



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**«Σχεδίαση συσκευής Kolsky τύπου συμπίεσεως για τον έλεγχο ιδιοτήτων  
δειγμάτων αλουμινίου»**

Βασίλειος Ποθητός

*Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος*

ΑΘΗΝΑ 2016

## Περίληψη

Η συσκευή Kolsky (Split Hopkinson Bar) αποτελεί τη πλέον διαδεδομένη λύση για τον έλεγχο υλικών υπό συνθήκες ισχυρής μηχανικής παραμόρφωσης. Αν και η θεωρία λειτουργίας της διατυπώθηκε πρώτη φορά στις αρχές του 20ου αιώνα (Bertram Hopkinson, 1913) και εν γένει οριστικοποιήθηκε ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1940 (Kolsky, 1949), ουσιαστική πρόοδος στη πρακτική χρήση της ξεκίνησε να επιτυγχάνεται μόλις στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και εντατικοποιήθηκε τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα έως και σήμερα. Οι λόγοι πίσω από την πρόοδο αυτή, είναι η τεχνολογική ανάπτυξη στο πεδίο των ηλεκτρονικών (H/Y και προγράμματα με ικανότητα διαχείρισης όλο και πιο απαιτητικών υπολογιστικά τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων, αισθητήρες και μετρητικά όργανα υψηλής ακρίβειας), αλλά και η ανακάλυψη νέων ή η βελτίωση των ιδιοτήτων ήδη υπάρχοντων υλικών (κράματα, πολύ-επίπεδες δομές, πλαστικά). Για τα υλικά αυτά, η γνώση της συμπεριφοράς τους υπό συνθήκες μηχανικού φόρτου, είναι σημαντικός παράγοντας επιλογής για χρήση τους σε συγκεκριμένες κατασκευές.

Μια συσκευή Kolsky αποτελείται από δύο λεπτές ράβδους ανάμεσα στις οποίες τοποθετείται ένα μικρό, κυλινδρικής μορφής, δείγμα του προς έλεγχο υλικού. Χτυπώντας την ελεύθερη άκρη της 1<sup>ης</sup> ράβδου (Incident bar), ένα κύμα πίεσης δημιουργείται, το οποίο αμέσως αρχίζει να διαδίδεται προς το δείγμα. Με την άφιξη του σε αυτό, τμήμα του κύματος ανακλάται πίσω. Το υπόλοιπο τμήμα, διαδίδεται κατά μήκος του δείγματος και έπειτα στη 2<sup>η</sup> ράβδο (Transmission bar), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη πλαστική παραμόρφωση στο δείγμα. Το ανακλώμενο κύμα είναι ανάλογο του ρυθμού μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα, ενώ το διαδιδόμενο κύμα είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης στο δείγμα. Με τη παρακολούθηση της παραμόρφωσης στις δύο ράβδους, μπορούν να υπολογιστούν οι ιδιότητες παραμόρφωσης και τάσης στο δείγμα.

Στη παρούσα εργασία, προσεγγίζεται η σχεδίαση μιας συσκευής Kolsky τύπου πίεσεως. Αρχικώς, ερευνώνται οι διάφορες μεθοδολογίες και παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση. Διαδικασία σχεδιασμού, βήμα προς βήμα, προτείνεται αργότερα, με σειρά πρακτικών αλγορίθμων για τα διάφορα στάδια σχεδίασης. Η προσέγγιση αυτή, δομείται πάνω σε προσομοιώσεις και θεωρητικούς υπολογισμούς ( Matlab/Simulink, C++). Στην επόμενη φάση, το μοντέλο χρησιμοποιείται στη σχεδίαση συσκευής Kolsky, για τον υπολογισμό ιδιοτήτων τάσης/παραμόρφωσης δειγμάτων αλουμινίου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και συγκρίνονται με αυτά από μετρήσεις με πραγματικές συσκευές. Έπειτα δημιουργείται τρισδιάστατο σχέδιο της συσκευής (CAD, Solidworks).

Η εργασία καταλήγει σε συνολική κριτική της μεθόδου και προτάσεις προς περαιτέρω έρευνα, γενίκευσης της χρήσης και βελτίωσης της απόδοσης της.

# Abstract

The Kolsky bar apparatus (Split Hopkinson Bar) is the most widespread solution for testing materials, under conditions of heavy mechanical stress. Although the theory behind its functionality was firstly expressed at the beginning of the 20<sup>th</sup> century (Bertram Hopkinson, 1913) and formulated to its final form at the end of 1940s (Kolsky, 1949), meaningful progress towards its practical use was achieved for the first time during the end of 1960s, followed by rapid progression during the remaining decades of the 20<sup>th</sup> century and to this day. The reasons behind this progress, are the technological advancements in the field of electronics (computer hardware and software, able to handle more demanding data processing techniques, high precision sensors and measuring devices) but also the discovery of new, or the improvement of existing, materials (alloys, multi-layered structures, plastics). For these materials, the knowledge of their behavior under conditions of heavy mechanical stress, is an essential factor of choice for specific constructions.

A Kolsky bar apparatus consists of two long slender bars that sandwich a short cylindrical specimen between them. By striking the end of a bar (Incident Bar), a compressive stress wave is generated, that immediately begins to traverse towards the specimen. Upon arrival at the specimen, the wave partially reflects towards the impact end. The remainder of the wave transmits through the specimen and into the 2<sup>nd</sup> bar (Transmission Bar), causing irreversible plastic deformation in the specimen. The reflected wave is proportional to the specimen's strain rate and the transmitted wave is proportional to the specimen's mechanical stress. By monitoring the strains in the two bars, specimen stress-strain properties can be calculated.

On this thesis, the design of a Kolsky Bar apparatus is approached. First, various methodologies and factors affecting the design are discussed. A step by step design model is proposed later, with a number of practical algorithms for the various design stages. This approach, is built upon simulations and theoretical calculations (Matlab/Simulink, C++). At the next stage, the model is used for the design of a Kolsky bar apparatus, for the calculation of Aluminum specimens' stress-strain properties. Simulation results are presented and compared with those of actual tests, with real devices. After this, a solid modeling computer-aided design (CAD, Solidworks) of the device is created.

The thesis concludes with a summarizing discussion of the results and proposals for further research, on how this method can be generalized and achieve better results.

# Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, η οποία αποτελεί για μένα μια σημαντική κίνηση ανανέωσης μετά από αρκετά χρόνια, πρακτικά, ακαδημαϊκής απραξίας.

Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Κατεργασιών και Υλικών. Ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να μου προσφέρει τη γνώση και βοήθεια του, οποτεδήποτε χρειάστηκε. Ιδιαίτερη εντύπωση μου έκανε η ευγένεια του, ο άψογος χαρακτήρας του, ο επαγγελματισμός του και η πολύπλευρη ακαδημαϊκή του κατάρτιση. Είναι ένας Διδάσκαλος με τη πραγματική σημασία της λέξεως. Θεωρώ εαυτόν τυχερό, για την έστω και σύντομη συνεργασία μας, και φυσικά ακόμα πιο τυχερούς, τους μόνιμους συνεργάτες του.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ ιδιαίτερα το διδάκτορα κ. Γεώργιο Σερέτη, για την άριστη συνεργασία που είχαμε. Πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος και αυτός να επιλύσει τη κάθε μου απορία, όσο ασήμαντη κι αν ήταν, όσο φορτωμένο και αν ήταν το πρόγραμμα του εκείνη τη περίοδο. Με βεβαιότητα πιστεύω, ότι είναι ένας λαμπρός νέος επιστήμονας, του οποίου τα ακαδημαϊκά επιτεύγματα στο άμεσο μέλλον θα είναι εξαιρετικά σημαντικά.

Έπειτα, ευχαριστώ θερμά τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητές ΕΜΠ κ. Ιωάννη Αντωνιάδη και κ. Γεώργιο-Χριστόφορο Βοσνιάκο, που με τίμησαν με την υπομονή και το πολύτιμο χρόνο τους, για την ανάγνωση και εξέταση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ και τον εξάδελφο μου Εμμανουήλ Γερασιμάτο, Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε, μεταπτυχιακό φοιτητή στο ΔΠΜΣ «Σύγχρονες Μέθοδοι Σχεδιασμού και Ανάλυσης Μηχανολογικών Κατασκευών», ΑΣΠΑΙΤΕ, για την πολύτιμη βοήθεια του στο CAD τμήμα της εργασίας αυτής, και τις συμβουλές του για τη χρήση του προγράμματος Solidworks.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, των οποίων τις άπειρες θυσίες και προσπάθειες που έκαναν για να αναθρέψουν εμένα και την αδερφή μου, θεωρώ πραγματικά απίθανο να μπορέσω ποτέ ν' ανταποδώσω όμοια. Ιδιαίτερα στην αδερφή μου τη Χρυσοβαλάντη, πτυχιούχο φιλόλογο του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, εύχομαι ότι καλύτερο, στη νέα οικογένεια που ξεκίνησε η ίδια. Μακάρι ο Θεός, να μας βοηθήσει να κάνουμε και εμείς ένα ανάλογο ξεκίνημα σύντομα, με τιμή και αξιοπρέπεια.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	2
Ευχαριστίες.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Κατάλογος Σχημάτων .....	10
Κατάλογος Πινάκων.....	18
<b>1 Εισαγωγή .....</b>	<b>19</b>
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	19
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	19
1.3 Δομή Εργασίας.....	24
<b>2 Στοιχεία Θεωρίας και γενικά ζητήματα σχεδίασης συσκευής Kolsky .....</b>	<b>26</b>
2.1 Βασική μορφή και λειτουργία.....	26
2.2 Εξισώσεις λειτουργίας .....	29
2.2.1 Παραμόρφωση και τάση δείγματος .....	29
2.2.2 Αξονική ταλάντωση των ράβδων.....	32
2.2.3 Τάση στο δείγμα.....	35
2.2.4 Μηχανική παραμόρφωση και ρυθμός μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης δείγματος.....	37
2.2.5 Συγκεντρωτική παρουσίαση των εξισώσεων υπολογισμού.....	39
2.3 Ράβδοι πίεσης.....	40
2.3.1 Επιλογή ράβδων πίεσης .....	40
2.3.1.1 Κανόνες επιλογής υλικού .....	40
2.3.1.2 Διαστάσεις ράβδων πίεσης.....	42
2.3.2 Μετάβαση κύματος μεταξύ ράβδων πίεσεως και δείγματος, εξάρτηση από τη διάμετρο των ράβδων .....	44
2.3.3.1 Συντελεστές μετάδοσης σήματος από τη 1 <sup>η</sup> ράβδο πίεσης στο δείγμα και στη 2 <sup>η</sup> ράβδο πίεσης .....	44
2.3.3.2 Χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης .....	48
2.3.4 Λοιπά χαρακτηριστικά κατασκευής των ράβδων πίεσης.....	52
2.4 Αισθητήρες μέτρησης μηχανικής παραμόρφωσης.....	53
2.4.1 Τύπου ηλεκτρικής αντίστασης (Strain Gages).....	53

2.4.2	Θέματα φυσικής συμπεριφοράς αισθητήρων .....	54
2.4.3	Τοποθέτηση και συνδεσμολογία .....	59
2.4.4	Ενίσχυση σήματος .....	60
2.5	Σχεδιασμός συστήματος εκτόξευσης .....	61
2.5.1	Μέθοδος Newton .....	63
2.5.2	Μέθοδος υπολογισμού μέσω αρχής διατήρησης της ενέργειας .....	66
2.5.3	Σύγκριση των δύο μεθόδων σχεδιασμού .....	70
2.5.4	Βελτίωση των αποτελεσμάτων με χρήση διατάξεων φωτοδιόδων .....	71
2.6	Διασπορά του κύματος πίεσης.....	72
2.6.1	Επίδραση της διασποράς στη διαδικασία κρούσης.....	72
2.6.2	Αναπαράσταση των φαινομένων διασποράς.....	73
2.6.3	Θεωρητική μεθοδολογία διόρθωσης της διασποράς.....	76
2.6.4	Πειραματική διόρθωση της διασποράς .....	78
2.7	Ορισμός της διαδικασίας μέτρησης.....	80
2.7.1	Βαθμονόμηση της συσκευής.....	80
2.7.2	Ομοιομορφία παραμόρφωσης δείγματος.....	81
2.7.2.1	Ομοιομορφία παραμόρφωσης και διαστάσεις δείγματος .....	81
2.7.2.2	Ομοιομορφία παραμόρφωσης και κύμα εισόδου .....	83
2.7.2.3	Θεωρητική μελέτη συμπεριφοράς ομοιομορφίας παραμόρφωσης δείγματος .....	84
2.7.2.4	Συσχέτιση με το μήκος δείγματος.....	88
2.7.3	Επιπλέον ζητήματα σχεδίασης και προετοιμασίας της συσκευής προς μέτρηση .....	91
2.7.4	Ορισμός απαιτήσεων παραμόρφωσης .....	91
2.7.5	Διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης.....	92
2.7.6	Συγκεντρωτική παρουσίαση της διαδικασίας μέτρησης .....	93
<b>3</b>	<b>Προσομοίωση και μοντελοποίηση συσκευής Kolsky .....</b>	<b>99</b>
3.1	Λογισμικό .....	99
3.2	Προσομοίωση και σχεδίαση.....	99
3.3	Μοντέλο Matlab/Simulink .....	100
3.3.1	Παραδοχές.....	100
3.3.2	Υλοποίηση του μοντέλου .....	102
3.3.3	Δοκιμές και μετρήσεις .....	104
<b>4</b>	<b>Διατύπωση μεθόδου σχεδιασμού .....</b>	<b>114</b>
4.1	Βήματα σχεδιασμού .....	114

4.2 Ορισμός τύπων υλικού δείγματος και ορίων επιθυμητού ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης .....	115
4.3 Ράβδοι συμπίεσης και ράβδος κρούστη.....	115
4.3.1 Επιλογή υλικού ράβδων πίεσεως.....	115
4.3.2 Επιλογή μήκους ράβδων πίεσεως .....	117
4.3.3 Διάμετρος ράβδων πίεσεως.....	118
4.3.4 Υλικό και μήκος ράβδου κρούστη και σωλήνα εκτόξευσης.....	118
4.3.5 Συντήρηση και συναρμολόγηση .....	118
4.4 Αισθητήρες καταγραφής.....	118
4.4.1 Strain gages .....	118
4.4.2 Φωτοζεύγη ελέγχου ταχύτητας κρούσης.....	120
4.5 Διαστάσεις δείγματος .....	121
4.5.1 Διάμετρος δείγματος.....	121
4.5.2 Μήκος δείγματος και τύπος εισόδου αρχικού σήματος.....	124
4.6 Σχεδίαση Gas Gun.....	127
4.6.1 Προσέγγιση ταχύτητας κρούσης .....	127
4.6.2 Πίεση Gas Gun και μήκος σωλήνα εκτόξευσης.....	128
4.6.3 Χρήση φωτοδιόδων για τη μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας κρούσης.....	130
4.7 Έλεγχος σχεδίασης μέσω μοντέλου προσομοίωσης.....	131
4.7.1 Επιλογή της μορφής του παλμού εισόδου .....	131
4.7.2 Μοντέλο προσομοίωσης .....	135
4.8 Μελέτη φαινομένων διασποράς .....	138
4.9 Αξιολόγηση τελικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.....	143
<b>5 Σχεδίαση συσκευής Kolsky για έλεγχο δειγμάτων αλουμινίου.....</b>	<b>145</b>
5.1 Εφαρμογή της μεθόδου σχεδιασμού .....	145
5.2 Περιορισμοί σχεδίασης.....	145
5.3 Ορισμός δειγμάτων υλικών .....	146
5.4 Διαδικασία σχεδίασης .....	147
5.5 Σχεδίαση του συστήματος των ράβδων πίεσεως.....	149
5.6 Προσδιορισμός κατάλληλων διαστάσεων δείγματος και μορφής εισόδου .....	149
5.7 Σχεδίαση του Gas Gun .....	152
5.8 Σχεδίαση του συστήματος συλλογής της πληροφορίας .....	155
5.8.1 Σύστημα μέτρησης της καταπόνησης στις ράβδους πίεσης.....	155
5.8.2 Ζεύγη φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης .....	157

5.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης, φάση σχεδίασης .....	158
5.9.1 Αλουμίνιο 2024-T4,1300 1/s .....	158
5.9.2 Αλουμίνιο 6061-T6,1200 1/s .....	161
5.9.3 Αλουμίνιο 7075-T6,1800 1/s .....	164
5.9.4 Παρατηρήσεις απόδοσης της σχεδίασης .....	167
5.10 Προσομοίωση λειτουργίας συσκευής και πραγματική είσοδος.....	168
5.10.1 Διαδικασία προσέγγισης πραγματικής λειτουργίας και αντιμετώπισης του φαινομένου της διασποράς.....	168
5.10.2 Αλγόριθμος διόρθωσης της διασποράς .....	170
5.11 Αποτελέσματα προσομοίωσης, προσέγγιση πραγματικής εισόδου ...	173
5.11.1 Αλουμίνιο 2024-T4,1300 1/s .....	174
5.11.2 Αλουμίνιο 6061-T6,1200 1/s .....	177
5.11.3 Αλουμίνιο 7075-T6,1800 1/s .....	181
5.11.4 Παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων με την προσέγγιση πραγματικής εισόδου .....	184
5.12 Υλοποίηση μετρητικού προγράμματος .....	184
5.12.1 Περιγραφή λειτουργίας.....	184
5.12.2 Παράδειγμα χρήσης .....	186
<b>6 Τρισδιάστατη CAD απεικόνιση της συσκευής .....</b>	<b>188</b>
<b>7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία .....</b>	<b>197</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	197
7.2 Μελλοντική Εργασία .....	198
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>199</b>
<b>Παράρτημα Α Κώδικας υπολογισμού παραμέτρων, υπολογισμού βαρών και μεταβλητών λειτουργίας.....</b>	<b>201</b>
<b>Παράρτημα Β Κώδικας εξαγωγής χαρακτηριστικών Gas Gun .....</b>	<b>207</b>
<b>Παράρτημα Γ Μοντέλο προσομοίωσης για είσοδο παλμό με πεπερασμένο μη μηδενικό χρόνο ανόδου .....</b>	<b>209</b>
<b>Παράρτημα Δ Κώδικας Προσομοίωσης για την περίπτωση εισόδου της προσέγγισης πραγματικού παλμού.....</b>	<b>210</b>
Δ.1 Μοντέλο προσδιορισμού της συμπεριφοράς εισόδου .....	210
Δ.2 Κώδικας διόρθωσης της διασποράς.....	210
Δ.3 Κυρίως μοντέλο προσομοίωσης.....	212



<b>Παράρτημα Ε Κώδικας Μετα-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων .....</b>	<b>214</b>
E.1 Αποθήκευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης .....	214
E.2 Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης .....	215
<b>Παράρτημα ΣΤ Μετρητικό πρόγραμμα υπολογισμού τάσης και παραμόρφωσης δείγματος σε C++.....</b>	<b>217</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

2-1. Σχεδιάγραμμα συσκευής Kolsky (Split Hopkinson Bar), τύπου πιέσεως.....	27
2-2. Εγκατάσταση συσκευής Kolsky, Εθνικό Εργαστήριο Los Alamos, ΗΠΑ .....	27
2-3. Διάδοση κύματος (α) Συγκεντρωτική μορφή (β) Επιμέρους ανακλάσεις και μεταδόσεις κύματος.....	28
2-4. Δεδομένα από μέτρηση αισθητήρων σε συσκευή Kolsky, τύπου συμπίεσης, με δείγμα ελέγχου 304 ανοξείδωτο χάλυβα, έπειτα από επεξεργασία σήματος και ενίσχυση .....	29
2-5. Ορισμός τάσης στερεού .....	30
2-6. Παραμόρφωση στερεού .....	31
2-7. Αναπαράσταση ράβδου i/o μέσω διαφορικών στοιχείων .....	32
2-8. Επίδραση δυνάμεων στο διαφορικό στοιχείο .....	33
2-9. Οι δυνάμεις αντίθετες στη συμπίεση, στο διαφορικό στοιχείο .....	33
2-10. Κυλινδρικό δείγμα, προς έλεγχο.....	35
2-11. Αναπαράσταση βηματικής μεταβολής στη δια-τομεακή περιοχή των υλικών .....	46
2-12. Εξάρτηση της διαμέτρου δείγματος από το συντελεστή μετάδοσης $\alpha_{13}$ , για διάφορα υλικά .....	49
2-13. Παλμός παραμόρφωσης τελικής μετάδοσης (Transmission), δείγμα τύπου Lexan .....	50
2-14. Διάμετρος δείγματος συναρτήσει του συντελεστή μετάδοσης $\alpha_{23}$ , για διάφορα υλικά.....	51
2-15. Ομο-αξονικός αισθητήρας παραμόρφωσης τύπου ηλεκτρικής αντίστασης.. ..	53
2-16. Κυματομορφές και αισθητήρες strain gages, διαφορετικού μήκους .....	54
2-17. Φαινόμενο μέσης τιμής στη μέτρηση μέγιστης παραμόρφωσης από τον αισθητήρα.....	55
2-18. Μέτρηση μέγιστης παραμόρφωσης μέσω strain gages, διαφόρων τιμών μήκους.....	56
2-19. Μορφή τελικών σημάτων εξόδου από strain gages, σε σχέση με το μήκος αρχικού τετραγωνικού παλμού PL και λειτουργικό μήκος αισθητήρα GL .....	58
2-20. Συνδεσμολογία Quarter Bridge type II με strain gages αισθητήρες.....	60

2-21. Κύκλωμα τύπου γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης της τάσης εξόδου από διάταξη strain gages τύπου Quarter Bridge type II .....	61
2-22. Διάγραμμα δυνάμεων που επενεργούν στη ράβδο Κρούστη .....	63
2-23. Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο Newton στη σχεδίαση Gas Gun.....	66
2-24. Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο αρχής διατήρησης ενέργειας στη σχεδίαση Gas Gun .....	70
2-25. Τοποθέτηση φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης.....	71
2-26. Μέτρηση πραγματικής ταχύτητας κρούσης μέσω φωτοδίοδων και αντιπαραβολή αυτής με την καμπύλη ταχύτητας/πίεσης που επιλέχθει κατά τη σχεδίαση .....	72
2-27. Μοναδιαία κανονικοποιημένη ταχύτητα κύματος σε ράβδο διαμέτρου 1,905 cm (3/4 in), για διαφορές τιμές λόγου Poisson (διάφορα υλικά κατασκευής).....	74
2-28. Τραπεζοειδής μορφής κύμα, τυπική μορφή σε μετρήσεις παραμόρφωσης δειγμάτων μέσω συσκευής Kolsky, χαλύβδινη ράβδος διαμέτρου 1,905 cm .....	74
2-29. FFT του τραπεζοειδούς παλμού του προηγούμενου σχήματος.....	75
2-30. Το αρχικό τραπεζοειδούς μορφής κύμα, με προσθήκη διασποράς 76.2 cm (30 in), χαλύβδινη ράβδος διαμέτρου 1,905 cm .....	75
2-31. Αντιπαραβολή των σημάτων του παραδείγματος, με και χωρίς φαινόμενα διασποράς .....	76
2-32. 1 <sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Απευθείας κρούση της ράβδου Δέκτη.....	79
2-33. 2 <sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Κρούση με τοποθετημένες και τις δύο ράβδους πίεσης .....	79
2-34. Πεπερασμένος χρονικά, τέλειος τετραγωνικός παλμός .....	85
2-35. Συμπεριφορά ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης, συναρτήσει των αριθμών διαδόσεων κύματος $n$ στο δείγμα και το λόγο $\beta$ , μηχανικής αντίστασης αυτού προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος τέλειος τετραγωνικός παλμός .....	85
2-36. Πεπερασμένος χρονικά παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και μορφής ανόδου ευθεία .....	86
2-37. Συμπεριφορά ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης, συναρτήσει των αριθμών διαδόσεων κύματος $n$ στο δείγμα και το λόγο $\beta$ , μηχανικής αντίστασης αυτού προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος παλμός με πεπερασμένο ανόδου.....	86
2-38. Πεπερασμένος χρονικά παλμός, μορφής αύξουσας ράμπας .....	87

2-39. Συμπεριφορά ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης, συναρτήσει των αριθμών διαδόσεων κύματος $n$ στο δείγμα και το λόγο $\beta$ , μηχανικής αντίστασης αυτού προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος μορφής ράμπας.....	87
2-40. Τυπική ακολουθία διαδικασίας μέτρησης με συσκευή Kolsky .....	94
2-41. Διαδικασία επεξεργασίας σήματος στον υπολογιστή .....	95
2-42. Τυπική μορφή παλμού παραμόρφωσης αρχικής μετάδοσης και ανακλώμενου (με αρχική επιθυμητή μορφή Incident wave τέλειιο τραπέζιο) .....	96
2-43. Μορφή σήματος παραμόρφωσης τελικής μετάδοσης (Transmission), με αρχική μετάδοση το παλμό της προηγούμενης εικόνας .....	96
3-1. Προσομοίωση συμπεριφοράς ράβδων πίεσης μέσω του προγράμματος Abaqus .....	99
3-2. α) Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος παραμόρφωσης, κατά τη διάδοση του σε κοινή διατομική περιοχή ράβδου πίεσεως και δείγματος β) Γραμμική υπέρθεση δύο κυμάτων παραμόρφωσης.....	102
3-3. Μοντελοποίηση και προσομοίωση των πολλαπλών μεταδόσεων κυμάτων καταπόνησης και ανακλάσεων που λαμβάνουν χώρα στο δείγμα, έως την ισοροπία και την ομοιόμορφη κατανομή παραμόρφωσης.....	103
3-4. Τελικό μοντέλο προσομοίωσης, εδώ ως είσοδος από την κρούση έχει προστεθεί σήμα βηματικής μορφής.....	104
3-5. Incident (κίτρινο), Reflected (πράσινο) και Transmitted (μωβ) τάση (α) Συγγραφείς [9] (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος βηματική).....	107
3-6. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης (α) Συγγραφείς [9] (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος βηματική) .....	107
3-7. Μετρήσεις συγγραφέων [9], (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (α) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις από τους συγγραφείς [9], οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης [8] .....	108
3-8. Μετρήσεις στη παρούσα εργασία, (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (α) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις που έγιναν , οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8].....	108
3-9. Αποτέλεσμα προσομοίωσης (α) Συγγραφείς (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος finite rising ramp) .....	109
3-10. Μετρήσεις συγγραφέων [9], (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (β) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις από τους συγγραφείς [9], οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8] .....	109

<b>3-11.</b> Μετρήσεις στη παρούσα εργασία, (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (β) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις που έγιναν , οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8].....	<b>110</b>
<b>3-12.</b> (α) Συγγραφείς [9] (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος infinite rising ramp).....	<b>110</b>
<b>3-13.</b> Μετρήσεις συγγραφέων [9], (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (β) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις από τους συγγραφείς [9], οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8] .....	<b>111</b>
<b>3-14.</b> Μετρήσεις στη παρούσα εργασία, (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (α) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις που έγιναν , οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8].....	<b>111</b>
<b>3-15.</b> Εξάρτηση διαμέτρου δείγματος από το συντελεστή μετάδοσης $\alpha_{13}$ , για διάφορα υλικά.....	<b>112</b>
<b>4-1.</b> Συνδεσμολογία Quarter Bridge type II με strain gages αισθητήρες.....	<b>119</b>
<b>4-2.</b> Κύκλωμα τύπου γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης της τάσης εξόδου από διάταξη strain gage τύπου Quarter Bridge type II.....	<b>120</b>
<b>4-3.</b> Τοποθέτηση φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης.....	<b>120</b>
<b>4-4.</b> Εξάρτηση συντελεστή μετάδοσης $\alpha_{13}$ και διαμέτρου δείγματος, για διάφορα υλικά.....	<b>122</b>
<b>4-5.</b> Μετάδοση παλμού τάσης Transmitted, από το δείγμα στη 2 <sup>η</sup> ράβδο πίεσης, υλικό δείγματος Lexan.....	<b>123</b>
<b>4-6.</b> Μορφή πραγματικού παλμού Incident εισόδου στη συσκευή, με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και καμπύλη, πεπερασμένο χρόνο καθόδου και καμπύλη, φαινόμενα διασποράς.....	<b>125</b>
<b>4-7.</b> Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο Newton στη σχεδίαση Gas Gun.....	<b>129</b>
<b>4-8.</b> Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο αρχής διατήρησης ενέργειας στη σχεδίαση Gas Gun.....	<b>130</b>
<b>4-9.</b> Μέτρηση πραγματικής ταχύτητας κρούσης μέσω φωτοδιόδων και αντιπαραβολή με την καμπύλη ταχύτητας/πίεσης που επιλέχθει κατά τη σχεδίαση .....	<b>131</b>
<b>4-10.</b> Παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου .....	<b>133</b>

4-11. Μορφή πραγματικού παλμού Incident εισόδου στη συσκευή, με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και καμπύλη, πεπερασμένο χρόνο καθόδου και καμπύλη, φαινόμενα διασποράς.....	134
4-12. Τελικό μοντέλο προσομοίωσης, με είσοδο βηματική συνάρτηση .....	137
4-13. Μετάδοση τραπεζοειδούς μορφής παλμού με παρουσία φαινομένων διασποράς.....	139
4-14. 1 <sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Απευθείας κρούση της ράβδου Δέκτη .....	141
4-15. 2 <sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Κρούση με τοποθετημένες και τις δύο ράβδους πίεσης .....	142
4-16. Προσέγγιση πραγματικής εισόδου στο simulink, με ένα ημίτονο αλλοίωσης .....	143
4-17. α) Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματική μέτρηση συμπίεσης με συσκευή Kolsky σε αλουμίνιο 6082-T6 β) Αποτέλεσμα προσομοίωσης από τη σχεδίαση του επόμενου κεφαλαίου .....	144
5-1. Υπόδειγμα παλμού εισόδου που θα χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση.....	146
5-2. Παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου.....	150
5-3. Προφίλ Gas Gun (1), με απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης 2.5 m/s, μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε λόγος μήκους σωλήνα κρούσης προς ράβδο Κρούστη (όριο ασφαλείας πίεσης περίπου 1.38 MPa).....	153
5-4. Προφίλ Gas Gun (2), με απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης 2.274 m/s, μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε λόγος μήκους σωλήνα κρούσης προς ράβδο Κρούστη (όριο ασφαλείας πίεσης περίπου 1.38 MPa).....	154
5-5. Προφίλ Gas Gun (3), με απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης 3.4228 m/s, μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε λόγος μήκους σωλήνα κρούσης προς ράβδο Κρούστη (όριο ασφαλείας πίεσης περίπου 1.38 MPa).....	154
5-6. Συνδεσμολογία Quarter Bridge type II με strain gages αισθητήρες.....	155
5-7. Κύκλωμα τύπου γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης της τάσης εξόδου από διάταξη strain gage τύπου Quarter Bridge type II.....	156
5-8. Τοποθέτηση φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης.....	157
5-9. Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις (1) .....	158
5-10. Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση με τα αποτελέσματα από [25] (1).....	158
5-11. Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25] (1).....	159

<b>5-12.</b> Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης (1).....	<b>159</b>
<b>5-13.</b> Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις (2).....	<b>161</b>
<b>5-14.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση με τα αποτελέσματα από [25] (2).....	<b>161</b>
<b>5-15.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25] (2).....	<b>162</b>
<b>5-16.</b> Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης (2).....	<b>162</b>
<b>5-17.</b> Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις (3).....	<b>164</b>
<b>5-18.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση με τα αποτελέσματα από [25] (3).....	<b>164</b>
<b>5-19.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25] (3).....	<b>165</b>
<b>5-20.</b> Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης (3).....	<b>165</b>
<b>5-21.</b> Πεπερασμένος χρονικά παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και μορφής ανόδου ευθεία .....	<b>168</b>
<b>5-22.</b> Πραγματικός παλμός πίεσης εισόδου .....	<b>169</b>
<b>5-23.</b> Προσέγγιση πραγματικής εισόδου στο simulink, με ένα ημίτονο αλλοίωσης .....	<b>169</b>
<b>5-24.</b> Προσέγγιση πραγματικής εισόδου με διασπορά, ένα ημίτονο αλλοίωσης, συνάρτηση f2.....	<b>170</b>
<b>5-25.</b> Αρχική υπόθεση για τη μορφή του σήματος χωρίς τη διασπορά, συνάρτηση f1 .....	<b>171</b>
<b>5-26.</b> Αντιπαραβολή των φάσεων F1(κόκκινο) και F2(μπλε), εύρεση κρουστικών (μαύρο).....	<b>172</b>
<b>5-27.</b> Το αρχικό σήμα f1 με διασπορά (κόκκινο) και η τελική διορθωμένη μορφή (μπλε).....	<b>172</b>
<b>5-28.</b> Προφίλ λειτουργίας gas gun – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1) .....	<b>174</b>
<b>5-29.</b> Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1) .....	<b>174</b>
<b>5-30.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση αυτού με τα αποτελέσματα από [25] – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1).....	<b>175</b>
<b>5-31.</b> Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1).....	<b>175</b>

<b>5-32.</b> Προφίλ λειτουργίας gas gun – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2) .....	<b>177</b>
<b>5-33.</b> Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2) .....	<b>178</b>
<b>5-34.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση αυτού με τα αποτελέσματα από [25] – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2).....	<b>178</b>
<b>5-35.</b> Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2).....	<b>179</b>
<b>5-36.</b> Προφίλ λειτουργίας gas gun – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3) .....	<b>181</b>
<b>5-37.</b> Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3) .....	<b>181</b>
<b>5-38.</b> Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση αυτού με τα αποτελέσματα από [25] – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3).....	<b>182</b>
<b>5-39.</b> Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3).....	<b>182</b>
<b>5-40.</b> Προσέγγιση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας δείγματος, παράδειγμα επίδειξης χρήσης του μετρητικού προγράμματος σε C++ .....	<b>186</b>
<b>6-1.</b> Δεξαμενή αερίου .....	<b>188</b>
<b>6-2.</b> Σωλήνωση απαγωγής αέρα Α.....	<b>189</b>
<b>6-3.</b> Σωλήνωση απαγωγής αέρα Β.....	<b>189</b>
<b>6-4.</b> Κεφαλή μηχανισμού εκτόξευσης .....	<b>190</b>
<b>6-5.</b> Ενδιάμεσο συναρμολόγησης μηχανισμού εκτόξευσης .....	<b>191</b>
<b>6-6.</b> Σωλήνας εκτόξευσης.....	<b>191</b>
<b>6-7.</b> Στηρίξεις μηχανισμού εκτόξευσης .....	<b>192</b>
<b>6-8.</b> Στηρίξεις τοποθέτησης για τα ζεύγη φωτοδιόδων .....	<b>192</b>
<b>6-9.</b> Ράβδος Striker .....	<b>193</b>
<b>6-10.</b> Ράβδος πίεσεως.....	<b>193</b>
<b>6-11.</b> Στηρίξεις ράβδων πίεσης, σχέδιο του μισού στηρίγματος .....	<b>194</b>
<b>6-12.</b> Ροδέλα τεφλόν .....	<b>194</b>
<b>6-13.</b> Βάση συναρμολόγησης συνολικού μηχανισμού.....	<b>195</b>
<b>6-14.</b> Τοίχωμα από τεφλόν.....	<b>195</b>



<b>6-15.</b> Solidworks σχέδιο τελικής συσκευής Kolsky .....	<b>196</b>
<b>Γ-1.</b> Ορισμός εισόδου προς προσομοίωση, περίπτωση παλμού πεπερασμένου μη μηδενικού χρόνου ανόδου στο simulink .....	<b>209</b>
<b>Γ-2.</b> Κυρίως μοντέλο προσομοίωσης στο simulink .....	<b>209</b>
<b>Δ-1.</b> Προσδιορισμός χαρακτηριστικών πίεσης incident, περίπτωση εισόδου τύπου πραγματικής στο simulink.....	<b>210</b>
<b>Δ-2.</b> Ορισμός εισόδου προς προσομοίωση, περίπτωση παλμού πεπερασμένου τύπου πραγματικής μορφής στο simulink.....	<b>213</b>

## Κατάλογος Πινάκων

2-1. Απαιτούμενος αριθμός μεταδόσεων κύματος $n$ στο δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, συναρτήσει του λόγου $\beta$ μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος τέλειος τετραγωνικός παλμός.....	85
2-2. Απαιτούμενος αριθμός μεταδόσεων κύματος $n$ στο δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, συναρτήσει του λόγου $\beta$ μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου.....	86
2-3. Απαιτούμενος αριθμός μεταδόσεων κύματος $n$ στο δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, συναρτήσει του λόγου $\beta$ μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος μορφής ράμπας.....	87
5-1. Ιδιότητες Aluminum 2024-T4.....	146
5-2. Ιδιότητες Aluminum 6061-T6.....	146
5-3. Ιδιότητες Aluminum 7075-T6.....	147
5-4. Ιδιότητες Aged Grade 300 maraging steel (18Ni).....	149
5-5. Δεδομένα διαστάσεων δείγματος και εισόδου πίεσης Incident, φάση σχεδίασης.....	151
5-6. Ταχύτητες κρούσης, φάση σχεδίασης.....	152
5-7. Δεδομένα διαστάσεων δείγματος και εισόδου πίεσης Incident, δοκιμές με προσέγγιση πραγματικής εισόδου.....	173
5-8. Ταχύτητες κρούσης, δοκιμές με τη προσέγγιση πραγματικής εισόδου.....	173

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Η εργασία αυτή, έγινε με σκοπό τη σχεδίαση συσκευής Kolsky, τύπου συμπίεσεως, για τον έλεγχο της τάσης (stress) και της παραμόρφωσης (strain) κυλινδρικών δειγμάτων υλικού, συγκεκριμένα αλουμινίου, υπό συνθήκες ομοαξονικής συμπίεσης (pressure). Η μέθοδος αυτή ελέγχου είναι η μοναδική με την οποία μπορούν να επιτευχθούν εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί μεταβολής παραμόρφωσης στο υλικό, πράγμα αναγκαίο για την διαπίστωση της καταλληλότητας του προς χρήση στις διάφορες κατασκευές. Αν και υπάρχει εξαιρετικός πλούτος μεθοδολογιών για τη σχεδίαση των επιμέρους τμημάτων της συσκευής, εν τούτοις συγκεκριμένο πρότυπο διαδικασίας σχεδιασμού δεν υπάρχει. Στην εργασία αυτή τίθενται οι βάσεις για τον ορισμό μιας τέτοιας διαδικασίας, η οποία χρησιμοποιείται μετά για την σχεδίαση συσκευής μέτρησης ιδιοτήτων τάσης και παραμόρφωσης δειγμάτων αλουμινίου.

## 1.2 Βιβλιογραφική εισαγωγή

Πολλές μέθοδοι ελέγχου της αντοχής και συμπεριφοράς των υλικών σε συνθήκες μηχανικής παραμόρφωσης έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς, αρκετές από τις οποίες πλέον βρίσκονται σε χρήση για αιώνες. Ωστόσο, μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του 1950, ελάχιστη πραγματικά επιστημονική έρευνα είχε γίνει πάνω στο πόσο επηρεάζει η μηχανική παραμόρφωσης τις ιδιότητες των υλικών. Η δεκαετία του 1950 και μετέπειτα κυρίως αυτή του 1960, έφερε στο προσκήνιο το πεδίο έρευνας αυτό, με τις στρατιωτικές εφαρμογές σε βολιολογικά συστήματα αμύνης, την ραγδαία ανάπτυξη της αεροναυπηγικής - από τον έλεγχο συμπεριφοράς καταπόνησης εξαρτημάτων στις υψηλές πλέον ταχύτητες των αεριωθούμενων μέχρι και τη συμπεριφορά των κινητήρων σε σενάρια πχ εισροής πουλιών στο εσωτερικό τους - , την αεροδιαστημική - πχ συμπεριφορά δορυφόρων σε πρόσκρουση με μετεωρίτες - , τις διάφορες κατασκευές και ανακάλυψη υλικών «νέου τύπου» - πχ αντοχή ουρανοξυστών ή αντοχή των ευρέως πλέον χρησιμοποιούμενων πλαστικών υλικών, ακόμα και σε εφαρμογές όπου παλαιότερα γινόταν χρήση μετάλλων- και αλλού. Παράλληλα, η ραγδαία ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και των υπολογιστών, έκανε δυνατή τη χρήση μετρητικών υψηλής ακρίβειας και την εφαρμογή εξαιρετικά απαιτητικών υπολογιστικά αλγορίθμων, δίνοντας τα απαραίτητα εργαλεία για την ανάπτυξη του πεδίου. Μέχρι και σήμερα, οι παραπάνω εφαρμογές βρίσκονται ακόμα στο προσκήνιο, συνεπώς το ενδιαφέρον πάνω στην έρευνα αυτή, συνεχίζεται και παραμένει, εν πολλοίς, αμείωτο.

Πριν την εξέλιξη αυτή, οι ιδιότητες των υλικών κάτω από συνθήκες μηχανικής παραμόρφωσης μετρούντουσαν με υδραυλικές ή τύπου κοχλία συσκευές, οι οποίες ήταν ικανές να επιτύχουν πολύ μικρούς ρυθμούς παραμόρφωσης, της τάξης των  $0.1 s^{-1}$  [1]. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν και συνεχίζονται να αναπτύσσονται, διάφορες μέθοδοι οι οποίες

επιτυγχάνουν ρυθμούς μηχανικής παραμόρφωσης έως και  $100 \text{ s}^{-1}$ . Σε αυτές μπορούμε ν' αναφέρουμε, ενδεικτικά, τις μεθόδους εκκρεμούς κρούσης, όπως τη μέθοδο Charpy, και τις μεθοδολογίες ελέγχου μέσω πτώσης και σύγκρουσης. Καμιά όμως από τις παραπάνω μεθόδους δεν επιτυγχάνει τους υψηλούς ρυθμούς μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης, αρκετά εύκολα ακόμα και  $10^4 \text{ s}^{-1}$  [2], και συνεπώς τον έλεγχο του υλικού σε αρκετά δυσμενείς συνθήκες φόρτισης, όπως ο έλεγχος μέσω μιας συσκευής Χωριστών Ράβδων τύπου Hopkinson (Split Hopkinson Bar). Η συσκευή αυτή ονομάζεται και συσκευή Kolsky. Πολύ λογικά λοιπόν, η μέθοδος αυτή, με τις κατασκευαστικές ανάγκες που προέκυψαν τη δεκαετία του 1950 και συνεχίζουν να υφίστανται μέχρι σήμερα, κατέληξε να είναι η πλέον ευρέως διαδεδομένη και εν χρήσει. Η έρευνα πάνω σε αυτή, συνεχίζεται αμείωτη, είτε στη διάταξη της ίδιας της συσκευής, είτε στη χρήση της σε νέα υλικά.

Το 1913 [1], ο Bertram Hopkinson εφευρίσκει μια τεχνική για τον προσδιορισμό της τάσης σε ένα υλικό, υπό μηχανική φόρτιση, συναρτήσει του χρόνου, μέσω της κρούσης σ' αυτό μιας σφαίρας. Τα κύρια υλικά της συσκευής αυτής, ήταν ένα μέσο παραγωγής τέτοιου τύπου κρουστικής τάσης, μια μακριά χαλύβδινη ράβδος, μια μικρή επίσης χαλύβδινη μπίλια και ένα βαλλιστικό εκκρεμές. Στο ένα άκρο της ράβδου τοποθέτησε τη μπίλια, συγκρατημένη από μια λεπτή στρώση γράσου. Η βασική ιδέα του πειράματος ήταν ότι όσο το κύμα πίεσης ταξίδευε διαμέσου της ράβδου, στο στρώμα γράσου και τελικά στη μπίλια, αυτό θα ανακλάτο προς την αντίθετη κατεύθυνση, σαν παλμός. Μιας και το στρώμα γράσου δεν θα συγκρατούσε αξιόλογα ποσοστά ελαστικών φορτίων, η μπίλια θα εκτοξευόταν με συγκεκριμένη ορμή, μετρούμενη μέσω του βαλλιστικού εκκρεμούς. Ο χρόνος δράσης της ορμής αυτής είναι ο χρόνος μετάδοσης μετά επιστροφής του διαμήκους κύματος στη μπίλια. Κάνοντας πολλές τέτοιες δοκιμές με ίδιου μεγέθους μηχανικές φορτίσεις αλλά διαφορετικού μήκους μπίλιες, δημιούργησε χρονικές καμπύλες τάσης που περιέγραφαν το κρουστικό αυτό φαινόμενο. Ο Hopkinson με τη διαδικασία αυτή, κατάφερε πάντα να βρίσκει τη μέγιστη τάση στο υλικό και τη συνολική διάρκεια της κρούσης, αλλά οι ακριβείς χρονικές καμπύλες τάσης ήταν συγκεχυμένες.

Το 1941, ο Dennison Bancroft επιλύει την εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας των Rochhammer και Love [2], σχετικά με την ταχύτητα μετάδοσης κύματος κατά μήκος κυλινδρικής ράβδου. Ο Bancroft εξέφρασε τη ταχύτητα του κύματος σε αναφορά με κύμα άπειρου μήκους, το λόγο Poisson και το λόγο της διαμέτρου της ράβδου προς το μήκος του κύματος προς εξέταση. Η αξία της δουλειάς του Bancroft, σε αναφορά με τη συσκευή Χωριστών Ράβδων Hopkinson, φάνηκε αρκετά αργότερα, όταν η ανάπτυξη των υπολογιστών επέτρεψε την εφαρμογή απαιτητικών υπολογιστικά αλγορίθμων και γενικά επιτάχυνε κατά πολύ την επεξεργασία δεδομένων. Η μελέτη του Bancroft, αποτέλεσε τη

βάση σημαντικής περαιτέρω έρευνας στην περιοχή της διόρθωσης της διασποράς του κύματος.

Το 1948, ο Davies αναπτύσσει μια τεχνική χρησιμοποιώντας συμπυκνωτές, για τη μέτρηση της μηχανικής παραμόρφωσης στη ράβδο πίεσης. Η έξοδος από το συμπυκνωτή είναι ανάλογη στη σχέση εκτοπίσματος-χρόνου που με τη σειρά της είναι ανάλογη στη σχέση τάσης-χρόνου, υποθέτοντας ότι η τάση στις ράβδους είναι κάτω από το ελαστικό όριο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής τους. Η χρήση συμπυκνωτών για την μέτρηση της μηχανικής παραμόρφωσης βελτίωσε την ακρίβεια της αρχικής συσκευής Hopkinson, η οποία μετρούσε την ορμή μιας χαλύβδινης μπίλιας που εκτοξευόταν από την μία άκρη της ράβδου πίεσης. Ο Hopkinson συγκολλούσε τη μπίλια στη ράβδο με γράσο, το οποίο επιπλέον εισήγαγε έναν σημαντικό άγνωστο παράγοντα στις δυνάμεις που απαιτούνταν για την θραύση της ένωσης αυτής.

Το 1949, ο Kolsky προσθέτει και δεύτερη ράβδο πίεσης στην αρχική συσκευή Hopkinson, συνεπώς και το τελικό όνομα όπου πήρε η συσκευή, Χωριστών Ράβδων Hopkinson (Split Hopkinson bar). Αντί να επικολλήσει μια μπίλια στην άκρη μιας ράβδου, ο Kolsky ενθυλάκωσε το δείγμα υλικού προς έλεγχο μεταξύ των δύο ράβδων. Διατύπωσε τύπους υπολογισμού των ιδιοτήτων του δείγματος, βασισμένους στην καταγραφή της συμπεριφοράς των μηχανικών καταπονήσεων στις ράβδους. Οι καταπονήσεις αυτές μετριούνταν με παρόμοιους συμπυκνωτές, σαν αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν από το Davies. Φυσικά, δύο ράβδοι σημαίνουν και μετρήσεις και στις δύο από αυτές. Οι τεχνική αυτή των δύο ράβδων, που είναι και, ουσιαστικά, σχεδόν η τελική μορφή της συσκευής Hopkinson όπως χρησιμοποιείται και σήμερα, εξελίχθηκε στην πλέον δημοφιλή μέθοδο που χρησιμοποιείτε πλέον για τη συμπεριφορά των υλικών κάτω από συνθήκες ισχυρής ομοαξονικής δυναμικής φόρτισης. Και γι' αυτό στη βιβλιογραφία, η συσκευή Χωριστών Ράβδων Hopkinson (Split Hopkinson Bar) αναφέρεται και ως συσκευή Ράβδου Kolsky (Kolsky Bar).

Το 1970, ο Hauser και οι συνεργάτες του προσθέτουν αισθητήρες παραμόρφωσης (καταπόνησης) τύπου ηλεκτρικής αντίστασης (strain gages) στη δύο ράβδους πίεσεως, για τη μέτρηση των μηχανικών καταπονήσεων σε αυτές. Έτσι έχουμε την υλοποίηση της τελικής, πρακτικώς, μορφής της συσκευής, όπως χρησιμοποιείτε σήμερα, στις διάφορες παραλλαγές της και στους ποικίλους τύπους υλικών όπου βρίσκει εφαρμογή.

Φυσικά, η έρευνα τόσο σ' αυτή καθαυτή τη συμπεριφορά της συσκευής, όσο και στις εφαρμογές της, δεν σταμάτησε εκεί, αλλά συνεχίζεται αμείωτη, με πλήθος ερευνητικών ομάδων να ασχολούνται πάνω στο αντικείμενο. Ενδεικτικά, το 1984, οι Frantz, Follansbee, και Wright [3] παρουσιάζουν πειραματικές μεθόδους για τη σχηματοποίηση του παλμού κύματος εισόδου στη συσκευή και την διόρθωση του φαινομένου της διασποράς του κύματος στις ράβδους πίεσεως. Ο ρυθμός μεταβολής του κύματος παραμόρφωσης

εισόδου στη συσκευή βρίσκεται προτιμότερος να είναι σταθερά μικρός, αντί σταθερά υψηλός και αρκετά άλλα συμπεράσματα συνάγονται, μεταξύ άλλων σχετικά με τη βέλτιστη γεωμετρία δείγματος. Γενικά, η εργασία αυτή γίνεται η βάση για πολλές μετέπειτα σημαντικές μελέτες.

Το 1996, οι Gorham και Wu [4] καταβάλλουν προσπάθειες να εξακριβώσουν τη σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων ράβδου και της διασποράς του κύματος. Η μεθοδολογία διόρθωσης της διασποράς που παρουσιάζουν βασίζεται στα χαρακτηριστικά της ράβδου σε επίπεδο συχνότητας πια και όχι χρόνου, προσδιοριζόμενα με μέτρηση των μηχανικών καταπονήσεων σε μία ράβδο, δημιουργούμενα από μια σειρά κρούσεων από διαφόρου μεγέθους μεταλλικές σφαίρες. Αν και στην εργασία αυτή γίνεται μια εξαιρετικά φιλότιμη προσπάθεια να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ διασποράς και ιδιοτήτων ράβδου, παρουσιάζονται μια σειρά μειονεκτημάτων στο όλο έργο. Στη μέθοδο των συγγραφέων, οι παλμοί του κύματος εισόδου μετατοπίζονται ώστε η αρχή του χρόνου μέτρησης  $t = 0$  ν' αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή του κυρίως παλμού εισόδου. Αν και ο λόγος αυτής της χρονικής μετατόπισης των παλμών είναι εύλογος, απλώς ευθυγραμμίζοντας τις κορυφές των παλμών δεν επιτυγχάνεται η σωστή χρονική καθυστέρηση. Άλλες αριθμητικές διαδικασίες, όπως συσχέτιση ή ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων θα μπορούσαν να αποφέρουν περισσότερο ακριβή αποτελέσματα στον προσδιορισμό της ακριβούς χρονικής υπεύθυνης για το γραμμική υστέρηση, φάσης.

Το 1997, οι Woldesenbet και Vinson [5] πραγματοποιούν δοκιμές για το προσδιορισμό της επιρροής της γεωμετρίας του δείγματος προς έλεγχο στα τελικά αποτελέσματα μέτρησης. Αυτές επικεντρώθηκαν σε ένα συγκεκριμένου εύρος κυλινδρικών δειγμάτων, συγκεκριμένα με λόγο μήκους προς διάμετρο από 0.5 έως και 2.0. Μελετήθηκαν επίσης και οι συμπεριφορές τετραγωνικών και ορθογώνιων δειγμάτων. Τα αποτελέσματα τους δεν ανέδειξαν σημαντική επιρροή του λόγου μήκους προς διάμετρο ή της γεωμετρίας των δειγμάτων στα τελικά αποτελέσματα μέτρησης. Άλλοι ερευνητές [3], είχαν καταλήξει ότι, για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μέτρησης εξαιτίας της τριβής μεταξύ των ράβδων πίεσης και του δείγματος και λόγω ακτινικής αδράνειας, καλό θα ήταν το δείγμα να έχει λόγο μήκους προς διάμετρο μεταξύ 0.5 και 1.

Ο Gray, θα προσφέρει με τη σειρά του και αυτός σημαντικό έργο πάνω στη συσκευή Kolsky, ιδιαίτερα σε ολόκληρη τη δεκαετία του 1990, με εργασίες που αναφέρονται στη μεθοδολογία ελέγχου διαφόρων υλικών μέσω αυτής [6], κυρίως μετάλλων όπως ταντάλιο, ταντάλιο-βολφράμιο, αλουμίνιο-ειδών κραμάτων και άλλων. Ιδιαίτερη μνεία, θα πρέπει να δοθεί στην ενασχόληση του με τη χρήση της συσκευής για τον έλεγχο της συμπεριφοράς «μαλακών» υλικών, δηλαδή πολυμερών και σύνθετων πολυμερών. Εδώ, η ερευνητική ομάδα των George, Gray και Blumenthal [7] θα πραγματοποιήσει εκτενείς μετρήσεις της συμπεριφοράς ιξωδοελαστικών στερεών δειγμάτων, με εφαρμογή μηχανικής καταπόνησης

μέσω συσκευής Kolsky σε αυτά. Θα χρησιμοποιήσει ακόμα, πέραν των παραδοσιακών υψηλής αντοχής χαλύβδινων ράβδων πίεσης, και ράβδους κατασκευασμένες από μαγνήσιο ή πολυμερή. Τα ιξωδοελαστικά υλικά, λόγω της ιδιαίτερης απόκρισης τους στη διάδοση και διασπορά του κύματος καταπόνησης εισόδου, έχουν συμπεριφορά η οποία εξαρτάται από το χρόνο εφαρμογής της παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία του υλικού, παρουσιάζουν δε μια σειρά προβλημάτων στον έλεγχο τους μέσω μιας συσκευής Kolsky. Το πιο σημαντικό ζήτημα που παρουσιάστηκε ήταν η επίτευξη ισορροπίας τάσης – μηχανικής παραμόρφωσης. Η προσεκτική επιλογή της γεωμετρίας του δείγματος και η χρήση μονοδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης κύματος παραμόρφωσης ευρέθησαν σημαντικοί παράγοντες για την τελική επίτευξη του επιθυμητού ομοαξονικού κύματος παραμόρφωσης. Η μοντελοποίηση των μετρήσεων της συσκευής μέσω πεπερασμένων στοιχείων, σε συνδυασμό με πειραματικά αποτελέσματα, ανοίγουν νέους ορίζοντες, για χρήση της μεθοδολογίας Hopkinson πέραν από απλώς σαν μετρητική διαδικασία. Η μοντελοποίηση μέσω πεπερασμένων στοιχείων των μετρήσεων μέσω συσκευής Hopkinson μπορεί να υποστηρίξει τη ποσοτικοποίηση της συστατικής συμπεριφοράς των υλικών, θέμα το οποίο θεωρείτο άκυρο και αδύνατο με χρήση μόνο της κλασσικής, μονοδιάστατης κυματικής ανάλυσης Hopkinson για τη παραμόρφωση. Οι προσομοιώσεις που έγιναν μπορούν να λειτουργήσουν ως εργαλεία ελέγχου εγκυρότητας και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων, ακόμα και για περίπλοκης γεωμετρίας δείγματα υλικών και να διευκολύνουν την ανάλυση δεδομένων και την ανάπτυξη μοντέλων για υλικά που παρουσιάζουν μη γραμμική ή και μη συμβατική συμπεριφορά, όπως συμπυκνώματα (αφροί), σχηματισμοί ζώνης διάτμησης και ρηγματώσεις.

Το 2005, οι Yang και Shim [8] θα χρησιμοποιήσουν τη μέθοδο επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων των χαρακτηριστικών (Method of Characteristics) σε μονοδιάστατα κύματα πίεσης για να ερευνήσουν την ομοιομορφία μηχανικής παραμόρφωσης σε δείγματα υλικών, ελεγμένα με συσκευή Kolsky. Ο απαιτούμενος χρόνος διάρκειας της επιβολής μηχανικής πίεσης (ή ο απαιτούμενος αριθμός των κυματικών διελεύσεων από το δείγμα), για την επίτευξη κατάστασης ομοιομορφίας παραμόρφωσης σε αυτό, προσδιορίστηκε και συσχετίστηκε με τη σχετική μηχανική αντίσταση του δείγματος ως προς τις (όμοιες) ράβδους πίεσης της συσκευής. Βρέθηκε ότι ο χρόνος που απαιτείτε για να επιτευχθεί κατάσταση ομοιομορφίας παραμόρφωσης στο δείγμα, για είσοδο κύματος πίεσης στη συσκευή τέλειο τετραγωνικό παλμό, είναι σημαντικά μεγαλύτερος του χρόνου που απαιτείται για ομοιομορφία παραμόρφωσης στο δείγμα, με είσοδο κύμα μορφής πεπερασμένης αύξουσας ευθείας. Αυτό λοιπόν καταδεικνύει ότι η ύπαρξη αύξοντα ορίου στο παλμό εισόδου στη συσκευή μειώνει το χρόνο που απαιτείται για να έχουμε κατάσταση ομοιομορφίας παραμόρφωσης στο δείγμα. Τα αποτελέσματα της μελέτης συγκλίνουν στο ότι υπάρχει ένα βέλτιστο σχήμα παλμού εισόδου που προάγει την ταχεία επίτευξη

ομοιομορφίας παραμόρφωσης στο δείγμα, ούτως ώστε τα αποτελέσματα της μέτρησης να είναι αξιόπιστα. Η εργασία αυτή δίνει χρήσιμα εργαλεία στην διάκριση εάν τα μετρούμενα δεδομένα μέσω της συσκευής είναι αποδεκτά και διευρύνει την κατανόηση των περιορισμών της τεχνικής Hopkinson.

Το 2010, οι Mao και Shi [9] θα αναπτύξουν μια αρκετά σύντομη και περιεκτική μέθοδο μονοδιάστατης μοντελοποίησης και προσομοίωσης για μετρήσεις παραμόρφωσης υλικού μέσω συσκευής Kolsky. Η υλοποίηση έγινε στο δημοφιλές λογισμικό Matlab/Simulink. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τους, συμφωνούν σε πολύ μεγάλο βαθμό, με τα αποτελέσματα της θεωρητικής μελέτης [8]. Αυτό καταδεικνύει την ορθότητα και υψηλή ακρίβεια τους. Αν και, ιδιαίτερα με τη πάροδο του χρόνου, περισσότερο υπολογιστικά ακριβή και εξειδικευμένα πακέτα λογισμικού ως προς τις ηλεκτρομηχανολογικές κατασκευές αναπτύχθηκαν και συνεχώς εξελίσσονται, αρκετά πλέον και με εξαιρετικές CAD δυνατότητες, η μελέτη των Mao και Shi παρέχει ένα πρώτο, πρακτικό και σημαντικά αξιόπιστο, εργαλείο πρώτης εποπτικής προσέγγισης της διεργασίας, το οποίο μάλιστα δεν προαπαιτεί την εξειδικευμένη γνώση χρήσης και ηλεκτρομηχανολογικής των πρότερων λύσεων λογισμικού.

Το 2014, οι Chen, Hudspeth, Claus, Parab, Black, Fezzaa και Luo [10] θα συνδυάσουν τη μεθοδολογία Hopkinson με τεχνικές ταχείας απεικόνισης ακτινών Χ, για την οπτική ανάλυση δυναμικά εξελισσόμενων βλαβών και διαδικασιών αστοχίας σε ποικιλία τύπων υλικών. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει τη συνεχή επιτόπια αξιολόγηση της εξέλιξης της βλάβης εντός του δείγματος, το οποίο υφίσταται συνεχή δυναμική φόρτιση. Η πειραματική μέθοδος που προέκυψε είναι ένα ακόμα βήμα αναγωγής της μεθόδου Hopkinson από μια απλή μετρητική διαδικασία σε ένα πλήρες εποπτικό εργαλείο μελέτης της κατάστασης του υλικού, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο, όταν σε αυτό παρουσιάζονται ταχείες και μεγάλης χρονικής διάρκειας παραμορφώσεις. Η αποτελεσματικότητα της νέας και ακόμα πειραματικής μεθόδου καταδείχθηκε μέσω σειράς δοκιμών στην αλληλεπίδραση σωματιδίων κάτω από δυναμική συμπίεση διαφόρων υλικών, όπως υψηλού ρυθμού κοπής γυαλιού, αστοχία εφελκυσμού μονού κρυστάλλου σιλικόνης και βλάβης συνδέσμων οστών κάτω από υψηλού ρυθμού ελαστική παραμόρφωση.

### **1.3 Δομή της Εργασίας**

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τμήματα της συσκευής και δίνονται οι βασικοί τύποι υπολογισμού των ιδιοτήτων τάσης και παραμόρφωσης δείγματος. Έπειτα, οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την σχεδίαση των τμημάτων αυτών αναλύονται και δίδονται, από την βιβλιογραφία, μεθοδολογίες σχεδιασμού γι' αυτά.



Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι επιλογές λογισμικού που υπάρχουν για τη διαδικασία σχεδιασμού, τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης όσο και σε επίπεδο CAD. Παρουσιάζεται διεξοδικά συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης σε Matlab/Simulink, το οποίο θα αποτελέσει και το κεντρικό πυρήνα της μεθόδου σχεδίασης όπως αυτή προέκυψε στην εργασία.

Στο κεφάλαιο 4, οροθετείται η μέθοδος σχεδίασης της συσκευής, υπό τη μορφή διαδικασίας συγκεκριμένων βημάτων. Κυρίως ζήτημα που προκύπτει στην παρούσα εργασία είναι η μη πρόβλεψη κατασκευής πραγματικού πρωτοτύπου συσκευής. Συνεπώς, προτείνονται επιπλέον διαδικασίες, αποκλειστικά θεωρητικής προσέγγισης της σχεδίασης, χωρίς δηλαδή τη παράλληλη κατασκευή τμημάτων και επιτόπιο έλεγχο/διόρθωση παραμέτρων. Για το σκοπό αυτό, η διαδικασία επιλογής του μήκους δείγματος συσχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του χρόνου ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, ενώ προτείνεται διαδικασία μοντελοποίησης, εποπτικού ελέγχου και μείωσης των φαινομένων διασποράς.

Στο κεφάλαιο 5, η μέθοδος σχεδίασης, χρησιμοποιείται στη σχεδίαση συσκευής Kolsky για τον έλεγχο ομοαξονικής συμπίεσης κυλινδρικών δειγμάτων αλουμινίου. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της τελικής συσκευής συγκρίνονται με αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων σε ίδιου τύπου κυλινδρικά δείγματα αλουμινίου και για τις ίδιους ρυθμούς μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης. Διαπιστώνεται η εγγύτητα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στην παρούσα διαδικασία και των μετρήσεων με πραγματικές συσκευές Kolsky. Παρουσιάζεται επιπλέον, πρόγραμμα υπολογισμού (C++) ιδιοτήτων δείγματος, από δεδομένα πραγματικών μετρήσεων. Το πρόγραμμα αυτό, αν και δε χρησιμοποιείται στη κυρίως μέθοδο σχεδίασης, δίδεται ως επιπλέον βοήθημα για το μελλοντικό ερευνητή, που θα θελήσει να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή, λαμβάνοντας υπόψη τα πορίσματα της εργασίας αυτής.

Στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τρισδιάστατα μοντέλα των εξαρτημάτων και της συνολικής συσκευής, όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου σχεδίασης στο προηγούμενο κεφαλαίο. Τα μοντέλα CAD αυτά, έγιναν με τη χρήση του προγράμματος Solidworks.

Στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται τελικά συμπεράσματα, τόσο για την μέθοδο σχεδίασης που προέκυψε, όσο και για τη συγκεκριμένη συσκευή που σχεδιάστηκε μέσω αυτής. Δίδονται κατευθύνσεις προς περαιτέρω έρευνα, κυρίως για τη γενίκευση και εφαρμογή της μεθόδου σε περισσότερους τύπους υλικών και τη βελτίωση της ακρίβειας των αναμενόμενων αποτελεσμάτων μέτρησης.

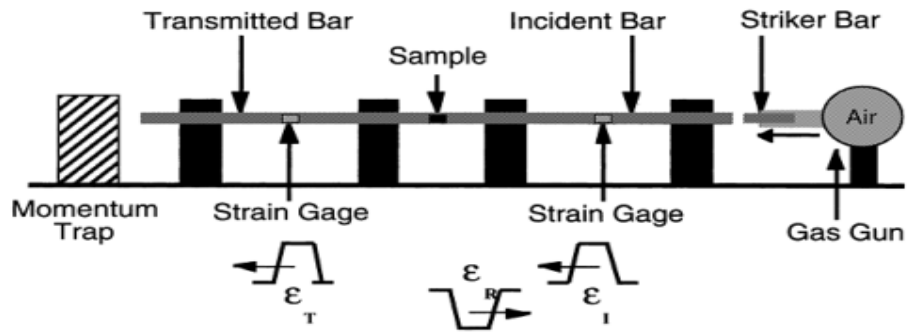
## 2 Στοιχεία Θεωρίας και γενικά ζητήματα σχεδίασης συσκευής Kolsky

### 2.1 Βασική μορφή και λειτουργία

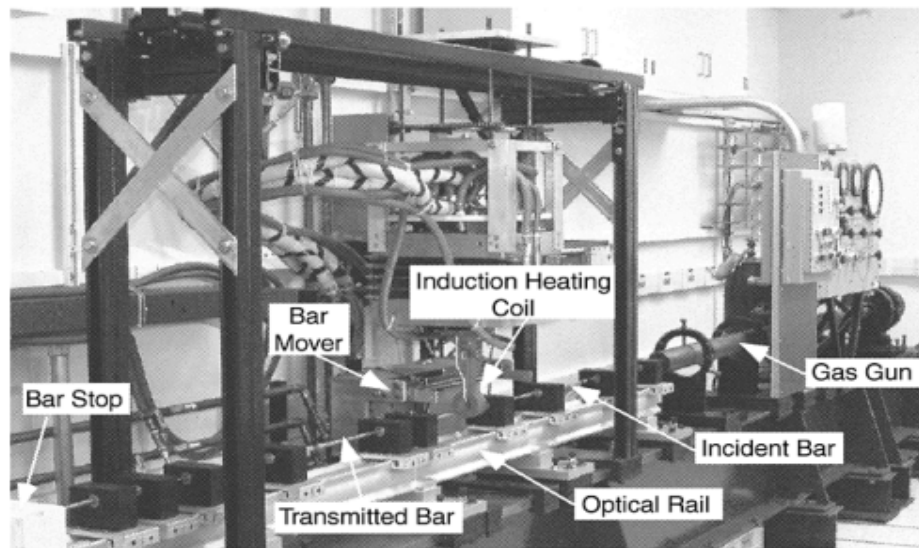
Ουσιαστικά, δεν υπάρχει κάποιο διεθνές και συγκεκριμένο πρότυπο για το σχεδιασμό μιας συσκευής Kolsky. Η συσκευή αυτή, χρησιμοποιείται με διάφορες παραλλαγές στη διάταξη της τόσο για μετρήσεις συμπίεσης (Split Hopkinson/Kolsky pressure bar), όσο και για μετρήσεις εφελκυσμού (Split Hopkinson tension bar) και συστροφής (Split Hopkinson torsion bar) [9]. Παράλληλα, δεν αποκλείονται συνδυασμοί των παραπάνω τύπων διατάξεων [10], ανάλογα με τις εκάστοτε μετρητικές ανάγκες.

Παρόλα αυτά, όλες οι διατάξεις συσκευών Kolsky μοιράζονται μια σειρά κοινών σε όλες σχεδιαστικών στοιχείων. Η, παραδοσιακή, διάταξη συσκευής Kolsky για μετρήσεις συμπίεσης, αποτελείται βασικώς από τα παρακάτω [11] :

- Δύο μακριές, συμμετρικές ράβδους. Με τη σειρά που το κύμα εισέρχεται στη συσκευή, η 1<sup>η</sup> από αυτές τις ράβδους ονομάζεται συνήθως Incident (Προσπίπτουσα) ή ράβδος Driver (οδηγός) ή και απλά Input (εισόδου). Η δε άλλη, συνήθως ονομάζεται ανάλογα ράβδος Transmission (εκπομπής) ή Receiver (δέκτης) ή και Output (εξόδου).
- Συγκρατήσεις και ευθυγραμμίσεις, οι οποίες επιτρέπουν στις ράβδους και στο προσπίπτον κρουστικό όργανο να μετακινούνται ελεύθερα αλλά και να διατηρούνται επακριβώς αξονικά ευθυγραμμισμένες.
- Συμπιεσμένου αέρα εκτοξευτής και σωλήνας ή άλλη παρόμοια συσκευή πρόωσης για την επιτάχυνση βλήματος, το τελευταίο λειτουργεί σαν κρουστικό όργανο και ονομάζεται ράβδος Striker (Κρούστης). Η όλη συσκευή αυτή δημιουργεί έναν ελεγχόμενο παλμό πίεσης στη προσπίπτουσα ράβδο.
- Αισθητήρες καταπόνησης τύπου ηλεκτρικής αντίστασης (strain gages) τοποθετούνται στις δύο i/o ράβδους (ράβδοι Input και Output), για την μέτρηση της διάδοσης κύματος καταπόνησης σε αυτές.
- Κατάλληλος εξοπλισμός για τον έλεγχο, τη καταγραφή, την επεξεργασία των δεδομένων κατά τη διαδικασία.



**Σχήμα 2-1.** Σχεδιάγραμμα συσκευής Kolsky (Split Hopkinson Bar) τύπου πίεσεως [11]



**Σχήμα 2-2.** Εγκατάσταση συσκευής Kolsky, Εθνικό Εργαστήριο Los Alamos, ΗΠΑ [11]

Μεταξύ των δύο i/o ράβδων, ενθυλακώνεται το δείγμα προς έλεγχο. Με τη λειτουργία του εκτοξευτή συμπιεσμένου αέρα η ράβδος Κρούστης συγκρούεται με το ελεύθερο άκρο της ράβδου Προσπίπτουσας και δημιουργεί ένα διαμήκη κύμα πίεσης στη τελευταία (incident wave), και μηχανική παραμόρφωση

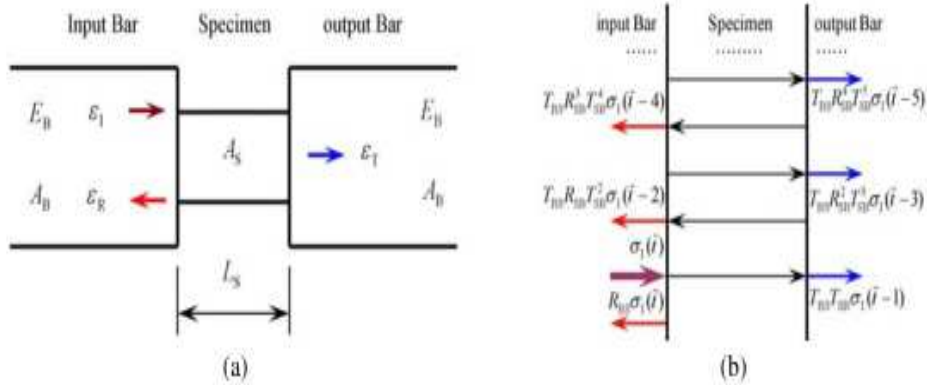
$$\varepsilon_I$$

Όταν αυτό φθάσει στα όρια μεταξύ δείγματος και ράβδου Προσπίπτουσας, ένα τμήμα του παλμού αυτού ανακλάται (reflected wave) πίσω στη ράβδο Προσπίπτουσας και το υπόλοιπο τμήμα του συνεχίζει τη διάδοσή του προς τη ράβδο Εκπομπής (transmission wave),

$$\varepsilon_R, \varepsilon_T$$

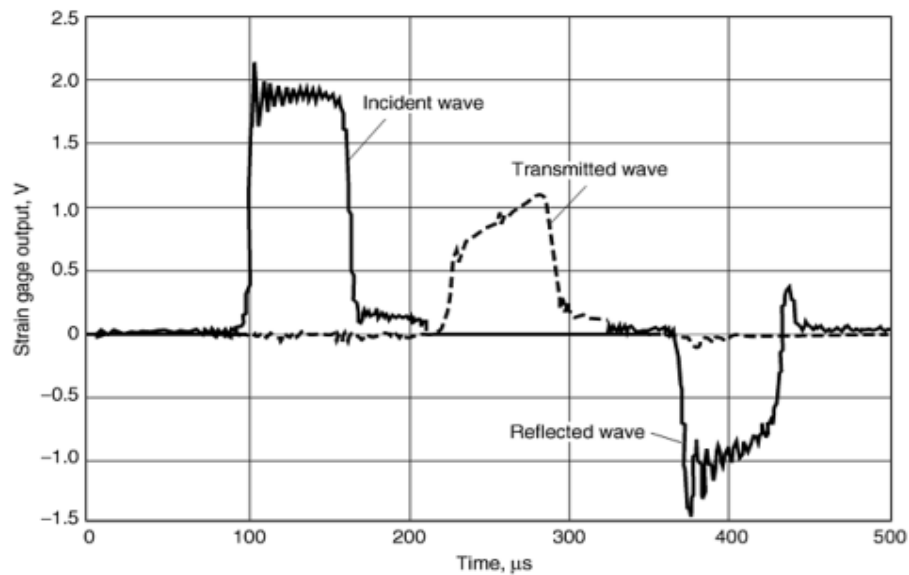
αντίστοιχα. Ο χρόνος διάδοσης και η τιμή των παλμών αυτών καταγράφονται από τους αισθητήρες παραμόρφωσης, οι οποίοι συνήθως τοποθετούνται στο μέσο (κατά μήκος) κάθε

ί/ο ράβδου. Πρακτικά βέβαια, η ακριβής φύση της διάδοσης είναι κάπως διαφορετική. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και καθώς η κρούση δεν είναι στιγμιαία, δημιουργούνται σειρά κυμάτων τα οποία κατά τη διαδρομή τους από το ένα άκρο του δείγματος προς άλλο, τμήμα τους ανακλάτε και το υπόλοιπο διαδίδεται τελικώς προς τη ράβδο Εκπομπής. Οι αισθητήρες καταγράφουν το σύνολο της ανάκλασης και εκπομπής κάθε στιγμή.



**Σχήμα 2-3.** Διάδοσης κύματος (a) Συγκεντρωτική μορφή (b) Επιμέρους ανακλάσεις και μεταδόσεις κύματος [9]

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από τους αισθητήρες κατά τη διάρκεια του χρόνου διεξαγωγής της διαδικασίας, οι δυνάμεις και οι ταχύτητες στη κοινή δια-τομεακή περιοχή (cross sectional areas) μεταξύ του δείγματος και των ί/ο ράβδων προσδιορίζονται. Με την προϋπόθεση ομοιόμορφης κατανομής της παραμόρφωσης στο δείγμα, ο ρυθμός μηχανικής παραμόρφωσης σε αυτό είναι ανάλογος του πλάτους του ανακλώμενου κύματος. Ανάλογα, η τάση στο δείγμα είναι ανάλογη του πλάτους του αρχικώς εκπεμπόμενου κύματος. Η τελική μορφή της μηχανικής παραμόρφωσης του υλικού βρίσκεται με την ολοκλήρωση του ανακλώμενου κύματος, και αντιπαραβάλλοντας τις τιμές παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής αυτών, δημιουργείται το δυναμικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δείγματος.



**Σχήμα 2-4.** Δεδομένα από μέτρηση αισθητήρων σε συσκευή Kolsky συμπίεσης με δείγμα ελέγχου από 304 ανοξείδωτο χάλυβα, έπειτα από επεξεργασία σήματος και ενίσχυση. Διακρίνονται τα τρία κύματα πίεσης που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία, ενώ είναι εμφανής η χρονική καθυστέρηση μεταξύ αυτών, η οποία οφείλεται στις χρονικές καθυστερήσεις στη λήψη των δεδομένων από τους αισθητήρες.

## 2.2 Εξισώσεις λειτουργίας

Εδώ αναπτύσσεται η θεωρία λειτουργίας της συσκευής Kolsky, τύπου συμπίεσης. Ξεκινώντας με τις εξισώσεις κίνησης ράβδου σε αξονική ταλάντωση, τόσο οι πλήρεις όσο και οι ελάσσων μορφής εξισώσεις προκύπτουν και μέσω αυτών υπολογίζεται η τάση, η μηχανική παραμόρφωση και ο ρυθμός μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα. Πολλά συγγράμματα στη βιβλιογραφία υπάρχουν που αναλύουν τις εξισώσεις κίνησης αυτές. Η παρακάτω ανάλυση υπάρχει στο [2].

### 2.2.1 Παραμόρφωση και τάση δείγματος

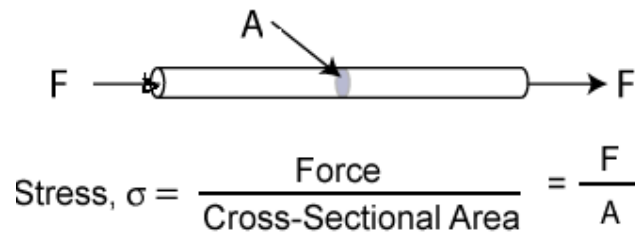
Η συσκευή Kolsky πίεσης, χρησιμοποιείται λοιπόν για τον υπολογισμό της τάσης και μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα υλικού, κάτω από την επίδραση της μηχανικής φόρτισης, στη περίπτωση που αναλύεται εδώ της συμπίεσης, που αυτό υφίσταται, μεταξύ των δύο ράβδων πίεσης. Η μηχανική τάση  $\sigma$  (mechanical stress), εκφράζει γενικώς το φόρτο που υφίσταται μια δια-τομεακή περιοχή στερεού A, υπό την επίδραση κάποιας δύναμης F. Η δια-τομεακή περιοχή, είναι η όλη επιφάνεια στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη αυτή. Έτσι λοιπόν, στην συνηθέστερη περίπτωση γεωμετρίας δείγματος εν χρήσει σε

συσκευή Kolsky, αυτή της κυλινδρικής ράβδου με μήκος  $l$  και διάμετρο  $D$ , η δια-τομεακή περιοχή του δείγματος ορίζεται ως

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2-1)$$

τότε, η πίεση στο στερεό ισούται με το πηλίκο της δύναμης που εφαρμόζεται στο κύλινδρο  $F$  (ομο-αξονική φόρτιση) δια τη δια-τομεακή αυτή επιφάνεια  $A$ , όπου εφαρμόζεται η δύναμη αυτή [23]

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-2)$$



**Σχήμα 2-5.** Ορισμός τάσης στερεού

Η βασική μονάδα μέτρησης της μηχανικής τάσης στο αμερικανικό σύστημα μέτρησης είναι η λίβρα ανά τετραγωνική ίντσα ή Psi

$$Psi = lbs / in^2$$

στο παγκόσμιο σύστημα μέτρησης είναι η μονάδα Newton ανά τετραγωνικό μέτρο ή Pa (μονάδα Pascal)

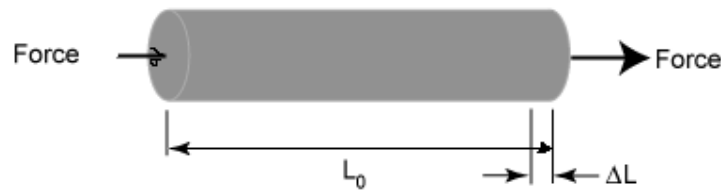
$$Pa = \frac{N}{m^2} = kg \frac{1}{m \cdot sec^2}$$

Ενώ ισχύει ότι

$$1 Psi = 6894.75729 Pa$$

Η μηχανική παραμόρφωση  $\varepsilon$  (mechanical strain) τώρα εκφράζει την αντίδραση του στερεού στην εφαρμογή της μηχανικής φόρτισης σε αυτό, η οποία οδηγεί στη παραμόρφωση αυτού. Στη περίπτωση της συμπίεσης (pressure), το στερεό συμπιέζεται και άρα μικραίνει το μήκος του, στη περίπτωση εφελκυσμού (tension) το στερεό τεντώνεται και άρα αυξάνει το μήκος του, ενώ στη περίπτωση συστροφής (torsion) το στερεό συστρέφεται. Στη περίπτωση συμπίεσης, όπου εκπίπτει και η διαδικασία μέτρησης μέσω συσκευής Kolsky πιέσεως, η μηχανική παραμόρφωση ορίζεται ως η μεταβολή του μήκους του στερεού προς το αρχικό μήκος του [22]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2-3)$$



**Σχήμα 2-6.** Παραμόρφωση στερεού

Όταν η παραμόρφωση αυτή είναι μικρή, το στερεό θα επανέλθει στη πρότερη του κατάσταση, με το πέρας του φόρτου της δύναμης που εφαρμόζεται σε αυτό. Η παραμόρφωση που υφίσταται τότε ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση. Η ελαστική παραμόρφωση προκύπτει όταν η καταπόνηση είναι μικρότερη ενός χαρακτηριστικού για κάθε υλικό ορίου, το όριο ελαστικότητας του υλικού (yield strength), πέραν αυτού του ορίου η παραμόρφωση που υφίσταται το υλικό είναι μόνιμη (πλαστική παραμόρφωση). Μονάδα μέτρησης της μηχανικής καταπόνησης στο αμερικάνικο σύστημα μέτρησης είναι η ίντσα προς ίντσα in/in, ενώ στο παγκόσμιο σύστημα μέτρησης είναι το μέτρο προς μέτρο (m/m), όπου

$$1 \text{ in/in} = 1 \text{ m/m}$$

Για όσο η παραμόρφωση αυτή είναι ελαστική, οι τιμές μηχανικής παραμόρφωσης και τάσης έχουν γραμμική σχέση, δηλαδή ισχύει

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-4)$$

όπου,  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) του υλικού από όπου είναι κατασκευασμένο το στερεό. Αυτό, συνδέεται με την πυκνότητα του υλικού  $\rho$  και τη ταχύτητα διάδοσης κύματος  $C$  στο υλικό αυτό με τη σχέση

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-5)$$

Πέραν της μηχανικής παραμόρφωσης  $\varepsilon$  και της μηχανικής τάσης  $\sigma$ , εν χρήσει υπάρχουν οι μετρικές της πραγματικής παραμόρφωσης  $e$  (True strain) και της πραγματικής τάσης  $s$  (True stress). Η διαφορά έγκειται στο ότι η πραγματική παραμόρφωση και η πραγματική πίεση μετρούν τις μεταβολές στη δια-τομεακή περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας τις στιγμιαίες τιμές τους. Σε όλη την εργασία, οι αναλύσεις έγιναν με χρήση των ορισμών

μηχανικής παραμόρφωσης και μηχανικής τάσης, ενώ μεταξύ των δύο ορισμών ισχύουν οι σχέσεις μετατροπής [23]

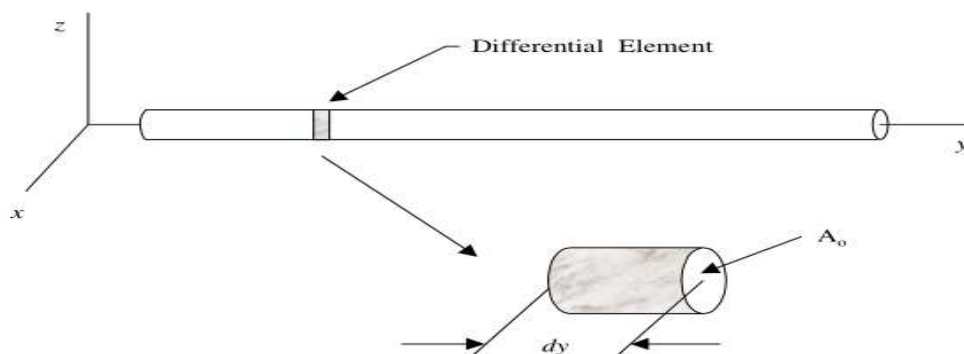
$$s = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$e = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2-6)$$

## 2.2.2 Αξονική ταλάντωση των ράβδων

Μια συσκευή Hopkinson αποτελείται βασικά από δύο ράβδους με δια-τομεακή επιφάνεια  $A_0$  ελαστική σταθερά και πυκνότητα  $E, \rho$  αντίστοιχα. Υποθέτοντας τις δυο ράβδους ίδιες, η σχεδιαστική επιλογή που επιλέγετε στη βιβλιογραφία, για τον υπολογισμό των σχέσεων που περιγράφουν την αξονική ταλάντωση είναι να μελετώνται οι ιδιότητες μίας εξ' αυτών. Τυπικά, το μήκος ράβδου επιλέγεται τουλάχιστον οχτώ φορές μεγαλύτερο της διαμέτρου.

Αρχικώς, θεωρούμε μια διαφορική διατομή της ράβδου, πριν τη παραμόρφωση της, και έπειτα ακριβώς μετά την παραμόρφωση. Στο παρακάτω σχήμα έχουμε την αναπαράσταση αυτή της ράβδου μέσω διαφορικών στοιχείων.



**Σχήμα 2-7.** Αναπαράσταση ράβδου i/o μέσω διαφορικών στοιχείων, πριν τη παραμόρφωση [2]

Το διαφορικό στοιχείο χαρακτηρίζεται από μήκος

$$d_y$$

και δια-τομεακή επιφάνεια

$$A_0$$

Πριν την κρούση, η ράβδος βρίσκεται σε στατική ισορροπία. Αμέσως μετά την κρούση, τμήμα του διαφορικού στοιχείου βρίσκεται σε συμπίεση, λόγω των δυνάμεων

$$F_1$$



(μετάδοση) και

$$F_2$$

(ανάκλαση) , όπως στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 2-8.** Επίδραση δυνάμεων στο διαφορικό στοιχείο[2]

Οι δυνάμεις στο διαφορικό στοιχείο σχετίζονται με τις μηχανικές πιέσεις στη δια-τομεακή επιφάνεια του στοιχείου. Για ελαστικές ράβδους υπακούοντες στο νόμο του Hooke, η μηχανική παραμόρφωση σχετίζεται με τη τάση μέσω του μέτρου ελαστικότητας της ράβδου

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-4)$$

Περαιτέρω, αυτές οι παραμορφώσεις μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μετατοπίσεων των συνολικών διαφορικών στοιχείων. Συνεπώς, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται αντίθετες στη πίεση στο διαφορικό στοιχείο μπορούν να αναπαρασταθούν συναρτήσει των στοιχειακών μετατοπίσεων  $u$ ,

$$F_y = A_0 E \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2-7)$$

υποθέτοντας μηχανική φόρτιση στον ένα μόνο άξονα. Το μέγεθος της διαμήκουσ αυτής δύναμης επιδρά στα δύο μέτωπα του διαφορικού στοιχείου, ως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 2-9.** Οι δυνάμεις αντίθετες στη συμπίεση, στο διαφορικό στοιχείο [2]

Αθροίζοντας τις δυνάμεις που επενεργούν στο στοιχείο, σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα

$$F = m\ddot{y} \quad (2-8)$$

προκύπτει η παρακάτω εξίσωση που περιγράφει την μετακίνηση των παλμών πίεσης

$$A_0 E \frac{\partial u_1}{\partial y} - A_0 E \frac{\partial u_2}{\partial y} = A_0 dy \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2-9)$$

όπου στην εξίσωση αυτή, γίνεται η υπόθεση της σταθερής επιτάχυνσης σε κάθε τμήμα του διαφορικού στοιχείου. Απλοποιώντας την εξίσωση, εξάγουμε την συνάρτηση κίνησης της ράβδου

$$C_0^2 \left[ \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial y} \right] = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dy \quad (2-10)$$

όπου, στην εξίσωση αυτή η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στη ράβδο ισούται με

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-11)$$

Πολλές μελέτες απλοποιούν περαιτέρω τις συναρτήσεις κίνησης αυτές, με την υπόθεση ότι ο ρυθμός μεταβολής της μετακίνησης στα δύο άκρα του διαφορικού στοιχείου είναι ίσος (πράγμα λογικό), τότε ισχύει

$$u_2 = u_1 + \frac{\partial u_1}{\partial y} dy \quad (2-12)$$

Παραγωγίζοντας τη τελευταία σχέση λαμβάνεται

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} dy \quad (2-13)$$

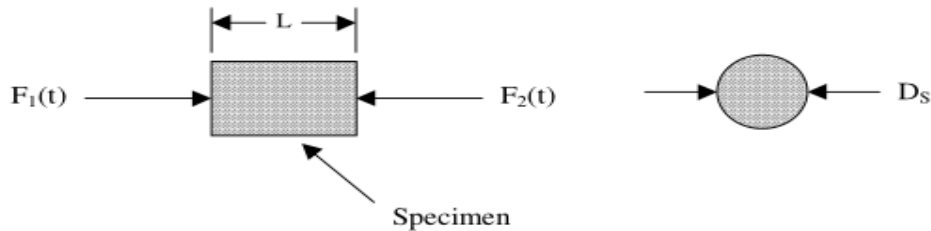
Και συνδυάζοντας τη τελευταία εξίσωση με την (2-9) προκύπτει

$$C_0^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2-14)$$

Η οποία αποτελεί την τελική εξίσωση κίνησης για τη ράβδο. Αν και η τελευταία εξίσωση δεν έχει κάποια πρακτική χρήση στη ανάλυση της ράβδου Hopkinson, παρακάτω γίνεται χρήση από αυτήν της θεωρητικής ταχύτητας κύματος με άπειρο μήκος. Το δεδομένο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μηχανικής παραμόρφωσης και της ταχύτητας μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα.

### 2.2.3 Τάση στο δείγμα

Η μέση τάση στο δείγμα μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δυνάμεων που επενεργούν σε κάθε επιφάνεια του. Σχηματικά., ένα απόλυτα κυλινδρικό δείγμα προς έλεγχο μπορεί να αναπαρασταθεί ως παρακάτω



**Σχήμα 2-10.** Κυλινδρικό δείγμα προς έλεγχο [2]

Όταν το δείγμα τοποθετείται ανάμεσα στις δύο i/o ράβδους (διάταξη μορφής «sandwich»), διακρίνονται οι δύο δυνάμεις πίεσης που εφαρμόζονται στο δείγμα, μια λόγω της διάδοσης κύματος από την ράβδο εκπομπής και μια λόγω της ανάκλασης από την ράβδο δέκτη

$$F_1, F_2$$

θέτοντας τη διάμετρο του δείγματος ως

$$D_s$$

και την δια-τομεακή περιοχή του ως

$$A_s = \frac{\pi D_s^2}{4} \quad (2-15)$$

η μέση δύναμη που εφαρμόζεται στο δείγμα ισούται με

$$F_{AVG}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \quad (2-16)$$

και συνεπώς, η μέση τάση στο δείγμα

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{F_{AVG}(t)}{A_s} = \frac{F_{AVG}(t)}{\frac{\pi D_s^2}{4}} \quad (2-17)$$

Οι δύο δυνάμεις που ορίστηκαν να δρουν στα δύο άκρα του δείγματος οφείλονται στις δύο i/o ράβδους που το συμπιέζουν. Όταν το δείγμα βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία, οι δυνάμεις αυτές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μηχανικών παραμορφώσεων στην ράβδο εκ πομπό και στη ράβδο δέκτη ως

$$F_1(t) = E[\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)] \frac{\pi D_{BAR}^2}{4} \quad (2-18)$$

$$F_2(t) = E\varepsilon_T(t) \frac{\pi D_{BAR}^2}{4} \quad (2-19)$$

Όπου, όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο των στοιχείων λειτουργίας της συσκευής I = incident, αρχική είσοδο κύματος στη συσκευή, στην ράβδο εκ πομπό, συνεπώς η τάση και η μηχανική παραμόρφωση λόγω του αρχικού αυτού κύματος ορίζονται κατά σειρά ως

$$\sigma_I(t), \varepsilon_I(t)$$

R = Reflected, ανακλώμενο κύμα από το δείγμα πίσω στη ράβδο εκ πομπό, συνεπώς η τάση και η μηχανική παραμόρφωση λόγω του κύματος αυτού ορίζονται κατά σειρά ως

$$\sigma_R(t), \varepsilon_R(t)$$

T = Transmission, τελικώς μεταδιδόμενο κύμα από το δείγμα στη ράβδο δέκτη, συνεπώς η τάση και η μηχανική παραμόρφωση λόγω του κύματος αυτού ορίζονται κατά σειρά ως

$$\sigma_T(t), \varepsilon_T(t)$$

με τη κοινή δια-τομεακή επιφάνεια των δύο i/o ράβδων να ορίζεται ως

$$A_0 = \pi \frac{D_{BAR}^2}{4} \quad (2-20)$$

Αφαιρώντας τις εξισώσεις (2-14), (2-16), (2-17) από την (2-15) λαμβάνεται η μέση τάση στο δείγμα συναρτήσει των μηχανικών παραμορφώσεων στις i/o ράβδους

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{ED_{BAR}^2}{D_s^2} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (2-21)$$

Αν το δείγμα παραμορφώνεται ομοιόμορφα (υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή παραμόρφωσης σε αυτό), η συνολική μηχανική παραμόρφωση στη ράβδο εκ πομπό είναι ίση με την μηχανική παραμόρφωση στη ράβδο δέκτη

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (2-22)$$

Υπενθυμίζεται ότι η μηχανική παραμόρφωση λόγω ανάκλασης οφείλεται σε κύματα με φορά αντίθετη με αυτά της μετάδοσης (I και R), άρα έχει αρνητικό πρόσημο στη τιμή της. Τελικώς, η τιμή της μέσης τάσης στο δείγμα με συνδυασμό των **2-21**, **2-22** είναι

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{ED_{BAR}^2}{D_s^2} \varepsilon_T(t) \quad (2-23)$$

Αυτό που τελικά προκύπτει, είναι ότι η μέση τάση στο δείγμα είναι ανάλογη της μηχανικής παραμόρφωσης στη ράβδο εκ-πομπό, συγκεκριμένα ίση με αυτή επί το μέτρο

ελαστικότητας  $E$  και επί την ανάστροφη τιμή της σχετικής κοινής δια-τομεακής περιοχής, μεταξύ δείγματος και μιας εκ των  $i/o$  ράβδων.

## 2.2.4 Μηχανική παραμόρφωση και ρυθμός μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης δείγματος

Ο μέσος ρυθμός μηχανικής παραμόρφωσης ορίζεται ως η μέση μηχανική παραμόρφωση διαιρούμενη δια του χρόνου στον οποίο λαμβάνει αυτή χώρα. Η μηχανική παραμόρφωση προσδιορίζει την ύπαρξη μετατόπισης, η τελευταία διαιρούμενη με το χρόνο μεταφράζεται σε ταχύτητα. Ο ρυθμός μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα μπορεί να υπολογιστεί μέσω των ταχυτήτων των  $i/o$  ράβδων και του δείγματος. Αυτές μπορούν να προσδιοριστούν από τις μηχανικές παραμορφώσεις/καταπονήσεις στις  $i/o$  ράβδους. Αρχικώς, επιστρέφοντας στην εξίσωση κίνησης στις  $i/o$  ράβδους, όπως προσδιορίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου

$$C_0^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2-24)$$

Στην περίπτωση αρμονικών κυμάτων ισχύει

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2-25)$$

όπου  $v$  είναι η ταχύτητα τμήματος της ράβδου, ενώ

$$E \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2-26)$$

Όπου  $p$  είναι η μηχανική παραμόρφωση στη δια-τομεακή περιοχή της ράβδου. Η εξίσωση κίνησης μπορεί τότε να οριστεί ξανά, συναρτήσει της πίεσης και της ταχύτητας στη δια-τομεακή περιοχή της ράβδου ως

$$-\frac{\partial p(y,t)}{\partial y} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2-27)$$

Στην τελευταία εξίσωση, η επίλυση ως προς ταχύτητα  $v$  στη ράβδο απαιτεί γνώση της πίεσεως σε αυτή. Αν υποθεθεί ένα θετικά διαδιδόμενο αρμονικό κύμα της μορφής

$$p(y,t) = P e^{j(\omega t - ky)} \quad (2-28)$$

όπου  $P$  είναι η μέγιστη τιμή της πίεσης,  $\omega$  είναι η συχνότητα,  $t$  ο χρόνος,  $k$  ο αριθμός των κυμάτων όπου

$$k = \frac{\omega}{C_0} \quad (2-29)$$

και  $y$  είναι η θέση στο χώρο του κύματος, τότε, για την στιγμιαία ταχύτητα τμήματος ράβδου, παραγωγίζοντας τη 2-28 λαμβάνεται

$$\frac{\partial p(y,t)}{\partial y} = -ikPe^{j(\omega t - ky)} \quad (2-30)$$

από τις 2-27, 2-28 και 2-30 λαμβάνεται

$$ikPe^{j(\omega t - ky)} = \rho i \omega v(y,t) \quad (2-31)$$

δηλαδή, η στιγμιαία ταχύτητα τμήματος ισούται τελικώς με

$$v(y,t) = \frac{k}{\rho \omega} Pe^{j(\omega t - ky)} \quad (2-32)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας το k

$$v(y,t) = \frac{1}{\rho C_0} p(y,t) \quad (2-33)$$

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο-αξονική διάδοση του κύματος πίεσης, δηλαδή δεν υπάρχουν σκεδάσεις και η μεταβολή της ράβδου γίνεται πλήρως στον άξονα κίνησης που μελετάται, η πίεση στη ράβδο είναι ίση με την πίεση στη δια τομεακή περιοχή της. Δηλαδή, η πίεση αυτή μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της μηχανικής παραμόρφωσης στη ράβδο

$$p(y,t) = E \varepsilon(y,t) \quad (2-34)$$

Από τις σχέσεις 2-33, 2-34 λαμβάνεται η σχέση της ταχύτητας συναρτήσει της μηχανικής παραμόρφωσης στη ράβδο

$$v(y,t) = C_0 \varepsilon(y,t) \quad (2-35)$$

Για ένα κύμα διαδιδόμενο σε αντίθετη κατεύθυνση από την οριζόμενη ως θετική, στη περίπτωση της συσκευής Hopkinson αυτή είναι από τη ράβδο εκ-πομπό προς τη ράβδο δέκτη, η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή

$$v(y,t) = -C_0 \varepsilon(y,t) \quad (2-36)$$

Με την τελευταία εξίσωση, περιγράφεται η ταχύτητα ελάσσων τμήματος ράβδου συναρτήσει της μηχανικής παραμόρφωσης. Από εδώ, ο υπολογισμός του ρυθμού μηχανικής παραμόρφωσης είναι μια, σχετικά, απλή διαδικασία. Κατ' αρχάς, ο μέσος ρυθμός μεταβολής της μηχανικής παραμόρφωσης κάθε χρονική στιγμή μπορεί να οριστεί ως

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_{interface2} - v_{interface1}}{L} \quad (2-37)$$

Η ταχύτητα στο 1<sup>ο</sup> μέσο (interface1) αποτελείται από το αρχικό κύμα (με θετική φορά) και το ανακλώμενο κύμα (με αρνητική φορά) δηλαδή

$$v_{interface1} = C_0 \varepsilon_1 - C_0 \varepsilon_R = C_0 (\varepsilon_1 - \varepsilon_R) \quad (2-38)$$

Για να υπολογιστεί η ταχύτητα στο 2<sup>ο</sup> μέσο (interface2) αυτό που χρειάζεται είναι η γνώση της εκπεμπόμενης μηχανικής παραμόρφωσης. Αυτή, περιγράφοντας κύμα με θετική φορά, θα είναι

$$v_{interface2} = C_0 \varepsilon_T \quad (2-39)$$

Αντικαθιστώντας στην 2-37 τις εκφράσεις ταχυτήτων λαμβάνεται

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{C_0(\varepsilon_T - \varepsilon_I + \varepsilon_R)}{L} \quad (2-40)$$

Η φυσική σημασία του αρνητικού πρόσημου στην τελευταία εξίσωση είναι ότι η παραμόρφωση που υφίσταται το δείγμα είναι συμπίεση. Αν αυτή η παραμόρφωση τώρα είναι ομοιόμορφη, δηλαδή ισχύει ο νόμος της υπέρθεσης στις μηχανικές παραμορφώσεις, δηλαδή ισχύει

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (2-41)$$

ο ρυθμός μεταβολής της μηχανικής παραμόρφωσης τότε, παίρνει τη μορφή

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2-42)$$

από όπου, με ολοκλήρωση υπολογίζεται η τιμή της μηχανικής καταπόνησης στο δείγμα ως

$$\varepsilon_s(t) = \frac{-2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (2-43)$$

## 2.2.5 Συγκεντρωτική παρουσίαση των εξισώσεων υπολογισμού

Με την προϋπόθεση ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα και ότι οι ράβδοι συμπίεσης παραμένουν στην ελαστική τους περιοχή, οι εξισώσεις υπολογισμού της τάσης, της μηχανικής παραμόρφωσης και του ρυθμού μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα λαμβάνουν συγκεκριμένη μορφή

$$\sigma_s(t) = E_{BAR} \frac{A_{BAR}}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (2-23)$$

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2-42)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{-2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (2-43)$$

Επιστρέφοντας τώρα στη φυσική διεργασία που λαμβάνει χώρα κατά τη λειτουργία ελέγχου δείγματος μέσω μιας συσκευής Hopkinson, όταν η ράβδος κρούσης χτυπήσει τη ράβδο εκ-πομπό, παράγεται κύμα πίεσης. Όταν αυτό φθάσει στο δείγμα, διαχωρίζεται σε ένα ανακλώμενο κομμάτι, που επιστρέφει πίσω, και σε ένα μεταδιδόμενο κομμάτι, που συνεχίζει στη ράβδο δέκτη. Με χρήση διατάξεων αισθητήρων, τοποθετημένες στις i/o

ράβδους, τα κύματα αυτά μπορούν να μετρηθούν και να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις αυτές για τον υπολογισμό της πίεσης και της παραμόρφωσης δείγματος, μέσω των εξισώσεων 2-23, 2-42 και 2-43.

## **2.3 Ράβδοι πίεσης**

### **2.3.1 Επιλογή ράβδων πίεσης**

Στη γενική περίπτωση, το υλικό κατασκευής των ράβδων ορίζεται από τη μηχανική παραμόρφωση που ο ερευνητής θέλει να υποβάλλει στο προς έλεγχο δείγμα. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο αυτός πρέπει να κατευθυνθεί σε επιλογές υλικών για τη ράβδο με μεγάλο όριο ελαστικότητας (yield strength/yield point). Ισοδύναμα, από πλευράς μαθηματικών, οι τύποι υπολογισμού τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία και αναπτύχθηκαν στο κεφ.2, προϋποθέτουν οι ράβδοι πίεσης να παραμένουν στην ελαστική τους περιοχή. Τα παραπάνω μεταφράζονται σε μια σειρά, κατά το σύνηθες, κανόνων επιλογής [11] ανάλογα το τύπο υλικού του προς έλεγχου δείγματος. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις κατασκευής συσκευών Kolsky, όπου ανάλογα το τύπο του προς μελέτη υλικού, χρησιμοποιείται και διαφορετικό υλικό κατασκευής ράβδων πίεσης, κατά περίπτωση. Στην πράξη, η επιλογή υλικού και διαστάσεων των ράβδων πίεσεως αποτελούν το πρώτο βήμα σχεδίασης της συσκευής., που γίνεται με αρχική υπόθεση κάποιας γκάμας υλικών δείγματος και μέγιστων τιμών ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης ή/και, απ' ευθείας, μέγιστης παραμόρφωσης σε αυτό. Συνεπώς, σαν αρχή της σχεδίασης, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις λειτουργίας, να επιλεγούν υλικά και διαστάσεις των ράβδων πίεσεως και έπειτα πια να σχεδιαστούν τα υπόλοιπα τμήματα της συσκευής. Αν η όλη σχεδίαση δεν επαρκεί για τις όποιες επιθυμητές συνθήκες μέτρησης, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, ξεκινώντας πάλι με την διόρθωση των παραμέτρων των ράβδων πίεσεως.

#### **2.3.1.1 Κανόνες επιλογής υλικού**

Παραδοσιακά, οι ράβδοι πίεσεως μιας συσκευής Kolsky κατασκευάζονται από, ίδιο και οι δύο, ομογενές μέταλλο μεγάλης αντοχής στη θραύση, όπως AISI – SAE 4340 χάλυβα, μαρτενσιτικό χάλυβα (maraging steel), διάφορα άλλα κράματα νικελίου όπως είναι το Inconel, οικογένεια κραμάτων με βάση το νικέλιο και το χρώμιο, που παρουσιάζουν, μεταξύ άλλων, υψηλή μηχανική αντοχή και αναλλοίωτο ιδιοτήτων για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών [16]. Τα υλικά αυτά, όλα με υψηλά όρια ελαστικότητας, χρησιμοποιούνται διότι το όριο ελαστικότητας των ράβδων πίεσης προσδιορίζει την μέγιστη τάση  $\sigma$  που μπορεί να υποβληθεί το δείγμα. Τα κράματα Inconel έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχημένα σε κατασκευές συσκευών Kolsky, όπου οι συνθήκες θερμοκρασίας είναι εξαιρετικά υψηλές, μέχρι και τους 800 °C. Επειδή ένα υλικό χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας αυξάνει τα ποσοστά σήματος προς θόρυβο, κάποιες φορές είναι επιθυμητή η χρήση ράβδων πίεσης



χαμηλότερης μηχανικής αντοχής, κυρίως σε εφαρμογές μετρήσεων υψηλής ακρίβειας, όπως είναι αυτές σε πολυμερή και υλικά κυψελοειδούς/αφρώδους τύπου. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά με διάφορες τιμές μέτρου ελαστικότητας, από το μαρτενσιτικό χάλυβα (210 GPa), το τιτάνιο (110 GPa), το αλουμίνιο (90 GPa), το μαγνήσιο και πολυμερή υλικά (<20 GPa). Στις μετρήσεις με δείγματα τύπου πολυμερών υλικών, μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων, υψηλό ποσοστό σήματος προς θόρυβο στις ράβδους πίεσεως, επιτυγχάνεται με χρήση αντί ομογενούς υλικού, κούφιου σωληνοειδούς στο ρόλο της ράβδου εκπομπής. Στη περίπτωση αυτή όμως, αυξάνονται τα φαινόμενα διασποράς κύματος στη ράβδο.

Ακόμα, αυτό που παρατηρείτε [16] είναι ότι στις περιπτώσεις που μετράτε η συμπεριφορά χαμηλής πυκνότητας  $\rho$  υλικών είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί ως υλικό ράβδων, αναλόγως μικρότερης πυκνότητας υλικού κατασκευής αυτών. Αν τότε υπάρχει συγκεκριμένη επιλογή υλικών, για παράδειγμα, μεταξύ αλουμινίου και χάλυβα, επιλέγεται αυτό με την μικρότερη πυκνότητα, στο παράδειγμα το αλουμίνιο.

Ο γενικός κανόνας λοιπόν, είναι η επιλογή υλικού ράβδων πίεσεως συναρτήσει της μέγιστης προβλεπόμενης τάσης που παράγεται από το κύμα πίεσης εισόδου στη συσκευή. Πρέπει πάντα οι ράβδοι πίεσεως να παραμένουν εντός της ελαστικής τους περιοχής, ούτως ώστε οι τύποι υπολογισμού τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα να ισχύουν. Αυτό μεταφράζεται σε επιλογή υλικού με όριο ελαστικότητας, βασική παράμετρος - σταθερά που δίδεται από το κατασκευαστή του υλικού, μεγαλύτερης της μέγιστης προβλεπόμενης τάσης στην Incident ράβδο πίεσεως. Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης εισόδου τώρα, με αρχική υπόθεση επιθυμητού σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης, σε μια σωστά βαθμονομημένη και γενικά έτοιμη προς μέτρηση συσκευή, ισχύει ότι [11]

$$\mathcal{E}_{Incident} = \frac{V_{striker\_Bar}}{2C_{Pressure\_Bar}} \quad (2-44)$$

Δηλαδή, είναι ίση με την ταχύτητα της ράβδου Κρούστη κατά την κρούση διά δύο φορές την ταχύτητα διάδοσης κύματος στις ράβδους πίεσεως, με την προϋπόθεση η ράβδος Κρούστη να είναι κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό και να έχει ίδια δια-τομεακή περιοχή κρούσης με τις ράβδους πίεσεως. Για την ταχύτητα κρούσης τώρα, αν υποθεθεί σταθερός επιθυμητός ρυθμός μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα ισχύει προσεγγιστικά [11]

$$\dot{\mathcal{E}}_{sample} = \frac{V_{striker\_Bar}}{l_{sample}} \quad (2-45)$$

Δηλαδή, είναι ίση με το γινόμενο του επιθυμητού σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης επί το μήκος του δείγματος. Ακόμα ισχύει προσεγγιστικά πάλι [11]

$$\max(\varepsilon_{sample}) = 2\dot{\varepsilon}_{sample} \frac{L_{striker\_Bar}}{C_{Pressure\_Bar}} \quad (2-46)$$

Δηλαδή, η μέγιστη παραμόρφωση στο δείγμα είναι ίση με 2 φορές το γινόμενο του ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα επί το μήκος της ράβδου Κρούστη επί τη ταχύτητα διάδοσης κύματος στις ράβδους. Οι εξισώσεις (2-45), (2-46) αποτελούν υποεκτιμήσεις [11]. Δίνουν αποτελέσματα αρκετά κοντά στα πραγματικά για μελέτη δειγμάτων μαλακών μετάλλων, όπως χαλκό ή αλουμίνιο. Υποεκτιμούν αρκετά συνήθως τις απαιτούμενες τιμές μήκους ράβδου πίεσεως και ταχύτητας κρούσης σε σκληρότερα υλικά, όπως για παράδειγμα σκληρούς χάλυβες. Είναι όμως μια επαρκή αρχική εκτίμηση [11], για την έναρξη σχεδίασης

Στην παραπάνω παράγραφο, παρουσιάστηκε πως δύναται ο ερευνητής να εκτιμήσει σε πρώτη φάση τη μέγιστη παραμόρφωση στις ράβδους πίεσεως. Πάλι όμως, η συσχέτιση γίνεται σε αναφορά με τα χαρακτηριστικά κατασκευής της ράβδου Κρούστη, και όχι άμεσα με το υλικό των ράβδων πίεσεως. Αυτό που πρακτικά πρέπει να γίνει, είναι να επιλεγεί κάποιο υλικό ράβδων πίεσεως, αρχικώς, να γίνει η λοιπή σχεδίαση της συσκευής, και αναλόγως τη μέτρηση και το υλικό δείγματος είτε να επιβεβαιωθεί έπειτα ότι η σχεδίαση επαρκεί είτε να γίνει επανασχεδιασμός. Και αυτό πραγματικά γίνεται στη πράξη. Αρχικώς, επιλέγεται η γκάμα των δειγμάτων υλικού που η συσκευή θα δύναται να επεξεργαστεί, και επιλέγεται ένα αρκετά σκληρότερο υλικό κατασκευής των ράβδων πίεσεως και ράβδου Κρούστη. Με αυτή την επιλογή, και με γνώση τη μέγιστη επιθυμητή παραμόρφωση στο δείγμα και του σταθερού επιθυμητού ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης αυτής, σχεδιάζεται η συσκευή, δηλαδή επιλέγονται μήκη ράβδου Κρούστη, σωλήνα εκτόξευσης, ταχύτητα κρούσης, διαστάσεις δείγματος. Αυτό γίνεται με τις εκτιμήσεις και τις διαδικασίες που παρουσιάζονται παρακάτω στην εργασία. Αν από την (2-44) προκύψει ότι η τάση εισόδου στην Incident ράβδο πίεσεως μπορεί να ξεπεράσει την τιμή του ορίου ελαστικότητας του αρχικώς επιλεγμένου υλικού κατασκευής της, τότε επιλέγεται νέο, σκληρότερο υλικό και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

### 2.3.2 Διαστάσεις ράβδων πίεσης

Το μήκος L και η διάμετρος D των ράβδων πίεσεως επιλέγονται ώστε να πληρούν μια σειρά κριτηρίων [11], ούτως ώστε το τελικό πείραμα να είναι αξιόπιστο όπως επίσης και τα επίπεδα μηχανικής τάσης και μέγιστου ρυθμού μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα κατά τη μέτρηση να είναι τα επιθυμητά. Πρώτα απ' όλα, το μήκος και των δύο ράβδων είναι, παραδοσιακά, το ίδιο. Πρέπει ακόμα το μήκος των ράβδων πίεσεως να είναι

τέτοιο, ώστε να διασφαλίζεται η μετάδοση του κύματος μόνο στον κατά μήκος άξονα των ράβδων, δηλαδή να μην σκεδάζεται ούτε κατά ύψος και ούτε κατά πλάτος, για συγκεκριμένο μήκος παλμού μετάδοσης (Pulse Length). Το τελευταίο ορίζεται ως το γινόμενο του μήκους κύματος, της συχνότητας και της συνολικής χρονικής διάρκειας του κύματος

$$PL = l * f * t_{ol} \quad (2-47)$$

ενώ, ισχύει ακόμα ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο μέσο είναι ίση με το γινόμενο του μήκους κύματος επί τη συχνότητα

$$c = l * f$$

Δηλ.

$$PL = c * t_{ol} \quad (2-48)$$

Στις περισσότερες δοκιμές υλικών, απαιτείται περίπου

$$PL \approx 10 * D \quad (2-49)$$

Κατά δεύτερον, για το γρήγορο διαχωρισμό του ανακλώμενου από το αρχικώς μεταδιδόμενο σήμα κατά την αναγωγή δεδομένων, απαιτείται ο λόγος μήκος προς διάμετρο κάθε ράβδου να είναι τουλάχιστον μεγαλύτερος του, περίπου, 20

$$\frac{L}{D} > (\sim 20) \quad (2-50)$$

Κατά τρίτον, πρέπει να ληφθεί υπόψη το επιθυμητό ποσοστό του αρχικώς εκπεμπόμενου κύματος που διαδίδεται στο δείγμα. Η απόλυτη τιμή της επιθυμητής κυματικής παραμόρφωσης αυτής, σχετίζεται με το μήκος μετάδοσης του αρχικού incident wave. Οι ράβδοι πίεσεως πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιου μήκους από το μήκος μετάδοσης αυτό, ώστε το αρχικώς μεταδιδόμενο incident σήμα και το ανακλώμενο σήμα να καταγραφούν με όσο το δυνατόν λιγότερες παρεμβολές θορύβου, και ώστε οι ράβδοι πίεσεως να παραμένουν στην ελαστική τους περιοχή, τότε οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες στις κοινές δια-τομεακές περιοχές μεταξύ των ράβδων πίεσεως και του δείγματος να μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς.

Η προϋπόθεση του ότι οι ράβδοι πίεσεως πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιου μήκους από το μήκος μετάδοσης του αρχικού κύματος στην Incident ράβδο πίεσεως, για δοθέν γνωστό μήκος αυτών, οδηγεί στον υπολογισμό της μέγιστης χρονικής διάρκειας του

αρχικού Incident παλμού εισόδου. Αν το, αρχικώς επιλεγμένο μήκος ράβδων Incident και Transmission είναι L, τότε ο χρόνος μετάδοσης του αρχικού παλμού εισόδου στη συσκευή

$t_p$

θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω ανισότητα

$$t_p < \frac{L_{\text{Pressure\_Bar}}}{2C_{\text{Pressure\_Bar}}} \quad (2-51)$$

Πάλι, παρατηρείτε ότι η σχεδίαση των ράβδων πίεσεως προηγείται χρονικά. Συνεπώς, αυτό που ακολουθείται ξανά, είναι να επιλεγεί κάποιο αρχικό μήκος ράβδων πίεσεως, και για την όποια απαιτούμενη μέτρηση, αν απαιτείται παλμός μεγαλύτερης διάρκειας, οι διαστάσεις των ράβδων πίεσεως ν' αλλάζουν. Αυτό που μπορεί να γίνει, είναι να επιλεγθεί αρχικά κάποιο μήκος για τις ράβδους πίεσεως, αναλόγως τις διαστάσεις της συνολικής εγκατάστασης διαθέσιμες για τη συσκευή, με την τυπική ελάχιστη τιμή μήκους των ράβδων πίεσεως να είναι περίπου 60 in (1.524 m) [2], και να επιλεγεί έπειτα διάμετρος των ράβδων μέσω της εξίσωσης (2-50). Με δοθείσες ανάγκες σχεδίασης, υπολογίζονται οι παράμετροι των λοιπών τμημάτων της συσκευής.

### **2.3.3 Μετάβαση κύματος μεταξύ ράβδων πίεσεως και δείγματος, εξάρτηση από τη διάμετρο των ράβδων**

#### **2.3.3.1 Συντελεστές μετάδοσης σήματος από τη 1<sup>η</sup> ράβδο πίεσης στο δείγμα και στη 2<sup>η</sup> ράβδο πίεσης**

Όλες οι ράβδοι, εκ κατασκευής ή άλλων φυσικών παραγόντων, έχουν ασυνέχειες στη δομή τους, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τη μετάδοση κύματος διαμέσου του υλικού τους. Οι πλέον συνήθεις ασυνέχειες που μπορούν να παρουσιαστούν είναι μη ομοιόμορφη διάμετρο, όπως εν προκειμένω μετάβαση του κύματος από μία ράβδο σε μια άλλη διαφορετικής διαμέτρου, και άρα μεταβλητή δια-τομεακή περιοχή, ένα αντικείμενο που φράζει τη μια άκρη τους ή και ακόμα μεταβολές υλικού, οι οποίες σημαίνουν και μεταβολή της μηχανικής αντίστασης. Για τις περισσότερες εφαρμογές μέτρησης μέσω μεθοδολογίας Hopkinson, η μεταβολή στην δια-τομεακή περιοχή θεωρείται συνήθως ως μεταβολή τύπου βηματικής συνάρτησης, δηλ. από περιοχή που ορίζει δια τομεακή περιοχή τιμής  $f(t)=A$  μπορεί να μεταπέσουμε σε περιοχή με δια τομεακή περιοχή τιμής  $g(t)=B$  κτλ. Πότε δηλαδή, μεταβολές της μορφής  $g(t)=h(t)$ , μη σταθερά. Οι μεταβολές αυτές συνήθως προκύπτουν στις ράβδους πίεσης και στο δείγμα. Ασυνέχεια μπορεί επίσης να θεωρηθεί η μετάπτωση του κύματος από ένα υλικό σε ένα άλλο, όπως ακριβώς είναι η περίπτωση που το κύμα μεταδίδεται από την incident bar στο δείγμα ή ανακλάται από την Transmission bar. Εν γένει, όταν το κύμα μεταπίπτει κατά τη μετάδοσή του σε μέσο διαφορετικής μηχανικής αντίστασης.

Σκοπός της παρακάτω ανάλυσης [2], είναι να περιγράψει την συμπεριφορά ενός κύματος όταν η διάδοση του εντός των ράβδων, συναντά μια, γενικά, ασυνέχεια. Στην περίπτωση των εφαρμογών με συσκευές Kolsky, οι πλέον κοινές περιπτώσεις ασυνεχειών είναι βηματικές μεταβολές στην δια-τομεακή περιοχή και στις ιδιότητες του υλικού των ράβδων. Οι ιδιότητες που επικεντρώνονται οι εφαρμογές με μεθοδολογία Hopkinson είναι η μηχανική αντίσταση του μέσου (εδώ οι ράβδοι πίεσεως i/o), η πυκνότητα μάζας, η δια-τομεακή περιοχή και η κατά μήκος της ράβδου ταχύτητα διάδοσης του κύματος

$$Z, \rho, s, C$$

αντίστοιχα. Για την περίπτωση κυλινδρικής ράβδου η δια τομεακή περιοχή ορίζεται ως

$$s = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2-52)$$

με D να είναι η διάμετρος ράβδου στη δια τομεακή περιοχή. Η μηχανική αντίσταση είναι ίση με το πηλίκο της δύναμης που εφαρμόζεται στη ράβδο διά την ταχύτητα, και επίσης ίση με το γινόμενο της δια-τομεακής επιφάνειας επί τη πυκνότητα μάζας επί την ταχύτητα διάδοσης κύματος

$$Z = \frac{F}{V} = s \rho C \quad (2-53)$$

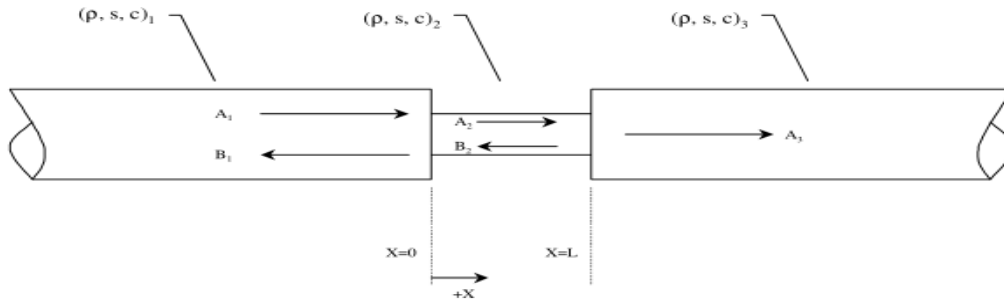
Στην ενότητα αυτή, κατ' εξαίρεση ορίζεται η δια-τομεακή περιοχή ως s, γιατί τα κεφαλαία γράμματα A,B χρησιμοποιούνται στον ορισμό των κυμάτων πίεσης, τιμές μηχανικής καταπόνησης, όπως θα καταδειχθεί παρακάτω. Το γινόμενο τώρα, πυκνότητας μάζας επί ταχύτητα διάδοσης κύματος στο μέσο έχει σταθερή τιμή για κάθε υλικό, συνεπώς το γινόμενο αυτό μπορεί να μελετηθεί συνολικά ως ένας όρος

$$X = \rho C \quad (2-54)$$

Άμεσα παρατηρείται από τις παραπάνω εξισώσεις ότι το φαινόμενο της κρούσης δεν μεταβάλλει τις φυσικές ιδιότητες από τις οποίες εξαρτάται η μηχανική αντίσταση του υλικού. Ο μόνος τρόπος ν' αλλάξει η μηχανική αντίσταση ράβδου, για δοθέν υλικό, είναι η μεταβολή της δια-τομεακής περιοχής (cross sectional area).

Συνήθως, οι ασυνέχειες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά μια μέτρηση με μεθοδολογία Hopkinson, λαμβάνουν χώρα στις περιοχές επαφής i/o ράβδων με το προς έλεγχο δείγμα. Είναι σημαντική λοιπόν η γνώση ως προς το πώς το κύμα μπορεί να συμπεριφερθεί, φθάνοντας σε μια τέτοια ασυνέχεια και μεταβολή του μέσου διάδοσης του.

Έστω λοιπόν το σενάριο όπου ένα στερεό υλικό, δείγμα προς έλεγχο, ενθυλακώνεται μεταξύ δύο μη όμοιων ως προς τις ιδιότητες τους ράβδους διαφορετικής δια-τομεακής περιοχής



**Σχήμα 2-11.** Αναπαράσταση βηματικής μεταβολής στη δια-τομεακή περιοχή των υλικών [2]

Οι μεταβλητές  $\rho, s, c$  έχουν την ίδια φυσική σημασία, όπως τις ορίσαμε προηγουμένως στην εξίσωση 3-9. Θεωρούμε τη τιμή παραμόρφωσης για κύματα που ταξιδεύουν από τα δεξιά έως τα αριστερά στη σχήμα ως

$$A_1 - A_3$$

Και τη τιμή παραμόρφωσης για κύματα που ταξιδεύουν από τα αριστερά έως τα δεξιά στη σχήμα ως

$$B_1 - B_2$$

Στη 1<sup>η</sup> δια τομεακή περιοχή συνάντησης των ράβδων ( $X=0$ ), έχουμε το διαδιδόμενο κύμα προκαλεί μηχανική παραμόρφωση

$$A_1$$

το οποίο, ανακλάτε και εκπέμπετε ως κύματα με τιμή μηχανικής παραμόρφωσης

$$B_1, A_2$$

αντίστοιχα. Στη 2<sup>η</sup> κοινή δια-τομεακή περιοχή των ράβδων ( $X=L$ ) το κύμα καταπόνησης

$$A_2$$

ανακλάται και εκπέμπετε ως κύματα με τιμή μηχανικής καταπόνησης

$$B_2, A_3$$

αντίστοιχα. Τα ποσοστά ανάκλασης και εκπομπής είναι εξαρτόμενα από τις διαφορές μηχανικών αντιστάσεων των υλικών στις δια τομεακές περιοχές. Για να υπολογιστούν ακριβώς τα ποσοστά ανάκλασης και εκπομπής των κυμάτων στις δια-τομεακές περιοχές, απαιτείται πρώτα κατανόηση της δυναμικής που λαμβάνει χώρα σε αυτές. Έτσι, αυτό που θα πρέπει να ισχύει εκεί είναι, κατ' αρχήν, ότι η ταχύτητα των υλικών ακριβώς δεξιά και αριστερά κάθε δια-τομεακής περιοχής είναι ίδια, εφ' όσον βρίσκονται συνεχώς σ' επαφή. Οι δυνάμεις επίσης, ακριβώς αριστερά και δεξιά των δια-τομεακών περιοχών πρέπει να είναι ίσες, ώστε να υπάρχει ισορροπία. Τα παραπάνω μπορούν να εκφραστούν ως εξισώσεις

- Για την δια τομεακή περιοχή 1 (X=0)

Συνέχεια της ταχύτητας

$$\frac{A_1 - B_1}{(\rho c)_1} = \frac{A_2}{(\rho c)_2} \quad (2-55)$$

Ισοροπία δυνάμεων

$$s_1(A_1 + B_1) = s_2(A_2) \quad (2-56)$$

- Για την δια τομεακή περιοχή 2 (X=L)

Συνέχεια της ταχύτητας

$$\frac{A_2 - B_2}{(\rho c)_2} = \frac{A_3}{(\rho c)_3} \quad (2-57)$$

Ισοροπία δυνάμεων

$$s_2(A_2 + B_2) = s_3(A_3) \quad (2-58)$$

Στις παραπάνω 4 εξισώσεις 2-55 – 2-58 υπάρχουν 5 μεταβλητές παραμόρφωσης

$$A_1, A_2, A_3, B_1, B_2$$

συνεπώς, για να έχουμε μοναδική λύση στο σύστημα χρειάζεται άλλη μια εξίσωση μεταξύ των παραμορφώσεων αυτών. Αφού μια τέτοια επιπλέον εξίσωση δεν υπάρχει, θα πρέπει να επαναπροσδιοριστούν κάποιοι όροι, ώστε να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία.

Ορίζεται ο συντελεστής μετάδοσης  $\alpha$ , ως μέσο υπολογισμού της καταπόνησης που προκαλεί το κύμα πίεσης που μεταδίδεται δια μέσου ενός ορίου (πρακτικά εδώ, η δια-τομεακή περιοχή) μεταξύ δύο στερεών υλικών. Η τιμή του μπορεί να είναι μηδέν (πλήρη ανάκλαση του κύματος) έως και ένα (πλήρη μετάδοση). Θα ισχύει

$$\alpha = \frac{A_t}{A_i} \quad (2-59)$$

όπου, το αρχικό διαδιδόμενο σήμα (incident) και το ανακλώμενο(reflected) σήμα προκαλούν παραμόρφωση ως

$$A_i, A_r$$

αντίστοιχα, κατ' απόλυτες τιμές (εφόσον η φορά τους είναι αντίθετη). Ανάλογα, μπορεί να οριστεί και ο συντελεστής ανάκλασης  $\beta$

$$\beta = 1 - \alpha$$

ως δείγμα, του ποσοστού του αρχικού κύματος που ανακλάται στη δια-τομεακή περιοχή. Προσδιορίζοντας, δηλ. τι ποσοστά του σήματος θέλουμε να ανακλώνται ή να εκπέμπονται, λαμβάνεται σημαντική γνώση για τη συμπεριφορά του κύματος. Στην περίπτωση του

παραδείγματος της εικόνας **2-11**, και πρακτικά ανάλογα σε μια διάταξη Kolsky, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις

- Ποσοστό του αρχικού κύματος που εισέρχεται στο ενθυλακωμένο δείγμα

$$\alpha_{12} = \frac{2s_1(\rho c)_2}{s_1(\rho c)_1 + s_2(\rho c)_2} \quad (2-60)$$

- Ποσοστό του εκπεμπόμενου κύματος παραμόρφωσης που εισήλθε στο δείγμα και τελικώς εκπέμπεται στο 2<sup>ο</sup> στερεό (ράβδο πίεσης στη συσκευή Kolsky)

$$\alpha_{23} = \frac{2s_2(\rho c)_3}{s_2(\rho c)_2 + s_3(\rho c)_3} \quad (2-61)$$

### 2.3.3.2 Χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης

Έχοντας εκφράσει τους συντελεστές μετάδοσης σήματος της όλης διαδικασίας μέτρησης ο ερευνητής μπορεί να κατευθύνει το αποτέλεσμα των εξισώσεων **(2-60)**, **(2-61)**, ούτως ώστε η συμπεριφορά των σημάτων κατά τη μέτρηση να βελτιωθεί.

Μια τέτοια, πρώτη βελτίωση συμπεριφοράς, που μπορεί με τον τρόπο αυτό να γίνει [2], είναι η επίτευξη ίδιου, ή τουλάχιστον παρόμοιου, μεγέθους ανακλώμενου (Reflected) κύματος με το τελικώς μεταδιδόμενο (Transmitted) κύμα. Συνήθως, το τελικώς μεταδιδόμενο κύμα είναι μικρότερο, κατά μέτρο, από το ανακλώμενο, κατά τη διάρκεια μέτρησης με συσκευή Kolsky. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε αρκετά υλικά μικρής μηχανικής αντίστασης, η τιμή του τελικώς μεταδιδόμενου κύματος να τόσο μικρή, άρα ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N) να είναι τόσο μικρός, ούτως ώστε το τελικό σήμα εξόδου να μην μπορεί να ανιχνευτεί και να επεξεργαστεί. Ένας τρόπος λοιπόν βελτίωσης της ευρωστίας του τελικώς μεταδιδόμενου σήματος, είναι να επιλεγεί κατάλληλη διάμετρος δείγματος ούτως ώστε, με τη προϋπόθεση φυσικά ακριβώς ίδιων ράβδων πίεσεως, το ανακλώμενο και το τελικώς μεταδιδόμενο σήμα να έχουν ίδιο μέτρο. Αυτό οδηγεί σε περίπου ίδιο λόγο σήματος προς θόρυβο για τα δύο σήματα. Όπου

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{(Magnitude \_ of \_ Signal)^2}{(Magnitude \_ of \_ Noise)^2} \right] \quad (2-62)$$

Αν δε γίνει σωστή επιλογή διαμέτρου δείγματος, τα επίπεδα θορύβου στο τελικώς μεταδιδόμενο σήμα θα είναι υψηλά και η διαφορά των λόγων σήματος προς θόρυβο των δύο σημάτων θα διαφέρουν κατά πολύ, έως ακόμα και 25dB [2].

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις **(2-60)**, **(2-61)**, προκύπτει ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης



$a_{13}$

πρακτικά, το ποσοστό του αρχικού παλμού Incident που μεταδόθηκε ως τελικώς Transmitted

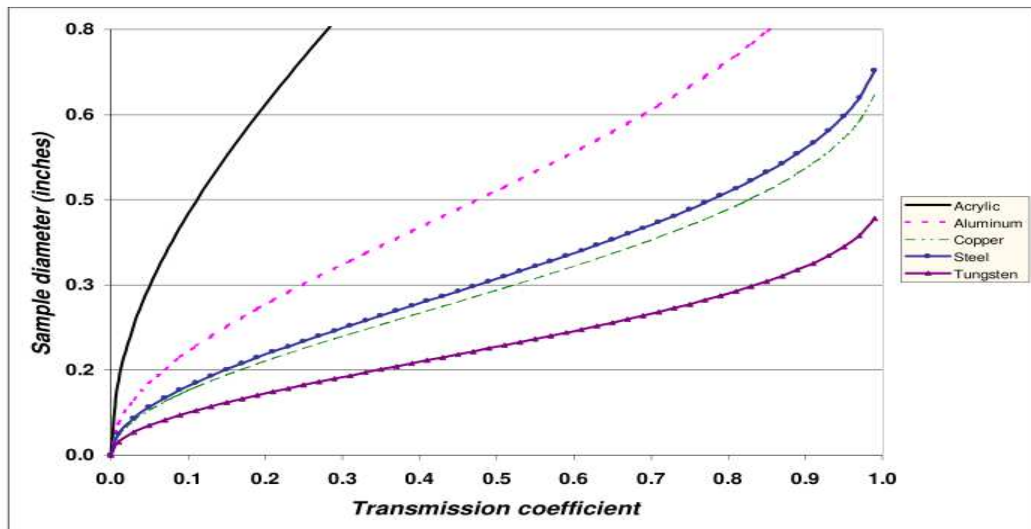
από την Incident ράβδο 1 στην Transmission 3 (υπενθύμιση, 2 ορίζεται το δείγμα), ως προς διάμετρο δείγματος

$D_{sample}$

λαμβάνεται [2]

$$D_{sample} = \frac{D_{Pressure\_Bar} \sqrt{(\rho C)_{Pressure\_Bar}} \cdot \sqrt{(2\sqrt{(1-a_{13})} + a_{13} - 2)}}{\sqrt{a_{13}} \sqrt{-(\rho C)_{sample}}} \quad (2-63)$$

αν και η μορφή της τελευταίας εξίσωσης είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, μπορεί αυτή να υποστεί επεξεργασία, είτε μέσω υπολογισμού με πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (επί παραδείγματι, Matlab), είτε με χρήση έτοιμων διαγραμμάτων προηγούμενων ερευνών, όπως το παρακάτω [2]



**Σχήμα 2-12.** Εξάρτηση διαμέτρου δείγματος από το συντελεστή μετάδοσης  $a_{13}$ , για διάφορα υλικά [2]

Αυτό που παρατηρείτε είναι ότι στην εξίσωση (2-63), όσο η διάμετρος δείγματος μειώνεται τόσο αυξάνει τα μέτρο του ανακλώμενου παλμού, αφού για πολύ μικρή διάμετρο δείγματος τότε

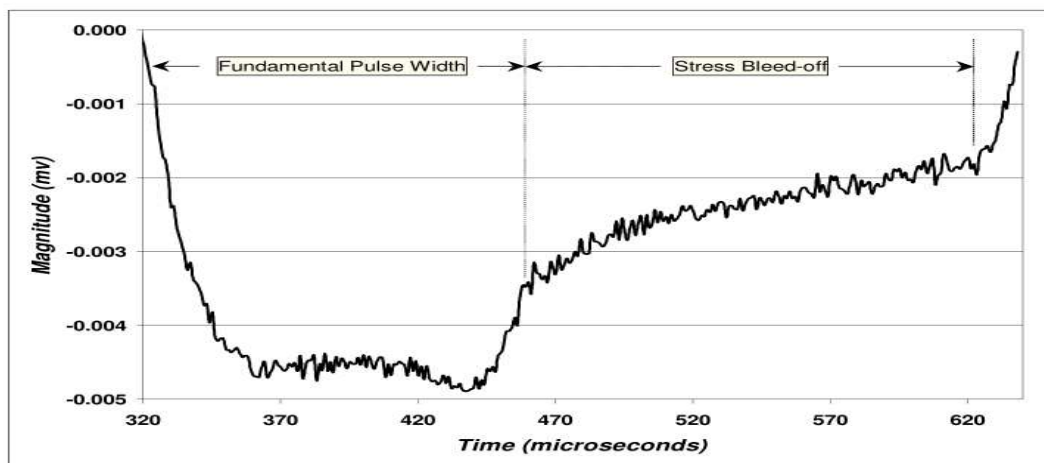
$$a_{13} \rightarrow 0 \quad (2-64)$$

επιλέγοντας

$$a_{13} = 0.5 \quad (2-65)$$

επιτυγχάνεται το μέτρο του παλμού Reflected να είναι ίσο με το μέτρο του παλμού Transmitted. Τότε τα επίπεδα θορύβου στο τελικώς μεταδιδόμενο σήμα είναι τα ελάχιστα δυνατά. Βέβαια, όπως φαίνεται και στο σχήμα (2-12), αυτή η διαδικασία επιλογής διαμέτρου δείγματος προς βελτίωση της ποιότητας σήματος, δεν μπορεί να ακολουθηθεί ούτως ή άλλως σε ορισμένες περιπτώσεις. Σε υλικά όπως τα ακρυλικά (Plexiglas, πολυκαρβονικά Lexan και άλλα), με πολύ χαμηλή τιμή μηχανικής αντίστασης, ο συντελεστής αυτός μετάδοσης είναι πάντα αρκετά μικρότερος του 0.5, δηλαδή οι τελικές τιμές μετρήσης με τη συσκευή θα έχουν ούτως ή άλλως σημαντικά σφάλματα.

Στη περίπτωση λοιπόν των «μαλακών» υλικών, δηλαδή υλικών με πολύ μικρή μηχανική αντίσταση, όπως τα ακρυλικά που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο, είναι δεδομένα τα σημαντικά σφάλματα στη μέτρηση. Ωστόσο, μπορεί ν' ακολουθηθεί μια άλλη διαδικασία μετατροπής των παλμών μέσω κατάλληλου ορισμού της διαμέτρου ράβδου, βασισμένη πάλι στον ορισμό των επιμέρους συντελεστών μετάδοσης. Αυτή μπορεί να βελτιώσει κάπως τη ποιότητα των μετρήσεων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των «μαλακών» υλικών, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γενικά σε κάθε μέτρηση με συσκευή Kolsky, όπου είναι δυνατό. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται ένα αρκετά τυπικό παράδειγμα τελικού Transmitted παλμού σε έλεγχο υλικού τύπου Lexan [2]



**Σχήμα 2-13.** Παλμός παραμόρφωσης τελικής μετάδοσης (Transmission) για δείγμα τύπου Lexan[2]

Αναγνωρίζονται δύο περιοχές, τη βασική περιοχή εύρους του παλμού (Fundamental Pulse Width region) και τη περιοχή «διαρροής» καταπόνησης του παλμού (Stress Bleed-off region). Η πρώτη περιοχή, έχει συνολική χρονική διάρκεια ίση με τη χρονική διάρκεια της αρχικής κρούσης. Η δεύτερη περιοχή δημιουργείται εξαιτίας της «παγίδευσης» του κύματος στο δείγμα. Δηλαδή, αυτό δεν μεταπίπτει άμεσα στην τελική Transmission ράβδο πίεσης, αλλά σταδιακά. Για υλικά δείγματος με μηχανική αντίσταση πολύ μικρότερη αυτής των

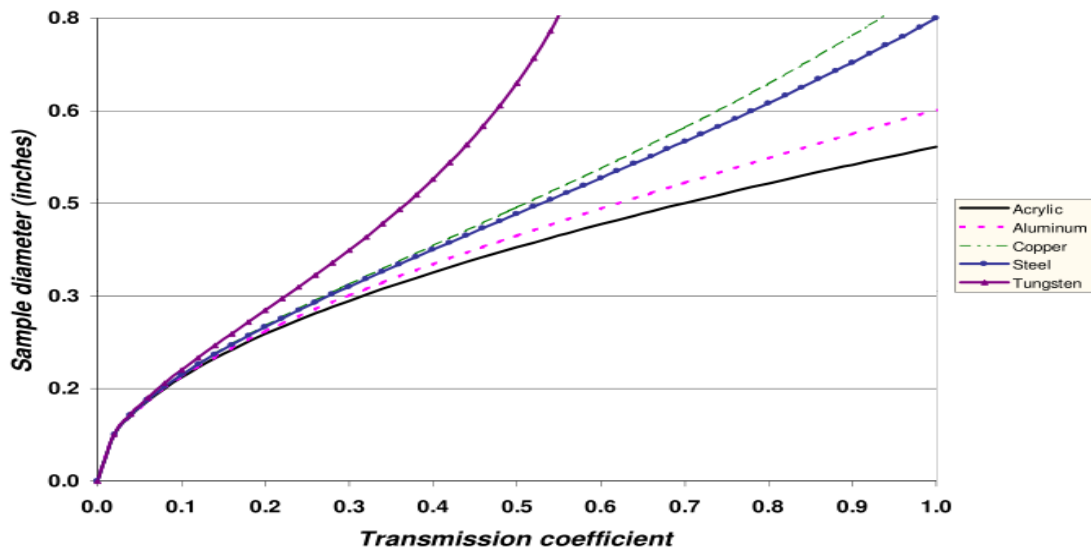
ράβδων πίεσεως, το φαινόμενο είναι πολύ πιο έντονο, και το σήμα εμποδίζεται να διαδοθεί από το δείγμα στην Transmission ράβδο πίεσης. Για τον προσδιορισμό του πόσο έντονο θα είναι το φαινόμενο αυτό, και πόσο μεγάλη θα είναι η περιοχή αυτή, πρακτικά, αλλοίωσης του σήματος, γίνεται χρήση της έκφρασης (2-61) για το συντελεστή μετάδοσης σήματος από το δείγμα στην Transmission bar [2]

$$\alpha_{23} = \frac{2s_2(\rho c)_3}{s_2(\rho c)_2 + s_3(\rho c)_3} \quad (2-61)$$

Η σχέση αυτή, για κυλινδρικού τύπου και γνωστού υλικού δείγματος και γνωστής διατομής και υλικού ράβδων πίεσεως, τελικώς [2] οδηγεί στη σχέση

$$D_{sample} = \frac{D_{Pressure\_Bar} \sqrt{a_{23}} \sqrt{-(\rho C)_{Pressure\_Bar}}}{\sqrt{(a_{23}(\rho C)_{sample} - 2(\rho C)_{Pressure\_Bar})}} \quad (2-66)$$

Πάλι, σχεδιάζοντας τη συμπεριφορά του γραφήματος διαμέτρου δείγματος συναρτήσει του συντελεστή μετάδοσης  $\alpha_{23}$  μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ή χρησιμοποιώντας δοθέντα διαγράμματα πρότερων ερευνών



**Σχήμα 2-14.** Διάμετρος δείγματος συναρτήσει του συντελεστή μετάδοσης  $\alpha_{23}$  για διάφορα υλικά [2]

Διαπιστώνεται άμεσα ότι μικρή διάμετρο δείγματος συνεπάγεται χαμηλή μετάδοση σήματος, δηλαδή το κύμα παραμένει περισσότερη ώρα στο δείγμα προτού τελικώς μεταδοθεί στην Transmission ράβδο πίεσεως. Το βέλτιστο λοιπόν στη περίπτωση αυτή, είναι όταν ο χρόνος «διαρροής» στο δείγμα είναι μηδενικός, όταν δηλαδή

$$a_{23} = 1$$

Στη πράξη, αυτό είναι σχεδόν απίθανο να συμβαίνει. Το φαινόμενο «διαρροής» εμφανίζεται πάντα, εντονότερο όταν η διάμετρος δείγματος είναι πολύ μικρή και όταν η μηχανική αντίσταση του δείγματος είναι επίσης πολύ χαμηλότερη αυτής των ράβδων πίεσεως. Αυτό που γίνεται είναι επιλογή διαμέτρου δείγματος ούτως ώστε το δυνατόν περισσότερο

$$a_{23} \rightarrow 1 \quad (2-67)$$

Και παράλληλα, ο συντελεστής συνολικής μετάδοσης να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα του 0.5

$$a_{13} - 0.5 \rightarrow 0^+ \quad (2-68)$$

Συνοψίζοντας, παρατηρείτε ότι η επιλογή κατάλληλης διαμέτρου δείγματος έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα μετάδοσης του κύματος καταπόνησης και στην επίδραση του θορύβου. Η διαδικασία επιλογής διαμέτρου δείγματος, γίνεται με βάση ήδη προσδιορισμένες τις ιδιότητες των ράβδων πίεσεως και βάση επιθυμητές τιμές των επιμέρους συντελεστών μετάδοσης του σήματος. Πολλές φορές, αυτές οι επιθυμητές τιμές απέχουν κατά πολύ από τις τελικώς προκύπτουσες από τις εξισώσεις (2-62), (2-66). Τότε, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, ή με αλλαγή τύπου υλικού ή/και αλλαγή της διαμέτρου των ράβδων.

### **2.3.4 Λοιπά χαρακτηριστικά κατασκευής των ράβδων πίεσης**

Η κατασκευή των ράβδων πίεσεως, όπως και κάθε άλλο τμήμα της συσκευής, πρέπει να γίνει με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και προσήλωση στις διαστάσεις, συνδεσμολογίες και οδηγίες που αναφέρονται στα όποια συγκεκριμένα σχέδια και εγχειρίδια κατασκευής υπάρχουν. Τα περιθώρια απόκλισης πραγματικών διαστάσεων με τις διαστάσεις σχεδίου πρέπει να είναι εξαιρετικά μικρά. Η γενίκευση της πρότασης που γίνεται στο [12] για το σχεδιασμό της διαμέτρου σωλήνα εκτόξευσης του gas gun, δηλαδή ένα εύρος ανοχής απόκλισης από τις διαστάσεις σχεδίου 0.001 – 0.008 in, ήτοι 0.254 – 2.032 mm, είναι επαρκής για τα περισσότερα σενάρια σχεδίασης, αφού προτείνεται στο εξαιρετικά κρίσιμο αυτό εξάρτημα για τον έλεγχο υλικών αρκετά ευπρόσβλητων από θόρυβο (πολυμερή) κατά τις μετρήσεις. Η ακρίβεια κατασκευής βέβαια έχει άμεσο αντίκτυπο και στο κόστος των εξαρτημάτων. Από εκεί και πέρα συναρτήσει των οικονομικών δεδομένων, ο ίδιος ο ερευνητής καλείται να επιλέξει πόσο μικρά θα είναι τα περιθώρια ανοχών.

Επιπρόσθετα [11], για την σωστή λειτουργία της συσκευής, οι ράβδοι πίεσεως πρέπει να είναι εντελώς φυσικά ευθείες κατά το μήκος τους, ούτως ώστε να μην υπάρχουν σκεδάσεις του κύματος, και να μπορούν να μετακινηθούν ελεύθερα, δηλαδή να μην υπάρχουν σφηνώματα, μαγκώματα και ανάλογα εμπόδια στην κατασκευή – διάδρομο κίνησης, ούτε ατέλειες όπως εξογκώματα σ' αυτές. Πρέπει επίσης η τοποθέτηση τους στην κατασκευή – διάδρομο κίνησης τους να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι τελείως ευθυγραμμισμένες,

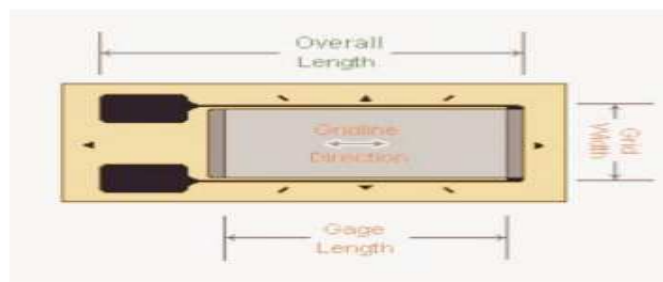
μεταξύ τους, με το σωλήνα εκτόξευσης το gas gun και το σημείο τοποθέτησης του δείγματος. Η διαδικασία αυτή της ευθυγράμμισης των ράβδων, απαιτείται τόσο για ομοιόμορφη και μόνο - αξονική κυματική διάδοση μεταξύ των ράβδων, αλλά και μόνο - αξονική συμπίεση του δείγματος. Πάλι, η ευθυγράμμιση αυτή δεν πρέπει να γίνεται με δεσίματα και γενικά πιθανά εμπόδια για την κίνηση των ράβδων, ή με το ίσιωμα στραβών ράβδων, αλλά μόνο με εντελώς ευθείες ράβδους και τρόπους που εξασφαλίζουν την ελεύθερη κίνηση τους. Τα στηρίγματα των ράβδων στο διάδρομο κίνησης δεν πρέπει και αυτά να εμποδίζουν τη κίνηση. Ως προς την ευθυγράμμιση των ράβδων και τη δημιουργία στηριγμάτων πάνω στο διάδρομο, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες λύσεις, ενδεικτικά ο ερευνητής μπορεί να ανατρέξει στο [17], όπου σε κατασκευή συσκευής Kolsky, προτείνεται διαδικασία ευθυγράμμισης των ράβδων με χρήση συσκευής επόπτευσης laser, αλλά και διαδικασία κατασκευής και τοποθέτησης των στηριγμάτων.

## 2.4 Αισθητήρες μέτρησης μηχανικής παραμόρφωσης

### 2.4.1 Τύπου ηλεκτρικής αντίστασης (Strain Gages)

Στην ενότητα αυτή, εξετάζονται οι απαιτήσεις που προκύπτουν στο ηλεκτρονικό κομμάτι της συσκευής, εννοώντας τις διατάξεις αισθητήρων μέτρησης της παραμόρφωσης στις ράβδους πίεσεως και η επικοινωνία αυτών με συσκευές μετά-επεξεργασίας, όπως για παράδειγμα ένας παλμογράφος.

Ο πλέον κοινός τύπος αισθητήρα μέτρησης της μηχανικής παραμόρφωσης είναι ο τύπου ηλεκτρικής αντίστασης μετρητής (strain gage). Λόγω του μικρού του μεγέθους και της ευκολίας εγκατάστασής του, ο συγκεκριμένος τύπος αισθητήρων καθίσταται εξαιρετικά ευέλικτη και ελκυστική λύση σε πλήθος εφαρμογών και, στην περίπτωση της συσκευής Kolsky, αποτελεί τη σχεδόν αποκλειστική επιλογή. Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός τέτοιου τύπου αισθητήρα, μονού στοιχείου, είναι το παρακάτω



**Σχήμα 2-15.** Ομο-αξονικός αισθητήρας παραμόρφωσης τύπου ηλεκτρικής αντίστασης (Measurements Group, αναδημοσίευση από [2])

## 2.4.2 Θέματα φυσικής συμπεριφοράς αισθητήρων

Όταν το μετρητικό αυτό στοιχείο παραμορφώνεται, με την εφαρμογή μηχανικής παραμόρφωσης στην *i/o* ράβδο που ευρίσκεται τοποθετημένο, δημιουργείται τάση στα άκρα του, ανάλογη της κατά μήκος παραμόρφωσης αυτής. Υπάρχουν τρεις, κυρίως, προϋποθέσεις που πρέπει να ελεγχθούν [2] κατά την επιλογή τέτοιων αισθητήριων στοιχείων, για εφαρμογή σε διατάξεις Hopkinson

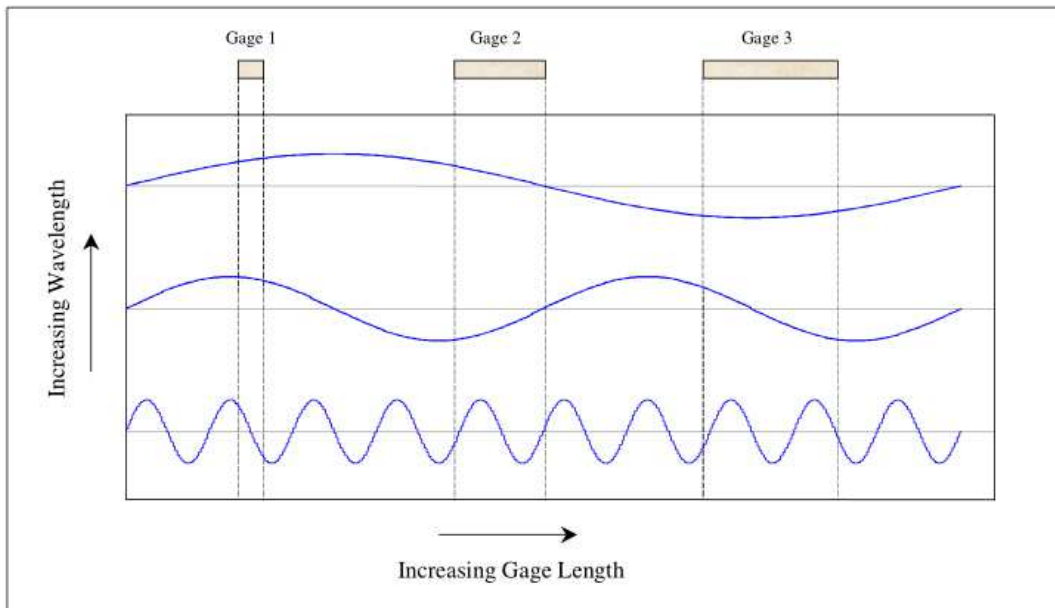
- Η χωρική ανάλυση σχετίζεται με τους παλμούς σε βαθμό ανάλογο του μήκους του στοιχείου

- Η ικανότητα του στοιχείου να «εντοπίζει» το σήμα, ή ο χρόνος ανύψωσης, πρέπει να είναι γνωστός

- Η ανάλυση συχνότητας χάνεται για μήκη κύματος κοντά στο μήκος του στοιχείου

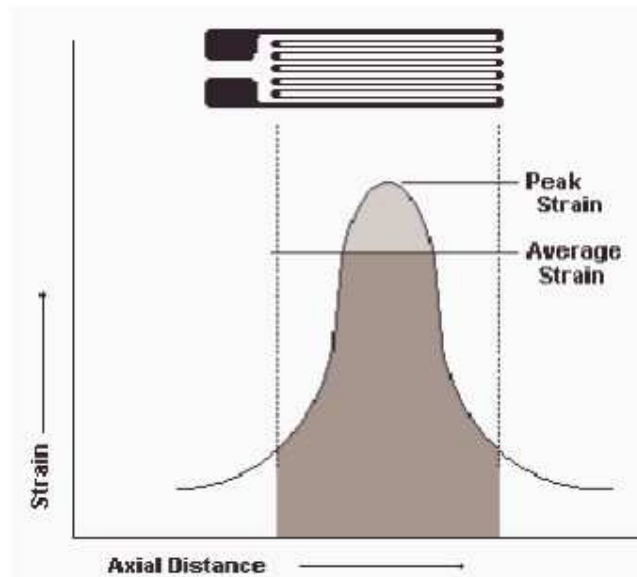
Το 1<sup>ο</sup>, έχει να κάνει με το φαινόμενο που παρουσιάζεται, κατά το οποίο στο αισθητήριο μειώνεται η ικανότητα του να αναγνωρίζει ένα κύμα χωρικά όταν το μήκος κύματος είναι κοντά στο μήκος του στοιχείου. Όσο το μήκος του στοιχείου μεγαλώνει, τόσο μεγαλώνει και η ικανότητα του να αναγνωρίζει σωστά τη χωρική μορφή του κύματος. Συνεπώς πρέπει το συνολικό μήκος του παλμού χρονικά να είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος του αισθητηρίου.

Η τιμή εξόδου ενός αισθητηρίου τύπου strain gage, τείνει να είναι μια μέση τιμή των μηχανικών παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα σε όλο το μήκος του. Για να γίνει αυτό περισσότερο κατανοητό μπορεί να παρουσιαστεί ένα παράδειγμα [2]. Έστω λοιπόν τρεις διαφορετικές κυματομορφές και τρία διαφορετικού μήκους strain gages, όπως στην παρακάτω εικόνα



**Σχήμα 2-16.** Κυματομορφές και αισθητήρες strain gages, διαφορετικού μήκους [2]

Ας κρατήσουμε το προηγούμενο δεδομένο, ότι η τιμή παραμόρφωσης κάθε αισθητηρίου θα είναι ίση με τη μέση τιμή παραμόρφωσης σε όλο το μήκος του στοιχείου. Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μεταβολής της κατά μήκος του αισθητηρίου, τόσο εγγύτερα θα είναι η τιμή της στην πραγματική τιμή καταπόνησης που έχουμε στην προς έλεγχο ράβδο, κάθε χρονική στιγμή. Έστω η ειδική περίπτωση όπου το εύρος τιμών κυματομορφής ισούται με το μήκος του αισθητηρίου (2<sup>ο</sup> από αριστερά στοιχείο, 1<sup>η</sup> από κάτω κυματομορφή στο σχήμα). Η μέση τιμή της κυματομορφής είναι μηδέν, και αυτή θα είναι η έξοδος του αισθητήρα, αλλά η πραγματική τιμή παραμόρφωσης είναι προφανώς μη μηδενική. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει στην περίπτωση αυτή για κάθε κύμα με μήκος κύματος ακριβές πολλαπλάσιο του μήκους του αισθητηρίου. Όσο το μήκος κύματος μικραίνει, το ίδιο μικραίνει η ικανότητα του αισθητηρίου να βρίσκει επακριβώς τη πραγματική μέγιστη παραμόρφωσης εξαιτίας αυτού ακριβώς του φαινομένου «μέσης τιμής» κατά μήκος του στοιχείου. Συνεπώς, στη περίπτωση αυτή η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης θα μετράτε συνεχώς πολύ μικρότερη της πραγματικής. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει γραφικά το φαινόμενο. Όπως μπορεί να ιδωθεί από αυτό, όσο πιο γρήγορος ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης (πχ μικρό μήκος κύματος) τόσο λιγότερο το αισθητήριο μπορεί να αναγνώσει σωστά τις μέγιστες τιμές αυτής.



**Σχήμα 2-17.** Φαινόμενο μέσης τιμής στη μέτρηση μέγιστης παραμόρφωσης από τον αισθητήρα (Measurements Group Inc., αναδημοσίευση από [2])

Για αρμονικά κύματα που περνούν από ένα strain gage, η μέγιστη τιμή εξόδου από το αισθητήριο θα είναι πάντα συμπίπτουσα της πραγματικής μέγιστης τιμής παραμόρφωσης όταν αυτή λαμβάνει χώρα ακριβώς στη μέση της διόδου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα (2-

17). Για να βρεθεί κλειστή λύση για της μέγιστης τιμής αυτής, το αρμονικό κύμα πρέπει να ολοκληρωθεί στο μήκος του strain gage. Αναγνωρίζοντας ότι αυτή η κορυφή/μέγιστη τιμή συμπίπτει με το κέντρο του αισθητήρα, η παρακάτω μαθηματική έκφραση υπολογίζει την μέγιστη μετρούμενη παραμόρφωση, μέσω των μετρήσεων του στοιχείου [2].

$$\varepsilon_{\text{Reported}} = \frac{C_0}{L} \int_{-\frac{L}{2C_0}}^{\frac{L}{2C_0}} \cos(2\pi ft) dt \quad (2-69)$$

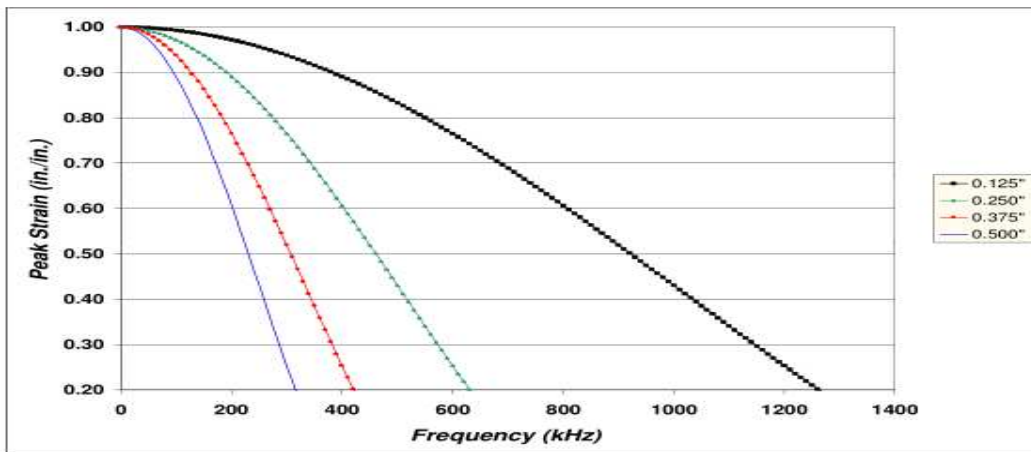
Πρέπει πάλι να ληφθεί υπόψη, ότι η μέγιστη αναφερόμενη έξοδο από το αισθητήριο είναι πάντα μικρότερη της πραγματικής μέγιστης τιμής. Στο προηγούμενο τύπο συμβολίζονται η ταχύτητα κύματος, το μήκος αισθητήρα και η συχνότητα λειτουργίας ως

$$C_0, L, f$$

αντίστοιχα. Υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα στην (2-69) λαμβάνουμε τελική μορφή της μετρούμενης τιμής παραμόρφωσης από τον αισθητήρα

$$\varepsilon_{\text{Reported}} = \frac{C_0 \sin\left(\frac{\pi Lf}{C_0}\right)}{\pi Lf} \quad (2-70)$$

Παρατηρώντας την εξίσωση (2-70) , η μετρούμενη παραμόρφωση ακολουθεί τη μορφή μιας sinc συνάρτησης. Γραφήματα μέγιστης παραμόρφωσης συναρτήσει της συχνότητας, για είσοδο κύματα αρμονικής μορφής πραγματικής τιμής μονάδας, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό βλέπουμε πως οι μικρότεροι σε μήκος αισθητήρες καταγράφουν την πραγματική τιμή της παραμόρφωσης με μεγαλύτερη ακρίβεια, όσο η συχνότητα του κύματος μεγαλώνει.



Σχήμα 2-18. Μέτρηση μέγιστης παραμόρφωσης μέσω strain gages, διάφορων τιμών μήκους [2]



Στην περίπτωση των DC κυμάτων (σταθερή συχνότητα) η καταγραφή από τον αισθητήρα είναι πάντα, πρακτικά, ακριβής. Όσο όμως αυξάνεται η συχνότητα του κύματος, τόσο περιορίζεται η πραγματική τιμή της παραμόρφωσης. Και στην περίπτωση DC κύματος, οι μικρότερου μήκους strain gages παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση, ανεξαρτήτου συχνότητας. Το φαινόμενο μέσης τιμής που είδαμε παραπάνω, επηρεάζει και εδώ την έξοδο του αισθητήρα, όσο μεγαλώνει η συχνότητα του κύματος εισόδου. Η έξοδος από την strain gage θα είναι μηδενική όταν το μήκος κύματος είναι ίσο με το μήκος του αισθητήρα.

Στην επιλογή αισθητήρα strain gage, παίζει λοιπόν ρόλο η επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης στη μέγιστη τιμή μέτρησης και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του ίδιου του αισθητήρα. Και τα δύο μεγέθη είναι σε άμεση εξάρτηση με το μήκος του αισθητήρα, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Σύμφωνα με το Measurements Group[2], «Strain gages με μήκος μικρότερο των 0.125 in (3.175 mm) τείνουν να παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση, ειδικά σε σχέση με την μέγιστη επιτρεπόμενη επιμήκυνση, την ευστάθεια σε στατική καταπόνηση και την αντοχή όταν υποβάλλονται σε εναλλασσόμενους κύκλους καταπόνησης.». Επιλύοντας την εξίσωση (2-71), με μήκος 3.175 mm και ταχύτητα κύματος σε μέσο διάδοσης το χάλυβα, επιτυγχάνεται η μέγιστη σωστά μετρούμενη συχνότητα κύματος. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται συχνότητα κύματος πίεσης μικρότερη των 150 KHz για να υπάρξουν επαρκώς ακριβείς μετρήσεις.

Όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο αυτή, η ακρίβεια μέτρησης μέσω του αισθητήρα strain gage περιορίζεται για μήκη κύματος κοντά στο μήκος του αισθητήρα (gage length). Υπάρχουν όμως και άλλες αιτίες, εξαρτώμενες από την ίδια τη φυσική πίσω από την κατασκευή και τη λειτουργία του αισθητήρα, που οδηγούν σε αλλοίωση των μετρήσεων του. Υπάρχει το φαινόμενο «παραθύρωσης» σε όλες τις μετρήσεις μέσω strain gage που μεταβάλλει τον πραγματικό παλμό καταπόνησης. Πιο απλά, το μήκος του αισθητήρα (gage length) ορίζει ένα ορθογώνιο παράθυρο, εντός του οποίου μεταβάλλεται το σχήμα του πραγματικού παλμού παραμόρφωσης. Ωστόσο, μπορούμε να ακολουθήσουμε διαδικασία υπολογισμού του φαινομένου της αλλοίωσης στη μέτρηση [2]. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην συνέλιξη σημάτων. Κατ' αρχάς, υπενθυμίζουμε ότι η συνέλιξη δυο σημάτων στο χρόνο ισούται με πολλαπλασιασμό αυτών στο πεδίο της συχνότητας. Και όμοια, ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του γινομένου δυο σημάτων στο πεδίο της συχνότητας, ισούται με την συνέλιξη αυτών στο πεδίο του χρόνου. Ας υποθέσουμε τετραγωνικό παλμό με

$$B, \frac{P_L}{2}$$

μέτρο και διάρκεια αντίστοιχα, μετρούμενος μέσω ορθογώνιου παραθύρου σήματος με

$$A, \frac{G_L}{2}$$

μέτρο και διάρκεια αντίστοιχα, και οι δύο παλμοί έχουν περίοδο T. Ο μετασχηματισμός Fourier των δύο αυτών σημάτων ορίζεται για το καθένα ως

$$Pulse(\omega_o) = \frac{BP_L}{T} SINC\left(\frac{n\omega_o P_L}{2}\right) \quad (2-71)$$

$$Window(\omega_o) = \frac{AG_L}{T} SINC\left(\frac{n\omega_o G_L}{2}\right) \quad (2-72)$$

Στο πεδίο της συχνότητας, η συνέλιξη των σημάτων αυτών θα είναι ίση με

$$\varepsilon_{out}(\omega_o) = Window(\omega_o) * Pulse(\omega_o) \quad (2-73)$$

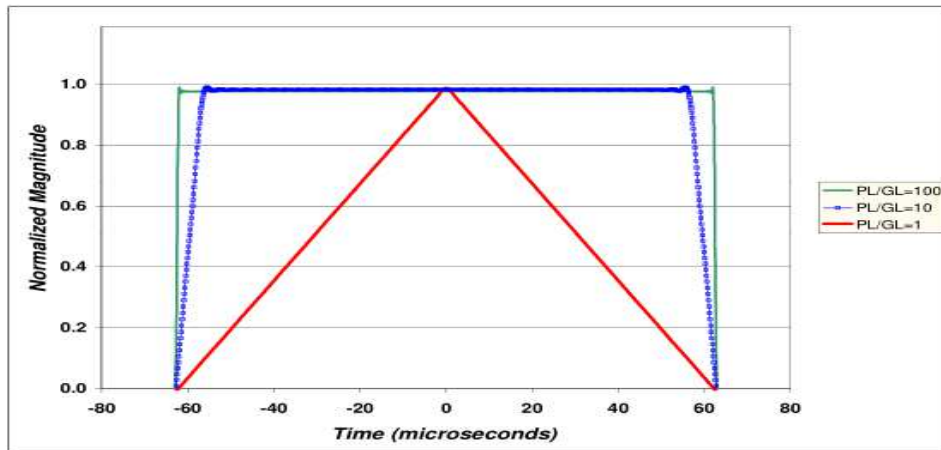
Στο πεδίο του χρόνου, υπολογίζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της παραπάνω εξίσωσης ισχύει

$$\varepsilon_{out}(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{4AB \sin\left(\frac{G_L n \omega_o}{2}\right) \sin\left(\frac{P_L n \omega_o}{2}\right)}{T^2 n^2 \omega_o^2} \exp(-in\omega_o t) \quad (2-74)$$

Σχεδιάζοντας την εξίσωση (2-74), το φαινόμενο «παραθύρωσης» και αλλοίωσης του αρχικού σήματος από τον αισθητήρα μπορεί να εποπτευθεί. Αν και η παραπάνω εξίσωση είναι εξαιρετικά πολύπλοκη στην ανάλυση της, παρέχει ένα μέσο ελέγχου και πρόβλεψης της τελικής μέτρησης μέσω του αισθητηρίου στοιχείου, συναρτήσει του μήκους της strain gage και του μήκους του παλμού

$$G_L, P_L$$

αντίστοιχα. Το παρακάτω σχήμα δίνει το γράφημα τελικής εξόδου μέτρησης για διάφορες αντιστοιχίες μήκους αισθητηρίου και μήκους αρχικού παλμού.



**Σχήμα 2-19.** Μορφή τελικών σημάτων εξόδου από strain gages, σε σχέση με το μήκος αρχικού τετραγωνικού παλμού PL και λειτουργικό μήκος αισθητήρα GL [2]

Στο παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι όλα αυτά τα σήματα εξόδου παρουσιάζουν αυξημένο χρόνο ανόδου, κάτι που δεν είναι χαρακτηριστικό του αρχικού τετραγωνικού παλμού. Αυτός ο επαυξημένος χρόνος ανόδου οφείλεται στη περίοδο του χρόνου από τη στιγμή που το σήμα εισέρχεται στον αισθητήρα μέχρι τη στιγμή της εξόδου από αυτόν. Πριν τη στιγμή εισόδου του σήματος στο αισθητήριο, η έξοδος από αυτό είναι μηδέν. Όσο ο παλμός αρχίζει να καταγράφεται από τον αισθητήρα, τόσο όλο και περισσότερο τμήμα του λειτουργικού μήκους του αισθητήρα παραμορφώνεται, μέχρι του σημείου που έχει παραμορφωθεί σε όλο το λειτουργικό του μήκος. Στην περιοριστική περίπτωση όπου το λειτουργικό μήκος του αισθητήρα ισούται με το μήκος του παλμού εισόδου, η μέγιστη τιμή παλμού επιτυγχάνεται να μετρηθεί μόνο μια χρονική στιγμή, τη μοναδική χρονική στιγμή όπου το παράθυρο του αισθητήρα και αυτό του παλμού συμπίπτουν επακριβώς.

Με γνωστή πλέον τη μέτρηση παραμόρφωσης από το αισθητήριο, διόρθωση του φαινομένου «παραθύρωσης» μπορεί να γίνει, διαιρώντας το μετασχηματισμό Fourier της μετρούμενης εξόδου με το μετασχηματισμό Fourier του παραθύρου μέτρησης του αισθητήρα, εφ' όσον αυτό είναι γνωστό από τον κατασκευαστή.

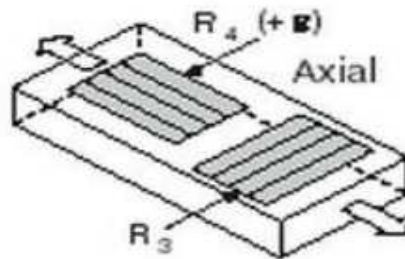
### **2.4.3 Τοποθέτηση και συνδεσμολογία**

Στη τοποθέτηση των αισθητήρων στις i/o ράβδους πίεσεως, αυτό που θα πρέπει κυρίως να ληφθεί υπόψη είναι το ότι σε αυτές το ένα άκρο τους είναι ελεύθερο (free end). Όταν ένα κύμα συναντά ελεύθερο άκρο κατά τη μετάδοσή του σε μια ράβδο, τότε ανακλάται πίσω στη ράβδο με μεταβολή των χαρακτηριστικών του, ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν στο άκρο αυτό. Στα ελεύθερα άκρα των ράβδων λοιπόν, αυτό που συμβαίνει είναι ανάκλαση αλλά και αύξηση της απόλυτης τιμής του κύματος. Δηλαδή, η μέτρηση της μηχανικής παραμόρφωσης στα ελεύθερα άκρα των ράβδων είναι λανθασμένη, αφού το κύμα έχει αντίθετη φορά του κύματος που διαδίδεται στο ράβδο, αλλά και αυξημένη από αυτό τιμή [2]. Συνεπώς, η τοποθέτηση των αισθητήρων πρέπει να γίνεται μακριά από τα ελεύθερα άκρα των ράβδων. Μια τυπική πρακτική, είναι η τοποθέτηση τους στο κατά μήκος μέσο της ράβδου [12].

Θα μπορούσε να υποθεθεί ότι δύο αισθητήρες, ένας τοποθετημένος στην Incident bar και ένας στην Transmission bar, και αυτοί συνδεδεμένοι απ' ευθείας σε συσκευή μετά-επεξεργασίας του σήματος, παλμογράφο ή H/Y μέσω κάρτας analog to digital, θα ήταν αρκετοί. Πλην όμως, άλλα φυσικά ζητήματα λειτουργίας, πέραν αυτών καθ' αυτών στη λειτουργία της αισθητήριας μονάδας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, απαιτούν διαφορετική προσέγγιση.

Έτσι, υπάρχει κατ' αρχάς το ζήτημα της υπερθέρμανσης του αισθητήρα. Με την εκτεταμένη χρήση του σε μια συσκευή εργαστηριακών μετρήσεων όπως η Kolsky, η θερμική καταπόνηση του αποτελεί σημαντικό παράγοντα μείωσης της διάρκειας ζωής του.

Παράλληλα, άμεση συνέπεια της θερμικής καταπόνησης είναι η πιθανή αλλοίωση της ακρίβειας των μετρήσεων του, πράγμα εξαιρετικά ανεπιθύμητο. Για την επίλυση του ζητήματος, διάφορα κυκλώματα απαγωγής θερμότητας μπορούν να υλοποιηθούν. Μια αρκετά δημοφιλή λύση είναι η χρήση ενός κυκλώματος Τεταρογέφυρας Τύπου 2 (Quarter Bridge type II) [12],[15].



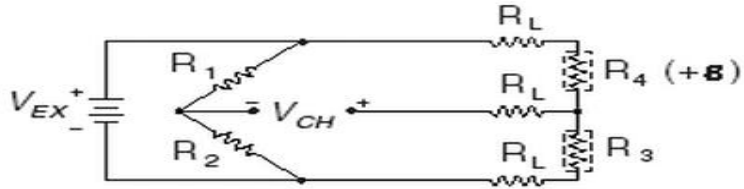
**Σχήμα 2-20** Συνδεσμολογία Quarter Bridge type II με strain gages αισθητήρες. Με R4 συμβολίζεται ο «ενεργός» μετρητικά αισθητήρας, με R3 ο αισθητήρας θερμικής απαγωγής [12].

Η συνδεσμολογία αυτή, χρησιμοποιεί μια strain gage για πραγματική μέτρηση της καταπόνησης στη ράβδο και μια strain gage όχι για μέτρηση, αλλά καθαρά για την απαγωγή θερμότητας από τον πρώτο αισθητήρα. Ο «ενεργός», μετρητικά, αισθητήρας τοποθετείται στην διεύθυνση της ράβδου, ενώ ο «μη ενεργός», κάθετα στο προηγούμενο και πλησίον του, θερμικά.

Παράλληλα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μπορεί να παρουσιαστεί το φαινόμενο να καμφθούν οι ράβδοι, με πιθανότερη αιτία την όχι σωστή ευθυγράμμιση τους. Αυτό επιφέρει επιπλέον μηχανική παραμόρφωση, η οποία και λανθασμένα θα επιδράσει στις μετρήσεις του αισθητήρα. Η επίδραση του φαινομένου αυτού εξομαλύνεται με την σύνδεση, αντί μιας μετρητικής αισθητήριας διάταξης, δύο σε παράλληλη σύνδεση, τοποθετούμενες αντί-διαμετρικά πάνω στη ράβδο[12],[15]. Έτσι σε περίπτωση καμπύλωσης της ράβδου, η μια μετρητική διάταξη θα παρουσιάσει αύξηση στις τιμές μέτρησης, η άλλη μείωση. Η μέση τιμή των μετρήσεων αυτών θα είναι η καθαρά μονο-αξονική μηχανική παραμόρφωση.

#### 2.4.4 Ενίσχυση σήματος

Η ενίσχυση της εξόδου τάσης από τον αισθητήρα, είναι επίσης απαραίτητη διαδικασία. Έτσι, αυξάνεται η ακρίβεια της μέτρησης του σήματος από το τελικό σύστημα συλλογής της πληροφορίας. Αυτό που ευρέως χρησιμοποιείται είναι κυκλώματα ενισχυτών τάσης, όπως είναι κυκλώματα γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης τάσης [12],[15].



**Σχήμα 2-21.** Κύκλωμα τύπου γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης της τάσης εξόδου από διάταξη strain gages τύπου Quarter Bridge type II [12][15]

Στο παράδειγμα της εικόνας (2-21) [15], οι αντιστάσεις R1 και R2 υλοποιούν το κύκλωμα ολοκλήρωσης ημι-γέφυρας, η R4 συμβολίζει τον «ενεργό» μετρητικά αισθητήρα σε συνδεσμολογία strain gages τύπου Quarter Bridge type II, η R3 τον μη «ενεργό». Για να μετατραπεί η ενισχυμένη έξοδο τάσης Vex σε μονάδες μηχανικής παραμόρφωσης, χρησιμοποιείται ο τύπος

$$strain(\varepsilon) = \frac{-4V_r}{GF(1+2V_r)} \left(1 + \frac{R_L}{R_g}\right) \quad (2-75)$$

Όπου GF = Gauge Factor, το ποσοστό της σχετικής αλλαγής στην ηλεκτρική αντίσταση του αισθητηρίου strain gage σε σχέση με την μηχανική παραμόρφωση (εκ του κατασκευαστή) και το Vr είναι το ποσοστό τάσης που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις μετατροπής τάσης σε μηχανική παραμόρφωση, οριζόμενο ως [15]

$$V_r = \frac{V_{ch}(strained) - V_{ch}(unstrained)}{V_{ex}} \quad (2-76)$$

## 2.5 Σχεδιασμός συστήματος εκτόξευσης

Το συνολικό σύστημα εκτόξευσης (Gas Gun) αποτελείται κυρίως από μια κλειστή δεξαμενή πεπιεσμένου αέρα, βαλβίδες, τη ράβδο Κρούστη και σωλήνα εκτόξευσης. Συνήθως, ο σωλήνας εκτόξευσης κατασκευάζεται από το ίδιο υλικό με τις i/o ράβδους και ράβδο Κρούστη, από υψηλής αντοχής μέταλλο, όπως είναι ο χάλυβας. Η διαδικασία κατασκευής του είναι, βασικά, η διάτρηση ομογενούς ράβδου του υλικού με το εσωτερικό να μπορεί να εισέλθει σ' αυτό η ράβδος Κρούστης, και να εφαρμόζει σχεδόν τέλεια στο εσωτερικό, με πολύ μικρές ανοχές διαμέτρου σε σχέση με τα όποια σχέδια κατασκευής, μερικά χιλιοστά του χιλιοστού [12]. Ο λόγος της επακριβούς αυτής συναρμολόγησης δεν είναι άλλος από την μείωση των απωλειών πίεσης από το μηχανισμό στο εξωτερικό χώρο. Αυτό πρέπει να

ισχύει και για λόγους ασφαλείας και κυρίως ώστε, σχεδόν, όλη η δοθείσα πίεση να χρησιμοποιείται για την εκτόξευση της ράβδου Κρούστη. Ανοχή στις σχεδιαστικές προδιαγραφές έως και μερικά εκατοστά του χιλιοστού μπορούν να μην επηρεάσουν, σημαντικά, τα αποτελέσματα, μειώνοντας όμως το κόστος κατασκευής [12]. Συνηθισμένη πρακτική επίσης είναι η προσθήκη στην έξοδο του σωλήνα εκτόξευσης, αισθητήριου μηχανισμού μέτρησης της ταχύτητας της ράβδου Κρούστη [14]. Ο μηχανισμός αυτός στη βασική του μορφή αποτελείται από δυο ζεύγη πηγής φωτός και φωτοκύτταρου, τοποθετημένων σε γνωστή απόσταση μεταξύ τους, το ένα ακριβώς στην έξοδο του σωλήνα εκτόξευσης, το άλλο ελάχιστα πιο μέσα στο εσωτερικό του. Όταν η ράβδος περάσει το πρώτο ζεύγος, ένα χρονόμετρο ξεκινά να μετρά και σταματάει όταν η ράβδος περάσει το δεύτερο φωτοζεύγος. Το πηλίκο της γνωστής εξ αρχής απόστασης των φωτοζεύγων δια του χρόνου που μέτρησε το χρονόμετρο, μας δίνει την ταχύτητα της ράβδου Κρούστη κατά την έξοδο της από το μηχανισμό εκτόξευσης.

Για την από-συμπύεση της δεξαμενής αέρα και την επιτάχυνση της ράβδου Κρούστη, χρησιμοποιείται μια γρήγορη σωληνοειδής βαλβίδα, παρέχοντας την απαιτούμενη σχεδόν στιγμιαία απελευθέρωση αέρα. Πάλι η αντικατάσταση της υψηλής ακρίβειας βαλβίδας, με σφαιρική βαλβίδα μικρότερης ταχύτητας, μπορεί να έχει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα, μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατασκευής [12].

Κατά την εκτόξευση της ράβδου Κρούστη, παρά τα παραπάνω μέτρα που μπορούν να ληφθούν, μοιραία ένα ποσοστό αέρα χάνεται, επειδή ακριβώς υπάρχει μια, μικρή, έστω διαφορά της διαμέτρου της ράβδου Κρούστη και του σωλήνα εκτόξευσης, ώστε η πρώτη να μπορεί να μετακινητέ ελεύθερα εντός του σωλήνα. Οι επαναλαμβανόμενες δοκιμές με διάφορα κατασκευασμένα πρωτότυπα και η καλύτερη εν γένει σχεδίαση μπορεί να βελτιώσει τη κατάσταση, πλην όμως αυτές οι διαδικασίες εννοείται πως πολλαπλασιάζουν το κόστος κατασκευής.

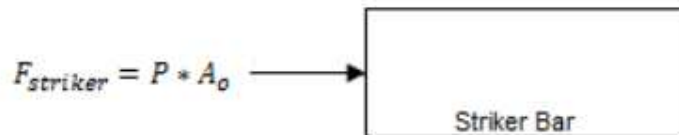
Η ράβδος Κρούστης κατασκευάζεται με διάμετρο ίδια με αυτή των *i/o* ράβδων πίεσεως (*incident bar* και *transmitted bar*). Συνήθως, το μήκος της επιλέγεται ως 20-30% του μήκους των ράβδων πίεσεως. Εναλλακτικά, του συμπιεσμένου αέρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μηχανισμό επιτάχυνσης και άζωτο.

Γενικά, το κυριότερο κριτήριο σχεδιασμού του μηχανισμού αυτού, είναι να υπολογίσουμε την απαιτούμενη πίεση αέρα για την επιτάχυνση της ράβδου Κρούστη, ώστε αυτή να φθάνει στην υψηλή ταχύτητα που χρειάζεται, αναλόγως το ρυθμό παραμόρφωσης του κύματος εισόδου που πρέπει να παραχθεί. Και αυτό, όσο το δυνατόν χρονικά γρηγορότερα και με την πίεση αυτή να παραμένει χαμηλή, κάτω από τα όποια όρια ασφαλείας μπορεί να τεθούν από τον ερευνητή. Υπάρχουν δύο μέθοδοι προσέγγισής για τους υπολογισμούς αυτούς [12]. Η μέθοδος Newton και η μέθοδος που προκύπτει από την αρχή διατήρησης

της ενέργειας. Παρακάτω αναλύονται οι δύο αυτές μέθοδοι, οι διάφορες σχέσεις φυσικής που απαιτούνται για τις αναλύσεις αυτές υπάρχουν περαιτέρω επεξηγούμενες στο [13].

### 2.5.1 Μέθοδος Newton

Εδώ, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα χρησιμοποιείται για να συσχετίσει τις δυνάμεις που επιδρούν στη ράβδο Κρούστη, με την επιτάχυνση της. Γίνονται οι υποθέσεις ότι η δύναμη που εφαρμόζεται στη ράβδο Κρούστη είναι σταθερή, μέχρι αυτή να φύγει από το σωλήνα εκτόξευσης, δηλαδή ομοίως η πίεση του αερίου είναι σταθερή, και ότι η επίδραση των τριβών και της αντίστασης του αέρα είναι αμελητέα. Η δύναμη που επενεργεί στη ράβδο Κρούστη μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της πίεσης που επενεργεί στη ράβδο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2-22.** Διάγραμμα δυνάμεων που επενεργούν στη ράβδο Κρούστη [12]

Ξεκινώντας από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα

$$\sum F = ma \quad (2-77)$$

Όπου, F οι δυνάμεις που επενεργούν στη ράβδο Κρούστη, m η μάζα της ράβδου Κρούστη, και a η επιτάχυνση της ράβδου. Από την πίεση που ασκείται ισχύει

$$F = P * A_o = ma \quad (2-78)$$

Η εξίσωση (2-78) μπορεί να γραφτεί σε συνάρτηση με τη ταχύτητα της ράβδου (η παράγωγος της ταχύτητας είναι η επιτάχυνση της ράβδου)

$$F = P * A_o = m \frac{dV}{dt} \quad (2-79)$$

Όπου εδώ, V είναι η ταχύτητα της ράβδου, P η πίεση που ασκείται σ' αυτήν και η διατομεακή της συμβολίζεται ως

$$A_b$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2-79) προκύπτει

$$\int_0^t P * A_o * dt = \int_0^V m * \frac{dV}{dt} * dt \rightarrow PA_o t = mV \quad (2-80)$$

Η (2-80) τώρα, μπορεί να εκφραστεί μέσω της θέσης της ράβδου Κρούστη  $y$  ως

$$PA_o t = m \frac{dy}{dt} \quad (2-81)$$

Ολοκληρώνοντας την (2-81) έχουμε

$$\int_0^t P * A_o * t * dt = \int_0^y m * dy \rightarrow PA_o t^2 = my \quad (2-82)$$

Λύνοντας την τελευταία εξίσωση ως προς το χρόνο

$$t = \sqrt{\frac{2ym}{PA_o}} \quad (2-83)$$

Συνδυάζοντας την (2-80) και (2-83) λαμβάνεται

$$V = \sqrt{\frac{2PA_o y}{m}} \quad (2-84)$$

Ενώ [11], ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της μηχανικής παραμόρφωσης δείγματος είναι αντιστρόφως ανάλογος του μήκους του δείγματος ως

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V}{l_s} \quad (2-85)$$

και η ίδια η μέγιστη μηχανική καταπόνηση δείγματος είναι ίση με

$$\varepsilon = \frac{2\dot{\varepsilon}L_{striker}}{c_b} \quad (2-86)$$

Δηλαδή ανάλογη του ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος, του μήκους της ράβδου Κρούστη, και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας διάδοσης του κύματος στη ράβδο Κρούστη (γνωστή, όσο και η ταχύτητα διάδοσης στις ράβδους πίεσεως).

Ο μέγιστος αυτός ρυθμός μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης έχει γνωστή τιμή, κατά τη μέτρηση με μεθοδολογία Hopkinson είναι ο επιθυμητός ρυθμός μεταβολής



παραμόρφωσης που θέλει ο ερευνητής να επιτύχει με το κύμα πίεσης εισόδου στην Incident Bar. Εναλλακτικά και στην πιο σύνηθες περίπτωση, ο ερευνητής έχει γνωστό, επιλογής του, τη μέγιστη τιμή της μηχανικής παραμόρφωσης από το κύμα πίεσης εισόδου στη συσκευή..

Από την εξίσωση (2-85), με γνωστό το ρυθμό μηχανικής παραμόρφωσης που θέλουμε να επιτύχουμε, γνωστό το μήκος δείγματος, βρίσκουμε την ταχύτητα της ράβδου κατά την έξοδο της από το μηχανισμό εκτόξευσης. Από την εξίσωση (2-84) έπειτα συσχετίζουμε μήκος σωλήνα εκτόξευσης, μάζα ράβδου Κρούστη και πίεση με την ταχύτητα.

Για την ράβδο Κρούστη είναι γνωστό το μήκος της εκ των προτέρων (ή το μήκος του σωλήνα εκτόξευσης), ότι είναι ομογενείς κύλινδρος φτιαγμένος από υλικό ίδιο με αυτό των i/o ράβδων πίεσεως και ίδιας διατομής, και άρα και ίδιας δια-τομεακής επιφάνειας με αυτές. Παράλληλα η μάζα m της ράβδου Κρούστη συσχετίζεται με τη πυκνότητα της ρ τη δια τομεακή της επιφάνειας, το μήκος της και τον όγκο της

$$V_1$$

Ως

$$\rho = \frac{m}{V_1} = \frac{m}{A_o L_{striker}} \quad (2-87)$$

Συνεπώς, με συνδυασμό των εξισώσεων 2-84 και 2-87 έχουμε

$$V = \sqrt{\frac{2PA_o y}{m}} = \sqrt{\frac{2PA_o y}{\rho A_o L_{striker}}} = \sqrt{\frac{2Py}{\rho L_{striker}}} \quad (2-88)$$

Αν τεθεί

$$x = \frac{y}{L_{striker}} \quad (2-89)$$

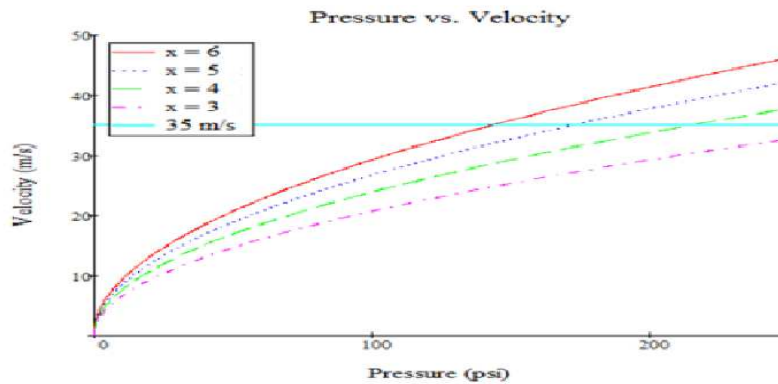
ο λόγος μήκους σωλήνα εκτόξευσης προς μήκος ράβδου Κρούστη, παρατηρείτε ότι η ταχύτητα της ράβδου Κρούστη, αμέσως μόλις βγει από το σωλήνα εκτόξευσης είναι συνάρτηση του λόγου x, της πίεσης P της γνωστής ήδη σε μας πυκνότητας της ράβδου, ίδιας με αυτή των i/o ράβδων πίεσεως)

$$V = \sqrt{\frac{2Px}{\rho}} \quad (2-90)$$

Από τις εξισώσεις (2-85), (2-86) ορίζεται η επιθυμητή ταχύτητα κρούσης με τη 1<sup>η</sup> ράβδο πίεσης. Επίσης τίθεται ένα όριο πίεσης, για λόγους ασφαλείας λειτουργίας, στο [12] προτείνονται τα 200 psi

$$200 \text{ psi} \approx 1378.9515 \text{ Kpa}$$

Από την (2-90), προκύπτει διάγραμμα της παρακάτω μορφής



**Σχήμα 2-23.** Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο Newton στη σχεδίαση Gas Gun [12]. Τα 35 m/s είναι η επιθυμητή ταχύτητα κρούσης στη μελέτη συγκεκριμένης συσκευής Kolsky [12]

Αυτό που γίνεται λοιπόν είναι, η κατ' αρχήν, επιλογή μήκους ράβδου Κρούστη, μια συνήθης τυπική επιλογή είναι από 20% έως 30% το μήκος ράβδου πίεσεως. Έπειτα, από το μήκος δείγματος που έχει επιλεγεί

$$l_s$$

ευρίσκεται από την εξίσωση (2-90) απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης, για ζητούμενο πάλι σταθερό ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα. Με χρήση διαγράμματος όπως αυτό στο σχήμα (2-23) και μέσω της σχέσης (2-89), επιλέγεται το ζητούμενο μήκος  $l_s$  του σωλήνα εκτόξευσης και η πίεση  $P$  που απελευθερώνει το gas gun, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η ζητούμενη ταχύτητα εκτόξευσης αλλά και να τηρούνται τα όποια όρια ασφαλείας έχουν τεθεί για την πίεση  $P$ .

### 2.5.2 Μέθοδος υπολογισμού μέσω αρχής διατήρησης της ενέργειας

Η μέθοδος αρχής διατήρησης της ενέργειας συσχετίζει την ενέργεια του συμπιεσμένου αέρα με την κινητική ενέργεια στη ράβδο Κρούστη. Εδώ γίνεται πάλι η υπόθεση ότι οι τριβές και η αντίσταση του αέρα έχουν αμελητέα επίδραση στο σύστημα. Ακόμα, ότι όλη η ενέργεια

του αερίου μεταφέρεται στη ράβδο Κρούστη, και ότι το αέριο υφίσταται ιστροπική διαστολή.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί ως

$$\sum P.E. = \sum K.E. \quad (2-91)$$

Όπου, P.E. είναι η ενέργεια που προσδίδεται από το αέριο και K.E. η κινητική ενέργεια της ράβδου. Η P.E. μπορεί να υπολογιστεί μοντελοποιώντας την ως ιστροπικό φύσημα

$$P.E. = \delta Q + \delta W_{reversible} - \delta W_{irreversible} \quad (2-92)$$

Όπου, η ενέργεια που χάνεται λόγω θερμότητας συμβολίζεται ως

$$\delta Q$$

ενώ το αναστρέψιμο έργο που έχει επιτελεστεί στο σύστημα συμβολίζεται ως

$$\delta W_{reversible}$$

και, το μη αναστρέψιμο έργο που έχει επιτελεστεί στο σύστημα συμβολίζεται ως

$$\delta W_{irreversible}$$

Υποθέτοντας ιστροπική επέκταση του αερίου ισχύει

$$\delta W_{irreversible} = 0, \delta Q = 0 \quad (2-93)$$

Το αναστρέψιμο έργο στο σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω της υπόθεσης ότι η πίεση υφίσταται μια αναστρέψιμη διαστολή όγκου,  $dV$ .

$$P.E. = \delta W_{reversible} \rightarrow W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad (2-94)$$

Όπου το συνολικό έργο που έχει επιτελεστεί στο σύστημα από την P του αερίου για την διαστολή αυτού από όγκο  $V_1$  σε όγκο  $V_2$  συμβολίζεται ως

$$W_{1-2}$$

Με χρήση της μοριακής μορφής του νόμου των ιδανικών αερίων, το έργο αυτό μπορεί να εκφραστεί ως

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} \rho R_s T dV \quad (2-95)$$

Εδώ, η πυκνότητα του αερίου, η ειδική σταθερά του αερίου, πεπιεσμένος αέρας ή άζωτο, και η θερμοκρασία συμβολίζονται ως

$$\rho, R_s, T$$

αντίστοιχα.

Με χρήση της ισοτροπικής σχέσης για ιδανικό αέριο σε θερμοκρασία  $T$

$$\frac{T}{T_1} = \left( \frac{\rho}{\rho_1} \right)^{\gamma-1} \quad (2-96)$$

Όπου, η αρχική θερμοκρασία και αρχική πυκνότητα του αερίου συμβολίζονται αντίστοιχως ως

$$T_1, \rho_1$$

ενώ, το  $\gamma$  είναι το ποσοστό θερμοχωρητικότητας του αερίου, για το οποίο ισχύει

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.4 \quad (2-97)$$

Λύνοντας την εξίσωση **2-97** ως προς θερμοκρασία  $T$  και αντικαθιστώντας στην **2-96** προκύπτει

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} \rho R_s T_1 \left( \frac{\rho}{\rho_1} \right)^{\gamma-1} dV = \left( \frac{R_s T_1}{\rho_1^{\gamma-1}} \right) \int_{V_1}^{V_2} \rho^\gamma dV \quad (2-98)$$

Αντικαθιστώντας στην **(2-96)** την πυκνότητα ως πηλίκο της μάζας  $M$  δια του όγκου  $V$  του αερίου

$$\frac{M}{V} = \rho \quad (2-99)$$

προκύπτει

$$W_{1-2} = \left( \frac{R_s T_1}{\rho_1^{\gamma-1}} \right) \int_{V_1}^{V_2} \left( \frac{M}{V} \right)^\gamma dV = (\rho_1 R_s T_1) \left( \frac{M}{\rho_1} \right)^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \left( \frac{1}{V} \right)^\gamma dV \quad (2-100)$$

Ενώ, για τις αρχικές συνθήκες πίεσης και όγκου του αερίου ισχύει

$$\frac{M}{\rho_1} = V_1$$

$$\rho_1 R_s T_1 = P_1 \quad (2-101)$$

Αντικαθιστώντας τις τελευταίες σχέσεις αρχικών συνθηκών στην **(2-100)** προκύπτει

$$W_{1-2} = P_1(V_1)^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{1}{V}\right)^\gamma dV \quad (2-102)$$

Υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα και απλοποιώντας την (2-102) [12] προκύπτει

$$P.E. \cong W_{1-2} = \frac{P_1 * V}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (2-103)$$

Όπου η αρχική πίεση του αερίου και η πίεση εξαερισμού (ατμόσφαιρας) συμβολίζονται αντίστοιχα ως

$$P_1, P_2$$

ενώ V, είναι ο όγκος του συμπιεσμένου αερίου,  $\gamma=1.4$ .

Η κινητική ενέργεια της ράβδου Κρούστη τώρα, ισούται με

$$K.E. = \frac{1}{2} m * V_{striker}^2 \quad (2-104)$$

Όπου η μάζα της ράβδου Κρούστη και η ταχύτητα της συμβολίζονται αντιστοίχως ως

$$m, V_{striker}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2-101) και (2-104) και αντικαθιστώντας τις στην (2-103), λαμβάνεται η παρακάτω έκφραση της συνολικής ενέργειας του συστήματος

$$\frac{P_1 * V}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{1}{2} m * V_{striker}^2 \quad (2-105)$$

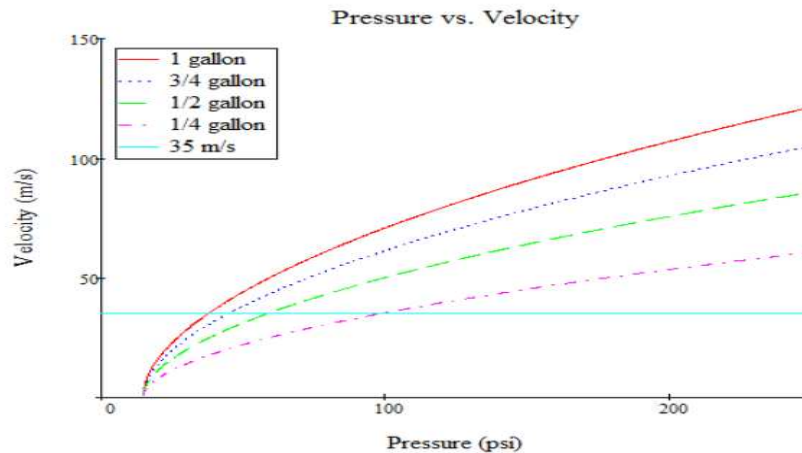
Επιλύοντας την 2-106 ως προς ταχύτητα

$$V_{striker} = \sqrt{\frac{2}{m} * \frac{P_1 * V}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (2-106)$$

ενώ, όπως στη μέθοδο Newton, ισχύει

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V}{L} \quad (2-107)$$

Πάλι, υποθέτοντας γνωστό το μήκος της ράβδου Κρούστη, από την εξίσωση (2-107) βρίσκεται η απαιτούμενη ταχύτητα ράβδου Κρούστη, η οποία στην (2-106) δίνει την εξάρτηση του όγκου του αερίου (πόσος όγκος πρέπει να απελευθερωθεί από το gas gun) με τη τελική πίεση P2 (με την υπόθεση μηδενικής διαρροής αερίου από τη δεξαμενή του συστήματος). Δημιουργείται λοιπόν διάγραμμα όπως αυτό της παρακάτω μορφής [12]



**Σχήμα 2-24.** Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο αρχής διατήρησης ενέργειας στη σχεδίαση Gas Gun [12]. Συσχετίζεται η τελική πίεση με τον τελικό όγκο αερίου που απελευθερώνεται στο Gas Gun και της ταχύτητα της ράβδου Κρούστη. Τα 35 m/s είναι η επιθυμητή ταχύτητα κρούσης στη μελέτη συγκεκριμένης συσκευής Kolsky [12]

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα συσκευής Kolsky [12], παρατηρείτε ότι η μέθοδος αυτή δείχνει ότι για οποιοδήποτε όγκο απελευθερωμένου αερίου πάνω από 0.25 gal (0.95 lt), μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ταχύτητα, με μέγιστη πίεση 100 psi, δηλαδή κάθε υποψήφια σχεδίαση, θα καλύπτει το όριο ασφαλείας πίεσης των 200 psi.

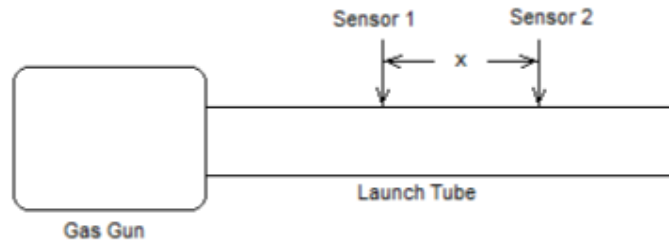
### 2.5.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων σχεδιασμού

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων [12]. Γενικώς, η μέθοδος Newton είναι πάντα λιγότερο ακριβείς, επειδή υποθέτει σταθερή τη δύναμη που εφαρμόζεται στη ράβδο Κρούστη. Αυτό στη πράξη δεν ισχύει, αφού όσο η ράβδο Κρούστης διέρχεται το σωλήνα εκτόξευσης, η πίεση στη δεξαμενή αερίου μειώνεται εξαιτίας του ότι ο συνολικός όγκος του αυξάνεται. Εν γένει, οι προσεγγίσεις που γίνονται στη μέθοδο της αρχής διατήρησης της ενέργειας, αναπαριστούν σε καλύτερο βαθμό τις φυσικές συνθήκες του πραγματικού gas gun συστήματος, από ότι αυτές στη μέθοδο Newton. Η τελευταία

μέθοδος όμως είναι περισσότερο απλούστερη, ιδιαίτερα στην ανάλυση της, ενώ και οι δύο σε γενικές γραμμές οδηγούν σε επαρκείς σχεδιάσεις.

### 2.5.4 Βελτίωση των αποτελεσμάτων με χρήση διατάξεων φωτοδιόδων

Σε μια υλοποιημένη συσκευή, τοποθετούνται στο σωλήνα εκτόξευσης δύο ζεύγη φωτοδιόδων, με τους οποίους μετράτε η πραγματική ταχύτητα κρούσης.



**Σχήμα 2-25.** Τοποθέτηση φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης [12]

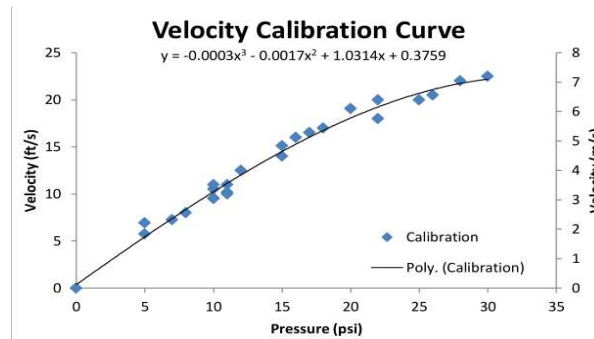
Όταν η ράβδος Κρούσης περάσει από το πρώτο αισθητήρα ξεκινά ένα μετρητής χρόνου, ο οποίος σταματά όταν η ράβδος Κρούσης περάσει από το σημείο που είναι η 2<sup>η</sup> διάταξη φωτοδιόδων. Η πραγματική ταχύτητα εκτόξευσης που έχει επιτευχθεί θα είναι ίση με

$$V = \frac{x}{\Delta t} \quad (2-108)$$

Όπου  $x$ , η απόσταση των δύο διατάξεων φωτοδιόδων και  $\Delta t$  ο χρόνος που μέτρησε το χρονόμετρο. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν και να συγκριθούν έπειτα με το θεωρητικό υπολογισμό της ταχύτητας κρούσης. μιας καμπύλη λειτουργίας ταχύτητας/πίεσης, που έχει μορφή 3<sup>ου</sup> βαθμού

$$V_{striker} = aP^3 + bP^2 + cP + d \quad (2-109)$$

συνεπώς, με τη χρήση των διατάξεων φωτοδιόδων, σε μια κατασκευασμένη συσκευή, μετρούνται κατ' αρχάς οι πραγματικές ταχύτητες κρούσης, έπειτα αντιπαραβάλλονται οι μετρήσεις αυτές με την καμπύλη λειτουργίας που έχει επιλεγεί στο στάδιο της σχεδίασης



**Σχήμα 2-26.** Μέτρηση πραγματικής ταχύτητας κρούσης μέσω φωτοδιόδων και αντιπαραβολή αυτής με την καμπύλη ταχύτητας/πίεσης που επιλέχθει κατά τη σχεδίαση [12]

Προβαίνοντας στις κατάλληλες διορθώσεις της μορφής της καμπύλης, ούτως ώστε να πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές τιμές ταχύτητας, και κατ' επέκταση σε διορθώσεις στην τιμή της πίεσης που απελευθερώνεται από την δεξαμενή.

## 2.6 Διασπορά του κύματος πίεσης

Η διασπορά που λαμβάνει χώρα κατά τη διάδοση του κύματος πίεσης, αποτελεί σημαντικό παράγοντα σφαλμάτων κατά τη μέτρηση. Η διασπορά του σήματος είναι αποτέλεσμα της εξάρτησης της ταχύτητας φάσης των ράβδων από τη συχνότητα, η οποία με τη σειρά της αλλοιώνει το κύμα κατά τη διάδοσή του. Εφ' όσον αυτό που εξετάζεται κατά τη μέτρηση είναι οι ιδιότητες του δείγματος, πρέπει να αναγνωριστούν τα φαινόμενα διασποράς στις ράβδους ούτως ώστε να προσδιοριστούν όσο το δυνατόν ακριβέστερα τα πραγματικά κύματα πίεσης. Όπως δηλαδή ακριβώς επιδρούν τελικά στις κοινές δια-τομεακές περιοχές ράβδων πίεσης – δείγματος, απαλλαγμένα από την επίδραση της διασποράς, η οποία προσμετράτε, στις διάφορες χρονικές περιόδους μέτρησης, κατά τη διεξαγωγή της διαδικασίας. Συνήθως, οι ερευνητές επιλύουν το πρόβλημα με χρήση της μεθοδολογίας αριθμητικού υπολογισμού της πραγματικής ταχύτητας των κυμάτων, όπως αυτή έχει διατυπωθεί από τον Bancroft [18]. Εν τούτοις, περισσότερο εμπειρικές, διαδικασίες βασισμένες στην αρχιτεκτονική της κάθε συγκεκριμένης προς έλεγχο συσκευής Kolsky έχουν επίσης προταθεί [2].

### 2.6.1 Επίδραση της διασποράς στη διαδικασία κρούσης

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, με την προϋπόθεση ομοιόμορφης κατανομής της μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα και την παραμονή των επιπέδων της τάσης στις ράβδους πίεσης κάτω από τα όρια τα όρια ελαστικότητας των, ο ρυθμός μεταβολής της μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα είναι ανάλογος της τιμής παραμόρφωσης του παλμού ανάκλασης (Reflected wave), ενώ η μηχανική τάση δείγματος είναι ανάλογη της τιμής παραμόρφωσης του τελικώς μεταδιδόμενου παλμού (Transmitted wave). Εφ' όσον το σύνηθες που μελετάται μέσω της συσκευής Kolsky, είναι η ευαισθησία των υλικών στις



μεταβολές, γενικώς, της μηχανικής παραμόρφωσης σε αυτά, είναι επιθυμητή η μελέτη των υλικών υπό συνθήκες σταθερών τιμών ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης. Δηλαδή, η παρατήρηση της όποιας συμπεριφοράς τότε, εύκολα να αποδίδεται στην τιμή του σταθερού ρυθμού μεταβολής και όχι σε, επί παραδείγματι, απότομη αύξηση που μετέπειτα εξαλείφθηκε, και αυτός να είναι ο λόγος κάποιου σημαντικού φαινομένου όπως θραύση του δείγματος. Έτσι, φαίνεται λογικό να υποθεθεί ότι η δημιουργία σταθερού παλμού ανάκλασης επαρκεί και είναι το κατ' αρχήν ζητούμενο στη μέτρηση.

Θεωρητικώς, το παραπάνω ισχύει [2]. Η , τέλεια, κρούση της ράβδου Κρούση στην input ράβδο πίεσεως, οι οποίες υπενθυμίζεται είναι ίδιου υλικού και διατομής, δημιουργεί τέλειο τετραγωνικό παλμό διάρκειας

$$T = \frac{2l_1}{C_o} \quad (2-110)$$

και μέγιστης τιμής μηχανικής τάσης

$$\sigma = \frac{V_1 \rho_1 C_o}{2} \quad (2-111)$$

Όπου οι παράγοντες

$$V_1, \rho_1, C_o, l_1$$

αναπαριστούν την ταχύτητα λίγο πριν τη κρούση, τη πυκνότητα, τη ταχύτητα διάδοσης κύματος και το μήκος αντιστοίχως, της ράβδου Κρούση (Striker bar). Οι παραπάνω εξισώσεις, δεικνύουν ότι για δοθέντα ράβδο Κρούση, η τάση που δημιουργείται είναι ανάλογη της ταχύτητας κρούσης και η διάρκεια της εξαρτάται μόνο από τις φυσικές ιδιότητες της ράβδου αυτής κρούσης. Το δημιουργούμενο κύμα πίεσης, είναι λοιπόν κύμα μορφής βηματικής συνάρτησης. Αυτό όμως, στην πράξη δεν ισχύει [2], κυρίως λόγω της ύπαρξης των φαινομένων διασποράς, τα οποία περιορίζουν τη χρησιμότητα εισόδου ενός τέτοιου, τετραγωνικού, παλμού ως διέγερση της μέτρησης. Οι μελέτη των φαινομένων αυτών, και η χρήση των αλγοριθμικών μεθοδολογιών για την εξομάλυνση τους, καθίσταται απαραίτητη.

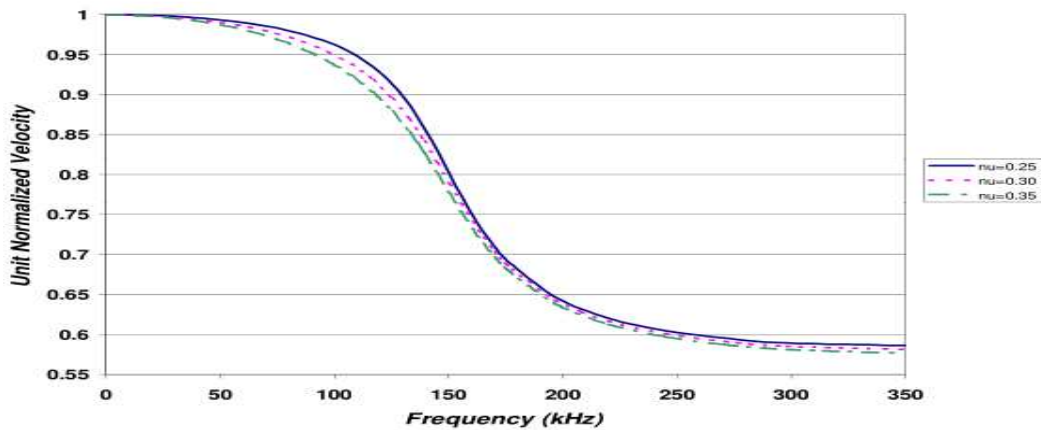
## 2.6.2 Αναπαράσταση των φαινομένων διασποράς

Στο κεφάλαιο, αναπτύχθηκαν οι εξισώσεις κίνησης ράβδου [2], όπως επίσης έπειτα μέσω αυτών οι εξισώσεις για την μηχανική τάση, την μηχανική παραμόρφωση και το ρυθμό μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα. Στην ανάλυση αυτή, χάριν απλότητας, παραλήφθηκε η επίδραση των φαινομένων εσωτερικής αδρανείας των ράβδων πίεσης. Παραλείποντας τα φαινόμενα αυτά, η διασπορά κατά την διάδοση του κύματος δεν μπορεί να περιγραφεί. Η προσθήκη της αδρανείας στις εξισώσεις κίνησης ράβδου, οδηγεί σε κυματικές εξισώσεις όπου η ταχύτητα μετάδοσης εξαρτάται από τη συχνότητα.

Σημαντική έρευνα έχει γίνει πάνω στο θέμα αυτό, των φαινομένων αδρανείας και διασποράς διαδιδόμενου κύματος, το πρώτο μισό του 20ου αιώνα (Pochhammer, Love,

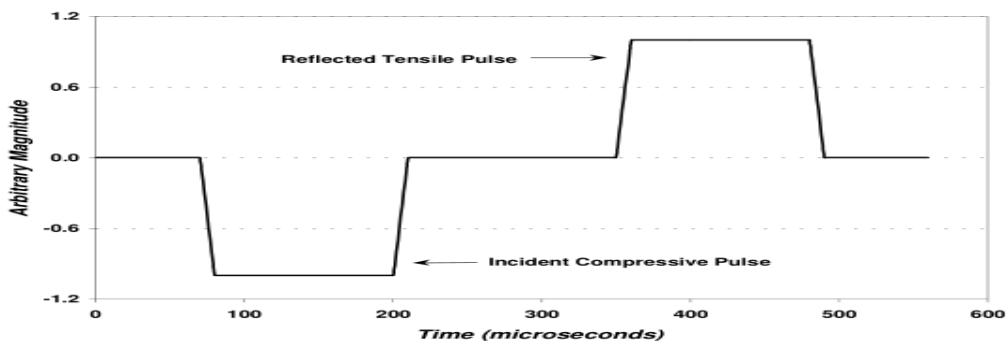
Davies) [2]. Από αυτή, ευρέθη ότι για μήκη κύματος (wavelength) τάξης μεγέθους της διαμέτρου των ράβδων πιέσεων, τα διαδιδόμενα αυτά κύματα παρουσιάζουν φαινόμενα διασποράς, ήτοι ταλαντώσεις στο πεδίο του χρόνου. Η συμπεριφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της εξάρτησης της ταχύτητας διάδοσης του κύματος από το μήκος κύματος του.

Ο Bancroft [18], ανέλυσε αυτή τη συμπεριφορά, στη ταχύτητα μετάδοσης κύματος σε κυλινδρικές ράβδους. Το αποτέλεσμα ήταν, η ανάπτυξη εξισώσεων που αναπαριστούν την ταχύτητα κύματος ως συνάρτηση της ταχύτητας κύματος με άπειρο μήκος και μεταβλητές, το λόγο Poisson και το λόγο της διαμέτρου της ράβδου προς το μήκος διαδιδόμενου κύματος, δίδοντας και αριθμητικές λύσεις για τα φαινόμενα αυτά, για διάφορα υλικά. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής, ενώ παρακάτω, η αριθμητική εξομάλυνση του φαινομένου της διασποράς, όπως προκύπτει από τη μελέτη [18][2].



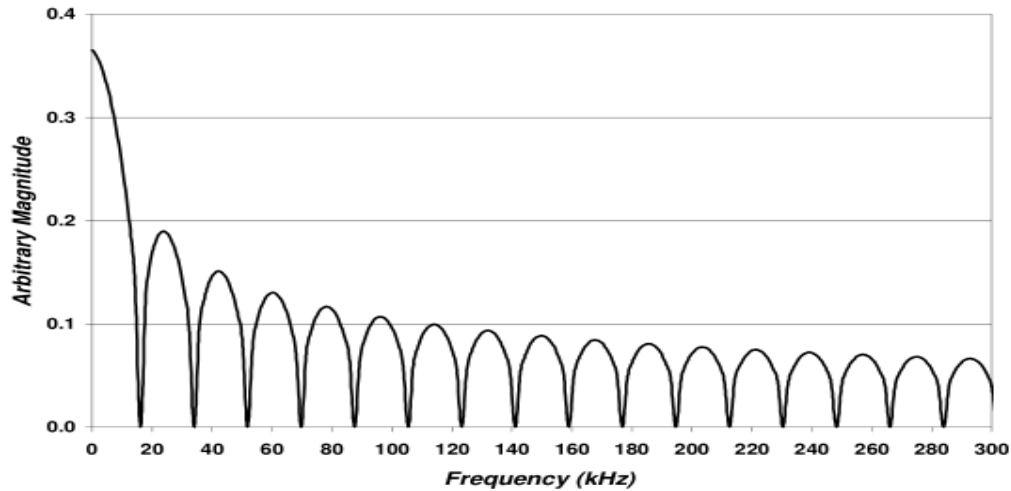
**Σχήμα 2-27.** Μοναδιαία κανονικοποιημένη ταχύτητα κύματος σε ράβδο διαμέτρου 1,905 cm (3/4 in), για διαφορές τιμές λόγου Poisson (διάφορα υλικά κατασκευής) [2]

Η επιρροή της διασποράς διαφαίνεται στο πεδίο του χρόνου, ως ταλαντώσεις στο κύμα[2]. Αν, για παράδειγμα, θεωρηθεί κύμα τραπεζοειδούς μορφής ως παρακάτω



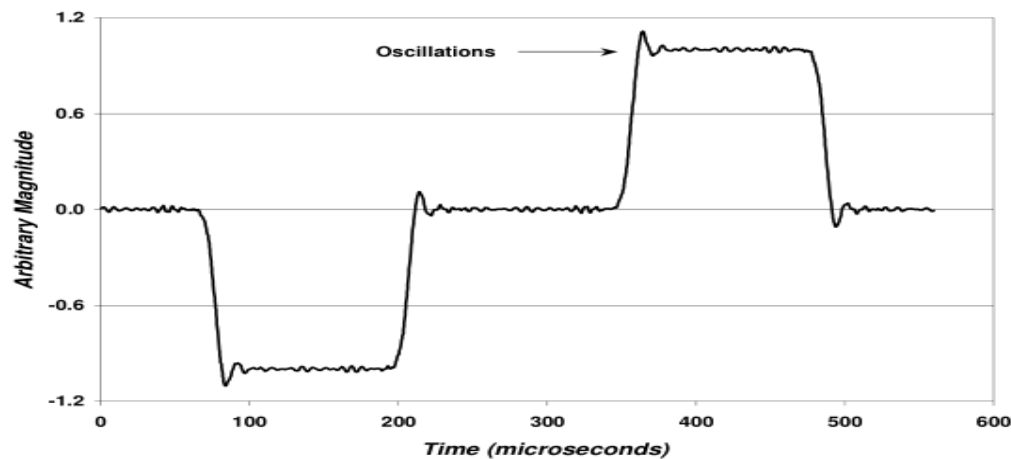
**Σχήμα 2-28.** Τραπεζοειδής μορφής κύμα, τυπική μορφή σε μετρήσεις παραμόρφωσης δειγμάτων μέσω συσκευής Kolsky, χαλύβδινη ράβδος διαμέτρου 1,905 cm [2]

Χωρίς τη παρουσία διασποράς, η χρονική καταγραφή της παραμόρφωσης στη ράβδο, είναι ένας παλμός και η ανάκλαση του, όμοιας μορφής αλλά διαφορετικού πρόσημου. Εξετάζοντας τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) της, σχήμα (2-29), οι παράγοντες απόκρισης συχνότητας της βρίσκονται σε όλο το φάσμα συχνοτήτων που ορίζεται στο σχήμα (2-27)



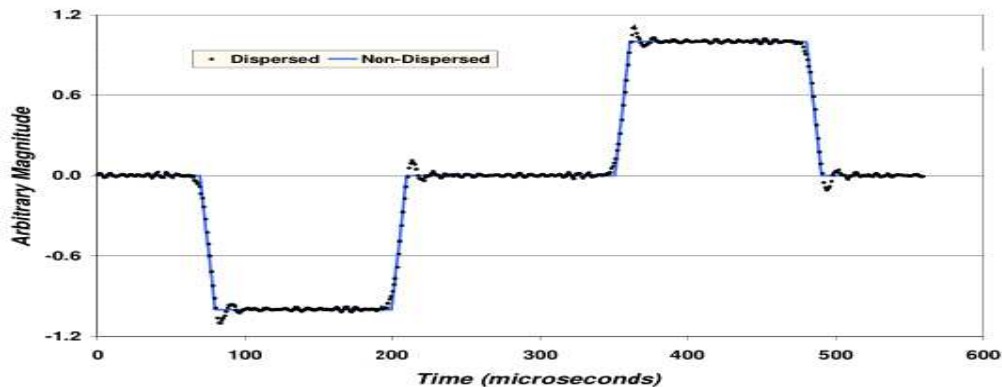
**Σχήμα 2-29.** FFT του τραπεζοειδούς παλμού του προηγούμενου σχήματος [2]

Οι διαφορετικοί αυτοί παράγοντες στο πεδίο της συχνότητας, μεταφράζονται σε μια σειρά διαφορετικών κυμάτων που διαδίδονται στη ράβδο με διαφορετικές ταχύτητες. Συνεπώς, το συνολικό αρχικό κύμα στο σχήμα (2-28), δεν θα παραμείνει αμετάβλητο κατά τη διάδοση του στη ράβδο, Λογαριάζοντας 30 in διασποράς (76.2 cm) για χαλύβδινη ράβδο διαμέτρου 0.75 in (1.905 cm), η τραπεζοειδής κυματομορφή του σχ.(2-28) αλλοιώνεται, ως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 2-30.** Το αρχικό τραπεζοειδούς μορφής κύμα, με προσθήκη διασποράς 76.2 cm (30 in), χαλύβδινη ράβδος διαμέτρου 1,905 cm [2]

Αυτό που άμεσα παρατηρείτε, είναι ότι η αλλοίωση αυτή εμφανίζεται ως έντονες ταλαντώσεις που μεταβάλλουν το αρχικό, τέλειο τραπεζοειδές σχήμα του σήματος. Το εύρος συχνοτήτων του παλμού, επηρεάζει τη τιμή των ταλαντώσεων αυτών, στο πεδίο του χρόνου. Για παλμούς με μικρό εύρος συχνοτήτων, οι ταλαντώσεις είναι ελάχιστες. Όμως, σε παλμούς με μεγάλο εύρος συχνοτήτων, οι ταλαντώσεις καθίστανται εντονότερες. Αντιπαραβάλλοντας τα δύο σήματα, με και χωρίς τις ταλαντώσεις στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 2-31.** Αντιπαραβολή των σημάτων του παραδείγματος, με και χωρίς φαινόμενα διασποράς [2]

γίνονται άμεσα διακριτά τα φαινόμενα διασποράς στο πεδίο του χρόνου, λόγω των ταλαντώσεων στη κυματομορφή του ενός από αυτά. Στο πεδίο της συχνότητας, η διασπορά μεταφράζεται ως μετατόπιση της φάσης κάθε φασματικού παράγοντα του αρχικού, αναλλοίωτου, σήματος. Μεταβάλλοντας μεμονωμένους από αυτούς τους φασματικούς παράγοντες, θεωρητικά η επίδραση της διασποράς μπορεί να υπολογιστεί. Η χρήση μετασχηματισμού Fourier του σήματος καταπόνησης, επιτρέπει την επέμβαση στο σήμα σε επίπεδο συχνότητας, και άρα δίνει τη δυνατότητα μεταβολής αυτών των φασματικών παραγόντων. Η τεχνική για το πώς γίνονται οι φασματικές αυτές μετατροπές, αναλύεται ακριβώς παρακάτω [2].

### **2.6.3 Θεωρητική μεθοδολογία διόρθωσης της διασποράς**

Συνήθως, όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 2.4, όπου παρουσιάστηκαν ζητήματα χρήσης των strain gages, η καταγραφή του ιστορικού παραμόρφωσης γίνεται στη μέση των ράβδων πίεσεων, επιτρέποντας έτσι τον διαχωρισμό του μεταδιδόμενου και του ανακλώμενου παλμού. Οι εξισώσεις τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης στο δείγμα, απαιτούν τη γνώση των ιστορικών τιμών παραμορφώσεως στις ράβδους πίεσεως. Για να προβλεφθούν οι μορφές των παλμών αυτών, χωρίς την επιρροή στις μετρήσεις της διασποράς, απαιτείται σημαντική επεξεργασία των δεδομένων μέτρησης. Η πιο εύκολη διαδικασία αυτού του τύπου της επεξεργασίας που

μπορεί να γίνει, είναι η μετατροπή της χρονικής κυματικής πληροφορίας στο πεδίο της συχνότητας, έπειτα μετατόπιση φάσης σε κάθε φασματικό παράγοντα του σήματος ούτως ώστε να ισοσκελιστεί η παρουσία της διασποράς στη ράβδο, και τέλος η μετατροπή της επιδιορθωμένης κυματικής πληροφορίας από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου.

Έχοντας γνώση των κυματικών ταχυτήτων στις ράβδο πίεσης, είναι δυνατή η επιδιόρθωση των φαινομένων αλλοίωσης διασποράς, στο πεδίο πια της συχνότητας. Κάθε περιοδικό κύμα μπορεί να αναλυθεί ως άθροισμα πολλών μικρότερων αρμονικών κυμάτων, τοποθετούμενα το κάθε ένα σε διαφορετικές συχνότητες. Εργαλείο ανάλυσης των κυμάτων, στο πεδίο της συχνότητας, αποτελεί ο μετασχηματισμός Fourier, η γενική του μορφή διατυπώνεται μαθηματικά ως παρακάτω

$$F(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi fnt) + B_n \sin(2\pi fnt)] \quad (2-112)$$

όπου, οι μεταβλητές

$$N, f, n, t$$

αναπαριστούν αντιστοίχως τον συνολικό αριθμό των σημείων πληροφορίας, την ανάλυση συχνότητας, το χρονικό δείκτη (χρονοθυρίδες) και το χρόνο. Οι σταθερές

$$A_n, B_n$$

είναι οι μέγιστες τιμές του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του σήματος, αντίστοιχα. Για να γίνει η επιδιόρθωση του φαινομένου της διασποράς, κάθε φασματικός παράγοντας πρέπει να μετακινηθεί κατά φάση, για να αντισταθμιστούν οι μεταβολές στη ταχύτητα του σήματος. Προσαρμόζοντας την αρχική εξίσωση (2-112) όπως παρακάτω, η επίδραση του φαινομένου της διασποράς μπορεί να εξαλειφθεί από τις κυματομορφές

$$F_{corrected}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi fnt + \varphi) + B_n \sin(2\pi fnt + \varphi)] \quad (2-113)$$

$$\varphi = \varphi_o - \varphi_n = 2\pi y \left( \frac{1}{\lambda_o} - \frac{1}{\lambda_n} \right) = 2\pi f n \left( \frac{1}{C_o} - \frac{1}{C_n} \right) y \quad (2-114)$$

όπου, ο παράγοντας  $\varphi$  αναπαριστά την υστέρηση φάσης στα τμήματα υψηλών συχνοτήτων, που διαδίδονται μακριά από τις κοινές δια τομεακές ράβδων πίεσης και δείγματος. Ο παράγοντας

$$C_o$$

είναι η ταχύτητα του άπειρου μήκους κύματος (infinite wavelength wave), ενώ ο παράγοντας

$$C_n$$

είναι η ταχύτητα κύματος για κάθε συγκεκριμένη συχνότητα, δοθέντα από τον FFT. Για το μήκος κύματος για κάθε χρονοθυρίδα ισχύει

$$\lambda_n = \frac{C_n}{f}$$

Η σταθερά  $y$  είναι η απόσταση που διανύει το κύμα πριν καταγραφεί. Πριν τον υπολογισμό της υστέρησης φάσης, πρέπει να γίνουν επιλογές, σχετικά με τις ταχύτητες κυμάτων

$$C_n$$

Εδώ, είτε θεωρητικές είτε προσεγγίσεις ταχυτήτων μέσω μετρήσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στην επόμενη παράγραφο, γίνεται πρακτική προσέγγιση του υπολογισμού των παραγόντων αυτών και χρήση του αλγόριθμου εξομάλυνσης της διασποράς κύματος στις ράβδους [2].

#### 2.6.4 Πειραματική διόρθωση της διασποράς

Αντί της χρήσης των από πίνακα δεδομένων, όπως παρουσιάζεται στη μελέτη του Bancroft [19], που ικανοποιούν την εξίσωση (2-114), οι πραγματικές κυματικές ταχύτητες μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά, για κάθε μια από τις ράβδους πίεσεως στη συσκευή. Επιλύοντας την εξίσωση (2-114) λαμβάνεται

$$C_n = \frac{2\pi n \omega y C_o}{2\pi n \omega y - C_o \Phi} \quad (2-115)$$

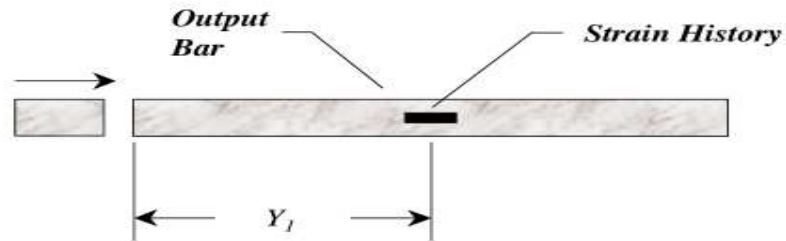
από εδώ, μπορούν να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά των ταχυτήτων φάσης για τις ράβδους. Οι σταθερές

$$y, C_o$$

μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα, η πρώτη με απλή μέτρηση των αποστάσεων των strain gages από την αρχή εκπομπής των κυμάτων, για το Incident wave επί παραδείγματι θα είναι το σημείο κρούσης της Striker bar. Για τη σταθερά ταχύτητας κύματος, αυτό που πρέπει να ερευνηθεί είναι το ιστορικό παραμόρφωσης της ράβδου μετά από κρούση. Αναγνωρίζοντας τις κύριες ακμές του διαδιδόμενου προσπίπτοντα (incident) και ανακλώμενου (reflected) παλμού, και γνωρίζοντας πόσο μακριά είναι η strain gage από το άκρο ανάκλασης της ράβδου, η ταχύτητα κύματος για χαμηλές συχνότητες μπορεί να

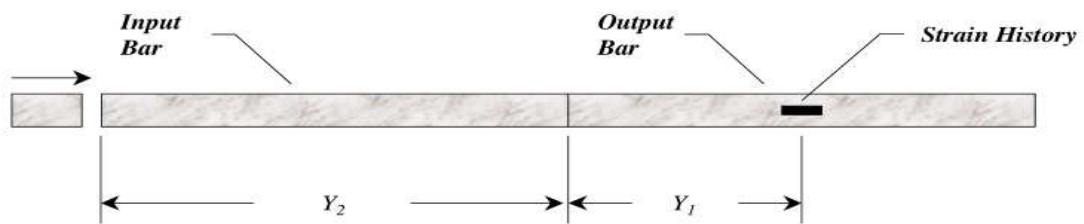
υπολογιστεί. Για το προσδιορισμό της σταθεράς  $\Phi$ , της διασπειρόμενης φάσης, απαιτείται η δημιουργία κρούσης, διάδοση κύματος και καταγραφή του, με συγκεκριμένο τρόπο.

Η διαδικασία υπολογισμού λοιπόν, της σταθεράς  $\Phi$  και εν γένει η διαπίστωση των φαινομένων διασποράς, απαιτεί κατ' αρχάς τη καταγραφή ιστορικού παραμόρφωσης στη ράβδο πίεσης Δέκτη (Output bar), σε δύο διαφορετικά πειράματα. Η ράβδος Δέκτης πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε στο 1ο πείραμα η ράβδος Κρούσης (Striker bar) να χτυπήσει σ' αυτήν απ' ευθείας.



**Σχήμα 2-32.** 1<sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Απευθείας κρούση της ράβδου Δέκτη [2]

Μετά την καταγραφή του παλμού παραμόρφωσης που προκύπτει από την κρούση αυτή, η διάταξη θα πρέπει να επανέλθει στην κανονική της μορφή, και χωρίς τη παρουσία δείγματος να συνενωθούν οι δύο ράβδοι πίεσης. Στο 2<sup>ο</sup> πείραμα πια, η κρούση θα γίνει, κανονικά στη ράβδο Πομπό (Input bar), με την καταγραφή ιστορικού παραμόρφωσης να γίνεται πάλι μόνο στην ράβδο Δέκτη.



**Σχήμα 2-33.** 2<sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Κρούση με τοποθετημένες και τις δύο ράβδους πίεσης [2]

Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση, ο παλμός παραμόρφωσης διασπείρεται δια μέσου απόστασης  $Y_1$ , πριν καταγραφεί. Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση, ο παλμός παραμόρφωσης διασπείρεται δια μέσου απόστασης  $Y_1$  συν το μήκος της ράβδου Πομπού  $Y_2$ . Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών χρονικών ιστορικών καταπόνησης είναι η διασπειρόμενη φάση  $\Phi$ , κατά μέσου απόστασης  $Y_1+Y_2$ . Αντικαθιστώντας τη τιμή  $\Phi$  στην εξίσωση (2.116), γίνεται δυνατόν πλέον να υπολογιστούν οι κυματικές ταχύτητες στην ράβδο Πομπό (Input bar). Όμοια

διαδικασία μπορεί ν' ακολουθηθεί για την προσδιορισμό των φαινομένων διασποράς στη ράβδο Δέκτη (Transmission bar).

Στο 2<sup>ο</sup> πείραμα κρούσης, λαμβάνεται η υπόθεση ότι η κοινή δια-τομεακή περιοχή μεταξύ των δύο ράβδων πιέσεων έχει μηδενική επιρροή στη μετάδοση του κύματος. Εφαρμόζοντας λεπτό στρώμα γράσου μεταξύ των δύο ράβδων πίεσης, ελαχιστοποιείται η επιρροή της περιοχής αυτής αφού δεν δημιουργείται εκεί κύμα ανάκλασης, οι ράβδοι συμπεριφέρονται σχεδόν σαν να είναι ένα συμπαγές υλικό. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί επίσης ούτως ώστε επαρκή ενέργεια να προσδοθεί κατά την κρούση, στις επιθυμητές συχνότητες. Πιθανών να χρειαστεί η χρήση πολλών διαφορετικών ράβδων κρούσης για να επιτευχθεί επαρκής επέκταση συχνότητας.

## 2.7 Ορισμός της διαδικασίας μέτρησης

Στις προηγούμενες θεματικές ενότητες, ορίστηκαν γενικευμένα τα σημαντικότερα βήματα και προτάθηκαν προσεγγίσεις των διαφόρων θεμάτων που ανακύπτουν κατά τη σχεδίαση και κατασκευή μιας συσκευής Kolsky, στην πλέον παραδοσιακή της μορφή, αυτή της πιέσεως. Αυτό που απομένει στη παρούσα εργασία, προτού πραγματοποιηθεί ενδεικτική σχεδίαση και προσομοίωση λειτουργίας μιας τέτοιας συσκευής, είναι η παρουσίαση θεμάτων χρήσης της, δηλαδή θέματα πάνω στη προετοιμασία της για μέτρηση, στον ορισμός των παραγόντων που πρέπει να προσδιοριστούν, τα βήματα της διαδικασίας και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.

### 2.7.1 Βαθμονόμηση της συσκευής

Για τη σωστή ανάλυση των δεδομένων μέτρησης από τους αισθητήρες strain gages, πριν από τη διαδικασία μέτρησης, το συνολικό σύστημα θα πρέπει να βαθμονομηθεί. Η διαδικασία αυτή γίνεται επιτόπου, συγκρίνοντας το πλάτος ενός παλμού κύματος, με την ταχύτητα κρούσης της ράβδου Κρούστη για κάθε ράβδο πίεσης ξεχωριστά. Στη πράξη [11], αυτή η διαδικασία βαθμονόμησης επιτυγχάνεται με την διάδοση κύματος, γνωστής ταχύτητας, στην ράβδο πίεσης Εισόδου και έπειτα στην ράβδο πίεσης Εξόδου, χωρίς τη παρουσία δείγματος. Έπειτα, η κρούση αυτή της ράβδου Κρούστη με τη ράβδο πίεσης Εισόδου, και αυτής στη συνέχεια με τη ράβδο πίεσης Εξόδου, με τις δύο ράβδους πιέσεως σε επαφή και χωρίς πάλι την παρουσία δείγματος, δίνει το συντελεστή μετάδοσης. Η ακριβής τιμή της ταχύτητας  $V$  της ράβδου Κρούστη κατά τη κρούση της με μια ράβδο πίεσης ισούται με

$$V = 2c_b \varepsilon_j \quad (2-116)$$

Εδώ, η καταπόνηση στην ράβδο πίεσης Εισόδου ή Εξόδου, αναλόγως πια βαθμονομείτε, ορίζεται

$$\varepsilon_j$$



ενώ, η ταχύτητα διάδοσης κύματος στη ράβδο πίεσης και κρούσης, αν αυτές έχουν ίδια διάμετρο και είναι φτιαγμένες από το ίδιο υλικό, ορίζεται ως

$$c_b$$

Απαιτείται, προφανώς, προσεκτική μέτρηση της ταχύτητας κρούσης, για παράδειγμα με διάταξη φωτοστοιχείων, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο σχεδιασμού της συσκευής gas gun. Το ίδιο πρέπει να γίνει και για τη ταχύτητα διάδοσης στις ράβδους. Ο ερευνητής δεν πρέπει να επαφίεται εντελώς στις τιμές που δίνονται από τα βιβλία αναφοράς, αλλά να τη μετράει επιτόπου, πάλι με διατάξεις ανίχνευσης του κύματος και χρονομέτρηση. Μεταβολές στη χημεία των κραμάτων της ράβδου, στη μικροδομή και στη θερμοκρασία κατά τη κατασκευή μπορούν να επηρεάσουν την πραγματική τιμή της ταχύτητας διάδοσης, για κάθε σετ ράβδων πίεσεως. Η διαδικασία βαθμονόμησης πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερήσεις λόγω ταχύτητας ανάγνωσης των αισθητήρων, του υλικού συγκολλήσεις των στις ράβδους πίεσεως, τις καλωδιώσεις τους. Θα πρέπει να γίνεται περιοδικά και σε συχνά χρονικά διαστήματα, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν προφανείς αλλαγές στην όλη διάταξη τις συσκευής.

## **2.7.2 Ομοιομορφία παραμόρφωσης δείγματος**

Στην ενότητα 2.2, αναπτύχθηκαν οι τύποι υπολογισμού της μηχανικής τάσης, της μηχανικής παραμόρφωσης και του ρυθμού μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης, στο δείγμα. Έγιναν δύο βασικές υποθέσεις, κριτήρια για την ισχύ της μαθηματικής ανάλυσης αυτής. Το ένα ήταν, οι ράβδοι πίεσεως να παραμένουν στα όρια αντοχής τους. Αυτό, εν πολλοίς, μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα, εφ' όσον ο ερευνητής γνωρίζει εκ των προτέρων το υλικό κατασκευής των ράβδων πίεσεως και εφαρμόσει κατάλληλο μηχανικής τάσης, κατώτερης ισχύος από το όριο ελαστικότητας του υλικού, στη συσκευή. Η δεύτερη υπόθεση, είναι η ύπαρξη ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για να εξασφαλιστεί αυτό [11], καθώς επίσης και τα συμπεράσματα μαθηματικής ανάλυσης [8], τα οποία μπορούν να δώσουν ένα ισχυρό εποπτικό εργαλείο πρόβλεψης της συμπεριφοράς ομοιομορφίας παραμόρφωσης στο δείγμα, σε σχέση με τις όποιες σχεδιαστικές επιλογές (κύμα εισόδου, μηχανική αντίσταση δείγματος και ράβδων πίεσεως).

### **2.7.2.1 Ομοιομορφία παραμόρφωσης και διαστάσεις δείγματος**

Στην ενότητα 2.3, δόθηκαν κάποια στοιχεία εξάρτησης των διαστάσεων του δείγματος, συναρτήσεων των διαστάσεων των ράβδων πίεσεως. Εν γένει, για τη βέλτιστη ανάλυση δεδομένων, πρέπει να δοθεί έμφαση στις διαστάσεις του δείγματος, όπως επίσης και στο μήκος της ράβδου Κρούστη, το τελευταίο συναρτήσεων της επιθυμητής ταχύτητας κρούσης, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Για την επιλογή του βέλτιστου μήκους δείγματος απαιτείται ο συνυπολογισμός του χρόνου  $t$ , που χρειάζεται για να επιτευχθεί ομοιόμορφη

ομοαξονική κατανομή παραμόρφωσης στο δείγμα. Μια πρακτική που επαρκεί στις περισσότερες των περιπτώσεων [11], είναι ο χρόνος αυτός  $t$  να θεωρηθεί ως ίσος με

$$t = \pi T \quad (2-117)$$

όπου  $T$ , ο χρόνος διάδοσης του κύματος στο δείγμα, για γνωστό υλικό ισχύει κατά τα γνωστά

$$T = \frac{l_s}{c_s} \quad (2-118)$$

δηλαδή, το πηλίκο του μήκους του δείγματος προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος σ' αυτό. Αν το υλικό είναι εντελώς άγνωστο κατά τη μέτρηση, γενικά σπάνια περίπτωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις για το προσδιορισμό του  $T$ , ανάλογες με αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης κύματος στις ράβδους κατά τη βαθμονόμηση. Επί παραδείγματι, strain gages στα δύο άκρα του, και μέτρηση του πότε υπάρχει καταπόνηση στην μία και στην άλλη. Η διαφορά αυτή χρόνου μεταξύ των δύο, με συνυπολογισμό των καθυστερήσεων στους αισθητήρες και όλων των ανάλογων παραγόντων, είναι το  $T$ .

Στη γενική περίπτωση βέβαια, για ένα στερεό που παραμορφώνεται πλαστικά και υπακούει τη θεωρία Taylor – von Karman, για το ζητούμενο αυτό χρόνο  $t$  ισχύει [11]

$$t^2 \geq \frac{\pi^2 \rho_s l_s^2}{\partial \sigma / \partial \varepsilon} \quad (2-119)$$

Όπου, η πυκνότητα και το μήκος του δείγματος συμβολίζονται αντίστοιχα ως

$$\rho_s, l_s$$

και η μερική παράγωγος

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$$

είναι ο από δευτέρου σταδίου ενδοτράχυνσης (stage 2 work-hardening) [20] ρυθμός της συνάρτησης πραγματικής τάσης/πραγματικής παραμόρφωσης για το προς έλεγχο υλικό. Για χρόνους  $t$ , μικρότερους από αυτούς που προσδιορίζονται από την ανισότητα (2-119), το δείγμα θα πρέπει να θεωρηθεί ότι δεν παραμορφώνεται ομοιόμορφα, και άρα το τελικό γράφημα τάσης/παραμόρφωσης θα έχει σημαντικά σφάλματα. Υλικά με είτε υψηλούς ρυθμούς εκτράχυνσης, χαμηλές ταχύτητες διάδοσης και/ή υψηλή πυκνότητα μικρότερα,

γενικά απαιτούν όλο και μικρότερο μήκος δείγματος για γρηγορότερη επίτευξη ομοιομορφίας παραμόρφωσης.

Μια προσέγγιση για να επιτευχθεί ομοιομορφία κατανομής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της μέτρησης, είναι να μειωθεί το μήκος δείγματος σε τέτοια επίπεδα ώστε ο χρόνος ανόδου  $t$ , από την εξίσωση **(2-119)** να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Κατά τα λοιπά, ως προς τις διαστάσεις του δείγματος, το μήκος δείγματος δεν πρέπει να μειωθεί περαιτέρω, χωρίς ταυτόχρονη μείωση στη διάμετρο του και στη διάμετρο των ράβδων πίεσεως. Μια συνηθισμένη και καθαρά πρακτική προσέγγιση, για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μεταβολής παραμόρφωσης, είναι η χρήση ράβδων πίεσεως μικρής διαμέτρου (<6 χιλιοστών), και ανάλογα ακόμα μικρότερη διάμετρο δείγματος [11].

### **2.7.2.2 Ομοιομορφία παραμόρφωσης και κύμα εισόδου**

Επειδή, η τιμή αυτή  $t$  έχει, πρακτικώς, ελάχιστη τιμή, μια ακόμα προσέγγιση για την επίτευξη ισορροπίας και ομοιόμορφης καταπόνησης στο δείγμα, σε συνθήκες μικρών τιμών παραμορφώσεως, είναι η αύξηση του χρόνου ανόδου στο αρχικώς μεταδιδόμενο (Incident wave) κύμα στις συσκευή [11]. Με χρήση υλικών ίδιας μηχανικής αντίστασης στην κατασκευή της ράβδου Κρούστη και στις ράβδους πίεσεως η κρούση καθίσταται συμμετρική, και ο παλμός εισόδου στη συσκευή μικρού χρόνου ανόδου και τετραγωνικός. Ο χρόνος ανόδου ενός τέτοιου τετραγωνικού παλμού εισόδου συνήθως είναι μικρότερος του  $t$ , όπως ορίζεται στην ανισότητα **(2-119)**. Αντιθέτως, αν ο χρόνος ανόδου του κύματος Incident αυξηθεί και γίνει συγκρίσιμος με το χρόνο διάδοσης κύματος στο δείγμα, τότε τα δεδομένα μέτρησης θα είναι ορθά για προηγούμενες τιμές καταπόνησης από αυτές για τις οποίες θα καταγραφούν. Ακόμα, επειδή τα τμήματα του παλμού εισόδου που εμφανίζουν εντονότερη διασπορά, τείνουν να είναι τα χαμηλού μήκους κύματος οριακά τμήματα του στην αρχή και στο τέλος του, στη περίπτωση του τετραγωνικού παλμού εννοούμε το τμήμα στην αρχή του παλμού όπου η τιμή του αρχίζει να σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή παλμού, και στο τμήμα του παλμού όπου η τιμή του αρχίζει να εκπίπτει από τη μέγιστη τιμή. Ένα κύμα εισόδου με μεγαλύτερο χρόνο ανόδου θα περιέχει λιγότερους παράγοντες ισχυρής διασποράς από ένα κύμα εισόδου με μικρό χρόνο ανόδου. Συνεπώς, ένα παλμός εισόδου Incident με μικρό ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης επιτυγχάνει να περιέχει λιγότερους παράγοντες διασποράς και γρηγορότερη ομοιομορφία παραμόρφωσης στο δείγμα.

Στη πράξη, ο χρόνος ανόδου του αρχικού κύματος εισόδου μπορεί να αυξηθεί με την τοποθέτηση μαλακού, εύπλαστου κομματιού μετάλλου, ανάμεσα στη ράβδο Κρούστη και στη ράβδο πίεσεως εισόδου [11], ως μια από τις μεθόδους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί γι' αυτό. Η επιλογή του υλικού αυτού και το πάχος του, εξαρτώνται από τον επιθυμητό ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα και τα όρια αντοχής του δείγματος. Συνήθως, επιλέγεται να έχει τα ίδια όρια αντοχής στη θραύση (yield strength) με το δείγμα, και πάχος από 0.1 mm έως και 2 mm. Το επιπλέον πλεονέκτημα που παρέχει η προσθήκη του υλικού

αυτού, είναι η ομοιομορφία και του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Όμως, αν το πρόσθετο αυτό έχει μεγάλο πάχος, ο ρυθμός μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος δεν θα είναι σταθερός και θα αυξάνεται συνεχώς κατά τη μέτρηση. Οι ακριβείς διαστάσεις και το πάχος αυτού του πρόσθετου υλικού στην άκρη κρούσης της ράβδου πίεσεως εισόδου, για κάθε δείγμα ελέγχου, δεν υπολογίζονται μαθηματικά εκ των προτέρων, αλλά η διαδικασία παραμένει η εμπειρικού τύπου δοκιμή και έλεγχος διάφορων δειγμάτων προσθετικού μετάλλου, έως την τελική επιλογή του καταλληλότερου. Η χρήση του πρόσθετου υλικού είναι μια διαδικασία η οποία επίσης επιτυγχάνει ιδιαίτερα αποτελεσματικά επίτευξη ομοιομορφίας παραμόρφωσης στο δείγμα αλλά και σταθερούς ρυθμούς μεταβολής παραμόρφωσης, στη μελέτη δειγμάτων υλικών μεσαίου και υψηλού ορίου θραύσης, τα οποία και μπορούν διαφορετικά μπορούν να παρουσιάσουν απότομους ρυθμούς μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης.

### **2.7.2.3 Θεωρητική μελέτη συμπεριφοράς ομοιομορφίας παραμόρφωσης δείγματος**

Στο [8], γίνεται θεωρητική μελέτη της συμπεριφοράς της παραμόρφωσης του δείγματος, συναρτήσει της μορφής του κύματος εισόδου, του λόγου μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως  $\beta$  και του χρόνου που απαιτείται για να επιτευχθεί ομοιομορφία κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα. Ο τελευταίος όρος οριοθετείτε ως ο αριθμός των απαιτούμενων διαδόσεων κύματος (wave transitions)  $n$  στο δείγμα, δηλαδή ο χρόνος αυτός θα ισούται με

$$t_b = \frac{nL_{sample}}{C_{sample}} \quad (2-120)$$

Στη μελέτη αυτή, θεωρείται παράμετρος

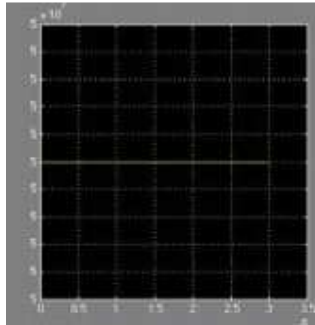
$$a_k$$

Όταν αυτή είναι μικρότερη του 0.05, το δείγμα θεωρείτε ότι βρίσκεται σε κατάσταση ομοιόμορφης κατανομής της παραμόρφωσης. Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης [8], για διάφορους τύπους αρχικού κύματος εισόδου (Incident wave).

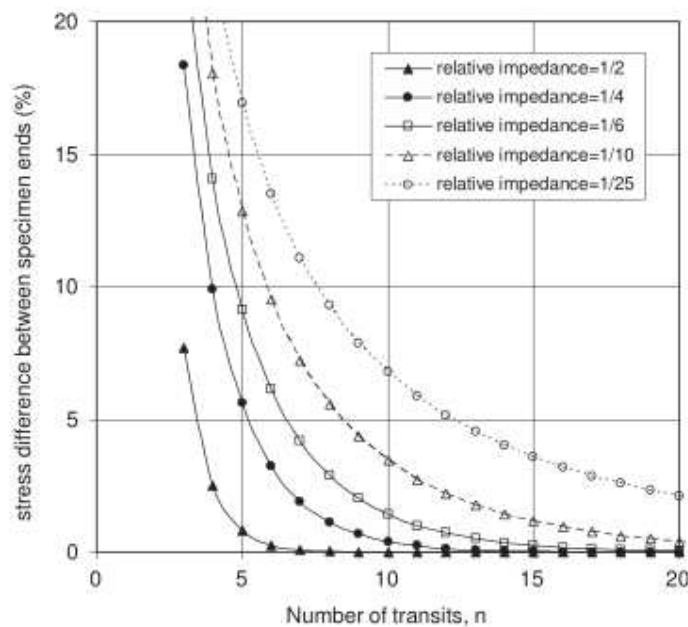
#### **1) Πεπερασμένος χρονικά, τέλειος τετραγωνικός παλμός**

Η παράμετρος ομοιομορφίας, συναρτήσει του λόγου μηχανικών αντιστάσεων δείγματος και ράβδων πίεσεων  $\beta$  και τον αριθμό των διαδόσεων κύματος δια μέσου του δείγματος, ισούται με

$$a_k = \frac{2\beta(1-\beta)^{k-1}}{(1+\beta)^k - (1-\beta)^k} \quad (2-121)$$



Σχήμα 2-34. Πεπερασμένος χρονικά, τέλειος τετραγωνικός παλμός



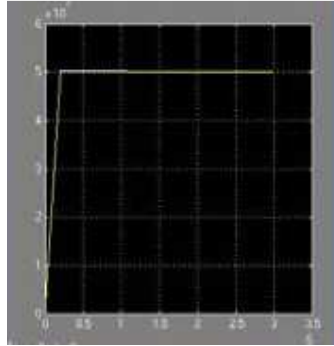
Σχήμα 2-35. Συμπεριφορά ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης, συναρτήσει των αριθμών διαδόσεων κύματος n στο δείγμα και το λόγο β, μηχανικής αντίστασης αυτού προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος τέλειος τετραγωνικός παλμός [8]

**Πίνακας 2-1.** Απαιτούμενος αριθμός μεταδόσεων κύματος n στο δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, συναρτήσει του λόγου β μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος τέλειος τετραγωνικός παλμός [8]

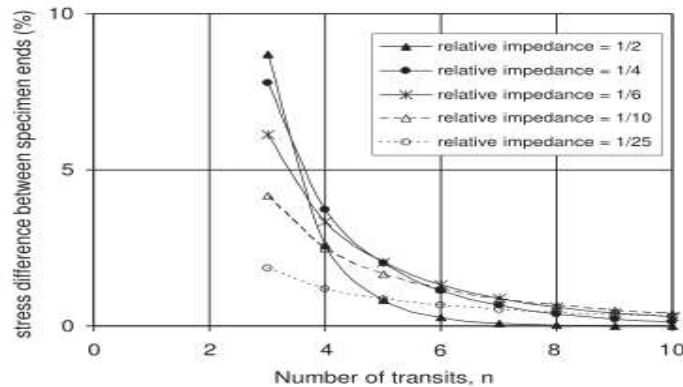
$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
n	4	6	7	9	13	17

2) Πεπερασμένος χρονικά παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και μορφής ανόδου ευθεία

$$a_k = \frac{2\beta^2(1-\beta)^{k-2}}{(1+\beta)^k - (1-\beta)^{k-2}}, k > 2 \quad (2-122)$$



Σχήμα 2-36. Πεπερασμένος χρονικά παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και μορφής ανόδου ευθεία



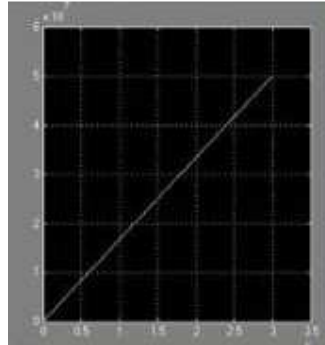
Σχήμα 2-37. Συμπεριφορά ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης, συναρτήσεϊ των αριθμών διαδόσεων κύματος n στο δείγμα και το λόγο β, μηχανικής αντίστασης αυτού προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος παλμός με πεπερασμένο ανόδου[8]

Πίνακας 2-2. Απαιτούμενος αριθμός μεταδόσεων κύματος n στο δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, συναρτήσεϊ του λόγου β μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου [8]

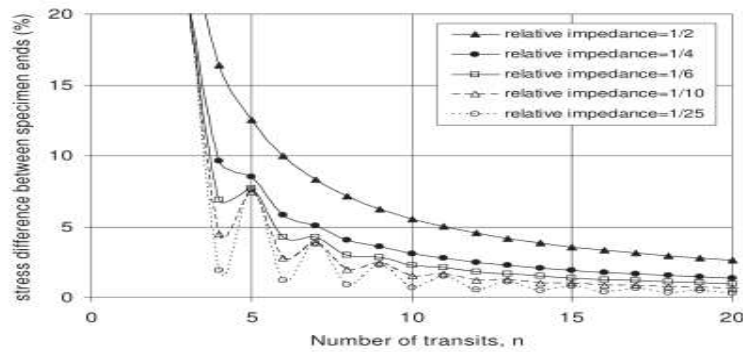
$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
n	4	4	4	3	3	3

3) Παλμός πεπερασμένος χρονικά, μορφής αύξουσας ράμπας

$$a_k = \frac{2\beta^2 [1 - (-1-\beta)/(1+\beta)^k]}{2k\beta - 1 + ((-1-\beta)/(1+\beta))^k}, k > 2 \quad (2-123)$$



Σχήμα 2-38. Πεπερασμένος χρονικά παλμός, μορφής αύξουσας ράμπας



Σχήμα 2-39. Συμπεριφορά ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης, συναρτήσει των αριθμών διαδόσεων κύματος n στο δείγμα και το λόγο β, μηχανικής αντίστασης αυτού προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος μορφής ράμπας [8]

Πίνακας 2-3. Απαιτούμενος αριθμός μεταδόσεων κύματος n στο δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό, συναρτήσει του λόγου β μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως, είσοδος μορφής ράμπας [8]

$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
n	11	8	6	6	6	6

Συμπερασματικά, αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί εδώ [8] είναι η θεωρητική διαπίστωση της ισχύος των πρακτικών κανόνων για την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα, που παρουσιάστηκαν παραπάνω [11]. Η ύπαρξη πεπερασμένου χρόνου ανόδου, και όχι μηδενικού, για το παλμό εισόδου οδηγεί σε γρηγορότερη σύγκλιση της καταπόνησης του δείγματος σε ομοιομορφία κατανομής παραμόρφωσης, ενώ κάνει τη σύγκλιση αυτή λιγότερο εξαρτώμενη από την σχετική μηχανική αντίσταση του δείγματος ως προς τις ράβδους πίεσεως. Ταυτόχρονα, αυτός ο χρόνος ανόδου, παραμένοντας μη μηδενικός και πεπερασμένος αλλά και σχετικά μικρός, συγκρίσει με τη χρονική διάρκεια του συνολικού παλμού εισόδου, οδηγεί στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, δηλαδή χαμηλότερο απαιτούμενο χρόνο σύγκλισης αλλά και ελαχιστοποίησης της επίδρασης της διαφοράς μηχανικής αντίστασης δείγματος και ράβδων πίεσεως.

#### 2.7.2.4 Συσχέτιση με το μήκος δείγματος

Στην παράγραφο 2.7.2.2, παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται για την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της παραμόρφωσης στο δείγμα. Αυτή, αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για την ισχύ των βασικών τύπων υπολογισμού τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης στο δείγμα. Δεν επιτυγχάνεται όμως άμεσα στη διεξαγωγή της μέτρησης, αλλά μετά την πάροδο χρόνου  $n\Delta t$ , όπου  $\Delta t$  είναι ο χρόνος διάδοσης κύματος στο υλικό δείγματος και ισούται με

$$\Delta t = \frac{L_{sample}}{C_{sample}} \quad (2-124)$$

Δηλαδή, το γινόμενο της ταχύτητας διάδοσης κύματος στο υλικό δείγματος επί το μήκος του δείγματος. Ο παράγοντας  $n$ , είναι ο αριθμός των διαδόσεων κύματος (wave transits) στο δείγμα. Στη μελέτη [9], ο αριθμός αυτός  $n$  απεδείχθη θεωρητικώς ότι εξαρτάται κατ' αρχάς από τον τύπο της εισόδου incident κύματος καταπόνησης, με τη μορφή παλμού πεπερασμένου χρόνου ανόδου να δεικνύεται η καλύτερη επιλογή (συγκρίσει με τέλειο τετραγωνικό παλμό και παλμό μορφής ράμπας), ούτως ώστε ο αριθμός των wave transits  $n$  να είναι μικρός, αλλά και σχετικά ελάχιστα αμετάβλητος, συναρτήσει του λόγου  $\beta$ , μηχανική αντίσταση δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδων πίεσεως

$$\beta = \frac{(\rho C)_{sample} \cdot A_{sample}}{(\rho C)_{Pressure\_Bar} \cdot A_{Pressure\_Bar}} = \frac{(\rho C)_{sample}}{(\rho C)_{Pressure\_Bar}} \left( \frac{D_{sample}}{D_{Pressure\_Bar}} \right)^2 \quad (2-125)$$



Στην ενότητα 2.3.3.2 έχει συσχετισθεί η ,εν γένει, ευρωστία του σήματος μετάδοσης με την διάμετρο του δείγματος μέσω των σχέσεων [2]

$$D_{sample} = \frac{D_{Pressure\_Bar} \sqrt{(\rho C)_{Pressure\_Bar}} \cdot \sqrt{(2\sqrt{(1-a_{13})} + a_{13} - 2)}}{\sqrt{a_{13}} \sqrt{-(\rho C)_{sample}}} \quad (2-63)$$

$$D_{sample} = \frac{D_{Pressure\_Bar} \sqrt{a_{23}} \sqrt{-(\rho C)_{Pressure\_Bar}}}{\sqrt{(a_{23}(\rho C)_{sample} - 2(\rho C)_{Pressure\_Bar})}} \quad (2-66)$$

$$a_{23} \rightarrow 1 \quad (2-67)$$

$$a_{13} - 0.5 \rightarrow 0^+ \quad (2-68)$$

Συνεπώς, το β στη σχεδιαστική αλληλουχία είναι ήδη γνωστό, άρα και ο αριθμός wave transits n. Συνεπώς, αυτό που απομένει και μπορεί να ελεγχθεί είναι η σχέση (2-126)

$$\Delta t = \frac{L_{sample}}{C_{sample}} \quad (2-126)$$

Δηλαδή το ζητούμενο είναι να ελαχιστοποιηθεί το μήκος δείγματος, ώστε ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται για την επίτευξη ομοιομορφίας να είναι αμελητέος (πολύ μικρότερος) του χρόνου διάρκειας T του αρχικού incident παλμού στη συσκευή. Πρακτικά, αυτό που χρειάζεται είναι όσο το δυνατόν μικρότερο μήκος δείγματος, ώστε ο χρόνος επίτευξης ομοιομορφίας καταπόνησης δείγματος, με την προϋπόθεση αρχικού παλμού incident παλμού με πεπερασμένο μη μηδενικό χρόνο ανόδου και συνολική διάρκεια T, να είναι πολύ μικρότερος του Τα αυτού

$$n\Delta t = n \frac{L_{sample}}{C_{sample}} \ll T \quad (2-127)$$

Το πρώτο εργαλείο χρήσης για να υπολογιστεί αυτό το μικρό επιθυμητό μήκος δείγματος είναι η σχέση (2-119)

$$t^2 \geq \frac{\pi^2 \rho_s l_s^2}{\partial \sigma / \partial \varepsilon} \quad (2-119)$$

Με  $t$  εδώ να είναι ο χρόνος ανόδου παλμού παραμόρφωσης στο δείγμα. Η σχέση αυτή όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από τον ερευνητή, αφού κατ' αρχήν απαιτεί γνώση του διαγράμματος εξάρτησης πραγματικής τάσης/ πραγματικής παραμόρφωσης από κατεργασία stage 2 work-hardening [21] του υλικού δείγματος. Μια άλλη πρακτική προσέγγιση θα μπορούσε να είναι να τεθούν κάποια κριτήρια μέσω των οποίων θα μπορούσε να επιλεγεί αρχικώς αυτό το μικρό μήκος δείγματος. Προς αυτή τη κατεύθυνση δύναται, κατ' αρχάς να επιλεγεί ένα λογικό κριτήριο για τη διάρκεια του που απαιτείται για επίτευξη ομοιομορφίας, στο οποίο ο χρόνος αυτός  $n\Delta t$  θα είναι ένα πολύ μικρό αναμενόμενο ποσοστό του χρόνου διάρκειας του αρχικού παλμού εισόδου  $T$ , επί παραδείγματι μικρότερο του 5%  $T$

$$n\Delta t = \frac{n * l_{sample}}{C_{sample}} \leq 0.05T \quad (2-120)$$

Παράλληλα, στην ενότητα 2.3, για τις ράβδους πίεσεως ορίστηκε ότι για απρόσκοπτη μετάδοση σήματος σε αυτές [2], συγκεκριμένα για τη μετάδοση του αρχικού incident παλμού στην Input ράβδο πίεσεως, απαιτείται το μήκος της ράβδου πίεσεως να είναι τουλάχιστον διπλάσιο του μήκους του αρχικού incident παλμού. Συνεπώς, αυτό που μπορεί να γίνει είναι να ευρεθεί ένα αρχικό μήκος δείγματος μέσω της (2-120), να γίνει προσομοίωση και να υπολογιστεί το μήκος παλμού καταπόνησης στο δείγμα.

Εάν ικανοποιείτε η ανισότητα

$$t_s < \frac{l_{sample}}{2C_{sample}} \quad (2-121)$$

Τότε το επιλεχθέν μήκος δείγματος μπορεί να κριθεί ικανοποιητική επιλογή για την πραγματοποίηση πραγματικής μέτρησης. Αλλιώς ο ερευνητής πρέπει να προβεί σε περαιτέρω μείωση του μήκους δείγματος και επανάληψη της διαδικασίας προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται ότι ο χρόνος  $t_p$  του αρχικού παλμού ορίστηκε στην ενότητα 2.3 ότι πρέπει να ικανοποιεί την ανισότητα (2-51)

$$t_p < \frac{L_{Pressure\_Bar}}{2C_{Pressure\_Bar}} \quad (2-51)$$

### 2.7.3 Επιπλέον ζητήματα σχεδίασης και προετοιμασίας της συσκευής προς μέτρηση

Ολοκληρώνοντας στο κεφάλαιο αυτό, την παρουσίαση των θεμάτων σχεδιασμού και προετοιμασίας μιας συσκευής Kolsky, θα πρέπει να ειπωθεί ότι τα θέματα σχεδιασμού και προετοιμασίας της συσκευής σίγουρα δεν εξαντλούνται σε όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Υπάρχουν άπειρα επιπλέον ζητημάτων, όπως για παράδειγμα αυτό των θερμοκρασιακών συνθηκών κατά τη διεξαγωγή της μέτρησης, της σκέδασης του κύματος σε τρεις χωρικές διαστάσεις, της μετατροπής των μεθοδολογιών για λειτουργία συσκευών Kolsky άλλου τύπου πλην της συμπίεσεως, της εξειδίκευσης για διάφορους πιο περίπλοκους τύπους υλικών, και πολλά άλλα. Σκοπός της παρούσης εργασίας, είναι να αποτελέσει ένα καλό, εισαγωγικό όμως πάντα, οδηγό των διαδικασιών σε όποιον ερευνητή ενδιαφερθεί να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή, ολοκληρώνοντας με την σχεδίαση μιας ενδεικτικής συσκευής Kolsky τύπου συμπίεσεως, προς μέτρηση σχετικά κοινότυπων υλικών, εν προκειμένω αλουμίνιο, σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Η εξειδίκευση αυτή, μπορεί να αναζητηθεί στη συνολική βιβλιογραφία που παρατίθεται με την εργασία αυτή [1]-[21], και ιδιαίτερα προτείνεται στον μελλοντικό ερευνητή να ανατρέξει στις ανάλογες εργασίες του συλλογικού έργου [21].

### 2.7.4 Ορισμός απαιτήσεων παραμόρφωσης

Με τη βαθμονόμηση της συσκευής και την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους δείγματος, οι περαιτέρω προετοιμασίες για τη μέτρηση μπορούν να προχωρήσουν. Πριν από κάθε μέτρηση, ο ερευνητής πρέπει να επιλέξει την επιθυμητή μέγιστη παραμόρφωση στο δείγμα ή/και τον, συνήθως, σταθερό, επιθυμητό ρυθμό μεταβολής αυτής στο δείγμα

$$\varepsilon_s, \dot{\varepsilon}_s$$

αντιστοίχως. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.4, σχεδίασης gas gun, η μέγιστη αυτή επιθυμητή παραμόρφωση στο δείγμα συσχετίζεται με το μήκος της ράβδου Κρούστη ως [11]

$$\varepsilon = \frac{2\dot{\varepsilon}L_{striker}}{c_b} \quad (2-86)$$

με το μήκος ράβδου Κρούστη και την ταχύτητα διάδοσης κύματος στις ράβδους πίεσεως και Κρούστη να είναι αντίστοιχα

$$L_{striker}, C_b$$

Ο ρυθμός μεταβολής της καταπόνησης δείγματος μπορεί να ίσος με [11]

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{V_{striker}}{l_s} \quad (2-85)$$

με τη ταχύτητα της ράβδου Κρούστη και το μήκος δείγματος να είναι αντίστοιχα

$$V_{striker} \gg l_s$$

Οι παραπάνω προσεγγίσεις [11] είναι, συνήθως, υπερεκτιμήσεις των πραγματικών τιμών που προκύπτουν τελικώς στην μέτρηση. Αποτελούν όμως μια πολύ καλή αρχική προσέγγιση, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της μέτρησης. Σε συνθήκες που απαιτούν υψηλές ταχύτητες σύγκρουσης για τη ράβδο Κρούστη, οι εξισώσεις (2-85), (2-86) έχουν αποδειχθεί πολύ καλές προσεγγίσεις για μέτρηση σε μαλακά μέταλλα, όπως χαλκό και αλουμίνιο. Στη πράξη, σε σκληρότερα υλικά, όπως σκληρούς χάλυβες, ευρέθηκε ότι απαιτούνται υψηλότερες ταχύτητες κρούσης και μήκη ράβδων Κρούστη για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

### 2.7.5 Διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης

Όταν η ράβδος Κρούστης χτυπήσει τη ράβδο Εισόδου πίεσεως, τότε δημιουργείται το αρχικώς μεταδιδόμενο στη συσκευή κύμα (Incident wave). Με τη διάδοση του κύματος αυτού έως τη κοινή δια-τομεακή περιοχή ράβδου Εισόδου και δείγματος, μέρος αυτού συνεχίζει να διαδίδεται στο δείγμα (Transmitted wave), ενώ άλλο μέρος του ανακλάται πίσω στη ράβδο πίεσεως Εισόδου (Reflected wave).

Αυτά τα τρία κύματα μετρούνται μέσω αισθητήρων strain gages. Όταν ο αισθητήρας καταγράφει μια μέτρηση, καταγράφεται επίσης η χρονική στιγμή που έγινε αυτή. Εφ' όσον τα σήματα αυτά ξεκινούν σε διαφορετικούς χρόνους, το καθένα αντιστοιχείται σε διαφορετική χρονική καταγραφή.

Για την δημιουργία του δυναμικού διαγράμματος τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα, χρησιμοποιούνται και τα τρία παραπάνω σήματα. Για να ληφθεί το ιστορικό παραμόρφωσης στο δείγμα, αφαιρείται η, απόλυτη, τιμή της Incident wave παραμόρφωσης από την , απόλυτη, τιμή του Reflected wave. Αφού και τα δύο σήματα αυτά δημιουργούνται σε διαφορετικούς χρόνους, πρέπει να συσχετιστούν ανάλογα [12]. Για παράδειγμα, έστω ο αισθητήρας strain gage στη ράβδο πίεσης εισόδου βρίσκεται σε απόσταση  $X$ , από την κοινή δια-τομεακή περιοχή ράβδου Εισόδου και δείγματος,  $C$  η ταχύτητα διάδοσης κύματος στη ράβδο πίεσεως αυτή. Συνεπώς ο χρόνος που θα χρειαστεί το κύμα να φθάσει από την 1<sup>η</sup> strain gage στη δια τομεακή περιοχή θα είναι  $t_0$ . Συνεπώς, για κάθε μέτρηση Reflected wave  $w_1(t)$  και Incident wave  $w_0(t)$  ο συσχετισμός και υπολογισμός διαφοράς θα πρέπει να γίνει ως

$$\Delta t = \frac{X}{C} \quad (2-122)$$

$$\Delta w(t) = |w_0(t)| - |w_1(t + \Delta t)| \quad (2-123)$$

Δηλαδή, κάθε ανακλώμενο κύμα αντιστοιχίζεται στο πραγματικό αρχικώς μεταδιδόμενο που το προκάλεσε, συνυπολογίζοντας το χρόνο που χρειάζεσαι το κύμα να φθάσει από τον ένα αισθητήρα στον άλλο. Πρακτικά βέβαια, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ανάγνωσης κάθε αισθητήρα, όπως η ίδια η καθυστέρηση ανάγνωσης αυτού, οι καλωδιώσεις και οι λοιποί σχετιζόμενοι παράγοντες. Με τη χρονική συσχέτιση αυτή των κυμάτων, αυτό που απομένει είναι απλώς η αφαίρεση του ενός από το άλλο για το προσδιορισμό της καταπόνησης στο δείγμα σε συνάρτηση με το χρόνο.

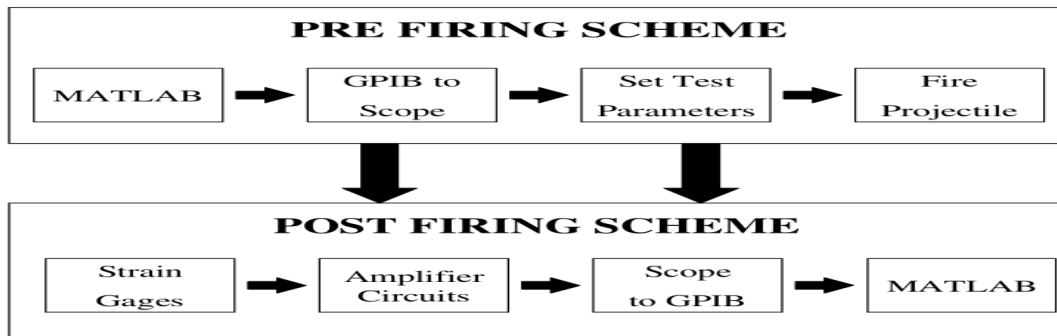
Η ίδια διαδικασία χρονικής συσχέτισης πρέπει να γίνει με το τελικώς μεταδιδόμενο κύμα (Transmission wave). Όταν αυτή ολοκληρωθεί, τότε μπορούν να παραχθούν τα δυναμικά γραφήματα τάσης/παραμόρφωσης δείγματος, χρησιμοποιώντας κατ' αρχάς τη σχέση υπολογισμού μηχανικής τάσης που αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.2

$$\sigma_{sample} = \frac{A_{BARS}}{A_{sample}} E_{BARS} \varepsilon_{transmitted}(t) \quad (2-23)$$

και σχεδιάζοντας τις τιμές που προκύπτουν σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες (στο χρόνο) τιμές της διαφοράς της απόλυτης τιμής του Incident wave με το Reflected wave.

### 2.7.6 Συγκεντρωτική παρουσίαση της διαδικασίας μέτρησης

Για να αναπαραχθεί μια διαδικασία μέτρησης μέσω συσκευής Kolsky, πρέπει να παρθούν συγκεκριμένες αποφάσεις και να υλοποιηθούν συγκεκριμένα στάδια προετοιμασίας. Πριν από οτιδήποτε άλλο, ο ερευνητής πρέπει να προσδιορίσει την επιθυμητή μέγιστη παραμόρφωση στο δείγμα ή/και τον επιθυμητό ρυθμό μεταβολής της. Έπειτα, θα πρέπει να ακολουθηθούν μια σειρά βημάτων σχεδίασης και προετοιμασίας της συσκευής που θα εγγυώνται ότι οι επιλογές αυτές παραμόρφωσης θα ικανοποιούνται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται μια τυπική ακολουθία βημάτων που λαμβάνουν χώρα κατά τη μέτρηση.



**Σχήμα 2-40.** Τυπική ακολουθία διαδικασίας μέτρησης με συσκευή Kolsky [2]

Εδώ, σε πρώτη φάση, ο ερευνητής πρέπει να δηλώσει στο πρόγραμμα επεξεργασίας σήματος (είτε το MATLAB, είτε υλοποιημένη εφαρμογή σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού, ή οτιδήποτε άλλο ίδιας λειτουργικότητας) τα επιθυμητά δεδομένα εκκίνησης τη διαδικασίας. Από αυτά ορίζονται οι τελικές παράμετροι λειτουργίας της συσκευής, δημιουργείται η κρούση και μετέπειτα, στη πορεία της διαδικασίας, οι μετρήσεις, η προ-επεξεργασία και η συλλογή δεδομένων.

Οι σημαντικότεροι αρχικοί παράγοντες που ορίζουν τη μορφή που θα πάρει μια τέτοια διαδικασία μέτρησης [2], είναι ο τύπος του υλικού δείγματος και ράβδων πίεσεως/κρούσης (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, όριο ελαστικότητας, η διάμετρος ή απ' ευθείας το εμβαδόν κοινής δια-τομεακής επιφάνειας δείγματος και ράβδων πίεσεως κρούσης, η μέγιστη επιθυμητή καταπόνηση στο δείγμα, μήκος δείγματος και ράβδων πίεσεως και ράβδου Κρούση, για την απλούστερη περίπτωση που έχουμε μόνο κυλινδρικές ράβδους, χαρακτηριστικά αισθητήρων strain gages και ενίσχυσης σήματος αυτών.

Προτού ξεκινήσει η κρούση και η βασική διαδικασία του πειράματος, από τους παραπάνω παράγοντες πρέπει να υπολογιστούν ή να επιβεβαιωθεί ότι κατά τη διάρκεια της μέτρησης θα παραμείνουν σε συγκεκριμένα πλαίσια τιμών [2] οι παρακάτω

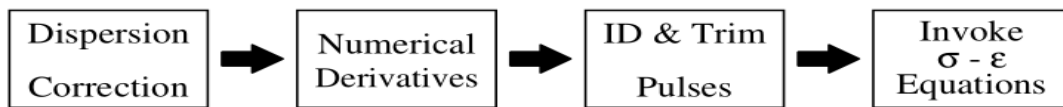
- Η απαιτούμενη απελευθέρωση πίεσης στο gas gun, για να επιτευχθεί η κατάλληλη ταχύτητα που θα οδηγήσει την κρούση να προκαλέσει το επιθυμητό κύμα param;orfvshw στην 1<sup>η</sup> ράβδο πίεσεως
- Έλεγχος ότι το Incident κύμα που δημιουργείται από την κρούση, δε θα επιβάλλει τις ράβδους κρούσης σε καταπόνηση μεγαλύτερη του ορίου ελαστικότητας τους
- Προσδιορισμός του ρυθμού μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης που θα υποστεί το δείγμα
- Επίπεδο ενίσχυσης του σήματος από τους αισθητήρες

Η προηγούμενη λίστα, δεν αποτελεί βέβαια το πλήρη κατάλογο των ενδιάμεσων υπολογισμών και ελέγχων που μπορούν να γίνουν πριν ακριβώς τη κρούση, αλλά σίγουρα είναι οι σημαντικότεροι από αυτούς.

Πριν από κάθε χρήση της συσκευής, ο ερευνητής θα πρέπει να ακολουθήσει της διαδικασίες ελέγχου βαθμονόμησης και εν γένει προετοιμασίας και εγγύησης αναμενόμενης λειτουργίας. Σε αυτές περιλαμβάνονται η ελαφρά επάλειψη με λιπαντικό των ράβδων πίεσης και Κρούστη, οι τοποθέτηση των διάφορων εξαρτημάτων και ο έλεγχος πίεσης του μηχανισμού gas gun.

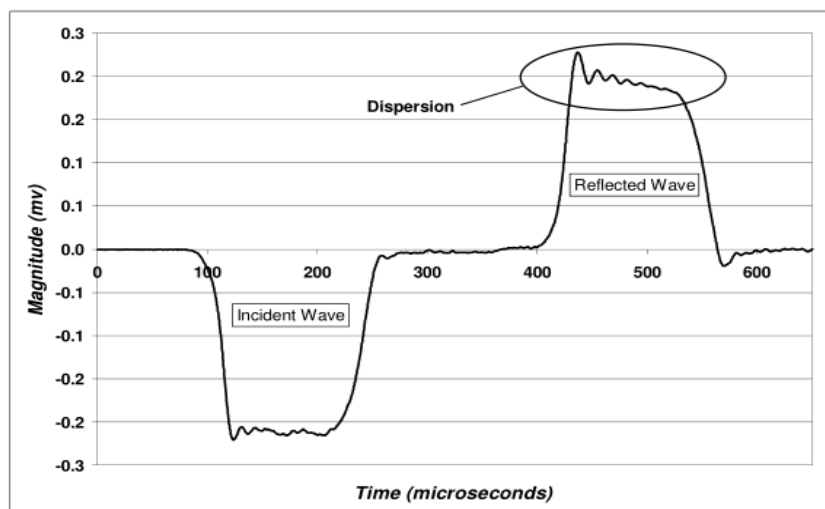
Με την απελευθέρωση πίεσης από το μηχανισμό gas gun, η ράβδος Κρούστης κατευθύνεται στην ράβδο πίεσεως Εισόδου. Η σύγκρουση τους δημιουργεί κύμα παραμόρφωσης (Incident wave) το οποίο, διασπάται στη κοινή δια-τομεακή περιοχή ράβδου πίεσεως Εισόδου και δείγματος, σε ένα τμήμα ανακλώμενο (Reflected wave) που επιστρέφει πίσω στη ράβδο Εισόδου και ένα τελικώς μεταδιδόμενο (Transmitted wave) στη ράβδο πίεσεως Εξόδου. Τα κύματα αυτά, καταγράφονται μέσω αισθητήρων strain gages, τοποθετημένους, συνήθως, στη μέση των ράβδων πίεσεως. Τα σήματα αυτά ενισχύονται, επεξεργάζονται κατάλληλα (ψηφιοποίηση) και μεταδίδονται προς καταγραφή και μετά - επεξεργασία, σε παλμογράφο ή/και Η/Υ.

Στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, λαμβάνει χώρα η κυρίως επεξεργασία του σήματος, όπως αυτή μπορεί να σκιαγραφηθεί στη παρακάτω εικόνα

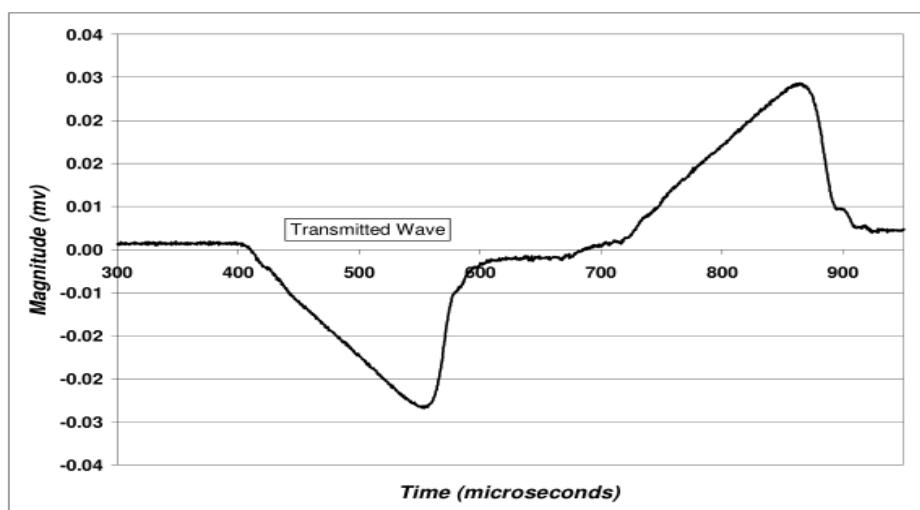


**Σχήμα 2-41.** Διαδικασία επεξεργασίας σήματος στον υπολογιστή [2]

Εδώ, πρωτίστως πρέπει να γίνει η διόρθωση του φαινομένου της διασποράς των σημάτων. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό με την παρουσία ταλαντώσεων, όπως μπορεί να φανεί στο παρακάτω σχήμα τυπικού Incident και Reflected παλμών (επιθυμητή μορφή τέλεια τραπεζοειδής).



**Σχήμα 2-42.** Τυπική μορφή παλμού παραμόρφωσης αρχικής μετάδοσης και ανακλώμενου (με αρχική επιθυμητή μορφή Incident wave τέλειο τραπέζιο) [2]



**Σχήμα 2-43.** Μορφή σήματος παραμόρφωσης τελικής μετάδοσης (Transmission), με αρχική μετάδοση το παλμό της προηγούμενης εικόνας [2]

Η διαδικασία διόρθωσης του φαινομένου της διασποράς αναλύθηκε παραπάνω. Αυτό, που ειπώθηκε και εκεί, είναι ότι χρειάζεται ο υπολογισμός των μετατόπισων φάσης των επιδρώντων ως διασπορά φασματικών παραμέτρων του σήματος. Υπολογίζεται ο σύνθετος μετασχηματισμός Fourier σε κάθε κύμα καταπόνησης, και η φάση τους μετατοπίζεται, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους



$$F_{corrected}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi fnt + \varphi) + B_n \sin(2\pi fnt + \varphi)]$$

$$\varphi = 2\pi fn \left( \frac{1}{C_o} - \frac{1}{C_n} \right) y$$

**(2-124)**

Οι απαιτούμενες μετατοπίσεις φάσεως  $\varphi$  υπολογίζονται από την είτε θεωρητική διαδικασία είτε από την πρακτική διαδικασία μέτρησης που προτάθηκαν [2] στην ενότητα 2.6.

Τέλος, ο άγνωστος χρόνος που χρειάζεται το σήμα για να διαδοθεί από τις κοινές διατομεακές περιοχές των ράβδων και του δείγματος, κάνει δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό του χρόνου έναρξης και λήξης κάθε κύματος. Θεωρητικά, κάποιος θα ανέμενε μικρούς τέτοιους επιπλέον χρόνους μετάδοσης, το οποίο και ισχύει, αλλά αφού και η διάρκεια της διαδικασίας κρούσης είναι μικρή, ακόμα και τέτοιες μικρές επιπλέον χρονικές προσθήκες από τα θεωρητικώς υπολογιζόμενα δεδομένα, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα, με αντίκτυπο στη μετέπειτα διαδικασία χρονικής ευθυγράμμισης των σημάτων και παραγωγής των διαγραμμάτων τάσης/παραμόρφωσης. Συνεπώς, η αρχή κάθε κύματος πρέπει να προσδιοριστεί χρονικά όσο το δυνατόν ακριβέστερα. Συνήθως πρακτική γι' αυτό, είναι αυτή που προτείνεται στην ενότητα 2.7.5, δηλαδή να υπολογιστεί συνολικά ο χρόνος διάδοσης των κυμάτων στις ράβδους και του χρόνου που χρειάζεται για την καταγραφή τους από τις strain gages, κατά συνέπεια η χρονική διαφορά έναρξης μεταξύ τους. Αυτό απαιτεί γνώση εκ των προτέρων της ταχύτητας διάδοσης κύματος, στις ράβδους πίεσεως και στο δείγμα. Επιπρόσθετα, άλλοι παράγοντες, όπως η λίπανση των κοινών διατομεακών περιοχών των ράβδων και του δείγματος, εισάγουν επιπλέον άγνωστες καθυστερήσεις διάδοσης. Η διαδικασία έτσι χρονικής συσχέτισης των κυμάτων με τον τρόπο αυτό, χάνει αρκετά ως προς την πρακτική της αξία. Αντί λοιπόν αυτής, της περισσότερο θεωρητικής και ιδανικών συνθηκών προσέγγισης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, ένας επαναληπτικός αλγόριθμος [2], σε κάθε μια από τις τρεις μελετώμενες μηχανικές παραμορφώσεις.

Για τη χρονική τοποθέτηση των παλμών λοιπόν, με συστηματικό τρόπο, απαιτούνται αριθμητικές διαδικασίες. Προσεγγίζοντας τις παραγωγούς των κυμάτων παραμόρφωσης, κώδικας αναζήτησης μπορεί να υλοποιηθεί, που θα αναζητά μεταβολές στη κλίση των γραφημάτων παραμόρφωσης. Σε μια τέλεια αναπαράσταση της μηχανικής παραμόρφωσης αυτή, τόσο η όσο και η παράγωγος της μέχρι τη πραγματική χρονική έναρξη της, θα είναι μηδέν. Στην πράξη βέβαια αυτό δεν ισχύει απόλυτα, καθώς λόγω της επίδρασης διαφόρων φαινομένων θορύβου, το σήμα θα έχει τιμή διάφορη του μηδενός, σε μια περιοχή κοντά στο σημείο χρονικής εκκίνησης του. Ο θόρυβος αυτός, είναι εκ φύσεως τυχαίος, άρα εξίσου τυχαία είναι και η συμπεριφορά της παραγωγού του. Συνεπώς για την

εύρεση των άκρων του παλμού, πρέπει να υλοποιηθεί διαδικασία αναζήτησης, όπου για ένα αριθμό συνεχόμενων παραγώγων του παλμού αυτές έχουν το ίδιο πρόσημο. Για παράδειγμα, για την εύρεση της αρχής στο χρόνο ενός συμπιεστικού παλμού αρχικής μετάδοσης (Incident), θα πρέπει να γίνει αναζήτηση, έστω, δέκα συνεχόμενων αρνητικών παραγώγων. Εφόσον είναι σχετικά αδύνατο να υπάρχουν δέκα συνεχόμενες παράγωγοι με ίδιο πρόσημο λόγω θορύβου, η διαδικασία με υψηλή πιθανότητα θα βρίσκει τα πραγματικά χρονικά άκρα του παλμού. Στη πράξη, η πιθανότητα ύπαρξης δέκα συνεχόμενων χρονικά τιμών παραγώγων με τιμή τυχαία, λόγω θορύβου, είναι πάρα πολύ μικρή, κάπου στο 0,1%. Ο υψηλότερος αριθμός συνεχόμενων τυχαίων παραγώγων ίδιου πρόσημου που έχει παρατηρηθεί είναι πέντε, το οποίο μπορεί να μεταφραστεί σε μέγιστο σφάλμα στην εύρεση της χρονικής αρχής του κύματος ίσο με πέντε δια το βαθμό δειγματοληψίας του σήματος. Ο αλγόριθμος προσέγγισης της παραγώγου που προκύπτει δίνεται από το παρακάτω τύπο [2]

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 4f(x_{i+1}) - 3f(x_i)}{2h} \quad (2-125)$$

Όπου,  $i$  είναι ο αριθμητικός δείκτης που αναφέρεται στον αριθμό των σημείων ελέγχου, στο παράδειγμα που αναλύθηκε παραπάνω, λαμβάνει τιμές από 1 έως 10, για κάθε χρονική περιοχή ελέγχου ενώ  $h$  είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας. Η συνάρτηση  $f$  είναι προφανώς το ιστορικό τιμών παραμόρφωσης από το κάθε κύμα πίεσης που μελετάται.

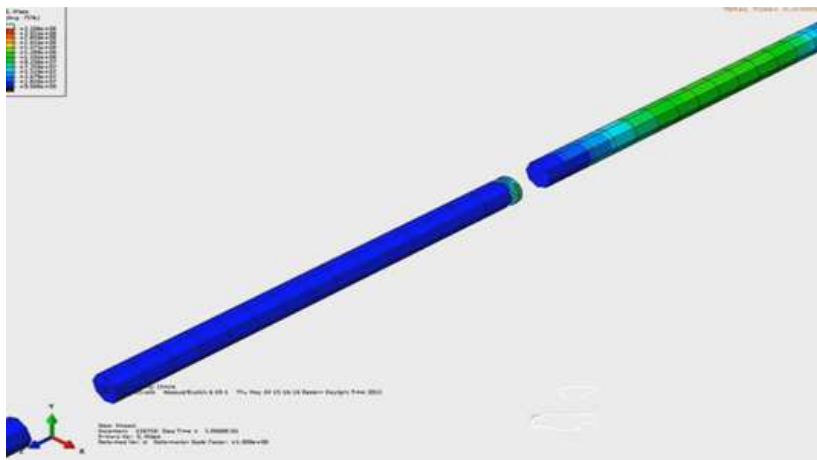
## 3 Προσομοίωση και μοντελοποίηση συσκευής Kolsky

### 3.1 Λογισμικό

Πέραν των υλικών για την κατασκευή της συσκευής, των ηλεκτρονικών, παλμογράφος, αισθητήρες, ενισχυτικές διατάξεις και άλλα πιθανά παρελκόμενα, σημαντικό ρόλο καταλαμβάνουν πλέον, οι επιλογές λογισμικού, τόσο στο στάδιο της σχεδίασης και προσομοίωσης, όσο και στο στάδιο της υλοποίησης και λειτουργίας. Ο ρόλος αυτός αναβαθμίζεται διαρκώς, αφού με τη συνεχή ανάπτυξη των υπολογιστών, οι επιλογές προσθήκης λειτουργικότητας ή αντικατάστασης hardware τμήματος με λογισμικό που επιτελεί παρόμοια λειτουργία, οι επιλογές βελτιώνονται και αυξάνονται δραματικά.

### 3.2 Προσομοίωση και σχεδίαση

Οι σύγχρονες επιλογές λογισμικού σχεδίασης και προσομοίωσης, παρέχουν πλέον εξελιγμένες δυνατότητες τόσο CAD όσο και εξομοίωσης υψηλής ακρίβειας της συμπεριφοράς της συσκευής.. Πακέτα λογισμικού όπως είναι το Solidworks, το Ansys, το LS-Dyna και άλλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, και χρησιμοποιούνται με εξαιρετική επιτυχία, τόσο στη σχεδίαση συσκευών Kolsky, όσο και σε πολύ πιο πολύπλοκες ηλεκτρομηχανολογικές κατασκευές.



**Σχήμα 3-1.** Προσομοίωση συμπεριφοράς συσκευής Kolsky μέσω του προγράμματος Abaqus [19]

Εν τούτοις, και αυτά τα ολοκληρωμένα πακέτα λογισμικού σχεδίασης ή/και προσομοίωσης, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που παρέχουν και, πλέον, τη πληρότητα τους δεν αποτελούν την επιλογή - «Πανάκεια», αλλά υπό ορισμένες προϋποθέσεις ο ερευνητής μπορεί να κατευθυνθεί και σε άλλες λύσεις. Κυρίως το πρόβλημα έγκειται στο ότι, τα προγράμματα αυτά, όντας στη πλειοψηφία τους επικεντρωμένα σε σενάρια

ηλεκτρομηχανολογικών κατασκευών, απαιτούν εξειδικευμένη γνώση ή/και εμπειρία για τη χρήση τους. Ακόμα και αν αυτή η γνώση μπορεί να αποκτηθεί σχετικά εύκολα, σίγουρα θα ήταν επιθυμητό στον ερευνητή να μπορεί να κάνει χρήση ήδη υπάρχουσας τεχνογνωσίας και περισσότερο δημοφιλών και πιο προσιτών λύσεων λογισμικού. Μια τέτοια εναλλακτική, από τις πραγματικά λίγες που ευρέθησαν στη βιβλιογραφία κατά την εκπόνηση της αρούσας εργασίας, παρουσιάζεται παρακάτω [9]. Εδώ, προτείνεται μοντελοποίηση της λειτουργίας μιας συσκευής Kolsky μέσω του λογισμικού Matlab/Simulink. Το τελευταίο, αν και δεν παρέχει την ακρίβεια και εποπτεία που δίνουν τα προηγούμενως αναφερόμενα εξειδικευμένα ηλεκτρομηχανολογικά πακέτα σχεδιασμού, είναι εξαιρετικά δημοφιλές στην επιστημονική κοινότητα, στο σύνολο της, πολύ πιο εύκολο στη χρήση, ενώ το πλήθος ήδη υλοποιημένων αλγορίθμων σε αυτό επαρκούν για οποιαδήποτε μαθηματική επεξεργασία σήματος απαιτηθεί.

### 3.3 Μοντέλο Matlab/Simulink

#### 3.3.1 Παραδοχές

Οι βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση ενός μονοδιάστατου ελαστικού κύματος καταπόνησης είναι μετάδοση, ανάκλαση και υπέρθεση (transmission, reflection, superposition). Η μετάδοση και η ανάκλαση λαμβάνουν χώρα όταν το κύμα προσπέσει σε περιοχή όπου μεταβάλλεται η μηχανική του μέσου διάδοσης, όπως είναι η περίπτωση της κοινής δια-τομεακής περιοχής μεταξύ δείγματος και ράβδου πίεσεως. Κατά την διάδοση του κύματος από ράβδο 1 σε άλλη ράβδο 2, ορίζονται οι μηχανικές αντιστάσεις τους ως

$$(\rho CA)_1, (\rho CA)_2$$

αντίστοιχα, όπου  $\rho$ ,  $C$ ,  $A$  είναι κατά σειρά η πυκνότητα ράβδου, η ταχύτητα διάδοσης κύματος στο υλικό κατασκευής της ράβδου και η δια τομεακή της επιφάνεια στη διάταξη, όπως αυτά ορίστηκαν ανάλογα στο κεφ.2 . Ορίζονται επιπλέον

- Η σχετική δια-τομεακή περιοχή των δύο ράβδων  $\alpha$ , ήτοι το πηλίκο της δια-τομεακής επιφάνειας της 1<sup>ης</sup> ράβδου προς τη δια-τομεακή επιφάνεια της 2<sup>ης</sup> ράβδου

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} \quad (3-1)$$

- Η σχετική μηχανική αντίσταση των δύο ράβδων  $\beta$ , ήτοι το πηλίκο της μηχανικής αντίστασης της 1<sup>ης</sup> ράβδου προς τη μηχανική αντίσταση της 2<sup>ης</sup> ράβδου

$$\beta = \frac{(\rho CA)_1}{(\rho CA)_2} \quad (3-2)$$

Εξειδικεύοντας την ανάλυση στην περίπτωση της συσκευής Kolsky πίεσεως, αν η ράβδος 1 είναι η 1<sup>η</sup> ράβδος πίεσης, 2 το δείγμα προς έλεγχο και με την παραδοχή δύο ίδιων ράβδων πίεσεων, από την ανάλυση που έγινε στο κεφ. 2 όπου για την τάση και τη μηχανική παραμόρφωση στο δείγμα έχουμε

$$\begin{aligned}\sigma_s(t) &= \sigma_2(t) = E_{BAR} \frac{A_{BAR}}{A_s} \varepsilon_T(t) = E_1 a \varepsilon_T(t) \\ \frac{d\varepsilon_s}{dt} &= \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{-2C_o}{L} \varepsilon_R(t) = \frac{-2C_{BAR}}{L_s} \varepsilon_R(t) = \frac{-2C_1}{L_2} \varepsilon_R(t) \\ \varepsilon_s(t) &= \varepsilon_2(t) = \frac{-2C_o}{L} \int \varepsilon_R(t) dt = \frac{-2C_{BAR}}{L_s} \int \varepsilon_R(t) dt = \frac{-2C_1}{L_2} \int \varepsilon_R(t) dt\end{aligned}\quad (3-3)$$

Με βάση αυτά, μπορούν να οριστούν οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης R, T ως

$$\begin{aligned}R_{12} &= \frac{1-\beta}{1+\beta} \\ T_{12} &= \frac{2\alpha}{1+\beta}\end{aligned}\quad (3-4)$$

συνεπώς, στη μετάδοση από το δείγμα στη 2<sup>η</sup> ράβδο πίεσης θα ισχύει

$$\begin{aligned}R_{21} &= \frac{1-\frac{1}{\beta}}{1+\frac{1}{\beta}} \\ T_{21} &= \frac{2\frac{1}{\alpha}}{1+\frac{1}{\beta}}\end{aligned}\quad (3-5)$$

Δηλαδή, για το αρχικό κύμα I (Incident), το κύμα ανάκλασης R (Reflected) και το κύμα τελικής μετάδοσης στη 2<sup>η</sup> ράβδο πίεσης T (Transmitted), οι τιμές μηχανικής τάσης θα είναι

$$\begin{aligned}\sigma_R(t) &= R_{12} \sigma_1(t) \\ \sigma_T(t) &= T_{12} \sigma_1(t)\end{aligned}\quad (3-6)$$

Στην πράξη, όπως προ-ειπωθεί στο κεφ.2, το κύμα ανακλάται και μεταδίδεται αρκετές φορές στο δείγμα, μέχρι την ομοιομορφία κατανομής παραμορφωσης. Συνεπώς, η παραπάνω ανάλυση, δίνει την υπέρθεση, το άθροισμα των ανακλώμενων και

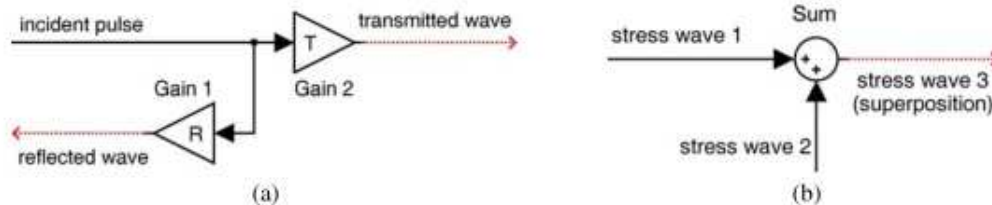
μεταδιδόμενων κυμάτων παραμόρφωσης που λαμβάνουν χώρα στο δείγμα, κάθε χρονική στιγμή. Παράλληλα, εισάγεται η παραδοχή για τις μηχανικές τάσεις ότι, προσεγγιστικά τουλάχιστον, ισχύει

$$\sigma_R \approx \sigma_T \quad (3-7)$$

στις βασικές εξισώσεις ανάλυσης (3-3), η οποία προκύπτει από την απαίτηση ομοιόμορφης κατανομής της καταπόνησης στο δείγμα

### 3.3.2 Υλοποίηση του μοντέλου

Η υλοποίηση της προσομοίωσης της διαδικασίας μετάδοσης και ανάκλασης φαίνεται στις παρακάτω εικόνες

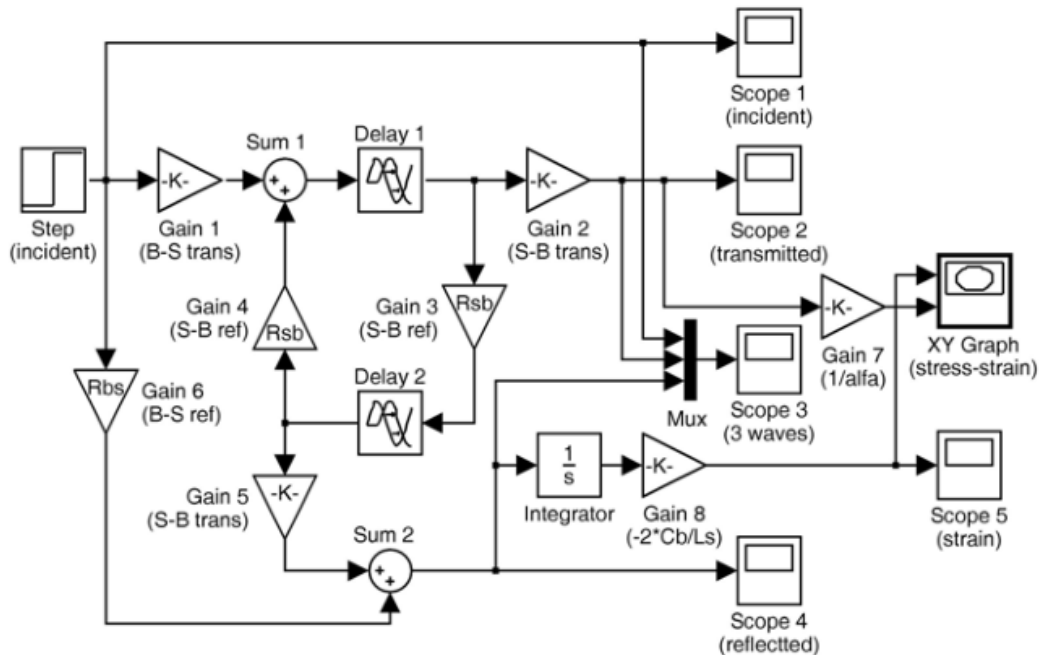


**Σχήμα 3-2.** a) Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος, κατά τη διάδοση του στη κοινή διατομεακή περιοχή ράβδου πίεσεως και δείγματος b) Γραμμική υπέρθεση δύο κυμάτων [9]

Όταν το αρχικό κύμα πίεσης φθάνει στη κοινή δια-τομεακή περιοχή, διαχωρίζεται σε δύο κύματα, ίσης απόλυτης τιμής. Έπειτα, αυτά περνούν από Gain blocks ενίσχυσης, με συντελεστές κέρδους τις ανάλογες τιμές συντελεστών ανάκλασης και μετάδοσης R,T. Η υπέρθεση υλοποιείται μέσω Sum block.

Τα παραπάνω δίνουν τη μέθοδο μοντελοποίησης της βασικής συμπεριφοράς του κύματος. Αυτό στη πράξη, ανακλάται και μεταδίδεται εμπρός και πίσω στο δείγμα ένα αριθμό φορών μέχρι την ομοιομορφία κατανομή παραμόρφωσης στο δείγμα. Αυτό ακριβώς το φαινόμενο είναι απαραίτητο να προσομοιωθεί, ούτως ώστε να δημιουργηθεί ένα πλήρες μοντέλο συμπεριφοράς της διαδικασίας μέτρησης με συσκευή Kolsky τύπου πίεσεως. Υπάρχει μια τεχνική ανατροφοδότησης και επανάληψης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εδώ. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.





**Σχήμα 3-4.** Τελικό μοντέλο προσομοίωσης, εδώ ως είσοδος από την κρούση έχει προστεθεί σήμα βηματικής μορφής [9]

Εδώ, στη βασική λειτουργία προσομοίωσης έχουν προστεθεί βοηθητικά blocks υπολογισμών και εποπτείας. Τα blocks Scope 1, Scope 2, Scope 3 χρησιμοποιούνται για την τελική απεικόνιση κατά σειρά των Incident, Reflected, Transmitted μηχανικών τάσεων. Το Mux block, χρησιμοποιείται για την πολυπλεξία και των τριών αυτών σημάτων καταπόνησης και την απεικόνιση τους, και των τριών ταυτόχρονα, στο Scope 4. Το Gain 7 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραμόρφωση στο δείγμα. Τα blocks Integrator και Gain 8 συνενώνονται για τον υπολογισμό της τάσης στο δείγμα, αυτή εξάγεται προς επόπτευση στο Scope 5. Τελικά, στο block XY Graph δημιουργείται διάγραμμα μηχανικής τάσης- μηχανικής καταπόνησης.

### 3.3.3 Δοκιμές και μετρήσεις

Στο [9], ορίστηκε ένα σύνολο δοκιμών για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Συγκεκριμένα, ορίστηκαν οι ιδιότητες των ράβδων πίεσεων και δείγματος ως

$$C_{BARS} = C_{SAMPLE} = 5064 \text{ m / s}$$

$$L_{SAMPLE} = 5,064 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$a = \beta = 0.1$$

$$E_{BARS} = 200 * 10^9 \text{ Pa}$$



$$Delay1 = Delay2 = \frac{L_{Sample}}{C_{Sample}} = 10^{-6} \text{ sec}$$

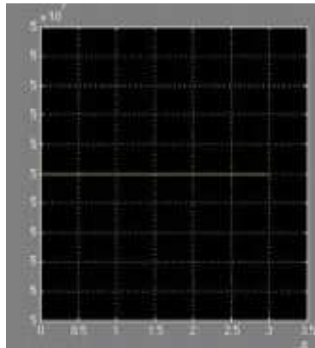
Δηλαδή κάποιο είδος μαλακού χάλυβα, στο [9] δεν αναφέρεται κάτι παραπάνω.

Είσοδοι στο μοντέλο

1) Αρχικό σήμα incident με μορφή βηματικής, πρακτικά ένα τέλειος τετραγωνικός παλμός [9]

Stress amplitude: 50MPa

Signal Length:  $30 \times 10^{-6}$  sec

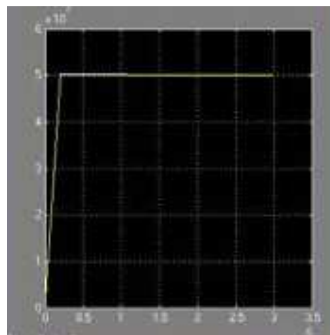


2) Αρχικό σήμα incident με αρχικό τμήμα του finite rising ramp για χρόνο  $2 \times 10^{-6}$  sec , πρακτικά παλμός με χρόνο ανόδου πεπερασμένο και όχι μηδενικό [9]

Rising time:  $2 \times 10^{-6}$  sec

Stress amplitude (max): 50MPa

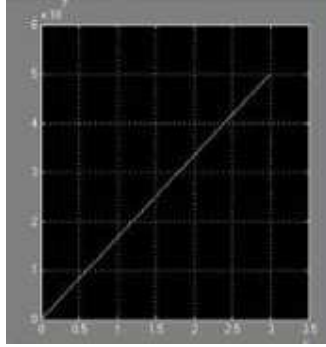
Signal Length:  $30 \times 10^{-6}$  sec



3) Αρχικό σήμα incident infinite rising ramp [9]

Stress amplitude (max): 50MPa

Signal Length:  $30 \times 10^{-6}$  sec



Οι τρεις αυτές μετρήσεις, υφίστανται μετα - επεξεργασία όπου

- Υπολογίζεται ο βαθμός της ομοιομορφίας στην καταπόνησης

$$U(t) = \frac{\Delta\sigma_{Sample}(t)}{\sigma_{Sample}(t)} \quad (3-8)$$

και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα θεωρητικά αποτελέσματα στην ανάλυση για την ομοιομορφία παραμόρφωσης στο δείγμα [8], η οποία παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.7.

- Θεωρητικός υπολογισμός της σχέσης τάσης εισόδου/παραμόρφωσης, και σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο. Αυτός ο υπολογισμός μπορεί να γίνει προσεγγίζοντας τη ,πραγματική, τιμή του συντελεστή ελαστικότητας (Elastic modulus, Young's modulus) ως

$$E_{Sample} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{C_{Sample}}{C_{BARS}} E_{BARS} \quad (3-9)$$

Η θεωρητική μορφή της σχέσης τάσης/παραμόρφωσης είναι η ευθεία

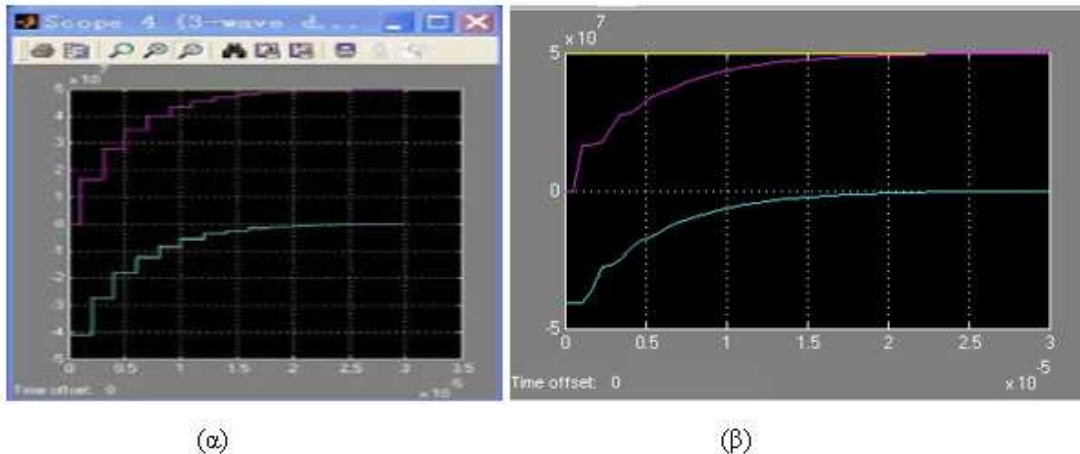
$$\sigma = E_{Sample} * \varepsilon \quad (3-10)$$

η οποία συγκρίνεται με τη σχέση αρχικής τάσης και παραμόρφωσης, της εισόδου, δηλαδή της εισόδου τάσης στο μοντέλο με την παραμόρφωση στο Score 5.

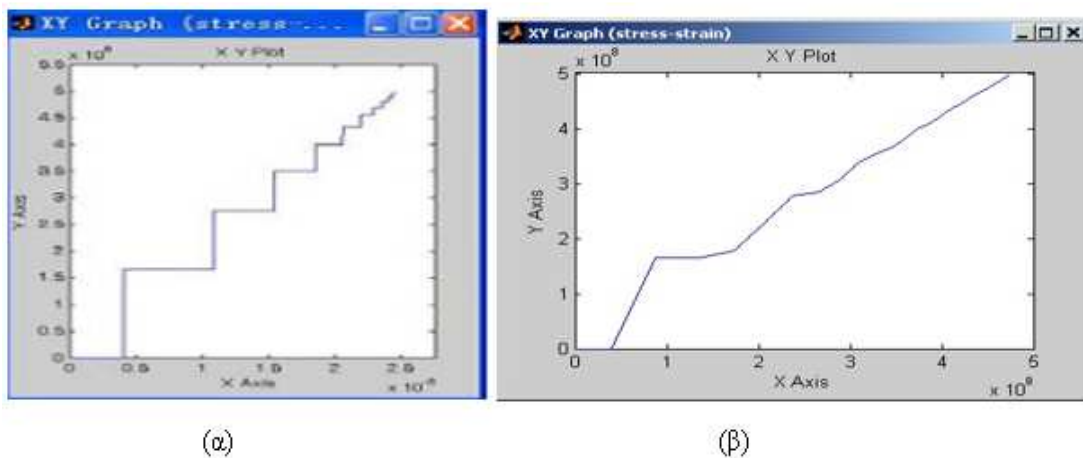
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής [8], τόσο από τους συγγραφείς όσο και η αναπαραγωγή τους στη παρούσα εργασία.

### 1. Μέτρηση με είσοδο βηματική

Τα σήματα εξόδου και το διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης, σε αντιπαραβολή με το αποτέλεσμα των μετρήσεων στη παρούσα εργασία φαίνονται στη παρακάτω εικόνα

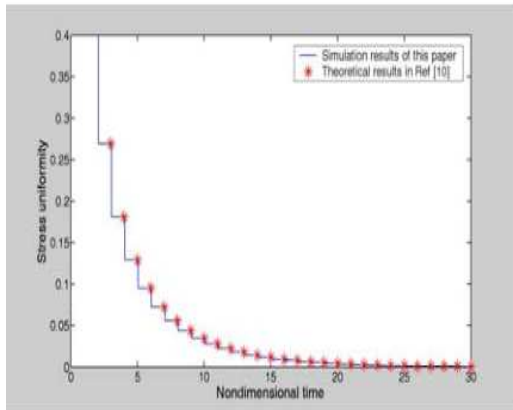


**Σχήμα 3-5.** Incident (κίτρινο), Reflected (πράσινο) και Transmitted (μωβ) πίεση (α) Συγγραφείς [9] (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος βηματική)

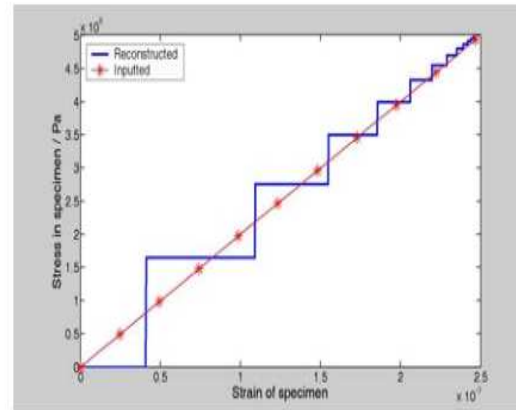


**Σχήμα 3-6.** Διάγραμμά τάσης/παραμόρφωσης (α) Συγγραφείς [9] (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος βηματική)

Και τα διαγράμματα βαθμού ομοιομορφίας καταπόνησης και προσέγγισης της τάσης/παραμόρφωσης δείγματος

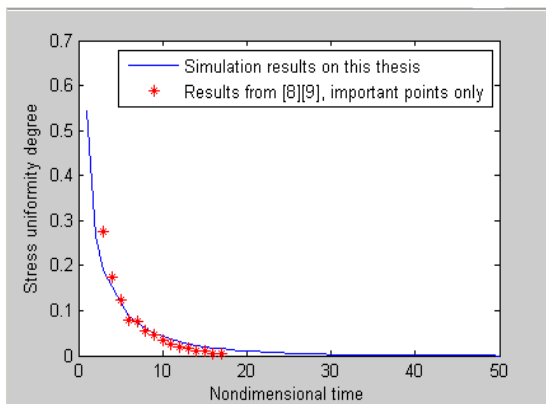


(a)

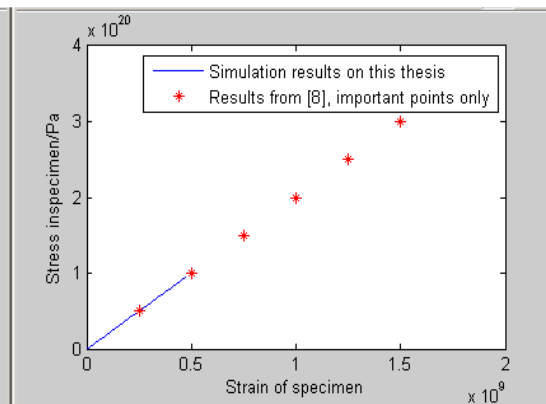


(b)

**Σχήμα 3-7.** Μετρήσεις συγγραφέων [9], (a) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (b) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις από τους συγγραφείς [9], οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης [8]



(a)

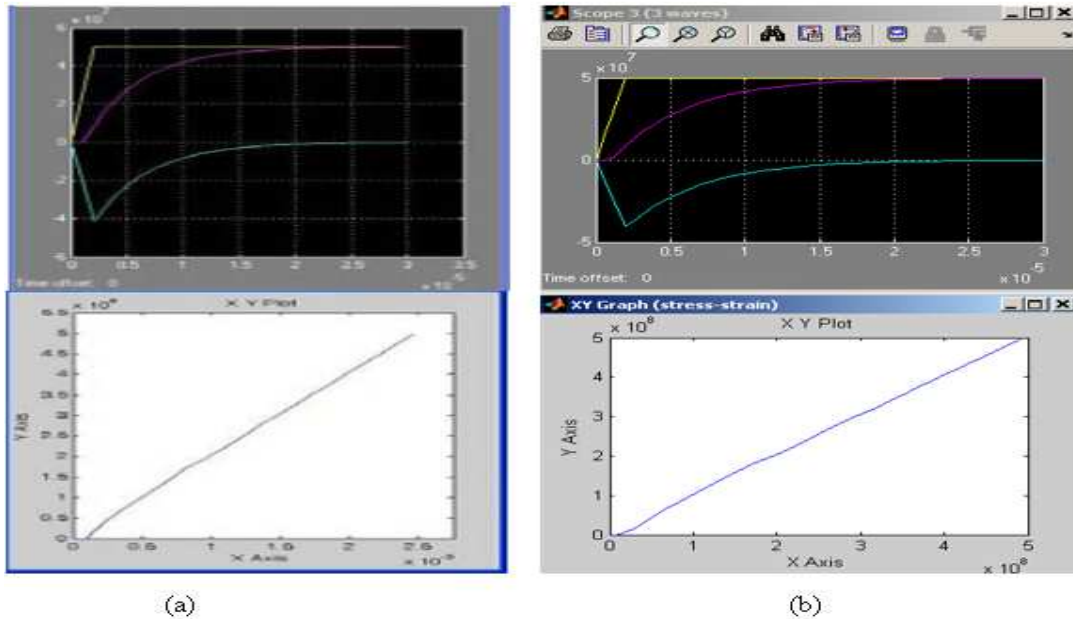


(b)

**Σχήμα 3-8.** Μετρήσεις στη παρούσα εργασία, (a) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (b) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις που έγιναν , οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8]

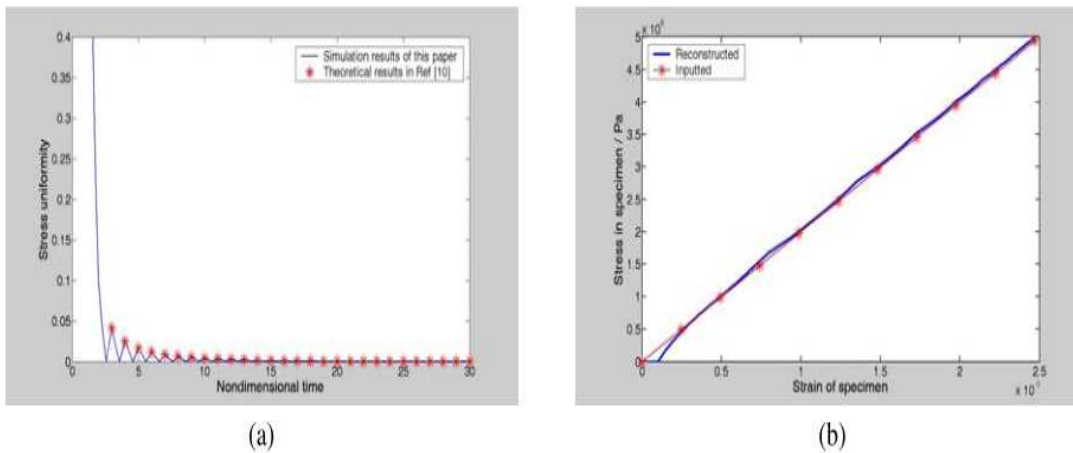
## 2. Μέτρηση με είσοδο finite rising ramp

Τα σήματα εξόδου και το διάγραμμα πίεσης/καταπόνησης, σε αντιπαραβολή με το αποτέλεσμα των μετρήσεων στη παρούσα εργασία φαίνονται στη παρακάτω εικόνα

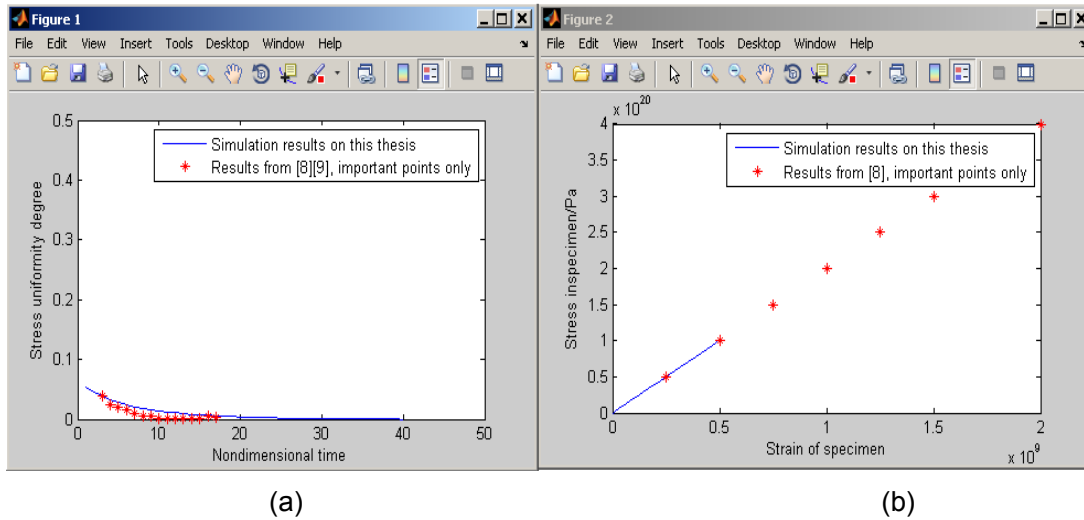


**Σχήμα 3-9.** Αποτέλεσμα προσομοίωσης (α) Συγγραφείς (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος finite rising ramp)

Και τα διαγράμματα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης και προσέγγισης της σχέσης τάσης/παραμόρφωσης δείγματος από το [9]

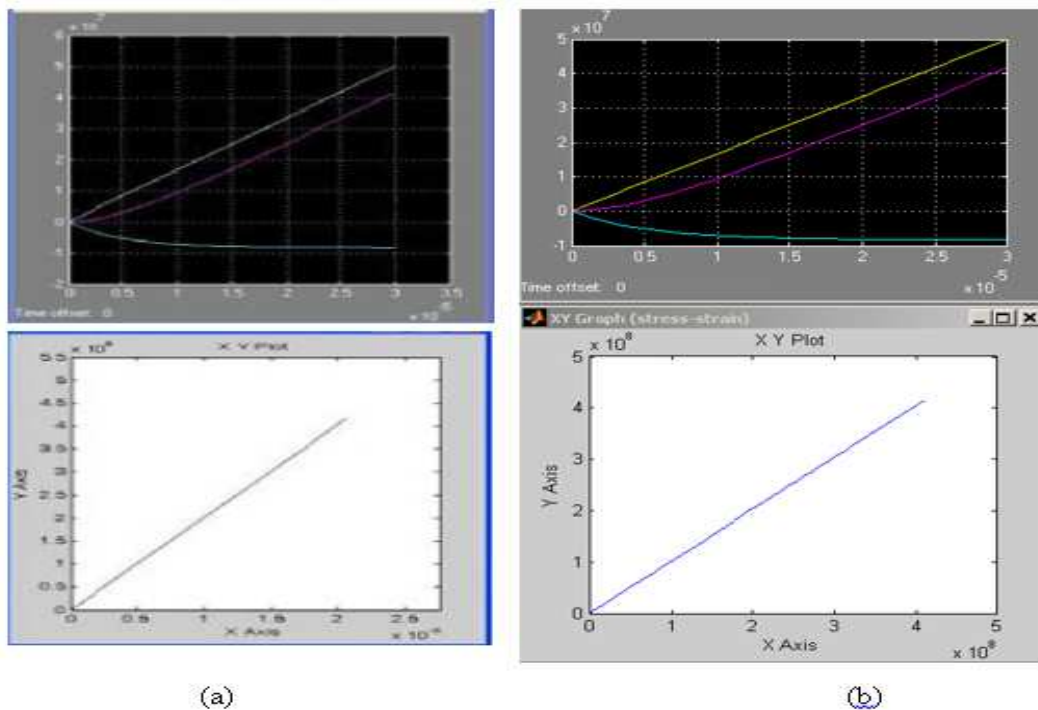


**Σχήμα 3-10.** Μετρήσεις συγγραφέων [9], (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (β) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις από τους συγγραφείς [9], οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8]

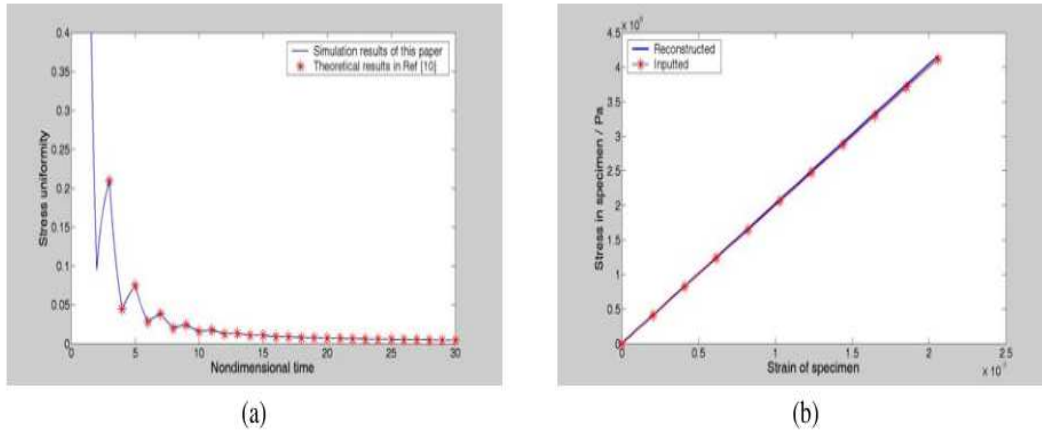


**Σχήμα 3-11.** Μετρήσεις στη παρούσα εργασία, (α) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (β) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις που έγιναν , οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8].

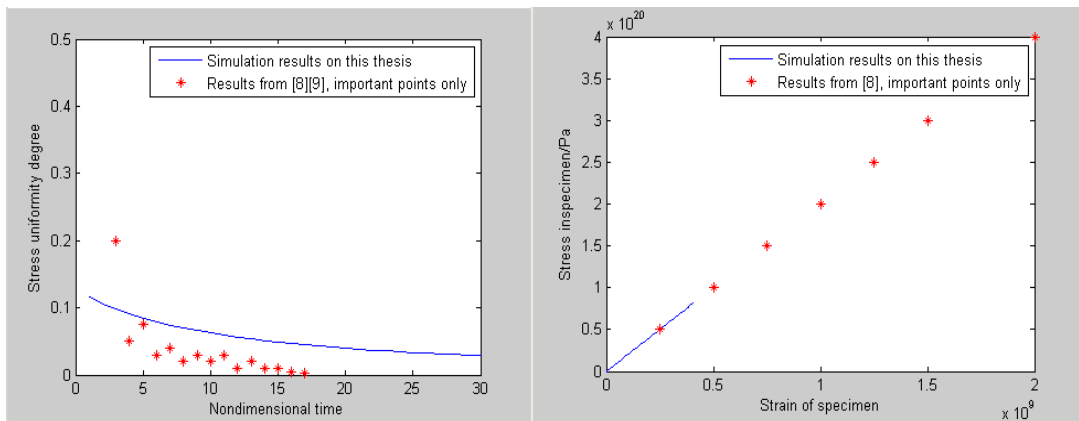
### 3. Μέτρηση με είσοδο infinite rising ramp



**Σχήμα 3.12** (α) Συγγραφείς [9] (β) Μετρήσεις παρούσας εργασίας (είσοδος infinite rising ramp)



**Σχήμα 3-13.** Μετρήσεις συγγραφέων [9], (a) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (b) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις από τους συγγραφείς [9], οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8]



**Σχήμα 3-14.** Μετρήσεις στη παρούσα εργασία, (a) Διάγραμμα βαθμού ομοιομορφίας παραμόρφωσης (b) Προσέγγιση σχέσης τάσης/παραμόρφωσης στο δείγμα. Η μπλε γραμμή είναι οι μετρήσεις που έγιναν , οι κόκκινες κουκίδες το αποτέλεσμα της θεωρητικής προσέγγισης από το [8].

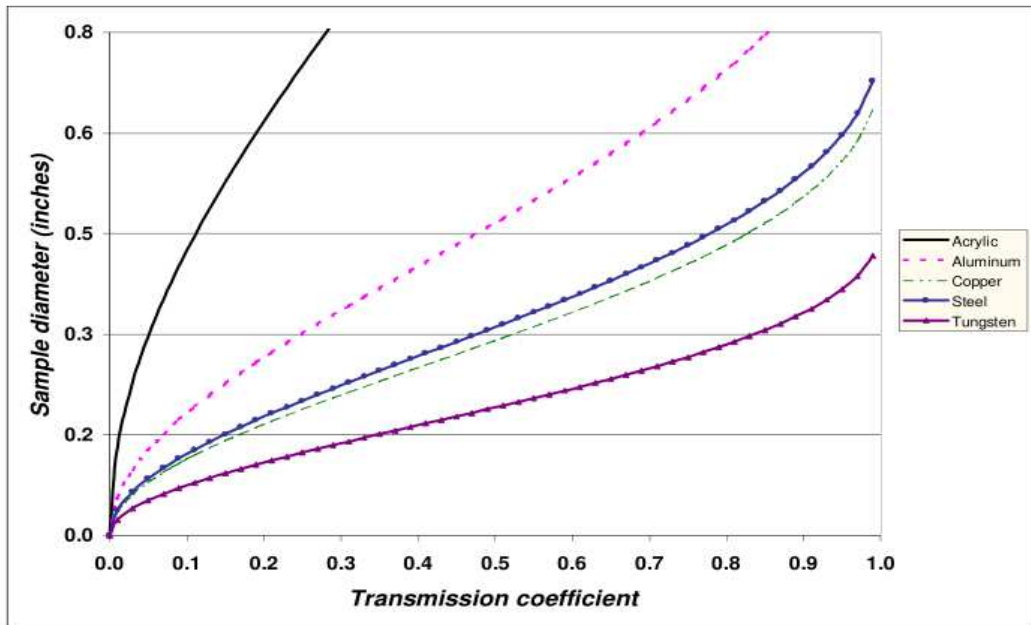
Όπως παρατηρείτε, το μοντέλο προσομοίωσης [9] κατορθώνει να εξομοιώνει επαρκώς τη συμπεριφορά μιας συσκευής Kolsky, σύμφωνα τουλάχιστον και με τα θεωρητικά αποτελέσματα [8], κατά τους συγγραφείς σχεδόν πανομοιότυπα, σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό ως προς τις μετρήσεις που αναπαράχθηκαν στην παρούσα εργασία. Συνεπώς, όντως μοιάζει ελκυστική εναλλακτική λύση προσομοίωσης στο επίπεδο σχεδίασης. Αν αναλογιστεί κανείς ακόμα, την άμεση συνάφεια των περισσότερων μελετητών με το λογισμικό Matlab/Simulink, την ευκολία χρήσης του και τον άπειρο πλούτο των ήδη

υλοποιημένων μαθηματικών συναρτήσεων για μετα-επεξεργασία των δεδομένων, ακόμα και τις επιλογές άμεσης δι-επικοινωνίας με τις μετρητικές διατάξεις αισθητήρων (μέσω καρτών Analog to Digital και άλλων δυνατοτήτων), τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης πολλαπλασιάζονται. Δύναται δε, λόγω του σχετικά μικρού όγκου εργασίας που απαιτεί, να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με κάποιο «κλασσικό» πακέτο Η/Μ λογισμικού CAD ή/και μοντελοποίησης (Solidworks, Ansys, LS-Dyna και άλλα παρόμοια).

Βέβαια, άμεσα παρατηρείτε επίσης ένα σημαντικό μειονέκτημα της παραπάνω μοντελοποίησης. Η απ' ευθείας υπόθεση της εξίσωσης (3-7) για τις τάσεις[9]

$$\sigma_R \approx \sigma_T \quad (3-7)$$

σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του κεφ. 2 [2], για τους επιμέρους συντελεστές μετάδοσης του Incident, Transmitted και Reflected παλμών, που ξαναπαρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 3-15.** Εξάρτηση διαμέτρου δείγματος από το συντελεστή μετάδοσης  $a_{13}$ , για διάφορα υλικά [2]

προϋποθέτει ότι ο συντελεστής μετάδοσης

$$a_{13} \approx 0.5 \quad (3-11)$$



δηλαδή ότι οι παλμοί τελικής μετάδοσης (Transmission) και ανάκλασης (Reflection) πρέπει πάντα να είναι περίπου ίσοι κατά μέτρο. Σε υλικά με πολύ χαμηλή μηχανική αντίσταση, όπως είναι τα ακρυλικά, που παρουσιάζεται η συμπεριφορά τους στο σχήμα **(3-15)**, διάφορα άλλα πολυμερή και άλλα παρόμοιας χαμηλής μηχανικής αντίστασης υλικά, η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους ως δείγματα σε μέτρηση, δεν μπορεί να γίνει με το παρών εργαλείο προσομοίωσης, χωρίς σημαντικά σφάλματα στα αποτελέσματα προσομοίωσης. Και αυτό γιατί οι μέγιστες τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής μετάδοσης  $\alpha_{13}$  στις περιπτώσεις αυτές, θα απέχουν σημαντικά από τη τιμή (περίπου 0.5) που προϋποθέτει το ίδιο το μοντέλο προσομοίωσης. Σαν εργαλείο μελέτης λοιπόν, καθίσταται περισσότερο χρήσιμο στη μελέτη της συμπεριφοράς υλικών με σημαντική μηχανική αντίσταση, όπως είναι τα συμπαγή και συνήθη μέταλλα, όπως είναι ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός και άλλα παρόμοια.

## 4 Διατύπωση μεθόδου σχεδιασμού

### 4.1 Βήματα σχεδιασμού

Στο κεφάλαιο αυτό, με βάση τις μεθοδολογίες και τα εργαλεία που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, επιχειρείτε να οριστεί διαδικασία σχεδιασμού μιας συσκευής Kolsky, τύπου πίεσεως. Τα βασικά τμήματα της διαδικασίας που αναγνωρίζονται προς αυτό το σκοπό είναι

- 1) Επιλογή τύπων υλικών των δειγμάτων προς έλεγχο, και συναρτήσει αυτών, επιλογή ορίων τάσης και επιθυμητού ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης στη λειτουργία της συσκευής
- 2) Επιλογή υλικού και διαστάσεων των ράβδων πίεσεως
- 3) Επιλογή υλικού και διαστάσεων ράβδου Κρούστη (Striker bar)
- 4) Επιλογή και τοποθέτηση αισθητήρων καταγραφής και λοιπού εξοπλισμού αυτής
- 5) Επιλογή των κατάλληλων διαστάσεων δείγματος, που επηρεάζουν και τη μορφή τόσο του κατάλληλου τύπου αρχικού σήματος πίεσεως εισόδου, όσο και της ποιότητας της συνολικής μετάδοσης.
- 6) Πρέπει να οριστούν όρια πίεσης εκτόξευσης, να υπολογιστεί η απαιτούμενη αυτή πίεση και από εδώ να υπολογιστεί το απαιτούμενο μήκος σωλήνα εκτόξευσης, η ακριβής ταχύτητα εκτόξευσης και τα λοιπά χαρακτηριστικά του gas gun.
- 7) Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να ελεγχθούν, είτε μέσω προσομοίωσης, είτε, πολύ σπανιότερα, με την απ' ευθείας κατασκευή πρωτοτύπου. Πρέπει λοιπόν να οριστεί διαδικασία προσομοίωσης.
- 8) Στη προσομοίωση της κατασκευής, πρέπει να ελεγχθεί το σενάριο επίδρασης της διασποράς του κύματος, συνεπώς πρέπει να οριστεί διαδικασία διόρθωσης του φαινομένου διασποράς, αλλά και διαδικασία εύρεσης της αρχής των σημάτων. Στην περίπτωση της προσομοίωσης, το τελευταίο δεν είναι απαραίτητο, αφού δεν υπάρχουν πρακτικά καθυστερήσεις καταγραφής.
- 9) Τα αποτελέσματα των δοκιμών που προκύπτουν, για την ακρίβεια διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης δείγματος, θα πρέπει να ελεγχθούν, συναρτήσει ανάλογων διαγραμμάτων πραγματικών μετρήσεων.
- 10) Πλέον, με ορισμένη πλήρως τη βασική δομή της συσκευής, αυτό που απομένει είναι να οριστούν διαδικασίες σωστής τελικής κατασκευής, συναρμολόγησης και λειτουργίας. Τέτοιοι είναι οι κανόνες ακρίβειας κατασκευής των εξαρτημάτων, η κατασκευή των στηριγμάτων της συσκευής, η διαδικασία ευθυγράμμισης των ράβδων πίεσεως και η διαδικασία σωστής περιοδικής βαθμονόμησης και συντήρησης της συσκευής.

11) Με το κατασκευασμένο ή έστω πλήρως σχεδιαστικά ορισμένο πρωτότυπο, αυτό που απομένει είναι να δοθούν ότι επιπλέον παρελκόμενα εργαλεία απαιτούνται για τη μελλοντική του χρήση. Τέτοιο είναι το μετρητικό πρόγραμμα καταγραφής των μετρήσεων καταπόνησης από τους αισθητήρες και υπολογισμού εξ' αυτών της τάσης, παραμόρφωσης και του ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα.

Οι παραπάνω διεργασίες, καθώς και οι λύσεις για την εκπόνηση τους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καταγράφονται στις παρακάτω ενότητες.

## **4.2 Ορισμός τύπων υλικού δείγματος και ορίων επιθυμητού ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης**

Προφανώς, για κάθε επακριβώς ορισμένη συσκευή Kolsky, σε αναφορά κυρίως με τις διαστάσεις και το υλικό των ράβδων συμπίεσης, η συμπεριφορά συμπίεσης κάθε υλικού δείγματος και η μέτρηση αυτής, διαφέρουν σημαντικά. Στη περίπτωση μαλακών υλικών όπως είναι, συνήθως, τα πολυμερή, η χρήση ράβδων συμπίεσης από ιδιαίτερα σκληρό υλικό, οδηγεί σε μεγάλη απώλεια σήματος και συνεπώς σφάλματα καταγραφής των, ούτως ή άλλως, χαμηλών καταγραφών τάσης και παραμόρφωσης. Όσο ο στόχος μελέτης προχωρά σε σκληρότερα υλικά δείγματος, μέταλλα και άλλα παρόμοια, τόσο αυξάνουν οι δυνατότητες επιβολής μεγαλύτερων ρυθμών μεταβολής παραμόρφωσης στο υλικό, αφού και οι σημαντικές μεταβολές αυτού, όπως λυγισμός και θραύση, λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερες τιμές τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης. Πρέπει λοιπόν ο ερευνητής, είτε να περιορίσει εξ ' αρχής τη σχεδίαση του σε συγκεκριμένη σκληρότητας υλικά και κατ' επέκταση το εύρος ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος, είτε να σχεδιάσει πρακτικά ξεχωριστές συσκευές Kolsky, δηλαδή μία με διαφορετικές ράβδους πίεσεως, Κρούστη, εν γένει συνθήκες λειτουργίας, αναλόγως το υλικό δείγματος. Όμοια λοιπόν, ορίζονται και τα όρια των επιθυμητών ρυθμών παραμόρφωσης δείγματος. Σε μαλακά υλικά, ρυθμοί μεταβολής καταπόνησης έως και 2500 – 3000 1/s είναι, συνήθως, αρκετοί για να παρατηρηθεί πλήρως η συμπεριφορά καταπόνησης του υλικού. Σε εξαιρετικά σκληρά μέταλλα όμως, ρυθμοί μεταβολής παραμόρφωσης έως και 10000 1/s, τα θεωρητικά όρια μιας τυπικής συσκευής Kolsky, μπορεί να απαιτηθούν. Κριτήριο επιλογής εδώ, δεν είναι άλλο από το όριο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής των ράβδων, που συνήθως, για παράδειγμα, στα μέταλλα αγγίζει τιμές μερικών εκατοντάδων MPa (Mega Pascals).

## **4.3 Ράβδοι συμπίεσης και ράβδος κρούστη**

### **4.3.1 Επιλογή υλικού ράβδων πίεσεως**

Έχοντας ορίσει πρακτικά τα όρια σκληρότητας των δειγμάτων, σειρά έχει η επιλογή υλικού των ράβδων συμπίεσης. Το όριο ελαστικότητας των ράβδων συμπίεσης καθορίζει και τη

μέγιστη επιτρεπτή τάση σε αυτές. Ο λόγος για το τελευταίο είναι, ότι για να ισχύουν οι τύποι υπολογισμού της τάσης και παραμόρφωσης στο δείγμα που παρουσιάστηκαν στο κεφ.2, οι ράβδοι συμπίεσης πρέπει να παραμένουν ευθείες και αλύγιστες κατά τη διάρκεια του πειράματος. Υπενθυμίζεται ότι, κατά τους τύπους αυτούς ισχύει

$$\sigma_s(t) = E_{BAR} \frac{A_{BAR}}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (4-1)$$

Δηλαδή, η μηχανική τάση που εξασκείται στο δείγμα, ισούται με το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) του υλικού ράβδων συμπίεσης επί τη δια-τομεακή περιοχή των ράβδων συμπίεσης, επί την παραμόρφωση στη Transmitted ράβδο συμπίεσης, η οποία μετράτε κατά τη διάρκεια του πειράματος μέσω αισθητήρα strain gage, δια τη δια-τομεακή περιοχή του δείγματος.

Η δια-τομεακή περιοχή υλικού, στην απλούστερη μορφή ελέγχου, αυτή των κυλινδρικών ράβδων είναι ίση με

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4-2)$$

Όπου D είναι η διάμετρος ράβδου και  $\pi = 3.14159265359$ .

Ακόμα, ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης στο δείγμα ισούται με

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (4-3)$$

Δηλαδή, είναι ίση με μείον δύο επί τη ταχύτητα κύματος στις ράβδους πίεσεως επί τη παραμόρφωση στη ράβδο πίεσεως Incident, που επίσης μετράτε μέσω άλλης διάταξης αισθητήρα strain gage, δια το μήκος του δείγματος. Η ταχύτητας διάδοσης κύματος C σε οποιοδήποτε υλικό ισούται με

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4-4)$$

Δηλ. τη ρίζα του πηλίκου του μέτρου ελαστικότητας του υλικού προς τη πυκνότητά του.

Από το τύπο (4-3), η παραμόρφωση στο δείγμα ισούται, με μηδενικές αρχικές συνθήκες, με το ολοκλήρωμα του ρυθμού μεταβολής παραμόρφωση σε αυτό.

$$\varepsilon_s(t) = \frac{-2C_o}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (4-5)$$

Έτσι λοιπόν, ως γενικός κανόνας, για την επιλογή υλικού ράβδων πίεσεως είναι να επιλέξουμε ένα «αρκετά σκληρότερο υλικό» από τα υλικά προς μέτρηση. Σε μαλακά υλικά, όπως ακρυλικά και πολυμερή, προφανώς δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό, οικονομικά και από πλευράς διευκόλυνσης της μετάδοσης του σήματος, να χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα σκληρό υλικό για τις ράβδους πίεσεως, για παράδειγμα ράβδοι αλουμινίου συνήθως είναι αρκετοί. Σε σκληρότερα υλικά δείγματος όπως τα μέταλλα, τυπική επιλογή είναι οι σκληρού τύπου χάλυβες. Υπάρχουν περιπτώσεις βέβαια, που πρέπει να συνυπολογιστούν και άλλοι παράγοντες. Για παράδειγμα, για μια κατασκευή συσκευής Kolsky που είναι επιθυμητό να λειτουργήσει σε υψηλές θερμοκρασίες, πολύ ανώτερες από τη θερμοκρασία δωματίου, συνήθης επιλογή είναι το υλικό Inconel, του οποίου οι ελαστικές ιδιότητες παραμένουν πρακτικώς αμετάβλητες, για θερμοκρασίες έως και 800° C [11].

### 4.3.2 Επιλογή μήκους ράβδων πίεσεως

Για το μήκος των ράβδων πίεσεων τώρα, αυτό πρέπει να επιλεγεί ούτως ώστε να υπάρχει απρόσκοπτη μετάδοση του κύματος. Οι ράβδοι πίεσεως θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλου μήκους, ούτως ώστε οι συσκευές καταγραφής, αισθητήρες και λοιπά όργανα, να μπορούν να καταγράψουν το σήμα. Αν οι ράβδοι είναι πολύ κοντές, το σύστημα καταγραφής δεν θα μπορεί να ξεχωρίσει το τέλος του παλμού Incident και την αρχή του παλμού Transmitted. Για το παραπάνω χρειάζεται το μήκος των ράβδων συμπίεσης να είναι τουλάχιστον διπλάσιο του κάθε αρχικού Incident παλμού εισόδου [2]. Αυτό μας δίνει πρακτικά ένα άνω όριο στη χρονική διάρκεια του παλμού εισόδου που μπορεί να έχουμε στη συσκευή, αφού για επιλεγμένο μήκος ράβδων πίεσεων

$$L_{Pressure\_Bar}$$

πρέπει να ισχύει

$$2 * Incident\_Pulse\_Length \leq L_{Pressure\_Bar} \quad (4-6)$$

Δηλ.

$$2 * C_{Pressure\_Bar} * t_{Incident\_pulse} \leq L_{Pressure\_Bar} \quad (4-7)$$

Άρα

$$t_{Incident\_pulse} \leq \frac{L_{Pressure\_Bar}}{2 * C_{Pressure\_Bar}} \quad (4-8)$$

Η προϋπόθεση (4-8) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα, στον έλεγχο του παλμού εισόδου. Πρακτικά, αυτό που γίνεται στο στάδιο αυτό, είναι να επιλέγεται ένα μήκος ράβδων πίεσεως, κυρίως αναλόγως τα περιθώρια διαστάσεων της συνολικής συσκευής που υπάρχουν, το οποίο ξεκινά, για τυπικών διαστάσεων συσκευές, από τις 60 in, ήτοι 1.524 m.

### 4.3.3 Διάμετρος ράβδων πίεσεως

Για τη διάμετρο των ράβδων πίεσεως, στο [11] προτείνεται λόγος μήκους προς διάμετρο L/D τουλάχιστον 20. Γενικά, όσο μικραίνει η διάμετρος των ράβδων πίεσεως, τόσο αυξάνεται ο ρυθμός μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος που μπορεί να επιτευχθεί.

### 4.3.4 Υλικό και μήκος ράβδου κρούστη και σωλήνα εκτόξευσης

Η ράβδος Κρούστης, και ο σωλήνας εκτόξευσης του gas gun, κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό και με ίδια διάμετρο με τις ράβδους πίεσεως. Το μήκος της ορίζεται ως ένα ποσοστό, συνήθως 20-30% του μήκους των ράβδων πίεσεως [12].

### 4.3.5 Συντήρηση και συναρμολόγηση

Επιπρόσθετα, όλες οι ράβδοι πρέπει να είναι απολύτως ευθείες, τα σπηρίγματα των ράβδων πίεσεων να κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη κίνηση τους, οι ράβδοι πριν τη χρήση της συσκευής πρέπει να επαλείφονται με λάδι χαμηλής τριβής και κατά την τοποθέτηση, να ευθυγραμμιστούν πλήρως,

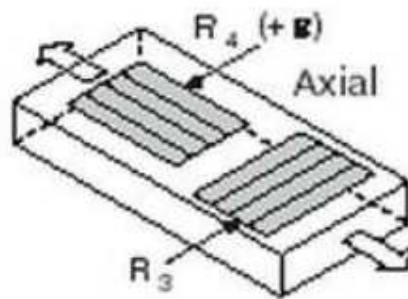
## 4.4 Αισθητήρες καταγραφής

### 4.4.1 Strain gages

Μια συσκευή Kolsky απαιτεί για τη λειτουργία της δυο αισθητήρες διατάξεις τύπου strain gages, τοποθετημένες στο μέσο, συνήθως, κάθε ράβδου πίεσεως. Οι διατάξεις αυτές, καταγράφουν τις Incident και Transmitted παραμορφώσεις. Κατά την επιλογή των αισθητήρων αυτών, όπως αναλύθηκε στο κεφ.2, ο ερευνητής πρέπει να λάβει υπόψη μια σειρά περιορισμών στη λειτουργία τους, που ανάγονται στη φυσική κατασκευή του αισθητήρα [2]. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αισθητήρα (gage length), συγκρίσει με το μήκος του παλμού εισόδου, τόσο περιορισμένη είναι η ακρίβεια μέτρησης που επιτυγχάνεται. Πρέπει λοιπόν, το μήκος των αισθητήρων που θα επιλεγούν να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του παλμού εισόδου. Ο αισθητήρας strain gage, δεν μετρά «γραμμικώς» την καταπόνηση που εισέρχεται σε αυτών, αλλά εντός του μήκους του δημιουργείται ένα παράθυρο αλλοίωσης του κύματος, το φαινόμενο εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας. Καθαρά πρακτικά, όσο μικρότερος είναι ο αισθητήρας, τόσο

ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα αυτά και η ακρίβεια μέτρησης αυξάνεται. Οι μικρότερου μήκους αισθητήρες βέβαια, συνεπάγονται περιορισμένο χρόνο ζωής και η ακρίβεια τους μειώνεται πιο γρήγορα με τη πάροδο του χρόνου.

Οι αισθητήρες strain gages, τοποθετούνται μακριά από τα ελεύθερα άκρα των ράβδων πιέσεων, συνήθως στο κέντρο τους. Για λόγους απαγωγής θερμοκρασίας, οι αισθητήρες δεν τοποθετούνται μόνοι τους, αλλά σε κύκλωμα, παράλληλα ή σε σειρά, με ένα άλλο strain gage. Τότε, ο ένας αισθητήρας δρα ως μετρητικός και ο άλλος καθαρά σαν απαγωγέας θερμότητας. Στο κεφ.2, παρουσιάστηκε μια τέτοια συνδεσμολογία, το κύκλωμα Τεταρτογέφυρας Τύπου 2 (Quarter Bridge type II) [12],[15].



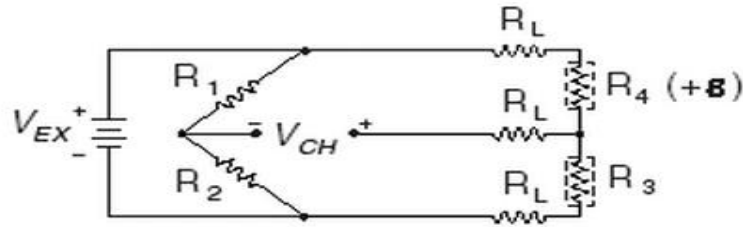
**Σχήμα 4-1.** Συνδεσμολογία Quarter Bridge type II με strain gages αισθητήρες. Με R4 συμβολίζεται ο «ενεργός» μετρητικός αισθητήρας, με R3 ο αισθητήρας θερμικής απαγωγής [12].

Η συνδεσμολογία αυτή, χρησιμοποιεί μια strain gage για πραγματική μέτρηση της καταπόνησης στη ράβδο και μια strain gage όχι για μέτρηση, αλλά καθαρά για την απαγωγή θερμότητας από τον πρώτο αισθητήρα. Ο «ενεργός», μετρητικός, αισθητήρας τοποθετείται στην διεύθυνση της ράβδου, ενώ ο «μη ενεργός», κάθετα στο προηγούμενο και πλησίον του, και λειτουργεί καθαρά θερμικά.

Επιπλέον, υπάρχουν στη βιβλιογραφία [12],[15] προτάσεις συνδεσμολογιών αισθητήρων για την εξάλειψη τη επιρροής του πιθανού φαινομένου κάμψης των ράβδων πίεσεως, κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Για την μείωση της επιρροής αυτής, προτείνεται η τοποθέτηση δυο διατάξεων strain gages, δύο σε παράλληλη σύνδεση, τοποθετούμενες αντί-διαμετρικά πάνω στη ράβδο. Έτσι σε περίπτωση καμπύλωσης της ράβδου, η μια μετρητική διάταξη θα παρουσιάσει αύξηση στις τιμές μέτρησης, η άλλη μείωση. Η μέση τιμή των μετρήσεων αυτών θα είναι η καθαρά αξονική μηχανική παραμόρφωση.

Τέλος, απαραίτητη είναι η ενίσχυση του σήματος του αισθητήρα, ώστε αυτό να μπορεί να αναγνωρισθεί κατάλληλα από τα υπόλοιπα όργανα καταγραφής, συνήθως χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις τύπου γέφυρας, όπως αυτό της παρακάτω εικόνας,

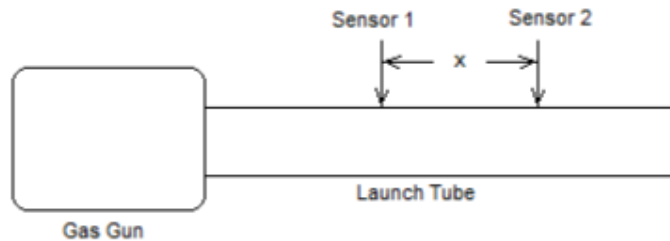
που παρουσιάστηκε στο κεφ. 2, στο οποίο γίνεται ενίσχυση με διάταξη γέφυρας σε συνδεσμολογία strain gages τύπου Quarter Bridge type II.



**Σχήμα 4-2.** Κύκλωμα τύπου γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης της τάσης εξόδου από διάταξη strain gage τύπου Quarter Bridge type II [12][15]

#### 4.4.2 Φωτοζεύγη ελέγχου ταχύτητας κρούσης

Επιπλέον στις δύο, διατάξεις, strain gages, μπορεί να προστεθεί, όπως παρουσιάστηκε στο κεφ.2 σχετικά με το σχεδιασμό του gas gun, διάταξη αισθητήρων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης [12],[14]. Αυτή περιλαμβάνει δύο ζεύγη φωτοδιόδων, τοποθετημένα στο σωλήνα εκτόξευσης όπως στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 4-3.** Τοποθέτηση φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης [12]

Όταν η ράβδος Κρούσης περάσει από το πρώτο αισθητήρα ξεκινά ένα μετρητής χρόνου, ο οποίος σταματά όταν η ράβδος Κρούσης περάσει από το σημείο που είναι η 2<sup>η</sup> διάταξη φωτοδιόδων. Η πραγματική ταχύτητα εκτόξευσης που έχει επιτευχθεί θα είναι ίση με

$$V = \frac{x}{\Delta t} \quad (4-9)$$

Όπου x, η απόσταση των δύο διατάξεων φωτοδιόδων και Δt ο χρόνος που μέτρησε το χρονόμετρο. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν και να συγκριθούν έπειτα με το



θεωρητικό υπολογισμό της ταχύτητας κρούσης συναρτήσει της πίεσης για το gas gun, όπως θα παρουσιαστεί στο παρακάτω ανάλογο βήμα παρακάτω, ώστε να διορθωθούν τυχόν αποκλίσεις πραγματικής ταχύτητας/πίεσης με την θεωρητικώς υπολογιζόμενη ταχύτητα/πίεση. Μια πρόταση για το πώς μπορεί να γίνει ακριβώς αυτό παρουσιάζεται παρακάτω [12], στο ανάλογο τμήμα υπολογισμού των παραμέτρων του gas gun.

## 4.5 Διαστάσεις δείγματος

### 4.5.1 Διάμετρος δείγματος

Οι σωστή επιλογή διαστάσεων δείγματος, παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του σήματος και την εξομάλυνση αλλοιώσεων και θορύβου. Συγκεκριμένα, για δοθέντα διάμετρο ράβδων πίεσεως, όπως παρουσιάστηκε στο κεφ.2 ότι ισχύει [2]

$$D_{sample} = \frac{D_{pressure\_bar} \sqrt{(\rho c)_{pressure\_bar}} \sqrt{(2\sqrt{(1-a_{13})} + a_{13} - 2)}}{\sqrt{a_{13}} \sqrt{-(\rho C)_{sample}}} \quad (4-10)$$

Δηλαδή η διάμετρος του δείγματος

$$D_{sample}$$

συσχετίζεται μέσω της εξίσωσης (4.8) με τη διάμετρο των ράβδων πίεσεως

$$D_{pressure\_bar}$$

το γινόμενο πυκνότητας επί ταχύτητας διάδοσης κύματος στις ράβδους πίεσεως

$$(\rho C)_{pressure\_bar}$$

το γινόμενο πυκνότητας επί ταχύτητας διάδοσης κύματος στο δείγμα

$$(\rho C)_{sample}$$

και το συντελεστή

$$a_{13}$$

Ο τελευταίος είναι ο συντελεστής μετάδοσης του τελικού σήματος, δηλαδή εκφράζει πιο ποσοστό του αρχικού Incident σήματος εισόδου που τελικώς μεταδίδεται ως Transmitted σήμα. Η επιλογή

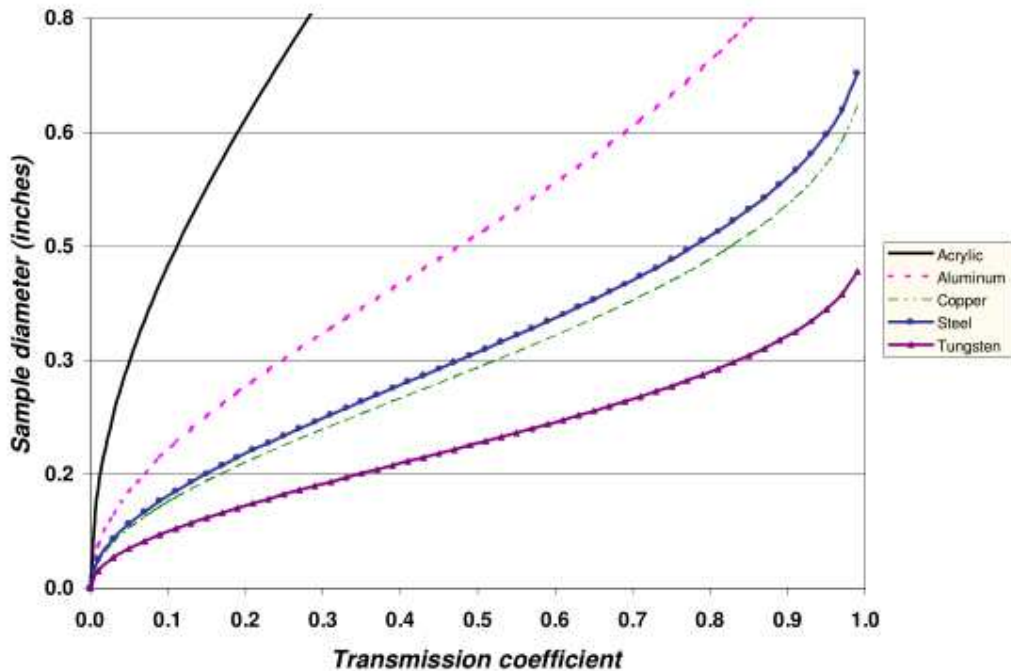
$$a_{13} = 0.5 \quad (4-11)$$

Πρακτικώς σημαίνει ότι το Reflected και το Transmitted σήματα θα έχουν το ίδιο μέτρο. Στη περίπτωση που ισχύει η (4-9), οι λόγοι σήματος προς θόρυβο των δύο σημάτων είναι ίδιοι, στη πράξη όσο πιο κοντά γίνεται, συνεπώς ο θόρυβος κατά τη μετάδοση είναι κατά το δυνατόν ελάχιστος. Οι σχέσεις (4-10) και (4-11) μπορούν να αποτελέσουν κριτήριο επιλογής διαμέτρου δείγματος, κυρίως στα μέταλλα.

Εξαιρέση στη χρήση του παραπάνω κανόνα επιλογής διαμέτρου δείγματος, αποτελούν τα πολύ μαλακά υλικά, όπως είναι τα ακρυλικά [2]. Στη περίπτωση αυτή, ισχύει πάντα

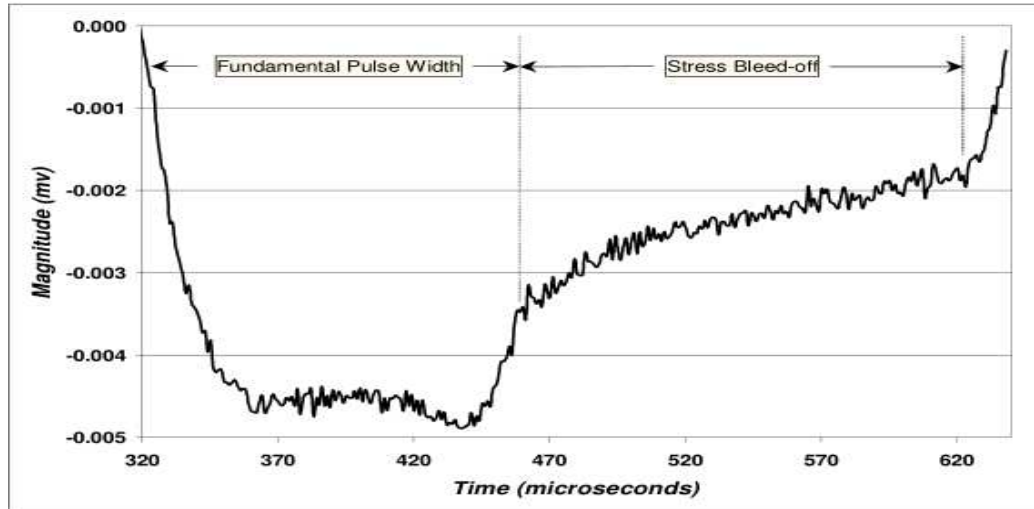
$$a_{13} < 0.5 \quad (4-12)$$

άρα οι σχέσεις (4-8), (4-9) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κριτήριο επιλογής μήκους δείγματος..



**Σχήμα 4-4.** Εξάρτηση συντελεστή μετάδοσης  $a_{13}$  και διαμέτρου δείγματος, για διάφορα υλικά [2], όπως παρατηρείται τα ακρυλικά έχουν μέγιστη τιμή για το  $a_{13} = 0.3$ , συνεπώς η επιλογή δείγματος μέσω των σχέσεων (4-10), (4-11) εδώ δεν μπορεί να γίνει

Στις περιπτώσεις αυτές, παρουσιάζεται, πολύ πιο έντονα, και ένα άλλο φαινόμενο, αυτό της «απομάστευσης» (Bleed-off) [2]. Συγκεκριμένα, το σήμα δεν μεταδίδεται ταχέως από το δείγμα στην Transmission ράβδο πίεσεως αλλά, τρόπον τινά, «παγιδεύεται» στο δείγμα και ο χρόνος της μετάδοσης σου από το δείγμα προς την Transmitted ράβδο πίεσεως, αυξάνει σημαντικά.



**Σχήμα 4-5.** Μετάδοση Παλμού πίεσης Transmitted, από το δείγμα στη 2<sup>η</sup> ράβδο πίεσης, υλικό δείγματος Lexan [2]. Είναι εμφανής η καθυστέρηση τελικής μετάδοσης, δηλαδή το φαινόμενο Bleed-off

Τότε, για την εύρεση της κατάλληλης διαμέτρου δείγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός της (4-12) με την παρακάτω εξίσωση

$$D_{sample} = \frac{D_{pressure\_bar} \sqrt{a_{23}} \sqrt{-(\rho C)_{pressure\_bar}}}{\sqrt{(a_{23}(\rho C)_{sample} - 2(\rho C)_{pressure\_bar})}} \quad (4-13)$$

Η οποία ισχύει μόνο στην περίπτωση κυλινδρικών δειγμάτων.

Ο συντελεστής μετάδοσης  $a_{23}$ , είναι ο συντελεστής μετάδοσης από το δείγμα στη 2<sup>η</sup> ράβδο πίεσης. Όσο μεγαλύτερος, τόσο καλύτερη είναι η μετάδοση αυτή και τα φαινόμενα Bleed-off ελαχιστοποιούνται. Άρα, για τις περιπτώσεις των υλικών αυτών, που ούτως ή άλλως και οι δύο συντελεστές

$$a_{13}, a_{23}$$

έχουν μικρές τιμές, αυτό που μπορεί να γίνει είναι να συνδυαστούν οι εξισώσεις (4.8) και (4.11) και να επιλεγεί διάμετρος δείγματος που θα δίνει τις καλύτερες, κατά το δυνατό, τιμές αυτών των συντελεστών μετάδοσης.

## 4.5.2 Μήκος δείγματος και τύπος εισόδου αρχικού σήματος

Το μήκος δείγματος

$$L_{sample}$$

που προκύπτει για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος  $t$ , που απαιτείται για την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα, σε ένα υλικό που παραμορφώνεται πλαστικά και ακολουθεί την θεωρία Taylor-von Karman, πρέπει να ικανοποιεί την ανισότητα [11]

$$t^2 \geq \frac{\pi^2 \rho_{sample} (L_{sample})^2}{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}\right)} \quad (4-14)$$

Όπου, η πυκνότητα του υλικού δείγματος

$$\rho_{sample}$$

και ο ρυθμός μεταβολής που προκύπτει από το διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης του υλικού σε διαδικασία 2<sup>ου</sup> βαθμού σκλήρυνσης μέσω πλαστικής παραμόρφωσης (stage 2 work-hardening) [11].

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$$

Εφόσον, ο ερευνητής έχει δεδομένα για το τελευταίο στη διάθεση του, μπορεί να τα συνδυάσει με μελέτη που προσδιορίζει τον απαιτούμενο αυτό χρόνο  $t$ , και να επιλέξει κατάλληλο μήκος δείγματος. Στη παρούσα εργασία, προτείνεται και εδώ και οπουδήποτε χρειάζεται στη σχεδίαση του ερευνητή μια προσέγγιση του απαιτούμενου χρόνου για επίτευξη ομοιόμορφης καταπόνησης στο δείγμα, τα αποτελέσματά της μελέτης [8], τα οποία παρουσιάστηκαν στο κεφ.2, επαναλαμβάνονται παρακάτω. Εδώ η σχετική μηχανική αντίσταση  $\beta$

$$\beta = \frac{(\rho C)_{sample}}{(\rho C)_{pressure\_bar}} \left( \frac{D_{sample}}{D_{pressure\_bar}} \right)^2 \quad (4-15)$$

συσχετίζεται με τον απαιτούμενο αριθμό περασμάτων  $n$  του σήματος από το δείγμα, για την επίτευξη ομοιομορφίας καταπόνησης  $\sigma'$  αυτό, συναρτήσει του τύπου αρχικού Incident

παλμού στη συσκευή. Έχοντας επιλέξει διάμετρο δείγματος, εξισώσεις **(4-10)**, **(4-11)**, και διάμετρο ράβδων πιέσεων, η σχετική μηχανική καταπόνηση είναι γνωστή. Τότε [8], ισχύει

1) Στη περίπτωση αρχικού Incident παλμού πίεσως εισόδου μορφής τέλειου τετραγώνου [8]

$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
$n$	4	6	7	9	13	17

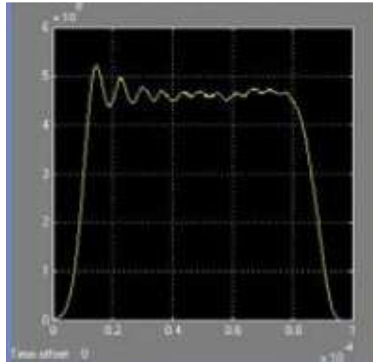
2) Στη περίπτωση αρχικού Incident παλμού πίεσως εισόδου με πεπερασμένο χρόνο ανόδου [8]

$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
$n$	4	4	4	3	3	3

3) Στη περίπτωση αρχικού Incident κύματος πίεσως εισόδου, μορφής «ράμπας»[8]

$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
$n$	11	8	6	6	6	6

Επιπλέον, στη περίπτωση ενός πραγματικού σήματος εισόδου πίεσως, δηλαδή της μορφής όπως το παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 4-6.** Μορφή πραγματικού παλμού Incident εισόδου στη συσκευή, με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και καμπύλη, πεπερασμένο χρόνο καθόδου και καμπύλη, φαινόμενα διασποράς [9]

Τότε, για το  $n$  ισχύει [11]

$$n \rightarrow 3 \text{ (4-16)}$$

ενώ γενικά ο χρόνος που απαιτείται για ομοιόμορφη κατανομή καταπόνησης στο δείγμα θα είναι

$$t = n\Delta t = \frac{nL_{sample}}{C_{sample}} \quad (4-17)$$

Με βάση όλα τα παραπάνω συνάγεται ότι

- 1) Η καλύτερη θεωρητική προσέγγιση για τη μορφή του σήματος πίεσης εισόδου, είναι η περίπτωση παλμού με πεπερασμένο χρόνο ανόδου, τότε το  $n$  είναι το ελάχιστο δυνατό, με μόνη εξαίρεση το πραγματικό παλμό (σχήμα 4-4), που προφανώς δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για θεωρητικούς υπολογισμούς. Μπορεί ωστόσο, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού να χρησιμοποιηθεί, προσεγγιστικά πάντα, σαν έλεγχος της όλης σχεδίασης.
- 2) Με γνωστό το  $t$ , εξίσωση (4-17), και το ρυθμό μεταβολής

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$$

ο ερευνητής, μέσω της εξίσωσης (4-14) μπορεί να επιλέξει κατάλληλο μήκος δείγματος για τη διαδικασία μέτρησης.

Στη παρούσα εργασία, το 1<sup>ο</sup> αποτέλεσμα κρατείτε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για τη δημιουργία του παλμού πίεσεως εισόδου κατά την προσομοίωση. Το 2<sup>ο</sup> αποτέλεσμα, δεν χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση του παρακάτω κεφαλαίου, διότι δεν ευρέθησαν δεδομένα για το

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$$

τον προς έλεγχο υλικό, στο παρακάτω στάδιο της εφαρμογής με δείγματα αλουμινίου.

Αντί αυτού, στη σχεδίαση του επόμενου κεφαλαίου προτείνεται η παρακάτω, εμπειρική, διαδικασία προσδιορισμού του κατάλληλου μήκους δείγματος

- 1) Είναι προφανώς επιθυμητό το  $t$ , συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ομοιομορφία καταπόνησης δείγματος, να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος
- 2) Παράλληλα ισχύει

$$t = n\Delta t = \frac{nL_{sample}}{C_{sample}} \quad (4-17)$$

- 3) Το  $n$  έχει τιμή περίπου 3, για είσοδο καταπόνησης πραγματικής μορφής όπως στο σχήμα (4-4), και 3 ή 4 (αναλόγως το  $\beta$ , δηλαδή και πάλι γνωστό), σε θεωρητική προσέγγιση προσομοίωσης

- 4) Το μόνο λοιπόν που μπορεί να μεταβληθεί για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για την ομοιόμορφη κατανομή παραμόρφωσης στο δείγμα, είναι το μήκος δείγματος
- 5) Μπορεί λοιπόν να τεθεί ένα μικρό άνω όριο στο χρόνο  $t$ , έστω 5% του συνολικού χρόνου του αρχικού incident παλμού (επίσης γνωστό, της επιλογής του ερευνητή)
- $$t \leq 0.05t_{ολ} \quad (4-18)$$

6) Συνεπώς

$$L_{Sample} \leq \frac{0.05 * C_{Sample} * t_{ολ}}{n} \quad (4-19)$$

- 7) Πάντα όμως επιλέγεται ο χρόνος ανόδου για το παλμό εισόδου να είναι μεγαλύτερος του χρόνου που απαιτείται για επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης.

## 4.6 Σχεδίαση Gas Gun

Έχοντας αποφασίσει το τύπο υλικού και τις διαστάσεις της ράβδου Κρούστη, μήκος 20-30% [12] των ράβδων πίεσεως, διάμετρο και υλικό ίδια μ' αυτές, και το υλικό κατασκευής του σωλήνα εκτόξευσης, ίδιο με αυτό των ράβδων πίεσεως, σειρά έχει ο προσδιορισμός των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του gas gun. Αυτός σα μηχανισμός αποτελείται επιπλέον από μια δεξαμενή αερίου και μηχανισμό απελευθέρωσης αερίου, μέσω των οποίων απελευθερώνεται αέριο το οποίο προωθεί τη ράβδο Κρούστη. Ακόμα, σε μια υλοποιημένη κατασκευή συσκευής, μπορεί υπάρχει και το ζεύγος φωτοδιόδων για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης. Αυτό που απομένει να παρουσιαστεί εδώ είναι πως γίνεται η, αρχική τουλάχιστον, προσέγγιση της τιμής της ταχύτητας κρούσης, πως υπολογίζεται το μήκος του σωλήνα εκτόξευσης, ο υπολογισμός της πίεσης που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή και το πώς μπορεί η διάταξη αισθητήρων να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση της προσέγγιση της ταχύτητας κρούσης.

### 4.6.1 Προσέγγιση ταχύτητας κρούσης

Κατά τον ορισμό μιας μέτρησης μέσω συσκευής Kolsky, συνήθως ορίζεται εξ' αρχής επιθυμητός σταθερός ρυθμός μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος ή/και μέγιστη επιθυμητή παραμόρφωση στο δείγμα

$$\dot{\epsilon}_s, \epsilon_s$$

αντίστοιχα. Με τη παραπάνω πληροφορία μπορεί να γίνει προσέγγιση της ταχύτητας κρούσης με χρήση των παρακάτω προσεγγιστικών τύπων [11]

$$\max(\varepsilon_s) = 2\dot{\varepsilon}_s \frac{L_{striker\_bar}}{C_{pressure\_bar}} \quad (4-20)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{V_{striker}}{L_{sample}} \quad (4-21)$$

Δηλ. η ταχύτητα κρούσης θα είναι ίση με το γινόμενο του μήκους δείγματος (που υπολογίστηκε στην ενότητα 4.5.2) επί τον σταθερό επιθυμητό ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος. Στη, σπανιότερη, περίπτωση που αντί του επιθυμητού ρυθμού παραμόρφωσης ορίζεται μέγιστη επιθυμητή παραμόρφωση στο δείγμα, πρώτα υπολογίζεται ο σταθερός ρυθμός μεταβολής παραμόρφωσης, εξίσωση (4-20), και μετά η ταχύτητα κρούσης, εξίσωση (4-21). Εν γένει [11], η προσέγγιση μέσω των τύπων αυτών είναι αρχικώς επαρκείς, συνήθως εγγύτερα των πραγματικών τιμών στις περιπτώσεις δειγμάτων μαλακού χάλυβα και αλουμινίου, με μεγαλύτερη απόκλιση στις περιπτώσεις όμως σκληρότερων μετάλλων, όπως είναι ο ενδυναμωμένος μέσω θέρμανσης (Annealed) χάλυβας.

#### 4.6.2 Πίεση Gas Gun και μήκος σωλήνα εκτόξευσης

Στο κεφ.2, αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν δύο μέθοδοι υπολογισμού της τελικής απαιτούμενης πίεσης και του μήκους του σωλήνα εκτόξευσης

1) Με τη μέθοδο Newton βρέθηκε ότι ισχύει για τη ταχύτητα κρούσης

$$V_{striker} = \sqrt{\frac{2Px}{\rho}} \quad (4-22)$$

όπου  $\rho$ , είναι η πυκνότητα υλικού της ράβδου Κρούστη,  $P$  είναι η ζητούμενη πίεση που πρέπει ν' απελευθερωθεί από τη δεξαμενή του gas gun, για να επιτευχθεί η ζητούμενη ταχύτητα κρούσης, ενώ

$$x = \frac{L_{Launching\_tube}}{L_{striker\_bar}} \quad (4-23)$$

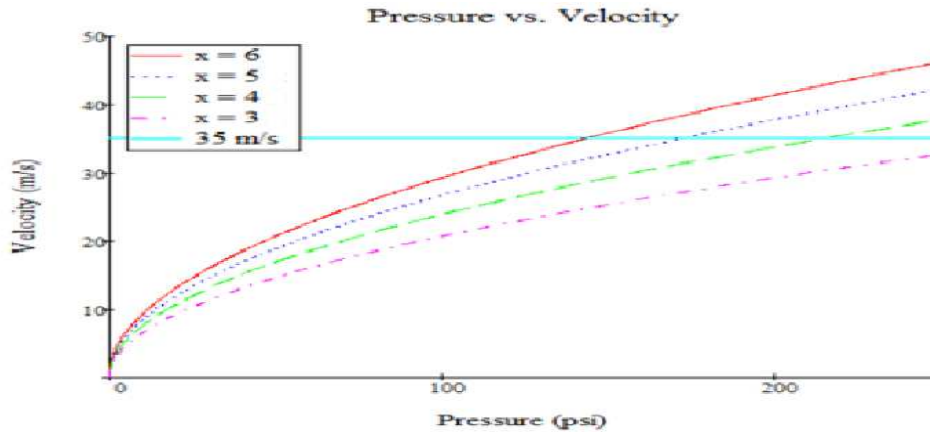
Δηλαδή, είναι ο λόγος του μήκους του σωλήνα εκτόξευσης προς το μήκος της ράβδου Κρούστη. Αυτό που γίνεται εδώ είναι, είναι θέτοντας κατ' αρχάς όποιο όριο ασφαλείας



πίεσης ο ερευνητής επιθυμεί, στο [12] για μια κανονικών διαστάσεων συσκευή (ράβδοι πίεσεως, κατ' ελάχιστο 1.524 m, με ράβδος Κρούστη περίπου στο 30% του μήκους των ράβδων πίεσεως), προτείνονται τα

$$200 \text{ psi} \approx 1378.9515 \text{ Kpa}$$

Δημιουργούνται διαγράμματα ταχύτητας/πίεσης, αναλόγως τη τιμή του  $x$ , όπως το παρακάτω



**Σχήμα 4-7.** Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο Newton στη σχεδίαση Gas Gun [12]. Τα 35 m/s είναι η επιθυμητή ταχύτητα κρούσης στη μελέτη συγκεκριμένης συσκευής Kolsky [12]

Σε αυτό, σημειώνεται η επιθυμητή ταχύτητα κρούσης και επιλέγεται αυτή η καμπύλη λειτουργίας πίεσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα και το  $x$ , που δίνει την επιθυμητή ταχύτητα κρούσης, εντός των ορίων πίεσεως. Έπειτα, υπολογίζεται και το μήκος του σωλήνα εκτόξευσης για το ανάλογο  $x$ .

2) Με τη μέθοδο μέσω αρχής διατήρησης της ενέργειας, βρέθηκε ότι ισχύει για την ταχύτητα κρούσης

$$V_{striker} = \sqrt{\frac{2 * P_1 * V}{m * \gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (4-24)$$

Όπου η αρχική πίεση του αερίου είναι

$$P_1$$

Ενώ η πίεση της ατμόσφαιρας είναι

$$P_2$$

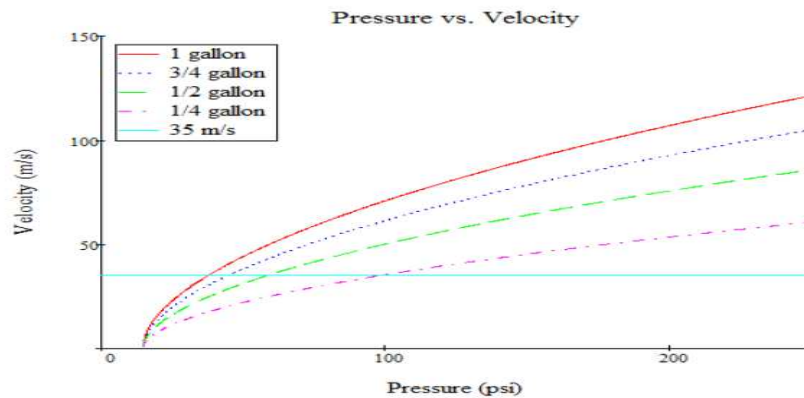
$V$ , είναι ο όγκος του αερίου,  $m$  η μάζα της ράβδου Κρούστη και

$$\gamma=1.4$$

Πάλι γνωρίζοντας ότι

$$m = \frac{\rho \pi (D_{striker})^2 L_{striker}}{4} \quad (4-25)$$

Δημιουργούνται, όμοια με τη 1<sup>η</sup> μέθοδο διαγράμματα ταχύτητας/πίεσης



**Σχήμα 4-8.** Αποτελέσματα ανάλυσης με μέθοδο αρχής διατήρησης ενέργειας στη σχεδίαση Gas Gun [12]. Τα 35 m/s είναι η επιθυμητή ταχύτητα κρούσης στη μελέτη συγκεκριμένης συσκευής Kolsky [12]

από τα οποία επιλέγεται ομοίως με την πρώτη μέθοδο, η επιθυμητή καμπύλη λειτουργίας ταχύτητας/πίεσης.

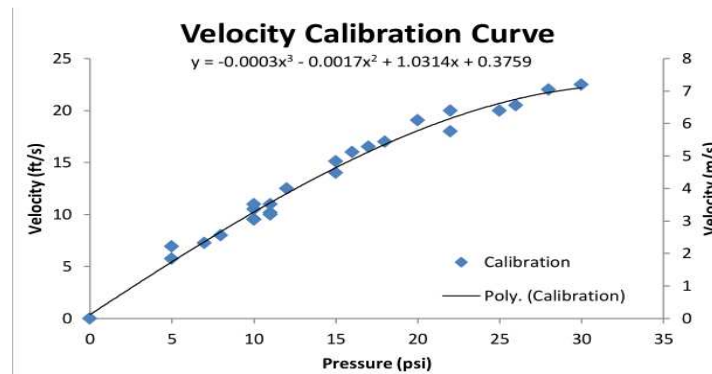
Οι δύο μέθοδοι γενικώς μπορούν να θεωρηθούν επαρκείς ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων σχεδίασης. Η μέθοδος μέσω αρχής διατήρησης ενέργειας είναι περισσότερο ακριβής, εφόσον δε στηρίζεται στην υπόθεση σταθερής δύναμης στη ράβδο Κρούστη, πράγμα που γίνεται στη μέθοδο Newton. Από την άλλη, η μέθοδος Newton είναι απλούστερη, τόσο ως προς την ανάλυση της (κεφ.2) αλλά και ως προς τον υπολογισμό των τελικών αποτελεσμάτων.

### 4.6.3 Χρήση φωτοδιόδων για τη μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας κρούσης

Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφ. 2, μια καμπύλη λειτουργίας ταχύτητας/πίεσης του Gas Gun έχει μορφή πολυωνύμου 3<sup>ου</sup> βαθμού

$$V_{striker} = aP^3 + bP^2 + cP + d \quad (4-26)$$

συνεπώς, με τη χρήση των διατάξεων φωτοδιόδων, σε μια κατασκευασμένη συσκευή, μετρούνται κατ' αρχάς οι πραγματικές ταχύτητες κρούσης, έπειτα αντιπαραβάλλονται οι μετρήσεις αυτές με την καμπύλη λειτουργίας που έχει επιλεγεί στο στάδιο της σχεδίασης



**Σχήμα 4-9.** Μέτρηση πραγματικής ταχύτητας κρούσης μέσω φωτοδιόδων και αντιπαραβολή με την καμπύλη ταχύτητας/πίεσης που επιλέχθηκε κατά τη σχεδίαση [12]

Προβαίνοντας στις κατάλληλες διορθώσεις των σχεδιαστικών επιλογών, ούτως ώστε να πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές τιμές ταχύτητας.

## 4.7 Έλεγχος σχεδίασης μέσω μοντέλου προσομοίωσης

### 4.7.1 Επιλογή της μορφής του παλμού εισόδου

Τόσο κατά τις δοκιμές των σχεδιαστικών αποφάσεων μέσω προσομοιωτικού μοντέλου στον υπολογιστή, όσο και στις πρώτες βελτιωτικές δοκιμές της πραγματικής συσκευής Kolsky αλλά και γενικώς τις μετρήσεις μέσω αυτής, είναι σημαντικό να επιλεγεί κατάλληλης μορφής παλμός πίεσης εισόδου (Incident pulse). Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις του ερευνητή εδώ, είναι ακριβώς οι περιορισμοί κάτω από τους οποίους ισχύουν οι βασικές εξισώσεις υπολογισμού (4-1,4-3,4-5) για την πίεση, την καταπόνηση και το ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης στο δείγμα

- 1) Οι πιέσεις στις ράβδους πίεσης πρέπει πάντα να είναι κάτω από το όριο ελαστικότητας (Yield Strength) αυτών.
- 2) Οι εξισώσεις (4-1,4-3,4-5) ισχύουν μόνο υπό την προϋπόθεση ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα

Το 1<sup>ο</sup>, είναι αρκετά ευθύ ως προς την κατανόηση και την εφαρμογή του. Προφανώς, εφαρμόζοντας πιέσεις που θα λυγίσουν ή ακόμα και θα σπάσουν τις ράβδους πίεσεως, όχι μόνο τα αποτελέσματα της μέτρησης δεν θα είναι αξιόπιστα, αφού για παράδειγμα η διάδοση κύματος θα πάψει να είναι η απαιτούμενη μίας διάστασης, αλλά και καταστροφικά για την ίδια την συσκευή. Ένας τρόπος να επιλεγεί κατάλληλη, και εντός ορίων αντοχής των ράβδων πίεσεως, μέγιστη τιμή μηχανικής τάσης του παλμού εισόδου, και κατ' επέκταση κατάλληλη μέγιστη τιμή τάσης γενικά στις ράβδους πίεσεως, είναι να συνδυαστεί η εξίσωση (4-3) με τα συμπεράσματα για το συντελεστή μετάδοσης  $a_{13}$ . Στην περίπτωση δειγμάτων από μέταλλο και ανάλογα επαρκείς σκληρότητας, επιλέγοντας

$$a_{13} = 0.5 \quad (4-11)$$

Δηλαδή, η πίεση Reflected και Transmitted έχουν ίδιες μέγιστες τιμές, τότε

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (4-3)$$

Συνεπώς

$$\frac{2C_0}{L} \max(\varepsilon_T) = \frac{2C_{pressure\_bar}}{L_{sample}} \frac{1}{2} \max(\varepsilon_I) = \frac{d\varepsilon_s}{dt} \quad (4-27)$$

και τελικά

$$\max(\varepsilon_I) = \frac{d\varepsilon_s}{dt} \frac{L_{sample}}{C_{pressure\_bar}} \quad (4-28)$$

Ο επιθυμητός ρυθμός μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα ορίζεται εξαρχής σε οποιαδήποτε μέτρηση και σε μια συνηθισμένη συσκευή Kolsky λαμβάνει τιμές μερικών χιλιάδων 1/s. Το μήκος δείγματος συνήθως πάλι λαμβάνει τιμές μερικών χιλιοστών και η ταχύτητα διάδοσης κύματος, σε απλά μέταλλα, είναι της τάξης μερικών χιλιάδων m/s. Συνεπώς οι μέγιστες τιμές τάσης Incident που προκύπτουν με αυτή τη προσέγγιση θα έχουν τιμές

$$\max(\sigma_I) = E_{pressure\_bar} \frac{d\varepsilon_s}{dt} \frac{L_{sample}}{C_{pressure\_bar}} \quad (4-29)$$

ενώ, για συνήθη μέταλλα, το μέτρο ελαστικότητας E παίρνει , μέγιστες, τιμές μερικών εκατοντάδων (100-200) GPa, το όριο ελαστικότητας (Yield Strength) είναι συνήθως της τάξης μερικών εκατοντάδων MPa, συνεπώς η επιλογή μέγιστης τιμής πίεσης εισόδου Incident μέσω της προσέγγισης (4.29) δίνει σχεδόν πάντα τιμή

$$\max(\sigma_I) < Yield\_Strength\_Pressure\_Bar \quad (4-30)$$

για τα περισσότερα, γνωστά μέταλλα, εν χρήσει ως ράβδους πίεσεως, και βέβαια μπορεί να ελεγχθεί εύκολα. Στη περίπτωση δειγμάτων μαλακότερων υλικών, όπου

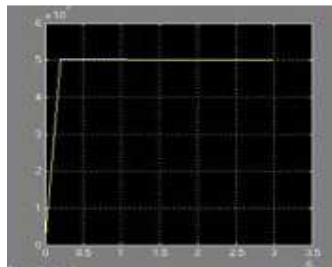
$$a_{13} < 0.5 \quad (4-12)$$

μπορεί πάλι να χρησιμοποιηθεί η ίδια διαδικασία υπολογισμού της μέγιστης τιμής τάσης εισόδου στη συσκευή, μόνο που τότε θα ισχύει

$$(1 - a_{13}) \max(\varepsilon_I) = \frac{d\varepsilon_s}{dt} \frac{L_{sample}}{C_{pressure\_bar}} \quad (4-31)$$

για όποια τιμή του συντελεστή μετάδοσης  $a_{13}$  έχει επιλεγεί από τον ερευνητή.

Για το 2<sup>ο</sup>, η συνεχώς ομοιόμορφη κατανομή παραμόρφωσης στο δείγμα, είναι γνωστό ότι στη πράξη δεν ισχύει [2],[8],[11]. Αυτό που συμβαίνει (κεφ. 2) είναι ότι κατά την έναρξη της μέτρησης, υπάρχει ένα «παράθυρο» χρόνου κατά το οποίο η κατανομή παραμόρφωσης στο δείγμα δεν είναι ομοιόμορφη. Είναι λοιπόν λογική η επιθυμία, αν όχι εξάλειψης αυτού του χρόνου μη ομοιόμορφιας, πράγμα αδύνατο, τουλάχιστον της ελαχιστοποίησης του. Από τα δεδομένα της μελέτης [8], είναι φανερό ότι η καλύτερη μορφή εισόδου γι' αυτό, σε μια διαδικασία προσομοίωσης συσκευής Kolsky είναι παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου



**Σχήμα 4-10.** Παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου

Διότι

- 1) Ο αριθμός των wave transits  $n$  στο δείγμα που απαιτούνται για επίτευξη ομοιομορφίας παραμόρφωσης είναι μικρός και συγκεκριμένης τιμής, αναλόγως τη σχετική μηχανική αντίσταση  $\beta$

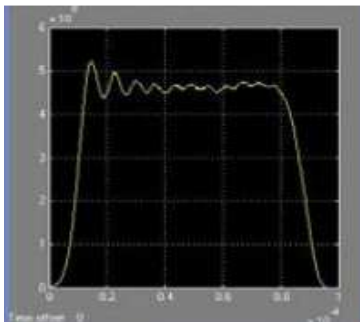
$$\text{if } (\beta \geq \frac{1}{6})$$

$$n = 4$$

*else*

$$n = 3 \quad (4-32)$$

- 2) Είναι λιγότερο τυχαία ορισμένος από ότι ο πραγματικός παλμός εισόδου, όπου η άνοδος είναι μια καμπύλη, περίπου, 2<sup>ου</sup> βαθμού πολυωνύμου, ομοίως η κάθοδος συν επιπλέον τα φαινόμενα διασποράς που παρουσιάζονται ( $n > 3$ )



**Σχήμα 4-11.** Μορφή πραγματικού παλμού Incident εισόδου στη συσκευή, με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και καμπύλη, πεπερασμένο χρόνο καθόδου και καμπύλη, φαινόμενα διασποράς [9]

Συνεπώς, μια καλή επιλογή μορφής Incident παλμού πίεσης, στο στάδιο της σχεδίασης και προσομοίωσης είναι αυτή του παλμού με πεπερασμένο χρόνο ανόδου, σχήμα (4-8). Η συνολική διάρκεια του παλμού μπορεί να επιλεγεί από τον ερευνητή, με την προϋπόθεση

$$t_{Incident\_pulse} \leq \frac{L_{Pressure\_Bar}}{2 * C_{Pressure\_Bar}} \quad (4-33)$$

και επιπλέον πρέπει, ο χρόνος ανόδου που επίσης θα επιλεγεί από τον ερευνητή, να είναι μεγαλύτερος του χρόνου που απαιτείται για επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης δείγματος

$$t_{rise} > n\Delta t = n \frac{L_{sample}}{C_{sample}} \quad (4-34)$$

Η είσοδος τύπου όπως το σχήμα **4-9**, είναι αυτή που προκύπτει σε μετρήσεις με πραγματικές συσκευές Kolsky, και επιλέγεται κυρίως γιατί ελαχιστοποιεί το χρόνο που απαιτείται για να επιτευχθεί ομοιομορφία καταπόνησης στο δείγμα, αφού με αυτήν οι απαιτούμενες μεταβάσεις κύματος από το κύμα έως την ομοιομορφία κατανομής παραμόρφωσης ελαχιστοποιούνται [11]

$$n \rightarrow 3 \quad (4-16)$$

Αυτή η είσοδος, υλοποιείτε στη πράξη, με τη προσθήκη στο ελεύθερο άκρο της 1<sup>ης</sup> ράβδου πίεσεως, αυτό που θα υποστεί τη κρούση, μαλακού, εύπλαστου κομματιού μετάλλου ως πρόσθετου [11], όπως παρουσιάστηκε και στο κεφ.2, η παρουσία του οποίου επιβραδύνει το χρόνο ανόδου. Σε επίπεδο προσομοίωσης, αυτό που μπορεί να γίνει είναι να δημιουργηθεί μια, τρόπον τινά, πραγματικού τύπου εισόδου, να δοθεί στο μοντέλο προσομοίωσης της συσκευής, να διορθωθούν τα φαινόμενα διασποράς σε αυτήν και την transmitted που προκύπτει, και να ελεγχθεί η λειτουργία της συσκευής. Το πώς μπορεί να γίνει αυτό, παρουσιάζεται παρακάτω, στην ενότητα για τη διόρθωση της διασποράς σήματος.

#### **4.7.2 Μοντέλο προσομοίωσης**

Φθάνοντας στο στάδιο αυτό, όπου ο ερευνητής έχει καταλήξει σε όλες τις βασικές παραμέτρους της συσκευής, είτε προχωρά σε απ' ευθείας κατασκευή πρωτότυπου ή πρώτα, σε δοκιμή της συμπεριφοράς της συσκευής, μέσω χρήσης κάποιου μοντέλου προσομοίωσης στον υπολογιστή. Συνηθέστερη πρακτική, όταν γίνεται δοκιμή της συμπεριφοράς της συσκευής μέσω μοντέλου προσομοίωσης, είναι να υλοποιείτε το μοντέλο αυτό μέσω θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων και με τη βοήθεια κάποιου εξειδικευμένου ηλεκτρομηχανολογικού λογισμικού, όπως είναι το LSDYNA και το ANSYS. Η προσέγγιση αυτή, σχεδόν πάντα, οδηγεί σε αποτελέσματα εγγύτερα των παρατηρήσεων που προκύπτουν στην τελικά υλοποιημένη, πραγματική συσκευή, δεν είναι όμως εντελώς χωρίς μειονεκτήματα. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφ.3, είναι γενικώς επιθυμητό σε οποιοδήποτε ερευνητικό έργο, να γίνεται χρήση όσο πιο γενικευμένων λύσεων λογισμικού, που κατά μεγάλη πιθανότητα, όλα τα μέλη μιας ερευνητικής ομάδας έχουν πρότερη τριβή με αυτά. Συγκεκριμένα σε αναφορά με τις συσκευές Kolsky, σήμερα γίνεται προσπάθεια χρήσης της [10] σε μετρήσεις που εμπλέκουν την παρατήρηση από επιστήμονες που δεν ανήκουν στον ηλεκτρομηχανολογικό κύκλο, όπως είναι η εξέλιξη θραύσης οστών. Θα ήταν

λοιπόν επιθυμητό, να γίνει χρήση ενός λογισμικού στο οποίο έχει τριβή σχεδόν όλη η επιστημονική κοινότητα, όπως για παράδειγμα είναι το Matlab/Simulink.

Μια τέτοια λύση προτάθηκε στο κεφ.3 [9], όπου μοντελοποιείται η συμπεριφορά μιας συσκευής Kolsky μέσω του σχεδιαστικού τμήματος του προγράμματος Matlab/Simulink. Η διαδικασία πλεονεκτεί στο ότι είναι προσιτή σχεδόν σε όλους τους πιθανούς ερευνητές που πιθανών θα κληθούν να ασχοληθούν με μια συσκευή Kolsky, εν γένει είναι μια λύση απλούστερη ενώ η πλούσια, ήδη υλοποιημένη βιβλιοθήκη κώδικα που υπάρχει, κάνει το λογισμικό αυτό ικανό να επεξεργαστεί οποιαδήποτε επιπλέον μαθηματική διεργασία χρειαστεί, στην επεξεργασία των δεδομένων, και τον επιτόπιο έλεγχο της πραγματικής διαδικασίας μέτρησης, διότι το Matlab υποστηρίζει απ' ευθείας διασύνδεση με μετρητές και αισθητήρες μέσω κάρτας A/D. Εδώ [9], οι συγγραφείς κάνοντας χρήση

- 1) Της σχετικής δια-τομεακής περιοχής  $a$ , δηλαδή του λόγου δια-τομεακής περιοχής δείγματος προς δια-τομεακή περιοχή ράβδου πίεσεως

$$a = \frac{A_{sample}}{A_{pressure\_bar}} = \left( \frac{D_{sample}}{D_{pressure\_bar}} \right)^2 \quad (4-35)$$

- 2) Της σχετικής μηχανικής αντίστασης  $\beta$ , δηλαδή του λόγου μηχανικής αντίστασης δείγματος προς μηχανική αντίσταση ράβδου πίεσεως

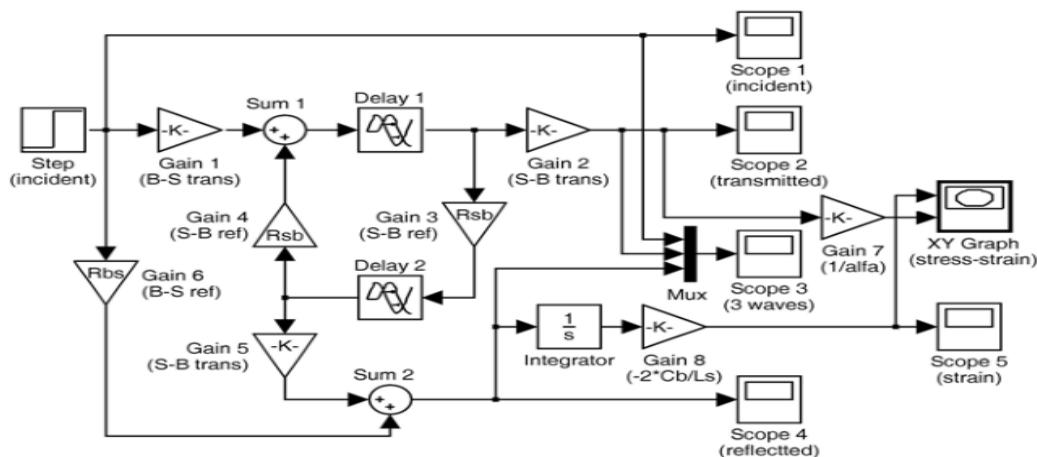
$$\beta = \frac{(\rho C)_{sample}}{(\rho C)_{pressure\_bar}} \left( \frac{D_{sample}}{D_{pressure\_bar}} \right)^2 \quad (4-15)$$

- 3) Του χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη ομοιομορφίας, από την ανάλυση που γίνεται στο [8]

$$t = n\Delta t = n \frac{L_{sample}}{C_{sample}} \quad (4-36)$$

Κατέληξαν στο παρακάτω μοντέλο Simulink





**Σχήμα 4-12.** Τελικό μοντέλο προσομοίωσης [9], με είσοδο βηματική συνάρτηση

Όπου

$$Delay1 = Delay2 = n \frac{L_{sample}}{C_{sample}} \quad (4-37)$$

$$Gain1 = \frac{\left(\frac{2}{a}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4-38)$$

$$Gain2 = \frac{2a}{1 + \beta} \quad (4-39)$$

$$Gain3 = Gain4 = \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \quad (4-40)$$

$$Gain5 = \frac{2a}{1 + \beta} \quad (4-41)$$

$$Gain6 = \frac{1 - \frac{1}{\beta}}{1 + \frac{1}{\beta}} \quad (4-42)$$

$$Gain7 = \frac{1}{a} \quad (4-43)$$

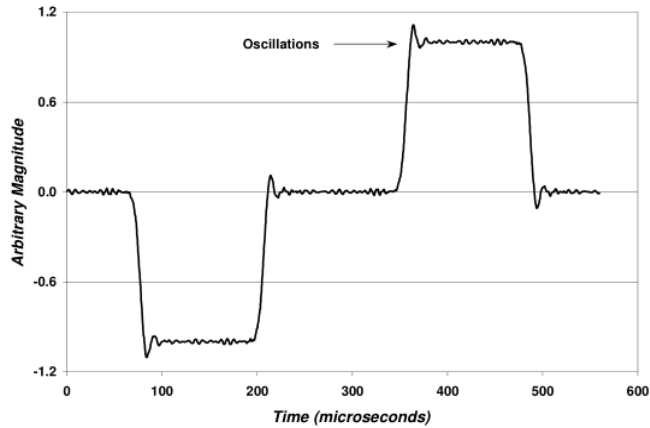
$$Gain8 = -2 \frac{C_{pressure\_bar}}{L_{sample} * E_{pressure\_bar}} \quad (4-44)$$

Το Gain8 έχει τη παραπάνω τιμή και εσφαλμένα ετέθη διαφορετικά στο σχήμα (4-12) [9]. Κατά τα λοιπά, το μοντέλο υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ταυτοποιήθηκε η πιστότητα των αποτελεσμάτων του διαπιστώθηκε στο κεφ.3, και άρα επιλέχθηκε, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, ως η λύση στη προσομοίωση της σχεδίασης του επόμενου κεφαλαίου. Παρουσιάζει βέβαια ένα βασικό μειονέκτημα, αφού υποθέτει τα κύματα πίεσης τελικής μετάδοσης (Transmitted stress wave) και ανάκλασης (Reflected stress wave) να είναι στις μέγιστες τιμές τάσης, προσεγγιστικά τουλάχιστον ίσα, περιορίζοντας τη χρησιμότητα του περισσότερο για συσκευές Kolsky ελέγχου συμπαγών υλικών και μετάλλων ( $\alpha_{13}=0.5$ ).

Γενικά, τέτοιες λύσεις προσομοίωσης, μέσω Matlab/Simulink, βρέθηκαν ελάχιστες στη βιβλιογραφία και τουλάχιστον όσο γνωρίζει ο υποφαινόμενος, καμία άλλη σχεδίαση δεν διατυπώνει διαδικασία υλοποίησης σε βήματα και δε βασίζεται στο παραπάνω [9] μοντέλο μέσω Simulink.

## 4.8 Μελέτη φαινομένων διασποράς

Οι εξισώσεις (4-1,4-3,4-5), για την τάση, τη παραμόρφωση και το ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος, διατυπώθηκαν για λόγους απλότητας στο κεφ. 2 [2] χωρίς να συμπεριληφθούν τα φαινόμενα πλευρικής αδράνειας που παρουσιάζονται κατά τη κυματική διάδοση. Αν αυτά συμπεριληφθούν, τότε αυτό που παρατηρείτε είναι ότι οι τιμές τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης, του δείγματος αλλά και οι τιμές των Incident, Reflected και Transmitted τάσεων/παραμορφώσεων εξαρτώνται επιπλέον από τη συχνότητα. Αυτή ακριβώς η εξάρτηση είναι που ευθύνεται για την παρουσία του φαινομένου της διασποράς στις κυματικές διαδόσεις, δηλαδή αλλοιώσεις στη μορφή του κύματος που στο πεδίο του χρόνου παρουσιάζονται ως ταλαντώσεις.



**Σχήμα 4-13.** Μετάδοση τραπεζοειδούς μορφής παλμού με παρουσία φαινομένων διασποράς [2]

Το φαινόμενο της διασποράς έχει ευρεθεί ότι παρουσιάζεται όταν τα κύματα που διαδίδονται στη συσκευή έχουν μήκος κύματος συγκρίσιμο της διαμέτρου των ράβδων πίεσεων. Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφ. 2, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του φαινομένου βασίζονται κυρίως στα αποτελέσματα του Bancroft [19]. Η βασική ιδέα όλων των λύσεων είναι η κατ' αρχήν μετατροπή του κύματος πίεσης από συνάρτηση του χρόνου σε συνάρτηση στο πεδίο της συχνότητας, μέσω του μετασχηματισμού FFT (Fast Fourier Transform), η εύρεση των συχνοτήτων αυτών στις οποίες παρουσιάζεται η διαταραχή, η εφαρμογή κατάλληλων μετατοπίσεων φάσης στο σήμα ούτως ώστε αυτή να εξαλειφθεί ή τουλάχιστον ελαχιστοποιηθεί, και η μετατροπή του τελικού σήματος από συνάρτηση στο πεδίο της συχνότητας πάλι πίσω σε χρονική συνάρτηση, μέσω του αντίστροφου FFT. Αυτό που κυρίως διαφοροποιεί την κάθε μεθοδολογία, είναι ο τρόπος εύρεσης των συχνοτήτων αυτών που παρουσιάζεται η διαταραχή. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με θεωρητικό τρόπο, κυρίως βασιζόμενο σε πρότερες διαπιστώσεις σε ανάλογα υλικά, είτε με πρακτικό τρόπο, με διάφορες διαδικασίες μέτρησης στην ίδια την συσκευή.

Στο [2], δίδεται μια τέτοια διαδικασία διόρθωσης του φαινομένου της διασποράς, βασισμένη σε εμπειρική μέτρηση χαρακτηριστικών πάνω στην ίδια τη συσκευή.

1) Για κάθε σήμα πίεσης ( Incident, Reflected, Transmitted) υπολογίζεται μετασχηματισμός Fourier

$$F(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi fnt) + B_n \sin(2\pi fnt)] \quad (4-45)$$

όπου, οι μεταβλητές

$$N, f, n, t$$

αναπαριστούν αντιστοίχως τον συνολικό αριθμό των σημείων πληροφορίας, την ανάλυση συχνότητας, το χρονικό δείκτη (χρονοθυρίδες) και το χρόνο. Οι σταθερές

$$A_n, B_n$$

είναι οι μέγιστες τιμές του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του σήματος, αντίστοιχα.

2) Για να γίνει η επιδιόρθωση του φαινομένου της διασποράς, κάθε φασματικός παράγοντας πρέπει να μετακινηθεί κατά φάση, για να αντισταθμιστούν οι μεταβολές στη ταχύτητα του σήματος.

$$F_{corrected}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi fnt + \varphi) + B_n \sin(2\pi fnt + \varphi)] \quad (4-46)$$

$$\varphi = \varphi_o - \varphi_n = 2\pi y \left( \frac{1}{\lambda_o} - \frac{1}{\lambda_n} \right) = 2\pi fn \left( \frac{1}{C_o} - \frac{1}{C_n} \right) y \quad (4-47)$$

όπου, ο παράγοντας  $\varphi$  αναπαριστά την υστέρηση φάσης στα τμήματα υψηλών συχνοτήτων, που διαδίδονται μακριά από τις κοινές διατομεακές ράβδων πίεσης και δείγματος. Ο παράγοντας

$$C_o$$

είναι η ταχύτητα του απείρου μήκους κύματος (infinite wavelength wave), ενώ ο παράγοντας

$$C_n$$

είναι η ταχύτητα κύματος για κάθε συγκεκριμένη συχνότητα, δοθέντα από τον FFT. Για το μήκος κύματος για κάθε χρονοθυρίδα ισχύει

$$\lambda_n = \frac{C_n}{f} \quad (4-48)$$

Η σταθερά  $y$  είναι η απόσταση που διανύει το κύμα πριν καταγραφεί. Πριν τον υπολογισμό της υστέρησης φάσης, πρέπει να γίνουν επιλογές, σχετικά με τις ταχύτητες κυμάτων

$$C_n$$

3) οι πραγματικές κυματικές ταχύτητες  $C$  μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά, για κάθε μια από τις ράβδους πίεσεως στη συσκευή. Επιλύοντας την εξίσωση (4-47) λαμβάνεται

$$C_n = \frac{2\pi n \omega y C_o}{2\pi n \omega y - C_o \Phi} \quad (4-48)$$

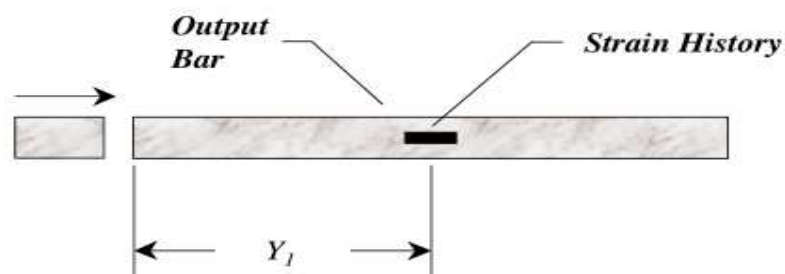
από εδώ, μπορούν να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά των ταχυτήτων φάσης για τις ράβδους.

Οι σταθερές

$$y, C_o$$

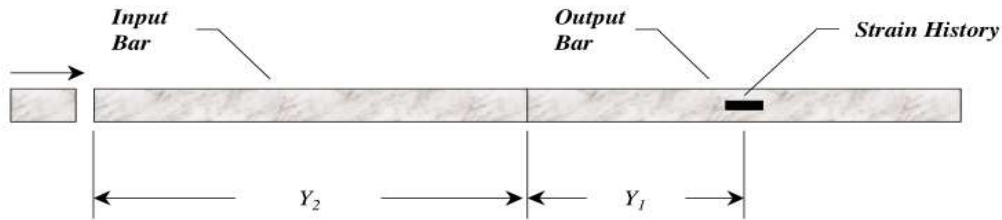
μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα, η πρώτη με απλή μέτρηση των αποστάσεων των strain gages από την αρχή εκπομπής των κυμάτων, για το Incident wave επί παραδείγματι θα είναι το σημείο κρούσης της Striker bar. Για τη σταθερά ταχύτητας κύματος, αυτό που πρέπει να ερευνηθεί είναι το ιστορικό παραμόρφωσης της ράβδου μετά από κρούση. Αναγνωρίζοντας τις κύριες ακμές του διαδιδόμενου προσπίπτοντα (incident) και ανακλώμενου (reflected) παλμού, και γνωρίζοντας πόσο μακριά είναι η strain gage από το άκρο ανάκλασης της ράβδου, η ταχύτητα κύματος για χαμηλές συχνότητες μπορεί να υπολογιστεί. Για το προσδιορισμό της σταθεράς  $\Phi$ , της διασπειρόμενης φάσης, απαιτείται η δημιουργία κρούσης, διάδοση κύματος και καταγραφή του, με συγκεκριμένο τρόπο.

Η διαδικασία υπολογισμού λοιπόν, της σταθεράς  $\Phi$  και εν γένει η διαπίστωση των φαινομένων διασποράς, απαιτεί κατ' αρχάς η καταγραφή ιστορικού παραμόρφωσης στη ράβδο πίεσης Δέκτη (Output bar), σε δύο διαφορετικά πειράματα. Η ράβδος Δέκτης πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε στο 1ο πείραμα η ράβδος Κρούσης (Striker bar) να χτυπήσει σ' αυτήν απ' ευθείας.



**Σχήμα 4-14.** 1<sup>ο</sup> Πειραματική μέτρηση – Απευθείας κρούση της ράβδου Δέκτη [2]

Μετά την καταγραφή των τιμών παραμόρφωσης από το παλμού αυτό, που προκύπτει από την κρούση, η διάταξη θα πρέπει να επανέλθει στην κανονική της μορφή, και χωρίς τη παρουσία δείγματος να συνενωθούν οι δύο ράβδοι πίεσης. Στο 2<sup>ο</sup> πείραμα πια, η κρούση θα γίνει, κανονικά στη ράβδο Πομπό (Input bar), με την καταγραφή ιστορικού καταπόνησης να γίνεται πάλι μόνο στην ράβδο Δέκτη.

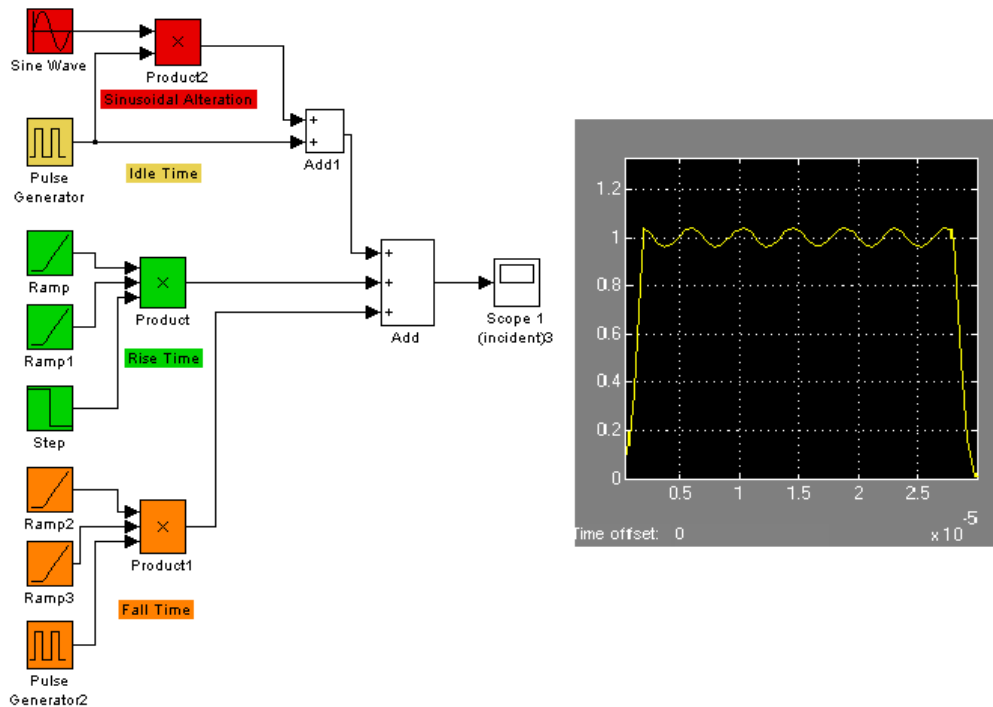


**Σχήμα 4-15.** 2<sup>η</sup> Πειραματική μέτρηση – Κρούση με τοποθετημένες και τις δύο ράβδους πίεσης [2]

Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση, ο παλμός διασπείρεται κατά μέσου απόστασης  $Y_1$ , πριν καταγραφεί. Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση, ο παλμός διασπείρεται δια μέσου απόστασης  $Y_1$  συν το μήκος της ράβδου Πομπό  $Y_2$ . Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών χρονικών ιστορικών καταπόνησης είναι η φάση διασποράς  $\Phi$ , κατά μέσου απόστασης  $Y_1+Y_2$ . Αντικαθιστώντας τη τιμή  $\Phi$  στην εξίσωση (4.48), γίνεται δυνατόν πλέον να υπολογιστούν οι κυματικές ταχύτητες στην ράβδο Πομπό (Input bar). Όμοια διαδικασία μπορεί ν' ακολουθηθεί για την προσδιορισμό των φαινομένων διασποράς στη ράβδο Δέκτη (Output bar).

Στο 2<sup>ο</sup> πείραμα κρούσης, λαμβάνεται η υπόθεση ότι η κοινή δια-τομεακή περιοχή μεταξύ των δύο ράβδων πίεσεων έχει μηδενική επιρροή στη μετάδοση του κύματος. Εφαρμόζοντας λεπτό στρώμα γράσου μεταξύ των δύο ράβδων πίεσης, ελαχιστοποιείται η επιρροή της επιρροή της περιοχής αυτής αφού δεν δημιουργείται εκεί κύμα ανάκλασης, οι ράβδοι συμπεριφέρονται σχεδόν σαν να είναι ένα συμπαγές υλικό. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί επίσης ούτως ώστε επαρκή ενέργεια να προσδοθεί κατά την κρούση, στις επιθυμητές συχνότητες. Πιθανών να χρειαστεί η χρήση πολλών διαφορετικών ράβδων κρούσης για να επιτευχθεί επαρκής επέκταση συχνότητας.

Σε περίπτωση που ο ερευνητής δεν προχωρήσει σε κατασκευή πρωτοτύπου της συσκευής αλλά επιθυμεί να ερευνήσει το φαινόμενο της διασποράς καθαρά σε επίπεδο προσομοίωσης, όπως είναι η σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε για τη παρούσα εργασία στο επόμενο κεφάλαιο, δύο σημαντικά προβλήματα ανακύπτουν. Το πρώτο έχει να κάνει με την δημιουργία του αρχικού, πραγματικού τύπου, σήματος εισόδου σχήμα (4-9). Αυτό μπορεί να γίνει είναι μια προσέγγιση κύματος, με το τμήμα της ανόδου του να είναι ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού, το ενδιάμεσο τμήμα μια βηματική συνάρτηση και πρόσθεση κάποιου, προφανώς πεπερασμένου, αριθμού συνημίτονων και η κάθοδος επίσης ένα πολυώνυμο επίσης 2<sup>ου</sup> βαθμού.



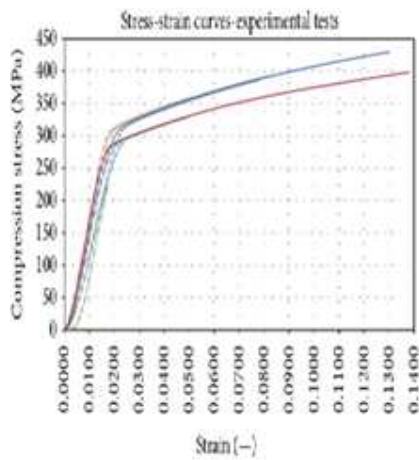
**Σχήμα 4-16.** Προσέγγιση πραγματικής εισόδου στο Simulink, με ένα ημίτονο αλλοίωσης

Το δεύτερο θέμα που ανακύπτει είναι ότι η μεθοδολογία προσδιορισμού των απαραίτητων μετατοπίσεων φάσης που παρουσιάστηκε, μόνο σε επίπεδο προσομοίωσης χωρίς τη παρουσία πραγματικής συσκευής, προφανώς δεν μπορεί να ακολουθηθεί. Στη περίπτωση αυτή, ο ερευνητής μπορεί να κάνει πρώτα προσομοίωση χωρίς την προσθήκη των ημιτόνων, μετά δεύτερη προσομοίωση με προσθήκη της ημιτονοειδούς αλλοίωσης, να βρει το μετασχηματισμό Fourier των σημάτων και στη δύο περιπτώσεις, και να αφαιρέσει από το αλλοιωμένο σήμα τις συχνότητες όπου υπάρχει μεταβολή της πληροφορίας σε σχέση με το αρχικό σήμα. Αυτή είναι και η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση του επόμενου κεφαλαίου.

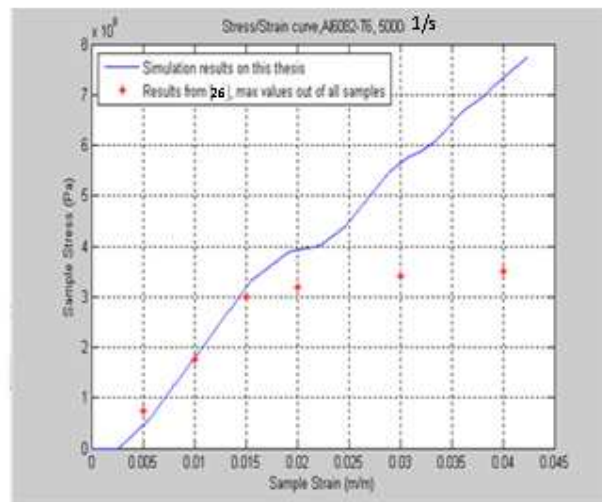
## 4.9 Αξιολόγηση τελικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Έχοντας επιλέξει και κατ' επέκταση, για τις υπόλοιπες, υπολογίσει όλες τις απαραίτητες σχεδιαστικές παραμέτρους, και έπειτα πραγματοποιώντας προσομοίωση, το τελικό αποτέλεσμα που λαμβάνεται είναι το διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης του δείγματος. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί σε σχέση με αποτελέσματα μετρήσεων σε πραγματικές συσκευές και για ίδια υλικά δείγματος, δηλαδή με διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης των μετρήσεων αυτών, όπως ενδεικτικά αυτές στα [25][26]. Μπορούν να ιδωθούν αποκλίσεις των τιμών πίεσης για τις ίδιες τιμές παραμόρφωσης, σημεία θραύσης. Σε περίπτωση που

ο ερευνητής χρησιμοποιήσει το μοντέλο Simulink [9], όπως στην σχεδίαση του επόμενου κεφαλαίου, θα πρέπει να έχει εις γνώση ότι τα διαγράμματα τάσης/καταπόνησης που θα πάρει από αυτό θα διαφέρουν από εκείνα των πραγματικών μετρήσεων, όταν η μηχανική τάση στο υλικό θα ξεπερνά το όριο ελαστικότητας αυτού. Με το πέρασμα στην περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, το προσομοιωτικό μοντέλο δεν μπορεί να αναπαραγάγει επαρκώς τη μη γραμμική, πλέον, συσχέτιση τάσης/παραμόρφωσης. Συνεπώς αυτό που θα ειδωθεί, σε επακριβή προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς του υλικού, είναι οι τιμές προσομοίωσης να είναι εξαιρετικά κοντά στις πραγματικές τιμές, για τις τιμές τάσης/παραμόρφωσης όπου το υλικό παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής του. Μόλις το υλικό περάσει στην περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης, το προσομοιωτικό θα παρουσιάσει μια απότομη κλίση ως δείγμα της μετάβασης αυτής, αλλά από εκεί και πέρα παύει να ακολουθεί την πραγματική συμπεριφορά του υλικού.



α)



β)

**Σχήμα 4-17.** α) Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματική μέτρηση συμπίεσης με συσκευή Kolsky σε αλουμίνιο 6082-T6 [26] β) Αποτέλεσμα προσομοίωσης από την σχεδίαση του επόμενου κεφαλαίου



## **5 Σχεδίαση συσκευής Kolsky για έλεγχο δειγμάτων αλουμινίου**

### **5.1 Εφαρμογή της μεθόδου σχεδιασμού**

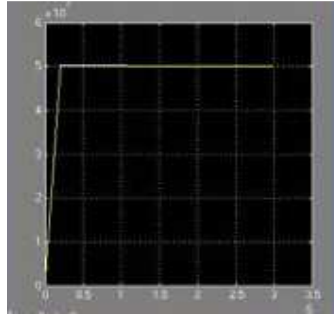
Στο παρών κεφάλαιο, γίνεται σχεδίαση και υπολογισμός των βασικών παραμέτρων λειτουργίας μιας συσκευής Kolsky πίεσεως, προς μέτρηση ιδιοτήτων συμπαγών κυλινδρικών δειγμάτων αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες και τα εργαλεία, δηλαδή το μοντέλο προσομοίωσης, τα αποτελέσματα των θεωρητικών και πρακτικών μελετών, ηλεκτρομηχανολογικά υλικά και συνδεσμολογίες, που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, ενώ η διαδικασία προσεγγίζεται με το συγκεντρωτικό μοντέλο βημάτων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Η σχεδίαση αυτή υπόκειται βέβαια σε μια σειρά περιορισμών, τόσο σε αναφορά με τις συνθήκες διεξαγωγής και συγγραφής της παρούσας έρευνας όσο και σε σχέση με τις γενικές μεθοδολογίες και τα εργαλεία σχεδίασης, που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και των οποίων γίνεται χρήση.

### **5.2 Περιορισμοί σχεδίασης**

Στην παρούσα εργασία, δεν προβλεπόταν εξ' αρχής η κατασκευή πραγματικής συσκευής και η σε βάθος ενασχόληση με τμήματα της συσκευής όπως είναι οι διατάξεις αισθητήρων, η ενίσχυση και μεταγωγή του σήματος στη συσκευή τελικής επεξεργασίας (παλμογράφος, ηλεκτρονικός υπολογιστής), η διαδικασία ευθυγράμμισης ράβδων, η τοποθέτηση των στηριγμάτων και η ενασχόληση μας με ιδιαίτερες περιπτώσεις λειτουργίας όπως θερμοκρασίες λειτουργίας πέραν αυτές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, χρήση δειγμάτων μορφής πέραν του απλού κυλίνδρου και περιπτώσεις σκέδασης των κυμάτων στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Η μελέτη επικεντρώνεται στα βασικά στοιχεία μιας συσκευής Kolsky, ήτοι τις διαστάσεις και το υλικό των ράβδων πίεσεως, τα χαρακτηριστικά του gas gun και τις διαστάσεις του δείγματος. Δίδεται επίσης, και μια προτεινόμενη συνδεσμολογία αισθητήρων, strain gages στις ράβδους πίεσεως και φωτοστοιχεία στο σωλήνα εκτόξευσης του gas gun, καθαρά όμως θεωρητικά.

Το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται [9] και παρουσιάστηκε στο κεφ.3, εγγενώς προϋποθέτει οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης των κυμάτων τελικής μετάδοσης (Transmitted strain wave) και ανάκλασης (Reflected strain wave) να είναι, προσεγγιστικά τουλάχιστον ίσες, περιορίζοντας τη χρησιμότητα του περισσότερο σε συμπαγή υλικά και μέταλλα. Ακόμα, για να γίνει χρήση της ανάλυσης επιμέρους συντελεστών μετάδοσης [2] που παρουσιάστηκε στο κεφ.3 και από την οποία μπορούν να προκύψουν επιλογές διαμέτρου δείγματος, θα πρέπει τα δείγματα αυτά να είναι κυλινδρικής μορφής. Επιπλέον,

για να γίνει άμεση χρήση της θεωρίας [8] περί της ομοιομορφίας παραμόρφωση δείγματος που παρουσιάστηκε στο κεφ.2, οι παλμοί εισόδου incident καταπόνησης θα πρέπει να έχουν μορφή παλμού με πεπερασμένο χρόνο ανόδου.



Σχήμα 5-1. Υπόδειγμα παλμού εισόδου που θα χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση

### 5.3 Ορισμός δειγμάτων υλικών

Επιλέχθηκε η σχεδίαση να γίνει με βάση ένα αρκετά ενδεικτικό σύνολο εμπορικών τύπων αλουμινίου [25], συγκεκριμένα

#### 1) Aluminum 2024-T4

Το αλουμίνιο σειράς 1xxx και 2xxx αποτελεί αρκετά τυπικό σύνολο υλικών, τόσο σε κατασκευές όσο και σε εργαστηριακό έλεγχο

Πίνακας 5-1. Ιδιότητες Aluminum 2024-T4 [24]

AA2024-T4	
Πυκνότητα ( $\rho$ )	2.77 g/cm <sup>3</sup>
Young's Modulus E	73 GPa
Όριο ελαστικότητας (Yield Strength)	310 MPa

#### 2) Aluminum 6061-T6

Η σειρά 6xxx είναι εξαιρετικά δημοφιλής επιλογή σε πραγματικές κατασκευαστικές εφαρμογές

Πίνακας 5-2. Ιδιότητες Aluminum 6061-T6 [24]

AA6061-T6	
Πυκνότητα ( $\rho$ )	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Young's Modulus E	69 GPa
Όριο ελαστικότητας (Yield Strength)	270 MPa

### 3) Aluminum 7075-T6

Όμοια με τη σειρά 6xxx, η σειρά 7xxx επίσης χρησιμοποιείται ευρέως σε σειρά κατασκευαστικών εφαρμογών

**Πίνακας 5-3.** Ιδιότητες AA7075-T6 [24]

AA7075-T6	
Πυκνότητα ( $\rho$ )	2.80 g/cm <sup>3</sup>
Young's Modulus E	72 GPa
Όριο ελαστικότητας (Yield Strength)	510 MPa

Παράλληλα, η επιλογή των υλικών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός μεν αυτά να είναι χαρακτηριστικά δείγματα της οικογένειας υλικών τους, αφετέρου δε να υπάρχει πλήρη και εύκολα προσβάσιμη βιβλιογραφία περί των ιδιοτήτων τους [24] και προηγούμενων μετρήσεων [25][26] κυρίως με τελικά διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης από μετρήσεις συμπίεσεως υλικού σε θερμοκρασία δωματίου, με τα δείγματα σε συμπαγή κυλινδρική μορφή, ενώ το όριο ασφαλείας πίεσης του gas gun ορίστηκε στα 200 psi = 1378951.458 Pa.

## 5.4 Διαδικασία σχεδίασης

Η διαδικασία σχεδίασης που ακολουθήθηκε, είναι βασικά αυτή που συγκεντρωτικά παρουσιάστηκε στο κεφ. 4. Συγκεκριμένα

- 1) Η σχεδίαση και ο έλεγχος αυτής μέσω του μοντέλου προσομοίωσης επιλέχθηκε να γίνει για τους ρυθμούς μεταβολής καταπόνησης [25]
  - α) AA2024-T4, 1300 1/s
  - β) AA6061-T6, 1200 1/s
  - γ) AA7075-T6, 1800 1/s
- 2) Επιλέχθηκε το υλικό ράβδων πίεσεως, οι διαστάσεις τους καθώς και οι διαστάσεις και το υλικό της ράβδου Κρούστη για το gas gun, το υλικό κατασκευής του σωλήνα εκτόξευσης. Η διαδικασία έγινε ακριβώς όπως αναφέρεται στη παράγραφο 4.3
- 3) Έγινε πρόταση για τις διατάξεις αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συσκευή, strain gages μέτρησης των καταπονήσεων στις ράβδους πίεσεως και φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης του gas gun για την μέτρηση της ταχύτητας εκτόξευσης. Η πρόταση αυτή έγινε καθαρά θεωρητικά, με βάση όσα αναφέρθηκαν συγκεντρωτικά στη παράγραφο 4.4.

- 4) Υπολογίστηκαν οι κατάλληλες διαστάσεις δειγμάτων, με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στη παράγραφο 4.5. Για να γίνει αυτό υλοποιήθηκε κώδικας στο λογισμικό Matlab.
- 5) Με βάση τον επιθυμητό ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης κάθε φορά, υπολογίστηκε η ταχύτητα κρούσης και μετά, ακολουθήθηκε η μέθοδος Newton, για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του gas gun, με όριο ασφαλείας πίεσης, ενδεικτικά, τα 200 psi. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, επιλέχθηκε το μήκος του σωλήνα εκτόξευσης και φυσικά ευρέθησαν οι απαιτούμενες πιέσεις που πρέπει να δοθούν από την δεξαμενή αερίου του gas gun. Η διαδικασία έγινε με τον τρόπο που συγκεντρωτικά ορίστηκε στη παράγραφο 4.6, και για να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί, σχεδιάσεις γραφημάτων, υλοποιήθηκε κώδικας στο λογισμικό Matlab.
- 6) Ορίζονται οι παλμοί εισόδου για κάθε περίπτωση μέτρησης, με τον τρόπο που διατυπώθηκε στη παράγραφο 4.7. Ο τύπος σήματος εισόδου είναι τέλειος τετραγωνικός παλμός, πλην της ανόδου, που αυτή είναι πεπερασμένου μη μηδενικού χρόνου, οι απαραίτητοι υπολογισμοί πάλι έγιναν μέσω του λογισμικού Matlab. Με όλες τις σχεδιαστικές παραμέτρους επιλεγμένες, η συνολική σχεδίαση προσομοιώνεται μέσω του Simulink μοντέλου [8].
- 7) Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με δεδομένα, συγκεκριμένα διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις [25]
- 8) Η τελική σχεδίαση, υποβάλλεται σε δεύτερη προσομοίωση, με τους επιθυμητούς ρυθμούς καταπόνησης να παραμένουν οι ίδιοι. Η μορφή της εισόδου όμως αλλάζει σε αυτή του, κατά προσέγγιση, πραγματικού παλμού και προστίθεται θόρυβος (μία συχνότητα) ως προσέγγιση του φαινομένου της διασποράς. Τα αποτελέσματα διορθώνονται ως προς τη διασπορά και τελικώς συγκρίνονται και αυτά με τα ανάλογα διαγράμματα πίεσης/καταπόνησης από πραγματικές μετρήσεις [25]. Η υλοποίηση του κώδικα υπολογισμών που απαιτήθηκε, έγινε στο λογισμικό Matlab
- 9) Υλοποιείται, σε λογισμικό C++, μετρητικό πρόγραμμα τάσεων, παραμορφώσεων. Αν και στη παρούσα εργασία δεν προβλεπόταν η κατασκευή πραγματικού πρωτοτύπου συσκευής, και συνεπώς η ανάγκη για κάτι τέτοιο, αυτό γίνεται ως επιπλέον βοήθημα για το μελλοντικό ερευνητή. Τα αποτελέσματα του ελέγχονται με χρήση αποτελεσμάτων από το μοντέλο προσομοίωσης.

## 5.5 Σχεδίαση του συστήματος των ράβδων πίεσεως

Ως υλικό κατασκευής των ράβδων πίεσεως επιλέχθηκε ο Aged Grade 300 Maraging χάλυβας (18Ni). Ο λόγος είναι το υψηλό όριο ελαστικότητας του υλικού αυτού, που εγγυάται την παραμονή των ράβδων πίεσεως εντός της ελαστικής περιοχής τους, για τα όποια κύματα πίεσης αυτές υποβληθούν, σε σχέση με τα προς έλεγχο υλικά δείγματα, στη περίπτωση μας αλουμίνιο.

**Πίνακας 5-4.** Ιδιότητες Aged Grade 300 Maraging steel (18Ni) [24]

Aged Grade 300 Maraging steel	ASTM A538 (C)
Πυκνότητα ( $\rho$ )	8 g/cm <sup>3</sup>
Young's Modulus E	190 GPa
Όριο ελαστικότητας (Yield Strength)	1990 MPa

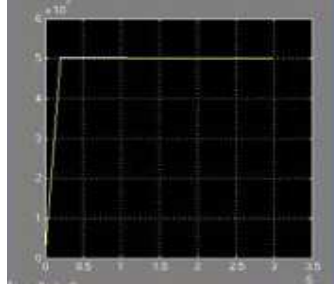
Το μήκος των ράβδων πίεσεως ορίστηκε λίγο παραπάνω από το ελάχιστο προτεινόμενο (1.524 m = 60 in) [2], για μια συσκευή τυπικών διαστάσεων, δηλαδή από τα 1.6 m. Ο λόγος L/D ( μήκος προς διάμετρο ράβδων πίεσεως) επιλέχθηκε ίσος με 20, η ελάχιστη προτεινόμενη τιμή [11]. Συνεπώς η διάμετρος τους επιλέχθηκε 0.08 m. Οι παραπάνω διαστάσεις εξασφαλίζουν ομαλή μετάδοση του κύματος και απρόσκοπτη καταγραφή των τιμών του από τις διατάξεις strain gages. Μεγαλύτερες τιμές μήκους και L/D θα οδηγούσαν σε παρόμοια απόδοσης συσκευή, πλην όμως θα ανέβαζαν το κόστος κατασκευής της.

Οι ράβδοι πίεσεως πρέπει να είναι εντελώς ίσιες και απολύτως κυλινδρικής μορφής. Για να μπορούν να μετακινούνται ελεύθερα και να μοιράζεται το βάρος τους σωστά, σε κατασκευή, πρέπει σε κάθε μία να υπάρχουν τέσσερα στηρίγματα, συμμετρικά τοποθετημένα σε ίση απόσταση μεταξύ τους. Τα στηρίγματα αυτά πρέπει να εξασφαλίζουν την ελεύθερη κίνηση της ράβδου, συνεπώς θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα με ανάλογο τρόπο γι' αυτό και επικαλυμμένα με λάδι μηχανής, χαμηλού συντελεστή τριβής. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο ράβδων πίεσεως. Ένας τρόπος για να γίνει η διαδικασία αυτή είναι να εφαρμοστεί ακτίνα laser διαμέσου του σωλήνα εκτόξευσης και, οπτικά πλέον, ο ερευνητής να τοποθετήσει καταλλήλως της ράβδους, έχοντας επιτύχει η ακτίνα να περνά από την οπή κίνησης και των 6, συνολικά, στηρίξεων των ράβδων πίεσεως.

## 5.6 Προσδιορισμός κατάλληλων διαστάσεων δείγματος και μορφής εισόδου

Και στις τρεις περιπτώσεις τύπων αλουμινίου, με βάση τις οποίες θα γίνει η σχεδίαση, θεωρήθηκε ως αρχικό Incident κύμα πίεσης μορφής τέλει τετραγωνικής πλην της ανόδου του, όπου αυτή είναι πεπερασμένου χρόνου, επιλογή που όπως αναλύθηκε στη

παράγραφο 4.5.2 ελαχιστοποιεί τον χρόνο που απαιτείτε για επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα, ενώ είναι εύκολα υλοποιήσιμη και στο επίπεδο της Simulink προσομοίωσης.



**Σχήμα 5-2.** Παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου

Συγκεκριμένα επιλέχθηκε

- 1) Συνολική διάρκεια του σήματος εισόδου

$$t_{ol} = 30 \mu s$$

- 2) Χρόνος ανόδου

$$t_{rise} = 2 \mu s$$

Με βάση τα έως τώρα δεδομένα, μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε περίπτωση

- 1) Η διάμετρος του δείγματος ως

$$D_{sample} = \frac{D_{pressure\_bar} \sqrt{(\rho c)_{pressure\_bar}} \sqrt{(2\sqrt{(1-a_{13})} + a_{13} - 2)}}{\sqrt{a_{13}} \sqrt{-(\rho C)_{sample}}} \quad (5-1)$$

Θέτοντας

$$a_{13} = 0.5 \quad (5-2)$$

προς μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο για τη μετάδοση [2].

- 2) Με τον υπολογισμό της διαμέτρου δείγματος, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της σχετικής μηχανικής αντίστασης  $\beta$

$$\beta = \frac{(\rho C)_{sample}}{(\rho C)_{pressure\_bar}} \left( \frac{D_{sample}}{D_{pressure\_bar}} \right)^2 \quad (5-3)$$

- 3) Υπολογισμός των απαιτούμενων μεταβάσεων  $n$ , σήματος από το δείγμα, έως την επίτευξη ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης σε αυτό[8]

$\beta$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$
$n$	4	4	4	3	3	3

και άρα του απαιτούμενου χρόνου για την επίτευξη ομοιομορφίας παραμόρφωση

$$t = n\Delta t = \frac{nL_{sample}}{C_{sample}} \quad (5-4)$$

- 4) Υπολογισμός του μήκους δείγματος με βάση τη πρακτική διαδικασία που προτείνεται στη παράγραφο 4.5.2

$$L_{sample} = \frac{0.05 * t_{ολ} * C_{sample}}{n} \quad (5-5)$$

- 5) Υπολογισμός της μέγιστης τιμής τάσης και παραμόρφωσης του αρχικού Incident κύματος (παράγραφος 4.7.1)

$$\max(\varepsilon_I) = \frac{d\varepsilon_s}{dt} \frac{L_{sample}}{C_{pressure\_bar}} \quad (5-6)$$

Από την οποία διαδικασία λαμβάνεται

**Πίνακας 5-5.** Δεδομένα διαστάσεων δείγματος και εισόδου πίεσης Incident, φάση σχεδίασης

Δείγμα	$d\varepsilon/dt$ (1/s)	Dsample (cm)	$\beta$	n	Lsample (mm)	max( $\sigma_I$ ) (MPa)
AA 2024-T4	1300	5.4868	0.1715	4	1.925	97.5
AA 6061-T6	1200	5.6004	0.1715	4	1.8957	88.69
AA 7075-T6	1800	5.491	0.1715	4	1.905	133.44

## 5.7 Σχεδίαση του Gas Gun

Τα βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος gas gun είναι

- 1) Η ράβδος Κρούστης

Αυτή θα κατασκευαστεί από ίδιο υλικό και με ίδια διάμετρο με τις ράβδους πίεσεως ενώ το μήκος της τίθεται ίσο με το 25% του μήκους ράβδου πίεσεως, συνεπώς

$$D_{striker} = 0.08m$$

$$L_{striker} = 0.4m$$

ενώ το υλικό κατασκευής της θα είναι Aged Grade 300 Maraging χάλυβας (18Ni)

- 2) Ο σωλήνας εκτόξευσης

Αυτός θα κατασκευαστεί με υλικό ίδιο με αυτό των ράβδων πίεσεως, διάμετρο λίγο μεγαλύτερη των ράβδων πίεσεως, όπου γι' αυτό στο [12] προτείνεται διαφορά λίγων mm ούτως ώστε η ράβδος Κρούστης να μπορεί να μετακινείται ελεύθερα εντός του σωλήνα εκτόξευσης αλλά και να μην υπάρχει μεγάλη απώλεια πίεσης. Το ακριβές μήκος του θα επιλεγεί παρακάτω.

- 3) Ο μηχανισμός εκτόξευσης και η δεξαμενή τροφοδοσίας αερίου για την εκτόξευση  
Όριο ασφαλείας πίεσης τίθενται τα

$$200 \text{ psi} \approx 1.38 \text{ MPa}$$

Σε κάθε περίπτωση μέτρησης η ταχύτητα κρούσης προσεγγίζεται από [11]

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{V_{striker}}{L_{sample}} \quad (5-7)$$

Οπότε, στις συγκεκριμένες μετρήσεις έχουμε

**Πίνακας 5-6.** Ταχύτητες κρούσης, φάση σχεδίασης

Δείγμα	dε/dt (1/s)	Vstriker (m/s)
AA 2024-T4	1300	2.5
AA 6061-T6	1200	2.274
AA7075-T6	1800	3.4228

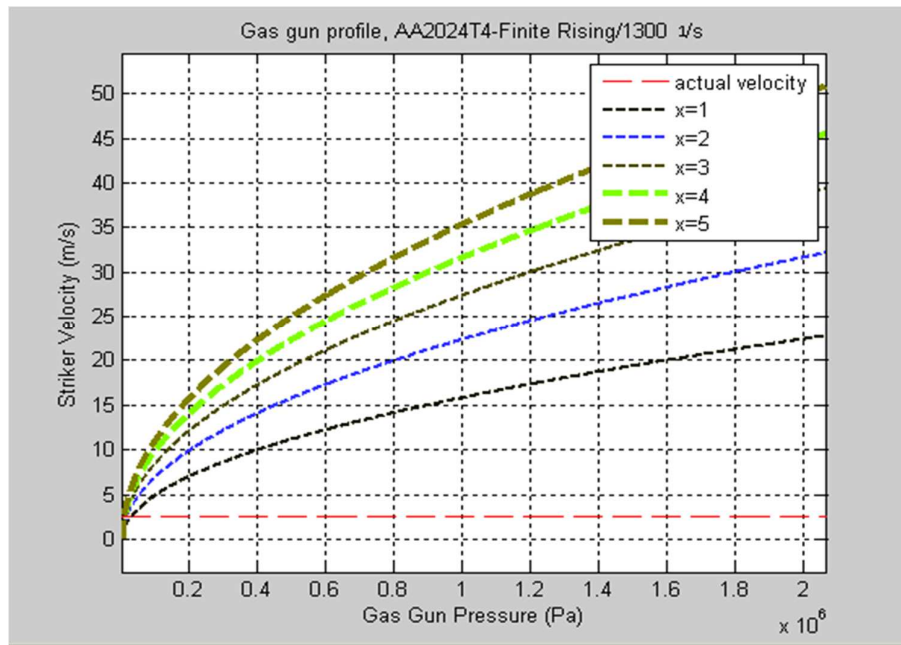


Μέσω της μεθόδου Newton [12] και με βάση τα παραπάνω δεδομένα, η πίεση που χρειάζεται να απελευθερωθεί από το gas gun P και ο λόγος μήκους x, του σωλήνα εκτόξευσης προς το μήκος της ράβδου Κρούστη, αλληλεξαρτώνται μέσω της σχέσης

$$V_{striker} = \sqrt{\frac{2Px}{\rho}} \quad (5-8)$$

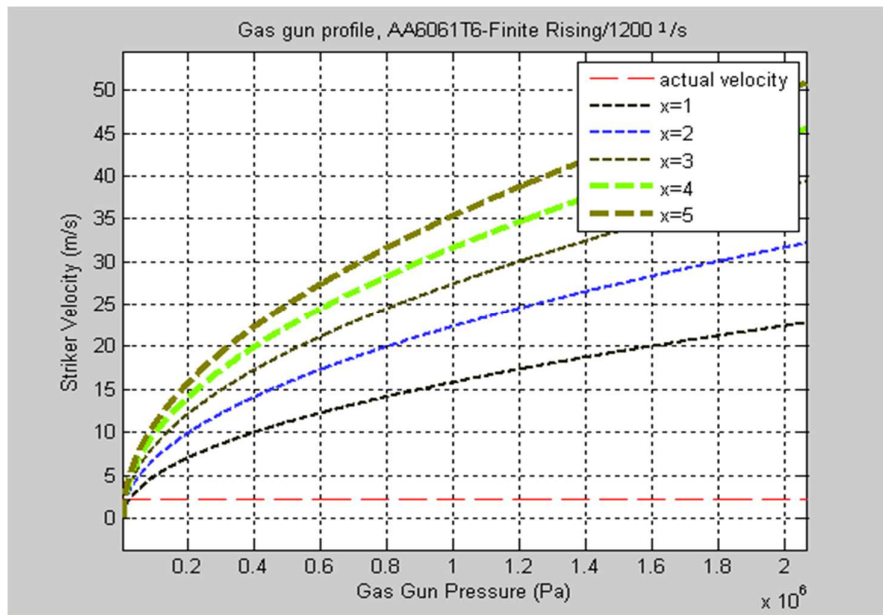
Συνεπώς, δημιουργώντας από αυτήν τα διαγράμματα ταχύτητας/πίεσης, όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο 4.6.2, λαμβάνεται

- 1) Περίπτωση δείγματος, AA2024-T4, Ρυθμός παραμόρφωσης 1300 1/s



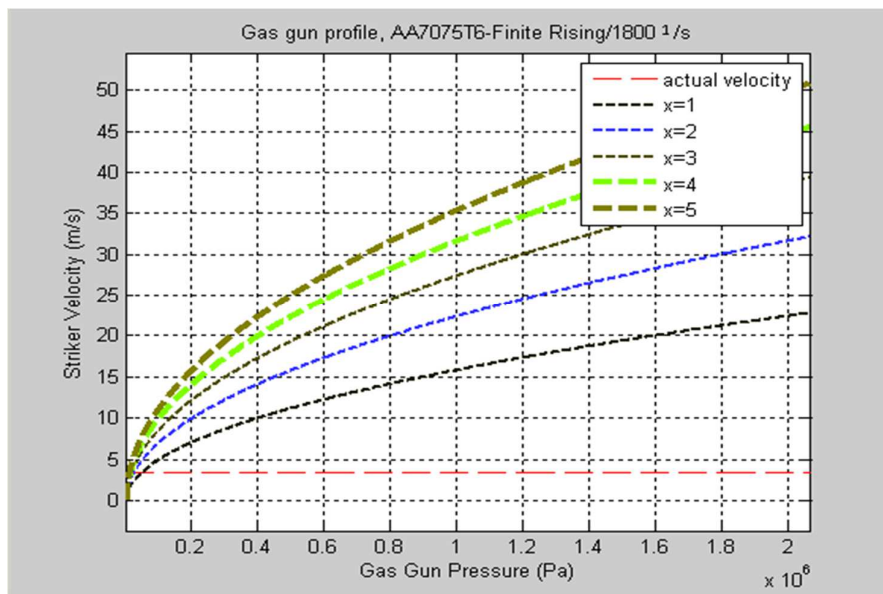
**Σχήμα 5-3.** Προφίλ Gas Gun (1), με απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης 2.5m/s, μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε λόγος μήκους σωλήνα κρούσης προς ράβδο Κρούστη (όριο ασφαλείας περίπου 1.38 MPa)

2) Περίπτωση δείγματος, AA6061-T6, Ρυθμός παραμόρφωσης 1200 1/s



**Σχήμα 5-4.** Προφίλ Gas Gun (2), με απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης 2.274m/s, μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε λόγος μήκους σωλήνα κρούσης προς ράβδο Κρούστη (όριο ασφαλείας περίπου 1.38 MPa)

3) Περίπτωση δείγματος, AA7075-T6, Ρυθμός παραμόρφωσης 1800 1/s



**Σχήμα 5-5.** Προφίλ Gas Gun (3), με απαιτούμενη ταχύτητα κρούσης περίπου 3.4228m/s, μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε λόγος μήκους σωλήνα κρούσης προς ράβδο Κρούστη (όριο ασφαλείας περίπου 1.38 MPa)

Συνεπώς, μπορεί να επιλεγεί, για τις επιθυμητές ταχύτητες κρούσης, οποιοσδήποτε λόγος  $x$  και ανάλογα καμπύλη λειτουργίας ταχύτητας κρούσης/ πίεσης απελευθέρωσης. Παρατηρείται ότι για  $x$  μεγαλύτερο του 2 οι πιέσεις απελευθέρωσης είναι σημαντικά χαμηλότερες, άρα στη περίπτωση αυτή μπορεί να επιλεγεί  $x=2$ , δηλαδή μήκος σωλήνα εκτόξευσης 0.8m, και η ανάλογη (μπλε χρώματος) καμπύλη υπολογισμού της πίεσης. Έτσι, η συσκευή θα μπορεί να υποστηρίξει και μετρήσεις σε πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς παραμόρφωσης και αρχικές ταχύτητες κρούσης, όπου δεν είχαμε στις δοκιμές αυτές.

Κλείνοντας τη διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων σχεδίασης του gas gun, παρατηρείται ότι για το μήκος της συνολικής συσκευής

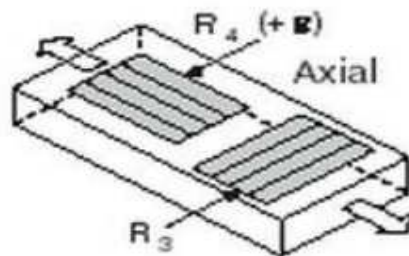
$$2L_{pressure\_bar} + L_{launch\_tube} = 3.2 + 0.8 = 4m$$

Δηλαδή, υπάρχει το επαρκές περιθώριο χωρικής τοποθέτησης 1-1.5 m του μηχανισμού εκτόξευσης και των υπολοίπων παρελκομένων της συσκευής, ώστε αυτή να έχει το συνολικό μήκος 5-5.5 m, αρχικός περιορισμός που τέθηκε για την κατασκευή της.

## 5.8 Σχεδίαση του συστήματος συλλογής πληροφορίας

### 5.8.1 Σύστημα μέτρησης της παραμορφωσης στις ράβδους πίεσης

Η βασική απαίτηση εδώ, είναι δύο διατάξεις αισθητήρων τύπου strain gages, κάθε μια τοποθετημένη στο κέντρο κάθε ράβδου πίεσεως. Η μία καταγράφει, πρακτικά, την ανακλώμενη παραμόρφωση Reflected στην 1<sup>η</sup> ράβδο πίεσεως, η άλλη τη μεταδιδόμενη Transmitted στη 2<sup>η</sup> ράβδο πίεσεως. Για την ελαχιστοποίηση της αλλοίωσης των αποτελεσμάτων και γενικά της επιρροής της υπερθέρμανσης του αισθητήρα στη λειτουργία του, η κάθε διάταξη δεν αποτελείται από ένα στοιχείο αισθητήρα, αλλά δύο, με συνδεσμολογία μορφής τεταρτογέφυρας τύπου 2 (Quarter Bridge Type II), η όποια φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

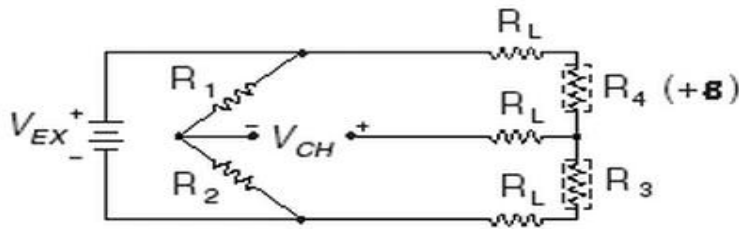


**Σχήμα 5-6.** Συνδεσμολογία Quarter Bridge type II με strain gages αισθητήρες. Με R4 συμβολίζεται ο «ενεργός» μετρητικά αισθητήρας, με R3 ο αισθητήρας θερμικής απαγωγής [12].

Ο ένας αισθητήρας δρα ο μετρητικός, ο άλλος χρησιμοποιείται καθαρά για απαγωγή θερμότητας από τον προηγούμενο.

Για την ελαχιστοποίηση των όποιων επιρροών πιθανού λυγισμού μιας ράβδου πίεσης κατά τη μέτρηση, συνδέονται παράλληλα δύο τέτοιες διατάξεις τετατογέφυρας, και τοποθετούνται στο κέντρο κάθε ράβδου πίεσεως, αντί-διαμετρικά η μια στην άλλη. Ο πιθανός λυγισμός της ράβδου οδηγεί σε αύξηση της μέτρησης τιμής παραμόρφωσης στη μια διάταξη, μείωση στην άλλη. Συνεπώς, η πραγματική ομοαξονική παραμόρφωση, μπορεί να ευρεθεί από τη μέση τιμή παραμορφώσεων στις δυο αυτές διατάξεις.

Κάθε τέτοια διάταξη τετατογέφυρας χρειάζεται την απαραίτητη ενίσχυση σήματος, ούτως ώστε αυτό να μπορεί να μετρηθεί και να συλλεχθεί από περαιτέρω σύστημα συλλογής πληροφορίας. Μπορούν γι' αυτό να χρησιμοποιηθούν διατάξεις τύπου γέφυρας



**Σχήμα 5-7.** Κύκλωμα τύπου γέφυρας, σε λειτουργία ενίσχυσης της τάσης εξόδου από διάταξη strain gage τύπου Quarter Bridge type II [12][15]

Στο παράδειγμα της διάταξης της παραπάνω εικόνας [15] η μετατροπή της τάσης  $V_{ex}$ , ανάγνωση από τον αισθητήρα, σε μονάδες καταπόνησης ισχύει ο τύπος μετατροπής

$$strain(\varepsilon) = \frac{-4V_r}{GF(1+2V_r)} \left(1 + \frac{R_L}{R_g}\right) \quad (5-9)$$

Όπου  $GF = \text{Gauge Factor}$ , το ποσοστό της σχετικής αλλαγής στην ηλεκτρική αντίσταση του αισθητηρίου strain gage σε σχέση με την μηχανική παραμόρφωση που μετράται (εκ του κατασκευαστή) και το  $V_r$  είναι το ποσοστό τάσης που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις μετατροπής τάσης σε τιμές παραμόρφωσης (εκ του κατασκευαστή), οριζόμενο ως [15]

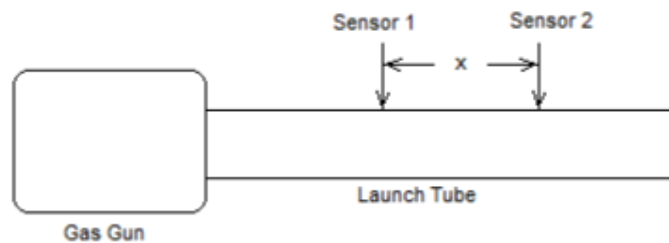
$$V_r = \frac{V_{ch}(strained) - V_{ch}(unstrained)}{V_{ex}} \quad (5-10)$$

## 5.8.2 Ζεύγη φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης

Το κατάλληλο μήκος δείγματος σε κάθε μέτρηση, υπολογίζεται μέσω της πρακτικής διαδικασίας που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 4.5.2 , τότε η ταχύτητα κρούσης προσεγγίζεται ως

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{V_{striker}}{L_{sample}} \quad (5-11)$$

Είναι δυνατό, σε τελική κατασκευή πραγματικού πρωτοτύπου, να βελτιωθεί επιτόπου η προσέγγιση αυτή της ταχύτητας κρούσης με χρήση διάταξης αισθητήρων τύπου φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης [12],[14]. Αυτή περιλαμβάνει δύο ζεύγη φωτοδιόδων, τοποθετημένα στο σωλήνα εκτόξευσης όπως στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 5-8.** Τοποθέτηση φωτοδιόδων στο σωλήνα εκτόξευσης για τον έλεγχο της ταχύτητας κρούσης [12]

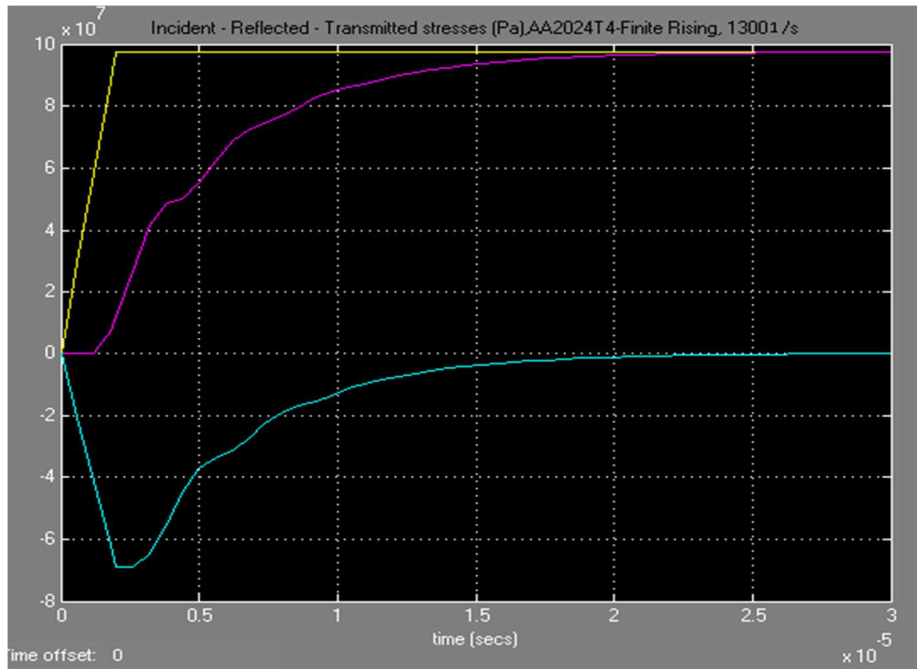
Όταν η ράβδος Κρούσης περάσει από το πρώτο αισθητήρα ξεκινά ένα μετρητής χρόνου, ο οποίος σταματά όταν η ράβδος Κρούσης περάσει από το σημείο που είναι η 2<sup>η</sup> διάταξη φωτοδιόδων. Η πραγματική ταχύτητα εκτόξευσης που έχει επιτευχθεί θα είναι ίση με

$$V = \frac{x}{\Delta t} \quad (5-12)$$

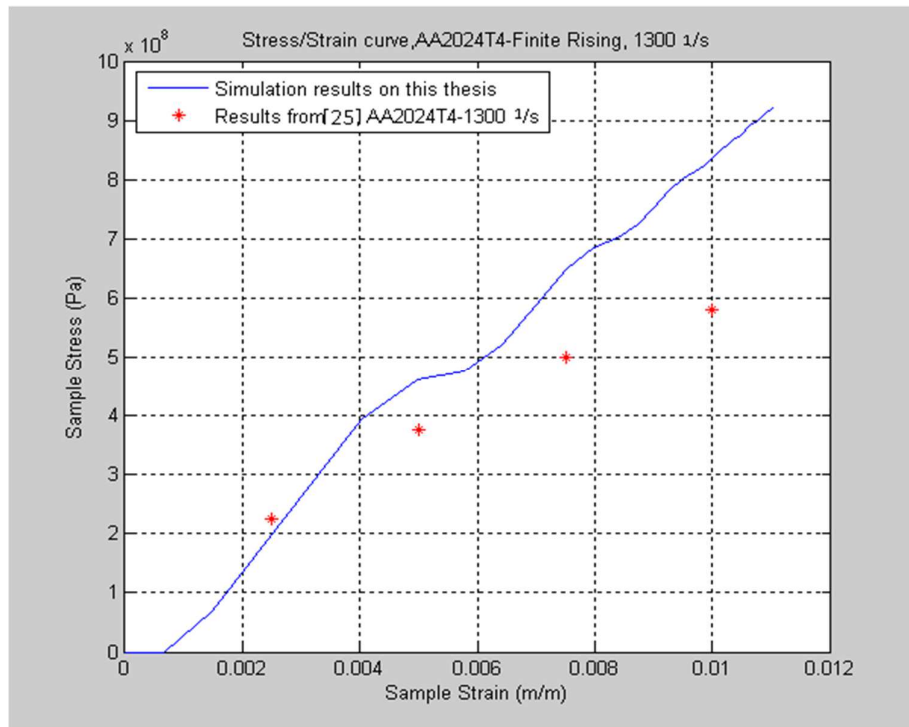
Όπου  $x$ , η απόσταση των δύο διατάξεων φωτοδιόδων και  $\Delta t$  ο χρόνος που μέτρησε το χρονόμετρο. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν και να συγκριθούν έπειτα με το θεωρητικό υπολογισμό της ταχύτητας κρούσης συναρτήσει της πίεσης για το gas gun, ώστε να διορθωθούν τυχόν αποκλίσεις πραγματικής ταχύτητας/πίεσης στο διάγραμμα ταχύτητας/πίεσης του gas gun, όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο 4.6.3

## 5.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης, φάση σχεδίασης

### 5.9.1 Αλουμίνιο 2024-T4, 1300 1/s

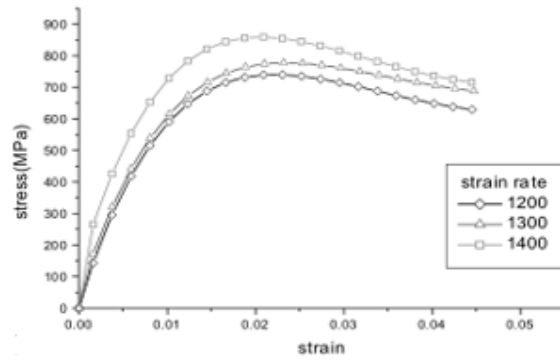


Σχήμα 5-9. Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις (1)

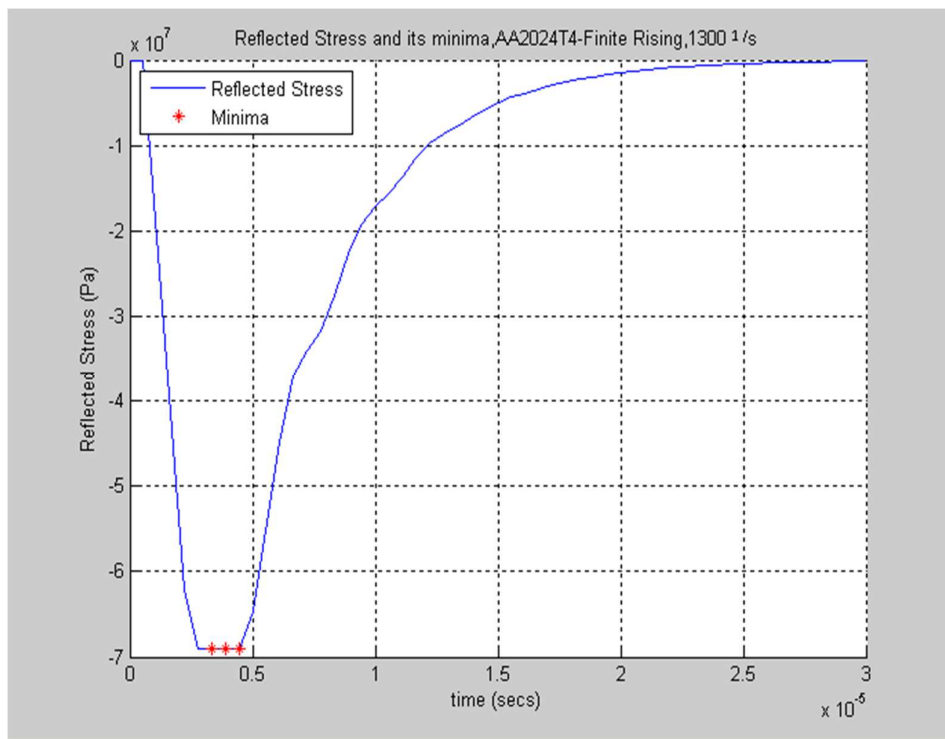


Σχήμα 5-10. Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση με τα αποτελέσματα από [25]

(1). Τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά



**Σχήμα 5-11.** Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25] (1)



**Σχήμα 5-12.** Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης (1). Υπάρχει μόνο ένα, ολικό, ελάχιστο ίδιο για ένα χρονικό plateau 3 περιόδων δειγματοληψίας

\_\_\_\_\_ Desired constant sample strain rate \_\_\_\_\_

Desired constant sample strain rate (1/s) 1300

\_\_\_\_\_ Sample characteristics \_\_\_\_\_

Sample Density kg/m<sup>3</sup> 2770

Sample Young's Modulus Pa 7.300000e+010

Sample Yield Strength Pa 310000000

Sample wave speed m/s 5.133594e+003

Sample diameter m 5.486868e-002

Sample length m 1.925098e-003

\_\_\_\_\_ Pressure bars characteristics \_\_\_\_\_

Pressure bars Density kg/m<sup>3</sup> 8000

Pressure bars Young's Modulus Pa 1.900000e+011

Pressure bars Yield Strength Pa 1990000000

Pressure bars wave speed m/s 4.873397e+003

Pressure bars diameter m 8.000000e-002

Pressure bars length m 1.600000e+000

Pressure bars L/D ratio 20

\_\_\_\_\_ GENERAL SETUP CHARACTERISTICS \_\_\_\_\_

TRANSMISSION COEFFICIENT a13 5.000000e-001

Striker bar velocity 2.502627e+000

Relative cross sectional area a 4.704019e-001

Relative mechanical impedance b 1.715729e-001

Wave transits through specimen 4

Striker Bar length 4.000000e-001

\_\_\_\_\_ Finite rise pulse - characteristics \_\_\_\_\_

Input pulse rising time secs 2.000000e-006

Input pulse Signal Length secs 3.000000e-005

\_\_\_\_\_ Simulation Characteristics Judgment \_\_\_\_\_

Max incident Stress Pa 9.757037e+007

Are Pressure bars able to handle this stress? 1

Transmission coefficient a23 4.095055e-001

Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? 0

Incident pulse duration secs 3.000000e-005

Max accepted incident pulse duration secs 1.641565e-004

Is Incident pulse between accepted time limits? 1

\_\_\_\_\_ SIMULATION VARIABLES \_\_\_\_\_

MAX INCIDENT STRESS (Pa) 9.757037e+007

MAX INCIDENT STRAIN (M/M) 5.135283e-004

GAIN1 6.226446e-001

GAIN2 8.030264e-001

GAIN3 7.071068e-001

GAIN4 7.071068e-001

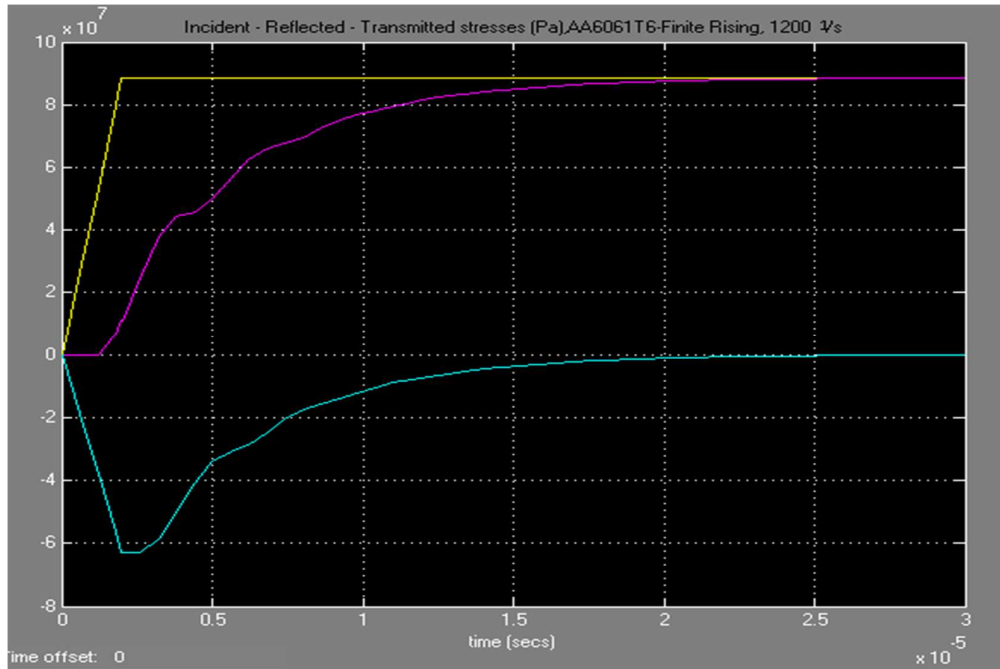
GAIN5 8.030264e-001

GAIN6 -7.071068e-001

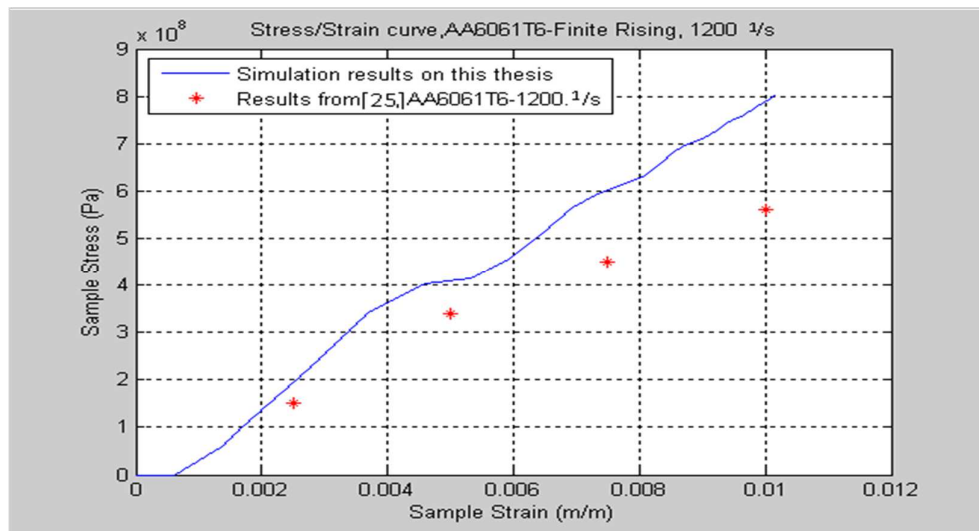


GAIN7 2.125842e+000  
 GAIN8 -2.664743e-005  
 DELAY1 1.500000e-006  
 DELAY2 1.500000e-006

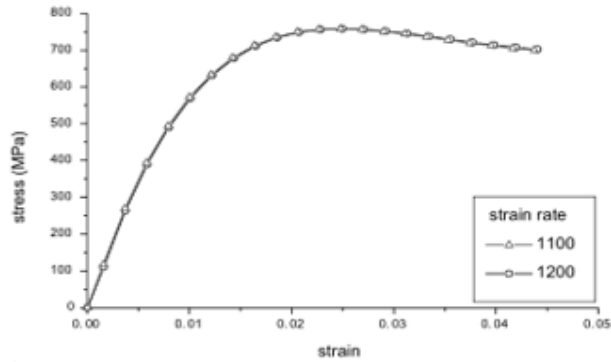
### 5.9.2 Αλουμίνιο 6061-T6, 1200 1/s



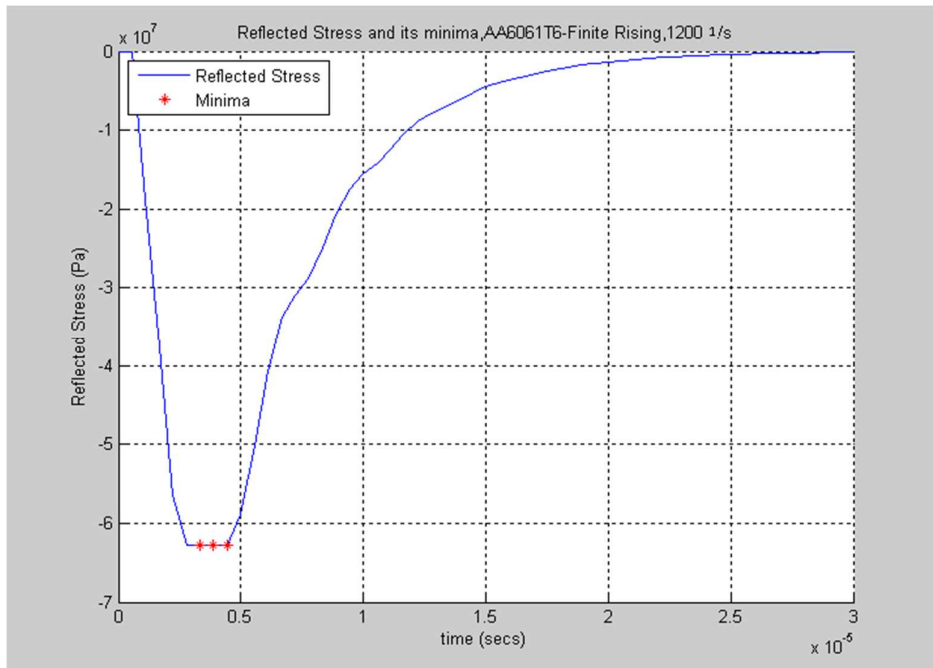
Σχήμα 5-13. Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις (2)



Σχήμα 5-14. Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση με τα αποτελέσματα από [25] (2). Τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά, αν και υπάρχει μικρή απόκλιση τιμών τάσης σε μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης, αυτή κινείται σε λογικά επίπεδα



**Σχήμα 5-15.** Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25] (2)



**Σχήμα 5-16.** Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης (2). Υπάρχει μόνο ένα, ολικό, ελάχιστο ίδιο για ένα χρονικό plateau 3 περιόδων δειγματοληψίας

\_\_\_\_\_ Desired constant sample strain rate \_\_\_\_\_

Desired constant sample strain rate (1/s) 1200

\_\_\_\_\_ Sample characteristics \_\_\_\_\_

Sample Density kg/m<sup>3</sup> 2700

Sample Young's Modulus Pa 6.900000e+010

Sample Yield Strength Pa 270000000

Sample wave speed m/s 5.055250e+003

Sample diameter m 5.600438e-002

Sample length m 1.895719e-003

\_\_\_\_\_Pressure bars characteristics\_\_\_\_\_

Pressure bars Density kg/m3 8000  
Pressure bars Young's Modulus Pa 1.900000e+011  
Pressure bars Yield Strength Pa 1990000000  
Pressure bars wave speed m/s 4.873397e+003  
Pressure bars diameter m 8.000000e-002  
Pressure bars length m 1.600000e+000  
Pressure bars L/D ratio 20

\_\_\_\_\_GENERAL SETUP CHARACTERISTICS\_\_\_\_\_

TRANSMISSION COEFFICIENT a13 5.000000e-001  
Striker bar velocity 2.274863e+000  
Relative cross sectional area a 4.900766e-001  
Relative mechanical impedance b 1.715729e-001  
Wave transits through specimen 4  
Striker Bar length 4.000000e-001

\_\_\_\_\_Finite rise pulse - characteristics\_\_\_\_\_

Input pulse rising time secs 2.000000e-006  
Input pulse Signal Length secs 3.000000e-005

\_\_\_\_\_Simulation Characteristics Judgment\_\_\_\_\_

Max incident Stress Pa 8.869047e+007  
Are Pressure bars able to handle this stress? 1  
Transmission coefficient a23 4.430932e-001  
Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? 0  
Incident pulse duration secs 3.000000e-005  
Max accepted incident pulse duration secs 1.641565e-004  
Is Incident pulse between accepted time limits? 1

\_\_\_\_\_SIMULATION VARIABLES\_\_\_\_\_

MAX INCIDENT STRESS (Pa) 8.869047e+007  
MAX INCIDENT STRAIN (M/M) 4.667920e-004  
GAIN1 5.976478e-001  
GAIN2 8.366131e-001  
GAIN3 7.071068e-001  
GAIN4 7.071068e-001  
GAIN5 8.366131e-001  
GAIN6 -7.071068e-001

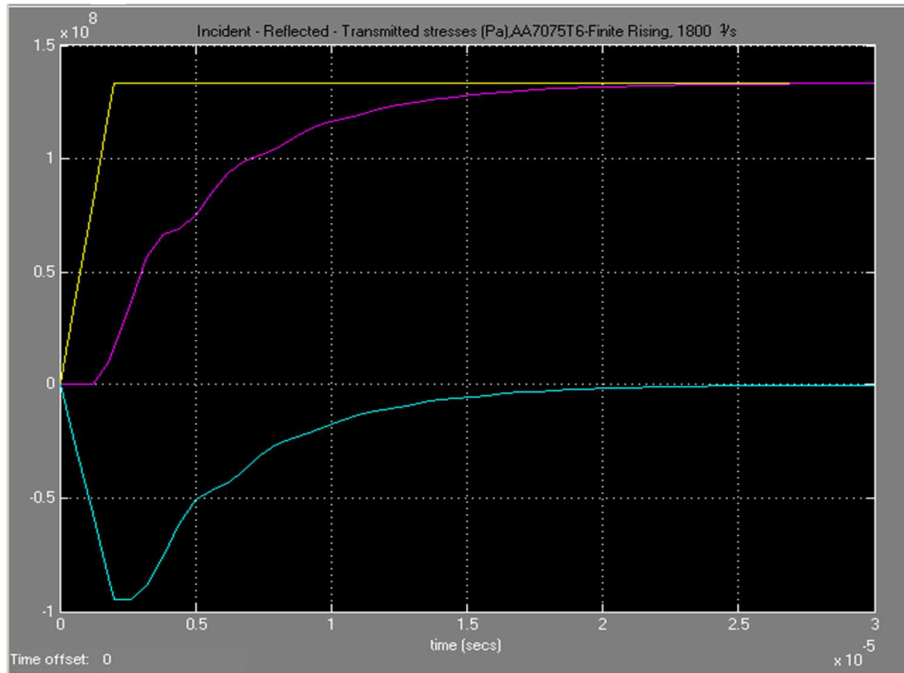
GAIN7 2.040497e+000

GAIN8 -2.706040e-005

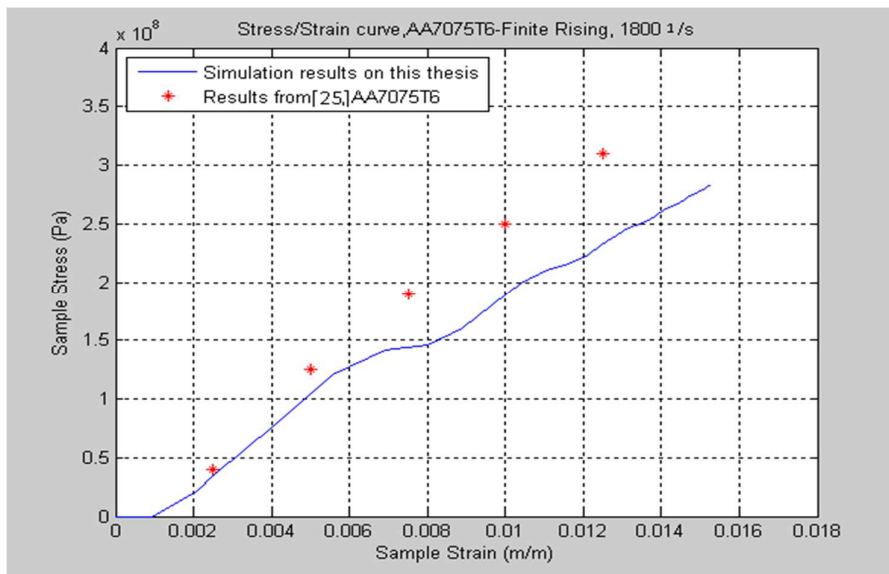
DELAY1 1.500000e-006

DELAY2 1.500000e-006

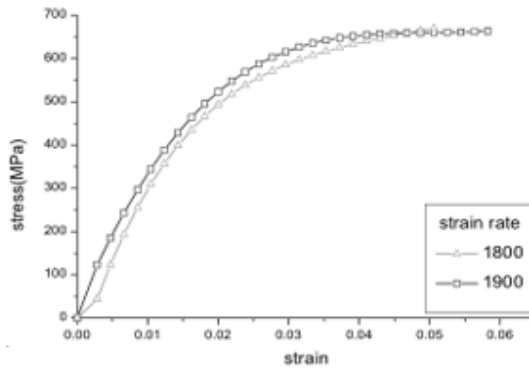
### 5.9.3 Αλουμίνιο 7075-T6, 1800 1/s



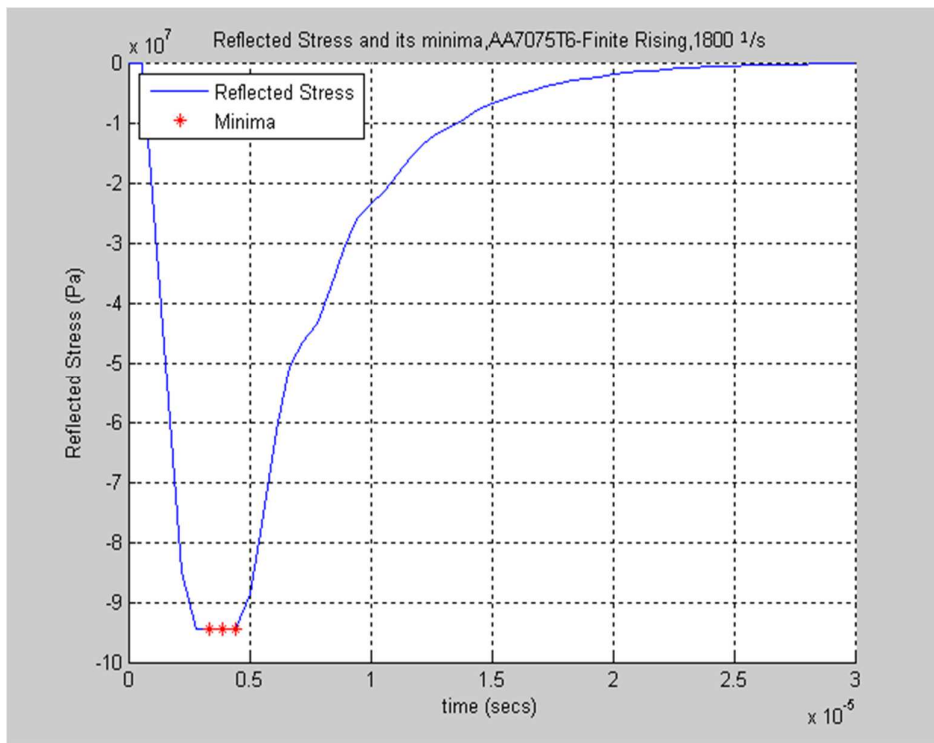
Σχήμα 5-17 Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις (3)



Σχήμα 5-18 Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση με τα αποτελέσματα από [25] (3). Αρκετά κοντά με τα αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων



**Σχήμα 5-19.** Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης από πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25] (3)



**Σχήμα 5-20.** Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης (3). Υπάρχει μόνο ένα, ολικό, ελάχιστο, ίδιο για ένα χρονικό plateau 3 περιόδων δειγματοληψίας

\_\_\_\_\_ Desired constant sample strain rate \_\_\_\_\_

Desired constant sample strain rate (1/s) 1800

\_\_\_\_\_ Sample characteristics \_\_\_\_\_

Sample Density kg/m<sup>3</sup> 2800

Sample Young's Modulus Pa 7.200000e+010

Sample Yield Strength Pa 510000000

Sample wave speed m/s 5.070926e+003

Sample diameter m 5.491014e-002

Sample length m 1.901597e-003

\_\_\_\_\_Pressure bars characteristics\_\_\_\_\_

Pressure bars Density kg/m<sup>3</sup> 8000

Pressure bars Young's Modulus Pa 1.900000e+011

Pressure bars Yield Strength Pa 1990000000

Pressure bars wave speed m/s 4.873397e+003

Pressure bars diameter m 8.000000e-002

Pressure bars length m 1.600000e+000

Pressure bars L/D ratio 20

\_\_\_\_\_GENERAL SETUP CHARACTERISTICS\_\_\_\_\_

TRANSMISSION COEFFICIENT a13 5.000000e-001

Striker bar velocity 3.422875e+000

Relative cross sectional area a 4.711131e-001

Relative mechanical impedance b 1.715729e-001

Wave transits through specimen 4

Striker Bar length 4.000000e-001

\_\_\_\_\_Finite rise pulse - characteristics\_\_\_\_\_

Input pulse rising time secs 2.000000e-006

Input pulse Signal Length secs 3.000000e-005

\_\_\_\_\_Simulation Characteristics Judgment\_\_\_\_\_

Max incident Stress Pa 1.334482e+008

Are Pressure bars able to handle this stress? 1

Transmission coefficient a23 4.106982e-001

Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? 0

Incident pulse duration secs 3.000000e-005

Max accepted incident pulse duration secs 1.641565e-004

Is Incident pulse between accepted time limits? 1

\_\_\_\_\_SIMULATION VARIABLES\_\_\_\_\_

MAX INCIDENT STRESS (Pa) 1.334482e+008

MAX INCIDENT STRAIN (M/M) 7.023591e-004

GAIN1 6.217047e-001

GAIN2 8.042403e-001

GAIN3 7.071068e-001

GAIN4 7.071068e-001

GAIN5 8.042403e-001

GAIN6 -7.071068e-001

GAIN7 2.122633e+000

GAIN8 -2.697675e-005

DELAY1 1.500000e-006

DELAY2 1.500000e-006

### 5.9.4 Παρατηρήσεις απόδοσης της σχεδίασης

Λαμβάνοντας και τα συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης, και συγκρίνοντας τα με τα αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων [25], άμεσα διαπιστώνεται η γενικώς καλή προσέγγιση των τελικών διαγραμμάτων τάσης/παραμόρφωσης με αυτά από τις μετρήσεις με πραγματική συσκευή. Η διαδικασία προσομοίωσης τείνει να αποκλίνει από τις πραγματικές τιμές τάσης, όσο αυξάνει η παραμόρφωση, πλην όμως οι αποκλίσεις αυτές δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Αυτό τουλάχιστον ισχύει, όπως αναμενόταν, για τις τάσεις έως και το όριο ελαστικότητας του υλικού.

Ο κυριότερος λόγος της υποεκτίμησης των τάσεων στο σύστημα που σχεδιάστηκε εδώ, είναι κυρίως η λογική αδυναμία του προσομοιωτικού μοντέλο στο να ακολουθήσει τη συμπεριφορά του υλικού στη μη γραμμική συμπεριφορά του, πέραν του ορίου ελαστικότητας του. Επίσης, η προσέγγιση αρχικής ταχύτητας, μέγιστης Incident τιμής πίεσης (μέγιστης πίεσης δείγματος) που χρησιμοποιήθηκε [11]

$$\max(\varepsilon_s) = 2\dot{\varepsilon}_s \frac{L_{striker\_bar}}{C_{pressure\_bar}} \quad (5-13)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{V_{striker}}{L_{sample}} \quad (5-14)$$

και από αυτά

$$\frac{2C_0}{L} \max(\varepsilon_T) = \frac{2C_{pressure\_bar}}{L_{sample}} \frac{1}{2} \max(\varepsilon_I) = \frac{d\varepsilon_s}{dt} \quad (5-15)$$

$$\max(\varepsilon_I) = -2 \max(\varepsilon_R) \quad (5-16)$$

Στο [11], αναφέρεται ακριβώς ότι αν και οι εξισώσεις (5-13),(5-14) αποτελούν μια καλή αρχική εκτίμηση σχεδίασης, τείνει σε υποεκτίμηση των πραγματικών τιμών ταχύτητας κρούσης, σε αρκετές περιπτώσεις. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να διορθωθεί, σε επίπεδο

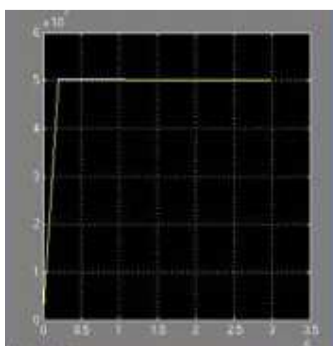
κατασκευής πια, με τη χρήση των αισθητήρων φωτοδιόδων και strain gages, της εξακρίβωσης των πραγματικών τιμών ταχύτητας και πίεσης δείγματος και την επιτόπια αλλαγή των χαρακτηριστικών σχεδίασης, όπως για παράδειγμα του πραγματικά απαιτούμενου μήκους ράβδου Κρούστη.

Αυτό που αναμένεται λοιπόν σε αυτό το στάδιο, με τη σχεδίαση που προέκυψε, είναι μια συσκευή που θα λειτουργεί αρκετά καλά στη περίπτωση των μαλακών και μεσαίων μετάλλων, θα έχει υποεκτίμηση των τιμών πίεσης στη περίπτωση των σκληρότερων μετάλλων. Η απόκλιση αυτή έχει να κάνει εγγενώς με τη προσέγγιση [11] ταχυτήτων κρούσης, πιέσεων δείγματος που χρησιμοποιήθηκε, και μπορεί να βελτιωθεί επιτόπου σε επίπεδο πια κατασκευής πραγματικής συσκευής. Παράλληλα, σε δοκιμαστικές προσομοιώσεις που έγιναν με βάση σκληρότερα υλικά, διαπιστώθηκε μια τάση υποεκτίμησης των πραγματικών τιμών πίεσης στο τελικό διάγραμμα πίεσης καταπόνησης. Συνεπώς, σε αυτό που τελικώς καταλήγουμε, είναι ότι η διαδικασία, όπως αρχικώς έχει οριστεί στην εργασία αυτή, είναι καταλληλότερη για σχεδιασμό για δείγματα μετάλλων έως και μεσαίας σκληρότητας.

## **5.10 Προσομοίωση λειτουργίας και πραγματική είσοδος**

### **5.10.1 Διαδικασία προσέγγισης πραγματικής λειτουργίας και αντιμετώπισης του φαινομένου της διασποράς**

Η σχεδίαση έγινε με υπόδειγμα εισόδου πίεσης Incident, το τέλειο τετραγωνικό παλμό, πλην της ανόδου του, όπου αυτή είναι ευθεία πεπερασμένου, μη μηδενικού χρόνου.

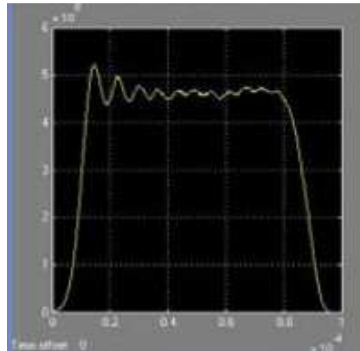


**Σχήμα 5-21.** Πεπερασμένος χρονικά παλμός με πεπερασμένο χρόνο ανόδου και μορφής ανόδου ευθεία

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφ. 4, τούτο έγινε λόγω του ότι αυτού του τύπου η είσοδος είναι πολύ πιο συγκεκριμένα καθορισμένη, εμφανίζει πολύ καλή και την εγγύτερα σε μια πραγματικού τύπου είσοδο συμπεριφορά ως προς την ομοιομορφία κατανομής παραμόρφωσης δείγματος και γι' αυτή τη συμπεριφορά υπάρχει αρκετή πληροφορία [8],



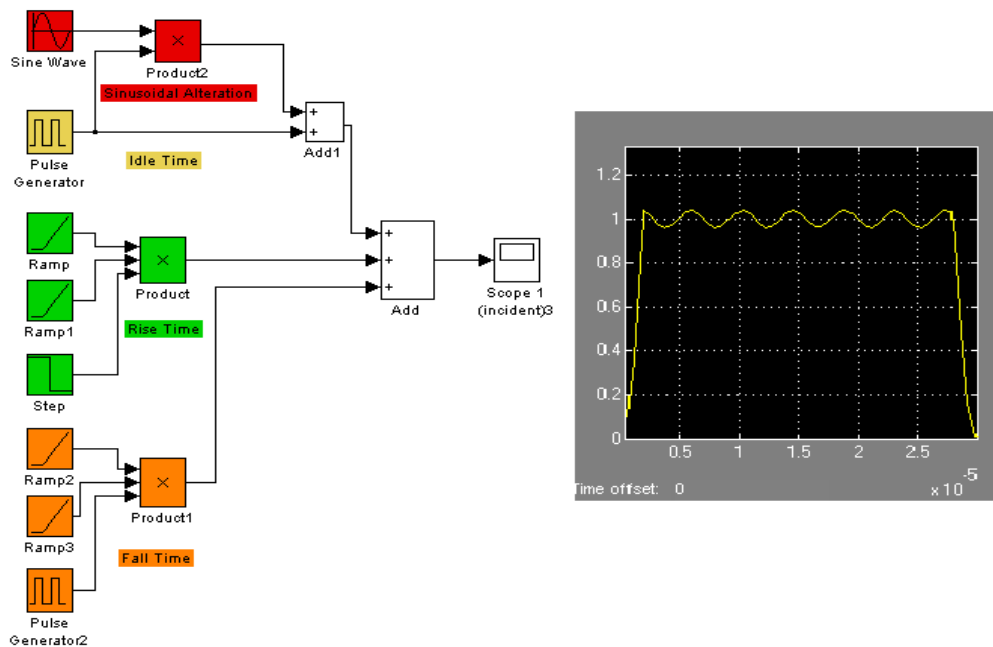
ούτως ώστε εύκολα να μοντελοποιηθεί και να εισαχθεί στο μοντέλο προσομοίωσης. Σε μια πραγματική μέτρηση όμως, μετά την κρούση, η μορφή του Incident κύματος πίεσης λαμβάνει τη μορφή, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



**Σχήμα 5-22.** Πραγματικός παλμός πίεσης εισόδου [9]

Δηλαδή, και η άνοδος και η κάθοδος του παλμού είναι πεπερασμένου και μη μηδενικού χρόνου, δεν έχουν μορφή ευθεία αλλά πολυωνυμική μορφή, ενώ η περιοχή ηρεμίας αλλοιώνεται από ημιτονοειδής ταλαντώσεις, λόγω του φαινομένου της διασποράς.

Όπως παρουσιάστηκε πάλι στο κεφ. 4, μια λύση προσέγγισης του σήματος αυτού θα ήταν ένα σήμα με μορφή ανόδου και καθόδου πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού και πρόσθεση πεπερασμένου αριθμού ημιτόνων στη περιοχή ηρεμίας του.



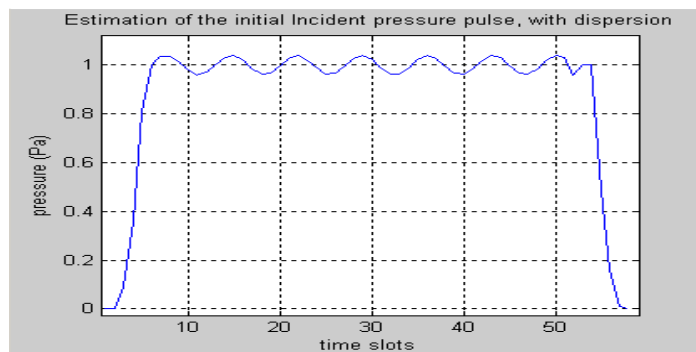
**Σχήμα 5-23.** Προσέγγιση πραγματικής εισόδου στο Simulink, με ένα ημίτονο αλλοίωσης

Σε αυτή τη φάση λοιπόν, εκτελείται η ίδια διαδικασία προσομοίωσης όπως πριν, στα ίδια τρία δείγματα υλικών, με τους ίδιους επιθυμητούς ρυθμούς μεταβολής παραμόρφωσης. Αυτή τη φορά, η είσοδος Incident είναι της μορφής του σχήματος (5-23), με χρόνο ανόδου/καθόδου 2μs, συνολική διάρκεια του παλμού 30μs, συχνότητα ημιτόνου διασποράς  $1/(0.00005e-6)$  rad/sec, μέτρο ημιτόνου το 4% της μέγιστης πίεσης Incident), με ένα ημίτονο ταλάντωσης να προσεγγίζει τη διασπορά. Τα αποτελέσματα (τάσεις Incident, Reflected, Transmitted) διορθώνονται ως προς την επίδραση της διασποράς, με εποπτική αφαίρεση της συχνότητας που προκαλεί την αλλοίωση στα σήματα, στο πεδίο του μετασχηματισμού Fourier, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, από αποτελέσματα προσομοίωσης με προσέγγιση του ίδιου σήματος εισόδου, χωρίς την επίδραση του ημιτόνου. Ο τρόπος υπολογισμού των διάφορων μεταβλητών που απαιτούνται δεν αλλάζει, παρά μόνο στη περίπτωση των απαιτούμενων κυματικών διαβάσεων από το δείγμα έως την επίτευξη ομοιόμορφης καταπόνησης, που τίθενται εξ' αρχής  $n = 3$  [11], δηλαδή η τιμή που προσεγγίζεται σε πραγματική μέτρηση με είσοδο όπως στο σχήμα (5-22). Κατόπιν, πάλι συγκρίνονται τα αποτελέσματα με διαγράμματα τάσης/παραμόρφωσης με τις ίδιες πραγματικές μετρήσεις συμπίεσης [25].

### 5.10.2 Αλγόριθμος διόρθωσης της διασποράς

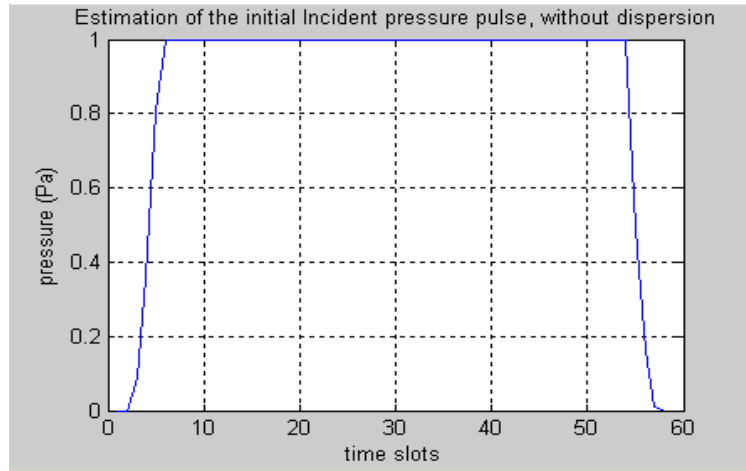
Στη παρούσα εργασία, εφόσον δεν προβλεπόταν η κατασκευή πρωτοτύπου δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί η πρακτική διαδικασία εξακρίβωσης των ιδιοτήτων των ράβδων πίεσεως [2] που προτείνεται στη παράγραφο 4.8. Αντί αυτού, η εξακρίβωση των συχνοτήτων αλλοίωσης του σήματος και η συνολική διαδικασία διόρθωσης της διασποράς, η οποία υλοποιήθηκε μέσω προτεινόμενου εποπτικού αλγορίθμου στο λογισμικό Matlab/Simulink, γίνεται ως εξής

- 1) Προσεγγίζεται ο αρχικός παλμός πίεσης  $f_1$ , με διασπορά, με παλμό όμοιο αυτού του σχήματος 5.31, δηλαδή με ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού η άνοδος του, ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> η κάθοδος, και ένα (ή περισσότερα) ημίτονα που ταλαντώνονται γύρω από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές της διασποράς.



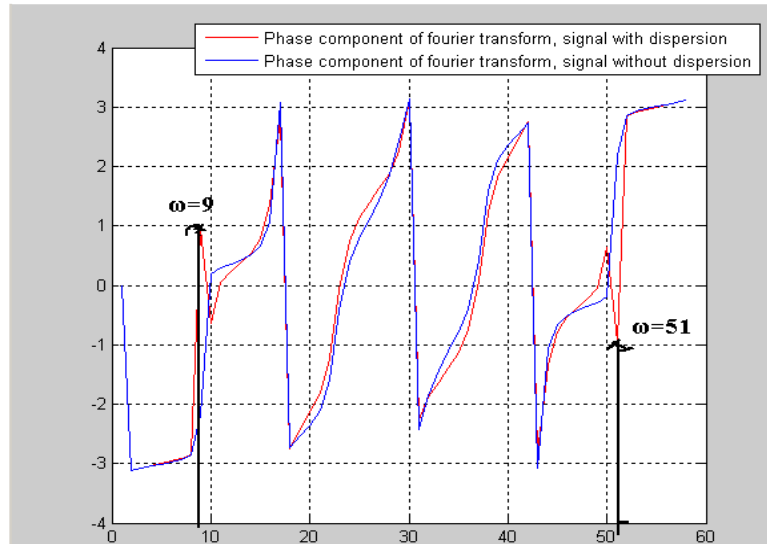
**Σχήμα 5-24.** Προσέγγιση πραγματικής εισόδου με διασπορά, ένα ημίτονο αλλοίωσης, συνάρτηση  $f_1$

- 2) Γίνεται η υπόθεση ότι ο παλμός incident  $f_2$ , χωρίς τη διασπορά, δεν είναι τίποτα άλλο από τον παλμό  $f_1$  όπου στην ενδιάμεση περιοχή (περιοχή ηρεμίας του παλμού) μεταξύ του τέλους της ανόδου του και της αρχής της καθόδου, η τιμές του είναι σε μια ευθεία που ενώνει το τέλος της ανόδου του με την αρχή της καθόδου. Στην ειδική περίπτωση που οριστεί τέλος της ανόδου ίδιας τιμής πίεσης με την τιμή πίεσης στην αρχή της καθόδου, προφανώς όλες οι ενδιάμεσες τιμές θα είναι ίσες, στον άξονα συμμετρίας των ταλαντευόμενων ημιτόνων



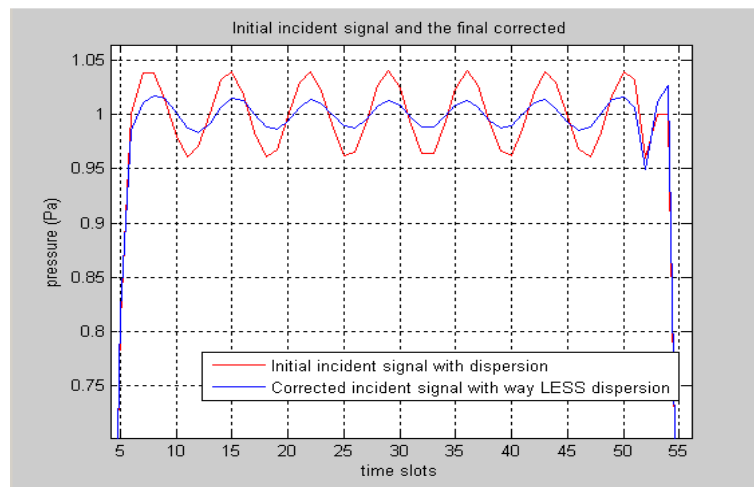
**Σχήμα 5-25.** Αρχική υπόθεση για τη μορφή του σήματος χωρίς τη διασπορά, συνάρτηση  $f_2$

- 3) Υπολογίζονται οι μετασχηματισμοί Fourier των  $f_1, f_2$ , (συνάρτηση `fft` του Matlab) ως  $F_1, F_2$
- 4) Απομονώνεται το κομμάτι της φάσης των  $F_1, F_2$  (συνάρτηση `angle` του Matlab)  $F_1\_phase$  και  $F_2\_phase$ .
- 5) Τα αποτελέσματα  $F_1\_phase, F_2\_phase$  αντιπαραβάλλονται μεταξύ τους και εποπτεύονται. Σκοπός είναι να βρεθούν έντονα σημεία διαφορών στη φάση των δύο, τύπου κρουστικών παλμών, τα οποία υποδηλώνουν συγκεκριμένες τιμές φάσεις όπου τα δύο σήματα έχουν μεγάλες διαφορές. Από την ελάχιστη τέτοια τιμή φάσης που θα βρεθεί και πέρα, όλες οι τιμές συχνότητας του  $F_1$  αποκόπτονται



**Σχήμα 5-26.** Αντιπαραβολή των φάσεων F1(κόκκινο) και F2(μπλε), εύρεση κρουστικών (μαύρο)

Υπολογίζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του αλλαγμένου F1. Το αποτέλεσμα είναι ένα νέο σήμα με πολύ λιγότερη διασπορά.



**Σχήμα 5-27.** Το αρχικό σήμα f1 με διασπορά (κόκκινο) και η τελική διορθωμένη μορφή (μπλε). Η ελάττωση της διασποράς είναι σημαντική

- 6) Υπολογίζονται η τάση, η παραμόρφωση και ο ρυθμός μεταβολής μηχανικής παραμόρφωσης από τη διορθωμένη Incident πίεση, με προσομοίωση μέσω του μοντέλου Simulink που και εξάγεται το διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης.

Στη παρούσα εργασία, η διαδικασία έγινε με μια συχνότητα αλλοίωσης, ο κώδικας Matlab/Simulink μπορεί ν' αλλάξει εύκολα και να προστεθούν περισσότερες. Η διαδικασία

αυτή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και γενικά σαν αλγόριθμος διόρθωσης διασποράς σε μια πραγματική μέτρηση. Στη περίπτωση αυτή όμως, θα πρέπει ο ερευνητής να προσεγγίσει, από μέτρηση μέσω των αισθητήρων, την μορφή του Incident κύματος πίεσης, με μια συνάρτηση όπως αυτή του σχήματος (5-23), θέτοντας κριτήρια για το πόσο ικανοποιητική είναι η προσέγγιση αυτή, και μετά να εκτελέσει τη διαδικασία διόρθωσης και υπολογισμών τάσης/παραμόρφωσης δείγματος, μέσω Matlab και του μοντέλου Simulink που υλοποιήθηκε στην εργασία. Το θέμα αυτό, δεν αναλύθηκε περαιτέρω στην εργασία αυτή, και αποτελεί ένα πεδίο προς μελλοντική έρευνα.

## 5.11 Αποτελέσματα προσομοίωσης, προσέγγιση πραγματικής εισόδου

Ο υπολογισμός των παραμέτρων προσομοίωσης (διαστάσεις δείγματος,  $\beta$ , μέγιστη τιμή πίεσης Incident) έδωσε τα αποτελέσματα

**Πίνακας 5-7.** Δεδομένα διαστάσεων δείγματος και εισόδου πίεσης Incident, δοκιμές με τη προσέγγιση πραγματικής εισόδου

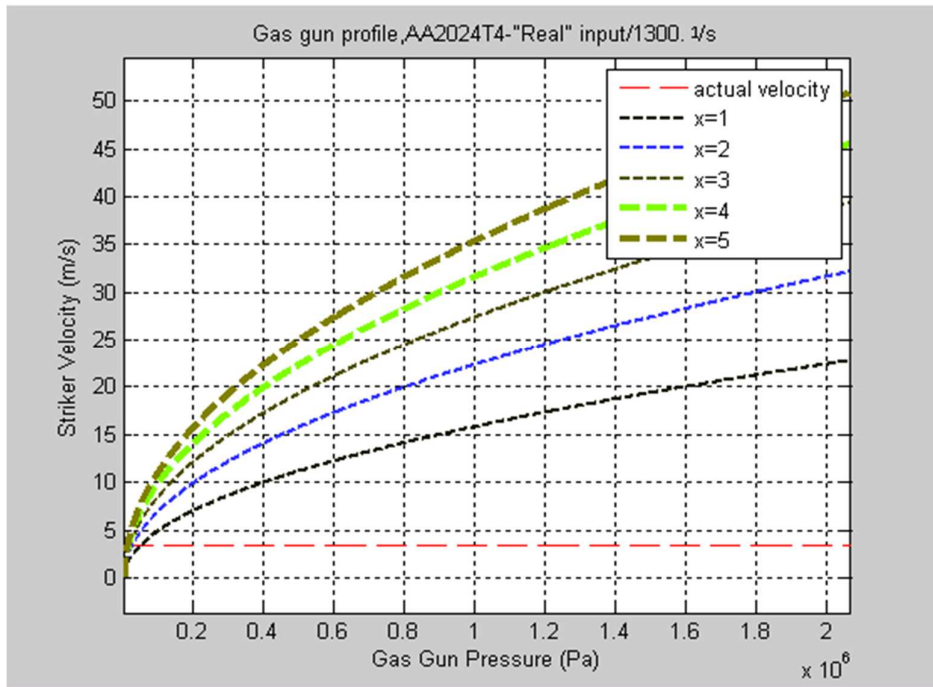
Δείγμα	$d\epsilon/dt$ (1/s)	Dsample (cm)	B	n	Lsample (mm)	max( $\sigma_i$ ) (MPa)
AA 2024-T4	1300	5.4868	0.1715	3	2.5667	130.09
AA 6061-T6	1200	5.6004	0.1715	3	2.5276	118.254
AA 7075-T6	1800	5.491	0.1715	3	2.5354	177.93

Ενώ οι ταχύτητες του gas gun τότε βρέθηκαν

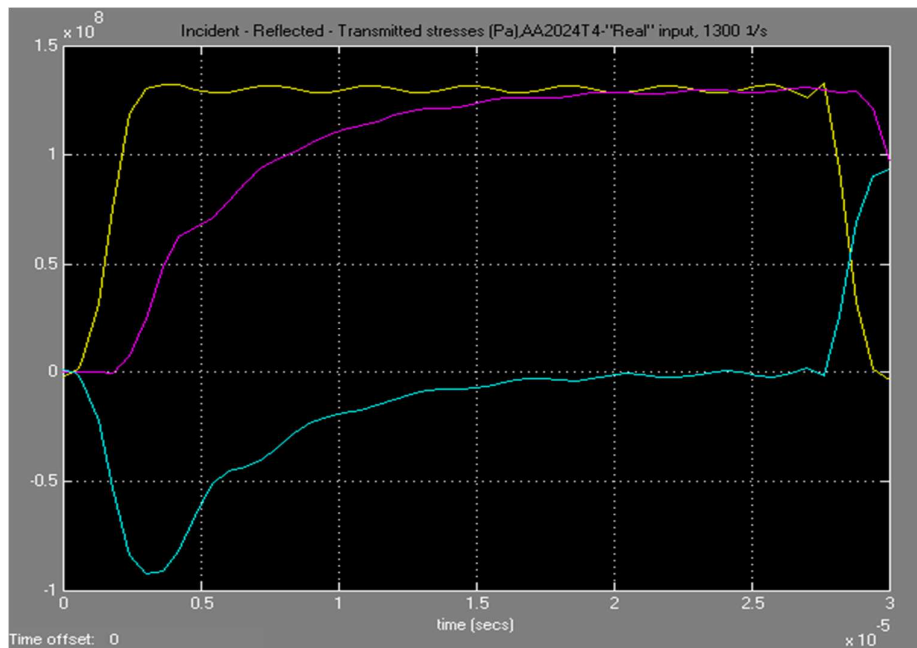
**Πίνακας 5-8.** Ταχύτητες κρούσης, δοκιμές με τη προσέγγιση πραγματικής εισόδου

Δείγμα	$d\epsilon/dt$ (1/s)	Vstriker (m/s)
AA 2024-T4	1300	3.33
AA 6061-T6	1200	3.033
AA7075-T6	1800	4.5638

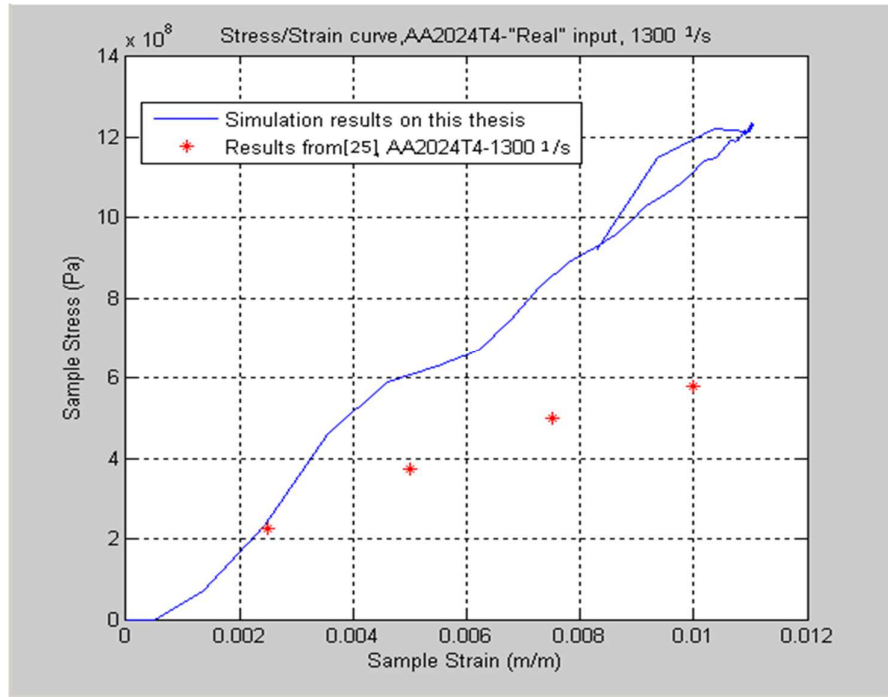
### 5.11.1 Αλουμίνιο 2024-T4, 1300 1/s



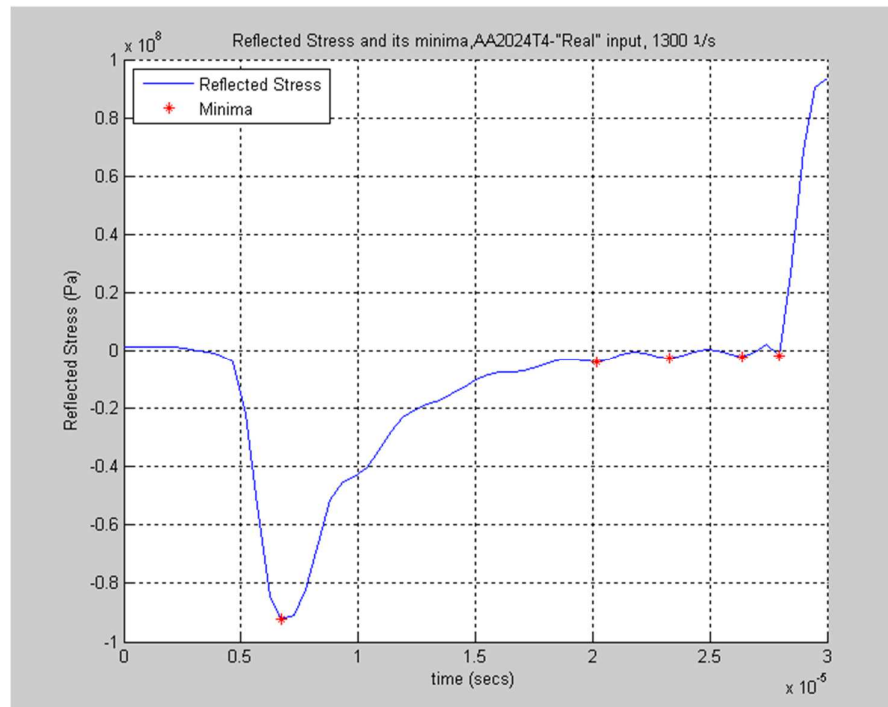
**Σχήμα 5-28.** Προφίλ λειτουργίας gas gun – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1), η σχεδιαστική επιλογή  $x=2$  επαρκεί για λειτουργία εντός του ορίου πίεσης, ταχύτητα κρούσης 3.33 m/s



**Σχήμα 5-29.** Incident, Reflected και Transmitted παραμόρφώσεις – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1)



**Σχήμα 5-30.** Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση αυτού με τα αποτελέσματα από [25] – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1)



**Σχήμα 5-31.** Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (1). Υπάρχει ένα, ολικό, ελάχιστο και τέσσερα τοπικά.

\_\_\_\_\_ Desired constant sample strain rate \_\_\_\_\_

Desired constant sample strain rate (1/s) 1300

\_\_\_\_\_ Sample characteristics \_\_\_\_\_

Sample Density kg/m<sup>3</sup> 2770

Sample Young's Modulus Pa 7.300000e+010

Sample Yield Strength Pa 310000000

Sample wave speed m/s 5.133594e+003

Sample diameter m 5.486868e-002

Sample length m 2.566797e-003

\_\_\_\_\_ Pressure bars characteristics \_\_\_\_\_

Pressure bars Density kg/m<sup>3</sup> 8000

Pressure bars Young's Modulus Pa 1.900000e+011

Pressure bars Yield Strength Pa 1990000000

Pressure bars wave speed m/s 4.873397e+003

Pressure bars diameter m 8.000000e-002

Pressure bars length m 1.600000e+000

Pressure bars L/D ratio 20

\_\_\_\_\_ GENERAL SETUP CHARACTERISTICS \_\_\_\_\_

TRANSMISSION COEFFICIENT a13 5.000000e-001

Striker bar velocity 3.336836e+000

Relative cross sectional area a 4.704019e-001

Relative mechanical impedance b 1.715729e-001

Wave transits through specimen 3

Striker Bar length 4.000000e-001

\_\_\_\_\_ Finite rise pulse - characteristics \_\_\_\_\_

Input pulse rising time secs 2.000000e-006

Input pulse Signal Length secs 3.000000e-005

\_\_\_\_\_ Simulation Characteristics Judgment \_\_\_\_\_

Max incident Stress Pa 1.300938e+008

Are Pressure bars able to handle this stress? 1

Transmission coefficient a23 4.095055e-001

Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? 0

Incident pulse duration secs 3.000000e-005

Max accepted incident pulse duration secs 1.641565e-004

Is Incident pulse between accepted time limits? 1

\_\_\_\_\_ SIMULATION VARIABLES \_\_\_\_\_

MAX INCIDENT STRESS (Pa) 1.300938e+008



MAX INCIDENT STRAIN (M/M) 6.847044e-004

GAIN1 6.226446e-001

GAIN2 8.030264e-001

GAIN3 7.071068e-001

GAIN4 7.071068e-001

GAIN5 8.030264e-001

GAIN6 -7.071068e-001

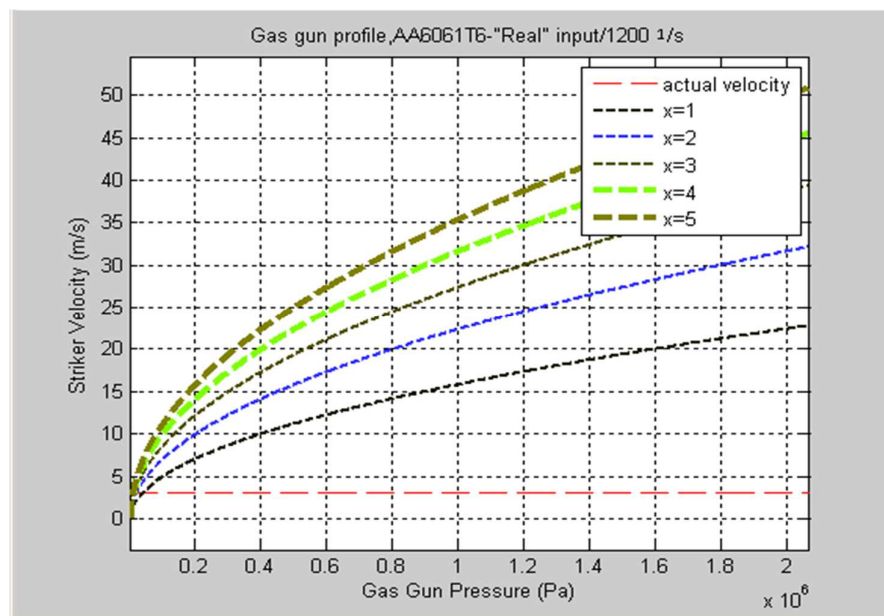
GAIN7 2.125842e+000

GAIN8 -1.998558e-005

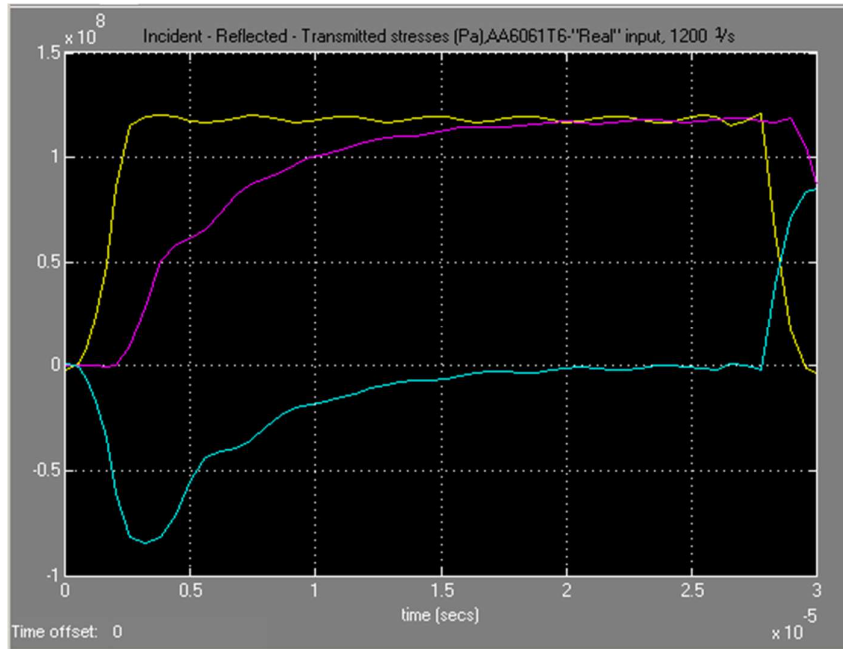
DELAY1 1.500000e-006

DELAY2 1.500000e-006

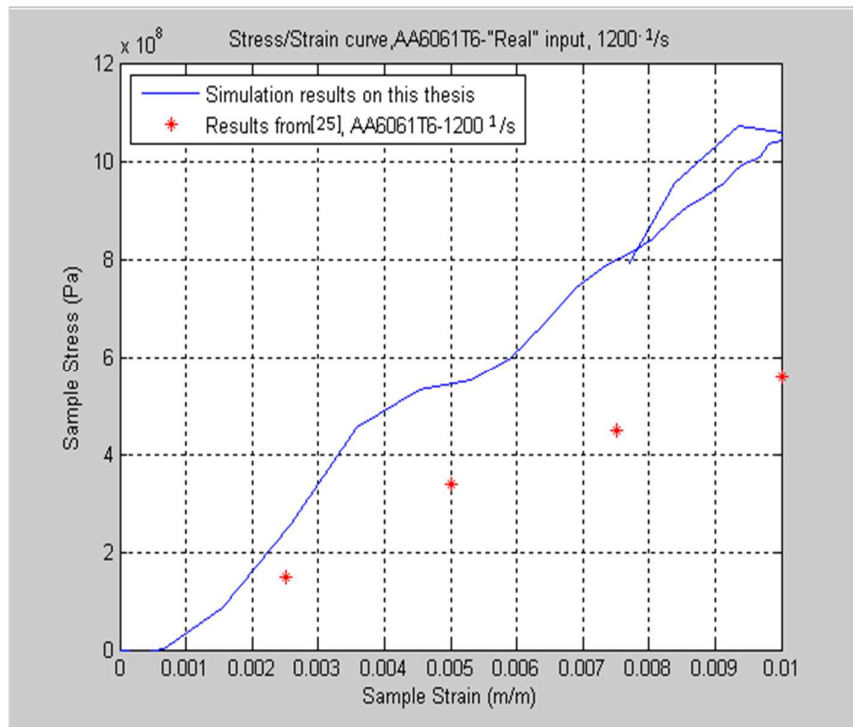
### 5.11.2 Αλουμίνιο 6061-T6, 1200 1/s



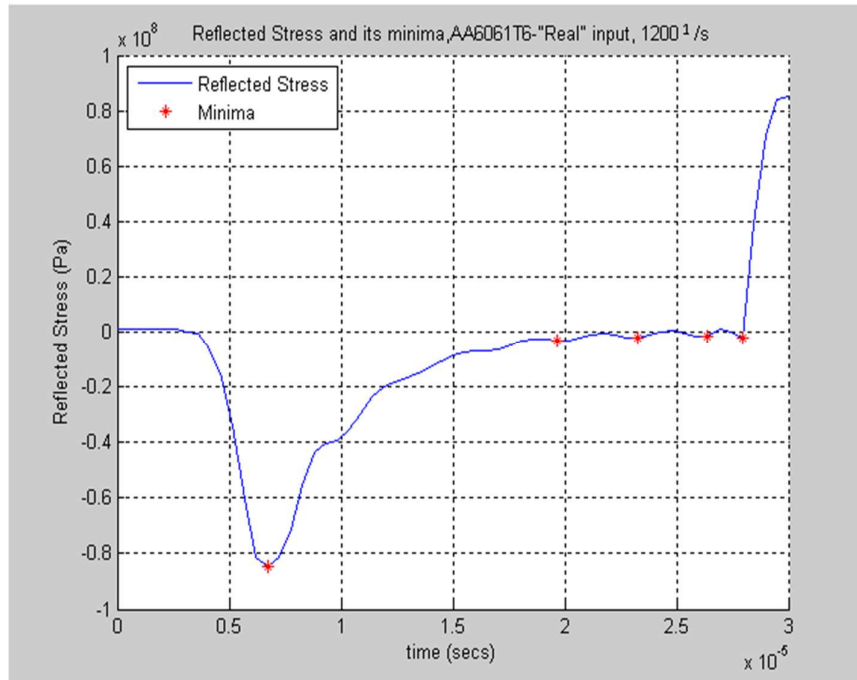
**Σχήμα 5-32.** Προφίλ λειτουργίας gas gun – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2), η σχεδιαστική επιλογή  $x=2$  επαρκεί για λειτουργία εντός του ορίου πίεσης, ταχύτητα κρούσης 3.033 m/s



**Σχήμα 5-33.** Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις– προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2)



**Σχήμα 5-34.** Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση αυτού με τα αποτελέσματα από [25] – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2).



**Σχήμα 5-35.** Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης– προσέγγιση πραγματικής εισόδου (2). Υπάρχει ένα, ολικό, ελάχιστο και τέσσερα τοπικά.

\_\_\_\_\_ Desired constant sample strain rate \_\_\_\_\_

Desired constant sample strain rate (1/s) 1200

\_\_\_\_\_ Sample characteristics \_\_\_\_\_

Sample Density kg/m<sup>3</sup> 2700

Sample Young's Modulus Pa 6.900000e+010

Sample Yield Strength Pa 270000000

Sample wave speed m/s 5.055250e+003

Sample diameter m 5.600438e-002

Sample length m 2.527625e-003

\_\_\_\_\_ Pressure bars characteristics \_\_\_\_\_

Pressure bars Density kg/m<sup>3</sup> 8000

Pressure bars Young's Modulus Pa 1.900000e+011

Pressure bars Yield Strength Pa 1990000000

Pressure bars wave speed m/s 4.873397e+003

Pressure bars diameter m 8.000000e-002

Pressure bars length m 1.600000e+000

Pressure bars L/D ratio 20

\_\_\_\_\_ GENERAL SETUP CHARACTERISTICS \_\_\_\_\_

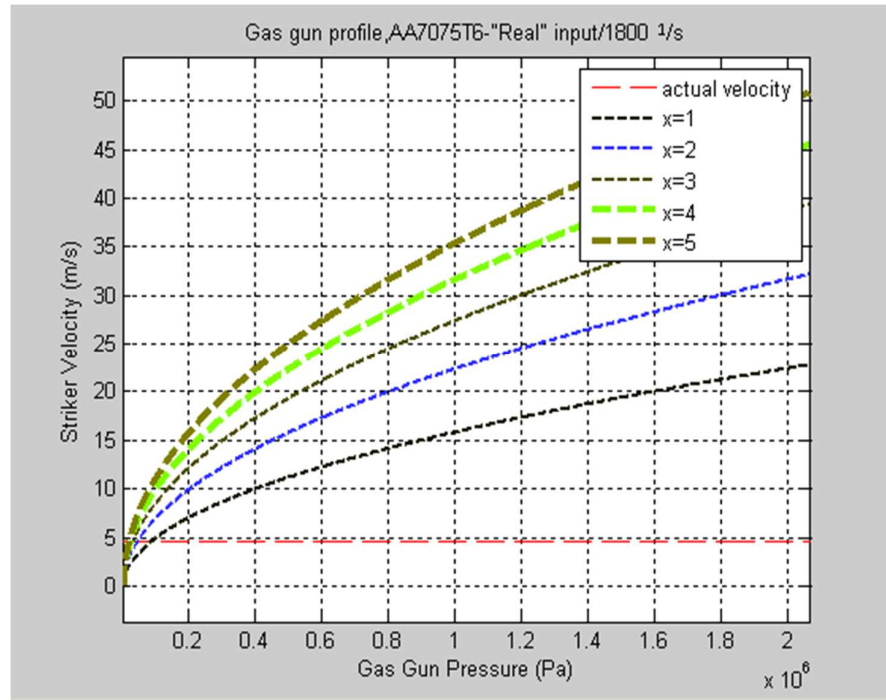
TRANSMISSION COEFFICIENT a13 5.000000e-001

Striker bar velocity 3.033150e+000  
Relative cross sectional area a 4.900766e-001  
Relative mechanical impedance b 1.715729e-001  
Wave transits through specimen 3  
Striker Bar length 4.000000e-001  
\_\_\_\_\_ Finite rise pulse - characteristics \_\_\_\_\_  
Input pulse rising time secs 2.000000e-006  
Input pulse Signal Length secs 3.000000e-005  
\_\_\_\_\_ Simulation Characteristics Judgment \_\_\_\_\_  
Max incident Stress Pa 1.182540e+008  
Are Pressure bars able to handle this stress? 1  
Transmission coefficient a23 4.430932e-001  
Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? 0  
Incident pulse duration secs 3.000000e-005  
Max accepted incident pulse duration secs 1.641565e-004  
Is Incident pulse between accepted time limits? 1

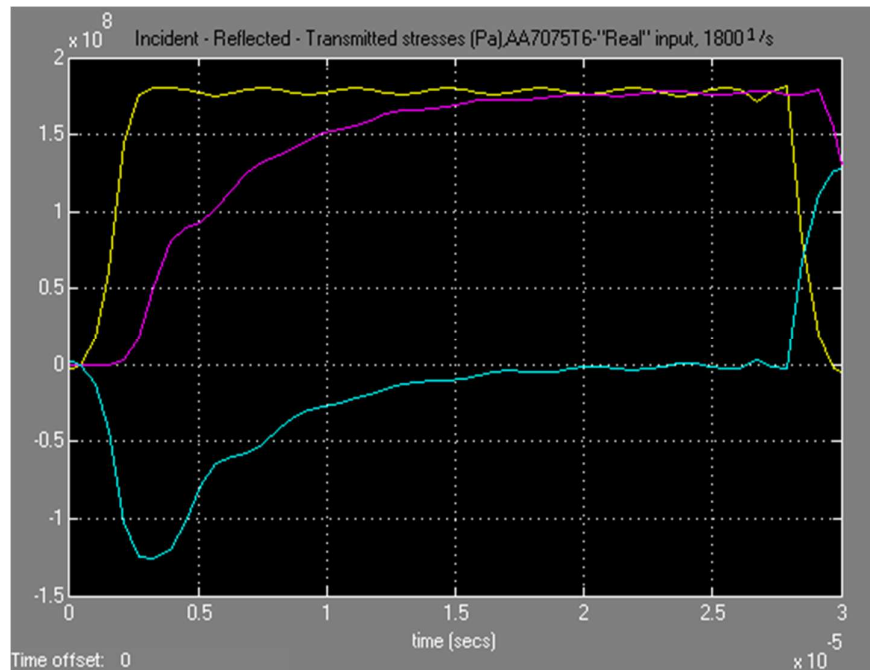
\_\_\_\_\_ SIMULATION VARIABLES \_\_\_\_\_

MAX INCIDENT STRESS (Pa) 1.182540e+008  
MAX INCIDENT STRAIN (M/M) 6.223893e-004  
GAIN1 5.976478e-001  
GAIN2 8.366131e-001  
GAIN3 7.071068e-001  
GAIN4 7.071068e-001  
GAIN5 8.366131e-001  
GAIN6 -7.071068e-001  
GAIN7 2.040497e+000  
GAIN8 -2.029530e-005  
DELAY1 1.500000e-006  
DELAY2 1.500000e-006

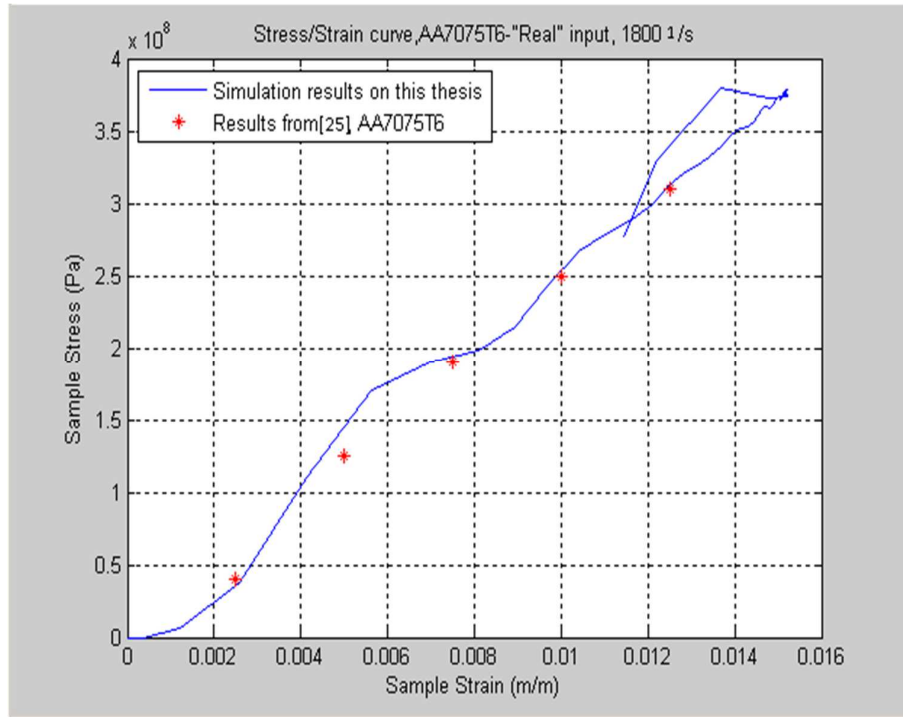
### 5.11.3 Αλουμνιο 7075-T6, 1800 1/s



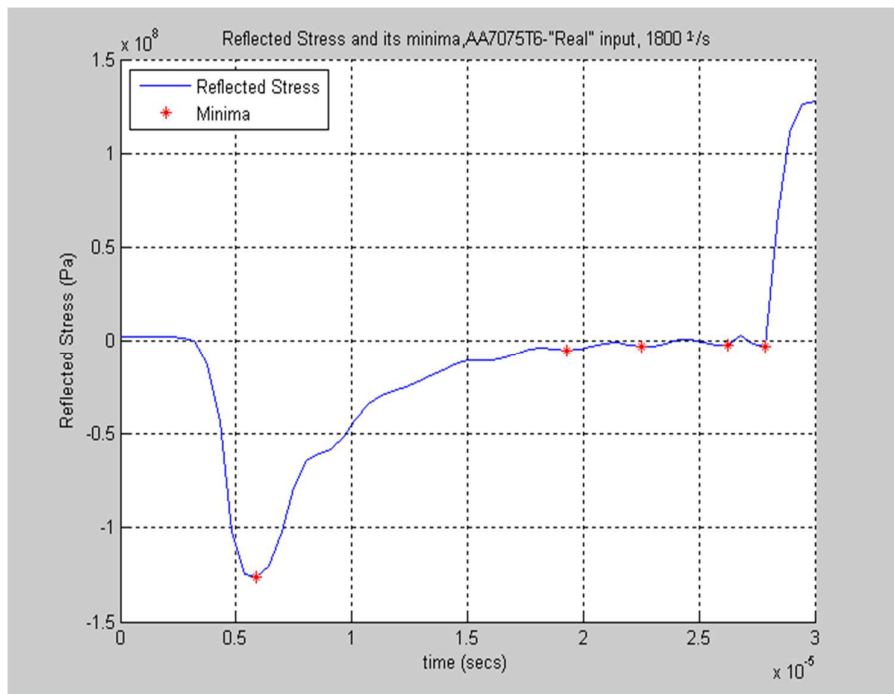
**Σχήμα 5-36.** Προφίλ λειτουργίας gas gun– προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3), η σχεδιαστική επιλογή  $x=2$  επαρκεί για λειτουργία εντός του ορίου πίεσης, ταχύτητα κρούσης 3.5638 m/s



**Σχήμα 5-37.** Incident, Reflected και Transmitted παραμορφώσεις– προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3)



**Σχήμα 5-38.** Διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης και σύγκριση αυτού με τα αποτελέσματα από [25] – προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3)



**Σχήμα 5-39.** Εύρεση ελαχίστων στη τάση ανάκλασης– προσέγγιση πραγματικής εισόδου (3). Υπάρχει ένα, ολικό, ελάχιστο και τέσσερα τοπικά.

\_\_\_\_\_ Desired constant sample strain rate \_\_\_\_\_

Desired constant sample strain rate (1/s) 1800

\_\_\_\_\_ Sample characteristics \_\_\_\_\_

Sample Density kg/m<sup>3</sup> 2800

Sample Young's Modulus Pa 7.200000e+010

Sample Yield Strength Pa 510000000

Sample wave speed m/s 5.070926e+003

Sample diameter m 5.491014e-002

Sample length m 2.535463e-003

\_\_\_\_\_ Pressure bars characteristics \_\_\_\_\_

Pressure bars Density kg/m<sup>3</sup> 8000

Pressure bars Young's Modulus Pa 1.900000e+011

Pressure bars Yield Strength Pa 1990000000

Pressure bars wave speed m/s 4.873397e+003

Pressure bars diameter m 8.000000e-002

Pressure bars length m 1.600000e+000

Pressure bars L/D ratio 20

\_\_\_\_\_ GENERAL SETUP CHARACTERISTICS \_\_\_\_\_

TRANSMISSION COEFFICIENT a13 5.000000e-001

Striker bar velocity 4.563833e+000

Relative cross sectional area a 4.711131e-001

Relative mechanical impedance b 1.715729e-001

Wave transits through specimen 3

Striker Bar length 4.000000e-001

\_\_\_\_\_ Finite rise pulse - characteristics \_\_\_\_\_

Input pulse rising time secs 2.000000e-006

Input pulse Signal Length secs 3.000000e-005

\_\_\_\_\_ Simulation Characteristics Judgment \_\_\_\_\_

Max incident Stress Pa 1.779310e+008

Are Pressure bars able to handle this stress? 1

Transmission coefficient a23 4.106982e-001

Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? 0

Incident pulse duration secs 3.000000e-005

Max accepted incident pulse duration secs 1.641565e-004

Is Incident pulse between accepted time limits? 1

\_\_\_\_\_ SIMULATION VARIABLES \_\_\_\_\_

MAX INCIDENT STRESS (Pa) 1.779310e+008

MAX INCIDENT STRAIN (M/M) 9.364788e-004

GAIN1 6.217047e-001

GAIN2 8.042403e-001

GAIN3 7.071068e-001

GAIN4 7.071068e-001

GAIN5 8.042403e-001

GAIN6 -7.071068e-001

GAIN7 2.122633e+000

GAIN8 -2.023257e-005

DELAY1 1.500000e-006

DELAY2 1.500000e-006

#### **5.11.4 Παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων με την προσέγγιση πραγματικής εισόδου**

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, κινούνται σε λογικά πλαίσια τιμών και συμπεριφοράς. Υπάρχει μια μετακίνηση σε υψηλότερες τιμές πίεσης με χρήση της προσέγγισης πραγματικής εισόδου, πράγμα αναμενόμενο, κυρίως με τη προσθήκη διασποράς, την οποία ο προτεινόμενος από εμάς εποπτικός αλγόριθμος μειώνει, αλλά δεν εξαλείφει εντελώς.

### **5.12 Υλοποίηση μετρητικού προγράμματος**

Επιπλέον, υλοποιήθηκε σε γλώσσα C++ μετρητικό πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων πραγματικής συσκευής. Στην εργασία αυτή, δεν έγινε κατασκευή πρωτοτύπου, οπότε το πρόγραμμα αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στην κυρίως σχεδίαση. Υλοποιήθηκε όμως ως επιπλέον βοήθημα στο μελλοντικό ερευνητή που θα θελήσει να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Οι προσεγγιστικοί τύποι υπολογισμού τάσης και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται σε ανάλογο, παλαιότερο πρόγραμμα [14], υλοποιημένο σε FORTRAN IV.

#### **5.12.1 Περιγραφή λειτουργίας**

1) Ο χρήστης πρέπει να αποθηκεύσει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες strain gage ως

e2.txt, μετρήσεις Reflected Strain

e3.txt, μετρήσεις Transmitted Strain

και ως

e1.txt, μετρήσεις Incident Strain στην είσοδο. Τα αρχεία αυτά θα πρέπει να περιέχουν τιμές, χωρισμένες μεταξύ τους με χαρακτήρα space ή new line.

2) Ο χρήστης θα πρέπει να αποθηκεύσει ένα ακόμα αρχείο



profile.txt, το οποίο θα περιέχει, πάλι μόνο αριθμούς χωρισμένους με χαρακτήρα space ή new line, τις τιμές κατά σειρά των

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) E του υλικού κατασκευής των ράβδων πίεσεως
- Ταχύτητα διάδοσης κύματος C στις ράβδους πίεσης
- Πυκνότητα υλικού ράβδων πίεσεως ρ
- Μήκος δείγματος L
- Σχετική δια τομεακή περιοχή α, δείγματος σε σχέση με ράβδους πίεσης
- Χρονοθυρίδα μετρήσεων Δt, ο χρόνος δειγματοληψίας στις παραπάνω μετρήσεις

$$\Delta t = \frac{\text{Total\_Simulation\_Time}}{\text{Number\_of\_Readings\_from\_Sensor} - 1} \quad (5.17)$$

3) Από τα παραπάνω, το πρόγραμμα υπολογίζει

- Τις τιμές τάσης (Incident, Reflected, Transmitted) ως  $\sigma(n\Delta t) = E\varepsilon(n\Delta t)$  (5.18)
- Υπολογίζει τάση δείγματος ως

$$\sigma_{\text{sample}}(n\Delta t) = \frac{\sigma_{\text{Incident}}(n\Delta t) - \sigma_{\text{Reflected}}(n\Delta t) + \sigma_{\text{Transmitted}}(n\Delta t)}{2\alpha} \quad (5.19)$$

- Υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα ως

$$\dot{\varepsilon}_s(n\Delta t) = \frac{\sigma_{\text{Incident}}(n\Delta t) + \sigma_{\text{Reflected}}(n\Delta t) - \sigma_{\text{Transmitted}}(n\Delta t)}{\rho_{\text{Pressure\_Bar}} * C_{\text{Pressure\_Bar}} * L_{\text{Sample}}} \quad (5.20)$$

- Υπολογίζει τη παραμόρφωση στο δείγμα, προσεγγίζοντας το ολοκλήρωμα του ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης ως

$$\varepsilon_s(n\Delta t) = \int_0^{n\Delta t} \dot{\varepsilon}_s(t) dt \approx \Delta t \sum \dot{\varepsilon}_s(n\Delta t) \quad (5.21)$$

- 4) Αποθηκεύει τα αποτελέσματα πίσω σε αρχεία txt, ίδιας μορφής με τα προηγούμενα stress.txt, οι τιμές τάσης στο δείγμα  
strain.txt, οι τιμές παραμόρφωσης στο δείγμα  
strainrate.txt, οι τιμές του ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης στο δείγμα

Το πρόγραμμα αυτό υπόκειται σε δύο περιορισμούς λειτουργίας. Ο ένας είναι ότι υποθέτει

$$\Delta t \rightarrow 0 \quad (5.22)$$

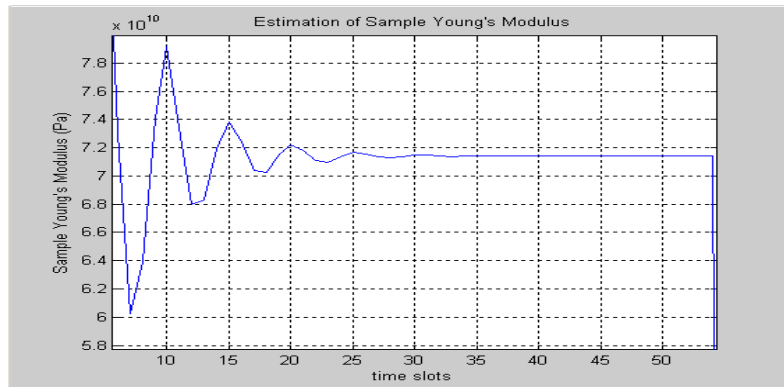
δηλαδή ένα, φυσιολογικά για τέτοιου είδους μετρήσεις, υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας των δεδομένων από τους αισθητήρες strain gages. Και αυτό, ούτως ώστε η παραπάνω προσέγγιση της τιμής καταπόνησης δείγματος, δηλαδή του ολοκληρώματος του ρυθμού μεταβολής καταπόνησης δείγματος, μέσω αθροίσματος Riemann να ισχύει. Ο δεύτερος περιορισμός είναι ότι οι πράξεις στο πρόγραμμα γίνονται με χρήση πινάκων πεπερασμένου αριθμού στοιχείων, συγκεκριμένα 100 στοιχείων. Συνεπώς, το πρόγραμμα δεν μπορεί να επεξεργαστεί μετρήσεις (Incident, Transmitted, Reflected) άνω των 100 χρονικών καταγραφών από τους αισθητήρες.

### 5.12.2 Παράδειγμα χρήσης

Ως έλεγχο της λειτουργίας του μετρητικού προγράμματος, υλοποιήθηκε η εξής διαδικασία

- 1) Δεδομένα Incident stress, Transmitted stress, Reflected stress πάρθηκαν από μία εκ των δοκιμαστικών προσομοιώσεων, που δε συμπεριλήφθηκε στα κυρίως αποτελέσματα λόγω ελλειπών στοιχείων για τους ρυθμούς μεταβολής παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν στη μέτρηση με πραγματική συσκευή, αν και τα δικά μας αποτελέσματα ήταν και αυτά κοντά στα αποτελέσματα των συγγραφέων [26], συγκεκριμένα για AA6082-T6, για επιθυμητό ρυθμό καταπόνησης δείγματος 2500 1/s
- 2) Αυτά περάστηκαν στο μετρητικό πρόγραμμα και υπολογίστηκε από αυτό η τάση και η παραμόρφωση δείγματος
- 3) Μέσω Matlab διαιρέθηκε η κάθε τιμή τάσης προς την αντίστοιχη της τιμή παραμόρφωσης

Το αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω γράφημα



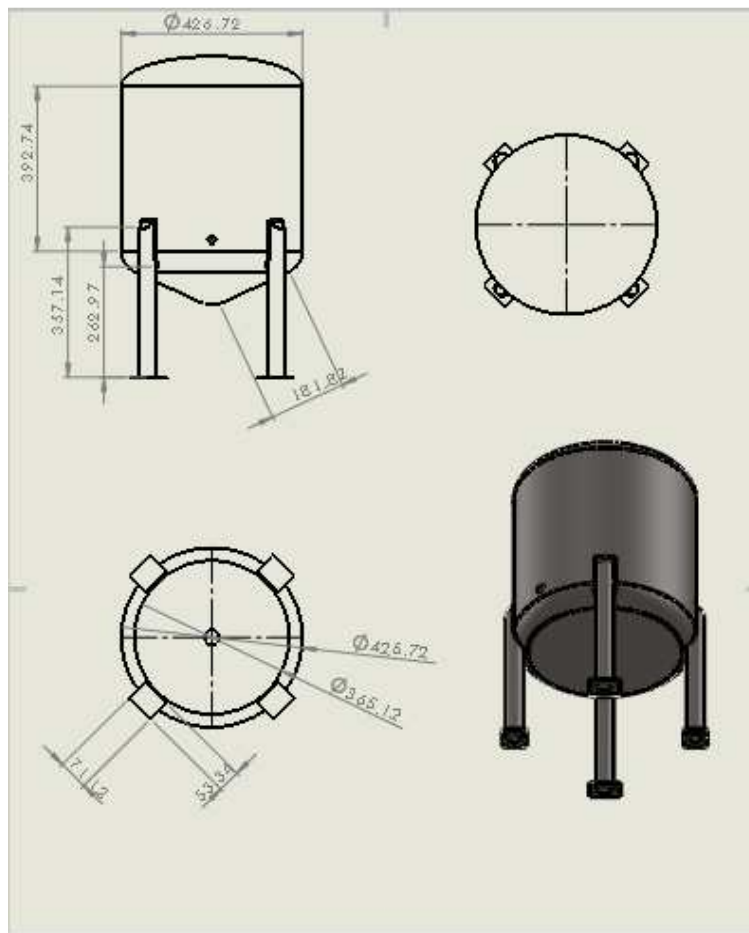
**Σχήμα 5-40.** Προσέγγιση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας δείγματος, παράδειγμα επίδειξης χρήσης του μετρητικού προγράμματος σε C++

Αν εξαιρεθούν οι πρώτες τιμές του παραπάνω γραφήματος που εμφανίζουν απότομες μεταβολές, κυρίως λόγω του ότι, ακόμα, δεν έχει επέλθει ομοιομορφία κατανομής παραμόρφωσης δείγματος στους χρόνους αυτούς, παρατηρείται ότι το γράφημα ηρεμεί τελικά κοντά σε μια σταθερή τιμή. Η τιμή αυτή θα πρέπει να είναι, περίπου, ίση με την πραγματική τιμή του μέτρου ελαστικότητας του δείγματος, που στη περίπτωση του AA6082-T6 είναι 71 GPa. Πράγματι, η τιμή ηρεμίας του γραφήματος είναι πολύ κοντά σ' αυτό, γύρω στο 71.5 GPa.

## 6 Τρισδιάστατη CAD απεικόνιση της συσκευής

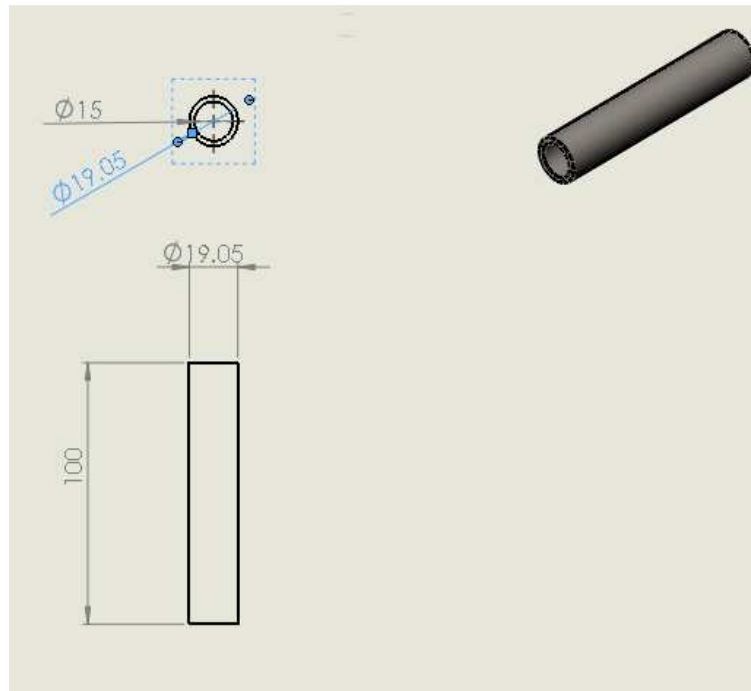
Έχοντας παρθεί οι βασικές επιλογές σχεδίασης, στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται το σχέδιο CAD, το οποίο έγινε στο λογισμικό Solidworks. Η σχεδίαση στηρίχθηκε στα αποτελέσματα των υπολογισμών του προηγούμενου κεφαλαίου και για τα υπόλοιπα, αναλογικά, δεδομένα σε πρότερη συσκευή, της οποίας η διαδικασία κατασκευής παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία [14]. Συγκεκριμένα, διακρίθηκαν και σχεδιάστηκαν τα έξι τμήματα (οι διαστάσεις των σχεδίων είναι σε χιλιοστά του μέτρου)

- 1) Δεξαμενή αερίου, χρησιμοποιήθηκε, ενδεικτικά, έτοιμη δεξαμενή από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος solidworks

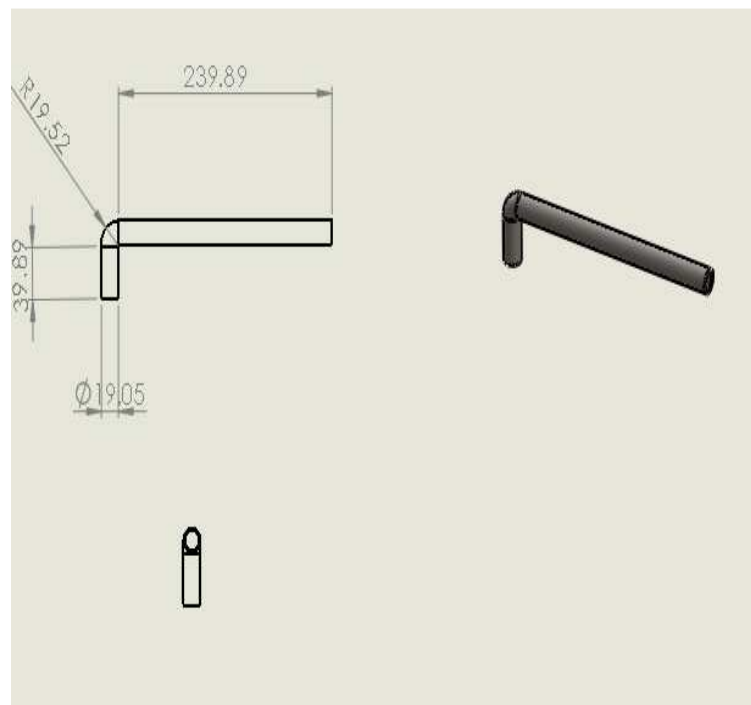


Σχήμα 6-1. Δεξαμενή αερίου

- 2) Σωληνώσεις απαγωγής αέρα, από τη δεξαμενή αερίου στο μηχανισμό εκτόξευσης, μεταξύ αυτών παρεμβάλλεται στρόφιγγα απελευθέρωσης αέρα

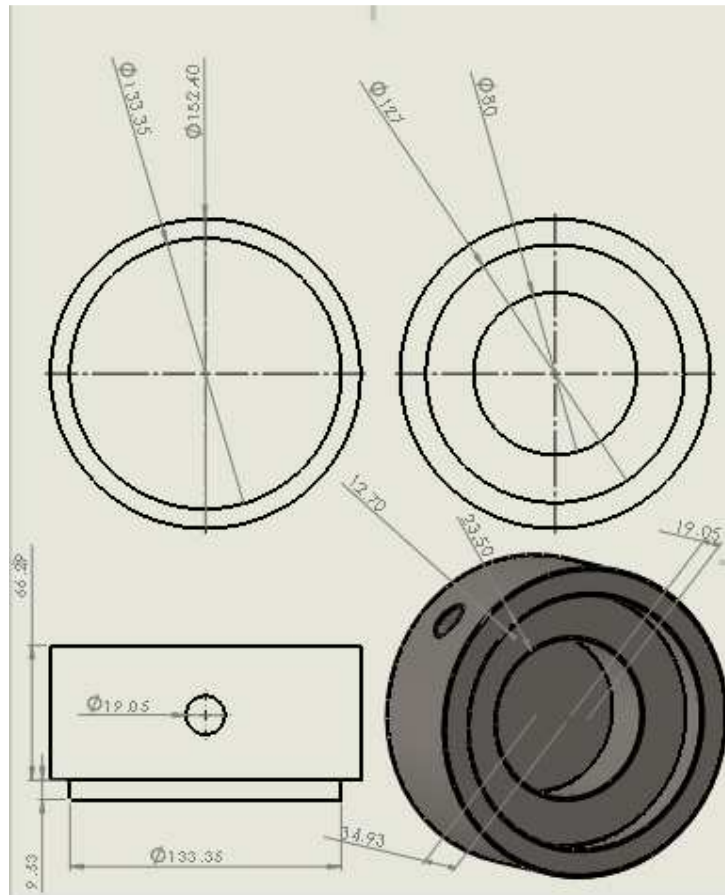


**Σχήμα 6-2.** Σωληνώση απαγωγής αέρα Α



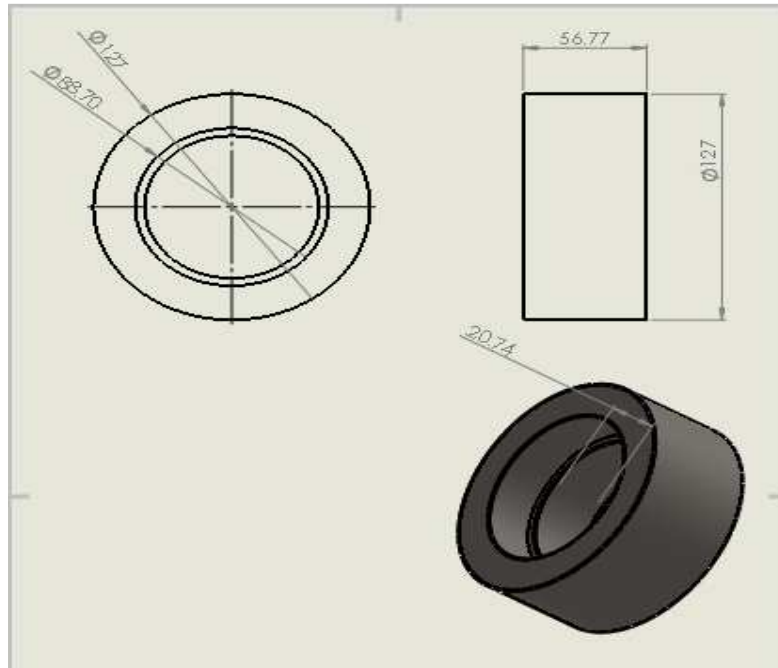
**Σχήμα 6-3.** Σωληνώση απαγωγής αέρα Β

- 3) Κυρίως μηχανισμός εκτόξευσης, αυτός αποτελείται από τρία τμήματα. Το πρώτο, είναι η κεφαλή του μηχανισμού, στο εσωτερικό της οποίας υπάρχει αποσβεστήρας από τεφλόν, ο οποίος αποτρέπει τη τριβή της, μεταλλικής, ράβδου Striker, με το, επίσης μεταλλικό, τοίχωμα του μηχανισμού εκτόξευσης. Στο άνω μέρος του, συνδέεται ο σωλήνας απαγωγής αέρα Β.



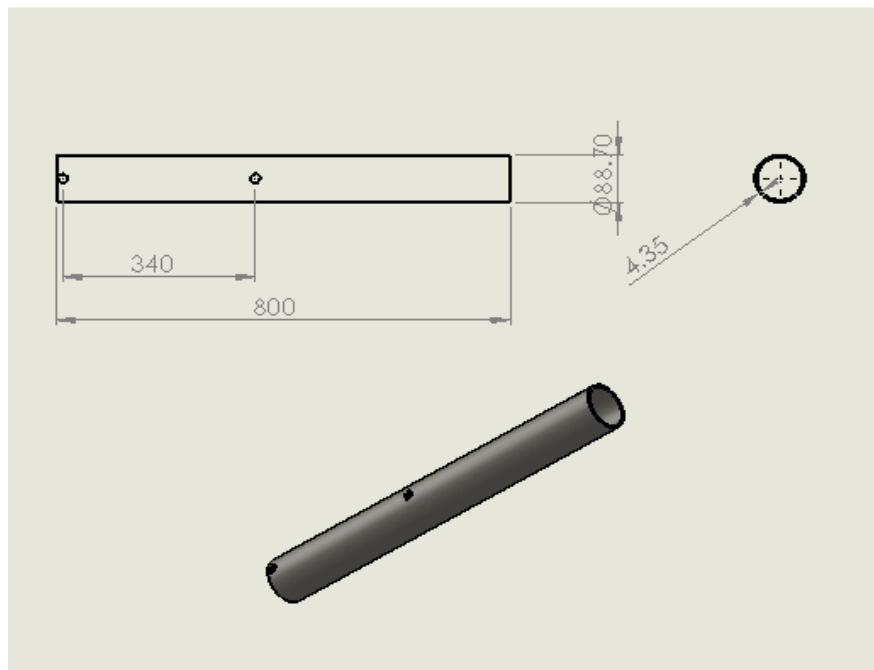
**Σχήμα 6-4.** Κεφαλή μηχανισμού εκτόξευσης

Το δεύτερο τμήμα, επιτελεί το ρόλο της συναρμολόγησης μεταξύ της κεφαλής και του επόμενου τμήματος του μηχανισμού, του σωλήνα εκτόξευσης



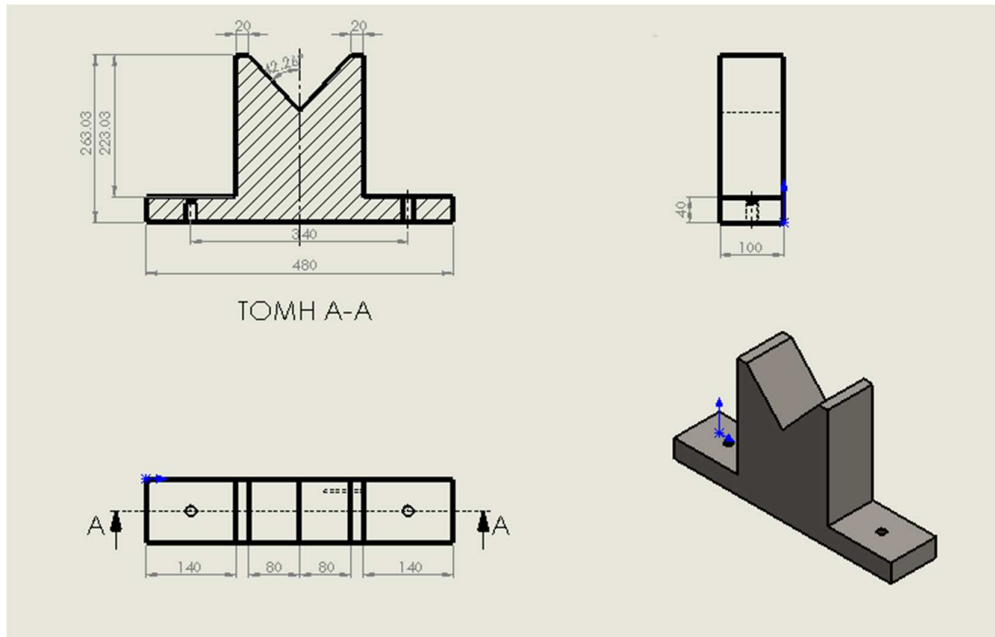
**Σχήμα 6-5.** Ενδιάμεσο συναρμολόγησης μηχανισμού εκτόξευσης

Το τρίτο και τελευταίο τμήμα του μηχανισμού, είναι ο σωλήνας εκτόξευσης, στον οποίο έχουν γίνει δύο συμμετρικά τρυπήματα, στο μέσο περίπου του μήκους του και στην άκρη εκτόξευσης, για τη τοποθέτηση των δύο ζεύγων φωτοδιόδων.



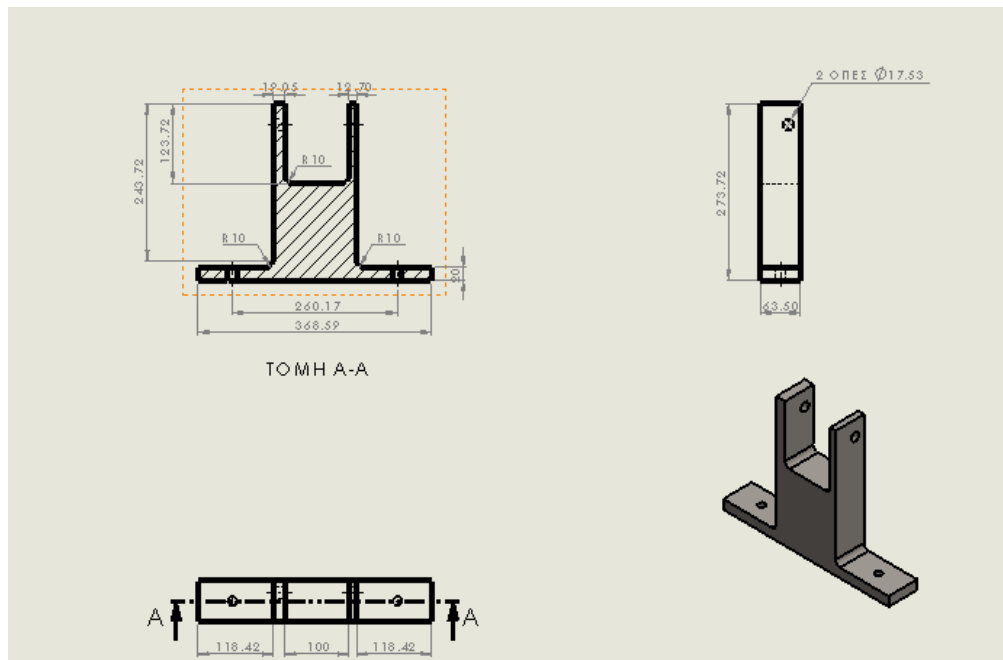
**Σχήμα 6-6.** Σωλήνας εκτόξευσης

- 4) Ο προηγούμενος μηχανισμός εκτόξευσης, στηρίζεται στη βάση της όλης συσκευής, μέσω δύο στηρίξεων, συμμετρικά τοποθετημένων



**Σχήμα 6-7.** Στηρίξεις μηχανισμού εκτόξευσης

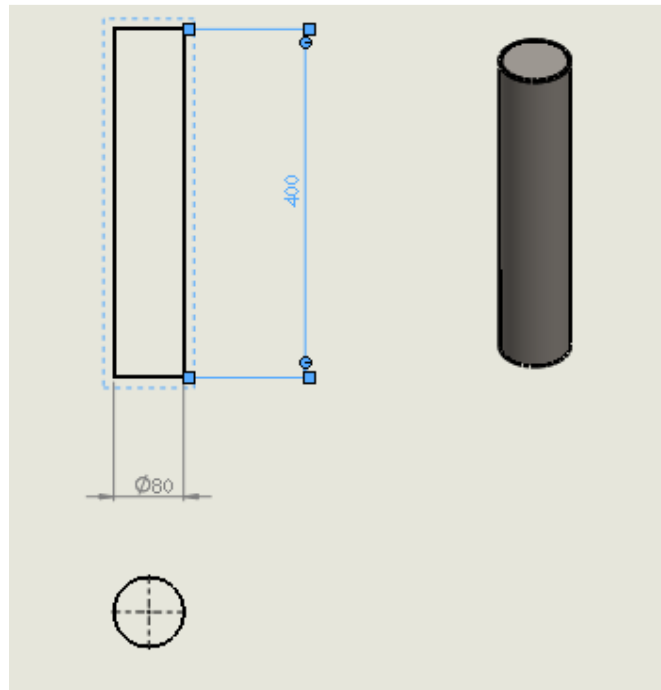
- 5) Απαιτούνται επίσης δύο στηρίξεις για τη τοποθέτηση των φωτοδιόδων, τοποθετημένα το ένα στο μέσο του μήκους και το άλλο στο τέλος του μήκους, του σωλήνα εκτόξευσης



**Σχήμα 6-8.** Στηρίξεις τοποθέτησης για τα ζεύγη φωτοδιόδων

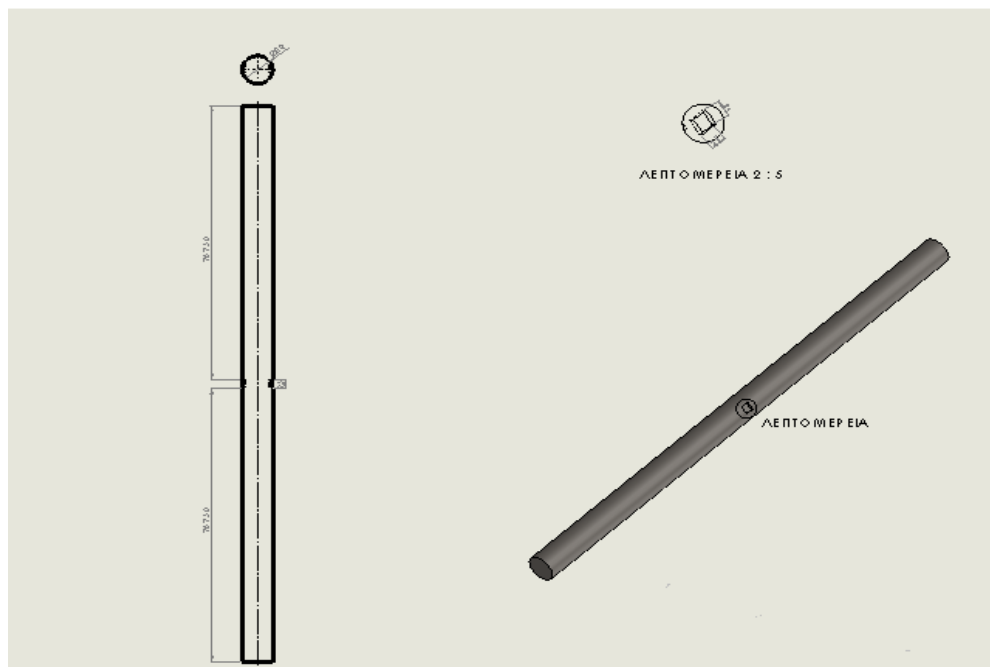


- 6) Ράβδος Striker, με τις διαστάσεις που προέκυψαν από τη μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου



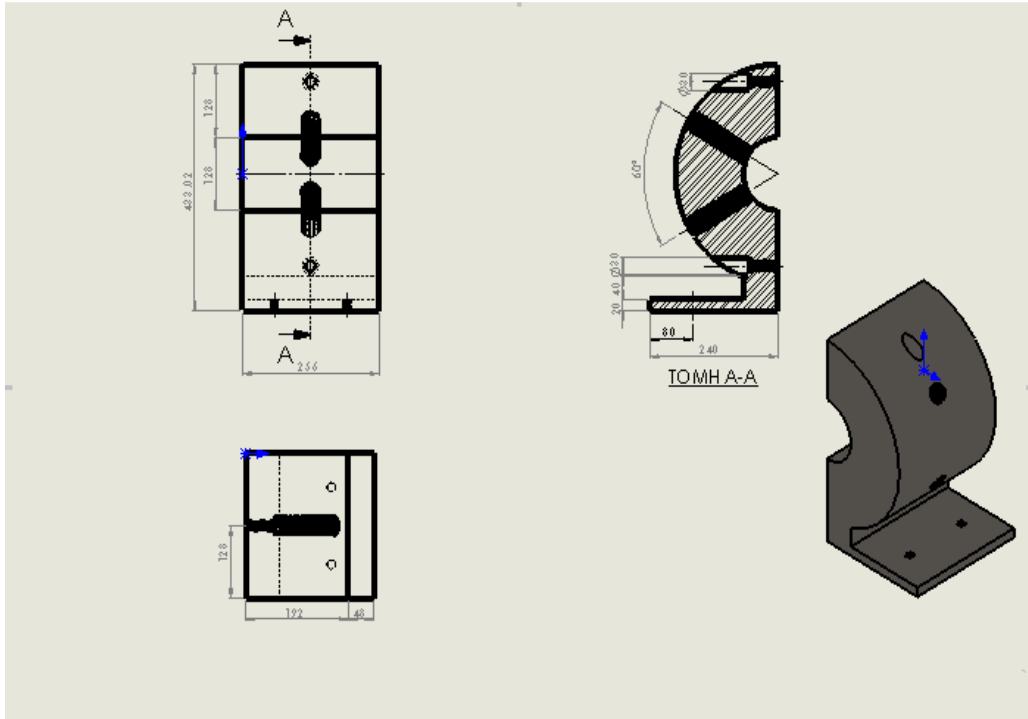
Σχήμα 6-9. Ράβδος Striker

- 7) Δύο ράβδοι πίεσης

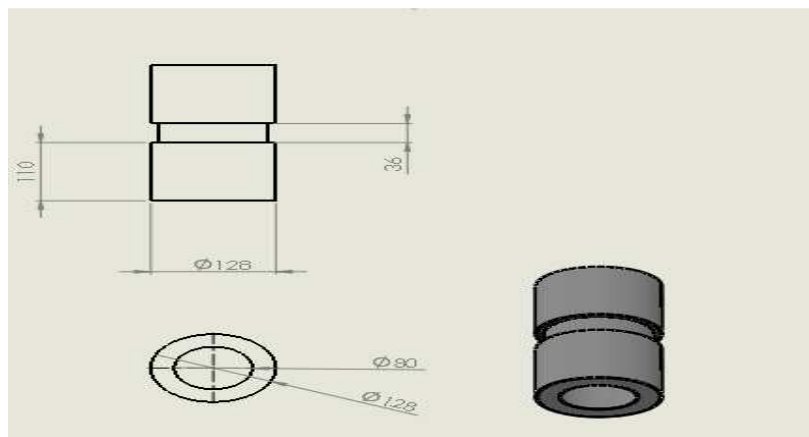


Σχήμα 6-10. Ράβδοι πίεσης

- 8) Στηρίξεις για τις ράβδους πίεσης στη βάση. Απαιτούνται, για κάθε ράβδο πίεσης, τρεις στηρίξεις συμμετρικά τοποθετημένες στο μήκος της κάθε ράβδου. Τα στηρίγματα αυτά είναι μεταλλικοί κύλινδροι, στο εσωτερικό των οποίων τοποθετείται ροδέλα τεφλόν, για την αποτροπή της τριβής των μεταλλικών επιφανειών της ράβδου και του στηρίγματος. Για τη συγκράτηση της ροδέλας τεφλόν και της ράβδου συμπίεσης, τοποθετούνται τέσσερα βιδώματα άλεν, συμμετρικά στη κυκλική περιφέρεια των στηριγμάτων.

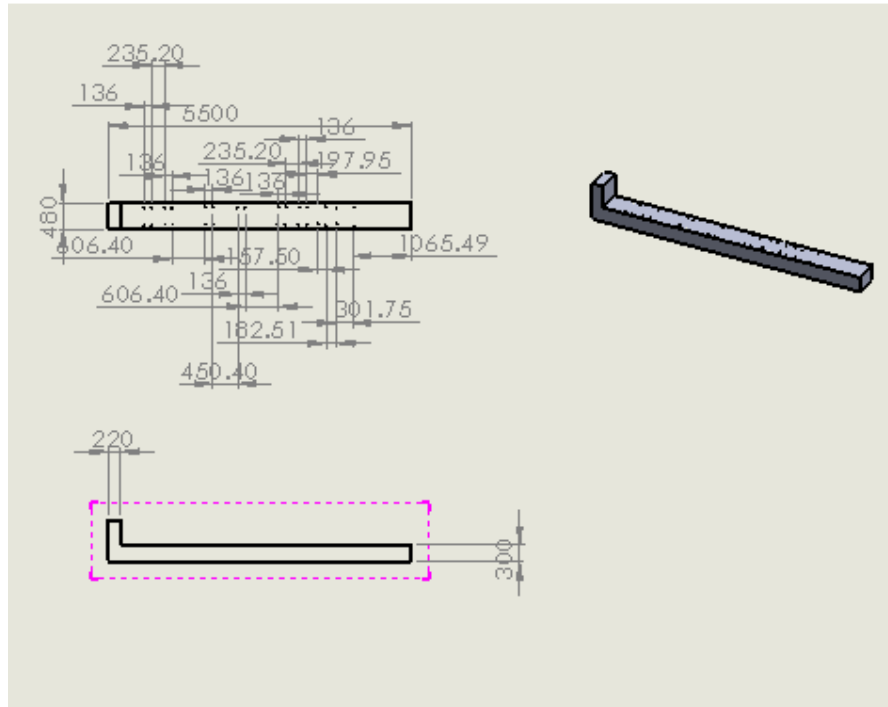


**Σχήμα 6-11.** Στηρίξεις ράβδων πίεσης, σχέδιο του μισού στηρίγματος, εφόσον αυτά είναι συμμετρικά



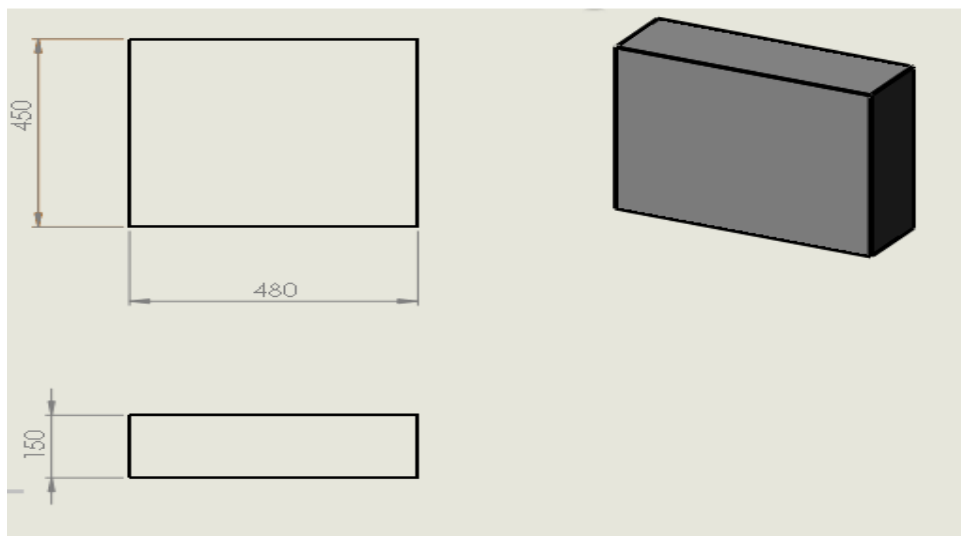
**Σχήμα 6-12.** Ροδέλα τεφλόν

- 9) Βάση συναρμολόγησης του συνολικού μηχανισμού, ο οποίος είναι ένας διάδρομος τοποθέτησης όλων εξαρτημάτων της συσκευής. Αυτός, στη μια άκρη του, καταλήγει σε μεταλλικό τοίχωμα, το οποίο λειτουργεί ως motion trap της ράβδου πίεσης Transmission.



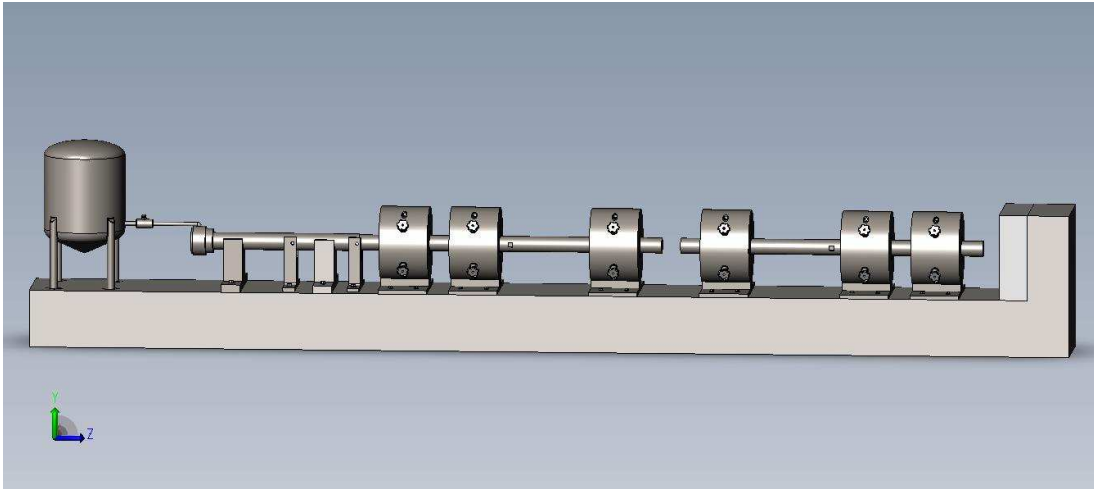
**Σχήμα 6-13.** Βάση συναρμολόγησης συνολικού μηχανισμού

Για την αποτροπή τριβών της motion trap με τη ράβδο Transmission, τοποθετείται μεταξύ αυτών, τοίχωμα από τεφλόν



**Σχήμα 6-14.** Τοίχωμα από τεφλόν

Με τη συναρμολόγηση των παραπάνω, ο τελικός μηχανισμός της συσκευής Kolsky προκύπτει σχηματικά ως



**Σχήμα 6-15.** Solidworks σχέδιο τελικής συσκευής Kolsky

## 7 Συμπεράσματα και Μελλοντική εργασία

### 7.1 Συμπεράσματα

Η σχεδίαση μιας συσκευής Kolsky αποτελεί γενικά μια διαδικασία για την οποία κάποιο συγκεκριμένο και διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο δεν υπάρχει. Πολλές δε από τις σχεδιαστικές λεπτομέρειες εΐθισται να υλοποιούνται με μεθόδους πρακτικές και ανάλογα τις εκάστοτε ανάγκες και περιστάσεις κατασκευής [11]. Και τούτο συμβαίνει, παρόλο που η ίδια η συσκευή αποτελεί ίσως τη μοναδική λύση για μέτρηση τάσης, παραμόρφωσης και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης σε εξαιρετικά για το υλικό δυσμενείς συνθήκες φόρτου. Οι κατασκευαστικές εφαρμογές ενός τέτοιου ελέγχου είναι αναρίθμητες και σημαντικές.

Στη παρούσα εργασία, ορίστηκε η σχεδίαση μιας τέτοιας συσκευής, για μέτρηση ιδιοτήτων δειγμάτων υλικού υπό ομοαξονική συμπίεση, ακριβώς σε διαδικασία συγκεκριμένων βημάτων (κεφ.4) και μάλιστα με βασικό εργαλείο προσομοίωσης μοντέλο ορισμένο στο Simulink [9], σε συνδυασμό με αποτελέσματα θεωρητικής προσέγγισης της συμπεριφοράς της ομοιομορφίας κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα [8]. Αυτό, τουλάχιστον από όσο γνωρίζει ο συγγραφέας, δεν έχει επιχειρηθεί έως τώρα. Τα αποτελέσματα, σε εφαρμογή σχεδίασης συσκευής τύπου πίεσεως ελέγχου δειγμάτων αλουμινίου μπορούν να χαρακτηρισθούν ικανοποιητικά. Γενικώς, κινούνται σε προσεγγιστικά καλά πλαίσια, ενώ δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός, ότι στην εργασία αυτή δεν προβλεπόταν η κατασκευή πρωτοτύπου και εις βάθος ενασχόληση με παραμέτρους όπως θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος και καθυστερήσεις καταγραφής. Και αυτό διότι σε επίπεδο κατασκευασμένου πρωτοτύπου, πολλές επιπλέον μεθοδολογίες ρύθμισης και βελτίωσης της ακρίβειας της συσκευής μπορούν να εφαρμοστούν. Οι παράμετροι θερμοκρασίας λειτουργίας και καθυστερήσεων καταγραφής εισάγουν περαιτέρω σημαντικές αποκλίσεις στο σύστημα, οι οποίες όμως δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν υπό τους περιορισμούς της εργασίας. Η κατασκευή πραγματικού πρωτοτύπου και δοκιμές πάνω σε αυτό, με συγκεκριμένα μοντέλα αισθητήρων και υλικά κατασκευής ράβδων πίεσεως, είναι η προφανέστερη λύση για την εισαγωγή των παραμέτρων αυτών στη μέθοδο σχεδιασμού που ορίστηκε εδώ.

Προτάθηκαν ακόμα δύο, περισσότερο πρακτικοί, αλγόριθμοι, ένας για την επιλογή κατάλληλου μήκους δείγματος και ένας για την μείωση του φαινομένου της διασποράς. Ο πρώτος, βασίζεται στη λογική απαίτηση για ελαχιστοποίηση του ίδιου του χρόνου για την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής παραμόρφωσης στο δείγμα, και την εξάρτηση του μήκους δείγματος από αυτή την απαίτηση (παρ. 4.5.2). Ο δεύτερος, επιχειρεί τη προσέγγιση της διασποράς ως άθροισμα γνωστών ημιτονοειδών συναρτήσεων, στο παράδειγμα εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε μόνο μία, του ορισμού μιας «ιδανικής» πραγματικής Incident εισόδου στη συσκευή, τη σύγκριση και την αποκοπή, στο πεδίο της

συχνότητας, των συχνοτήτων όπου η προσέγγιση ημιτόνων και η «ιδανική» είσοδος εμφανίζουν έντονες διαφορές (παρ. 5.10.2). Και οι δύο μεθοδολογίες δεν ερευνήθηκαν σε βάθος, καθώς αυτό θα ξέφευγε αρκετά από τις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας, τα πρακτικά αποτελέσματα τους όμως ήταν αρκετά καλά και σίγουρα δίνουν έναυσμα προς μελλοντική έρευνα, τόσο αυτές όσο και η συνολική μεθοδολογία βημάτων της σχεδίασης.

## 7.2 Μελλοντική εργασία

Η εφαρμογή της διαδικασίας με κατασκευή πρωτοτύπου, διορθώσεις και δοκιμές σε αυτό, αποτελεί τη πλέον προφανή οδό περαιτέρω ελέγχου της μεθόδου. Σε ένα τέτοιο παραπάνω βήμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον μέθοδοι βελτίωσης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, αρκετές από τις οποίες αναφέρθηκαν εδώ αλλά προφανώς δεν μπορούσαν να υλοποιηθούν και να προσεγγιστούν με προσομοιωτικά εργαλεία που υπήρχαν στη διάθεση μας. Τέτοια είναι, επί παραδείγματι, η πρακτική μέθοδος εξακρίβωσης των ιδιοτήτων διασποράς των ράβδων πιέσεων, που αναφέρθηκε στο κεφ. 2. Παράλληλα, ανοίγει ο δρόμος έτσι, για το πραγματικό έλεγχο καθυστερήσεων καταγραφής από τα αισθητήρια στοιχεία της συσκευής και της εισαγωγής της παραμέτρου θερμοκρασίας λειτουργίας.

Το προσομοιωτικό μοντέλο σε simulink που χρησιμοποιήθηκε, εγγενώς αποκλίνει σημαντικά στα αποτελέσματα του, συγκρίσει με μετρήσεις σε πραγματική συσκευή, για πολύ μαλακά υλικά (Lexan, πολυμερή) και σκληρά υλικά με πολύ υψηλό όριο ελαστικότητας. Η αντικατάσταση ή μετατροπή του σε μια περισσότερο εύρωστη διαδικασία, η οποία θα συμπεριλάβει τα υλικά αυτά, θα επιτρέψει τη γενίκευση της μεθόδου και θα πολλαπλασιάσει τις πιθανές πρακτικές εφαρμογές της.

Οι αλγόριθμοι επιλογής μήκους δείγματος συναρτήσει της απαίτησης ελαχιστοποίησης του χρόνου επίτευξης ομοιομορφίας παραμόρφωσης στο δείγμα, της προσέγγισης πραγματικού κύματος εισόδου και της εποπτικής διόρθωσης της διασποράς που προτάθηκαν στην εργασία αυτή, ελέγχθηκαν μόνο με πρακτική χρήση τους, και όχι με αναλυτικό τρόπο. Αποτελούν δε, υποκατάστατο άλλων μεθόδων που δύναται να χρησιμοποιηθούν, το οποίο στη παρούσα εργασία δε μπορούσε να γίνει, λόγω της αδυναμίας εύρεσης δεδομένων από τη βιβλιογραφία και, κυρίως, της μη δυνατότητας κατασκευής πραγματικού πρωτοτύπου της συσκευής. Ο περαιτέρω αναλυτικός έλεγχος τους και η σύγκριση με άλλες υπάρχουσες μεθοδολογίες, θα καταδείξει την αξία χρήσης τους, είτε γενικά είτε σε περιπτώσεις σχεδίασης υπό περιορισμούς, ανάλογους με της εργασίας αυτής.

## Βιβλιογραφία

- [1] Southwest Research Institute, Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus, ASME, 2006.  
<https://www.asme.org/getmedia/a82d72ab-e923-4aa9-a296-784c3fb7463a/242-Split-Hopkinson-Pressure-Bar-Apparatus.aspx>
- [2] MA Kaiser, Advancements in Split Hopkinson Bar test, 1998.  
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-41998-18465/materials/ETD.pdf>
- [3] Follansbee P.S., Frantz C.E., Wright W. T., Experimental Techniques with the Hopkinson Pressure Bar. High Energy Fabrication, the American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 229-236, 1984
- [4] Gorham D.A., Wu X.J., An empirical method for correcting dispersion in pressure bar measurements of impact stresses, Measurement Science and Technology, V.7 No.9, pp. 1227-1232, 1996
- [5] Vinson J., Woldesenbet E., Effect of specimen geometry in high-strain-rate testing of graphite/epoxy composites. Collection-of-Technical-Papers AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, v2, pp. 927-934, 1997
- [6] Gray III G.T., High-Strain-Rate Testing of Materials: The Split-Hopkinson Pressure Bar, Methods in Materials Research. E. Kaufmann, Ed., John Wiley Press, 1999
- [7] Blumenthal W.R., George T., Gray III G.T., Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Soft Materials. Los Alamos National Laboratory. ASM Metals Handbook, Volume 8, pp. 488 – 496, 2000
- [8] Shim V., Yang L., An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens. International Journal of Impact Engineering 31, pp. 129 – 150, 2005
- [9] Li Y., Mao Y., Shi F., A Matlab/Simulink - based method for modelling and simulation of split Hopkinson bar test. World Journal of Modelling and Simulation, Vol. 6, No. 3, pp. 205-213, 2010
- [10] Black J.T., Claus B., Chen W.W., Fezzaa K., Hudspeth M.C., Luo S.N. , Parab N.D., In situ damage assessment using synchrotron X-rays in materials loaded by a Hopkinson bar. Philosophical Transactions of the London Royal Society A, vol. 372, pp. 20130191, 2014
- [11] Gray III G.T. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar. ASM Metals Handbook, Volume 8, pp. 462 – 476, 2000
- [12] Lang S.M., Design of a Split Hopkinson Bar Apparatus for use with Fiber Reinforced Composite Materials, Utah State University, 2012.  
<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2285&context=etd>

- [13] The Engineering Toolbox. Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications, 2015. <http://www.engineeringtoolbox.com>
- [14] Bai W., The design, construction and experimental verification of a split Hopkinson bar. Thesis, University of Missouri, Rolla. M.S. / Engineering Mechanics, 1970
- [15] National Instruments Corporation, Measuring Strain with Strain Gages, 2006. <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>
- [16] Berger - Pelletier H., Modelling of Split Hopkinson pressure bars - Adaptation of a compression apparatus into tension, UNIVERSITÉ LAVAL – QUÉBEC, 2013. <http://www.theses.ulaval.ca/2013/28977/28977.pdf>
- [17] Burns T.J., Davies M.A., Dutterer B.S., Kennedy M.D., Rhorer R.L., Construction and Alignment of a Kolsky Bar Apparatus, 2002. [http://aspe.net/publications/Annual\\_2002/PDF/POSTERS/1equip/1analy/984.PDF](http://aspe.net/publications/Annual_2002/PDF/POSTERS/1equip/1analy/984.PDF)
- [18] Bancroft, D., The velocity of Longitudinal Waves in Cylindrical Bars, Physical Review, V.59, No.59, pp. 588-593, 1941
- [19] Demonstration of 1-D Kolsky bar analysis with Abaqus, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=GZmeNaTdVT8>
- [20] Caceres Valencia P.G., University of Puerto Rico, notes from course “Mechanical Metallurgy”, 2015. <http://academic.uprm.edu/pcaceres/Courses/MechMet/MET-6A.pdf>
- [21] ASM Metals Handbook, Volume 8, ASM International, 2000
- [22] True and Engineering mechanical stress and strain, NDT Resource Center, 2015. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/>
- [23] The difference between true and engineering stress, EQS, 2015. <http://www.eqsgroup.com/all-about-steel/difference-between-true-stress-and-engineering-stress.asp>
- [24] Material Properties Database, 2015. <http://www.makeitfrom.com/>
- [25] Kim M.S., Lee O.S., Dynamic material property characterization by using split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique, Nuclear Engineering and Design, vol.226, pp.119–125, 2003
- [26] Americo Almeida Magalhaes P. Junior , Da Silva Scari A., Landre J. Junior, Pockszevnicki B.C., Stress-Strain Compression of AA6082-T6 Aluminum Alloy at Room Temperature, Journal of Structures, Article ID 387680, 2014. <http://www.hindawi.com/journals/jstruc/2014/387680/>



## Παράρτημα Α

### Κώδικας ορισμού παραμέτρων, υπολογισμών βαρών και μεταβλητών λειτουργίας

Στο πρόγραμμα αυτό (parameters.m, matlab), ο χρήστης εισάγει τις βασικές επιλογές σχεδίασης (μήκος και L/D ράβδων πίεσης, μήκος ράβδου Κρούστη, χαρακτηριστικά υλικού δείγματος και υλικού ράβδων πίεσεως, επιθυμητός ρυθμός μεταβολής καταπόνησης, χρόνος ανόδου και συνολική διάρκεια εισόδου, συντελεστής μετάδοσης  $\alpha_{13}$  από ράβδο incident προς τη ράβδο transmission. Έπειτα, σύμφωνα με τη διαδικασία βημάτων που ορίστηκε στο κεφ. 4, το πρόγραμμα υπολογίζει τις υπόλοιπες απαιτούμενες παραμέτρους για τη διαδικασία προσομοίωσης (ταχύτητα ράβδου Κρούστη, διαστάσεις δείγματος,  $\beta$ ,  $n$ , βάρη για το Simulink μοντέλο προσομοίωσης). Τέλος, εξάγει αρχείο κειμένου txt, στο οποίο αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της επιχειρούμενης προσομοίωσης και μια σειρά μετρικών για την ποιότητα του αποτελέσματος που θα προκύψει, τη μέγιστη τιμή τάσης Incident, αν το όριο ελαστικότητας των ράβδων πίεσεων είναι μεγαλύτερο από την τιμή αυτή, το ποσοστό μετάδοσης  $\alpha_{23}$  από το δείγμα στη transmission ράβδο και αν υπάρχουν φαινόμενα “bleed off”, τη χρονική διάρκεια παλμού εισόδου και αν αυτή είναι μικρότερη της μέγιστης επιθυμητής για σωστής ποιότητας μετάδοση).

Το πρόγραμμα είναι πρακτικώς το ίδιο, τόσο για προσομοίωση με είσοδο παλμό πεπερασμένου μη μηδενικού χρόνου ανόδου όσο και στη περίπτωση παλμού πραγματικού τύπου. Στη δεύτερη περίπτωση το μόνο που αλλάζει είναι ότι ο χρήστης, στο κομμάτι του κώδικα όπου υπολογίζονται ο αριθμός μεταβάσεων σήματος από το δείγμα  $n$ , πρέπει να επιλέξει απ’ ευθείας το  $n=3$ .

```
%Desired constant sample strain rate
SR = % Desired sample strain rate 1/s

% Sample characteristics
Ds = %Sample Density kg/m3
Es = %Sample Young's Modulus Pa
Ys = %Sample Yield Strength Pa
Cs = sqrt (Es/Ds); %Sample wave speed m/s

% Input Pulse Characteristics
RS = %Input pulse Rising time secs
SL = %Input pulse Signal Length secs

% Pressure bar characteristics
n1 = %Pressure Bar L/D ratio
DB = %Pressure Bar Density kg/m3
EB = %Pressure Bar Young's Modulus Pa
YB = %Pressure Bar Yield Strength Pa
LB = %Pressure Bar length m
```

```

DiamB = LB/n1;      %Pressure Bar Diameter m
CB = sqrt(EB/DB);  %Pressure Bar wave speed m/s
Lstriker =          %Striker bar length m

%//////////////////////////////////// STEP 1 : Specimen Diameter //////////////////////////////////////

% set a13 transmission coefficient
a13 =

%Calculate Sample diameter in order a13 = 0.5

X1 = a13*(-Ds*Cs);
X2 = 2*sqrt(1-a13) + a13 - 2 ;

DiamS = DiamB * sqrt((DB*CB*X2)/X1);

%////////////////////////////////////END OF STEP1////////////////////////////////////

%//////////////////////////////////// STEP 2 : Specimen Length //////////////////////////////////////

%Calculate Relative Mechanical Impedance a, Relative Cross sectional
Area b

X3 = 0.25*Ds*pi*(DiamS*DiamS)*Cs; % Mechanical impedance of sample
X4 = 0.25*DB*pi*(DiamB*DiamB)*CB; % Mechanical impedance of the pressure
bars

B = X3/X4; %Relative impedance

A = (DiamS*DiamS)/(DiamB*DiamB);

% Now calculate n = number of required wave transits throught specimen

% 1. Using finite rise pulse and the matrices from [8] is simply
% n=4 if b>= 1/6 else n=3

if B>=(1/6)
n=4;
else
    n=3;
end

%2. For real type input use the use this
%n=3;

% Sample length Calculation
LS = 0.05*SL*Cs/n;

%////////////////////////////////////END OF STEP
2////////////////////////////////////

%//////////////////////////////////// STEP3 : Associate results with gus gun, Desired strain
rate////////////////////////////////////

```

```

Striker_Velocity = SR*LS; % Striker Bar Velocity

%Max incident strain, reflected strain, which we set initially 0.5 of
%incident is (Lstriker*SR)/2CB
Max_incident_Strain = (LS*SR)/CB; %Max incident strain at impact

%////////////////////END OF STEP
3////////////////////

%////////////////////STEP 4: 1st Judgement of
results////////////////////
Max_incident_Stress = EB*Max_incident_Strain; % Pulse Stress Amplitude
for simulation Pa

%check if pressure bars can handle it
if YB < Max_incident_Stress
    CHECK_Yield = 0;
else
    CHECK_Yield = 1;
end

%Calculate transmission coefficient a23
a23=((2*A*A)*(DB*CB))/(A*A*(Ds*Cs)+(DB*CB));

% check if a23> 0.9, thus good transmission from sample n
% less severe "bleed-off" effect
if a23>=0.9
    Sample_Transmission_quality = 1;
else
    Sample_Transmission_quality = 0;
end

%Check if the chosen initial pulse duration is between accepted limits,
% 2pulse_duration < pressure bar length

Pulse_duration_limit = LB/(2*CB);

if SL <= Pulse_duration_limit
    Accepted_initial_pulse = 1;
else
    Accepted_initial_pulse = 0;
end
%////////////////////END OF STEP 4////////////////////

%////////////////////STEP 5 : CALCULATE THE VARIABLES NEEDED FOR SIMULATION////////////////////

%calculate GAINS and DELAYS for the simulation

GAIN1 = (2/A)/(1+1/B);%TBS
GAIN2 = (2*A)/(1+B);%TSB
GAIN3 = (1-B)/(1+B);%RSB
GAIN4 = (1-B)/(1+B);%RSB
GAIN5 = (2*A)/(1+B);%TSB

```

```

GAIN6 = (1-(1/B))/(1+(1/B));%RBS
GAIN7 = 1/A; %1/A
GAIN8 = [-2*(CB/LS)]/EB; %[-2CB/LS]/EB
DELAY1 = n*LS/Cs;
DELAY2 = DELAY1;

%///////////////////////////////////////////////////////////////////END OF STEP 5
//////////////////////////////////////////////////////////////////

%///////////////////////////////////////////////////////////////////STEP 6 STORE
RESULTS//////////////////////////////////////////////////////////////////

fid=fopen('SAMPLE_MATERIAL_DESIRED STRAIN RATE.txt','w');

fprintf(fid,'_____Desired constant sample strain rate_____\n');
fprintf(fid,'Desired constant sample strain rate (1/s) ');
fprintf(fid, '%d\n',SR );
fprintf(fid, '\n' );

fprintf(fid,'_____Sample characteristics_____\n');
fprintf(fid,'Sample Density kg/m3 ');
fprintf(fid, '%d\n',Ds );
fprintf(fid,'Sample Youngs Modulus Pa ');
fprintf(fid, '%d\n',Es );
fprintf(fid,'Sample Yield Strength Pa ');
fprintf(fid, '%d\n',Ys );
fprintf(fid,'Sample wave speed m/s ');
fprintf(fid, '%d\n',Cs );
fprintf(fid,'Sample diameter m ');
fprintf(fid, '%d\n',DiamS );
fprintf(fid,'Sample length m ');
fprintf(fid, '%d\n',LS );
fprintf(fid, '\n' );

fprintf(fid,'_____Pressure bars characteristics_____\n');
fprintf(fid,'Pressure bars Density kg/m3 ');
fprintf(fid, '%d\n',DB );
fprintf(fid,'Pressure bars Youngs Modulus Pa ');
fprintf(fid, '%d\n',EB );
fprintf(fid,'Pressure bars Yield Strength Pa ');
fprintf(fid, '%d\n',YB );
fprintf(fid,'Pressure bars wave speed m/s ');
fprintf(fid, '%d\n',CB );
fprintf(fid,'Pressure bars diameter m ');
fprintf(fid, '%d\n',DiamB );
fprintf(fid,'Pressure bars length m ');
fprintf(fid, '%d\n',LB );
fprintf(fid,'Pressure bars L/D ratio ');
fprintf(fid, '%d\n',n1 );
fprintf(fid, '\n' );

fprintf(fid,'_____GENERAL SETUP CHARACTERISTICS_____\n');
fprintf(fid,'TRANSMISSION COEFFICIENT a13 ');
fprintf(fid, '%d\n',a13 );
fprintf(fid,'Striker bar velocity ');
fprintf(fid, '%d\n',Striker_Velocity );

```

```

fprintf(fid, 'Relative cross sectional area a ');
fprintf(fid, '%d\n', A );
fprintf(fid, 'Relative mechanical impedance b ');
fprintf(fid, '%d\n', B );
fprintf(fid, 'Wave transits through specimen ');
fprintf(fid, '%d\n', n );
fprintf(fid, 'Striker Bar length ');
fprintf(fid, '%d\n', Lstriker );

fprintf(fid, '\n' );

fprintf(fid, '_____ Finite rise pulse - characteristics _____\n');
fprintf(fid, 'Input pulse Rising time secs ');
fprintf(fid, '%d\n', RS );
fprintf(fid, 'Input pulse Signal Length secs ');
fprintf(fid, '%d\n', SL );
fprintf(fid, '\n' );

fprintf(fid, '_____ Simulation Characteristics Judgment _____\n');
fprintf(fid, 'Max incident Stress Pa ');
fprintf(fid, '%d\n', Max_incident_Stress );
fprintf(fid, 'Are Pressure bars able to handle this stress? ');
fprintf(fid, '%d\n', CHECK_Yield );

fprintf(fid, 'Transmission coefficient a23 ');
fprintf(fid, '%d\n', a23 );
fprintf(fid, 'Is transmission from specimen good enough (no "bleed-off")? ');
fprintf(fid, '%d\n', Sample_Transmission_quality );

fprintf(fid, 'Incident pulse duration secs ');
fprintf(fid, '%d\n', SL );
fprintf(fid, 'Max accepted incident pulse duration secs ');
fprintf(fid, '%d\n', Pulse_duration_limit);
fprintf(fid, 'Is Incident pulse between accepted time limits? ');
fprintf(fid, '%d\n', Accepted_initial_pulse);
fprintf(fid, '\n' );

fprintf(fid, '_____ SIMULATION VARIABLES _____\n');
fprintf(fid, 'MAX INCIDENT STRESS (Pa) ');
fprintf(fid, '%d\n', Max_incident_Stress );
fprintf(fid, 'MAX INCIDENT STRAIN (M/M) ');
fprintf(fid, '%d\n', Max_incident_Strain );
fprintf(fid, 'GAIN1 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN1 );
fprintf(fid, 'GAIN2 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN2 );
fprintf(fid, 'GAIN3 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN3 );
fprintf(fid, 'GAIN4 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN4 );
fprintf(fid, 'GAIN5 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN5 );
fprintf(fid, 'GAIN6 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN6 );

```

```
fprintf(fid, 'GAIN7 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN7 );
fprintf(fid, 'GAIN8 ');
fprintf(fid, '%d\n', GAIN8 );
fprintf(fid, 'DELAY1 ');
fprintf(fid, '%d\n', DELAY1 );
fprintf(fid, 'DELAY2 ');
fprintf(fid, '%d\n', DELAY2 );

fclose(fid);
```

## Παράρτημα Β

### Κώδικας εξαγωγής χαρακτηριστικών του Gas Gun

Στο πρόγραμμα αυτό (gasgun.m, matlab), ο χρήστης εισάγει την ταχύτητα ράβδου Κρούστη, ταχύτητα διάδοσης κύματος στις ράβδους πίεσης, επιθυμητό ρυθμό μεταβολής παραμόρφωσης δείγματος, πυκνότητα υλικού ράβδων πίεσεως, μήκος ράβδου κρούστη και επιθυμητό όριο ασφαλείας πίεσης. Το πρόγραμμα εξάγει διαγράμματα ταχύτητας ράβδου Κρούστη/απαιτούμενης πίεσης από το gas gun (με τη μέθοδο Newton) για λόγους μήκους σωλήνα εκτόξευσης/ράβδου Κρούστη  $x=1,2,3,4$  και 5.

```
Bar_velocity =           %Striker bar velocity at impact m/s
CB =                    %wave speed in pressure bars m/s
SR =                    %Desired constant sample strain rate (1/s)
DB =                    %Pressure bars Density Kg/m3
Lstriker =              %Striker bar length m
```

```
%Pressure Limit (Pa)
Pmax =
```

```
figure(1);
```

```
syms P;
```

```
% Actual striker velocity upon impact
p0=eplot(Bar_velocity*(P/P), [1,p]);
legend('actual velocity', 'Location', 'northeast')
set(p0, 'Color', [1,0,0], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 1);
hold on ;

% x=1
p1=eplot(sqrt((2*1*P)/DB), [1,p]);
set(p1, 'Color', [0.1,0.1,0], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 2);
hold on ;

% x=2
p2=eplot(sqrt((2*2*P)/DB), [1,p]);
set(p2, 'Color', [0.2,0.2,1], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 2);
hold on ;

% x=3
p3=eplot(sqrt((2*3*P)/DB), [1,p]);
set(p3, 'Color', [0.3,0.3,0], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 2);
hold on ;

% x=4
p4=eplot(sqrt((2*4*P)/DB), [1,p]);
set(p4, 'Color', [0.5,1,0], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 3);
hold on ;

% x=5
```

```
p5=ezplot(sqrt((2*5*P)/DB),[1,p]);
set(p5,'Color',[0.5,0.5,0], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 3);
hold on ;

title('Gas gun profile, SAMPLE MATERIAL-TYPE OF INPUT/STRAIN RATE 1/s');
legend('actual
velocity','x=1','x=2','x=3','x=4','x=5','Location','northeast')
xlabel('Gas Gun Pressure (Pa)') % x-axis label
ylabel('Striker Velocity (m/s)') %y-axis label

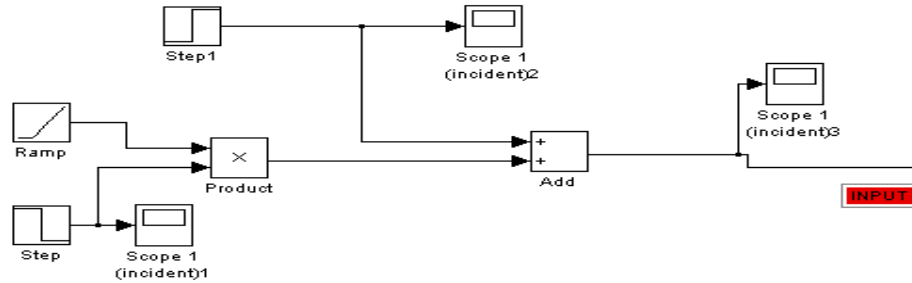
grid on;
hold off;
```



# Παράρτημα Γ

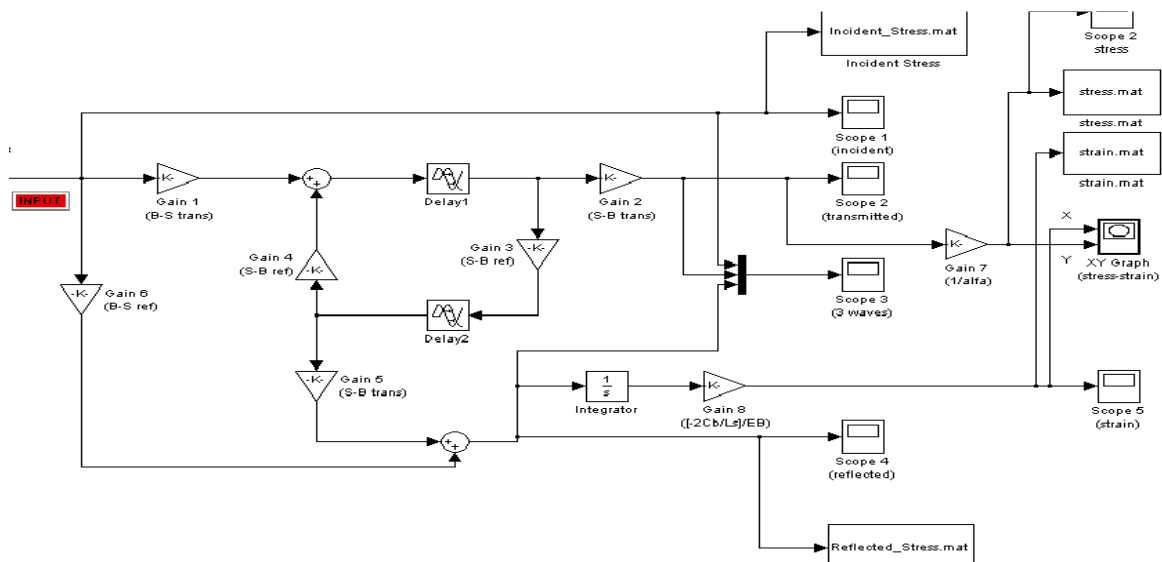
## Μοντέλο προσομοίωσης για είσοδο παλμό με πεπερασμένο μη μηδενικό χρόνο ανόδου

Στο μοντέλο αυτό (simulink1.mdl, Simulink), ο χρήστης κατ' αρχάς ορίζει διάρκεια παλμού, χρόνο ανόδου στο Ramp, μέγιστη τιμή πίεσης incident στα Step, Step1



**Σχήμα Γ-1.** Ορισμός εισόδου προς προσομοίωση, περίπτωση παλμού πεπερασμένου μη μηδενικού χρόνου ανόδου στο Simulink

Έπειτα, στο κυρίως μοντέλο προσομοίωσης επιλέγει τα βάρη Gain1-Gain 8, Delay 1, Delay 2 (όπως αυτά προκύπτουν από τον αρχικό υπολογισμό παραμέτρων μέσω του κώδικα του παραρτήματος Α).



**Σχήμα Γ-2.** Κυρίως μοντέλο προσομοίωσης στο simulink

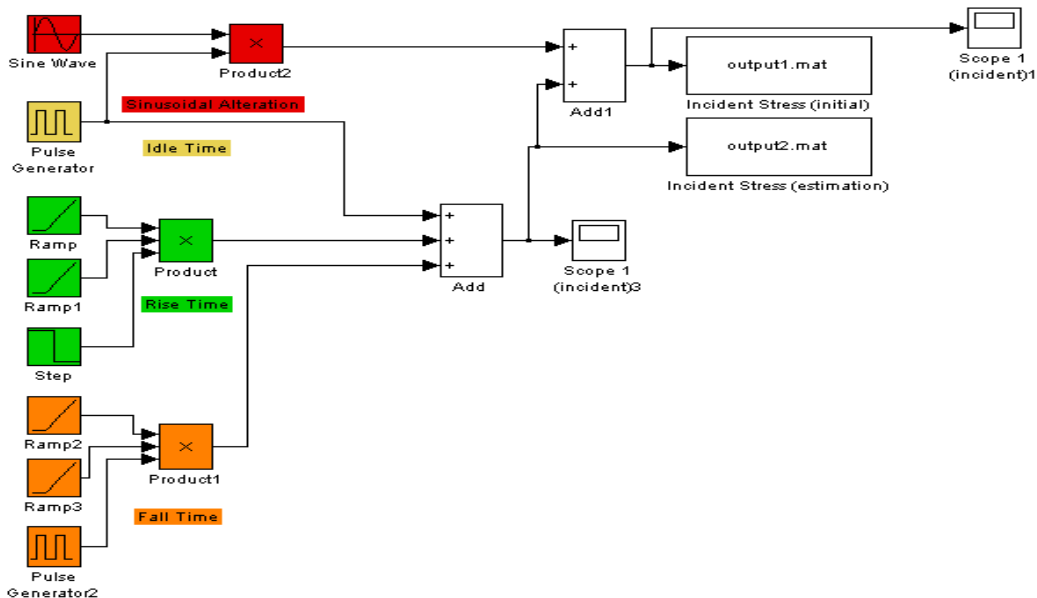
Τελικώς, μέσω του μοντέλου Simulink πραγματοποιείται προσομοίωση και εξάγονται διαγράμματα Incident/Reflected/Transmission τάσεων στις ράβδους πίεσεως, διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης δείγματος και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία από το matlab (αρχεία \*.mat)

# Παράρτημα Δ

## Κώδικας προσομοίωσης για την περίπτωση εισόδου της προσέγγισης πραγματικού παλμού

### Δ.1 Μοντέλο προσδιορισμού της συμπεριφοράς εισόδου

Εδώ (realsignal1.mdl, Simulink) ο χρήστης θέτει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του παλμού εισόδου, τη διάρκεια παλμού, το χρόνο ανόδου, το χρόνος καθόδου, τη μέγιστη τιμή πίεσης χωρίς διασπορά, συχνότητα διασποράς, ποσοστό της μέγιστης τιμής σήματος χωρίς διασπορά ως μέτρο της ημιτονοειδούς αλλοίωσης διασποράς). Η υλοποίηση έχει γίνει με ένα ημίτονο για τη διασπορά αυτή, αν ο χρήστης το επιθυμεί μπορεί να προσθέσει περισσότερα.



**Σχήμα Δ-1.** Προσδιορισμός χαρακτηριστικών πίεσης incident, περίπτωση εισόδου τύπου πραγματικής στο Simulink

Έπειτα, τρέχοντας το μοντέλο, αποθηκεύονται στη μνήμη του matlab, τα επιθυμητά χαρακτηριστικά εισόδου.

### Δ.2 Κώδικας διόρθωσης της διασποράς

Εδώ (disp correction2.m, matlab), μπορεί να πραγματοποιηθεί η προτεινόμενη εποπτική διαδικασία διόρθωσης της διασποράς, όπως παρουσιάστηκε στη κυρίως εργασία. Ο χρήστης εποπτεύει το γράφημα του συντελεστή φάσης του FFT του σήματος εισόδου και

επιλέγει την ανάλογη ελάχιστη συχνότητα αποκοπής που επιθυμεί. Το πρόγραμμα έπειτα, μεταβάλλει αναλόγως την είσοδο incident, για το επόμενο στάδιο, της κυρίως προσομοίωσης.

```
T= %total simulation time s

% load input with dispersion from simulink model
load output1.mat;
f1_val = X1.Data;

% load input without dispersion from simulink model
load output2.mat;
f2_val = X2.Data;

figure(1);
plot(f1_val);
grid on;
xlabel('time slots')
ylabel('pressure (Pa)');
title('Estimation of the initial Incident pressure pulse, with
dispersion');

figure(2);
plot(f2_val);
grid on;
xlabel('time slots')
ylabel('pressure (Pa)');
title('Estimation of the initial Incident pressure pulse, without
dispersion');

% subtract the signals
f3_val= f1_val - f2_val;

%compute FFT for all signals
F1=fft(f1_val);
F2=fft(f2_val);
F3=fft(f3_val);

%Magnitudes and phases of all FFTs
F1_mag = abs(F1);
F1_phase = angle(F1);
F2_mag = abs(F2);
F2_phase = angle(F2);
F3_mag = abs(F2);
F3_phase = angle(F2);
%Find the phases where dispersion exists, practically where the
magnitude of
%F3 is not zero, for those phases set the magnitude of F2 equal to the
%magnitude of F1

figure(3);
plot(F1_phase,'color','r');
grid on;
hold on;
plot(F2_phase,'color','b');
```

```

legend('Phase component of fourier transform, signal with
dispersion','Phase component of fourier transform, signal without
dispersion','Location','northeast')
hold off;

N = max(size(F1));
K=zeros(size(N));

N = length(F1);
conjbin = N-9+2;
ydft = F1;
ydft([9 conjbin]) = 0;

u=ifft(F1_mag);
u1=ifft(F1_phase);
y = ifft(ydft);

figure(4);
plot(f1_val,'color','r');
grid on;
hold on;
plot(y,'color','b');
xlabel('time slots')
ylabel('pressure (Pa)');
title('Initial incident signal and the final corrected');
legend('Initial incident signal with dispersion','Corrected incident
signal with way LESS dispersion','Location','northeast')
hold off;

%define t to pass final incident signal

k=max(size(y)); %number of time slots

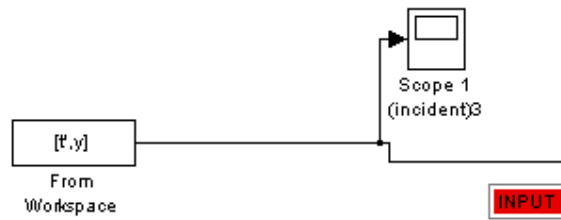
t=0:T/(k-1):T;

figure(5);
plot(t',y);
grid on;
hold on;
xlabel('time (secs)');
ylabel('pressure (Pa)');
title('Final incident signal as simulink input');
hold off;

```

### Δ.3 Κυρίως μοντέλο προσομοίωσης

Εδώ, (Simulinkmodel3.mdl, Simulink) το μόνο που αλλάζει από το μοντέλο του παραρτήματος Γ, είναι ότι η είσοδος μορφοποιείται από τα αποτελέσματα των διεργασιών Δ.1, Δ.2.



**Σχήμα Δ-2.** Ορισμός εισόδου προς προσομοίωση, περίπτωση παλμού πεπερασμένου τύπου πραγματικής μορφής στο Simulink

Κατά τα λοιπά, το κυρίως κομμάτι προσομοίωσης παραμένει όπως στο παράρτημα Γ και επιτελεί τις ίδιες λειτουργίες.

# Παράρτημα Ε

## Κώδικας Μετα-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων

### Ε.1 Αποθήκευση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Με το κώδικα αυτό (postprocess1.m, matlab), αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας προσομοίωσης (τάση και παραμόρφωση δείγματος, incident και reflected τάσεις, μέγιστη παραμόρφωση δείγματος) σε αρχεία κειμένου και μορφοποιούνται τα γραφήματα που προκύπτουν από αυτήν (τίτλοι, μονάδες).

```
%saving Incident Stress, Reflected_Stress, Sample Stress, Sample strain
%to txt files for future postprocessing

load Incident_Stress.mat;
Incident_Stress = ans;
Incident_Stress_val = Incident_Stress.Data;
Incident_Stress = Incident_Stress_val(:);
save Incident_Stress_history.txt Incident_Stress -ascii

load Reflected_Stress.mat;
Reflected_Stress = ans;
Reflected_Stress_val = Reflected_Stress.Data;
Reflected_Stress = Reflected_Stress_val(:);
save Reflected_Stress_history.txt Reflected_Stress -ascii

load stress.mat;
Sample_Stress = ans;
Sample_Stress_val = Sample_Stress.Data;
Sample_Stress = Sample_Stress_val(:);
save Sample_Stress_history.txt Sample_Stress -ascii

load strain.mat;
Sample_strain = ans;
Sample_strain_val = Sample_strain.Data;
Sample_strain = Sample_strain_val(:);
save Sample_strain_history.txt Sample_strain -ascii

%find max sample strain and save it also for gas gun design

X=max(Sample_strain);

fid=fopen('maxStrainInSample.txt','w');
fprintf(fid, '_____Maximum strain in sample for phase 4 - gas
gun_____ \n');
fprintf(fid, '%d\n', X );

%setup XY graph
set(0, 'ShowHiddenHandles', 'on')
```

```

set(gcf,'menubar','figure')

xlabel('time (secs)');
ylabel('Stress (Pa)');
title('Incident - Reflected - Transmitted stresses (Pa),SAMPLE MATERIAL-
TYPE OF INPUT, STRAIN RATE 1/s');
set(gcf,'name','Figure Name');

%xlabel('Sample Strain (m/m)');
%ylabel('Sample Stress (Pa)');
%title('Stress/Strain curve,SAMPLE MATERIAL-TYPE OF INPUT, STRAIN RATE
m/s');
%set(gcf,'name','Figure Name');
grid on;

```

## E.2 Εύρεση ελαχίστων στην τάση ανάκλασης

Το πρόγραμμα αυτό (localminima2.m, matlab) σχεδιάζει τη χρονική συμπεριφορά της τάσης Reflected και βρίσκει τις ελάχιστες τιμές αυτής (τοπικά ελάχιστα και ολικό).

```

T= %total signal duration s

figure(1);
load Reflected_Stress.mat;
Reflected_Stress = ans;
Reflected_Stress_val = Reflected_Stress.Data;
Reflected_Stress = Reflected_Stress_val(:);
Slot=max(size(Reflected_Stress));

X=zeros(Slot,1);

for i=1:Slot
    X(i,1)=(i-1)*(T/(Slot-1));
end
hold on;

plot(X,Reflected_Stress);

[Maxima,MaxIdx] = findpeaks(Reflected_Stress);
DataInv = 1.01*max(Reflected_Stress) - Reflected_Stress;
[Minima,MinIdx] = findpeaks(DataInv);
Minima = Reflected_Stress(MinIdx);

%number of local minima
Minimas = max(size(Minima));

for i=1:Minimas
    u=MinIdx(i);
    plot(X(u),Minima(i),'r*');

for j=1:Slot
    if Reflected_Stress(j)==Minima(i)
        plot(X(j),Reflected_Stress(j),'r*');
    end
end
end

```

```
end

legend('Reflected Stress','Minima','Location','northwest')

grid on;
xlabel('time (secs)');
ylabel('Reflected Stress (Pa)');
title('Reflected Stress and its minima,SAMPLE MATERIAL-TYPE OF INPUT,
STRAIN RATE 1/s');
%set(gcf,'name','Figure Name');
hold off;
```



## Παράρτημα ΣΤ

### Μετρητικό πρόγραμμα υπολογισμού τάσης και παραμόρφωσης δείγματος σε C++

Ο κώδικας αυτός (sstraincalculator1.cpp, C++), υλοποιεί τον υπολογισμό τάσης και παραμόρφωσης δείγματος από αρχεία κειμένου που περιέχουν μετρήσεις incident, reflection, transmission τάσεων/παραμορφώσεων στις ράβδους πίεσης, προερχόμενα είτε από προσομοίωση είτε από μετρήσεις με πραγματικούς αισθητήρες. Ο τρόπος λειτουργίας του, αναλύθηκε και παρουσιάστηκε στο κυρίως κείμενο της εργασίας.

```
1  #include <iostream>
2  #include <string>
3  #include <fstream>
4
5  int main()
6  {
7      using namespace std;
8
9      long double e1[100]; //incident strain gage readings
10     long double e2[100]; //reflected strain gage readings
11     long double e3[100]; //transmitted strain gage readings
12
13     long double TEST_PROFILE[6]; //0: Young's (elastic) modulus of the i/o bars E
14                                     //1: Elastic wave speed (wave velocity) in the i/o bars C
15                                     //2: density of the i/o bars (Greek letter 'rho')
16                                     //3: length of specimen Ls
17                                     //4: relative cross sectional area (Greek letter 'alfa')
18                                     // (CROSS_SECTIONAL_AREA_SPECIMEN / CROSS_SECTIONAL_AREA_i/oBAR)
19                                     //5: test time slot dt
20
21     long double s1[100]; //incident stress
22     long double s2[100]; //reflected stress
23     long double s3[100]; //transmitted stress
24
25     long double s_AVG[100]; //average stress in the specimen
26
27     long double de_s[100]; //average strain rate in the specimen
28
29     long double e_s[100]; //average strain in the specimen
30     long double SUM; //secondary variable, for calculating e_s
31
```

```

32     //initialization of data
33
34     for(int i = 0; i < 6; ++i)
35     {
36         TEST_PROFILE[i]=0;
37     }
38
39
40     for(int i = 0; i < 100; ++i)
41     {
42         e1[i]=0;
43         e2[i]=0;
44         e3[i]=0;
45         s1[i]=0;
46         s2[i]=0;
47         s3[i]=0;
48         s_AVG[i]=0;
49         de_s[i]=0;
50         e_s[i]=0;
51     }
52
53
54
55     //incident strain gage readings
56
57     ifstream file1("e1.txt");
58     if(file1.is_open())
59     {
60
61
62         for(int i = 0; i < 100; ++i)
63         {
64             file1 >> e1[i];
65         }
66     }
67
68     //optional check
69     // for(int i = 0; i < 100; ++i)
70     //     {
71     //         cout << e1[i];
72     //         cout << endl;
73     //     }
74
75
76     //reflected strain gage readings
77
78     ifstream file2("e2.txt");
79     if(file2.is_open())
80     {
81
82
83         for(int i = 0; i < 100; ++i)
84         {

```

```

85         file2 >> e2[i];
86     }
87 }
88
89
90 for(int i = 0; i < 100; ++i)
91 {
92     cout << e2[i];
93     cout << endl;
94 }
95
96 //transmitted strain gage readings
97
98
99 ifstream file3("e3.txt");
100 if(file3.is_open())
101 {
102
103
104     for(int i = 0; i < 100; ++i)
105     {
106         file3 >> e3[i];
107     }
108 }
109
110
111
112
113 //test profile readings
114
115 ifstream file4("profile.txt");
116 if(file4.is_open())
117 {
118
119
120     for(int i = 0; i < 6; ++i)
121     {
122         file4 >> TEST_PROFILE[i];
123     }
124 }
125
126
127
128 //calculating incident, transmitted and reflected stresses
129
130 for(int i = 0; i < 100; ++i)
131 {
132
133     s1[i]= TEST_PROFILE[0] * e1[i];
134     s2[i]= TEST_PROFILE[0] * e2[i];
135     s3[i]= TEST_PROFILE[0] * e3[i];
136
137

```

```

138 //for our test with the simulink model,since we already have the strains we use this instead
139 //s1[i]= e1[i];
140 //s2[i]= e2[i];
141 //s3[i]= e3[i];
142
143 -}
144
145 //calculating average stress in the specimen
146
147
148 for(int i = 0; i < 100; ++i)
149
150 {
151     s_AVG[i] = (s1[i]-s2[i]+s3[i]) / (2*TEST_PROFILE[4]);
152
153 -}
154
155 // calculating average strain rate in the specimen
156
157 for(int i = 0; i < 100; ++i)
158
159 {
160
161     de_s[i] = (s1[i]+s2[i]-s3[i])/((TEST_PROFILE[2]*TEST_PROFILE[1]*TEST_PROFILE[3]));
162 -}
163
164
165 //calculating average strain in the specimen
166 //simply use Riemann sum with the average strain rates in the specimen, dt = TEST_PROFILE[5]
167 // we assume time slot between strain gage readings is very small -> 0
168
169 SUM = 0;
170 e_s[0] = 0;
171
172
173 for(int i = 1; i < 100; ++i)
174
175 {
176     SUM = SUM+de_s[i]*TEST_PROFILE[5];
177     e_s[i] = SUM;
178 -}
179
180
181 // write results back to files for postprocessing
182
183
184 //Average stress in the specimen to file
185 ofstream outfile1;
186 outfile1.open("stress.txt");
187
188 //Average strain rate in the specimen to file
189 ofstream outfile2;
190 outfile2.open("strainrate.txt");
191
192 //Average strain in the specimen to file
193 ofstream outfile3;
194 outfile3.open("strain.txt");
195
196
197 //writing the files
198 for(int i = 1; i < 100; ++i)
199 {
200     outfile1<<s_AVG[i]<<endl;
201     outfile2<<de_s[i]<<endl;
202     outfile3<<e_s[i]<<endl;
203 -}
204
205
206 //closing files
207
208 outfile1.close();
209 outfile2.close();
210 outfile3.close();
211 }

```