



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΜΣ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

## «Μελέτη αντοχής αεροναυπηγικών κατασκευών αποτελούμενων από σύνθετα υλικά»

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΧΡΗΣΤΟΥ ΔΗΜΟΥ**

**Επιβλέπων:**

**Δρ. Αιμίλιος Σιδερίδης**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα, Ιούνιος 2017**



*...στην Πολεμική Αεροπορία,  
για την ευκαιρία που μου έδωσε...*



## Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	A-7
INTRODUCTION.....	A-9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Σύνθετα Υλικά .....	1
1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών.....	2
1.2.1 Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites) .....	3
1.2.2 Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) .....	3
1.2.3 Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites / laminates).....	3
1.3 Ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά (fiber-metal laminates/FMLs ) .....	4
1.3.1 Πλεονεκτήματα των FMLs.....	6
1.4 Υλικό GLARE (GLAss REinforced FML).....	8
1.4.1 Ονοματολογία και βασικοί τύποι του GLARE.....	9
1.4.2 Κατασκευή του GLARE .....	10
1.4.3 Μηχανικές ιδιότητες του GLARE.....	12
1.5 Αντοχή σε κρούση των FMLs.....	19
1.5.1 Πειραματικές μελέτες της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs.....	20
1.5.1.1 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης & φορτίου-χρόνου.....	22
1.5.1.2 Κριτήρια εκτίμησης κρουστικής αστοχίας. ....	24
1.5.2 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με το υλικό.....	24
1.5.3 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με τις συνθήκες κρούσης.....	31
1.6 Προσομοίωση της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs. ....	36
1.6.1 Σχεδόν στατική διείδυση.....	36
1.6.2 Κρούση χαμηλής ταχύτητας.....	37
1.6.3 Κρούση υψηλών ταχυτήτων.....	39
1.7 Πείραμα βαλλιστικής κρούσης υψηλής ταχύτητας .....	41
1.8 Αριθμητική Προσομοίωση με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων .....	46
2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΒΑΛΛΙΣΤΙΚΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ FML.....	51
2.1 Γενικά.....	51

2.2	Μοντέλο Johnson-Cook .....	51
2.2.1	Εφαρμογές μοντέλου Johnson-Cook .....	51
2.2.2	Λεπτομερής ανάλυση καταστατικού μοντέλου Johnson-Cook. ....	52
2.3	Μοντέλο Chang-Chang .....	57
2.3.1	Εφαρμογές μοντέλου Chang-Chang .....	57
2.3.2	Λεπτομερής ανάλυση μοντέλου Chang-Chang .....	58
2.4	Χρησιμοποιηθέντα Μοντέλα Υλικών .....	60
3.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ .....	61
3.1	Φυσικό πρόβλημα .....	61
3.2	Σχεδίαση Μοντέλου .....	62
3.2.1	Επιλογή πεπερασμένου στοιχείου .....	63
3.2.2	Επιλογή μοντέλου υλικού .....	63
3.2.2.1	Μοντέλο υλικού βλήματος.....	64
3.2.2.2	Μοντέλο υλικού στρώσεων αλουμινίου.....	64
3.2.2.3	Μοντέλο υλικού στρώσεων σύνθετου υλικού .....	65
3.2.3	Σχεδίαση Γεωμετρίας.....	66
3.2.4	Διακριτοποίηση (meshing).....	69
3.2.4.1	Διακριτοποίηση βλήματος .....	70
3.2.4.2	Διακριτοποίηση πλάκας αλουμινίου .....	71
3.2.4.3	Διακριτοποίηση πλάκας GLARE.....	71
3.2.4.4	Επαλήθευση καταλληλότητας διακριτοποίησης μέσω της ενέργειας Hourglass.....	72
3.2.5	Προσδιορισμός Ιδιοτήτων Επαφών (Contact definitions) .....	73
3.2.5.1	Επαφή βλήμα/στρώση .....	74
3.2.5.2	Επαφή στρώση/στρώση .....	75
3.2.5.3	Υπολογισμός δυνάμεων επαφής.....	76
3.2.5.4	Ενέργεια ολίσθησης (sliding energy) .....	76
3.3	Προσδιορισμός φορτίων και επίλυση.....	77
3.3.1	Προσδιορισμός φορτίων σε μοντέλο πλήρους γεωμετρίας .....	77
3.3.2	Προσδιορισμός φορτίων σε μοντέλο γεωμετρίας 1/4 .....	78
3.4	Θεωρητική ανάλυση παραμέτρων LS-DYNA .....	79
3.4.1	Χρονικό βήμα (Time step).....	79

3.4.2	Χρονική Ολοκλήρωση (Time Integration) .....	83
4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	89
4.1	Γενικά.....	89
4.2	Μοντελοποίηση πλακών .....	90
4.2.1	Μοντελοποίηση GLARE πάχους 0.1in .....	90
4.2.2	Μοντελοποίηση GLARE πάχους 0.076in.....	90
4.2.3	Μοντελοποίηση GLARE πάχους 0.06in.....	90
4.2.4	Μοντελοποίηση πλάκας Al 2024-T3 πάχους 3.2mm .....	91
4.2.5	Μοντελοποίηση πλάκας Al 2024-T3 πάχους 1.6mm .....	91
4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων και μοντελοποίησης ANSYS/LS-DYNA .....	92
4.3.1	Σύγκριση βαλλιστικών ορίων .....	92
4.3.2	Σύγκριση διαγραμμάτων μοντελοποίησης ANSYS/LS-DYNA και μονοβάθμιου συστήματος μάζας-ελατηρίου των Hoo Fatt et al. [38] .....	94
4.3.3	Οπτική σύγκριση.....	99
5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ GLARE ΙΣΟΥ ΠΑΧΟΥΣ .....	101
5.1	Γενικά.....	101
5.2	Μοντελοποίηση πλακών - Αποτελέσματα.....	102
5.2.1	Πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5 .....	102
5.2.2	GLARE 2A-4/3-0.31 .....	110
5.2.3	GLARE 3 3/2-0.5 .....	112
5.2.4	GLARE 4A-3/2-0.42 .....	114
5.2.5	GLARE 5-3/2-0.33.....	116
5.2.6	GLARE 3-4/3-0.31.....	118
5.2.7	GLARE 4A-4/3-0.22 .....	120
5.2.8	GLARE 5-2/1-0.75.....	122
5.2.9	Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 2mm .....	124
5.3	Σχολιασμός - Συμπεράσματα .....	126
5.3.1	Μελέτη αποτελεσμάτων σε περιβάλλον LS-DYNA .....	126
5.3.2	Συγκριτικά Διαγράμματα .....	130

5.3.3	Επίδραση του αριθμού στρώσεων AI & GE στο βαλλιστικό όριο .....	134
5.3.4	Επίδραση του αριθμού στρώσεων AI & GE στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E.....	135
5.3.5	Επίδραση του MVF στο βαλλιστικό όριο .....	136
5.3.6	Επίδραση MVF στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E.....	137
5.3.7	Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στο βαλλιστικό όριο .....	138
5.3.8	Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E .....	139
5.3.9	Βαλλιστικό όριο και ειδικές ενέργειες.....	139
5.3.10	Σύνοψη.....	140
6.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ GLARE ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ AI.....	141
6.1	Γενικά.....	141
6.2	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 .....	142
6.2.1	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος AI 2024-T351 .....	142
6.2.2	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος AI 2024-O.....	144
6.2.3	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος AI 6061-T6 .....	146
6.2.4	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος AI 7075-T6 .....	147
6.2.5	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος AI 7039 .....	149
6.2.6	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος AI 2024-T3 .....	151
6.3	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048.....	152
6.3.1	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος AI 2024-T351 .....	152
6.3.2	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος AI 2024-O.....	154
6.3.3	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος AI 6061-T6 .....	156
6.3.4	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος AI 7075-T6 .....	157
6.3.5	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος AI 7039 .....	159
6.3.6	Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος AI 2024-T3 .....	161
6.4	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 .....	162
6.4.1	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος AI 2024-T351 .....	163
6.4.2	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος AI 2024-O.....	164
6.4.3	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος AI 6061-T6 .....	166

6.4.4	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6 .....	168
6.4.5	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039 .....	170
6.4.6	Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3 .....	172
6.5	Πλάκα Al πάχους 3.2mm .....	173
6.5.1	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351 .....	173
6.5.2	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O .....	175
6.5.3	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 6061-T6 .....	177
6.5.4	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6 .....	178
6.5.5	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039 .....	180
6.5.6	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3 .....	182
6.6	Πλάκα Al πάχους 1.6mm .....	183
6.6.1	Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351 .....	183
6.6.2	Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O .....	185
6.6.3	Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 6061-T6 .....	187
6.6.4	Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6 .....	189
6.6.5	Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039 .....	191
6.6.6	Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T3 .....	193
6.7	Σχολιασμός - Συμπεράσματα .....	194
6.7.1	Γενικά .....	194
6.7.2	Συνδυαστικά Διαγράμματα με μεταβλητή το κράμα Al .....	195
6.7.2.1	Πλάκα GLARE 3/2-0.508 .....	195
6.7.2.2	Πλάκα GLARE 3/2-0.3048 .....	198
6.7.2.3	Πλάκα GLARE 2/1-0.508 .....	201
6.7.2.4	Πλάκα Al πάχους 3.2mm .....	204
6.7.2.5	Πλάκα Al πάχους 1.6mm .....	207
6.7.3	Συνδυαστικά Διαγράμματα με μεταβλητή τη διαμόρφωση της πλάκας .....	210
6.7.3.1	Κράμα Al 2024-O .....	210
6.7.3.2	Κράμα Al 2024-T351 .....	214
6.7.3.3	Κράμα Al 6061-T6 .....	217
6.7.3.4	Κράμα Al 7039 .....	220

6.7.3.5	Κράμα Al 7075-T6 .....	223
6.7.3.6	Κράμα Al 2024-T3 .....	226
6.7.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	229
6.7.4.1	Γενικά .....	229
6.7.4.2	Επίδραση της δομής των πλακών .....	230
6.7.4.3	Επίδραση του κράματος αλουμινίου .....	234
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		239

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα σύνθετα υλικά συνιστούν μία αποτελεσματική λύση στην αναζήτηση υλικών με ιδιαίτερους συνδυασμούς ιδιοτήτων που απαιτούνται από τις σύγχρονες τεχνολογίες, συνδυασμούς τους οποίους, δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τα συμβατικά υλικά (μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή, κράματα κτλ.). Τα ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά (Fiber Metal Laminates - FMLs) αποτελούν μία από τις πλέον σύγχρονες κατηγορίες των σύνθετων υλικών που αναπτύσσονται ραγδαία. Ένα από τα σπουδαιότερα και από τα πλέον αντιπροσωπευτικά υλικά της κατηγορίας των FMLs, είναι το GLARE (Glass Reinforced), που απαρτίζεται από διαδοχικές εναλλασσόμενες στρώσεις λεπτών πλακών αλουμινίου (συνήθως 2024-T3) και λεπτών στρώσεων σύνθετου υλικού (συνήθως ενισχυμένου με ίνες γυαλιού τύπου S2-glass).

Το GLARE αποτελεί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ένα εξαιρετικό κατασκευαστικό υλικό που απαντάται κυρίως σε αεροναυπηγικές εφαρμογές, με πολύ καλές ιδιότητες, όπως μεγάλη αντοχή σε κόπωση, χαμηλό ειδικό βάρος, εξαιρετική ανθεκτικότητα στην υγρασία και σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, μεγάλη αντοχή σε συνθήκες φλόγας και σε εκρήξεις, πολύ καλή κρουστική συμπεριφορά κτλ.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς λεπτών, πακτωμένων, τετραγωνικών πλακών (κατασκευασμένων από διαφορετικούς τύπους GLARE εμπορικά διαθέσιμων, αλλά και μη), που υπόκεινται σε κάθετες βαλλιστικές κρούσεις από κυλινδρικό βλήμα επίπεδης μετωπικής επιφάνειας. Η συγκεκριμένη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς πραγματοποιείται μέσω της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (με χρήση του εμπορικού προγράμματος LS-DYNA/ANSYS). Αρχικά, προσομοιώνεται η συμπεριφορά τριών διαφορετικών τύπων GLARE και δύο πλακών μονολιθικού αλουμινίου και γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων που είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία για τα υλικά αυτά. Από την σύγκριση διαπιστώνεται συμφωνία αποτελεσμάτων σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό και με αφορμή το γεγονός αυτό, η ανάλυση επεκτείνεται αφενός στη μελέτη της συμπεριφοράς μίας σειράς τύπων GLARE, όπου όλες οι πλάκες έχουν ίσο πάχος και αφετέρου στη μελέτη μίας σειράς τύπων GLARE όπου στις μεταλλικές στρώσεις χρησιμοποιούνται πέντε κράματα αλουμινίου διαφορετικά από το συνηθισμένο 2024-T3.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δύναται να παράσχουν σε ερευνητές και μηχανικούς, που επικεντρώνονται στην αντίσταση σε βαλλιστική κρούση πλακών GLARE και πλακών αλουμινίου μία χρήσιμη βοήθεια όσον αφορά τη μεταβολή της κρουστικής συμπεριφοράς των συγκεκριμένων πλακών, ανάλογα με τη διαφορετική γεωμετρία ή/και το διαφορετικό τύπο GLARE.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Αιμίλιο Σιδερίδη, για τις εύστοχες και καθοριστικές κατευθύνσεις που με ευγενή και διακριτικό τρόπο μου παρείχε, κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Γεώργιο Μπικάκη για τις πολύ σημαντικές επιστημονικές γνώσεις και πληροφορίες που πρόθυμα μου προσέφερε, για την υπομονή του, και γενικά για την άσφογη συνεργασία που είχαμε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας.

Αποτελεί τιμή για μένα η συνεργασία μου με τους ανωτέρω, όπως επίσης αποτελεί τιμή για μένα που αξιώθηκα να διαβώ στα “ανηφορικά ακαδημαϊκά μονοπάτια” του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## INTRODUCTION

Composite materials are an effective solution to the search for materials with special property combinations required by modern technologies, combinations which cannot be satisfied by conventional materials (metals, ceramics, polymers, alloys etc.). Fibre-metal multilayer materials (Fibre Metal Laminates – FMLs) are one of the most modern categories of composite materials developing rapidly. One of the most important and most representative materials of the FML category is GLARE (Glass Reinforced), consisting of successive alternating layers of thin aluminium plates (usually 2024-T3) and thin layers of a composite material (usually reinforced with fibreglass type S2-glass).

GLARE is, according to the bibliography, an exceptional structural material found mostly in aeronautical applications, with very good properties, such great resistance to fatigue, low specific weight, exceptional resistance to humidity and corrosive environments, great resistance to flame conditions and explosions, very good impact behaviour etc.

The present postgraduate thesis focusses on the study of the dynamic behaviour of thin, embedded, square plates (made of different, commercially or non-commercially, available GLARE types), subjected to perpendicular ballistic impacts by a cylindrical flat frontal surface missile. The particular study of the dynamic behaviour is carried out through the numerical finite element method (using the LS-DYNA/ANSYS commercial program). Initially, the behaviour of three different GLARE types and two monolithic aluminium plates is simulated, and then, a comparison is made between the simulation results and experimental results available in the bibliography for these materials. The comparison confirms a congruence of the results to quite a satisfactory degree and, on account of this fact, the analysis is extended, on the one hand, to the study of the behaviour of a series of GLARE types, where all the plates are of equal thickness, and, on the other, to the study of a series of GLARE types, where five aluminium alloys are used in the metal layers, different from the usual 2024-T3.

The results of the thesis could provide researchers and engineers, focussing on the resistance to ballistic impact of GLARE plates and aluminium plates, with useful assistance in relation to changes in the impact behaviour of the particular plates, depending on the different geometry and/or the different GLARE type.

In conclusion, I would like to thank my professor, Dr Emiliós Sideridis, for his insightful and definitive directions which he offered me in a polite and tactful way, during the undertaking of my postgraduate thesis. As well, I would extend a warm thank you to Dr Georgios Bikakis for his very important scientific knowledge and information he willingly gave me, his patience, his always immediate response to any ensuing problem, and, generally, for the excellent collaboration we shared in the last nine months in the context of the thesis.

My collaboration with the above gentlemen is an honour for me, as is my being deemed worthy to walk on the “uphill academic paths” of the National Metsovio Polytechnic School of Athens.



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σύνθετα Υλικά

Πολλές από τις σύγχρονες τεχνολογίες απαιτούν υλικά με ιδιαίτερα ασυνήθιστους συνδυασμούς ιδιοτήτων οι οποίοι δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από τα συμβατικά μέταλλα, τα κράματα μετάλλων, τα κεραμικά και τα πολυμερή υλικά. Αυτό το γεγονός είναι ιδιαίτερα αισθητό στα υλικά που απαιτούνται στην αεροδιαστημική, στην ναυπηγική και στις μεταφορές. Για παράδειγμα οι μηχανικοί αεροσκαφών αναζητούν συνεχώς δομικά υλικά τα οποία να διαθέτουν χαμηλές πυκνότητες, μεγάλη αντοχή, μεγάλη δυσκαμψία, πολύ καλή συμπεριφορά στην κρούση, μεγάλη αντοχή στην κόπωση και στην διάβρωση, και επιπλέον να μην έχουν απαγορευτικό κόστος [21]. Αυτός είναι ένας μάλλον «τρομακτικός» συνδυασμός ιδιοτήτων. Συνήθως, τα ανθεκτικά υλικά έχουν και μεγάλη πυκνότητα, ενώ η αύξηση της αντοχής ή της δυσκαμψίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής σε κρούση.

Ο συνδυασμός και το εύρος των ιδιοτήτων των υλικών έχει επεκταθεί και συνεχίζει να επεκτείνεται με την εξέλιξη των σύνθετων υλικών. Γενικά, ως σύνθετο υλικό θεωρείται κάθε πολυφασικό υλικό το οποίο διαθέτει σε μεγάλο ποσοστό τις ιδιότητες και των δύο επιμέρους φάσεων που το αποτελούν, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος συνδυασμός ιδιοτήτων τους. Έτσι, σύμφωνα με αυτή την αρχή της συνδυασμένης δράσης, καλύτερο αποτέλεσμα διαμορφώνεται με τον επιλεκτικό συνδυασμό δύο ή περισσότερων διακριτών υλικών.

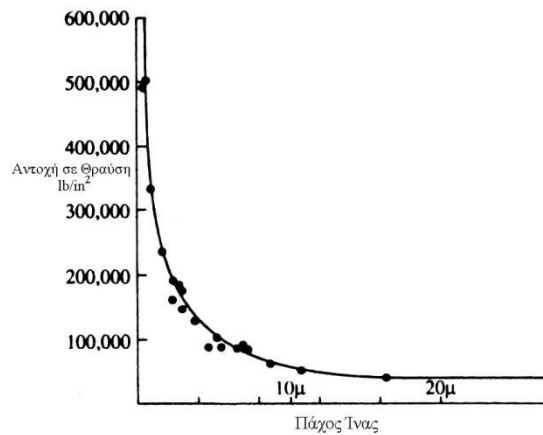
Με σκοπό την σχεδίαση σύνθετων υλικών, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί έχουν συνδυάσει με ιδιοφυή τρόπο διάφορα μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή για να παράγουν μία νέα γενεά υλικών. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά έχουν δημιουργηθεί με αντικειμενικό σκοπό τη βελτίωση του συνδυασμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών όπως την δυσκαμψία, την δυσθραυστότητα, αλλά και την αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένα μεγάλο ποσοστό σύνθετων υλικών αποτελείται από δύο φάσεις. Η μία από αυτές ονομάζεται μήτρα, η οποία είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση που ονομάζεται διεσπαρμένη φάση. Οι τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού αποτελούν συνάρτηση των ιδιοτήτων των συνιστωσών τους φάσεων, των σχετικών ποσοτήτων τους και της γεωμετρίας της διεσπαρμένης φάσης.

Ένα συναρπαστικό στοιχείο των σύνθετων υλικών είναι ότι κάνοντας απλά μακροσκοπικό συνδυασμό υλικών (δηλαδή χωρίς να εμπλέκεται η χημεία και να παράγονται νέες ενώσεις) επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός υλικού πολύ καλύτερου σε σχέση με τα αρχικά. Επιπλέον, τα ίδια υλικά μπορούν να αποκτήσουν βελτιωμένες ιδιότητες, με την απάντηση σε αυτό το γρίφο να δίνει, πολύ πριν την ανακάλυψη της σύγχρονης μορφής των συνθέτων υλικών, ο Griffith, θεωρώντας ως παράδειγμα την ενίσχυση με υαλικές ίνες. Συγκεκριμένα, οι ίνες μεγάλου μήκους και μικρής διατομής εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη ακαμψία και αντοχή στη θραύση απ' ό,τι οι ίνες με μεγαλύτερες διατομές [3], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

Η αντοχή σε θραύση του κοινού γυαλιού δεν ξεπερνάει τα 350 MPa, τη στιγμή που οι εμπορικά διαθέσιμες ίνες γυαλιού εμφανίζουν αντοχή σε θραύση της τάξης των 1.500 MPa, ενώ σε εργαστηριακό περιβάλλον έχουν κατασκευασθεί ίνες με αντοχή σε θραύση μεγαλύτερες

από 4.000 MPa. Επομένως, η διατομή μιας ίνας αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για τον προσδιορισμό της αντοχής του υλικού και λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

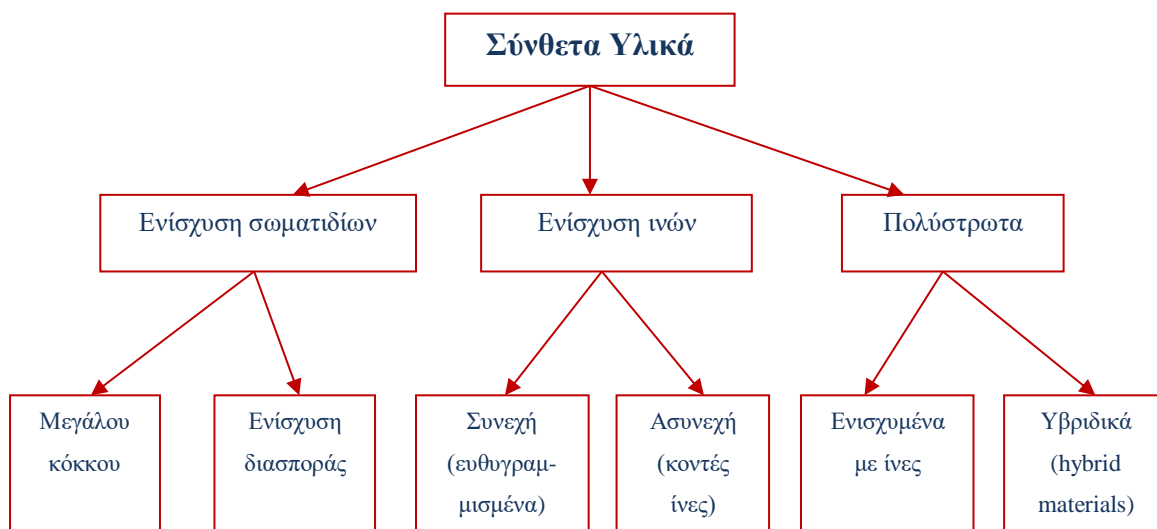
Το παράδοξο αυτό οφείλεται στην ύπαρξη τελειότερης δομής (δηλαδή με λιγότερες μικρορωγμές) και στον προσανατολισμό των κρυστάλλων του υλικού κατά διεύθυνση παράλληλη με το διαμήκη άξονα της ίνας. Αντίθετα, στην ακατέργαστη μορφή, οι κρύσταλλοι έχουν τυχαία διεύθυνση, ενώ παρουσιάζονται περισσότερες εσωτερικές ατέλειες, οι οποίες στη συνέχεια θα αποτελέσουν σημεία έναρξης ρωγμών. Επιπλέον η αρχική ρωγμή επηρεάζει μεμονωμένες ίνες, άρα δεν υπάρχουν τοπικές εξάρσεις των τάσεων, όπως συμβαίνει με τα ομογενή και ισότροπα υλικά (π.χ. μέταλλα).



Σχήμα 1.1. Αντοχή σε θραύση ίνας γυαλιού ως προς το πάχος της. [3]

## 1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών.

Ένας απλός τρόπος για την ταξινόμηση των σύνθετων υλικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, και αποτελείται από τρεις μεγάλες κατηγορίες : Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites), Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites), και Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites / laminates) [1], [2].



Σχήμα 1.2. Κατάταξη σύνθετων υλικών. [1]

### 1.2.1 Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites)

Τα ινώδη σύνθετα υλικά [21] αποτελούνται από τη μήτρα (matrix) μέσα στην οποία βρίσκονται ίνες (fibers) από άλλο υλικό. Οι ίνες μπορεί να έχουν τυχαίο προσανατολισμό ή να είναι πεπλεγμένες με συγκεκριμένο τρόπο και προσανατολισμό. Η μήτρα συνήθως αποτελείται από κάποιο πολυμερές υλικό το οποίο συνδέει, προστατεύει και στηρίζει τις ίνες ενώ συμβάλλει στη μεταφορά φορτίων μεταξύ σπασμένων ινών. Οι ίνες αποτελούνται από διάφορα υλικά όπως γυαλί, άνθρακα, γραφίτη κτλ. Επίσης οι ίνες διαθέτουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό κατά την έννοια του μήκους τους και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

### 1.2.2 Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites)

Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων αποτελούνται από τη μήτρα μέσα στην οποία βρίσκονται σωματίδια (particulates) από άλλο υλικό. Τα σωματίδια μπορεί να είναι σφαιρίδια, νιφάδες (flakes) κτλ. Τόσο η μήτρα όσο και τα σωματίδια μπορεί να είναι μεταλλικά ή μη μεταλλικά υλικά σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

### 1.2.3 Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites / laminates)

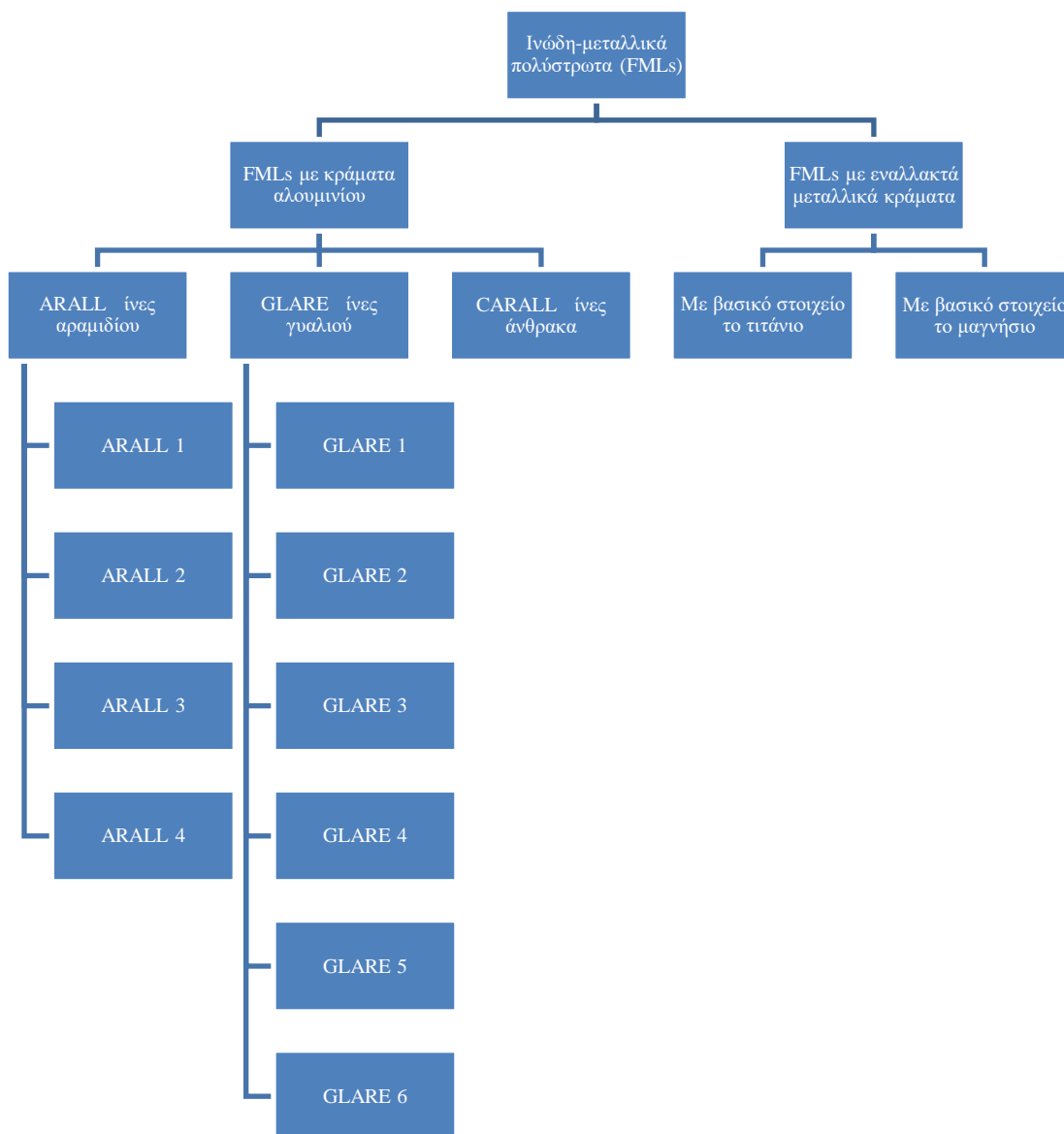
Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερες στρώσεις (laminate) υλικών οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους. Η κατασκευή πολύστρωτων υλικών αποσκοπεί στο συνδυασμό των καλύτερων ιδιοτήτων που διαθέτει η κάθε στρώση, έτσι ώστε να επιτευχθεί ένα σύνθετο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες. Μια βασική υποκατηγορία πολύστρωτων σύνθετων υλικών αποτελούν τα ενισχυμένα με ίνες πολύστρωτα σύνθετα υλικά (fiber-reinforced laminated composite materials). Αυτά αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις σύνθετων υλικών που έχουν κολληθεί μεταξύ τους. Η κάθε στρώση αποτελείται από ένα επίπεδο (με μικρό πάχος) ινώδες σύνθετο υλικό του οποίου οι ίνες έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό και διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση του πάχους.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν κατασκευασθεί σύγχρονα πολύστρωτα υλικά τα οποία δεν ανήκουν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για υβριδικά υλικά (hybrid materials) τα οποία αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις μεταλλικών πλακών και στρώσεις ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών οι οποίες εναλλάσσονται μεταξύ τους. Οι στρώσεις αυτές, κολλημένες μεταξύ τους, αποτελούν το υβριδικό πολύστρωτο. Τα υβριδικά σύνθετα υλικά της νέας κατηγορίας ονομάζονται ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα (fiber-metal laminates), και η τυπική δομή τους φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3. Τυπική δομή των FMLs. [119]

### 1.3 Ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά (fiber-metal laminates/FMLs )

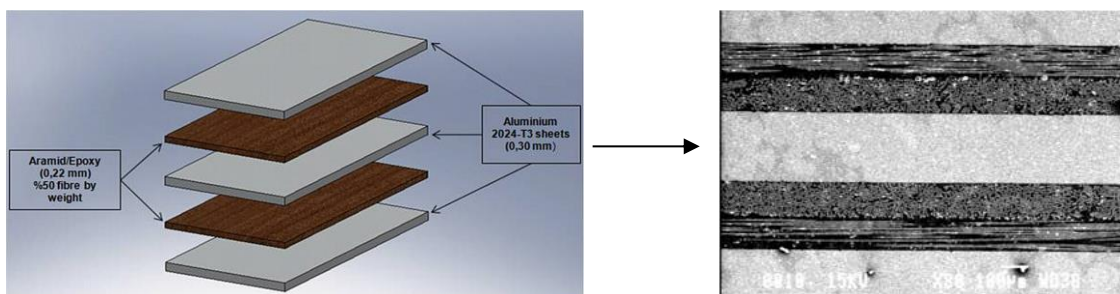


Σχήμα 1.4. Κατηγοριοποίηση των FMLs. [4]

Στα τέλη της δεκαετίας του '70, γεννήθηκε η ιδέα της αξιοποίησης των δύο βασικότερων υλικών που χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο σε αεροναυπηγικές εφαρμογές, των κραμάτων αλουμινίου και των ινώδων σύνθετων υλικών, με σκοπό την δημιουργία ενός υβριδικού σύνθετου υλικού το οποίο θα ξεπερνούσε τα μειονεκτήματα των «γονιών» του, όπως τη μειωμένη αντοχή σε κόπωση του αλουμινίου, τη χαμηλή αντοχή σε κρούση αλλά και τη μικρή παραμένουσα αντοχή που έχουν τα ινώδη σύνθετα [4]. Τότε, στο Delft University of Technology, ανακαλύφθηκε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών λόγω φαινομένου κόπωσης, σε κολλημένα φύλλα μετάλλου σε στρώσεις (μορφή laminate), δύναται να μειωθεί δραστικά όταν τα φύλλα μετάλλου είναι λεπτού πάχους εν συγκρίσει με ένα παχύ συμπαγές μονολιθικό φύλλο μετάλλου. Ειδικά στην περίπτωση που η ρωγμή ξεκινά από μία μεμονωμένη στρώση, τότε τα επιμέρους κολλημένα στρώματα δρουν ως εμπόδια στις ρωγμές και τις απομονώνουν. Έτσι τα περιβάλλοντα φύλλα διατηρούν την ακεραιότητά τους μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το ρυθμό διάδοσης των ρωγμών στο υλικό.

Τα ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά (FMLs) μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με το Σχήμα 1.4 [4]. Τα περισσότερο εμπορικά διαθέσιμα FMLs μέχρι σήμερα είναι το ARALL 1 (Aramid-fibre Reinforced ALuminium Laminate), που βασίζεται στις ίνες αραμιδίου, και το GLARE 1 (GLASS-fibre REinforced aluminium laminate) που βασίζεται σε υψηλής αντοχής ίνες γυαλιού.

Το 1978 πολλές έρευνες πραγματοποιήθηκαν από το αεροναυπηγικό τμήμα του Delft University of Technology (DUT), επικεντρωμένες στην αύξηση της αντοχής κόπωσης των κραμάτων αλουμινίου. Η βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση επιτεύχθηκε εισάγοντας υψηλής αντοχής ίνες αραμιδίου ανάμεσα σε στρώσεις φύλλων αλουμινίου. Ως αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας ήταν η δημιουργία του ARALL, του πρώτου ινώδους- μεταλλικού πολυστρωματικού υλικού που αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις λεπτών πλακών κραμάτων αλουμινίου ( $0.2 \pm 0.4$  mm), και μονοαξονικές ή διαξονικές προεμποτισμένες ίνες αραμιδίου [5]. Το 1984 ξεκίνησε (βάσει δύο παγκόσμιων πατέντων) μία πιλοτική παραγωγή από την βιομηχανία ALCOA, τεσσάρων διαφορετικών τύπων τυποποιημένου ARALL [6]. Αρχικά είχε τυποποιηθεί ο τύπος ARALL 1 που χρησιμοποιούσε στις στρώσεις του αλουμίνιο 7075, και ο τύπος ARALL 2, που χρησιμοποιούσε αντίστοιχα στις στρώσεις του αλουμίνιο 2024 [7]. Η χαρακτηριστική δομή του ARALL φαίνεται στο Σχήμα 1.5.

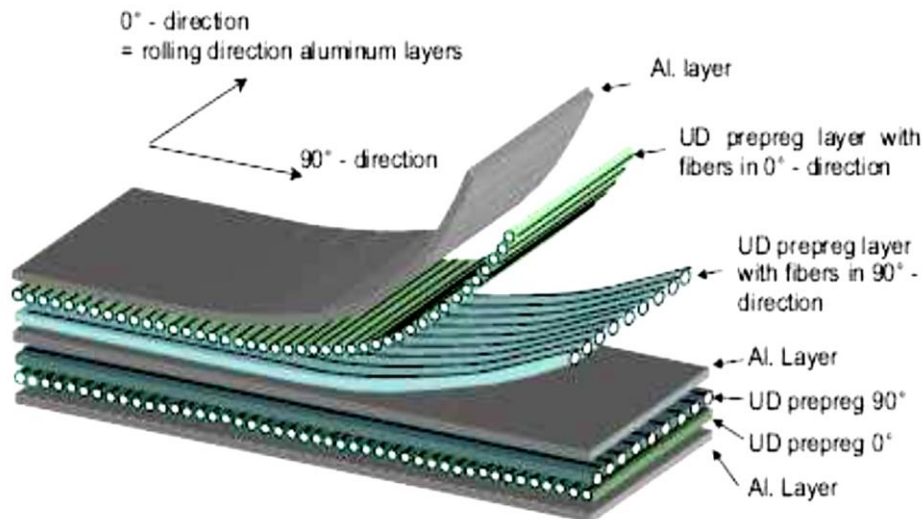


Σχήμα 1.5. Η δομή του ARALL. [4]

Αργότερα αντικαταστάθηκαν από το ίδιο αεροναυπηγικό τμήμα του DUT οι ίνες αραμιδίου από ίνες άνθρακα που είναι κατά πολύ πιο ανθεκτικές [8]. Έτσι δημιουργήθηκε ένα νέο υλικό, το CARALL (CARbon Reinforced ALuminium Laminate). Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν πάνω σε αυτό το νέο υλικό παρουσίασαν θραύση των ινών κατά τη διάρκεια διαφόρων τεστ κόπωσης με υψηλά επίπεδα εφαρμοζόμενων τάσεων (συνθήκες εξομοίωσης πτήσεων), γεγονός που οδηγούσε σε χαμηλή απόδοση του υλικού στο φαινόμενο της κόπωσης. Η περιορισμένη παραμόρφωση αστοχίας του CARALL (0.5-2.0%), όπως και η γαλβανική διάβρωση που

παρουσιάζεται ανάμεσα στις ίνες άνθρακα και στο αλουμίνιο μέσα σε περιβάλλον υγρασίας, θεωρούνται δύο βασικά μειονεκτήματα του υπόψη υλικού.

Το 1990 πραγματοποιείται με σπουδαία επιτυχία μία ακόμα προσπάθεια βελτίωσης του πολύστρωτου ARALL, αντικαθιστώντας τις ίνες αραμιδίου με ίνες γυαλιού [6]. Έτσι δημιουργείται το υλικό GLARE (GLASS REINFORCED ALUMINIUM LAMINATE) και με συνεργασία των βιομηχανιών AKZO και ALCOA ξεκινά το 1991 η παραγωγή του GLARE για εμπορικούς σκοπούς [7]. Η χαρακτηριστική δομή του GLARE φαίνεται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6. Τυπική δομή GLARE. [30]

### 1.3.1 Πλεονεκτήματα των FMLs.

Τα ινώδη-μεταλλικά πολυστρωματικά υλικά παρουσιάζουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα απλά σύνθετα υλικά και τα μονολιθικά κράματα αλουμινίου [9]. Πιο συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα των FMLs αναλύονται παρακάτω :

#### Μηχανική συμπεριφορά.

- Υψηλή αντοχή σε κόπωση. Επιτυγχάνεται χάρη στο φαινόμενο της γεφύρωσης των ινών (το οποίο αναλύεται σε επόμενη παράγραφο) το οποίο περιορίζει το άνοιγμα της ρωγμής. Τα FMLs παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά στη κόπωση [10],[11].

- Υψηλή αντοχή. Επειδή τα FMLs είναι υβριδικά υλικά που η δομή τους βασίζεται σε λεπτά φύλλα μετάλλου και σε λεπτές στρώσεις ινωδών πολυμερικών υλικών. Ο συνδυασμός των ανωτέρω προσδίδει στα FMLs μεγάλη αντοχή λόγω των μετάλλων και μεγάλη ακαμψία και αντοχή λόγω της ενίσχυσης των ινών. Τα FMLs αποτελούν δομικά υλικά με μεγάλη αντοχή [12],[10].

- Υψηλή αντοχή θραύσης. Σύμφωνα με μελέτες [13] έχει αποδειχτεί ότι τα FMLs διαθέτουν μεγαλύτερη αντοχή θραύσης σε σχέση με την αντίστοιχη των υλικών που το αποτελούν. Βάσει λοιπόν αυτής της συμπεριφοράς, αλλά και του γεγονότος των χαμηλών ρυθμών διάδοσης ρωγμών λόγω κόπωσης, τα υλικά αυτά ανάγονται σε πολύ ελκυστική επιλογή για ένα μεγάλο εύρος δομικών κατασκευών.

- Υψηλή αντοχή σε κρούση. Σε αντίθεση με τα σύνθετα υλικά, η αντοχή σε αστοχία των FMLs είναι συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών κραμάτων αλουμινίου, (σε υψηλά επίπεδα κρουστικής ενέργειας παρατηρείται ο ίδιος τύπος βλάβης και παρόμοια πλαστική

παραμόρφωση με αυτά). Η παραμόρφωση λόγω της κρούσης είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των FMLs, ειδικά όταν συγκρίνεται με διάφορα άλλα σύνθετα υλικά, καθώς η οπτική ένδειξη που υπάρχει, αυξάνει πάρα πολύ την ικανότητα σωστής επιθεώρησης και την δυνατότητα εντοπισμού της βλάβης. Έτσι η χρήση των FMLs επιτρέπει την χρήση επισκευαστικών κριτηρίων και τεχνικών [14],[15].

- Υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (δυσθραυστότητα). Μελέτες που έχουν γίνει [16],[17] έχουν αποδείξει ότι τα FMLs διαθέτουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας λόγω της τοπικής θραύσης των ινών, και της διατμητικής αστοχίας (αποκολλήσεις) ανάμεσα στις στρώσεις.

#### Φυσικές ιδιότητες.

- Χαμηλή πυκνότητα. Χάρη στην εποξική μήτρα και στα χαμηλής πυκνότητας φύλλα αλουμινίου, τα FMLs αποτελούν ένα ελαφρύ δομικό υλικό σε σύγκριση με άλλα συμβατικά υλικά [6].

#### Ανθεκτικότητα.

- Εξαιρετική αντίσταση στην υγρασία. Η απορρόφηση υγρασίας είναι βραδύτερη στα FMLs σε σχέση με τα λοιπά πολυμερικά σύνθετα υλικά, ακόμα και σε πολύ ακραίες συνθήκες λόγω των εξωτερικών στρωμάτων αλουμινίου που λειτουργούν ως φράγμα παρεμποδίζοντας την υγρασία να εισχωρήσει στο εσωτερικό του υλικού. Επιπλέον, τα προεμποτισμένα στρώματα είναι ικανά να δράσουν ως εμπόδια στη υγρασία ανάμεσα στα λοιπά στρώματα αλουμινίου εντός του FML [11].

- Εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η εξαιρετική άνθυγρη συμπεριφορά των FMLs, σε συνδυασμό με τη μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση που διαθέτουν οι πολυμερικές προεμποτισμένες στρώσεις ινών, τα καθιστούν πολύ ανθεκτικά σε διαβρωτικά περιβάλλοντα [6],[14],[18],[11].

- Καθυστερήση στο ρυθμό υποβάθμισης υλικού. Τα FMLs έχουν εξαιρετική (όπως προαναφέρθηκε) αντοχή στην υγρασία, και στη διάβρωση, οπότε η υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού ως αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών συνθηκών είναι πολύ βραδύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη των μεταλλικών ή κλασικών σύνθετων υλικών [10].

#### Ασφάλεια.

- Αντοχή στη φωτιά. Το υψηλό σημείο τήξης των ινών των FMLs, αποτρέπει την εισχώρηση της φωτιάς στα εσωτερικά στρώματα του υλικού π.χ. οι ίνες γυαλιού στα πολυστρωματικά υλικά GLARE μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 1100°C. Έτσι η αντοχή σε φλόγα των FMLs είναι κατά πολύ καλύτερη σε σχέση με τα μονολιθικά κράματα αλουμινίου, και εξαρτάται από το σημείο τήξης των ινών που το αποτελούν. Πλέον πολλά FMLs χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της ατράκτου διαφόρων αεροσκαφών. Με την πολύ καλή συμπεριφορά τους απέναντι στη φλόγα, τα FMLs παρέχουν π.χ. τον απαιτούμενο χρόνο (90sec) για την ασφαλή εκκένωση του αεροσκάφους από τους επιβάτες [14],[19].

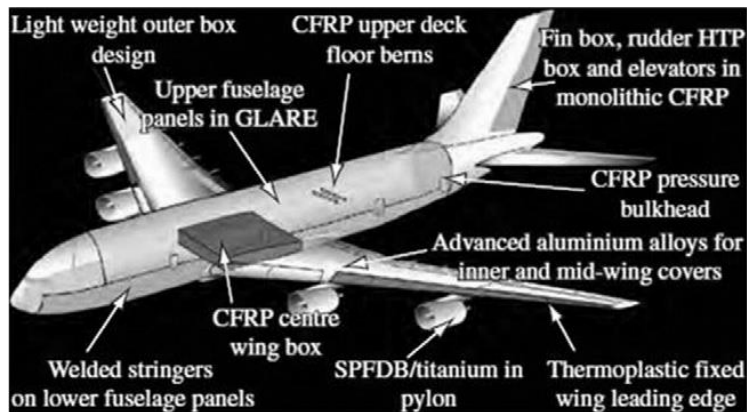
#### Μείωση κόστους

- Η χρήση FMLs σε μια κατασκευή παρέχει δραστική μείωση του βάρους αυτής σε σχέση με τη χρήση συμβατικών μεταλλικών κραμάτων. Επιπλέον, ο αριθμός των εξαρτημάτων που απαιτούνται για να συνθέσουν μία κατασκευή μπορεί να είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με αυτόν που θα απαιτούνταν αν η κατασκευή πραγματοποιούνταν από συμβατικά μεταλλικά υλικά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εξόδων παραγωγής, που σε ορισμένες

περιπτώσεις μπορεί να αντισταθμίσει την υψηλή αρχική τιμή που έχουν επί του παρόντος τα FMLs.

- Χάρη στην υψηλή αντοχή σε κόπωση των FMLs, οι κατασκευές που είναι φτιαγμένες από αυτά χρειάζονται λιγότερες επισκευές, ενώ τα διαστήματα επιθεώρησης και οι κύκλοι συντήρησης αμβλύνονται. Αυτά τα πλεονεκτήματα μειώνουν δραστικά τα έξοδα συντήρησης [6].

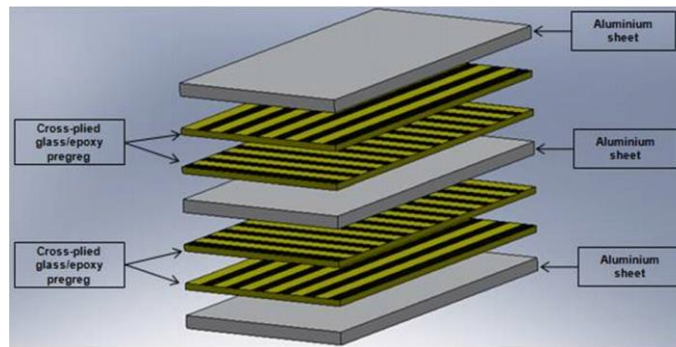
Κατόπιν των ανωτέρω καθίσταται σαφές ότι τα FMLs είναι κατάλληλα για χρήση σε πληθώρα εφαρμογών, και ειδικά σε αεροναυπηγικές κατασκευές. Ένας μεγάλος αριθμός βιομηχανιών έχουν επενδύσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών κραμάτων αλουμινίου με FMLs [10]. Σε σύγχρονα αεροσκάφη συναντώνται κατά κόρον υλικά όπως το ARALL και το GLARE, π.χ. στο Airbus A380 [12]. Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζονται τα μέρη του Airbus A380 που χρησιμοποιούνται FMLs [4], [7],[20].



Σχήμα 1.7. Χρήση FMLs στο Airbus A380. [4]

#### 1.4 Υλικό GLARE (GLAss REinforced FML).

Το GLARE όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελείται από διαδοχικές εναλλασσόμενες στρώσεις λεπτών πλακών αλουμινίου (Al) και λεπτών στρώσεων σύνθετου υλικού [1], [2]. Το αλουμίνιο είναι συνήθως κράματος 2024-T3. Οι στρώσεις του σύνθετου υλικού είναι ενισχυμένες κατά τη μία κατεύθυνση (UD) η κάθε μία με ίνες γυαλιού, συνήθως τύπου S2-glass. Η μήτρα αποτελείται από εποξική ρητίνη. Οι στρώσεις αλουμινίου και σύνθετου υλικού είναι κολλημένες μεταξύ τους με ειδική κόλλα σχηματίζοντας έτσι το πολύστρωτο υλικό. Στα Σχήματα 1.8 και 1.9 απεικονίζεται η τυπική δομή ενός πολύστρωτου GLARE το οποίο αποτελείται από τρεις στρώσεις αλουμινίου (γκρι χρώμα) και τέσσερις στρώσεις σύνθετου υλικού (πράσινο και μπλε χρώμα). Το GLARE δύναται να προκύψει σε πλήθος συνδυασμών ανάλογα με τον αριθμό στρώσεων αλουμινίου και στρώσεων σύνθετου υλικού, τον προσανατολισμό των ινών, αλλά και των παχών των στρώσεων. Η ιδιότητες του τελικού πολύστρωτου GLARE εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από όλες αυτές τις παραμέτρους.



Σχήμα 1.8. Σχηματική απεικόνιση δομής GLARE. [4]

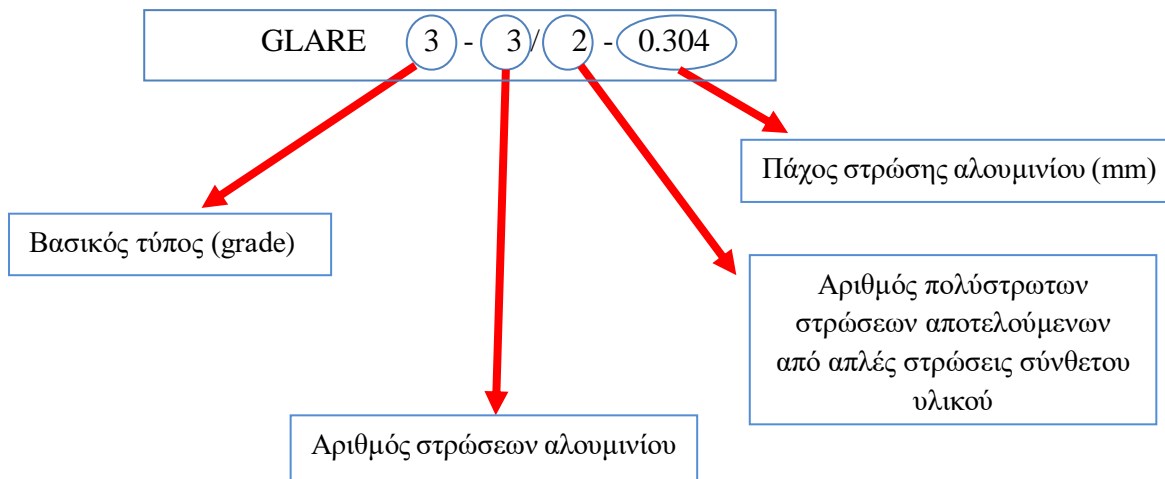


Σχήμα 1.9. Διαστρωμάτωση του GLARE 3. [65]

Καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των μηχανικών ιδιοτήτων του GLARE διαδραματίζουν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που το αποτελούν, δηλαδή του αλουμινίου και του ενισχυμένου με ίνες γυαλιού, σύνθετου υλικού. Το αλουμίνιο είναι ελαφρύ κράμα και προσφέρεται για διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση χάρη στην κρυσταλλική δομή κυβικού εδροκεντρωμένου τύπου που διαθέτει. Έτσι μπορεί να παραχθεί σε μορφή πλακών για διάφορες χρήσεις.

#### 1.4.1 Ονοματολογία και βασικοί τύποι του GLARE

Δεδομένου ότι το GLARE είναι δυνατό να κατασκευασθεί σε πολλές εκδοχές, με διαφορετικό αριθμό στρώσεων αλουμινίου, διαφορετικό κράμα αλουμινίου, διαφορετικό αριθμό στρώσεων σύνθετου υλικού, διαφορετικό τύπο γυάλινων ενισχυτικών ινών, διαφορετικό προσανατολισμό των ενισχυτικών ινών και διαφορετικό πάχος στρώσεων, έχει καθιερωθεί ένα σύστημα ονοματολογίας με το οποίο ορίζονται οι βασικότερες από τις παραμέτρους αυτές. Για παράδειγμα, αν το πολύστρωτο GLARE του Σχήματος 1.8 έχει πάχος κάθε στρώσης αλουμινίου 0.304 mm, τότε αυτό ονομάζεται GLARE 3 - 3 / 2 - 0.304.



Σχήμα 1.10. Ονοματολογία GLARE.

Παραδείγματα :

α. GLARE 4A - 3 / 2 - 0.304 έχει την παρακάτω αλληλουχία στρώσεων: [2024-T3 / 0° glass / 90° glass / 0° glass / 2024-T3 / 0° glass / 90° glass / 0° glass / 2024-T3]

β. GLARE 5 - 2 / 1 - 0.489 έχει την παρακάτω αλληλουχία στρώσεων: [2024-T3 / 0° glass / 90° glass / 90° glass / 0° glass / 2024-T3 ]

### 1.4.2 Κατασκευή του GLARE

Το πολυστρωματικό GLARE μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να αξιοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών εφαρμογών, μεταβάλλοντας ορισμένους παράγοντες, όπως το σύστημα ίνας/ρητίνης, τον τύπο του κράματος, το πάχος του κράματος, την ακολουθία των διαστρωματώσεων, τον προσανατολισμό των προεμποτισμένων ινών, και τη τεχνική κατεργασίας των επιφανειών [22]. Η πυκνότητα του GLARE εξαρτάται από το σχετικό πάχος των φύλλων αλουμινίου, καθώς και από το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στο υλικό. Σε όλες τις περιπτώσεις η πυκνότητά του είναι το λιγότερο 8% μικρότερη από την αντίστοιχη πυκνότητα του κράματος αλουμινίου.

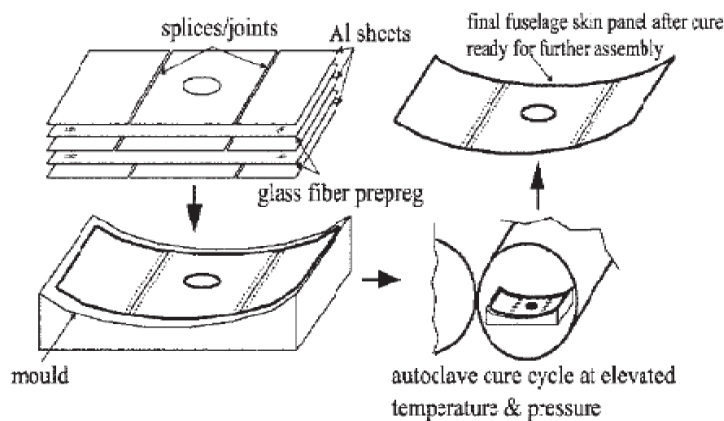
Το GLARE κατασκευάζεται με συγκόλληση απλών φύλλων μετάλλου (unclad) με προεμποτισμένες ίνες γυαλιού, χρησιμοποιώντας πίεση, ή με ποιοτικότερο τρόπο εντός θαλάμου autoclave. Προτού πραγματοποιηθεί το στάδιο της συγκόλλησης, έχει προηγηθεί το βασικής σημασίας ενδιάμεσο στάδιο της ειδικής κατεργασίας των επιφανειών των φύλλων του αλουμινίου, έτσι ώστε να αυξηθεί η ποιότητα της συμπαγούς ενώσεως με τις προεμποτισμένες ίνες. Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει καθαρισμό σε αλκαλικό διάλυμα, εμβάπτιση σε χρωμικό-σουλφορικό οξύ, ανοδίωση σε χρωμικό οξύ, και επικάλυψη με BR-127, το οποίο αποτελεί ένα τροποποιημένο εποξικό-φαινολικό συστατικό επίστρωσης με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες [4], [22]. Το σύστημα συγκόλλησης κατά το οποίο οι ίνες επικολλούνται στα φύλλα αλουμινίου, σχηματίζοντας ένα συμπαγές νέο πολυστρωτο σώμα, είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα και την απόδοση του τελικού προϊόντος.

Οι στρώσεις αλουμινίου έχουν πάχος που κυμαίνεται από 0,2mm έως 0,5mm mm για κράματα αλουμινίου 2024-T3 και από 0,3 mm έως 0,4 mm για κράματα αλουμινίου 7475-T761 [29]. Το πάχος κάθε απλής στρώσης συνθέτου υλικού εξαρτάται από τη διαδικασία παραγωγής με συνήθη τιμή 0,13 mm. Εκτός από το συνήθη τύπο S2-glass, οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού μπορεί να είναι και τύπου R-glass. Στον Πίνακα 1.1 αναγράφονται κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τους έξι (6) βασικούς τύπους GLARE που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο [29], [30]. Στους βασικούς τύπους GLARE, όλες οι στρώσεις αλουμινίου διατάσσονται έτσι ώστε οι διευθύνσεις έλασης να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Ο προσανατολισμός 0° συμπίπτει με τη διεύθυνση έλασης. Όλοι αυτοί οι βασικοί τύποι GLARE έχουν συμμετρική αλληλουχία στρώσεων, εκτός από το GLARE 3 και το GLARE 6 όταν αυτά αποτελούνται από άρτιο αριθμό στρώσεων αλουμινίου.

Grade (τύπος)	Κράμα αλουμινίου	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος στρώσης συνθέτου (mm)	Προσανατολισμός στρώσεων (°)	Προένταση (%)	Πλεονεκτήματα
1	7475-T61	0.3–0.4	0.266	0/0	0.4	αντοχή σε κόπωση, υψηλή τάση διαρροής, αντοχή σε 0°
2	[A] 2024-T3	0.2–0.5	0.266	0/0	0.0	αντοχή σε κόπωση, αντοχή σε 0°
	[B] 2024-T3	0.2–0.5	0.266	90/90	0.0	αντοχή σε κόπωση, αντοχή σε 90°
3	2024-T3	0.2–0.5	0.266	0/90	0.0	αντοχή σε κόπωση, αντοχή σε κρούση
4	[A] 2024-T3	0.2–0.5	0.266	0/90/0	0.0	αντοχή σε κόπωση, αντοχή σε 0°
	[B] 2024-T3	0.2–0.5	0.266	90/0/90	0.0	αντοχή σε κόπωση, αντοχή σε 90°
5	2024-T3	0.2–0.5	0.266	0/90/90/0	0.0	αντοχή σε κρούση
6	[A] 2024-T3	0.2–0.5	0.266	+45, -45	0.0	αντοχή σε διάτμηση, καλές ιδιότητες εκτός αξόνων
	[B] 2024-T3	0.2–0.5	0.266	-45, +45	0.0	αντοχή σε διάτμηση, καλές ιδιότητες εκτός αξόνων

Πίνακας 1.1. Βασικοί τύποι GLARE.

Το GLARE μπορεί να παραχθεί είτε σε ημιτελή κατάσταση, με τη μορφή δηλαδή φύλλων πολυστρωματικού υλικού, είτε στην τελική σχηματοποιημένη μορφή της κατασκευής, εφόσον η διαδικασία σκλήρυνσης-ωρίμανσης της όλης κατασκευής έχει πραγματοποιηθεί εντός του θαλάμου autoclave, (π.χ. μεγάλα πάνελ με μεγάλες καμπυλότητες, που φέρουν πάνω τους και δευτερεύουσες κατασκευές όπως αρμοκαλύπτρες, ενισχύσεις ακαμψίας κτλ.). Επιπλέον η κατασκευή του GLARE με τη μέθοδο των αρμών (spliced laminates) [4], επιτρέπει την παραγωγή πολύ μεγάλων σε διαστάσεις πάνελ, σε σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευές αλουμινίου [23], ενώ ο μόνος περιορισμός για το μέγεθος της κατασκευής ουσιαστικά αποτελεί το μέγεθος του θαλάμου autoclave στον οποίο θα πρέπει να χωράει η υπόψη κατασκευή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11. Κατασκευή μεγάλων διαστάσεων πάνελ με τη μέθοδο των αρμών. [22]

### 1.4.3 Μηχανικές ιδιότητες του GLARE.

#### Συμπεριφορά σε εφελκυσμό [22]

Τυπικά το πολυστρωματικό υλικό GLARE παρουσιάζει μία ανελαστική συμπεριφορά σε εφελκυστική καταπόνηση λόγω της πλαστικοποίησης που συμβαίνει στα στρώματα του αλουμινίου. Η χαρακτηριστική συμπεριφορά διαφόρων τύπων GLARE σε εφελκυστική εγκάρσια και διαμήκη καταπόνηση (που αποτυπώνεται από τα μεγέθη : μέτρο ελαστικότητας, τάση διαρροής, τάση θραύσης και παραμόρφωση θραύσης) φαίνεται στον Πίνακα 1.2. Το μέτρο ελαστικότητας όλων των τύπων GLARE προκύπτει να είναι μικρότερο σε σχέση με το μονολιθικό κράμα αλουμινίου εξαιτίας του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας των προεμποτισμένων ινών. Είναι προφανές ότι οι τύποι GLARE με όλες τις ίνες προσανατολισμένες σε μία κατεύθυνση, παρουσιάζουν ισχυρή εξάρτηση των ιδιοτήτων τους σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό. Η χρήση των διασταυρούμενων προεμποτισμένων ινών ανάμεσα στα φύλλα αλουμινίου δημιουργούν πολυστρωματικά με όμοιες ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου η αντοχή σε εφελκυσμό ενός πολυστρωματικού GLARE με σταυρωτές στρώσεις ινών (π.χ. το GLARE 3) είναι μακράν ανώτερη εν συγκρίσει με την αντίστοιχη αντοχή του κράματος αλουμινίου, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Ο μηχανισμός αστοχίας ενός υλικού GLARE είναι αρκετά περίπλοκος καθώς εμπλέκονται και ενυπάρχουν ταυτόχρονα πολλαπλοί τύποι θραύσης κατά τη διαδικασία της αστοχίας, όπως ρωγμές στην μήτρα, αποκόλληση ανάμεσα στις ίνες και στη μήτρα, θραύση ινών, αστοχία λόγω

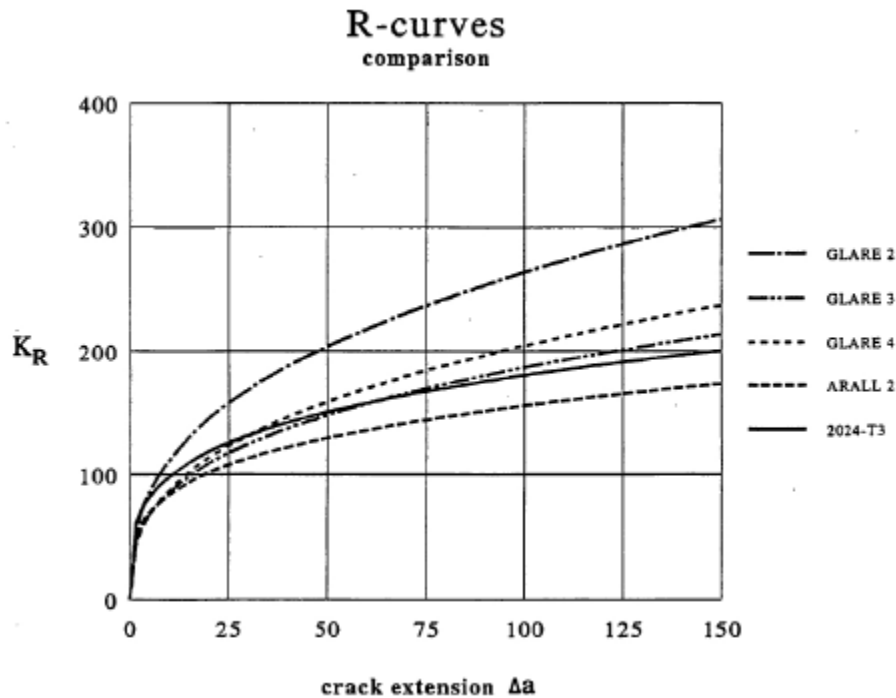
διάτμησης στη διεπιφάνεια ινών μήτρας, και εσωτερική αποκόλληση ανάμεσα στις στρώσεις των προεμποτισμένων ινών. Κατά τη διάρκεια διαμήκους εφελκυστικής καταπόνησης συνήθως παρατηρείται θραύση ινών, και αστοχία λόγω διάτμησης στη διεπιφάνεια ινών μήτρας. Αντίστοιχα σε εγκάρσια εφελκυστική καταπόνηση συνήθως παρατηρείται αστοχία της μήτρας, και αποκόλληση της διεπιφάνειας ανάμεσα στις ίνες και στη μήτρα.

Laminates	Τάση θραύσης (MPa)		Τάση διαρροής (MPa)		Μέτρο Young (GPa)		Παραμόρφωση θραύσης (%)	
	διαμήκης	εγκάρσια	διαμήκης	εγκάρσια	διαμήκη	εγκάρσιο	διαμήκης	εγκάρσια
<b>GLARE 1</b>								
3/2	1,282	352	545	333	65	50	4.2	7.7
2/1	1,077	436	525	342	66	54	4.2	7.7
<b>GLARE 2</b>								
3/2	1,214	317	360	228	66	50	4.7	10.8
2/1	992	331	347	244	67	55	4.7	10.8
<b>GLARE 3</b>								
3/2	717	716	305	283	58	58	4.7	4.7
2/1	662	653	315	287	60	60	4.7	4.7
<b>GLARE 4</b>								
3/2	1,027	607	352	255	57	50	4.7	4.7
2/1	843	554	321	250	60	54	4.7	4.7
<b>GLARE 5</b>								
2/1	683	681	297	275	59	59	4.7	4.7

Πίνακας 1.2. Εφελκυστικές ιδιότητες πολυστρωματικών GLARE και κραμάτων αλουμινίου. [2]

### Συμπεριφορά στη θραύση του GLARE.

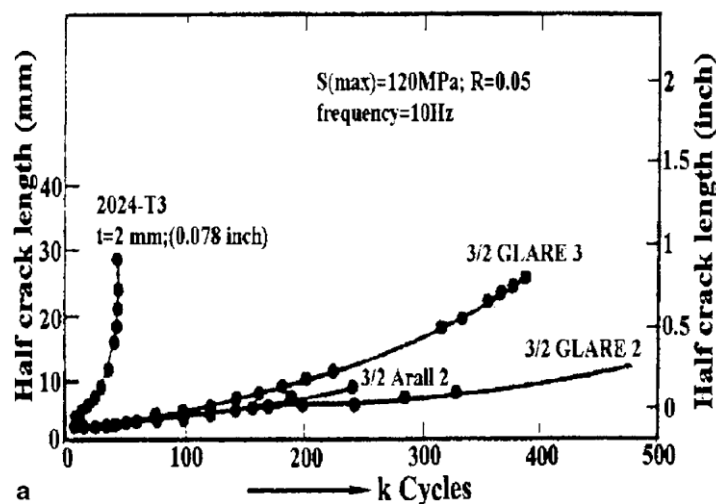
Η συμπεριφορά διαφόρων τύπων του GLARE στην αντίσταση ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας έχει μελετηθεί σε μεγάλο εύρος προωγματωμένων δοκιμίων με κεντρικές ρωγμές [24], [25]. Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται η αντοχή στη θραύση όπως καθορίζεται από τις καμπύλες αντίστασης στην ανάπτυξη ρωγμών (μέθοδος R-curve) [24]. Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφή ανωτερότητα του GLARE όσον αφορά τη συμπεριφορά στη θραύση σε σχέση με το κράμα αλουμινίου 2024-T3.



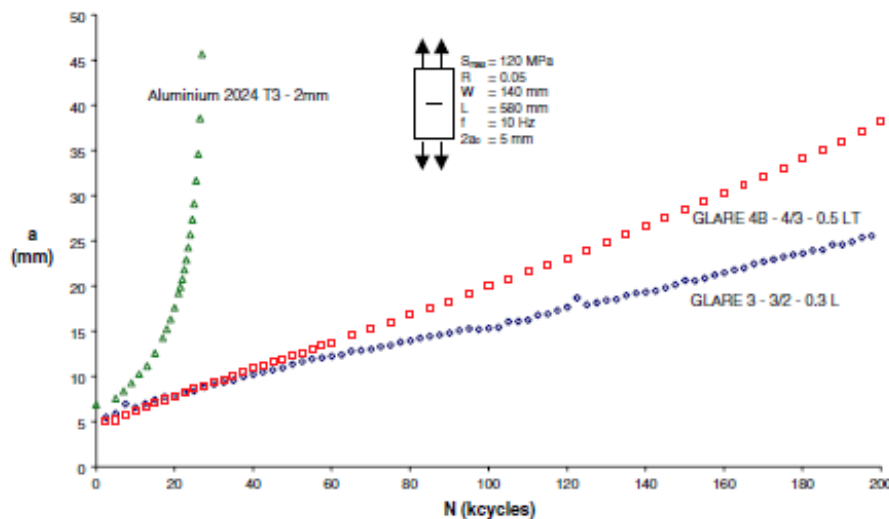
Σχήμα 1.12. Καμπύλες αντίστασης στην ανάπτυξη των ρωγμών (R-curves). [24]

#### Συμπεριφορά του GLARE στο φαινόμενο της κόπωσης.

Οι ιδιότητες του GLARE στο φαινόμενο της κόπωσης έχουν εκτενώς διερευνηθεί και μελετηθεί από διάφορους επιστήμονες [26],[27],[28],[29]. Γενικά το GLARE παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά σε φορτία κόπωσης. Στο Σχήμα 1.13 συγκρίνεται η διάδοση ρωγμής σε δοκίμια GLARE 2 - 3 / 2 και GLARE 3 - 3 / 2 - 0.3 με τη διάδοση ρωγμής σε αλουμίνιο κράματος 2024-T3 [22]. Αντίστοιχα στο Σχήμα 1.14 συγκρίνεται η διάδοση ρωγμής σε δοκίμια GLARE 4B - 4 / 3 - 0.5 και GLARE 3 - 3 / 2 - 0.3 με τη διάδοση ρωγμής σε αλουμίνιο κράματος 2024-T3 [31], [32]. Είναι ευδιάκριτο ότι σε αντίθεση με το αλουμίνιο στο οποίο ο ρυθμός διάδοσης ρωγμής αυξάνει απότομα με την αύξηση του μήκους της ρωγμής, στο GLARE παραμένει σχεδόν σταθερός. Είναι χαρακτηριστικό ότι το GLARE παρουσιάζει από 10 μέχρι 100 φορές μικρότερους ρυθμούς διάδοσης ρωγμής σε σύγκριση με το αλουμίνιο. Αυτό οδηγεί τελικά σε πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Ο κατακόρυφος άξονας στα σχήματα αντιστοιχεί στο μισό του μήκους της ρωγμής [mm] και ο οριζόντιος στον αριθμό εναλλαγών φόρτισης [χιλιάδες κύκλους φόρτισης]. Παρατηρείται ότι για το ίδιο μήκος ρωγμής απαιτείται πολύ μεγαλύτερος αριθμός εναλλαγών φόρτισης στα δοκίμια GLARE συγκριτικά με το δοκίμιο του αλουμινίου. Επίσης, οι ρυθμοί διάδοσης ρωγμής στα δοκίμια GLARE, δηλαδή οι κλίσεις των πειραματικών καμπυλών, είναι σημαντικά μικρότερες από το ρυθμό διάδοσης ρωγμής στο αλουμίνιο.



Σχήμα 1.13. Διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης σε δοκίμια GLARE-Al. [22]

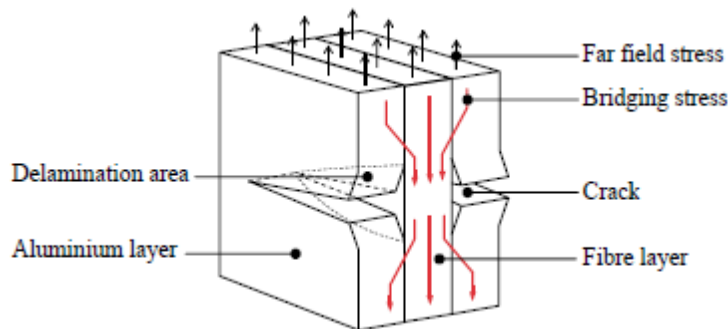


Σχήμα 1.14. Διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης σε δοκίμια GLARE-Al. [31], [32]

Η μείωση του ρυθμού διάδοσης των ρωγμών στο GLARE οφείλεται στην ύπαρξη των ινών στις στρώσεις του σύνθετου υλικού. Οι ίνες δεν επηρεάζονται από φορτία κόπωσης σε αντίθεση με τις μεταλλικές στρώσεις αλουμινίου στις οποίες εκκινούν και διαδίδονται οι ρωγμές. Παραμένοντας άθικτες, μεταφέρουν φορτίο στην περιοχή της ρωγμής παρακάμπτοντάς την όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15, ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν το άνοιγμα της ρωγμής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ινώδης γεφύρωση (fiber bridging) και προκαλεί τη μείωση του ρυθμού διάδοσης των ρωγμών [29], [31], [32].

Επιπλέον όμως με τη γεφύρωση των ινών, καθώς η ρωγμή διαδίδεται στο GLARE, παρουσιάζεται αποχωρισμός μεταξύ των στρώσεων αλουμινίου και των στρώσεων του σύνθετου υλικού κατά μήκος της ρωγμής. Αυτό προκαλείται εξαιτίας των διατμητικών τάσεων που προκύπτουν από τη μεταφορά φορτίου από το αλουμίνιο στο σύνθετο υλικό. Η συμπεριφορά του GLARE σε κόπωση μπορεί να αλλάξει εφόσον μεταβληθεί η αντίσταση στον αποχωρισμό των στρώσεων, η οποία εξαρτάται από το σύνθετο υλικό και την κόλλα που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των στρώσεων. Αύξηση της αντίστασης αυτής συνεπάγεται καλύτερη ινώδη γεφύρωση η οποία οδηγεί σε χαμηλότερο ρυθμό διάδοσης των ρωγμών στις μεταλλικές στρώσεις. Υπερβολική όμως αύξηση της αντίστασης στον αποχωρισμό των

στρώσεων προκαλεί πολύ υψηλές τάσεις στις στρώσεις του σύνθετου υλικού με αποτέλεσμα τη θραύση των ινών.



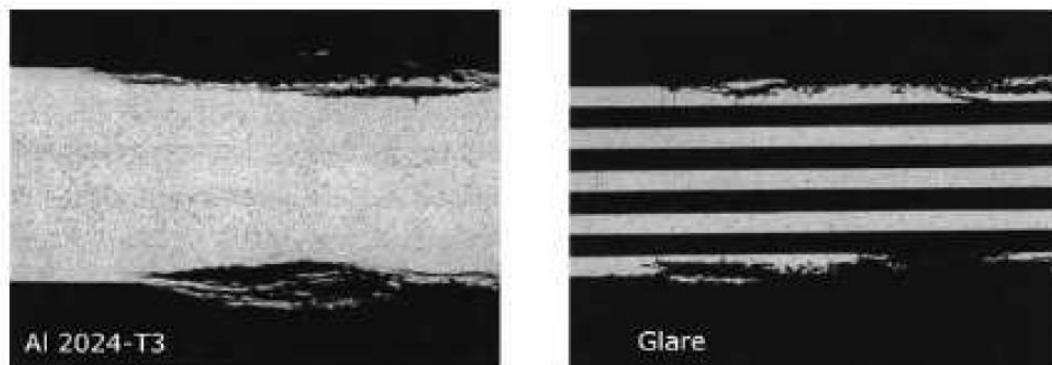
Σχήμα 1.15. Το φαινόμενο της γεφύρωσης των ινών στο GLARE. [31]

### Συμπεριφορά του GLARE στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στα υλικά GLARE υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία που διερευνά την αντοχή τους και ειδικότερα την υποβάθμιση της δομικής τους ακεραιότητας σε περιβαλλοντικές συνθήκες, όσον αφορά την απορρόφηση υγρασίας, και την αντίσταση σε διάβρωση [33], [34], [35]. Όπως συμβαίνει σε όλα τα ινώδη πολυμερή σύνθετα, οι στρώσεις των προεμποτισμένων ινών γυαλιού που χρησιμοποιούνται στη δομή του GLARE είναι επίσης ευπαθείς στην απορρόφηση υγρασίας, ενώ καταλυτικό ρόλο σε αυτήν κατέχουν η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική υγρασία. Παρόλα αυτά όμως η ύπαρξη των εξωτερικών (αλλά και των ενδιάμεσων) φύλλων αλουμινίου διαδραματίζουν ένα ισχυρό ανασταλτικό παράγοντα που περιορίζει δραστικά την εισχώρηση και την απορρόφηση εν γένει της υγρασίας από το σύνθετο υλικό.

Η ύπαρξη υγρασίας εντός των στρώσεων προεμποτισμένων ινών γυαλιού αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την ευκολία αποκόλλησης των στρωμάτων των προεμποτισμένων ινών με τα φύλλα του μετάλλου. Οι επιπτώσεις γίνονται περισσότερο δυσμενείς στην περίπτωση αποσταγμένου νερού ή στην περίπτωση υδατικού διαλύματος άλατος, απ' ό,τι στον ατμοσφαιρικό αέρα που φέρει υψηλή συγκέντρωση υγρασίας, ενώ η δριμύτητα των επιπτώσεων αυξάνεται περαιτέρω με την άνοδο της θερμοκρασίας [34]. Συνεπώς, ιδιότητες όπως ο χαμηλός ρυθμός ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών, ή όπως η υψηλή παραμένουσα αντοχή, υποβαθμίζονται ραγδαία.

Γενικά το πολυστρωματικό GLARE διαθέτει εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση, καθώς όλα τα φύλλα αλουμινίου που συμμετέχουν στη δομή του, έχουν υποστεί ανοδίωση, και έχουν ασταρωθεί με ειδική επίστρωση αντιδιαβρωτικού συστατικού, πριν το στάδιο της επικόλλησης των στρώσεων. Η διάβρωση εντός του πάχους του GLARE αναστέλλεται λόγω της παρουσίας των ενδιάμεσων στρωμάτων ινών-εποξικής ρητίνης που ουσιαστικά δρα ως αδιαπέραστο εμπόδιο στη διάδοση της διάβρωσης.



Σχήμα 1.16. Σύγκριση διάβρωσης των Al 2024-T3 & GLARE. [35]

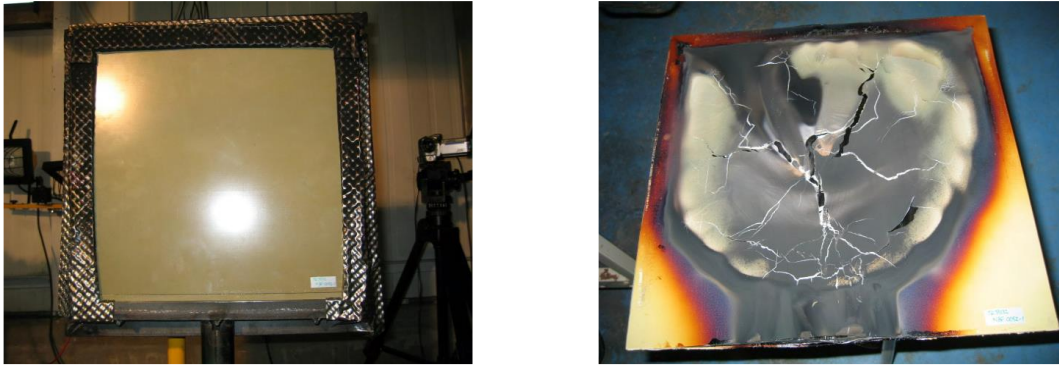
Διάφορα πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια υλικού GLARE, απέδειξαν ότι το φαινόμενο της διάβρωσης εντοπίζεται μόνο στα εξωτερικά φύλλα αλουμινίου (0.4mm πάχους). Η αντίσταση στη διάδοση της διάβρωσης του υλικού GLARE με λεπτά φύλλα αλουμινίου κράματος 2024-T3, βρέθηκε να είναι ανώτερη της αντίστοιχης με δεκαπλάσιου πάχους πάνελ (4mm πάχους) του ίδιου κράματος 2024-T3 [35], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.16. Προβλήματα λόγω του φαινομένου της διάβρωσης υπό εντατική καταπόνηση δεν παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια σχετικών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια GLARE.

#### Αντοχή του GLARE στη φλόγα.

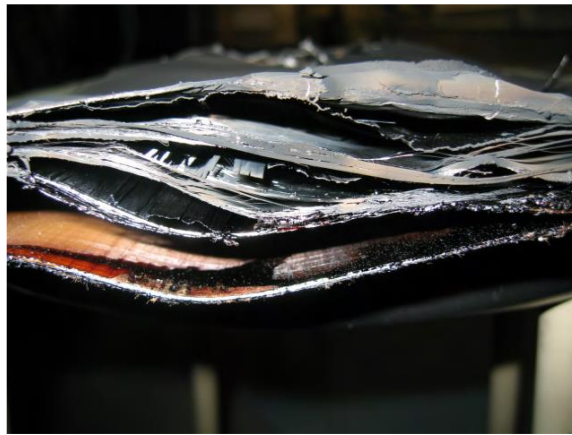
Η αντίσταση του GLARE στην φλόγα είναι κατά πολύ ανώτερη σε σχέση με την αντίστοιχη που έχει το μονολιθικό αλουμίνιο [14]. Ο χρόνος έναρξης της τήξης των σημερινών ατράκτων των αεροσκαφών που είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο, προβλέπεται να είναι 20-30 sec σε περίπτωση εξωτερικής πυρκαγιάς από κηροζίνη. Συνεπώς οι επιβάτες πρόκειται να εκτεθούν σε αυτές τις θερμοκρασίες καθώς σύμφωνα με τις αρχές αξιοπιστοσύνης των αεροσκαφών ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για την διαφυγή των επιβατών είναι 90sec.

Το GLARE έχει αποδειχτεί ότι δύναται να αντέξει σε αντίστοιχο θερμοκρασιακό περιβάλλον για πολύ μεγαλύτερους χρόνους. Οι ίνες γυαλιού που έχουν πολύ υψηλή θερμοκρασία τήξης προστατεύουν το δεύτερο στρώμα αλουμινίου για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, προσφέροντας στο παράδειγμα του αεροσκάφους τον αναγκαίο χρόνο στους επιβάτες για ασφαλή διαφυγή. Στα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού σύνθετα υλικά, παρόλο που η μήτρα λιώνει ή καίγεται, οι ίνες παραμένουν άθικτες ακόμα και σε θερμοκρασίες 1100°C δημιουργώντας ένα φράγμα πυρός.

Η εξαιρετική αντοχή του GLARE σε φλόγα οφείλεται στον αποχωρισμό μεταξύ των στρώσεων που συμβαίνει λόγω της θερμότητας. Ο αποχωρισμός συμβάλλει στη σημαντική βελτίωση της θερμικής μόνωσης μεταξύ των στρώσεων. Έτσι, ενώ η εξωτερική στρώση αλουμινίου λιώνει άμεσα, οι μεταλλικές στρώσεις πίσω από τις πρώτες στρώσεις σύνθετου υλικού (οι οποίες αποτελούν φράγμα πυρός λόγω των γυάλινων ινών τους) δεν λιώνουν και η θερμοκρασία στην πλευρά του GLARE που δεν φλέγεται παραμένει σε ανεκτά επίπεδα. Αυτή η συμπεριφορά του GLARE σε φλόγα εμποδίζει ταυτόχρονα και τη δομική κατάρρευση των κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς [1], [2]. Παραδείγματα θερμικής καταπόνησης σε θερμοκρασίες των 1170°C σε δοκίμια GLARE φαίνονται στα Σχήματα 1.17 και 1.18 [118].



Σχήμα 1.17. Δοκίμιο GLARE πριν το τεστ. (Αριστερά) Δοκίμιο GLARE μετά το τεστ. (Δεξιά). [118]



Σχήμα 1.18. Λεπτομέρεια αποκόλλησης των στρώσεων GLARE μετά το τεστ. [118]

Η εξαιρετική πυρίμαχη συμπεριφορά του GLARE σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή του σε κρούσεις του προσδίδουν μεγάλη αντοχή σε φορτία λόγω εκρήξεων (blast loading), όπου σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα αναπτύσσονται ταυτόχρονα υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλοι ρυθμοί μεταβολής των παραμορφώσεων. Μία από τις εφαρμογές που αξιοποιούν κατάλληλα τις συγκεκριμένες αυτές ιδιότητες του GLARE είναι η κατασκευή του αεροπορικού κοντέϊνερ ECOS-3 που φαίνεται στο Σχήμα 1.19 από την εταιρία Galaxy Scientific Corporation, το οποίο ολοκλήρωσε επιτυχώς τα τεστ εκρηκτικών της FAA (ομοσπονδιακή αρχή αξιοπιστίας της Αμερικής) το 1995, και έκτοτε έχει βγει σε παραγωγή για εμπορική χρήση σε επιβατικά αεροσκάφη.



Σχήμα 1.19. Το ECOS-3 πριν και μετά τα τεστ εκρηκτικών. [120]

### Αντοχή του GLARE στην κρούση

Η αντοχή του GLARE καθώς και γενικά των FMLs στις κρούσεις παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς έχει αποδειχτεί ότι είναι πολύ ανώτερη σε σχέση με την αντίστοιχη των απλών σύνθετων υλικών και για αυτό το λόγο στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου ακολουθεί εκτενής αναφορά.

## **1.5 Αντοχή σε κρούση των FMLs.**

Η συμπεριφορά των FMLs σε κρουστικές καταπονήσεις θεωρείται καταλυτικής σημασίας ιδιαίτερα σε κατασκευές λεπτού πάχους όπως οι αεροπορικές. Σε μία δομή αεροσκάφους μπορεί να υπάρξουν αστοχίες που οφείλονται σε διαφορετικούς λόγους, όπως π.χ. σε διάβρωση, σε κόπωση ή σε ακούσια χτυπήματα κρουστικού τύπου. Σύμφωνα με μελέτη [36] που προέκυψε από 688 καταγραφές επιδιορθώσεων αστοχιών σε εβδομήντα ένα (71) αεροσκάφη τύπου Boeing 747, το 13% τουλάχιστον αυτών, αναφέρεται σε ζημιές λόγω κρούσεων. Οι υπόψη κρουστικού τύπου ζημιές, σύμφωνα με μελέτη του Vlot [37], εντοπίζονται κυρίως πέριξ των θυρών της ατράκτου, στο radome («μύτη» του αεροσκάφους), στα τμήματα της ατράκτου που φορτώνονται οι αποσκευές, αλλά και στην «ουρά» του αεροσκάφους (λόγω κοντινής απόστασης με την επιφάνεια του διαδρόμου κατά τις φάσεις απογείωσης και προσγείωσης).

Οι ζημιές λόγω κρούσεων στο παράδειγμα των αεροσκαφών μπορούν να προκληθούν από διάφορους λόγους, όπως [37]:

- ξένα σώματα που ενδέχεται να υπάρχουν επί του διαδρόμου από/προσγείωσης (Foreign Object Damage – FOD) με ταχύτητες της τάξης των 60m/sec,
- χαλαζόπτωση (στο έδαφος ταχύτητες της τάξης 25-60 m/sec, ενώ στον αέρα της τάξης κάποιων εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο),
- κατά τις διαδικασίες συντήρησης του αεροσκάφους όπως π.χ. πτώση εργαλείων, με ταχύτητες μικρότερες των 10m/sec,
- επαφές-συγκρούσεις ανάμεσα σε οχήματα εξυπηρέτησης-φόρτωσης και στη δομή του αεροσκάφους, με πολύ μικρές ταχύτητες,
- πρόσκρουση πτηνών κατά την πτήση (Bird strikes - υψηλές ταχύτητες) ,
- κομμάτια πάγου που δύναται να αποκολληθούν από τις έλικες και να προσκρούσουν στην άτρακτο,
- υπολείμματα ελαστικών που μπορεί να αποκολληθούν λόγω έντονης φθοράς κατά την τροχοδρόμηση.

(Σημειώνεται ότι ο όρος χαμηλές ταχύτητες κρούσης αναφέρεται συνήθως σε ταχύτητες μικρότερες των 10m/sec, όπως η περίπτωση πρόσκρουσης εργαλείων από ακούσια πτώση αυτών.)

Πέραν των επιπτώσεων στην ασφάλεια που επιφέρουν οι συγκεκριμένες αστοχίες λόγω κρουστικών χτυπημάτων, έχουν και άμεσο οικονομικό αντίκτυπο καθώς θα πρέπει να υπάρχει αφ' ενός ένα ειδικό αξιόπιστο σύστημα επιθεώρησης και εντοπισμού των υπόψη ζημιών, και αφετέρου ένα οργανωμένο πρόγραμμα συντήρησης που να προβαίνει στην επιδιόρθωση και απαλοιφή αυτών.

Όσον αφορά το πολυστρωματικό GLARE το αρχικό ενδιαφέρον των επιστημόνων για την χρήση του επικεντρώνονταν στις πολύ βελτιωμένες ιδιότητες που αφορούν την κόπωση, τελευταία όμως η χρήση του έχει επεκταθεί ραγδαία χάρη στην πολύ καλή συμπεριφορά του σε κρούση, σε σχέση με το μονολιθικό αλουμίνιο ίδιου βάρους. Αντίστοιχα προτερήματα του GLARE σχετικά με την κρουστική του αντοχή έχουν δημοσιευτεί από τους Hoo Fat [38] και αφορούν κρούσεις υψηλών ταχυτήτων. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε 15% αύξηση της βαλλιστικής αντοχής σε σύγκριση με την αντίστοιχη του κράματος αλουμινίου 2024-T3 της ίδιας έκτασης πυκνότητας. Η υπόψη βελτιωμένη απόδοση αναμένεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη σε FMLs θερμοπλαστικής βάσης σε κρούσεις υψηλών ταχυτήτων [39].

### 1.5.1 Πειραματικές μελέτες της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs.

Στην βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος δημοσιεύσεων από ερευνητές που εστίασαν πειραματικά στην κρουστική συμπεριφορά των FMLs. Στον Πίνακα 1.3 συνοψίζονται οι κυριότερες από αυτές. Από την πειραματική αυτή μελέτη έχουν προκύψει οι γενικές παρατηρήσεις που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Πηγή	Τύπος FML	Τύπος μήτρας	Τύπος ινών	Τύπος Μετάλλων	Εφαρμογή φορτίων	Αντικείμενο μελέτης
[42]	FGA	Ths	Gl	Al2	LV	Load deflection curves
[72]	GLARE 4, GLARE 5	Ths	Gl	Al2	LV	Ply configuration, post impact fatigue behaviour
[73]	GLARE3, 4 & 5	Ths	Gl	Al2	LV	Post impact fatigue
[61]	GLARE3, 4, & 5	Ths	Gl	Al2	LV	Test fixture and ply configuration
[63]	GLARE 2,3	Ths	Gl	Al2	LV	Impactor geometry, ply configuration
[74]	GLARE	Ths	Gl	Al3,Al4	LV	GLARE on a substrate
[54]	GLARE1, 2 & Arall 3	Ths	Gl,Ke	Al5,Al2	LV	Fiber, metal, number of layers effects and configuration
[44]	GLARE1, 2,&3	Ths	Gl,Ke	Al5,Al2	LV	Fiber, metal, number of layers effects and configuration
[75]	GLARE1, 3,5&Arall 2,1	Ths	Gl,Ke	Al1,Al2	LV,HV	Fiber, metal pretension ply configuration
[11]	Arall1,2 & GLARE 2,3	Ths	Gl,Ke	Al1,Al2	LV,HV	Fiber,metal configuration effects
[36]	Arall2& GLARE3	Ths	Gl,Ke	Al1,Al2,Al4	LV,HV	Fiber,metal configuration effects & pretension
[56]	GLARE3, 5	Ths	Gl	Al2	LV,HV	Configuration

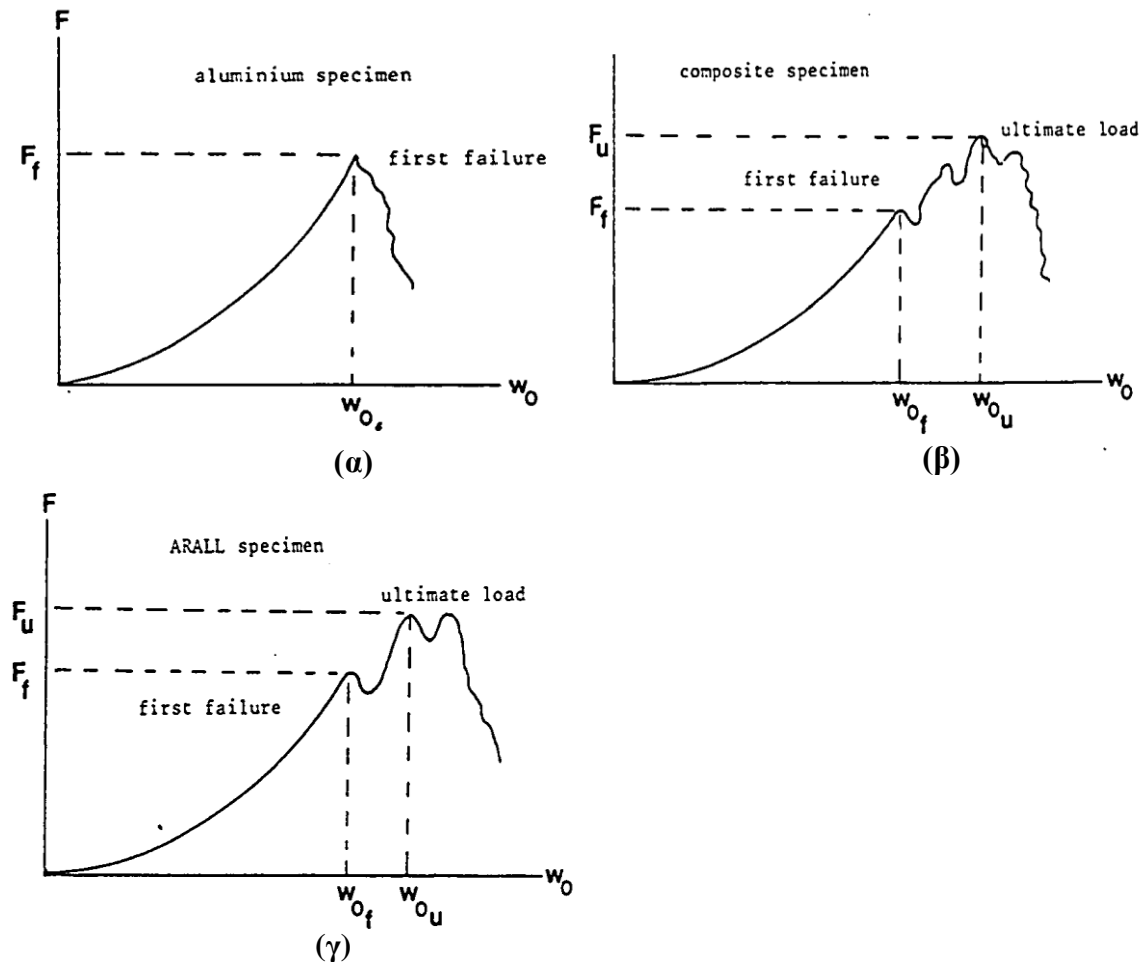
Πηγή	Τύπος FML	Τύπος μήτρας	Τύπος ινών	Τύπος Μετάλλων	Εφαρμογή φορτίων	Αντικείμενο μελέτης
[62]	FML	Thp	Po	Al6	LV	Scaling effects
[76]	FML	Thp	Po	Al6	LV	Scaling effects (ply configurations)
[57]	GLARE, Arall	Ths	Gl,Ke	Al1,Al2	LV	Fiber,metal and configuration impact
[77]	GLARE, Arall	Ths	Gl,Ke	Al1,Al2	LV,HV,QS	Pretension
[38]	GLARE, Arall	Ths	Gl,Ke	Al1,Al2	LV,HV,QS	Fiber,metal and configuration pretension
[43]	Arall, GLARE	Ths	Gl,Ke	Al1,Al4	LV	Post-impact fatigue behavior
[75]	FML	Ths	Gl	Al6	LV	Target thickness and diameter impactor radius effects
[39]	FML	Thp	Gl	Al2	HV	Matrices and ipmactor nose effects
[38]	GLARE5	Ths	Gl	Al2	HV	(Ballistic) Perforation& ballistic limit
[52]	FML(sand wich)	Thp	Gl	Al2	HV	Ballistic limit
[64]	GLARE	Thp&Ths	Gl	Al2,Al6	Blast	Blast local and uniformly distributed blast loading
[78]	FML	Thp	Gl	Al2	Blast	Blast response
[79]	FML	Thp	Gl	Al6	Blast	Localized blast response
[80]	FML	Thp	Gl	Al6	Blast	Trends and failure mode
[81]	Arall2	Ths	Ke	Al2	QS,LV	Strength degradation
[82]	GLARE	Ths	Gl	Al2	LV,HV	Damage quantification
[55]	GLARE	Ths	Gl	Al2	LV	Stacking sequence, Geometrical effects
[59]	GLARE	Ths	Gl	Al2	LV	Specimen thickness,Impactor mass

Επεξήγηση συντομεύσεων : Ths: thermoset, Thp: thermoplastic, Ke: Kevlar, Gl: glass, Gr: graphite, PP: polypropylene, Al1:Al7075-T6, Al2:Al2024-T3, Al3:Al7085-T7651, Al4:Al7475-T761, Al5:Al7475-T6, Al6:Al2024-0, Mg: magnesium, Ti: titanium, QS: quasi-static, LV: low-velocity, HV: high-velocity

Πίνακας 1.3. Πειραματικές μελέτες της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs. [2]

### 1.5.1.1 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης & φορτίου-χρόνου.

Οι τυπικές καμπύλες στατικής δύναμης-παραμόρφωσης όσον αφορά το μονολιθικό κράμα αλουμινίου, τα σύνθετα υλικά και τα FMLs, φαίνονται στο Σχήμα 1.20 [37]. Οι συγκεκριμένες καμπύλες προέκυψαν από στατική φόρτιση ημισφαιρικού διεισδυτή με ακτίνα καμπυλότητας στο άκρο του 7,5mm, πάνω σε τετραγωνικά πακτωμένα δοκίμια διαστάσεων 100mm×100mm.



Σχήμα 1.20. Στατικές καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης. [37]

Η διαφορετική συμπεριφορά των ανωτέρω υλικών φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 1.20. Ειδικότερα :

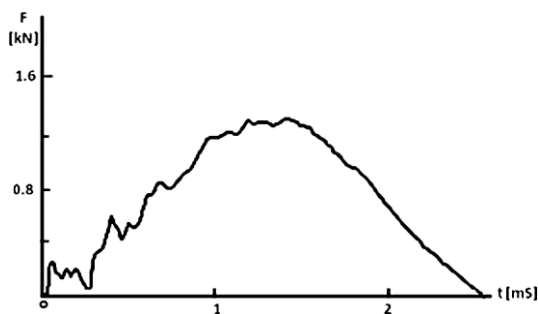
- Το μονολιθικό αλουμίνιο (Σχήμα 1.20(α)) παρουσιάζει μόνιμα αυξητική εξάρτηση της δύναμης ως προς την παραμόρφωση, η οποία διατηρείται έως την αστοχία. Μέχρι το σημείο της πρώτης αστοχίας το υλικό έχει μόνο πλαστική παραμόρφωση. Η πρώτη αστοχία συμβαίνει στο μέγιστο ή στο απόλυτο φορτίο που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο. Μετά τη θραύση η δύναμη μειώνεται ραγδαία, δημιουργείται μία οπή και ο διεισδυτής διαπερνά το δοκίμιο.

- Στο σύνθετο υλικό (Σχήμα 1.20(β)) υπάρχει αστοχία της μήτρας και αποκόλληση των στρωμάτων προτού να συμβεί η πρώτη αστοχία των ινών. Στην καμπύλη αναπαρίσταται με την πρώτη απότομη πτώση του φορτίου. Η συγκεκριμένη θραύση των ινών ξεκινάει από το πίσω

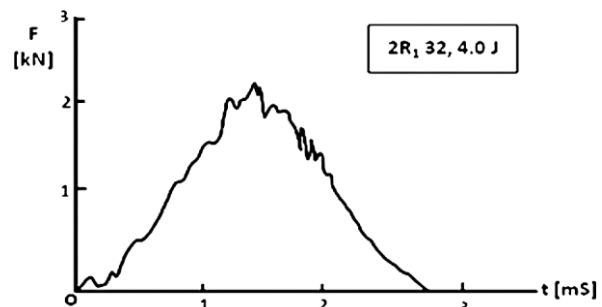
μέρος του δοκιμίου και σταδιακά διαδίδεται προς το εσωτερικό του. Στη συνέχεια οι δυνάμεις συνεχίζουν να αυξάνονται και πάλι μέχρι το σημείο της απόλυτης αντοχής του υλικού.

- Στα FMLs (Arall) διακρίνεται μια παρόμοια συμπεριφορά με την αντίστοιχη των σύνθετων υλικών (Σχήμα 1.20(γ)). Παρόλα αυτά τα FMLs παρουσιάζουν μία αστοχία που καθορίζεται δραστικά είτε από τις ίνες, είτε από το αλουμίνιο. Για το FML, με αστοχία που καθορίζεται από τις ίνες, η πρώτη αστοχία εμφανίζεται στη μέγιστη αντοχή του μονολιθικού αλουμινίου. Πριν το σημείο της καμπύλης που συμβαίνει η πρώτη απότομη πτώση της δύναμης, μία περιοχή του προεμποτισμένου στρώματος γύρω από το κέντρο του δοκιμίου παρουσιάζει μικρορωγματώσεις στην κόλληση. Στο σημείο της πρώτης αστοχίας, (πρώτη πτώση του φορτίου), οι ίνες και / ή το εξωτερικό στρώμα αλουμινίου θα καταρρεύσουν. Όποτε συμβαίνει αστοχία που έχουν πρωτεύοντα ρόλο οι ίνες, τότε πάντα εντοπίζεται μία ρωγμή στην εξωτερική στρώση αλουμινίου απέναντι από την πλευρά που εφαρμόζεται η καταπόνηση [40]. Όταν στο αλουμίνιο εμφανιστεί κρίσιμη αστοχία, η ρωγμή που θα αναπτυχθεί θα διαδοθεί κατά την διεύθυνση της διέλασης, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση των ινών. Εφόσον οι ίνες κάτω από τη στρώση του αλουμινίου διατρέχουν την ίδια κατεύθυνση, τότε θα παραμείνουν άθικτες. Μετά την πρώτη αστοχία, οι δυνάμεις συνεχίζουν να αυξάνονται, έως το σημείο της απόλυτης αντοχής, στο οποίο ο διεισδυτής πλέον θα διαπεράσει το δοκίμιο.

Οι τυπικές καμπύλες δύναμης ως προς το χρόνο για τα FMLs Arall και GLARE φαίνονται στα Σχήματα 1.21 και 1.22 αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες καμπύλες προέκυψαν από χαμηλής ταχύτητας κρούση ενός 575gr ημισφαιρικού διεισδυτή με ακτίνα καμπυλότητας άκρου 7.5mm, πάνω σε τετραγωνικά πακτωμένα δοκίμια διαστάσεων 100mm×100mm. Οι ενέργειες πρόσκρουσης για τα πολυστρωματικά Arall και GLARE επιλέχθηκαν να είναι 1.4J και 4J αντίστοιχα [11], [37].



Σχήμα 1.21. Load Vs time για ARALL. [11]



Σχήμα 1.22. Load Vs time για GLARE. [37]

Κατά τη διάρκεια της αρχικής επαφής παρατηρείται μία τυπική συμπεριφορά [11]. Απότομα εμφανίζεται μία σχετικά μεγάλη δύναμη επαφής πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία προκαλεί την επιτάχυνση του δοκιμίου από την κατάσταση ηρεμίας που βρισκόταν. Σε αυτή τη φάση της παραμόρφωσης η ακαμψία του δοκιμίου είναι χαμηλή, και παραμορφώνεται από μία έντονα ταλαντευόμενη δύναμη, ενώ στη συνέχεια η δύναμη πέφτει και η επαφή ανάμεσα στον διεισδυτή και στο δοκίμιο διακόπτεται για μικρό χρονικό διάστημα. Σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις, η αντίδραση μεμβράνης του φύλλου αποκτά ισχυρή επίδραση, γεγονός που συνεπάγεται την αύξηση της ακαμψίας. Κατά τη φάση φόρτισης του δοκιμίου Arall όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.21, υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της καμπύλης που οφείλονται στις ταλαντώσεις του δοκιμίου, και στις εσωτερικές αστοχίες που λαμβάνουν χώρα. Μετά το σημείο της μέγιστης δύναμης εκλείπει η υψηλόσυχη ταλάντωση. Συνεπώς, σε FMLs όπως το Arall,

που έγκειται στις περιπτώσεις αστοχιών λόγω «κρισιμότητας των ινών» σε χαμηλές κρουστικές ενέργειες εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση και στις στρώσεις του σύνθετου αραμιδίου υπάρχουν σημάδια ρωγμάτωσης της μήτρας και αποκολλήσεων. Αυτό αποτυπώνεται με τις διακυμάνσεις στο στάδιο φόρτισης στο Σχήμα 1.21.

Στα FMLs που η αστοχία «καθορίζεται από το αλουμίνιο», όπως στην περίπτωση του GLARE, αρχικά ρωγματώνεται (κατά τη διεύθυνση της διέλασης) η εξωτερική στρώση αλουμινίου απέναντι από αυτήν της πρόσκρουσης, και αυτό εντοπίζεται στο Σχήμα 1.22 ως μία απότομη κάθετη πτώση του φορτίου. Μετά από αυτό ακολουθούν συνεχείς διακριτές πτώσεις του φορτίου που είναι αποτέλεσμα αποκολλήσεων και αστοχιών που λαμβάνουν χώρα στις ενδιάμεσες στρώσεις, μέχρι να επέλθει η ολική διάτρηση του δοκιμίου [37], [42].

### 1.5.1.2 Κριτήρια εκτίμησης κρουστικής αστοχίας.

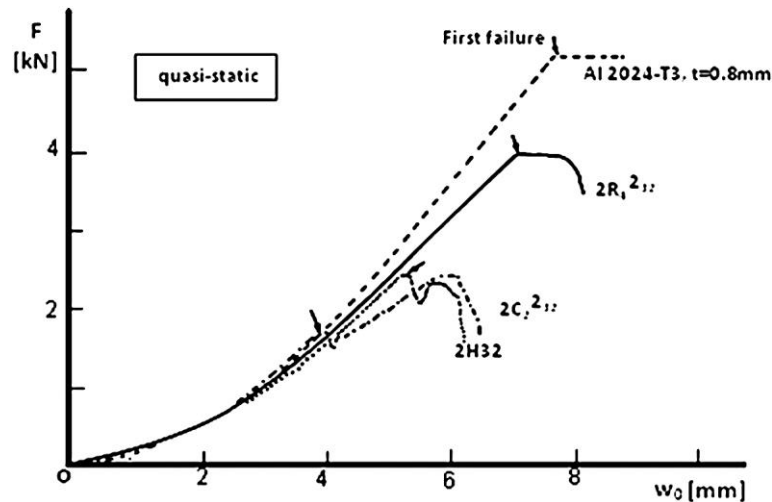
Με σκοπό την αντικειμενικότητα, στην περιγραφή και στην σύγκριση των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζονται από την κρουστική συμπεριφορά των FMLs, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια :

- Μέγιστη μόνιμη παραμόρφωση (η μέγιστη κοιλότητα)
- Συντελεστής ενεργειακού ισοζυγίου (για βλήματα που αναπηδούν, και ουσιαστικά είναι ο λόγος της κινητικής ενέργειας του διεισδυτή πριν και μετά την κρούση)
- Ελάχιστη ενέργεια ρωγμάτωσης (η ελάχιστη κινητική ενέργεια του διεισδυτή που απαιτείται για να προκαλέσει αστοχία των ινών ή θραύση των εξωτερικών στρώσεων του αλουμινίου).
- Έκταση ζημιάς (η διάμετρος του μικρότερου κύκλου πέριξ της αστοχούσας περιοχής).

### 1.5.2 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με το υλικό.

#### α. Τύπος Ινών

Οι πιο διαδεδομένες ίνες που χρησιμοποιούνται στις στρώσεις των FMLs, είναι οι ίνες αραμιδίου και γυαλιού. Στο Σχήμα 1.23 απεικονίζονται οι καμπύλες των πιο γνωστών FMLs (Arall, GLARE και Caral) σε αντιδιαστολή με την καμπύλη του κράματος αλουμινίου 2024-T3 όσον αφορά την εξάρτηση δύναμης και μετατόπισης του κέντρου των δοκιμίων σε συνθήκες σχεδόν στατικές [11]. Μέχρι το σημείο της πρώτης αστοχίας οι διαφορές μεταξύ των τριών πολυστρωματικών είναι αμελητέες. Το πρώτο που πρόκειται να αστοχήσει στις συγκεκριμένες συνθήκες είναι το Carall και στη συνέχεια το Arall, λόγω αστοχίας των ινών. Στη συνέχεια θα αστοχήσει το GLARE λόγω θραύσης του αλουμινίου, ενώ οι ίνες του θα παραμείνουν άθικτες, και στο τέλος θα αστοχήσει το κράμα αλουμινίου 2024-T3.

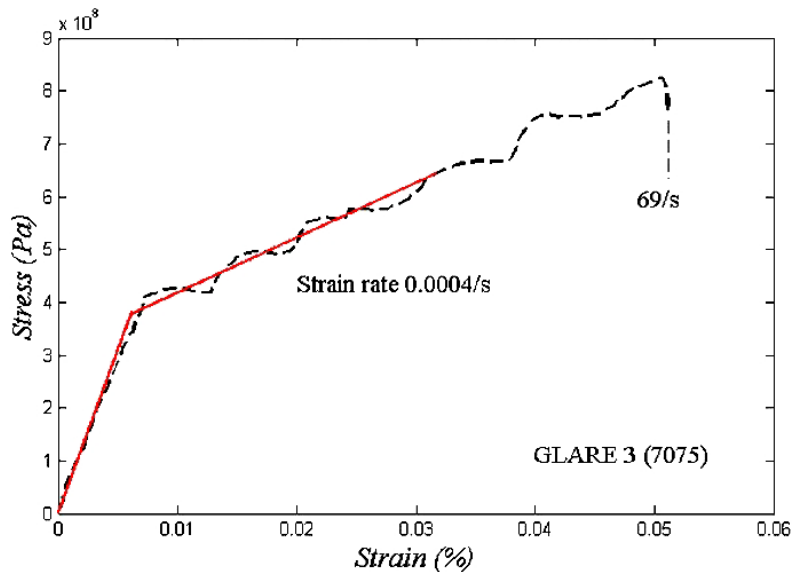


Σχήμα 1.23. Επίδραση του τύπου ινών στις στατικές καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης (2H32 : Arall, 2C32 : Caral, 2R32 : GLARE). [11]

Γενικά, τα προεμποτισμένα στρώματα γυαλιού-εποξικής ρητίνης που υπάρχουν στο GLARE, είναι ισχυρότερα και περισσότερο ελατά από τα αντίστοιχα αραμιδίου-εποξικής ρητίνης του Arall [42]. Στην περίπτωση της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs, ο τύπος των προεμποτισμένων στρώσεων που χρησιμοποιείται αποτελεί παράγοντα καθοριστικής σημασίας, για αυτό άλλωστε το λόγο το GLARE έχει την καλύτερη κρουστική αντοχή σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο πολυστρωματικά. Σε σχετικά χαμηλές κρουστικές ενέργειες στο GLARE εμφανίζονται μόνο μικρές ρωγματώσεις στην απέναντι επιφάνεια της πρόσκρουσης, ενώ το Arall υφίσταται μεγάλη ήδη ζημιά από τη βαθιά εισχώρηση του βλήματος στη μάζα του [42].

Αναλύοντας το Σχήμα 1.23 από την οπτική των κριτηρίων κρουστικής αστοχίας, το Carall έχει αισθητά μικρότερη ενέργεια πρώτης αστοχίας σε σχέση με το Arall, ενώ τη μεγαλύτερη την έχει το GLARE [43]. Παρόλα αυτά ο τύπος των ινών μέχρι το σημείο της πρώτης αστοχίας έχει μικρή επίδραση στη κεντρική μέγιστη παραμόρφωση, αλλά έχει σημαντική επίδραση στη μόνιμη παραμόρφωση μετά το τέλος της κρούσης. Το Carall έχει τη μέγιστη μόνιμη παραμόρφωση, ενώ ακολουθεί το GLARE και μετά το Arall. Το GLARE τέλος παρουσιάζει την μικρότερη έκταση ζημιάς σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο πολυστρωματικά.

Η εξάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης του GLARE αποτελεί ακόμα ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα δύο FMLs [11]. Στο Σχήμα 1.24 παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες τάσεων συναρτήσει του χρόνου, σε διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική του ιδιότητα συνεπάγεται την αυξημένη απορρόφηση ενέργειας σε κρούσεις με μεγαλύτερες ταχύτητες.



Σχήμα 1.24. Σχέση ρυθμού παραμόρφωσης-χρόνου σε δοκίμια GLARE. [37]

### β. Τύπος μετάλλου.

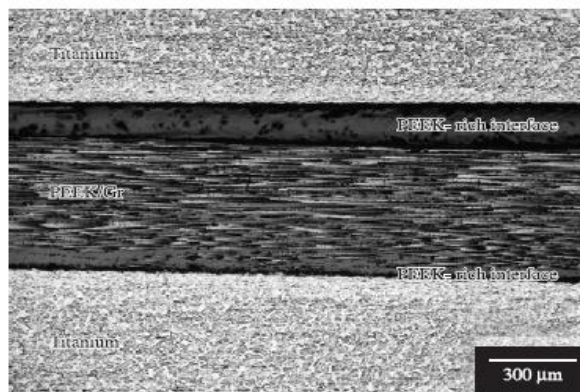
Δύο τύποι κραμάτων μετάλλου αποτελούν τις κύριες επιλογές στις μεταλλικές στρώσεις των FMLs, :

- 2024-T3
- 7475-T6

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 είναι, γενικά, ανθεκτικότερα και περισσότερο ψαθυρά σε σχέση με τα κράματα της σειράς 2000 όπως το 2024, το οποίο όμως είναι περισσότερο όλκιμο. Αυτό συνεπάγεται μικρότερο εμβαδό που διαγράφεται από την καμπύλη τάσεων-παραμόρφωσης του 7475-T6 (δυσθραυστότητα) σε σχέση με το αντίστοιχο εμβαδό του 2024-T3. Το συγκεκριμένο γεγονός δικαιολογεί την αξιοσημείωτα χαμηλότερη ενέργεια αστοχίας του 7475-T6 (περίπου το 1/3 σε σχέση με το 2024-T3) [44]. Η συγκεκριμένη ιδιότητα επηρεάζει την απόδοση του GLARE, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το GLARE1 (με κράμα 7475-T6) που η απορροφούμενη ενέργεια οδηγεί γρηγορότερα στη θραύση του, σε σχέση με το GLARE2 (με κράμα 2024-T3) που απορροφά μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων που υπόκειται το όλκιμο κράμα 2024-T3. Κατά την κρουστική καταπόνηση δοκιμίων GLARE2 (2024-T3) σε σχέση με δοκίμια GLARE3 (7475-T6) παρατηρείται μικρότερη έκταση ζημιάς [44]. Από τα ανωτέρω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όσον αφορά την κρουστική συμπεριφορά του GLARE, η χρήση κραμάτων αλουμινίου 2024-T3 συνεπάγεται γενικά μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με χρήση κραμάτων της σειράς 7000.

Τελευταία έχει υπάρξει ενδιαφέρον στη βιβλιογραφία η χρήση του τιτανίου [45],[46], ως εναλλακτικού των μεταλλικών στρώσεων των FMLs. Στο Σχήμα 1.25 φαίνεται στο μικροσκόπιο η διαστρωμάτωση ενός πολυστρωματικού τιτανίου με ίνες γραφίτη. Το τιτάνιο προσδίδει εξαιρετικές ιδιότητες στο FML σε αντοχή στην κόπωση [47], και βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την στατική αντοχή σε σχέση με την αντίστοιχη του GLARE [48]. Παρόλα αυτά η μειωμένη όλκιμότητα των υψηλής αντοχής κραμάτων τιτανίου έχει ως αποτέλεσμα τη

μειωμένη σχετικά αντοχή των υπόψη FMLs σε κρουστικές καταπονήσεις [49]. Επιπλέον η χαμηλή ενέργεια διάτρησης και ενέργεια έναρξης ρωγμών, που συσχετίζονται άμεσα με τις κρούσεις χαμηλής ταχύτητας, δείχνουν ότι τα συγκεκριμένα κράματα τιτανίου δεν αποτελούν ικανοποιητική εναλλακτική πρόταση στα προηγούμενα FMLs, όσον αφορά την κρουστική συμπεριφορά.



Σχήμα 1.25. Λεπτομέρεια σε μικροσκόπιο διαστρωμάτωσης FML τιτανίου. [47]

### γ. Τύπος μήτρας.

Τα πρώτα FMLs που προορίζονταν για αεροναυπηγικές εφαρμογές, κατασκευάζονταν από σύνθετα υλικά με θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή αντοχή και καλύτερη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τις υπόλοιπες πολυμερικές μήτρες. Τα αρνητικά σημεία αυτών των μητρών όπως ψαθυρότητα, εκτεταμένη διαδικασία κατασκευής ώστε να διασφαλιστεί η ορθή ωρίμανση της μήτρας, καθώς και προβλήματα σύνδεσης στη διεπαφή του σύνθετου με το μέταλλο, έστρεψαν το ενδιαφέρον σε άλλους τύπους πολυμερικών μητρών όπως τις θερμοπλαστικές [37]. Τα θερμοπλαστικά υλικά προσφέρουν βελτιωμένη αντοχή εξαιτίας της μεγαλύτερης ενέργειας που απαιτείται για την πρώτη αστοχία και για την απόλυτη αντοχή, σε σχέση με τα αντίστοιχα θερμοσκληρυνόμενα. Επιπλέον η κατασκευή τους δύναται να είναι συντομότερη και οικονομικότερη [50].

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αναλυτικές μελέτες που να συγκρίνουν τη συμπεριφορά σε κρούση χαμηλής ταχύτητας ανάμεσα σε θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα FMLs. Η πλειοψηφία των μελετών έχει γίνει πάνω σε υψηλής ταχύτητας κρούσεις θερμοπλαστικά σύνθετα με ίνες γυαλιού FMLs [39], [51],[52]. Από αυτές τις έρευνες προέκυψε ότι η ειδική ενέργεια της κρούσης (που αναφέρεται και ως ενέργεια διαπέρασης ή διάτρησης ή ρωγμάτωσης του πολυπροπενίου (PP) με ενίσχυση ινών γυαλιού FML, είναι περίπου 25% μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο GLARE 3/2 (με 0/90 κατεύθυνση προεμποτισμένων στρώσεων) [39].

Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των πολυστρωματικών που εμπεριέχουν στη μήτρα τους πολυπροπυλένιο είναι η αυξημένη κατά 50% της βαλλιστικής τους αντοχής, σε σύγκριση με το μονολιθικό κράμα αλουμινίου, το οποίο είναι και 35% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του GLARE5 σύμφωνα με τον Hoo Fat [38]. Η πολύ καλή αυτή απόδοση, αποδίδεται στο γεγονός ότι στις υψηλής ταχύτητας κρούσεις η δράση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης έχει

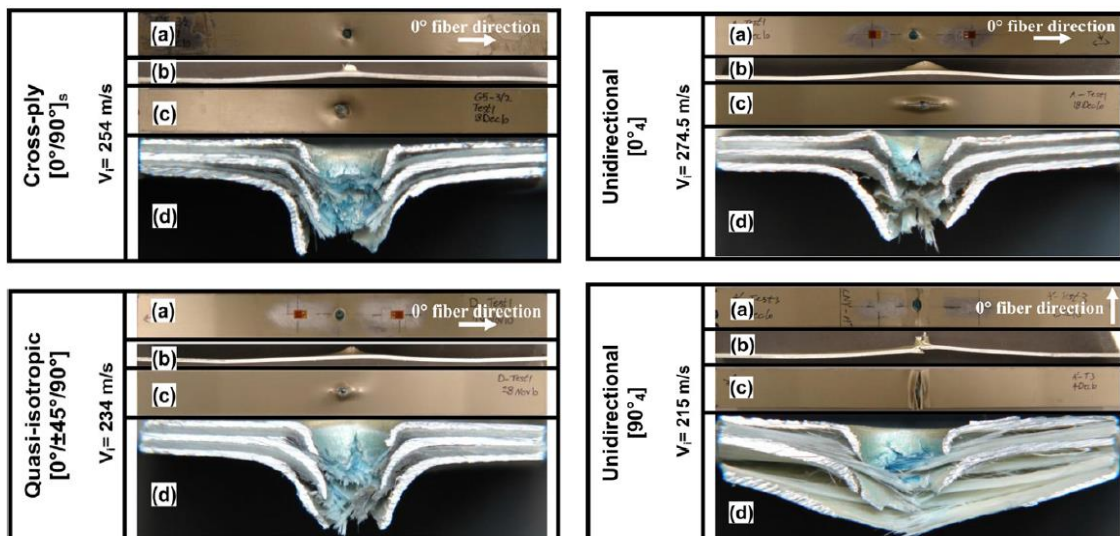
καταλυτική σημασία, το οποίο χαρακτηρίζεται από την εγκάρσια συμπίεση του πολυπροπυλενίου.

#### δ. Η διαμόρφωση της δομής.

Υπό το πρίσμα των δύο διαφορετικών τύπων αστοχίας (που καθορίζονται είτε από τις ίνες είτε από το αλουμίνιο), το Arall και το Carall, εξαιτίας της μικρής παραμόρφωσης αστοχίας (2%), ανεξάρτητα από τη δομή τους πάντοτε παρουσιάζουν μία συμπεριφορά κρίσιμη στις ίνες. Αντίθετα όμως το GLARE, που έχει υψηλότερη παραμόρφωση αστοχίας (5%), μπορεί να παρουσιάσει και τις δύο μορφές αστοχίας, ανάλογα με τη δομή που έχει διαμορφωθεί [11].

Γενικά είναι δύσκολο να συγκριθούν τα αποτελέσματα από διάφορες δημοσιεύσεις όσον αφορά την επίδραση της δομής λόγω των διαφορετικών παχών των δοκιμίων αλλά και των διαφορετικών συνθηκών που πραγματοποιήθηκαν οι μελέτες. Παρόλα αυτά μπορούν να εξαχθούν ορισμένα αντικειμενικά συμπεράσματα, όπως στην μελέτη των Liaw & Liu [44], που φαίνεται η επίδραση των μονοκατευθυντήριων στρώσεων ινών του GLARE2, και των διασταυρούμενων στρώσεων ινών του GLARE3. Έχει αποδειχτεί ότι το GLARE3 έχει ανώτερη συμπεριφορά στην κρούση σε σχέση με ίδιου πάχους υλικό GLARE2, λόγω της χρήσης των διασταυρούμενων προεμποτισμένων στρώσεων γυαλιού.

Είναι γεγονός ότι σε ένα σύνθετο υλικό θα παρουσιαστεί αποκόλληση των παρακείμενων στρώσεων που έχουν διαφορετικό προσανατολισμό ινών [53]. Στο Σχήμα 1.26 φαίνονται οι διαφορετικές αστοχίες από κρούσεις πάνω σε δοκίμια GLARE5 3/2 με διαφορετικό προσανατολισμό στρώσεων.



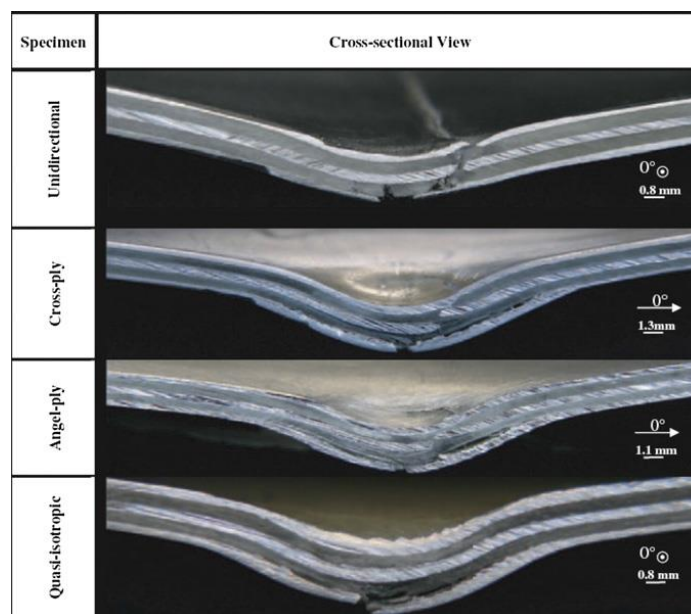
Σχήμα 1.26. Αστοχίες που προκαλούνται από κρούσεις επάνω σε δοκίμια GLARE5 3/2 με διαφορετικό προσανατολισμό στρώσεων, όπου, α.επιφάνεια που δέχεται την κρούση, β. πλάγια όψη, γ.κάτω επιφάνεια,δ.τομή. [83]

Η υψηλότερη αντοχή σε κρούση του GLARE3 έναντι του GLARE2, παρατηρήθηκε λόγω των μικρότερων ρωγμών και μόνιμων παραμορφώσεων σε κρούσεις με ίδια επίπεδα ενέργειας. Η ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί μέσω της αποκόλλησης του τελευταίου στρώματος αλουμινίου και της προηγούμενης προεμποτισμένης στρώσης γυαλιού, αλλά και εσωτερικά της προεμποτισμένης στρώσης. Μία ενδιαφέρουσα σύγκριση έγινε μεταξύ δοκιμίων GLARE3 και δοκιμίων που κατασκευάστηκαν από ένα ειδικό GLARE3I, και είχαν την ίδια πυκνότητα. Το

GLARE3I έχει δομή 2024/0/90/0/90/0/90/0/2024. Τα πειράματα φανέρωσαν την ανωτερότητα του GLARE3I σε κρουστικά φορτία, εξαιτίας της :

- υψηλότερης απαιτούμενης ενέργειας για διαμπερή ρωγμή,
- της μικρότερης μόνιμης παραμόρφωσης και
- της μικρότερης έκτασης ζημιάς σε σχέση με το GLARE3.

Η σχεδόν ιστροπική διαμόρφωση των προεμποτισμένων ινών (0/45/-45/90) στα FMLs προσδίδει πολύ καλύτερη αντοχή στην κρούση σε σχέση με τη διαμόρφωση κάθετης διασταύρωσης ινών (0/90/90/0), αλλά και με τη διαμόρφωση διαγώνιας διασταύρωσης ινών (45/-45/-45/45) καθώς και τη διαμόρφωση ίδιας κατεύθυνσης ινών (0)<sub>4</sub>. Σημειώνεται ότι οι μονοκατευθυντήριες στρώσεις ινών (unidirectional-UD) παρουσιάζουν την χειρότερη συμπεριφορά στις κρουστικές καταπονήσεις, αλλά και στην καθυστέρηση ανάπτυξης ρωγμών [54]. Σε αυτά τα αποτελέσματα κατέληξε και η μελέτη του Seyed Yaghoubi [55] που εστιάστηκε στη συμπεριφορά των γεωμετρικών επιπτώσεων δοκιμών GLARE5 από κρούσεις χαμηλής ταχύτητας. Οι διαφορετικές επιπτώσεις αναλόγως της περίπτωσης φαίνονται στο Σχήμα 1.27.



Σχήμα 1.27. Τομές σε τετράγωνα δοκίμια GLARE5-3/2, διαφορετικών δομών, υπό την ενέργεια κρούσης 40J. [55]

Όπως είναι αναμενόμενο, η διαμόρφωση των στρώσεων στο GLARE επηρεάζει καθοριστικά την γεωμετρία της αστοχίας λόγω κρούσης. Στην περίπτωση του GLARE4, στο οποίο η πλειοψηφία των ινών έχουν προσανατολισμό 0°, αναπτύσσεται μία απλή ρωγμή παράλληλα στην διεύθυνση των 0°, και το μήκος της είναι ευθέως ανάλογο της κρουστικής ενέργειας που απελευθερώνεται. Αντίθετα στο GLARE3-2/1 και στο GLARE5-2/1 εμφανίζονται πολλαπλές ρωγμές στις κατευθύνσεις 0° και 90°. Παρόλα αυτά το GLARE5 που διαθέτει πολλές στρώσεις προεμποτισμένων ινών και επομένως μικρότερη συνολική πυκνότητα σε σχέση με το καθαρό φύλλο αλουμινίου παρουσιάζει και εξαιρετική δυνατότητα απορρόφησης κρουστικής ενέργειας.

Κρούσεις χαμηλής ταχύτητας που πραγματοποιήθηκαν σε διαμορφώσεις 2/1,3/2 και σε 4/3 FMLs, δοκιμών θερμοπλαστικής μήτρας [51] απέδειξαν ότι τα χαρακτηριστικά αστοχίας των

πολυστρωματικών 2/1 και 3/2 είναι παρόμοια, ενώ τα πολυστρωματικά 4/3 παρουσίαζαν κωνικού σχήματος γεωμετρία αστοχίας.

ε. Η ογκομετρική αναλογία μετάλλου/σύνθετου.

Η ογκομετρική αναλογία μετάλλου/σύνθετου εκφράζεται με το κλάσμα όγκου μετάλλου MVF (Metal Volume Fracture), το οποίο ορίζεται ως το επί τοις εκατό κλάσμα του αθροίσματος των παχών όλων των στρώσεων μετάλλου (αλουμινίου) προς το συνολικό πάχος του πολύστρωτου. Συγκεκριμένα,

$$MVF = \frac{\sum t_{metal}}{t_{FML}} \quad (1.1)$$

Κατά τη διάρκεια προσομοίωσης της στατικής καταπόνησης, η δυσκαμψία, η μέγιστη αντοχή και η αντίσταση σε διάτρηση, αυξάνονται με την αύξηση του πάχους των στρώσεων του συνθέτου υλικού. Ένα σύνθετο με μεγάλο πάχος θα προκαλέσει συμπεριφορά ελατηρίου κι έτσι μετά την κρούση θα μετακινήσει την επιφάνεια κρούσης προς τα πάνω. Σύμφωνα με την έρευνα των Abdulah & Cantwell [51] η ύπαρξη σύνθετου πάχους 6.5mm ανάμεσα σε δύο στρώσεις αλουμινίου 2024-T3, τριπλασιάζει την απαιτούμενη ενέργεια για διάτρηση, σε σχέση με την περίπτωση της απευθείας κόλλησης των μεταλλικών στρώσεων χωρίς την μεσολάβηση του συνθέτου. Η αύξηση των στρώσεων του συνθέτου στο FML GLARE, έχει ως αποτέλεσμα [56]:

- μικρότερη έκταση ζημιάς,
- υψηλή απαιτούμενη ειδική ενέργεια έναρξης ρωγμών, σε κρούσεις χαμηλής ταχύτητας,
- ακόμα υψηλότερη ειδική ενέργεια έναρξης ρωγμών, σε κρούσεις μεγάλης ταχύτητας.

Για δεδομένο πάχος FML, παχύτερες στρώσεις αλουμινίου προσφέρουν ανώτερη αντοχή σε σχέση με τα αντίστοιχα πολυστρωματικά που διαθέτουν λεπτές στρώσεις. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχτεί [51] ότι υπάρχει ένα κατώφλι στο πάχος των FMLs, άνω του οποίου η κανονικοποιημένη ενέργεια διάτρησης (δηλ. ο λόγος της ενέργειας διάτρησης προς το πάχος του αλουμινίου) αρχίζει να μειώνεται. Η αιτία έγκειται στη μεταβολή του μηχανισμού αστοχίας που απαιτεί λιγότερη ενέργεια διάτρησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρόλος του αλουμινίου είναι περισσότερο κυρίαρχος στην περίπτωση λεπτών πολυστρωματικών. Επομένως στην περίπτωση χρησιμοποίησης χαμηλού μέτρου ελαστικότητας στις στρώσεις ινών, τα στρώματα αλουμινίου συμπεριφέρονται με τρόπο σχεδόν ανεξάρτητο, απορροφώντας τη μεγαλύτερη ενέργεια κρούσης [51]. Το γεγονός της αύξησης της αντοχής σε κρούση με την αύξηση του πάχους των μεταλλικών στρώσεων θα πρέπει να συνεκτιμηθεί με την συνεπαγόμενη αύξηση του βάρους, που συνήθως αποτελεί ένα ισχυρό αρνητικό στοιχείο στις κλασικές κατασκευές από FMLs.

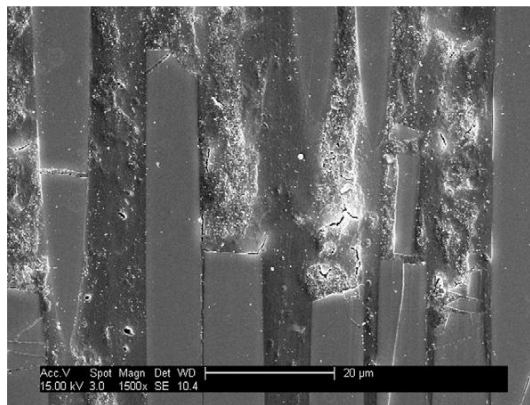
στ. Ολικό πάχος.

Η μέγιστη μόνιμη παραμόρφωση κρούσης επηρεάζεται καθοριστικά από το ολικό πάχος του FML. Όσον αφορά το μονολιθικό αλουμίνιο και το Arall, έχει βρεθεί ότι ο συντελεστής του ενεργειακού ισοζυγίου κρούσης δεν εξαρτάται άμεσα από το ολικό πάχος. Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο ποσό ενέργειας πρόκειται να απορροφηθεί, αλλά το παχύτερο πολυστρωματικό θα παρουσιάζει μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση μετά την κρούση [37]. Όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη δύναμη, η κλίση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης, και η αντοχή έναντι

διάτρησης, αυξάνονται στο GLARE, όσο αυξάνεται το πάχος του, ενώ η ειδική ενέργεια διάτρησης παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλο το εύρος των παχών που έχουν μελετηθεί [57].

Οι λεπτού πάχους στρώσεις αλουμινίου διαθέτουν υψηλότερη ειδική ενέργεια ρωγμάτωσης, η οποία οφείλεται στην πολύ αποτελεσματική μεμβρανική παραμόρφωση των λεπτών στρώσεων, σε σχέση με την καμπτική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι παχύτερες αντίστοιχες στρώσεις [56]. Σύμφωνα με τους Liaw & Liu [44] που μελέτησαν την επίπτωση του πάχους σε πάνελ GLARE5 των οποίων το πάχος κυμαίνονταν από 0.044'', μέχρι 0.172'' κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ελάχιστη ενέργεια ρωγμάτωσης (δηλ. αυτή που απαιτείται για εμφάνιση ρωγμής στην κάτω επιφάνεια) αυξάνεται με παραβολικό τρόπο ως προς το πάχος των πάνελ [51].

Σε άλλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε επίσης σε υλικά GLARE5 [59], εξετάστηκε πειραματικά η επίδραση του πάχους σε κρούσεις χαμηλής ταχύτητας και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο τύπος αστοχίας διαφοροποιείται ανάλογα με το πάχος του πάνελ. Γενικά παρατηρήθηκαν δύο τύποι αστοχίας, αυτός που οι ίνες αποτελούν τον κρίσιμο παράγοντα, και αυτός που τον κρίσιμο παράγοντα έχει το αλουμίνιο. Στο GLARE5-2/1 μετά την αποκόλληση παρουσιάστηκε αστοχία του αλουμινίου, ενώ στο GLARE5-3/2 ο κύριος λόγος αστοχίας ήταν η αποκόλληση της ελεύθερης από κρούση εξωτερικής επιφάνειας, και στη συνέχεια θραύση των ινών και διαχωρισμός τους, για να καταλήξει στη θραύση του αλουμινίου. Όταν το πάχος αυξάνει, π.χ. GLARE5-5/4 και GLARE5-6/5 ο διαχωρισμός των στρώσεων εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια της πρόσκρουσης όταν οι ενέργειες κρούσης είναι σχετικά χαμηλές. Σε υψηλότερες ενέργειες κρούσεις περισσότερη έκταση ζημιάς όπως θραύση ινών, και αποκόλληση των στρώσεων του σύνθετου συμβαίνει στην απέναντι πλευρά από αυτήν της πρόσκρουσης [59]. Μία τυπική μικρογραφία από SEM, θραύσης ινών και μήτρας φαίνεται στο Σχήμα 1.28.



Σχήμα 1.28. Μικρογραφία SEM που φαίνονται οι θραύσεις ινών και μήτρας του δεύτερου στρώματος προεμποτισμένων ινών γυαλιού σε GLARE, υπό κρούση 40J ενέργειας. [74]

### 1.5.3 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με τις συνθήκες κρούσης.

Οι συνθήκες μέσα στις οποίες πραγματοποιείται η εκάστοτε κρούση διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στην συμπεριφορά του FML, στις επιπτώσεις και εν γένει σε όλη την εξέλιξη του φαινομένου. Οι παράγοντες που συσχετίζονται με τις υπόψη συνθήκες μπορούν να συνοψιστούν στους κάτωθι :

- α. Γεωμετρία δοκιμίου,
- β. Φαινόμενα κλίμακας,

- γ. Γεωμετρία διεισδυτή,
- δ. Ρυθμός φόρτισης, που με τη σειρά του αναλύεται σε:
  - δ1. Απλή διείσδυση,
  - δ2. Χαμηλής ταχύτητας και υψηλής ταχύτητας κρούση,
  - δ3. Καταπόνηση εκρηκτικού τύπου,
- ε. σημείο πρόσκρουσης,
- στ. Προένταση.

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύεται διεξοδικά έκαστος παράγοντας.

#### α. Γεωμετρία δοκιμίου & επίδραση κλίμακας.

Μία αύξηση του μεγέθους του πάνελ που υπόκειται σε κρούση, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αρχικής κλίσης της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, και την ελάττωση του μέγιστου φορτίου της κρούσης. Επιπλέον η απαιτούμενη ενέργεια για διάτρηση αυξάνεται λόγω της μειωμένης ελαστικής ακαμψίας των μεγαλύτερης διαμέτρου πάνελ και της αυξημένης απόσβεσης ελαστικής και πλαστικής ενέργειας [60]. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε ανάμεσα σε δύο τύπους γεωμετρίας δοκιμίων [61] ενός τετραγωνικού ( τυποποίησης NASA) και ενός κυκλικού, χωρίς να υπάρχει ομοιότητα στα μεγέθη αυτών, παρατηρήθηκε ότι στα τετραγωνικά δοκίμια παρουσιάζονταν μεγάλες παραμορφώσεις στα άκρα του δοκιμίου, ενώ στα κυκλικά δεν παρουσιάζονταν καθόλου αντίστοιχες παραμορφώσεις.

#### β. Φαινόμενα κλίμακας.

Όσον αφορά την επίδραση κλίμακας, υπάρχει στην βιβλιογραφία μία έρευνα που εξετάζει το συγκεκριμένο φαινόμενο σε χαμηλής ταχύτητας κρούση σε δοκίμια FML [62]. Η συγκεκριμένη μελέτη σύμφωνα με την ανάλυση ομοιότητας (similitude analysis) διαχωρίζει τις παραμέτρους σε παραμέτρους ομοιότητας εισόδου, συμπεριλαμβάνοντας το χαρακτηριστικό μήκος, την πυκνότητα, τη μάζα, την ταχύτητα, και τις σταθερές του υλικού με συντελεστές κλίμακας:  $\lambda, 1, \lambda^3, 1, 1$  αντίστοιχα, και τον δεύτερο τύπο παραμέτρων που χαρακτηρίζονται ως παράμετροι απόκρισης (response parameters) και συμπεριλαμβάνουν το φορτίο, τον χρόνο απόκρισης, την παραμόρφωση, την τάση, την μετατόπιση και τον ρυθμό παραμόρφωσης με αντίστοιχους συντελεστές κλίμακας:  $\lambda^2, \lambda, 1, 1, \lambda, \lambda^{-1}$ , όπου το  $\lambda$  είναι ένας γεωμετρικός συντελεστής (που προσδιορίζεται ως ο λόγος του χαρακτηριστικού μήκους στο μοντέλο ως προς την αντίστοιχη τιμή του στην πραγματικότητα). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τέσσερις τιμές του συντελεστή  $\lambda$ : 1/4, 1/2, 3/4 και 1. Κατά τη διάρκεια της μελέτης κρούσης χαμηλής ταχύτητας πάνω σε FMLs, και των αντίστοιχων καμπυλών δύναμης- μετατόπισης και ενεργειών έναρξης αστοχίας, διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά των FMLs σε κρούση υπακούει τον νόμο κλίμακας. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της χρονικής εξάρτησης των σύνθετων υλικών είναι γνωστό ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης δεν μπορεί να τεθεί υπό κλίμακα βάσει ενός απλού νόμου, και αυτό ισχύει και σε προβλήματα που εμπλέκονται αστοχίες. Επομένως οι παραπάνω απλοί νόμοι κλίμακας δεν δύναται να εφαρμοστούν απευθείας αφού πρέπει να ληφθεί υπόψιν το ανωτέρω φαινόμενο.

#### γ. Γεωμετρία του διεισδυτή.

Σύμφωνα με παρατηρήσεις που αναφέρονται σε δημοσιεύσεις [51],[63] όταν η κρούση πραγματοποιείται από μικρής διαστάσεως διεισδυτές κατά τη διάρκεια κρούσεων από

ελεύθερες πτώσεις πάνω σε δοκίμια GLARE2 και GLARE3, εμφανίζεται μεγάλος βαθμός αστοχίας περίξ του σημείου κρούσης, ενώ η κρουστική ενέργεια απορροφάται κατά κύριο μέσω τοπικών αστοχιών (θραύσεις, αποκολλήσεις, και πλαστικές παραμορφώσεις). Αντίθετα, σε περιπτώσεις στις οποίες ο διεισδυτής είχε διάμετρο πέραν των 25.4mm δεν προκαλούσε αξιοσημείωτη τοπική αστοχία, ενώ η κρουστική ενέργεια απορροφούνταν μέσω της ολικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Γενικά, ισχύει ότι αύξηση της διαμέτρου του βλήματος συνεπάγεται και αύξηση της μέγιστης αναπτυσσόμενης κρουστικής δύναμης, καθώς και της ενέργειας διάτρησης του FML [51].

Στην περίπτωση που ο διεισδυτής έχει σχήμα επίμηκες-γραμμικού ανεξαρτήτως της σχετικής γωνίας που έχει με τις ίνες, εμφανίζονται δύο διαμπερείς ρωγμές στα δύο άκρα του διεισδυτή, οι οποίες διαδίδονται (σε δοκίμια GLARE2) κατά μήκος των ινών. Παρόλα αυτά, στην καμπύλη περιγραφής της δύναμης ως προς τον χρόνο και στην περίπτωση ινών με προσανατολισμό 0° υπάρχει μία κάθετη απότομη πτώση φορτίου που οφείλεται στην θραύση των ινών, ενώ στην περίπτωση που οι ίνες έχουν προσανατολισμό 45° και 90° δεν έχει αναφερθεί κάποια διαφορά [63].

Σύμφωνα με τη μελέτη των Compston και Cantwell [39] εξετάστηκαν δύο γεωμετρίες διεισδυτών (ημισφαιρικοί και επίπεδοι) σε κρούσεις υψηλών ταχυτήτων πάνω σε δοκίμια FML πολυπροπυλενικής βάσης. Η ενέργεια έναρξης διάτρησης και η ειδική ενέργεια διάτρησης στην περίπτωση του επίπεδου διεισδυτή ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ενέργειες για ημισφαιρικό διεισδυτή. Σημειώνεται ότι ο τύπος αστοχίας στην διάτρηση φύλλου αλουμινίου από ημισφαιρικό διεισδυτή συνδέεται με μεγάλη πλαστική παραμόρφωση και ρωγματώσεις λόγω εφελκυσμού στην πίσω πλευρά, ενώ ένα επίπεδο βλήμα θα προκαλούσε μία δισκοειδούς σχήματος διόγκωση μετά τη διάτρηση, χαρακτηριστικό διατμητικής αστοχίας, με λιγότερη πλαστική παραμόρφωση με τελικό αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ενέργεια διάτρησης. Παρόλα αυτά, όσον αφορά δοκίμια FMLs, κρούσεις με βλήματα που είχαν επίπεδο σχήμα δημιουργούν μεγαλύτερες περιοχές θραύσεις, οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερες ενέργειες για διάτρηση.

#### δ. Ρυθμός φόρτισης.

Τα αποτελέσματα που επιφέρει ο ρυθμός φόρτισης περιγράφονται στις τρεις υποκατηγορίες που αναλύονται στη συνέχεια:

##### δ1. Διαφορά στατικής διείσδυσης και κρουστικής καταπόνησης.

Γενικά οι καμπύλες εξάρτησης των σχεδόν στατικών δυνάμεων ως προς τις μετατοπίσεις περιγράφουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό το φαινόμενο της κρούσης πολύ χαμηλής ταχύτητας. Παρόλα αυτά υπάρχει μία σημαντική διαφοροποίηση όσον αφορά την κεντρική παραμόρφωση ανάμεσα στη στατική διείσδυση και στις κρούσεις πολύ χαμηλών ταχυτήτων. Εξετάζοντας τον παράγοντα της ενέργειας πρώτης αστοχίας, το GLARE κατά τη διάρκεια κρούσης πολύ χαμηλής ταχύτητας, χρειάζεται περισσότερη ενέργεια (σε σχέση με τις στατικές συνθήκες) για την εμφάνιση της πρώτης αστοχίας στις ίνες. Αντιθέτως το Agall, απαιτεί λιγότερη κρουστική ενέργεια ώστε να προκληθεί η πρώτη θραύση στις ίνες εν συγκρίσει με την αντίστοιχη όμοια στατική κατάσταση [37].

##### δ2. Κρούση χαμηλής ταχύτητας και κρούση υψηλής ταχύτητας.

Στη βιβλιογραφία, οι δημοσιεύσεις που αφορούν κρούσεις υψηλών ταχυτήτων πάνω σε FMLs, θερμοσκληρυνόμενων αλλά και θερμοπλαστικών βάσεων, είναι γενικά περιορισμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες που έχουν ως αντικείμενο μελέτης τις κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων [37]. Παρόλα αυτά από την σύγκριση των υπόψη μελετών δύναται να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, ορισμένα εκ των οποίων αναλύονται παρακάτω :

- Κατά τη διάρκεια χαμηλής ταχύτητας κρούσης, και όσον αφορά μικρές κρουστικές ενέργειες, η αστοχία των FMLs, ξεκινά με μία τοπική αμυχή στην άνω επιφάνεια και με μία τοπική ρωγμή παράλληλη με την διεύθυνση διέλασης στην πίσω επιφάνεια του στρώματος αλουμινίου. Αυξάνοντας την ενέργεια κρούσης, το μήκος της ρωγμής του αλουμινίου, καθώς και το μέγεθος της αμυχής άνω επιφανείας, αυξάνονται ολοένα μέχρι το σημείο που ξεκινάει το στάδιο της διάτρησης το οποίο συνήθως καταλήγει σε μία διαμπερή οπή και σε περιορισμένο βαθμό εκχειλώσεων στην πίσω επιφάνεια του FML. Πέριξ του σημείου κρούσης αναπτύσσεται ένας μηχανισμός εκλέπτυνσης εξ' αιτίας των μεμβρανικών τάσεων και διαρροών που λαμβάνουν χώρα στις στρώσεις του αλουμινίου κατά το φαινόμενο της κρούσης.

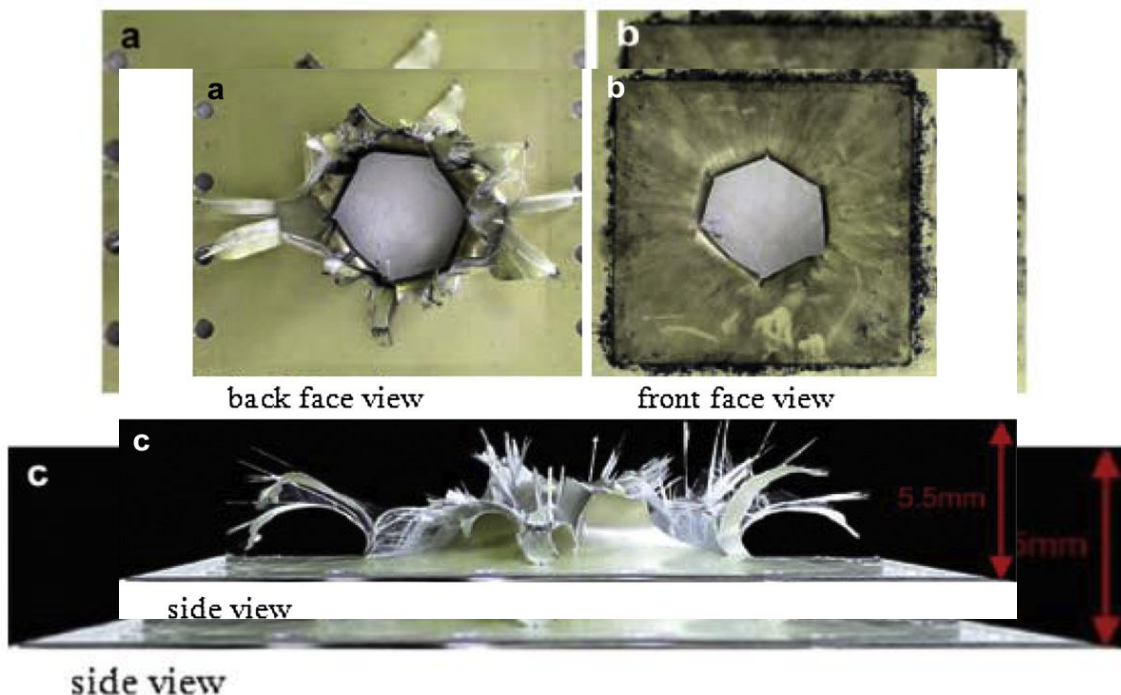
- Κατά τη διάρκεια χαμηλής ταχύτητας κρούσεων, εγκάρσια διατμητικά κύματα φτάνουν στο σύνορο του FML, και ανακλώνται πίσω. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει μέχρι το στάδιο της διάτρησης, όπου ( εφόσον αγνοηθεί ο παράγοντας της επίδρασης των τασικών κυμάτων που διαδίδονται κατά την διεύθυνση του πάχους), δύο εγκάρσια διατμητικά κύματα διαδίδονται πλευρικά, τα οποία σε συνθήκες υψηλών ταχυτήτων κρούσεων μετατρέπονται σε καμπτικά ή/και σε μεμβρανικά [38]. Αυτή η διαπίστωση έχει πολύ σημαντική επίδραση στην όλη κρουστική συμπεριφορά του πάνελ. Ειδικότερα, αναμένεται να πραγματοποιηθεί περισσότερη τοπική και περιορισμένη ολική παραμόρφωση του πάνελ, κατά τη διάρκεια κρούσεων υψηλών ταχυτήτων.

- Σύμφωνα με δημοσιευμένη μελέτη [38], έχει επιτευχθεί η ποσοτικοποίηση μέσω αναλυτικών μοντέλων, της κατανομής της απορροφούμενης κρουστικής ενέργειας από κρούσεις υψηλών ταχυτήτων πάνω σε δοκίμια GLARE. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το 84%-92% του συνόλου της ενέργειας που απορροφάται είναι ενέργεια παραμόρφωσης εξ' αιτίας της κάμψης. Λεπτότερα πάνελ απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας παραμόρφωσης σε σχέση με παχύτερα πάνελ. Το 2%-9% της ολικής ενέργειας καταναλώνεται στην αποκόλληση των στρώσεων, ενώ ισχύει ότι λεπτότερα πάνελ απορροφούν χαμηλότερο ποσοστό ενέργειας σε σχέση με τα παχύτερα. Τέλος, περίπου το 7% της ενέργειας καταναλώνεται στην θραύση λόγω εφελκυστικής καταπόνησης. Τα ανωτέρω ευρήματα δίνουν έμφαση στη χρήση λεπτότερων πάνελ FMLs, τα οποία επιτρέπουν απορρόφηση ενέργειας μέσω της μεμβρανικής τάνυσης.

- Μία σημαντική παρατήρηση που αφορά κρούσεις χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων πάνω σε δοκίμια FMLs, αναφέρεται στο φαινόμενο αποκόλλησης ανάμεσα στην χαμηλότερη στρώση αλουμινίου και στην παρακείμενη στρώση εμποτισμένης στρώσης, το οποίο μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια κρούσεων υψηλών ταχυτήτων. Στο συγκεκριμένο φαινόμενο αποδίδεται η υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας καθώς και η επιπλέον αντίσταση έναντι διάτρησης που παρουσιάζουν τα FMLs κατά τις κρούσεις υψηλών ταχυτήτων. Η σύνδεση ανάμεσα στις προεμποτισμένες στρώσεις συνθέτου και στις στρώσεις αλουμινίου θεωρείται σημείο αδυναμίας κατά τη διάρκεια κρούσεων υψηλών ταχυτήτων, ενώ αντίθετα στις κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων, η υπόψη σύνδεση στρώσεων δεν επηρεάζεται και παραμένει ισχυρή. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η διεπιφανειακή ανθεκτικότητα αυξάνεται αρχικά με το ρυθμό παραμόρφωσης, ενώ στη συνέχεια μειώνεται σε μεγαλύτερους ρυθμούς [64], επομένως σε υψηλές κρουστικές ταχύτητες, η τάση αποκόλλησης μεταξύ του αλουμινίου και των στρώσεων του συνθέτου είναι αρκετά μεγάλη, και το αποκολληθέν στρώμα αλουμινίου μπορεί να εκτονώσει επιπλέον ενέργεια μέσω της μεμβρανικής παραμόρφωσης. Με αυτόν τον τρόπο η ελεύθερη παραμόρφωση οδηγεί σε καλύτερη κρουστική συμπεριφορά των FMLs. Επιπλέον, παράλληλα με αυτό το φαινόμενο, οι στρώσεις του συνθέτου με υψηλότερη αντοχή μήτρας (δηλ. θερμοπλαστικές) μπορούν να συνεισφέρουν αποδοτικότερα στην απορρόφηση ενέργειας του FML.

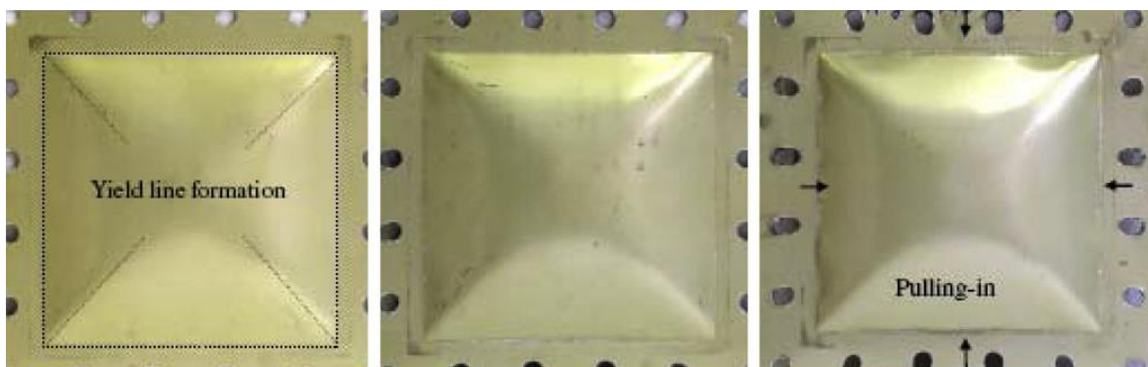
### δ3. Καταπόνηση εκρηκτικού τύπου.

Οι περισσότερες μελέτες που εστιάζονται στην καταπόνηση εκρηκτικού τύπου των FMLs, συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη του Langdon [64]. Τα πάνελ καταπονούνται είτε τοπικά είτε με ομοιόμορφη κατανομή, ενώ τα αποτελέσματα αφορούν και λεπτού πάχους αλλά και μεγαλύτερου πάχους πάνελ (το μεγαλύτερο πάχος επιτυγχάνεται με αναλογικά περισσότερες στρώσεις σύνθετων στρώσεων). Η τοπική καταπόνηση στα λεπτότερα πάνελ οδηγεί σε μεμβρανική παραμόρφωση εξ' αιτίας της σχετικά μεγάλης αναλογίας των στρώσεων αλουμινίου εντός του πολυστρωματικού. Τα παχύτερα πάνελ υπόκεινται σε αποκόλληση της πίσω επιφάνειας, είτε ως εκτόπιση ολόκληρης της πίσω επιφάνειας, είτε ως αποκόλληση μιας περιορισμένης περιοχής χωρίς μεγάλη μεμβρανική δράση [64]. Έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην συμπεριφορά του GLARE3 έναντι εκρηκτικής κρούσης [65] έδειξε την ύπαρξη μιας μεγάλης οπής στο κέντρο του πάνελ, με αποκολλήσεις, θραύσεις ινών, και αστοχία έντονων εκχειλώσεων περιφερειακά της οπής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.29.



Σχήμα 1.29. Φωτογραφίες GLARE 3 υπό τοπική κρούση εκρηκτικού τύπου. [64]

Στις περιπτώσεις ομοιόμορφης καταπόνησης κρούσεων εκρηκτικού τύπου σε δοκίμια επίσης GLARE3, παρατηρήθηκε συμπεριφορά παρόμοια με αυτή που παρουσιάζουν τα φύλλα μονολιθικών μετάλλων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.30, στις οποίες είναι εμφανής ο σχηματισμός γραμμών διαρροής, αλλά και η μεγάλη πλαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 1.30. Πάνελ GLARE3, υπό ομοιόμορφης κατανομής κρούση εκρηκτικού τύπου. [64]

### ε. Προένταση.

Ο παράγοντας της προέντασης έχει διερευνηθεί από τον Vlot [36], ο οποίος χρησιμοποίησε δοκίμια Arall 3/2, που εμπεριείχαν τα κράματα αλουμινίου 2024-T3 και 7075-T6, ενώ οι προεντάσεις που εφαρμόστηκαν στα δοκίμια πριν τις κρούσεις είχαν εύρος από 0-350MPa. Η γενική παρατήρηση ήταν ότι η μέγιστη κεντρική παραμόρφωση καθώς και η διάρκεια επαφής μειώνονταν όσο η προένταση των δοκιμίων αυξάνονταν, ενώ η μέγιστη κρουστική δύναμη αυξάνονταν στα τεστ ελαστικών κρούσεων (δηλ. σε κρούσεις χαμηλής ενέργειας). Σε περιπτώσεις υψηλών κρουστικών ενεργειών (σε τεστ πλαστικών κρούσεων) η επίδραση της προέντασης στις καμπύλες δύναμης-χρόνου και δύναμης-παραμόρφωσης του Arall είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το αλουμίνιο.

Με αυξανόμενη προένταση, η έναρξη της ρωγμάτωσης εμφανίζεται ολοένα και νωρίτερα, ενώ σε υψηλές προεντάσεις παρουσιάζεται πολύ μεγάλη αύξηση του μήκους ρωγμής. Σε δοκίμια που δεν έχουν υποστεί προένταση, οι ρωγμές διαδίδονται κατά τη διεύθυνση των ινών, το υλικό εκχειλώνεται και στη συνέχεια δημιουργείται μια οπή στο πολυστρωματικό, ενώ σε δοκίμια με προένταση οι ρωγμές διαδίδονται κάθετα στη διεύθυνση των ινών και η συγκέντρωση των τάσεων δεν εκτονώνεται, γεγονός που έχει αρνητικό αντίκτυπο στην παραμένουσα αντοχή του δοκιμίου [66].

## 1.6 Προσομοίωση της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs.

Μία συστηματική βήμα προς βήμα προσέγγιση προσομοίωσης της κρουστικής συμπεριφοράς των κατασκευών από FML, είναι η έναρξη με τη σχεδόν στατική διείσδυση, ακολουθούμενη από την κρούση χαμηλής ταχύτητας και τελικά αυξάνοντας το ρυθμό παραμόρφωσης της φόρτισης, στην κρούση υψηλών ταχυτήτων.

### 1.6.1 Σχεδόν στατική διείσδυση.

Ο Vlot [11] παρουσίασε μία ανάλυση μοντελοποίησης της μέγιστης κεντρικής παραμόρφωσης του πολυστρωματικού, βασισμένη στις απλοποιημένες εξισώσεις Von Karman. Οι υπόψη εξισώσεις εφαρμόζονται σε σύνθετα υλικά τετράγωνου σχήματος και σε κυκλικά μεταλλικά ισοτροπικά φύλλα. Ο Vlot έλαβε υπόψιν τους υψηλότερης τάξης, μη γραμμικούς όρους που σχετίζονται με την τάνυση μεγάλων παραμορφώσεων. Έτσι, θεωρώντας μια κατάλληλη συνάρτηση σχήματος που να ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες, προσδιορίζεται η ελαστοπλαστική ενέργεια ενός στοιχείου όγκου της περιοχής υπό της διγραμμικής καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Μετά τον υπολογισμό της παραμορφωσιακής ενέργειας, με ολοκλήρωση της ενέργειας των στοιχείων, και με γνωστό το σχήμα της αστοχίας σε συγκεκριμένη τιμή της κεντρικής παραμόρφωσης, προσδιορίζεται η πραγματική παραμόρφωση από τις απλοποιημένες εξισώσεις Von Karman. Η αντίστοιχη δύναμη επαφής προσδιορίζεται από την παραγωγή της ενέργειας ως προς την κεντρική παραμόρφωση.

Σε μία παράλληλη προσέγγιση, η έρευνα των Hoo Fat πάνω σε βαλλιστικές κρούσεις σε GLARE [38] εστιάστηκε στην εξάρτηση της παραμόρφωσης του GLARE συναρτήσει του φορτίου υπό στατικές καταπονήσεις. Επίσης απλοποίησαν τις εξισώσεις Von Karman,

θεωρώντας ότι οι μετατοπίσεις είναι μεγάλες, οι παραμορφώσεις είναι πεπερασμένες, οι συνεπίπεδες μετατοπίσεις δύνανται να αγνοηθούν, και ότι η παραμορφωσιακή ενέργεια μπορεί να γραφτεί ως προς τις εγκάρσιες μετατοπίσεις μόνο. Η μοναδική διαφοροποίηση με την έρευνα της προηγούμενης παραγράφου έγκειται στη θεώρηση της συμπεριφοράς του στρώματος αλουμινίου και πιο συγκεκριμένα στην πολλαπλά γραμμική εξάρτηση της παραμόρφωσης ως προς την αντοχή και όχι σε διγραμμική συμπεριφορά. Επιπλέον, ενσωμάτωσαν μία ανάλυση αστοχίας στο μοντέλο τους εξ' αιτίας του αποχωρισμού των στρώσεων αλουμινίου και προεμποτισμένων ινών, και των αποκολλήσεων εντός των στρώσεων συνθέτου, επαναπροσδιορίζοντας τα μητρώα μεμβρανικής και καμπτικής ακαμψίας των πάνελ. Παρόλα αυτά, εφόσον η αντίσταση μεμβρανικής τάνυσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της καμπτικής αντίστασης, και εφόσον η αποκόλληση δεν μεταβάλλει την μεμβρανική ακαμψία του πάνελ, το φαινόμενο της αποκόλλησης δεν είχε σημαντική επίδραση στην καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης.

Πρόσφατα, στις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Τσαμασφύρο και Μπικάκη [67] [68], διερευνήθηκε η απόκριση λεπτών κυκλικών πλήρως πακτωμένων πλακών GLARE, που καταπονούνται κάθετα από ημισφαιρικό διεισδυτή στο κέντρο του δοκιμίου. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό φορτίου-διείσδυσης και της πρώτης αστοχίας που οφείλεται στην θραύση του συνθέτου λόγω εφελκυσμού, το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε κυκλικές πλάκες. Το αλουμίνιο θεωρήθηκε ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό, ενώ οι προεμποτισμένες ίνες θεωρήθηκαν ως γραμμικά ελαστικές. Στις εργασίες τους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ritz, σε συνδυασμό με κατάλληλες προσεγγιστικές συναρτήσεις ώστε να ικανοποιούνται οι συνοριακές συνθήκες. Η προσέγγιση με τη μέθοδο Ritz με τρεις παραμέτρους που λαμβάνει υπόψιν τόσο την καμπτική όσο και την μεμβρανική ακαμψία της πλάκας αποδείχτηκε ότι συγκλίνει πάρα πολύ ικανοποιητικά.

### 1.6.2 Κρούση χαμηλής ταχύτητας.

Για τη μοντελοποίηση κρούσεων χαμηλής ταχύτητας υπάρχουν πολύ λίγες δημοσιεύσεις. Εκτενώς με το θέμα ασχολήθηκε ο Vlot [36], [37] ο οποίος πρότεινε δύο γραμμικά και μη γραμμικά ελαστικά μοντέλα και ένα μη γραμμικό μοντέλο ελαστοπλαστικής κρούσης για την περιγραφή των καταπονήσεων σε FMLs, τα οποία υποβάλλονται σε κρούσεις χαμηλής ταχύτητας.

Αρχικά θεώρησε ένα απλό σύστημα μάζας-ελατηρίου για την μοντελοποίηση της κρούσης μάζας  $m_p$ , αρχικής ταχύτητας  $V_0$ , πάνω σε πακτωμένο κυκλικό δοκίμιο με σταθερή ακαμψία  $C$ , και μια ισοδύναμη μάζα  $m_{eq}$ . Θεωρείται επίσης ότι η επαφή μεταξύ του δοκιμίου και του διεισδυτή διατηρείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της κρούσης, και ότι η ακαμψία της πλάκας είναι ανεξάρτητη της παραμόρφωσης, δηλαδή ότι παραμένει σταθερή καθόλη την κρούση. Η παραμορφωσιακή ενέργεια για καθαρή κάμψη μπορεί να προσδιοριστεί θεωρώντας ένα προφίλ κάμψης της πλάκας. Η ισοδύναμη μάζα της πλάκας μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση της κινητικής ενέργειας, η οποία για μία κυκλική πλάκα είναι περίπου  $0,13m_{plate}$  [37].

Σε μεταγενέστερη μελέτη του ο Vlot [37] θεώρησε την επαφή μεταξύ του βλήματος και της πλάκας χρησιμοποιώντας τον Hertzian νόμο επαφής. Η πλάκα μοντελοποιήθηκε με δύο εν σειρά ελατήρια : ένα μη γραμμικό με την ακαμψία επαφής Hertzian, και ένα γραμμικό με την

καμπτική ακαμψία της πλάκας. Γράφοντας την ολική παραμορφωσιακή ενέργεια, την κινητική ενέργεια, και την δυναμική ενέργεια της πλάκας και του βλήματος και χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης ενέργειας καταλήγει στη σχέση:

$$T_{plate} + T_{impactor} + U_{plate} + E_{impactor} + E_{plate} = \frac{1}{2} m_p V_0^2 \quad (1.2)$$

όπου:

$T_{plate}$  : Κινητική ενέργεια πλάκας,

$T_{impactor}$  : Κινητική ενέργεια βλήματος,

$U_{plate}$  : Εσωτερική ενέργεια πλάκας,

$E_{impactor}$  : Μεταβολή δυναμικής ενέργειας βλήματος,

$E_{plate}$  : Μεταβολή δυναμικής ενέργειας πλάκας,

$m_p$  : Μάζα βλήματος,

$V_0$  : Αρχική ταχύτητα βλήματος.

Η εξίσωση με τις ενέργειες μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας εξισώσεις κίνησης Lagrange με δύο γενικευμένες μεταβλητές ( $S$  και  $w_0$ ), οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν με μία προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών. Στη συνέχεια ο Vlot επέκτεινε το μοντέλο του σε ένα τελείως μη γραμμικό ελαστικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τις απλοποιημένες εξισώσεις Von Karman, τον Hertzian νόμο επαφής, και αριθμητική ολοκλήρωση Newmark.

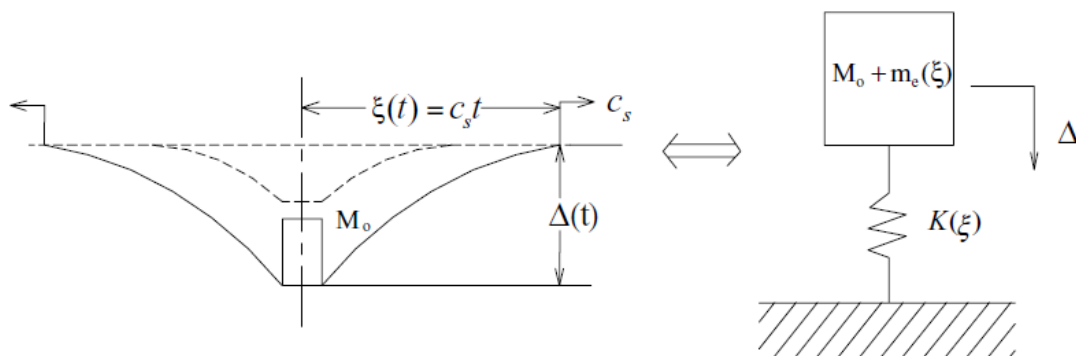
Το τρίτο μοντέλο του Vlot είναι ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο για κρούσεις επάνω σε κυκλικές πλάκες. Το ελαστοπλαστικό υλικό θεωρήθηκε να έχει διγραμμική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, η οποία περιγράφεται από το μέτρο ελαστικότητας Young  $E$ , τη τάση διαρροής  $\sigma_y$  και την κράτυνση  $\alpha$ . Η ολική παραμορφωσιακή ενέργεια στα ελαστοπλαστικά στρώματα (στρώσεις αλουμινίου) μπορεί να προσδιοριστεί με ολοκλήρωση της παραμορφωσιακής ενέργειας επί του στοιχείου όγκου, το οποίο είναι η περιοχή που περικλείεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Επίσης η παραμορφωσιακή ενέργεια των σύνθετων στρώσεων (που οφείλεται μόνο στις ίνες) υπολογίστηκε και τελικώς η αντίστοιχη δύναμη επαφής προσδιορίστηκε με παραγωγή της παραμορφωσιακής ενέργειας ως προς την κεντρική παραμόρφωση.

Μια διαφορετική προσέγγιση του θέματος έγινε από τον Caprino [69] με σκοπό να προσομοιάσει τις πειραματικές καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης ενός πολυστρωματικού, χρησιμοποιώντας απλά πολυώνυμα δευτέρου βαθμού. Μέσω αυτής της απλής μεθόδου, (η οποία όμως αγνοεί τοπικές διεισδύσεις-αμυχές, την έναρξη της αστοχίας και την ανάπτυξη αυτής), μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η ολική συμπεριφορά της κατασκευής. Παρόλα αυτά, ο βασικός περιορισμός της μεθόδου είναι ότι χρειάζονται αρχικά πειραματικά δεδομένα για την εκάστοτε δομή διαστρωμάτωσης. Σε μία παρόμοια οπτική κινήθηκε και η έρευνα των Abatan και Hu [70], οι οποίοι ανέπτυξαν ένα γραμμικό ελαστικό μοντέλο για τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η δομή διαστρωμάτωσης των FMLs στην συμπεριφορά έναντι των κρούσεων χαμηλών ταχυτήτων. Το συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η σχετική θέση των συστατικών του FML έχει σημαντική επίδραση στην κρουστική συμπεριφορά του. Επιπλέον,

για τα ίδια βάρη ο αριθμός των στρώσεων του FML, δεν έχει σημαντική επίπτωση στην αντίσταση σε κρούση, όμως η σχετική αναλογία των υλικών του έχει σημαντική επίδραση. Παρόλα αυτά, ο βασικός περιορισμός αυτού του τύπου προσέγγισης, είναι ότι αγνοείται η πλαστική συμπεριφορά των μεταλλικών στρώσεων, η οποία διαδραματίζει βασικό ρόλο στη συμπεριφορά του FML.

### 1.6.3 Κρούση υψηλών ταχυτήτων.

Μία από τις ελάχιστες αναλυτικές έρευνες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και αφορά κρούσεις υψηλών ταχυτήτων είναι των Hoo Fat et al. [38]. Στη συγκεκριμένη εργασία οι εξισώσεις κίνησης έχουν σχηματιστεί και τροποποιηθεί με το ακόλουθο σκεπτικό : η αδράνεια και η ακαμψία εκφράστηκαν ως χρονικά μεταβαλλόμενες συναρτήσεις χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από στατικές διεισδύσεις, και θέτοντας ως έκταση του δοκιμίου την απόσταση που διανύει το διατμητικό κύμα που διαδίδει την αποκόλληση και την θραύση. Στη συνέχεια καταστρώθηκαν οι σχετικές εξισώσεις ενέργειας που απαιτείται για αποκόλληση, αποχωρισμό στρώσεων, εφελκυστική θραύση ινών και εκχειλώσεων αλουμινίου. Τέλος, μελετήθηκε η βαλλιστική απόκριση του GLARE σε δύο φάσεις, μία πριν την αστοχία ινών/εποξικής μήτρας, και μία μετά την αστοχία.



Σχήμα 1.31. Γραφική απεικόνιση της κρούσης βλήματος- GLARE και το ισοδύναμο μοντέλο μάζας-ελατηρίου. [38]

Μία συνηθισμένη πολιτική που εφαρμόζεται για την προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης πλακών GLARE σε βαλλιστική κρούση υψηλής ταχύτητας με χρήση κυλινδρικού βλήματος, είναι η υιοθέτηση ενός συστήματος μάζας-ελατηρίου (Σχήμα 1.31). Σε ένα τέτοιο μοντέλο η αδράνεια της μάζας και η ακαμψία του ελατηρίου υπολογίζονται, αρχικά, από το στατικό πρόβλημα. Στη συνέχεια εκφράζονται ως συναρτήσεις του χρόνου θέτοντας την παραμόρφωση του δοκιμίου GLARE κάθετα στον άξονα κίνησης του βλήματος ίση με την απόσταση που έχουν διανύσει τα διατμητικά κύματα στην επιφάνεια του δοκιμίου έχοντας ως σημείο εκκίνησης το σημείο πρόσκρουσης του βλήματος. Τελικά, το βαλλιστικό όριο υπολογίζεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας κατά την οποία η κινητική ενέργεια του βλήματος δαπανάται για την δημιουργία διαφόρων αστοχιών στο δοκίμιο ανάλογα με τους μηχανισμούς θραύσης που έχουν θεωρηθεί κάθε φορά. Αυτό συμβαίνει διότι στις κρούσεις υψηλής ταχύτητας τα διατμητικά κύματα δεν καταφέρνουν πάντα να φτάσουν μέχρι τα σύνορα του δοκιμίου GLARE πριν το βλήμα του προκαλέσει διάτρηση. Στις περιπτώσεις όπου τα διατμητικά κύματα δεν καταφέρνουν να φτάσουν στα σύνορα του δοκιμίου πριν τη διάτρηση,

για τον υπολογισμό της αδράνειας και της ακαμψίας λαμβάνεται υπόψη η έκταση της παραμόρφωσης η οποία είναι χρονικά εξαρτώμενη, ενώ στις περιπτώσεις όπου τα κύματα καταφέρνουν να φτάσουν ως τα σύνορα του δοκιμίου, η παραμόρφωση γίνεται μόνιμη και για τον υπολογισμό της αδράνειας και της ακαμψίας λαμβάνεται υπόψη η πλήρης έκταση του δοκιμίου.

Τελικά, το αναλυτικό μοντέλο για τις βαλλιστικές κρούσεις υψηλής ταχύτητας καταλήγει να είναι ένας συνδυασμός της φάσης διάδοσης των κυμάτων και της στατικής φάσης. Πιο συγκεκριμένα, για να υπολογιστεί η δυναμική απόκριση του δοκιμίου GLARE κατά την φάση διάδοσης των κυμάτων γίνεται χρήση του ισοδύναμου μοντέλου μάζας-ελατηρίου, όπου τόσο η αδράνεια του βλήματος και του δοκιμίου όσο και η ακαμψία του ελατηρίου εξαρτώνται από την έκταση της παραμόρφωσης του δοκιμίου GLARE. Οι συναρτήσεις υπολογισμού της ακαμψίας και της αδράνειας υπολογίζονται από τη στατική απόκριση του GLARE.

Στην πλήρη επίλυση του παραπάνω προβλήματος σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το ισοζύγιο ενεργειών. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά μεταξύ της αρχικής και τελικής κινητικής ενέργειας του κυλινδρικού βλήματος, που αντιστοιχούν στην ταχύτητά του ακριβώς πριν τη σύγκρουση και ακριβώς μετά τη διάτρηση αντίστοιχα, ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των διαφόρων μορφών ενέργειας, που σχετίζονται με την αντίσταση της πλάκας GLARE στην κρούση. Αναλυτικότερα, θεωρείται ότι η κινητική ενέργεια του βλήματος δαπανάται σε ενέργεια παραμόρφωσης και πλαστικό έργο ( $E_{bm}$ ) κατά την κάμψη της πλάκας και την τάνυση μεμβράνης (membrane stretching), σε ενέργεια αποχωρισμού ( $E_{del}$ ) μεταξύ διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού ( $E_{del}$ ), σε ενέργεια αποχωρισμού ( $E_{deb}$ ) μεταξύ στρώσης αλουμινίου και στρώσης σύνθετου υλικού, σε ενέργεια θραύσης ( $E_t$ ) των στρώσεων σύνθετου υλικού και, τέλος, σε ενέργεια θραύσης ( $E_p$ ) των στρώσεων αλουμινίου.

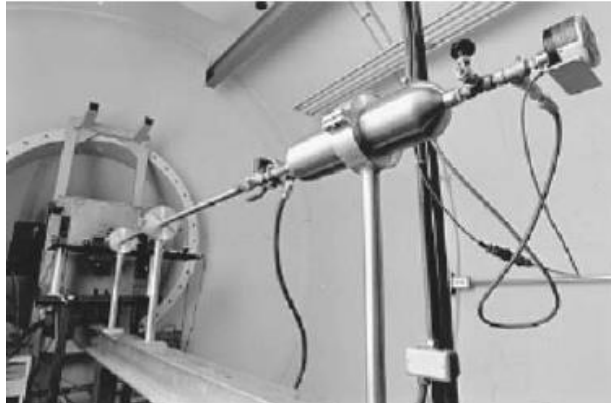
	0.06 in.-GLARE 5		0.076 in.-GLARE 5		0.1 in.-GLARE 5		2 × 0.076 in.-GLARE 5		2 × 0.1 in.-GLARE 5	
	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test
$V_{50}$ (m/s)	124.09	137.16	131.31	150.88	158.33	156.97	192.41	185.93	214.00	211.23
(% diff)	(-9.5%)		(-13.0%)		(+0.9%)		(+3.5%)		(+1.3%)	
$E_{bm}$ (J)	101.13	-	108.23	-	159.83	-	224.75	-	274.29	-
$E_{del}$ (J)	2.30	-	5.83	-	7.60	-	22.1	-	29.95	-
$E_t$ (J)	3.43	-	6.86	-	6.86	-	13.72	-	13.72	-
$E_p$ (J)	2.85	-	1.54	-	4.32	-	3.21	-	8.34	-
$E_{tot}$ (J)	109.71	134.04	122.85	162.20	178.61	175.55	263.78	246.31	326.30	317.90
(% diff)	(-18.2%)		(-24.3%)		(+1.7%)		(+7.1%)		(+2.6%)	

Σχήμα 1.32: Επιμερισμός ενεργειών μετά την διαπέραση του κυλινδρικού βλήματος από δοκίμια GLARE διαφόρων διαμορφώσεων. [38]

Μέσω της παραπάνω υπολογιστικής προσομοίωσης δύναται να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες για το φαινόμενο της βαλλιστικής κρούσης υψηλών ταχυτήτων, όπως καμπύλες ταχύτητας βλήματος-χρόνου, παραμόρφωσης πλάκας-χρόνου, δύναμης επαφής βλήματος - χρόνου, κτλ..

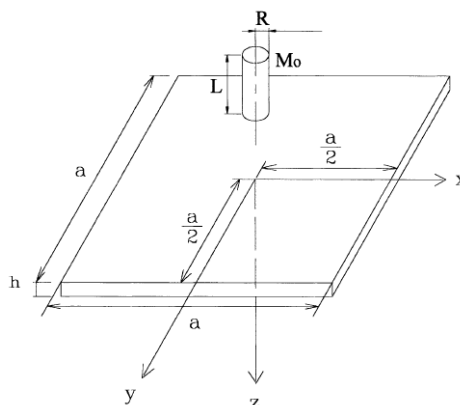
## 1.7 Πείραμα βαλλιστικής κρούσης υψηλής ταχύτητας

Σε ένα τυπικό πείραμα βαλλιστικής κρούσης υψηλής ταχύτητας, για την εκτόξευση του βλήματος χρησιμοποιείται η διάταξη «πιστολιού αερίου». Μία τέτοια διάταξη χρησιμοποίησαν και οι Hoo Fatt et al. [38] στην μελέτη τους (Σχήμα 1.33). Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από ένα δοχείο όγκου 2250ml, στο εσωτερικό του οποίου περιέχεται αέριο Ήλιο (He) υπό πίεση. Η πίεση του αερίου είναι 10 MPa και χρησιμεύει ως προωθητικό. Το υπό πίεση δοχείο επικοινωνεί μέσω μιας βαλβίδας υψηλής ταχύτητας ενεργοποίησης με έναν κενό κυλινδρικό σωλήνα κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι.



Σχήμα 1.33. Πειραματική διάταξη «πιστολιού αερίου He». [38]

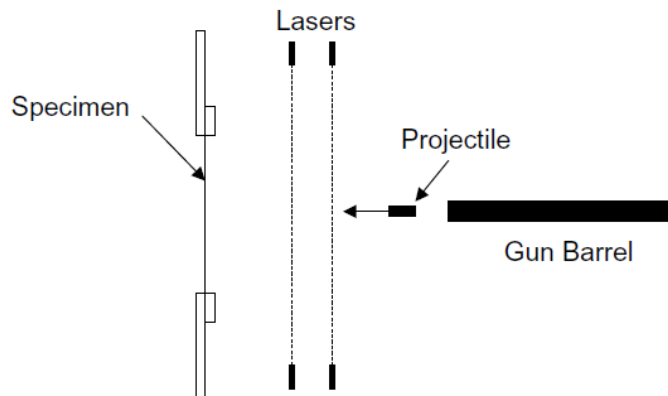
Ο σωλήνας αυτός έχει εξωτερική διάμετρο ίση με 2.54cm και εσωτερική διάμετρο ίση με 1.28cm και προορίζεται για την προώθηση ενός συμπαγούς κυλινδρικού βλήματος με επίπεδες βάσεις, μήκος ίσο με 2.54cm και διάμετρο ίση με 1.28cm. Η βάση η οποία έρχεται σε επαφή με το υπό δοκιμή υλικό έχει ακτίνα 0.8mm. Το βλήμα είναι κατασκευασμένο από Ti-6Al-4V και έχει σκληρότητα 36-37 HRC, ενώ η μάζα του κυμαίνεται μεταξύ 14.05g και 14.20g. Το υλικό το οποίο βρίσκεται υπό δοκιμή κρούσης υψηλής ταχύτητας κόβεται σε τετράγωνα δοκίμια πλευράς 17.8cm. Τα δοκίμια αυτά συγκρατούνται από όλες τις πλευρές έτσι ώστε να θεωρούνται πακτωμένα και ουσιαστικά το ελεύθερο σε κρούση τμήμα του δοκιμίου καταλήγει να είναι τετράγωνο πλευράς 15.24cm. Τα δοκίμια τοποθετούνται κάθετα στην πορεία κίνησης του κυλινδρικού βλήματος.



Σχήμα 1.34. Σχηματική απεικόνιση του βλήματος και του δοκιμίου κρούσης υψηλής ταχύτητας. [38]

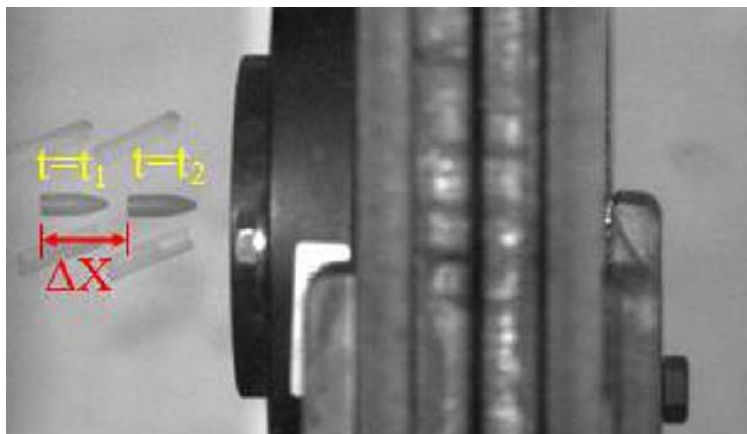
Κατά τη διάρκεια του πειράματος τοποθετούνται δύο ακτίνες λέιζερ κάθετα στην πορεία που διαγράφει το βλήμα, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.35. Καταγράφοντας με

ακρίβεια τη χρονική στιγμή που το βλήμα αποκόπτει τη συνέχεια της κάθε ακτίνας και έχοντας ως γνωστό την μεταξύ τους απόσταση, εύκολα υπολογίζεται η ταχύτητα του βλήματος.



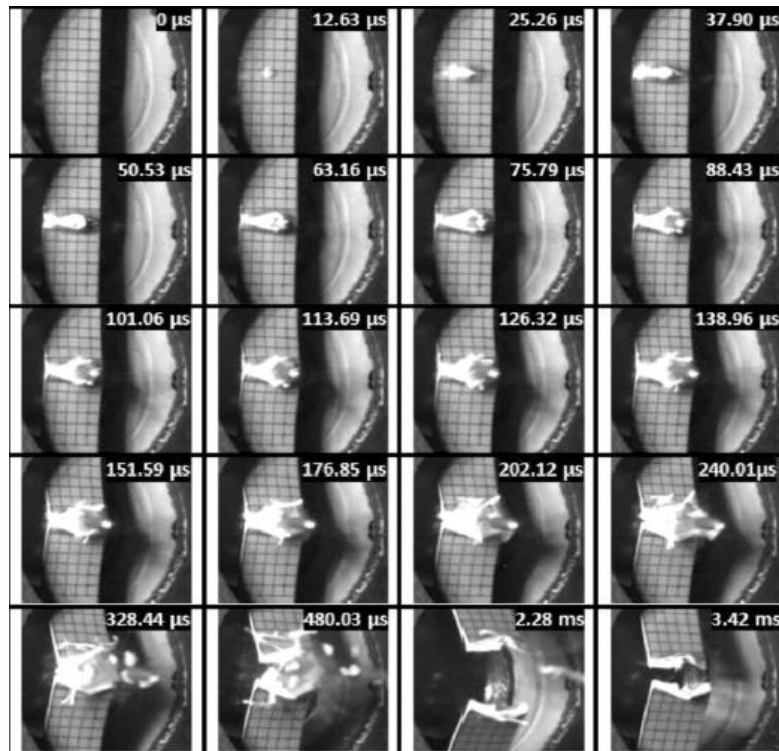
Σχήμα 1.35. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης μέτρησης της ταχύτητας του βλήματος με δέσμες laser. [38]

Μία άλλη μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ταχύτητας του βλήματος είναι η χρήση ειδικής φωτογραφικής μηχανής υψηλής ταχύτητας λήψης. Μια τέτοιου είδους φωτογραφική μηχανή καταγράφει πολλαπλά στιγμιότυπα της πορείας του βλήματος με σταθερό χρονικό διάστημα να μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων. Με τον τρόπο αυτό μετρώντας την απόσταση που έχει διανύσει το βλήμα μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμιότυπων, και γνωρίζοντας το χρονικό διάστημα μεταξύ τους εύκολα υπολογίζεται η ταχύτητα του βλήματος. Η διαδικασία αυτή γίνεται αντιληπτή από το Σχήμα 1.36.



Σχήμα 1.36. Μέτρηση ταχύτητας βλήματος με τη χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας. [83]

Μια δεύτερη χρήση της φωτογραφικής μηχανής υψηλής ταχύτητας λήψης κατά τη διάρκεια ενός πειράματος βαλλιστικής κρούσης υψηλής ταχύτητας είναι η παρακολούθηση της πορείας του πειράματος μέσω εξέτασης των διαδοχικών στιγμιότυπων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Σχήμα 1.37.



Σχήμα 1.37. Διαδοχικά στιγμιότυπα από κάμερα υψηλής ταχύτητας λήψης για το πείραμα βαλλιστικής κρούσης GLARE 5 (3/2)-[90° 4] με αρχική ταχύτητα βλήματος 258m/sec. [83]

Ως βαλλιστικό όριο ενός υλικού ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα κατά την οποία το υπό εξέταση υλικό διαπερνάται εξ ολοκλήρου από το κυλινδρικό βλήμα με το οποίο έχει έρθει σε κρούση υψηλής ταχύτητας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυτή αρκετές φορές ώστε να επαληθευτούν τα αποτελέσματα.

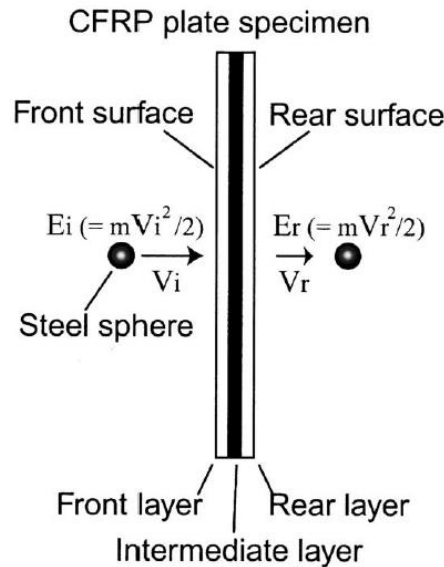
Ενδεικτικά ορισμένα αποτελέσματα του βαλλιστικού ορίου που προκύπτει μετά από βαλλιστικά πειράματα σε διάφορες διατάξεις GLARE καθώς και σε Αλουμίνιο 2024 παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 1.38.

GLARE impact test results

Material	Panel thickness (mm)	Areal weight density (N/m <sup>2</sup> )	No. of panels tested	Ballistic limit (lowest recorded perforation speed) (m/s)	Highest speed recorded without perforation (m/s)
GLARE 5	1.53	36.65	9	136	136
GLARE 5	1.93	43.41	7	151	150
GLARE 5	2.59	61.15	8	156	155
GLARE 5 2-ply (0.076 in.)	4.02	91.92	6	185	179
GLARE 5 2-ply (0.100 in.)	5.3	124.46	7	212	206
Aluminum 2024	0.4	10.89	14	67	70
Aluminum 2024	1.6	42.92	13	131	132
Aluminum 2024	3.2	86.53	7	196	192
Aluminum 2024	6.4	179.44	11	213	217

Σχήμα 1.38. Βαλλιστικό όριο διαφόρων διατάξεων GLARE και Aluminum 2024. [38]

Αρκετά βαλλιστικά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί εκτός των άλλων και για απλά σύνθετα υλικά. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας είναι η βαλλιστική κρούση με ατσάλινο βλήμα σφαιρικού σχήματος τετραγωνικού δοκιμίου σύνθετου υλικού, το οποίο αποτελείται από πλαστική μήτρα και ανθρακονήματα (Carbon Fiber Reinforced Plastics) (Σχήμα 1.39). Οι κρούσεις αυτές είναι υψηλών ταχυτήτων με ελάχιστη τιμή τα 500m/sec ενώ σε πολλές περιπτώσεις ξεπερνούν κατά πολύ ακόμα και τα 1000m/sec.



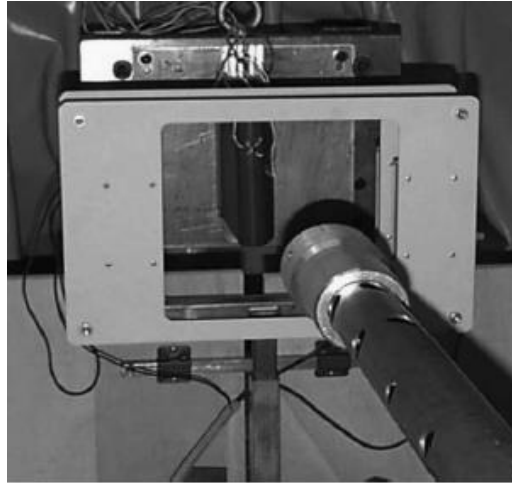
Σχήμα 1.39. Σχηματική απεικόνιση του πειράματος βαλλιστικής κρούσης με χρήση ασφάλινης σφαίρας. [84]

Η προώθηση του σφαιρικού βλήματος επιτυγχάνεται και σε αυτή την περίπτωση με τη χρήση ειδικού πιστολιού αερίου και η ταχύτητά του μετράται με ειδική κάμερα υψηλής ταχύτητας λήψεως (Σχήμα 1.40).

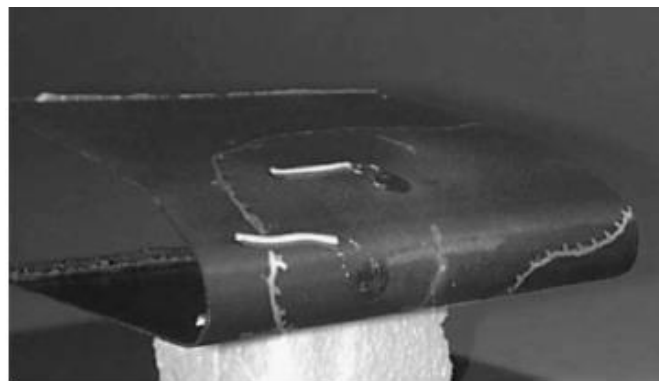


Σχήμα 1.40. Διάταξη της κάμερας υψηλής ταχύτητας λήψεως για το πείραμα βαλλιστικής κρούσης σφαιρικού βλήματος σε «CFRP». [85]

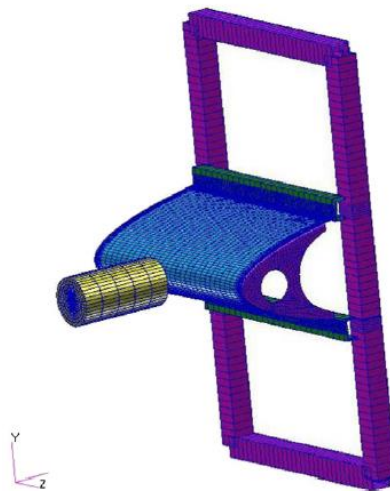
Εκτός των πειραμάτων στα οποία πραγματοποιείται διάτρηση κάποιου σύνθετου υλικού ή FML μετά από κρούση με κυλινδρικό ή σφαιρικό βλήμα, υπάρχει και ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων στα οποία ενώ υπάρχει κρούση μεταξύ του βλήματος και του υπό δοκιμή υλικού, δεν παρατηρείται διάτρηση. Η συντριπτική πλειοψηφία των πειραμάτων αυτών εξετάζει τις επιπτώσεις που θα έχει η σύγκρουση ενός πτηνού με ένα αεροσκάφος εν ώρα πτήσης. Για το λόγο αυτό στα συγκεκριμένα πειράματα για το δοκίμιο χρησιμοποιείται κάποιο αεροπορικό υλικό, ενώ για το βλήμα χρησιμοποιούνται είτε μια ειδική ζελατινώδης ουσία είτε σφαιρικά κομμάτια πάγου προκειμένου να προσομοιώσουν το σώμα του πτηνού. Στα πειράματα αυτά, γίνεται χρήση ειδικής διάταξης πιστολιού αερίου τροποποιημένου αυτή τη φορά, ώστε να εκτοξεύει τη ζελατινώδη ουσία ή τον πάγο (Σχήμα 1.41) [86], ενώ το δοκίμιο του σύνθετου υλικού λαμβάνει σχήματα τμημάτων αεροσκάφους τα οποία έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συγκρουστούν με πτηνό, όπως είναι το χείλος προσβολής της πτέρυγας ή το εμπρόσθιο τμήμα της ατράκτου (ρύγχος), κτλ. (Σχήμα 1.42 και Σχήμα 1.43) [86], [87].



Σχήμα 1.41. Ειδικά διαμορφωμένο πιστόλι αερίου για την εκτόξευση ζελατινώδους ουσίας ή πάγου. [86]



Σχήμα 1.42. Δοκίμιο αεροπορικού υλικού σε διαμόρφωση χείλους προσβολής αεροσκάφους. [86]



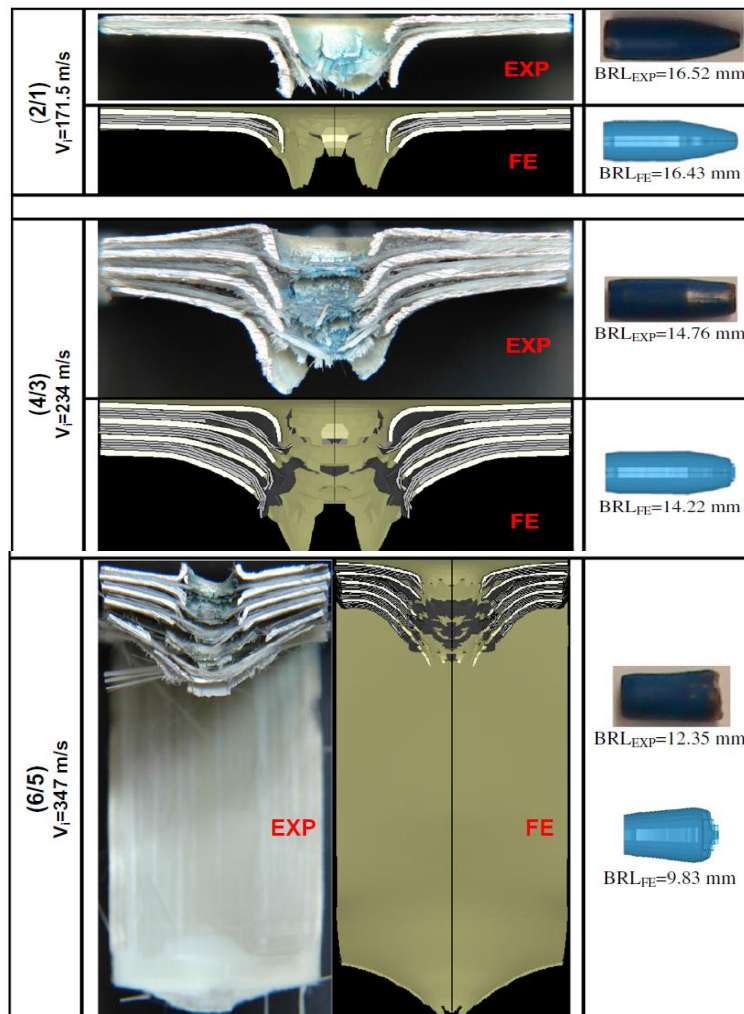
Σχήμα 1.43. Μοντελοποίηση «bird strike» σε χείλος προσβολής πτέρυγας. [87]

Βέβαια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα πειράματα κρούσης υψηλών ταχυτήτων χωρίς διάτρηση δεν περιορίζονται μόνο σε προσομοιώσεις σύγκρουσης πτηνών με αεροσκάφος εν ώρα πτήσης. Αντίθετα, έχουν διεξαχθεί πειράματα με διατάξεις παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα βαλλιστικής κρούσης υψηλών ταχυτήτων. Πιο συγκεκριμένα, έχουν διεξαχθεί πειράματα όπου βλήματα κατασκευασμένα από υλικά υψηλής αντοχής και σκληρότητας έρχονται σε σύγκρουση με δοκίμια άλλων υλικών χωρίς να παρατηρείται καμία διάτρηση στα δεύτερα.

## 1.8 Αριθμητική Προσομοίωση με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων

Παρά τις αρκετές προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν πάνω στην μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία των σύνθετων υλικών ώστε να προβλέπουν την αστοχία που θα επέλθει λόγω κρουστικής καταπόνησης, στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολύ λίγες δημοσιεύσεις όσον αφορά αντίστοιχες αριθμητικές μοντελοποιήσεις που να αφορούν FMLs. Οι δυσκολίες που ανακύπτουν από την μοντελοποίηση των FMLs είναι αρκετές και πολύπλοκες λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα της πλαστικότητας, της ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών, των αποκολλήσεων και της διάτρησης, αλλά και την ιδιαιτερότητα του ρυθμού φόρτισης. Η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία εμπλέκει τη συνέχεια των FMLs, σε συνδυασμό με διεπιφανειακά στοιχεία όπου εμφανίζονται ρωγμές και αποκολλήσεις. Επιπλέον θα πρέπει η μοντελοποίηση να λαμβάνει υπόψη την ανισοτροπική πλαστικότητα του υλικού, την ανάπτυξη ρωγμών και αποκολλήσεων με ένα ικανό και εύστοχο κριτήριο αστοχίας, και φυσικά να καταλήγει σε ακριβείς και σταθερούς αριθμητικούς αλγόριθμους.

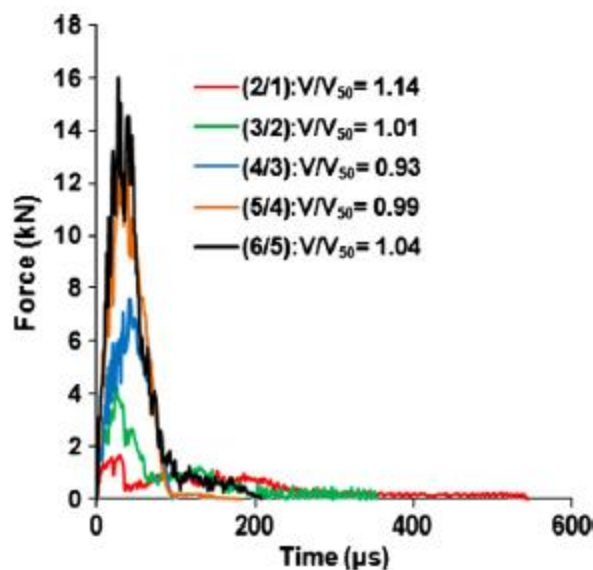
Στη πλειοψηφία των επιστημονικών άρθρων που έχουν δημοσιευθεί για την αριθμητική προσομοίωση βαλλιστικής κρούσης σε FMLs, ως πλατφόρμα επίλυσης χρησιμοποιείται το πρόγραμμα LS DYNA το οποίο διαθέτει όλα τα χαρακτηριστικά εκείνα που το καθιστούν ιδανικό για επίλυση δυναμικών προβλημάτων.



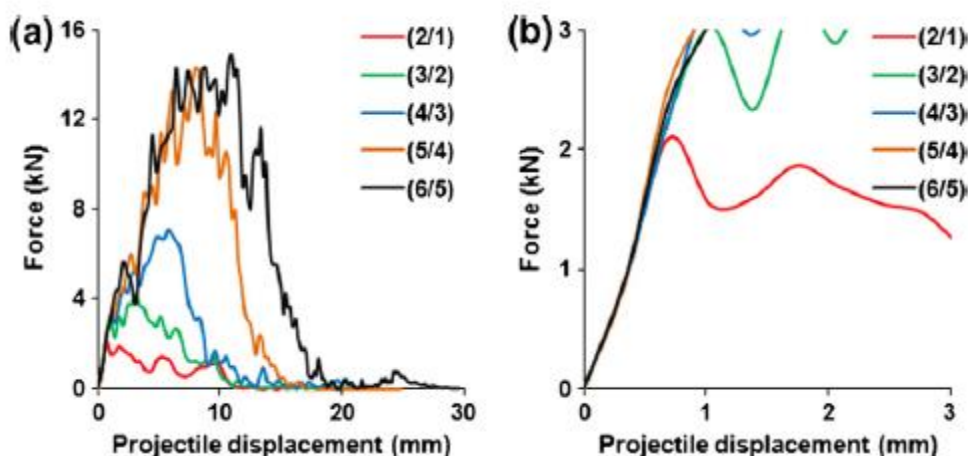
Σχήμα 1.44 Σύγκριση πειραματικών και FE analysis αστοχιών λόγω κρούσεων βλημάτων επάνω σε δοκίμια GLARE5, με διαμορφώσεις (2/1), (4/3) και (6/5). Το BRL αντιστοιχεί στο τελικό μήκος του βλήματος. [71]

Μία αρκετά ενδιαφέρουσα μοντελοποίηση βαλλιστικής καταπόνησης GLARE, με πεπερασμένα στοιχεία έγινε από τους Yaghoubi & Liaw [71]. Στην υπόψη μελέτη οι κρούσεις πραγματοποιήθηκαν σε λεπτές δοκούς από GLARE5 με διαφορετικό πάχος, ενώ η μοντελοποίηση και η ανάλυση έγινε μέσω του λογισμικού LS-Dyna. Στο Σχήμα 1.44 φαίνεται η πολύ καλή σύγκλιση των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων των κρούσεων.

Επίσης, με τη βοήθεια του LS-DYNA είναι δυνατό να κατασκευαστούν καμπύλες, οι οποίες δεν μπορούν να υπολογιστούν πειραματικά. Τέτοιες καμπύλες είναι οι καμπύλες φορτίου-χρόνου και φορτίου-μετατόπισης, που κατασκευάστηκαν από τους Yaghoubi & Liaw [71]. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται στα Σχήματα 1.45 και 1.46.



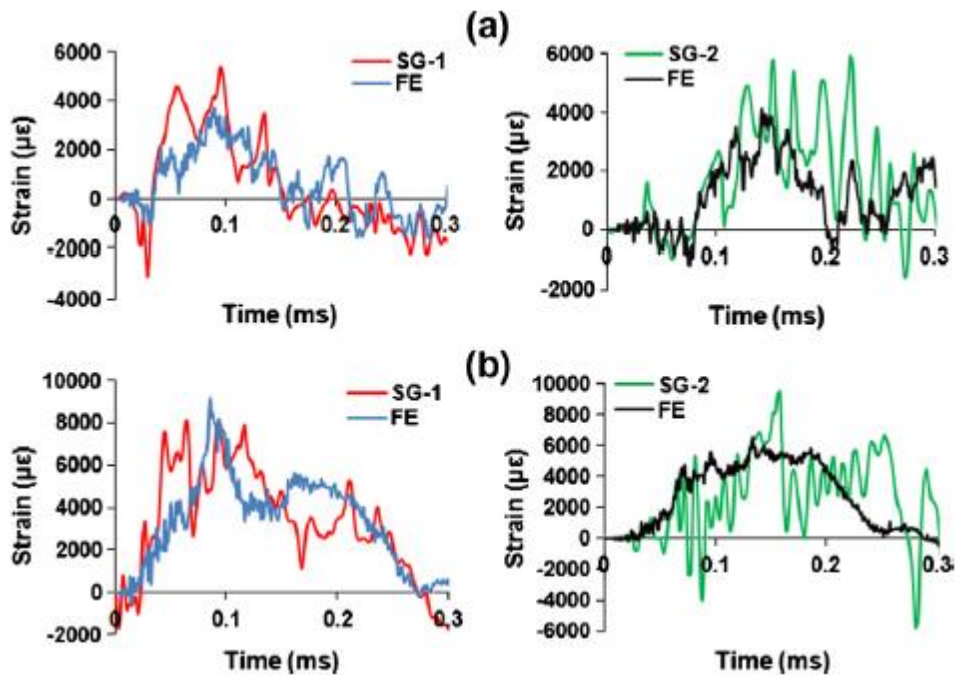
Σχήμα 1.45. Εκτίμηση της καμπύλης φορτίου-χρόνου για διάφορες πλάκες GLARE κοντά στο βαλλιστικό τους όριο με χρήση του LS-DYNA. [71]



Σχήμα 1.46. Εκτίμηση της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης για διάφορες πλάκες GLARE βαλλόμενες με βλήμα ταχύτητας 350m/s με χρήση του LS-DYNA: (a) πλήρες διάγραμμα, (b) εστίαση στο αρχικό τμήμα. [71]

Παράλληλα, με τη βοήθεια του LS-DYNA είναι δυνατό να κατασκευαστούν καμπύλες για διάφορα μεγέθη, προκειμένου να συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά και να ελεγχθεί έτσι η ορθότητα της προσομοίωσης. Τέτοιες καμπύλες κατασκεύασαν οι Yaghoubi & Liaw

[71] για την μεταβολή της παραμόρφωσης των πλακών GLARE σε συνάρτηση με τον χρόνο. (Σχήμα 1.47)

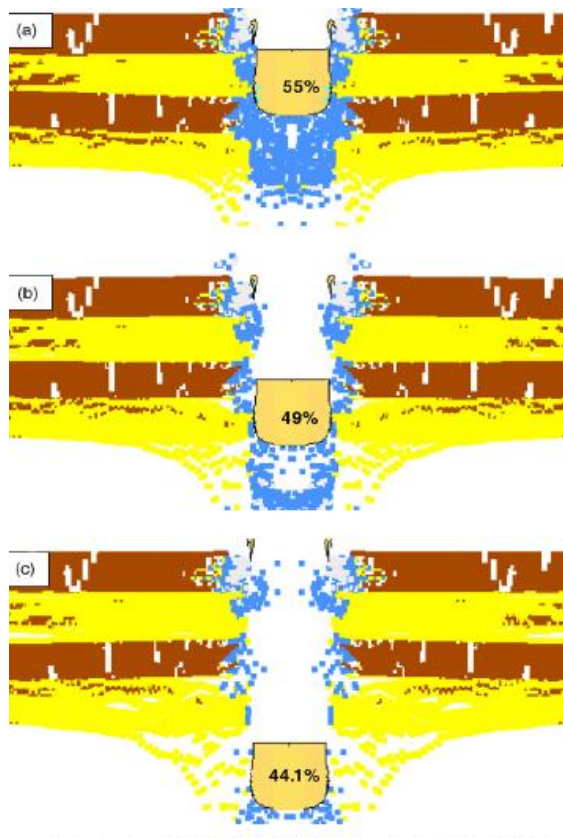


Σχήμα 1.47. Σύγκριση βαλλιστικής απόκρισης μεταξύ προσομοίωσης και πειραμάτων για: (a) πλάκα GLARE 5 (2/1) βαλλόμενη με ταχύτητα 177m/s και (b) πλάκα GLARE (6/5) βαλλόμενη με ταχύτητα 347m/s. [71]

Ένα ακόμα λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση βαλλιστικών κρούσεων σε FMLs είναι το ABAQUS. Οι Sadighi et al. [116] χρησιμοποίησαν το εν λόγω λογισμικό για την μελέτη της αντίστασης σε κρούση διάφορων τύπων GLARE. Κατά τη μοντελοποίηση οι στρώσεις αλουμινίου διαχωρίστηκαν σε επιμέρους εξάεδρα στοιχεία τύπου τρισδιάστατης ελαστικότητας, ενώ οι στρώσεις του σύνθετου υλικού μοντελοποιούνται ως εξάεδρα στοιχεία τύπου τρισδιάστατης ελαστικότητας ή τύπου κελυφών κάτι που εξαρτάται από τα κριτήρια αστοχίας τα οποία εφαρμόζονται στις στρώσεις. Ο κύριος σκοπός της έρευνας αυτής ήταν η εύρεση ενός νέου τρισδιάστατου καταστροφικού μοντέλου για σύνθετα υλικά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το προηγούμενο δισδιάστατο μοντέλο αστοχίας. Η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ελέγχοντας δύο ειδών ενέργειας, της ενέργειας που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια εμφανής ζημιά από κρούση και της ενέργειας που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια όχι και τόσο ξεκάθαρα εμφανής ζημιά από κρούση. Και στις δύο περιπτώσεις αποδείχθηκε ότι τόσο το τρισδιάστατο όσο και το δισδιάστατο μοντέλο καταλήγουν σε αποτελέσματα πολύ κοντά στα πειραματικά.

Επίσης, ένα ακόμη λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται σε ερευνητικές εργασίες για την επίλυση του υπολογιστικού μέρους του προβλήματος είναι το AUTODYN. Το λογισμικό αυτό ανήκει σε μία ομάδα υπολογιστικών προγραμμάτων τα οποία είναι γνωστά με τον όρο «hydrocodes» και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά και χρησιμοποιούνται ευρέως στην επίλυση προβλημάτων που μοντελοποιούν εκρήξεις, κρούσεις με ή χωρίς διαπέραση. Με τη χρήση του κώδικα αυτού οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας, ορμής και μάζας συνδυάζονται με τις εξισώσεις μοντελοποίησης υλικού και στη συνέχεια εισάγονται οι κατάλληλες αρχικοποιήσεις και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος σύμφωνα με τις οποίες θα προκύψει η λύση. Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων αυτών κάνουν χρήση των πεπερασμένων όγκων, των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων

στοιχείων, ενώ η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου βασίζεται στη φύση του προβλήματος το οποίο μελετάται. Το κύριο πλεονέκτημα που παρουσιάζει το AUTODYN είναι η δυνατότητα να διαχωρίζει πολύπλοκα προβλήματα σε επιμέρους απλούστερα προβλήματα τα οποία επιλύονται από διαφορετικό επεξεργαστή της ίδιας ή διαφορετικής υπολογιστικής μονάδας το καθένα, γεγονός που αυξάνει την ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος και κατ' επέκταση την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Επίσης το λογισμικό αυτό κάνει χρήση διαφορετικού τύπου επεξεργασίας ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, διαθέτει τη μέθοδο επεξεργασίας «Lagrange» που χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση προβλημάτων συνεχών ρευστών ή κατασκευών. Ταυτόχρονα διαθέτει τη μέθοδο επεξεργασίας «Euler» που χρησιμοποιείται στα προβλήματα που μοντελοποιούν υγρά, ρευστά ή στερεά τα οποία υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις. Επίσης, διαθέτει και πιο σύνθετες μεθόδους επεξεργασίας, όπως μία μέθοδο συνδυαστική των μεθόδων «Euler» και «Lagrange» που ονομάζεται «ALE» (Arbitrary Lagrange Euler), ειδική για επίλυση προβλημάτων πολύπλοκων διαστρεβλωμένων πλεγμάτων. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει μία ακόμα μέθοδο επεξεργασίας αποκλειστικά για χρήση σε προβλήματα πολύ λεπτών κελυφών και τέλος μία μέθοδο επεξεργασίας ειδική για προβλήματα με εξαιρετικά διαστρεβλωμένα πλέγματα έτσι ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία επίλυσης. Σε μελέτη τους οι Grujicic et al. [117] χρησιμοποίησαν το εν λόγω λογισμικό για την ανάλυση της βαλλιστικής συμπεριφοράς ελαφριών υβριδικών σύνθετων υλικών. Στο Σχήμα 1.48 φαίνονται στιγμιότυπα από την προσομοίωση διάτρησης δοκιμίου.



Σχήμα 1.48. Μοντελοποίηση σε Autodyn βαλλιστικής κρούσης ασφάλινου βλήματος σε δοκίμιο τεσσάρων στρώσεων KFRE/CFRE/ KFRE/CFRE. Ο αναγραφόμενος αριθμός είναι το ποσοστό της αρχικής ταχύτητας που διατηρεί το βλήμα. [117]



## 2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΒΑΛΛΙΣΤΙΚΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ FML

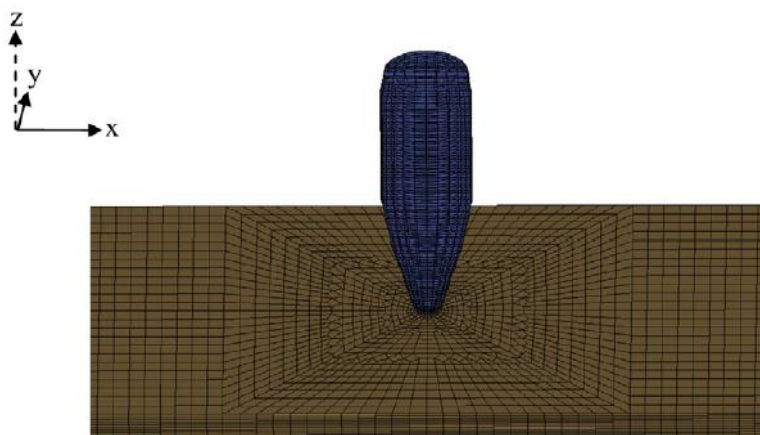
### 2.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό τα FMLs αποτελούνται από στρώσεις σύνθετου υλικού και στρώσεις μετάλλου. Σε μία αριθμητική ανάλυση, λοιπόν, προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά ενός FML είναι απαραίτητο να επιλεγούν κατάλληλα μοντέλα τα οποία θα περιγράψουν με όσο το δυνατόν ακριβέστερο τρόπο τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένες τόσο οι στρώσεις μετάλλου όσο και οι στρώσεις σύνθετου υλικού. Στη παρούσα εργασία για την μοντελοποίηση του υλικού των μεταλλικών στρώσεων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Johnson-Cook, ενώ για το υλικό των στρώσεων σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Chang-Chang. Τα μοντέλα αυτά αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

### 2.2 Μοντέλο Johnson-Cook

#### 2.2.1 Εφαρμογές μοντέλου Johnson-Cook

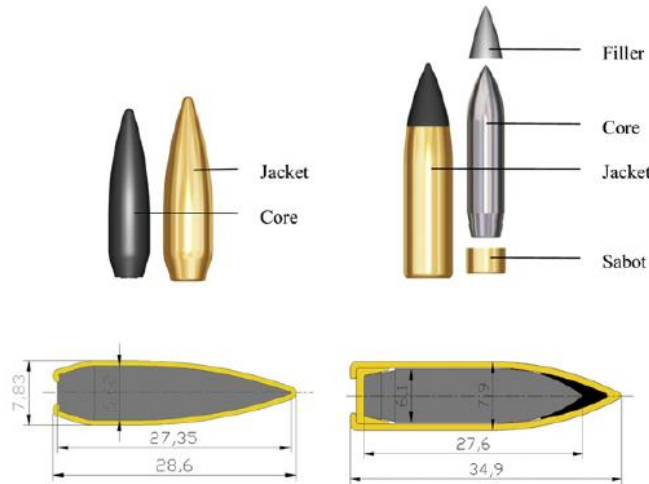
Το μοντέλο υλικού Johnson-Cook έχει ευρεία χρήση στη μοντελοποίηση μεταλλικών υλικών και κυρίως του αλουμινίου σε πειράματα κρούσης. Χαρακτηριστικές είναι οι μελέτες [83], [89] όπου προσομοιώνεται η βαλλιστική κρούση δοκιμίων GLARE με τη χρήση του λογισμικού LS-DYNA. Στις μελέτες αυτές για την προσομοίωση των στρώσεων αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Johnson-Cook και ειδικότερα το απλουστευμένο μοντέλο Johnson-Cook (MAT\_98), ενώ το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε και για την μοντελοποίηση του βλήματος κράματος τιτανίου.



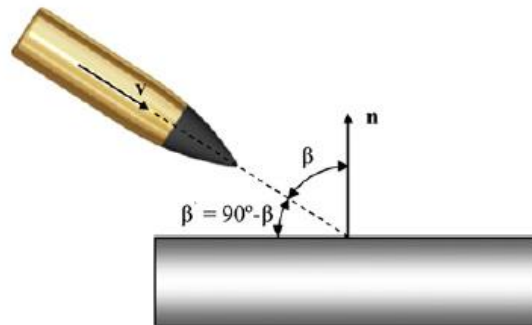
Σχήμα 2.1. Μοντελοποίηση πειράματος κρούσης βλήματος σε δοκίμιο GLARE. [83]

Μία άλλη κατηγορία βαλλιστικών προβλημάτων είναι τα πειράματα που διεξάγονται για να αποδειχθεί η ικανότητα της θωράκισης στρατιωτικών οχημάτων να αντισταθούν σε

πραγματικά βλήματα μάχης. Στη μελέτη [90] μελετήθηκε η συμπεριφορά πλακών αλουμινίου AA6082-T4 σε κρούση είτε κάθετη είτε πλάγια με πραγματικά βλήματα 7.62mm (Σχήμα 2.2 και Σχήμα 2.3). Τα βλήματα αυτά διέθεταν εμπρόσθιο τμήμα κατασκευασμένο είτε από μαλακό μολύβδο είτε από σκληρό χάλυβα. Και σε αυτή την περίπτωση πειραμάτων τόσο η πλάκα θωράκισης από κράμα αλουμινίου, όσο και τα πραγματικά βλήματα μοντελοποιήθηκαν με χρήση του μοντέλου υλικού Johnson-Cook [90].



Σχήμα 2.2. Διαμορφώσεις πραγματικών βλημάτων που χρησιμοποιούνται στο πείραμα. [90]



Σχήμα 2.3. Κρούση του βλήματος με το δοκίμιο σε διάφορες γωνίες. [90]

## 2.2.2 Λεπτομερής ανάλυση καταστατικού μοντέλου Johnson-Cook.

Το μοντέλο Johnson-Cook χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση μετάλλων και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλών ρυθμών παραμόρφωσης, μεγάλων παραμορφώσεων και υψηλών θερμοκρασιών. Πρόκειται για ένα εμπειρικό μοντέλο το οποίο έχει προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα. Το καταστατικό αυτό μοντέλο προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Johnson G.R. and Cook W.K. [94], εξ ου και η ονομασία του. Στη μελέτη τους [94] εξέφρασαν την τάση διαρροής Von Mises σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_y = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^m] \quad (2.1)$$

όπου

A, B, C, n, m είναι σταθερές που χαρακτηρίζουν το υλικό και προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα.

$\bar{\varepsilon}^p$  είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση,

$\dot{\varepsilon}^*$ : ο αδιάστατος ρυθμός παραμόρφωσης, που δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\varepsilon}^0} \quad (2.2)$$

όπου

$\dot{\bar{\varepsilon}}^p$ : ο ρυθμός της πλαστικής παραμόρφωσης

$\dot{\varepsilon}^0$ : ο ρυθμός παραμόρφωσης ή ρυθμός αναφοράς για τον οποίο έχουν υπολογιστεί οι σταθερές του υλικού. Κατά βάση είναι ίσος με 1.0.

$T^*$  είναι η αδιάστατη θερμοκρασία, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (2.3)$$

όπου,

$T$  είναι η τρέχουσα θερμοκρασία

$T_{room}$  είναι η θερμοκρασία δωματίου

$T_{melt}$  είναι η θερμοκρασία τήξης του υλικού

Οι αδιαβατικές συνθήκες έχουν οριστεί έτσι ώστε όλο το εσωτερικό πλαστικό έργο να καταναλώνεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας, οπότε ισχύει:

$$\Delta T = \frac{\bar{\sigma} \bar{\varepsilon}^p}{\rho C_v} \quad (2.4)$$

όπου,

$\rho$  η πυκνότητα του υλικού,

$C_v$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού υπό σταθερό όγκο,

$\bar{\sigma}$  η ισοδύναμη (effective) τάση, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} \quad (2.5)$$

$\bar{\varepsilon}^p$  η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\varepsilon}^p = \int_0^t d\bar{\varepsilon}^p \quad (2.6)$$

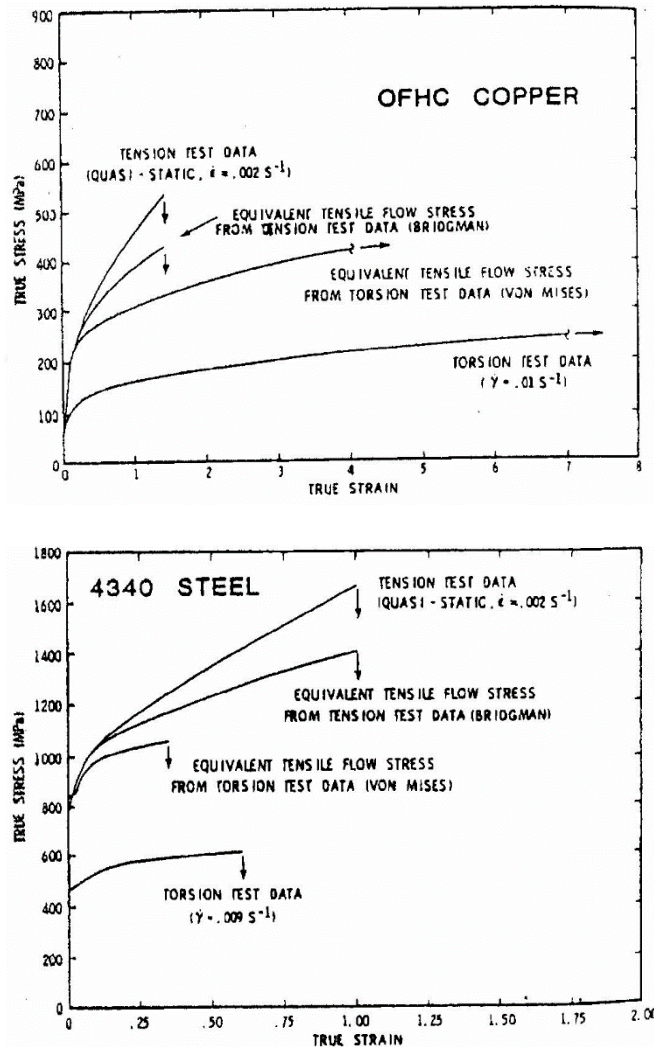
όπου

$$d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}} \quad (2.7)$$

Οι σταθερές A, B, C, n και m προκύπτουν για κάθε υλικό από πειραματικά αποτελέσματα. Οι Johnson G.R. and Cook W.K. στη μελέτη τους [94] χρησιμοποίησαν δεδομένα από πειράματα στρέψης σε διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης, στατικά πειράματα εφελκυσμού, δυναμικά πειράματα εφελκυσμού Hopkinson, καθώς και πειράματα Hopkinson σε διάφορες θερμοκρασίες. Αναλύοντας τα δεδομένα αυτά κατάφεραν και υπολόγισαν τις

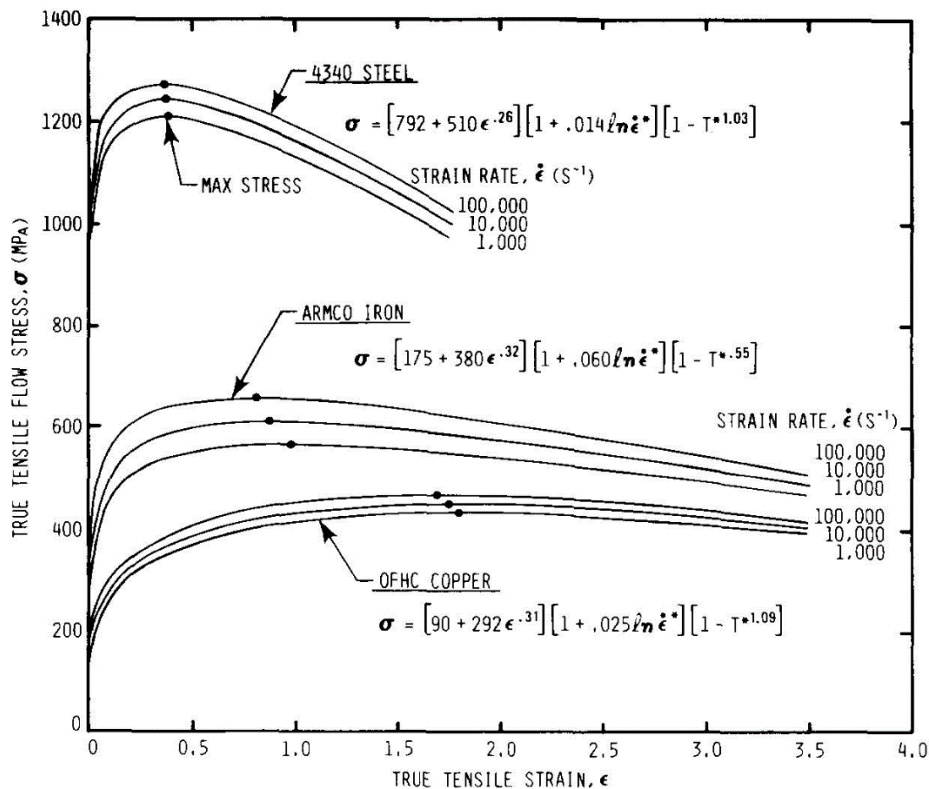
προαναφερόμενες σταθερές για δώδεκα μέταλλα μεταξύ των οποίων τα Al 2024-T351, Al 7039, 4340 Steel, Nickel 200, κ.α..

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης για χαλκό και χάλυβα, οι οποίες προέκυψαν από πειραματικές καταπονήσεις κατά την μελέτη [94] με σκοπό να προσδιοριστούν οι σταθερές της Σχέσης 2.1.



Σχήμα 2.4. Καμπύλες πραγματικής-τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης για OFHC Copper (πάνω) και 4340 Steel (κάτω). [94]

Οι καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$ , που κατασκεύασαν οι Johnson G.R. and Cook W.K. για τρία μέταλλα σε μία άλλη μελέτη τους [121] εφαρμόζοντας το μοντέλο τους (Σχέση 2.1) φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Οι καμπύλες αυτές κατασκευάστηκαν για διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης υπό αδιαβατικές συνθήκες. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης τόσο αυξάνεται η αντοχή του υλικού. Επίσης, παρατηρείται ότι η τάση διαρροής αυξάνεται σε συνάρτηση με την παραμόρφωση μέχρι να φτάσει μία μέγιστη τιμή και έπειτα αρχίζει να μειώνεται καθώς η παραμόρφωση αυξάνει.



Σχήμα 2.5. Καμπύλες σ-ε για 4340 Steel, ARMCO Iron και OFHC Copper σύμφωνα με το γενικευμένο μοντέλο Johnson-Cook. [121]

Δίνοντας μία φυσική σημασία στις σταθερές της Σχέσης 2.1, η σταθερά A εκφράζει το στατικό όριο διαρροής του υλικού. Ως γνωστόν, όμως, τα μέταλλα από την στιγμή που θα παραμορφωθούν πλαστικά (όπως συμβαίνει όταν διαρρεύσουν) εμφανίζουν κράτυνση (hardening), δηλαδή αύξηση της αντοχής τους. Αυτό, λοιπόν, το φαινόμενο περιγράφουν οι σταθερές B και n. Καθώς μάλιστα ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνει, η κράτυνση γίνεται εντονότερη. Αυτό εκφράζεται από τον δεύτερο παράγοντα της Σχέσης 2.1 και από την σταθερά C. Τέλος, ο τρίτος παράγοντας της Σχέσης 2.1 και κατ' επέκταση η σταθερά m, περιγράφουν το φαινόμενο της χαλάρωσης (softening), της τάσης, δηλαδή, που έχουν τα μέταλλα να εμφανίζουν μειωμένη αντοχή όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.

Το λογισμικό LS-DYNA [93] παρέχει τη δυνατότητα χρήσης διαφόρων εκδοχών του καταστατικού μοντέλου Johnson-Cook. Οι πιο δημοφιλείς από αυτές είναι το γενικευμένο μοντέλο του Johnson-Cook, το οποίο συμβολίζεται για λόγους συντομίας ως \*MAT\_015 και το απλουστευμένο μοντέλο Johnson-Cook, το οποίο συμβολίζεται για λόγους συντομίας ως \*MAT\_098.

\*MAT\_015/\*MAT JOHNSON COOK [91], [93]

Στο γενικευμένο μοντέλο \*MAT\_015 [91], [93] η τάση διαρροής υπολογίζεται από την Σχέση 2.1 και ο χρήστης καλείται να καταχωρήσει τις σταθερές A, B, C, n και m. Επίσης, για την χρήση του μοντέλου αυτού απαιτείται να οριστεί η παραμόρφωση θραύσης. Αυτή ορίζεται μέσω της ακόλουθης Σχέσης 2.8 [91], [93]:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] [1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}^*)] [1 + D_5 T^*] \quad (2.8)$$

όπου

$\sigma^*$  είναι η τριαξονικότητα (triaxiality) ή αλλιώς το πηλίκο της υδροστατικής πίεσης προς την ισοδύναμη τάση (τάση Von Mises):

$$\sigma^* = \frac{P}{\sigma_{eff}} \quad (2.9)$$

$\varepsilon^*$  : ο αδιάστατος ρυθμός παραμόρφωσης, όπως διατυπώθηκε στη Σχέση 2.2,

$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό

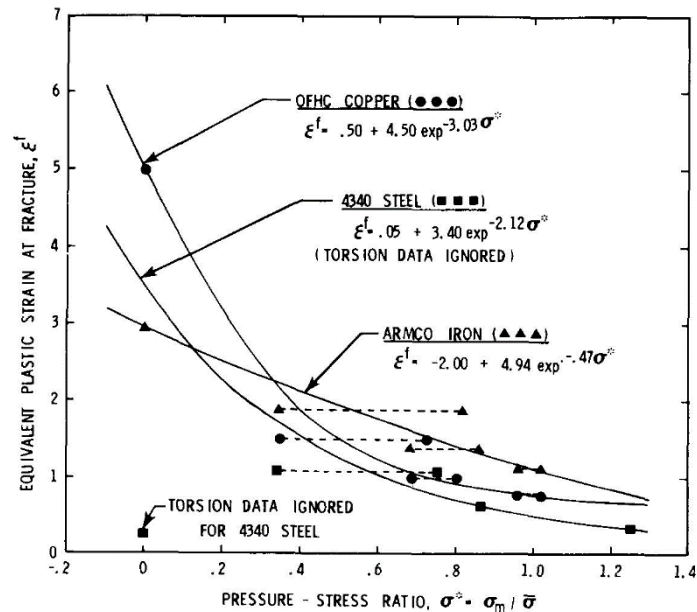
Σύμφωνα, λοιπόν, με το μοντέλο αστοχίας Johnson-Cook [91], [93], η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$\sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon^f} = 1 \quad (2.10)$$

όπου η ποσότητα  $\Delta \bar{\varepsilon}^p$  εκφράζει την μεταβολή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης.

Σύμφωνα με την Σχέση 2.8 η παραμόρφωση αστοχίας  $\varepsilon^f$  και κατά συνέπεια η έκταση της αστοχίας είναι συνάρτηση της τριαξονικότητας ( $\sigma^*$ ), του ρυθμού παραμόρφωσης ( $\dot{\varepsilon}^*$ ) και της θερμοκρασίας ( $T^*$ ). Σημειώνεται ότι η τριαξονικότητα εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το φυσικό πρόβλημα και τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται οι τάσεις στο δοκίμιο. Σε πειράματα βαλλιστικής κρούσης η τιμή της διαφέρει ανάλογα με το σχήμα του βλήματος. Στην ερευνητική εργασία [95] θεωρήθηκαν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες βλήματος (ημισφαιρικό, κωνικό και επίπεδο εμπρόσθιο τμήμα) προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της τριαξονικότητας στην αντοχή πλακών χάλυβα σε βαλλιστική κρούση. Για την τριαξονικότητα των βλημάτων αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 2/3, 1/3 και 0 αντίστοιχα και διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα.

Η εξάρτηση της παραμόρφωσης αστοχίας από την τριαξονικότητα φαίνεται στις καμπύλες του Σχήματος 2.6, οι οποίες κατασκευάστηκαν κατά την μελέτη των Johnson G.R. and Cook W.K. [121]. Παρατηρώντας τις καμπύλες αυτές διαπιστώνεται ότι μείωση της τιμής της τριαξονικότητας οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης.



Σχήμα 2.6. Παραμόρφωση αστοχίας σε συνάρτηση με την τριαξονικότητα ( $\sigma^*$ ). [121]

**\*MAT 098/\*MAT SIMPLIFIED JOHNSON COOK [91], [93]**

Στο απλουστευμένο μοντέλο \*MAT\_098 δεν λαμβάνονται υπόψη οι θερμικές επιδράσεις στις ιδιότητες του υλικού. Έτσι, η Σχέση 2.1 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \bar{\epsilon}^*) \tag{2.11}$$

Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι καταφέρνει αφενός να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά των μετάλλων στις περιπτώσεις, όπου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα και αφετέρου δεν απαιτεί την γνώση δυσέυρετων παραμέτρων, όπως είναι για παράδειγμα οι σταθερές αστοχίας  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  που απαιτούνται στο γενικευμένο μοντέλο. Επιπλέον, είναι γρηγορότερο στην επίλυση κατά 50% συγκρινόμενο με το γενικευμένο μοντέλο. Το πλεονέκτημα αυτό το καθιστά αρκετά δημοφιλές στη πλειοψηφία των σύγχρονων ερευνητικών μελετών βαλλιστικών κρούσεων σε FMLs ([83], [88], [89], κ.α.). Έτσι, στην παρούσα εργασία, όπως θα αναφερθεί και στο επόμενο Κεφάλαιο 3, για την μοντελοποίηση των στρώσεων αλουμινίου των δοκιμίων GLARE υιοθετήθηκε το απλουστευμένο μοντέλο Johnson-Cook \*MAT\_098.

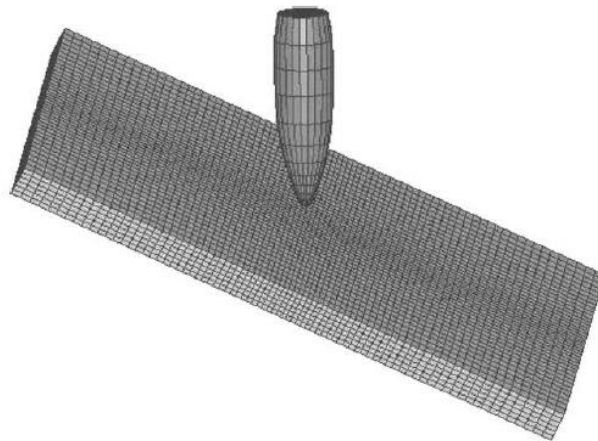
## 2.3 Μοντέλο Chang-Chang

### 2.3.1 Εφαρμογές μοντέλου Chang-Chang

Εκτός από τα πειράματα βαλλιστικής κρούσης που έχουν εκτελεστεί σε μέταλλα (§2.2.1), έχουν διεξαχθεί αντίστοιχα πειράματα σε σύνθετα υλικά. Τα πειράματα αυτά είναι ίδια ως προς τον τρόπο εκτέλεσής τους με αυτά που αναφέρθηκαν στην (§2.2.1) για τα κράματα αλουμινίου. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στο στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης της κρούσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπου για την μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού επιλέγεται το μοντέλο υλικού Chang-Chang. Το μοντέλο αυτό θεωρείται ιδανικό για μοντελοποίηση

σύνθετων υλικών και ιδιαίτερα Fiber Metal Laminates, καθώς διαθέτει τρία διαφορετικά κριτήρια αστοχίας: ένα για θραύση των ινών, ένα για θραύση της μήτρας και ένα για αστοχία λόγω θλίψης.

Στη μελέτη [96] έχει διεξαχθεί πείραμα παρόμοιο με αυτό του ελέγχου της θωράκισης στρατιωτικών οχημάτων, αλλά σε δοκίμια σύνθετου υλικού τύπου 3D braided Twaron®/epoxy. Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά βλήματα, τα οποία βάλλονταν προς το δοκίμιο με πλάγια κλίση (Σχήμα 2.7). Η μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού έγινε σε περιβάλλον LS-DYNA και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υλικού Chang-Chang.



Σχήμα 2.7. Μοντελοποίηση κρούσης βλήματος κωνικής κεφαλής σε σύνθετο υλικό υπό κλίση. [96]

Σημειώνεται ότι σε τέτοιου είδους πειράματα το υπό εξέταση δοκίμιο μπορεί να αποτελείται είτε από μία στρώση σύνθετου υλικού είτε από διαδοχικές στρώσεις σύνθετου υλικού με ανεξάρτητο προσανατολισμό ινών για κάθε μία από αυτές. Επίσης δύναται να διαφέρει η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας του βλήματος και του διανύσματος που είναι κάθετο στην επιφάνεια του δοκιμίου (πλάγια κρούση). Όλα αυτά τα ανεξάρτητα χαρακτηριστικά προσδίδουν ένα τεράστιο εύρος διαφορετικών δοκιμών που μπορούν να πραγματοποιηθούν και να ερευνηθούν.

### 2.3.2 Λεπτομερής ανάλυση μοντέλου Chang-Chang

Το μοντέλο υλικού Chang-Chang είναι ένα ελαστικό-ορθότροπο υλικό με ψαθυρή θραύση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στη μοντελοποίηση στρώσεων σύνθετων υλικών με ίνες μονής κατευθύνσεως. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη μοντελοποίηση στοιχείων τύπου κελύφους μικρού πάχους. Σημειώνεται ότι το λογισμικό LS-DYNA έχει ενσωματώσει το συγκεκριμένο μοντέλο αστοχίας στα μοντέλα υλικών \*MAT\_022, \*MAT\_054 και \*MAT\_055. Το μοντέλο υλικού Chang-Chang διαθέτει τρία διαφορετικά κριτήρια αστοχίας, τα οποία εισήχθησαν από τους Chang et al. [97], [98]. Το πρώτο προβλέπει την ρωγμάτωση της μήτρας (matrix cracking) του σύνθετου, το δεύτερο την αστοχία της μήτρας λόγω θλίψης (compressive failure) και το τρίτο μέσω της θραύσης των ινών του σύνθετου προβλέπει τόσο την αστοχία των ινών όσο και την διατμητική αστοχία μεταξύ ινών-μήτρας.

Για τον ορισμό των τριών κριτηρίων απαιτούνται πέντε παράμετροι, που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε σύνθετο υλικό:

- $S_1$ : η αντοχή σε εφελκυσμό κατά την διεύθυνση των ιών
- $S_2$ : η αντοχή σε εφελκυσμό κατά την εγκάρσια διεύθυνση
- $S_{12}$ : η αντοχή σε διάτμηση
- $C_2$ : η αντοχή σε θλίψη κατά την εγκάρσια διεύθυνση
- $\alpha$ : μη-γραμμική παράμετρος διατμητικής τάσης

Οι αντοχές  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_{12}$  και  $C_2$  υπολογίζονται από μετρήσεις αντοχής του σύνθετου, ενώ η παράμετρος  $\alpha$  υπολογίζεται από μετρήσεις διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης. Σε επίπεδη εντατική κατάσταση οι παραμορφώσεις εκφράζονται συναρτήσει των τάσεων ως εξής:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1\sigma_2) \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_2\sigma_1) \quad (2.13)$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \quad (2.14)$$

Η ανωτέρω Σχέση 2.14 χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της παραμέτρου  $\alpha$ .

Σε όλα τα κριτήρια αστοχίας εμπεριέχεται ο όρος  $\bar{\tau}$ , ο οποίος εκφράζει τον λόγο της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στο σύνθετο υλικό προς την αντοχή του σε διάτμηση. Ο όρος αυτός δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \quad (2.15)$$

#### Κριτήριο αστοχίας λόγω ρωγμάτωσης της μήτρας [91], [93], [97]

Το κριτήριο ρωγμάτωσης της μήτρας διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$F_{matrix} = \left( \frac{\sigma_2}{S_2} \right)^2 + \bar{\tau} \quad (2.16)$$

Η αστοχία επέρχεται όταν  $F_{matrix} > 1$ .

#### Κριτήριο αστοχίας της μήτρας σε θλίψη [91], [93], [97], [99]

Το κριτήριο αστοχίας της μήτρας έχει υιοθετηθεί από την μελέτη του Hashin Z. [99] και διατυπώνεται ως εξής:

$$F_{comp} = \left( \frac{\sigma_2}{2S_{12}} \right)^2 + \left[ \left( \frac{C_2}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{C_2} + \bar{\tau} \quad (2.17)$$

Η αστοχία επέρχεται όταν  $F_{comp} > 1$ .

#### Κριτήριο θραύσης των ινών [91], [93], [97]

Το κριτήριο θραύσης των ινών του σύνθετου προβλέπει τόσο την αστοχία των ινών όσο και την διατμητική αστοχία μεταξύ ινών-μήτρας και διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$F_{fiber} = \left( \frac{\sigma_1}{S_1} \right)^2 + \bar{\tau} \quad (2.18)$$

Η αστοχία επέρχεται όταν  $F_{fiber} > 1$ .

## 2.4 Χρησιμοποιηθέντα Μοντέλα Υλικών

Στην παρούσα εργασία κατά την διαδικασία της μοντελοποίησης (Κεφάλαιο 3) υιοθετήθηκε αφενός το απλουστευμένο μοντέλο Johnson-Cook και συγκεκριμένα το \*MAT\_098 της πλατφόρμας του LS-DYNA [93] για την προσομοίωση των μεταλλικών στρώσεων των GLARE που μελετήθηκαν και αφετέρου το \*MAT\_022 για την προσομοίωση των στρώσεων σύνθετου υλικού, το οποίο περιλαμβάνει τα κριτήρια αστοχίας Chang-Chang.

Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους και ιδιαίτερα των διάφορων παραδειγμάτων κρούσης που έχουν ήδη διεξαχθεί, μπορεί να ειπωθεί ότι η επιλογή των μοντέλων υλικού Johnson-Cook και Chang-Chang στην εργασία μας είναι αξιόπιστη και ασφαλής. Πιο συγκεκριμένα, τόσο το μοντέλο υλικού Johnson-Cook όσο και το Chang-Chang έχουν χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις, όπου εξεταζόταν αποκλειστικά και μόνο η συμπεριφορά είτε μετάλλων είτε σύνθετων υλικών αντίστοιχα. Επιπλέον, σύγχρονες ερευνητικές εργασίες πάνω σε FMLs υιοθετούν τα συγκεκριμένα μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών αυτών σε βαλλιστική κρούση και μάλιστα συγκρίσεις μεταξύ πειραμάτων και προσομοιώσεων δείχνουν συμφωνία αποτελεσμάτων σε ικανοποιητικό βαθμό. Συνεπώς, η χρήση των μοντέλων αυτών στην μοντελοποίηση GLARE κρίνεται αρκετά ασφαλής και αξιόπιστη, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών και αυτών που προέκυψαν κατά την αριθμητική ανάλυσή μας. Η σύγκριση αυτή παρατίθεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.

### 3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η μοντελοποίηση είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια μίας ανάλυσης με την χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Ουσιαστικά με τον όρο μοντελοποίηση εννοούμε τη διαδικασία μέσα από την οποία δημιουργείται ένα μαθηματικό αντίγραφο με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο προορίζεται να προσομοιώσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός φυσικού προβλήματος.

Μία τυπική διαδικασία μοντελοποίησης με τη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στάδια [100]:

1. Μελέτη/κατανόηση φυσικού προβλήματος
2. Σχεδίαση μοντέλου
3. Προσδιορισμός φορτίων και επίλυση

Στη παρούσα μελέτη για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα του ANSYS/LS DYNA, η οποία μεταξύ άλλων επιτρέπει την αριθμητική προσέγγιση δυναμικών προβλημάτων.

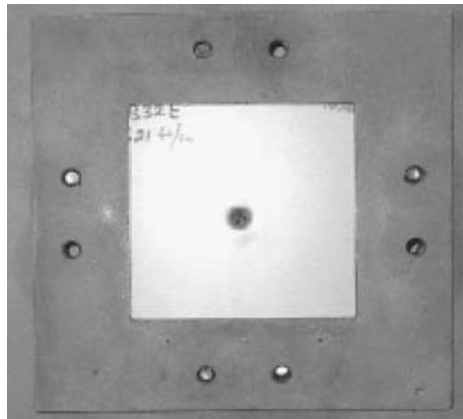
#### 3.1 Φυσικό πρόβλημα

Το φυσικό πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι η βαλλιστική κρούση πακτωμένης τετραγωνικής πλάκας GLARE εκτελούμενης σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία που ακολούθησε το Εργαστήριο Βαλλιστικών Κρούσεων (Ballistic Impact Lab) της NASA για χάρη της ερευνητικής εργασίας των Michelle S. Hoo Fatt et al. [38].

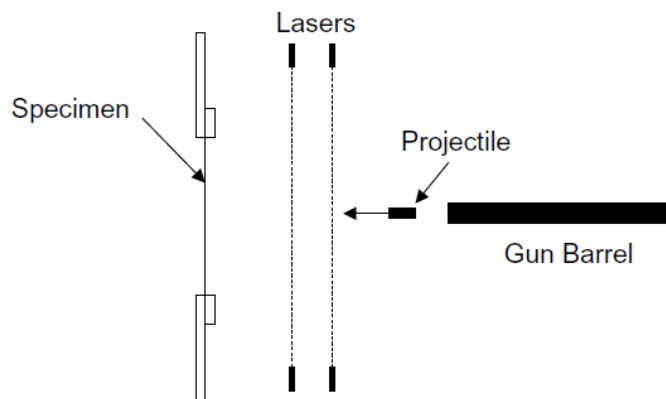
Τα εν λόγω πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση διάταξης «πιστολιού αερίου He» για την εκτόξευση του βλήματος. Το βλήμα ήταν συμπαγές και κυλινδρικού σχήματος με επίπεδες βάσεις, μήκους ίσου με 2.54cm και διαμέτρου ίσης με 1.27cm. Η μετώπη του βλήματος η οποία ερχόταν σε επαφή με το υπό δοκιμή υλικό είχε υποστεί μηχανική κατεργασία περιμετρικά και είχε αποκτήσει «στρογγύλεμα» ακτίνας 0.8mm. Ως υλικό κατασκευής του βλήματος είχε χρησιμοποιηθεί το κράμα Ti-6Al-4V σκληρότητας 36-37 HRC, ενώ η μάζα του κυμαινόταν μεταξύ 14.05gr και 14.20gr.

Τα δοκίμια που υποβάλλονταν σε βαλλιστική κρούση ήταν τετραγωνικές πλάκες με μήκος πλευράς 17.8cm, οι οποίες πακτώνονταν περιμετρικά, έτσι ώστε τελικά το ελεύθερο σε κρούση τμήμα να καταλήγει να είναι ένα τετράγωνο πλευράς 15.24cm. Τα δοκίμια τοποθετούνταν κάθετα στην πορεία κίνησης του κυλινδρικού βλήματος.

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται ο τρόπος πάκτωσης των πλακών, ενώ στο Σχήμα 3.2 δίνεται μία σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 3.1. Πάκτωση δοκιμίου. Διακρίνεται το ελεύθερο τετραγωνικό τμήμα πλευράς 15.24cm. [38]



Σχήμα 3.2. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης. [38]

## 3.2 Σχεδίαση Μοντέλου

Η σχεδίαση του μοντέλου είναι ένα από τα σημαντικότερα και ίσως από τα πιο χρονοβόρα στάδια μίας μελέτης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο περιλαμβάνει όλους τους κόμβους (nodes), τα στοιχεία (elements), τις ιδιότητες υλικού (material properties), τις πραγματικές σταθερές (real constants), τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) και άλλες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν το φυσικό πρόβλημα. Όλες αυτές οι παράμετροι θα πρέπει να επιλεγούν με ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε το τελικό μοντέλο να μπορεί να αναπαράξει με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά του φυσικού πρωτοτύπου.

Τα κρίσιμότερα σημεία τα οποία περιλαμβάνει η κατασκευή ενός μοντέλου δυναμικής ανάλυσης είναι τα παρακάτω σημεία [102]:

1. Επιλογή πεπερασμένου στοιχείου (element type)
2. Επιλογή μοντέλου υλικού (material model)
3. Σχεδίαση γεωμετρίας μοντέλου (model geometry)
4. Διακριτοποίηση (meshing)
5. Προσδιορισμός ιδιοτήτων επαφών (contact definitions)

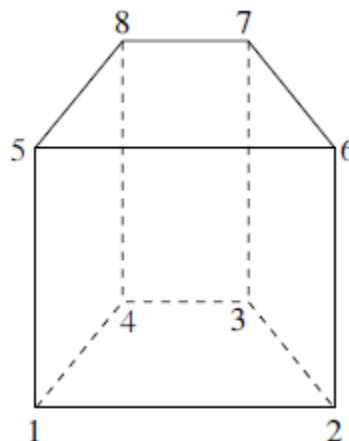
### 3.2.1 Επιλογή πεπερασμένου στοιχείου

Στη πλατφόρμα του λογισμικού ANSYS/LS DYNA υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων τύπων πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την μοντελοποίηση. Γενικά, το είδος των στοιχείων καθορίζει μεταξύ άλλων:

- το βαθμό ελευθερίας
- το χώρο στον οποίο κείται το στοιχείο (2-Δ ή 3-Δ)

Για τα δυναμικά προβλήματα όλα τα διαθέσιμα είδη στοιχείων είναι 3-Δ με μία μόνο εξαίρεση (το PLANE162) και χρησιμοποιούν μειωμένη ολοκλήρωση (reduced integration), όπου αυτό είναι εφικτό. Λέγοντας μειωμένη ολοκλήρωση εννοείται ότι ο αριθμός των σημείων που λαμβάνεται υπόψη για την αριθμητική ολοκλήρωση κατά τον υπολογισμό της παραμόρφωσης των στοιχείων είναι μικρότερος από τον αριθμό που απαιτείται για την ακριβή ολοκλήρωση. Ως προεπιλογή χρησιμοποιείται η ενός σημείου ολοκλήρωση (one point integration) για τα στοιχεία τύπου στερεού (solid), κελύφους (shell), επιπέδου (plane) και δοκού (beam), ενώ υπάρχει και η δυνατότητα επιλογής ολικής ολοκλήρωσης (full integration). Τα στοιχεία αυτά εμφανίζουν γραμμική συνάρτηση μετατόπισης και σε συνδυασμό με την ενός σημείου ολοκλήρωση θεωρούνται τα πιο κατάλληλα για μη γραμμικές εφαρμογές με μεγάλες παραμορφώσεις και αστοχία υλικών [102].

Κατά τη κατασκευή των μοντέλων της παρούσας εργασίας τόσο για τις τετραγωνικές πλάκες όσο και για το βλήμα χρησιμοποιήθηκε 8-κομβικό εξάεδρο στερεό στοιχείο (8-node brick solid element). Το στοιχείο αυτό κατά προεπιλογή χρησιμοποιεί ένα σημείο ολοκλήρωσης, καθώς και έλεγχο της hourglass (§3.2.4.4) για πιο γρήγορο υπολογισμό της παραμόρφωσης των στοιχείων. Το σημαντικό πλεονέκτημα της ενός σημείου ολοκλήρωσης είναι ότι στα προβλήματα μεγάλων παραμορφώσεων μειώνει σημαντικά την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και οδηγεί σε αρκετά μικρότερο χρόνο επίλυσης. Ένα 8-κομβικό εξάεδρο στοιχείο φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. 8-κομβικό εξάεδρο στερεό στοιχείο. [92]

### 3.2.2 Επιλογή μοντέλου υλικού

Η επιλογή του μοντέλου υλικού (material model) γίνεται για κάθε παρελκόμενο (part) ξεχωριστά και εξαρτάται, όπως είναι εύλογο, από τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής του εκάστοτε παρελκόμενου. Η επιλογή του μοντέλου υλικού θα πρέπει να γίνει σχολαστικά, έτσι

ώστε το μοντέλο να περιγράφει όσο το δυνατόν καλύτερα τη συμπεριφορά του υλικού που επιχειρείται να προσομοιώσει.

Στη πλατφόρμα του LS-DYNA υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων μοντέλων υλικών. Κατά τη μοντελοποίηση της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα:

1. Μοντέλο στερεού απαραμόρφωτου υλικού (\*MAT\_RIGID/ \*MAT\_020) για το υλικό του βλήματος.
2. Απλουστευμένο μοντέλο Johnson-Cook (\*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK/ \*MAT\_098) για το υλικό των στρώσεων αλουμινίου (§2.2).
3. Μοντέλο αστοχίας σύνθετου υλικού (\*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE/ \*MAT\_022) για τις στρώσεις του σύνθετου υλικού στις πλάκες GLARE (§2.3).

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ανωτέρω καταστατικά μοντέλα υπ' αριθμόν 2 και 3 δεν επιτρέπουν τη διαγραφή των στοιχείων που έχουν αστοχήσει, γεγονός που καθιστά αδύνατη τη διάτρηση των δοκιμίων και τον υπολογισμό του βαλλιστικού τους ορίου. Για το λόγο αυτό ήταν απαραίτητη η χρήση της εντολής \*MAT\_ADD\_EROSION, μέσω της οποίας κατέστη δυνατό να οριστούν κριτήρια διαγραφής των στοιχείων. Και για τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα υιοθετήθηκαν κριτήρια παραμόρφωσης, πράγμα που σημαίνει ότι η διαγραφή των στοιχείων ενεργοποιούνταν όταν η παραμόρφωσή τους ξεπερνούσε μία κρίσιμη τιμή, όταν δηλαδή  $\varepsilon \geq \varepsilon_{erosion}$ .

### 3.2.2.1 Μοντέλο υλικού βλήματος

Το βλήμα ήταν κατασκευασμένο από κράμα Ti-6Al-4V, το οποίο είναι ένα υλικό υψηλής σκληρότητας και αντοχής, με αποτέλεσμα κατά την βαλλιστική κρούση των πλακών GLARE να υφίσταται αμελητέες παραμορφώσεις [38].

Για την προσομοίωσή του επιλέχθηκε να γίνει χρήση του μοντέλου \*MAT\_RIGID. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει, ουσιαστικά, το υλικό ως απαραμόρφωτο. Έχει εφαρμογή σε πολλά πρακτικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα στην μοντελοποίηση των εργαλείων σε ένα πρόβλημα μηχανικής κατεργασίας μετάλλων. Ένα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι απαιτεί ελάχιστη υπολογιστική ισχύ.

Οι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό του εν λόγω μοντέλου είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , ο συντελεστής Poisson  $\nu$  και η πυκνότητα  $\rho$ . Για το κράμα Ti-6Al-4V χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Μηχανική Ιδιότητα	Ti-6Al-4V [103]
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	4430
$\nu$	0.342
$E$ (GPa)	113.8

Πίνακας 3.1. Μηχανικές ιδιότητες Ti-6Al-4V, που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο υλικού του βλήματος [103].

### 3.2.2.2 Μοντέλο υλικού στρώσεων αλουμινίου

Για την μοντελοποίηση των στρώσεων αλουμινίου επιλέχθηκε το μοντέλο \*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK. Πρόκειται για το απλουστευμένο καταστατικό μοντέλο του Johnson Cook, το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη τις θερμικές επιδράσεις στις

ιδιότητες του υλικού (§2.2). Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα, όπου οι ρυθμοί παραμόρφωσης (strain rates) κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι ότι καταφέρνει να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά των μετάλλων και για το λόγο αυτό προτιμάται στη πλειοψηφία των σύγχρονων αναλύσεων.

Το απλουστευμένο καταστατικό μοντέλο του Johnson-Cook διατυπώνεται από την Σχέση 2.11. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό του εν λόγω μοντέλου είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , ο συντελεστής Poisson  $\nu$ , η πυκνότητα  $\rho$ , καθώς και οι σταθερές Johnson Cook  $A$ ,  $B$ ,  $n$  και  $C$ .

Οι ιδιότητες όλων των κραμάτων αλουμινίου, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Παράμετρος	Al 2024-T3 <sup>[83]</sup>	Al 2024-T351	Al 2024-O	Al 6061-T6	Al 7039	Al 7075-T6
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2770	2770	2770	2700 <sup>[104]</sup>	2740 <sup>[105]</sup>	2810 <sup>[111]</sup>
$\nu$	0.33	0.33	0.33	0.33 <sup>[104]</sup>	0.33 <sup>[105]</sup>	0.33 <sup>[111]</sup>
$E$ (GPa)	73.084	73.084	73.084	68.9 <sup>[104]</sup>	69.6 <sup>[105]</sup>	71.7 <sup>[111]</sup>
$A$ (MPa)	369	265 <sup>[94]</sup>	85 <sup>[106]</sup>	324 <sup>[106]</sup>	337 <sup>[94]</sup>	546 <sup>[106]</sup>
$B$ (MPa)	684	426 <sup>[94]</sup>	325 <sup>[106]</sup>	114 <sup>[106]</sup>	343 <sup>[94]</sup>	678 <sup>[106]</sup>
$n$	0.73	0.34 <sup>[94]</sup>	0.4 <sup>[106]</sup>	0.42 <sup>[106]</sup>	0.41 <sup>[94]</sup>	0.71 <sup>[106]</sup>
$C$	0.0083	0.015 <sup>[94]</sup>	0.0083 <sup>[106]</sup>	0.002 <sup>[106]</sup>	0.01 <sup>[94]</sup>	0.024 <sup>[106]</sup>

Πίνακας 3.2. Παράμετροι κραμάτων αλουμινίου.

### 3.2.2.3 Μοντέλο υλικού στρώσεων σύνθετου υλικού

Οι στρώσεις σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των GLARE της παρούσας εργασίας, είναι στρώσεις ενισχυμένες κατά τη μία κατεύθυνση η κάθε μία (unidirectional ή UD) με ίνες γυαλιού τύπου S2-glass και διαθέτουν μήτρα από εποξική ρητίνη.

Η μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού επιλέχθηκε να γίνει με το μοντέλο \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ορθότροπων σύνθετων υλικών (§2.3). Το μοντέλο αυτό έχει υιοθετήσει τα κριτήρια αστοχίας Chang-Chang, τα οποία περιλαμβάνουν την ρωγμάτωση της μήτρας (matrix cracking) του σύνθετου, την αστοχία της μήτρας λόγω θλίψης (compressive failure), την αστοχία των ινών και την διατμητική αστοχία μεταξύ ινών-μήτρας. (Τα κριτήρια αυτά έχουν αναλυθεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 2.)

Οι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό του εν λόγω μοντέλου είναι η πυκνότητα  $\rho$ , τα μέτρα ελαστικότητας ( $E_{11}$ ,  $E_{22}$  και  $E_{33}$ ), τα μέτρα διάτμησης ( $G_{12}$ ,  $G_{23}$  και  $G_{31}$ ), οι συντελεστές Poisson ( $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$  και  $\nu_{32}$ ), η αντοχή σε διάτμηση (SC), η αντοχή σε εφελκυσμό κατά τη διεύθυνση των ινών (XT), η αντοχή σε εφελκυσμό κατά την εγκάρσια διεύθυνση (YT) και η αντοχή σε θλίψη κατά την εγκάρσια διεύθυνση (YC).

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού UD S2-glass/epoxy φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3.

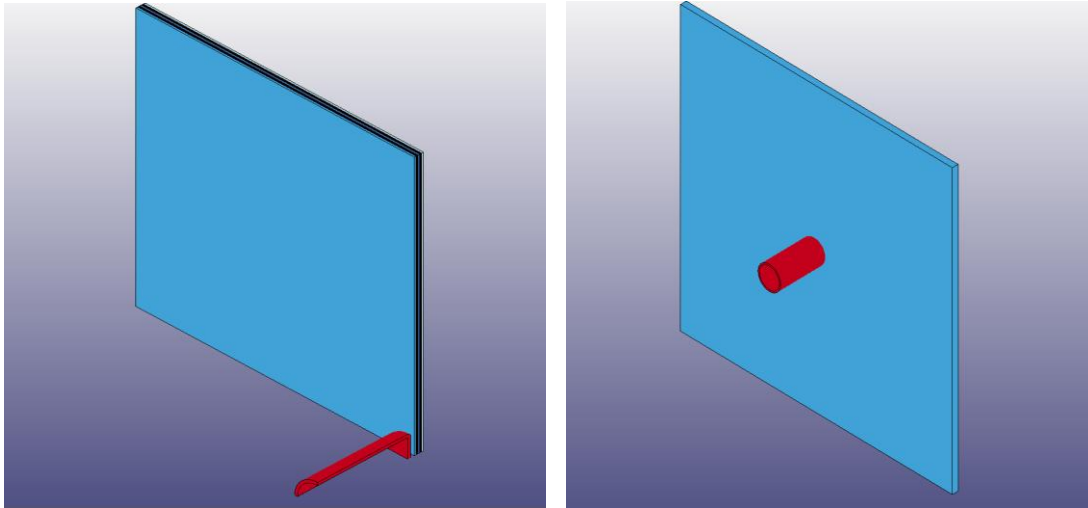
Παράμετρος	UD S2-glass/epoxy <sup>[38], [83]</sup>
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1980
$\nu_{21}$	0.0817
$\nu_{31}$	0.0817
$\nu_{32}$	0.32
$E_{11}$ (GPa)	52
$E_{22}$ (GPa)	17
$E_{33}$ (GPa)	17
$G_{12}$ (GPa)	7
$G_{23}$ (GPa)	7
$G_{31}$ (GPa)	7
$SC$ (MPa)	75
$XT$ (MPa)	1779
$YT$ (MPa)	57
$YC$ (MPa)	285

Πίνακας 3.3. Παράμετροι σύνθετου υλικού UD S2-glass/epoxy.

### 3.2.3 Σχεδίαση Γεωμετρίας

Η δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου γίνεται, κατά κανόνα, σύμφωνα με τις φυσικές διαστάσεις του φυσικού πρωτότυπου. Ωστόσο, πολλές φορές για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικής ισχύος και χρόνου επίλυσης είναι δυνατόν να αναπαραχθεί μόνο ένα τμήμα αυτής (π.χ. το 1/4 ή το 1/2). Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί κάτι τέτοιο είναι το πρόβλημα να εμφανίζει συμμετρία τόσο γεωμετρική όσο και τασική, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να οριστούν και οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.

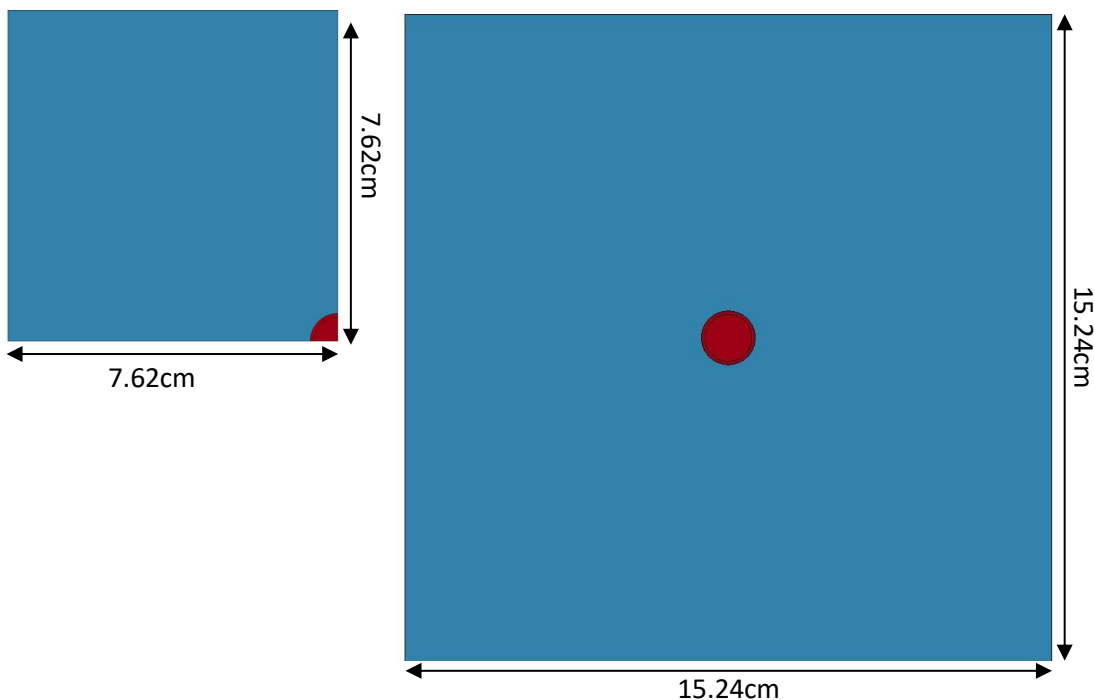
Στη παρούσα εργασία για τις πλάκες κραμάτων αλουμινίου κατασκευάστηκαν μοντέλα πλήρους γεωμετρίας για το σύστημα βλήμα-πλάκα, ενώ για τις πλάκες GLARE, που απαιτούσαν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, αξιοποιήθηκε η συμμετρία που παρουσιάζει το φυσικό πρόβλημα και κατασκευάστηκαν μοντέλα γεωμετρίας 1/4. Στο Σχήμα 3.4 φαίνονται ένα μοντέλο πλήρους γεωμετρίας και ένα μοντέλο γεωμετρίας 1/4.



Σχήμα 3.4. Μοντέλο γεωμετρίας 1/4 (αριστερά) και μοντέλο πλήρους γεωμετρίας (δεξιά).

Στα μοντέλα πλήρους γεωμετρίας οι πλάκες σχεδιάστηκαν με διαστάσεις επιφάνειας 15.24cm x 15.24cm (Σχήμα 3.5), όσο δηλαδή το ωφέλιμο τμήμα των πειραματικών δοκιμών, ενώ το πάχος τους διέφερε ανάλογα με την πλάκα GLARE ή αλουμινίου που μελετούνταν κάθε φορά.

Στα μοντέλα γεωμετρίας 1/4, οι πλάκες σχεδιάστηκαν με διαστάσεις επιφάνειας 7.62cm x 7.62cm (Σχήμα 3.5) και το πάχος τους, επίσης, διέφερε ανάλογα με την πλάκα GLARE ή αλουμινίου που μελετούνταν κάθε φορά.



Σχήμα 3.5. Διαστάσεις πλάκας σε μοντέλο γεωμετρίας 1/4 (αριστερά) και σε μοντέλο πλήρους γεωμετρίας (δεξιά).

Το βλήμα προς όφελος χρόνου επίλυσης τοποθετήθηκε αρκετά κοντά στην πλάκα και συγκεκριμένα σε απόσταση 1mm. (Σχήμα 3.6). Οι εξωτερικές διαστάσεις του σχεδιάστηκαν ίσες με αυτές του βλήματος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.



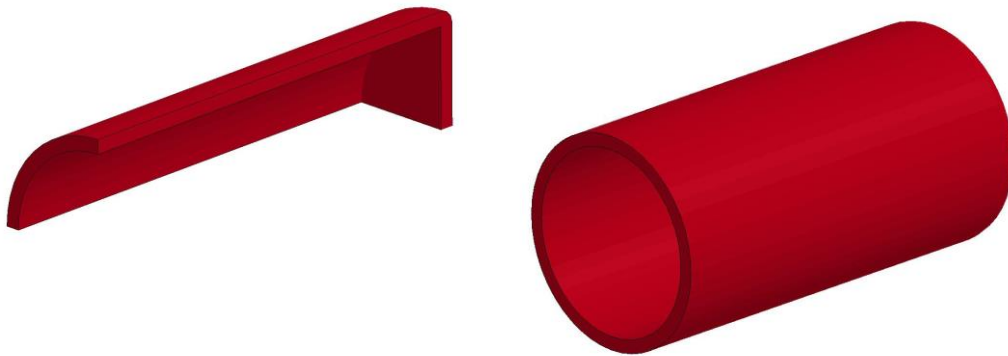
Σχήμα 3.6. Αρχική απόσταση βλήματος από το δοκίμιο.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι για την εσωτερική δομή του βλήματος για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικής ισχύος προτιμήθηκε μία διαφορετική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, προτιμήθηκε η υιοθέτηση κυλινδρικής γεωμετρίας με κενό εσωτερικό χώρο και όχι η συμπαγής δομή που είχε το βλήμα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων των Michelle S. Hoo Fatt et al [38] (Σχήμα 3.7). Η τροποποίηση αυτή στον όγκο του βλήματος επέβαλε και ανάλογη τροποποίηση στη πυκνότητά του, προκειμένου η μάζα του να είναι ίση με 14.125g, ίση δηλαδή με τον μέσο όρο των πειραματικών βλημάτων. Υπογραμμίζεται, ότι η υιοθέτηση της «κούφιας» δομής υιοθετήθηκε, αφού πρώτα εκτελέστηκαν δοκιμές με μοντέλα συμπαγούς βλήματος και αφού επιβεβαιώθηκε ότι τα αποτελέσματά των δύο δομών ταυτίζονταν πλήρως. Σημαντικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η χρήση του μοντέλου υλικού \*MAT\_RIGID, το οποίο αναλύθηκε στην §3.2.2.1.



Σχήμα 3.7. Γεωμετρία βλήματος «κούφιας» και συμπαγούς δομής. Η εμπρόσθια όψη είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Στα μοντέλα γεωμετρίας 1/4 το βλήμα έχει ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με το βλήμα πλήρους γεωμετρίας, όσον αφορά σε μήκος και διάμετρο και έχει προκύψει με τομή του πλήρους μοντέλου κατά μήκος δύο επιπέδων τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και τέμνονται στην ευθεία που σχηματίζεται από τα κέντρα των δύο εδρών του βλήματος (Σχήμα 3.8).

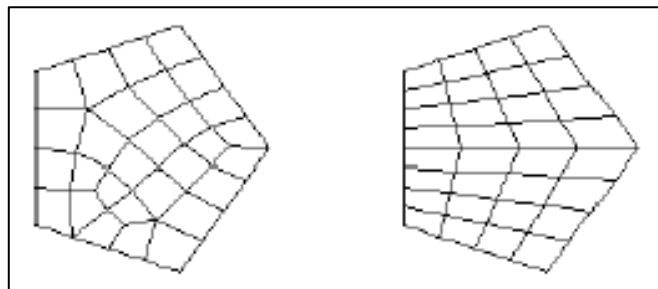


Σχήμα 3.8. Βλήμα γεωμετρίας 1/4 (αριστερά) και πλήρους γεωμετρίας (δεξιά).

### 3.2.4 Διακριτοποίηση (meshing)

Η διακριτοποίηση ή αλλιώς meshing είναι η διαδικασία κατά την οποία η γεωμετρία της υπό ανάλυση κατασκευής χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία.

Το ANSYS προσφέρει δύο επιλογές προκειμένου να επιτευχθεί η ιδανικότερη διακριτοποίηση. Αυτές είναι η ελεύθερη (free) και η δομημένη (mapped). Στην ελεύθερη διακριτοποίηση δεν υπάρχει κανένας περιορισμός ούτε στο σχήμα των στοιχείων ούτε και στον τρόπο διάταξής τους προκειμένου να σχηματίσουν τον κάρναβο (pattern). Αντίθετα, στη δομημένη διακριτοποίηση τα στοιχεία έχουν συγκεκριμένο σχήμα και συγκεκριμένο τρόπο διάταξης. Μία επιφάνεια που έχει υποστεί δομημένη διακριτοποίηση περιέχει είτε μόνο τετραπλευρικά στοιχεία είτε μόνο τριγωνικά, ενώ ένας αντίστοιχος όγκος περιέχει μόνο εξαεδρικά στοιχεία. Η εν λόγω διακριτοποίηση εμφανίζει «τακτοποιημένο» κάρναβο με τα στοιχεία να διατάσσονται σε εμφανείς γραμμές. Ωστόσο, η εφαρμογή του δομημένου κάρναβου προϋποθέτει ότι η γεωμετρία της κατασκευής είναι τέτοια που να το επιτρέπει. Στο Σχήμα 3.9 στα αριστερά απεικονίζεται μία επιφάνεια με ελεύθερη διακριτοποίηση, ενώ στα δεξιά μία επιφάνεια με δομημένη.



Σχήμα 3.9. Ελεύθερη (αριστερά) και δομημένη (δεξιά) διακριτοποίηση [101].

Στη παρούσα εργασία κατά την κατασκευή όλων των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η δομημένη διακριτοποίηση (mapped mesh). Σε αυτό συνέβαλε τόσο το εξαεδρικό στοιχείο (§3.2.1) που έχει επιλεγεί για την μοντελοποίηση μας όσο και η γεωμετρία του βλήματος και των πλακών-δοκιμίων.

Ένα άλλο κρίσιμο σημείο κατά την διακριτοποίηση είναι η επιλογή του μεγέθους των στοιχείων, από το οποίο καθορίζεται το πόσο πυκνός ή αραιός είναι ένας κάρναβος. Γενικά, υπάρχει η πεποίθηση ότι όσο περισσότερα στοιχεία διαθέτει ένας κάρναβος τόσο περισσότερο

προσεγγίζει το φυσικό πρόβλημα. Ωστόσο, υπερβολικά μεγάλος αριθμός στοιχείων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μεγαλύτερα σφάλματα. Συνεπώς, είναι σημαντικό ο κάνναβος να διαθέτει τη κατάλληλη πυκνότητα. Δυστυχώς, όμως, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας που να μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση για να μπορεί να προσδιοριστεί η ιδανική πυκνότητα κάνναβου. Για το λόγο αυτό κάθε φυσικό πρόβλημα εξετάζεται ξεχωριστά.

Μία πρακτική που εφαρμόζεται ευρέως για την επιλογή της πυκνότητας κάνναβου είναι αυτή της σύγκλισης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζεται αρχικά ένα μοντέλο με μία εμπειρική πυκνότητα κάνναβου και έπειτα κατασκευάζεται ένα δεύτερο μοντέλο με 1.5 έως 2 φορές πυκνότερο κάνναβο. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων και αν αυτά δεν διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους (απόκλιση μικρότερη από 15%), τότε θεωρείται ότι η αρχική πυκνότητα κάνναβου είναι επαρκής. Αυτή η μέθοδος υιοθετήθηκε και κατά την παρούσα μελέτη.

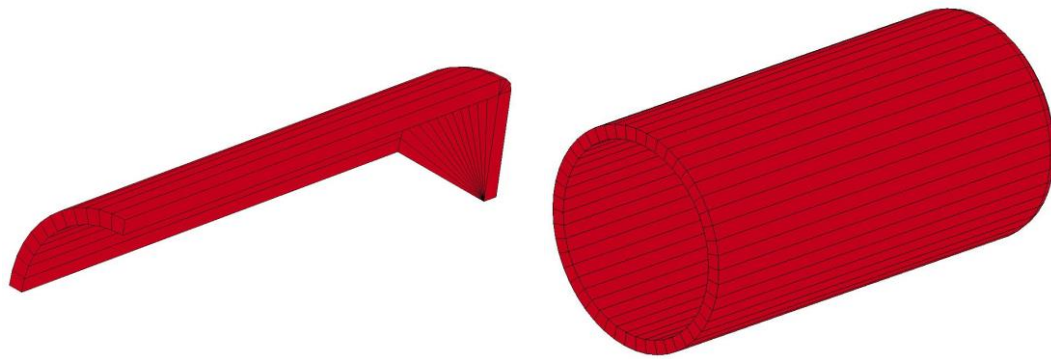
Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα για την πυκνότητα του κάνναβου που θα έπρεπε να εφαρμόσουμε στα μοντέλα της εργασίας μας, χρησιμοποιήθηκαν σε πρώτη φάση εκείνα τα μοντέλα για τα οποία υπήρχαν ήδη πειραματικά αποτελέσματα, ήτοι τα GLARE 5 με στρώσεις αλουμινίου 2024-T3 πάχους 0.06in (1.53mm), 0.076in (1.93mm) και 0.1in (2.54mm), καθώς και οι πλάκες αλουμινίου 2024-T3 πάχους 3.2mm και 1.6mm. Για τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκε αρχικά ένας αραιός κάνναβος και στη συνέχεια ένας πυκνός με τα διπλάσια σε αριθμό στοιχεία. Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων από τους δύο κάνναβους συγκρίνονταν τόσο μεταξύ τους, ώστε να μην αποκλίνουν περισσότερο από 15%, όσο και με τα πειραματικά.

Τελικά, ύστερα από πολυάριθμες δοκιμές εξάχθηκαν πολύτιμα συμπεράσματα βάσει των οποίων έγινε και η διακριτοποίηση σε όλα τα μοντέλα της εργασίας μας. Η διακριτοποίηση περιλαμβάνει:

1. την διακριτοποίηση του βλήματος,
2. την διακριτοποίηση πλάκας αλουμινίου,
3. την διακριτοποίηση πλάκας GLARE,
4. την επαλήθευση καταλληλότητας διακριτοποίησης μέσω της ενέργειας Hourglass.

### 3.2.4.1 Διακριτοποίηση βλήματος

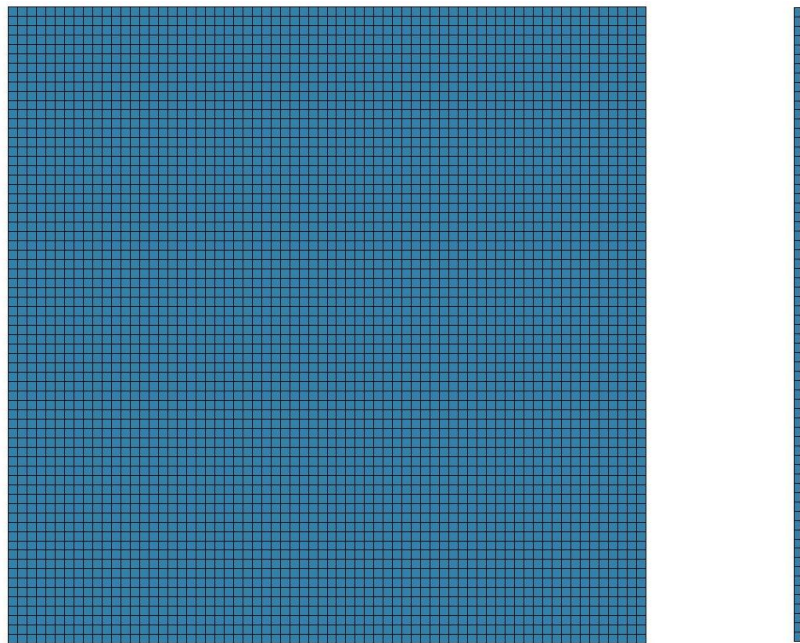
Σε όλα τα μοντέλα, όπως ήταν λογικό, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ακριβώς βλήμα. Το υλικό κατασκευής του βλήματος, όπως αναφέρθηκε και στην §3.2.2.1, προσομοιώθηκε με το μοντέλο υλικού \*MAT\_RIGID, το οποίο μετατρέπει, ουσιαστικά, το βλήμα σε απαραμόρφωτο στερεό. Για τον λόγο αυτό η πυκνότητα του κάνναβου του βλήματος δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα της λύσης. Έτσι, προκειμένου να υπάρξει υπολογιστικό όφελος η διακριτοποίηση του βλήματος επιλέχθηκε να γίνει με έναν αρκετά μικρό αριθμό στοιχείων. Συγκεκριμένα, στα μοντέλα πλήρους γεωμετρίας το βλήμα αποτελείται από 240 στοιχεία (elements) και 338 κόμβους (nodes), ενώ στα μοντέλα γεωμετρίας 1/4 το βλήμα αποτελείται από 60 στοιχεία (elements) και 93 κόμβους (nodes) (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Διακριτοποίηση βλήματος γεωμετρίας 1/4 (αριστερά) και πλήρους γεωμετρίας (δεξιά).

#### 3.2.4.2 Διακριτοποίηση πλάκας αλουμινίου

Στις πλάκες αλουμινίου χρησιμοποιήθηκαν κυβικά στοιχεία, δηλαδή στοιχεία με σχήμα κύβου (όλες οι ακμές ίσες μεταξύ τους), και μάλιστα με μέγεθος τέτοιο, ώστε να τοποθετούνται δύο στοιχεία κατά μήκος του πάχους της πλάκας (Σχήμα 3.11).



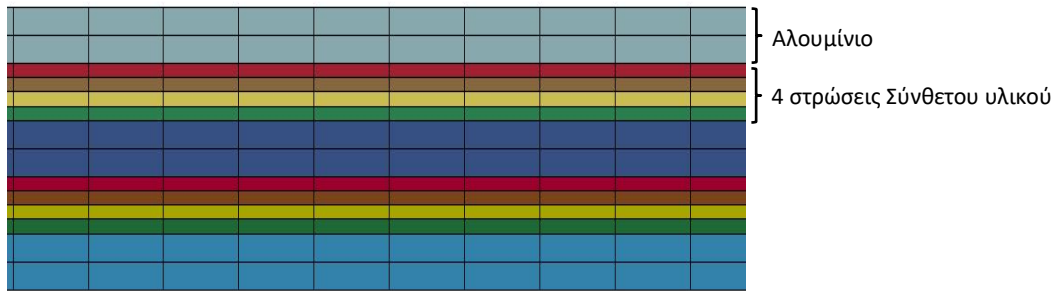
Σχήμα 3.11. Διακριτοποίηση πλάκας αλουμινίου κατά την επιφάνεια (αριστερά) και κατά το πάχος (δεξιά).

#### 3.2.4.3 Διακριτοποίηση πλάκας GLARE

Στις πλάκες GLARE με δεδομένο ότι οι στρώσεις σύνθετου υλικού ήταν οι ίδιες για όλα τα μοντέλα ως προς το πάχος και το υλικό, η διακριτοποίηση και το μέγεθος των στοιχείων έγινε με βάση το πάχος των στρώσεων αλουμινίου.

Δεδομένου ότι οι στρώσεις αλουμινίου και σύνθετου υλικού δεν έχουν το ίδιο πάχος στις πλάκες GLARE και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι στρώσεις αυτές θα πρέπει να σχηματίζουν τον ίδιο επιφανειακό κάνναβο, προκειμένου να μην υπάρχουν σφάλματα κατά την επίλυση, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση κυβικών στοιχείων (όπως έγινε στις πλάκες αλουμινίου) για την διακριτοποίηση μίας πλάκας GLARE είναι εκ των πραγμάτων αδύνατη. Εδώ, σε όλες τις

πλάκες GLARE, κάθε στρώση αλουμινίου διακριτοποιήθηκε με δύο στοιχεία κατά μήκος του πάχους, ενώ κάθε στρώση σύνθετου υλικού με μόνο ένα (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12. Διακριτοποίηση πλάκας GLARE.

Όσον αφορά στον επιφανειακό κάρναβο των στρώσεων, τα στοιχεία είχαν τετραγωνικό σχήμα με μήκος πλευράς εξαρτώμενο κάθε φορά από το πάχος της στρώσης αλουμινίου στο εκάστοτε GLARE.

Ένα άλλο σημαντικό κομμάτι κατά την διακριτοποίηση των πλακών GLARE είναι η απόδοση προσανατολισμού στις στρώσεις σύνθετου υλικού. Στα GLARE, που μελετήθηκαν, κάθε στρώση σύνθετου υλικού είναι ενισχυμένη με ίνες προσανατολισμένες κατά μία διεύθυνση (UD) και τοποθετείται στην πλάκα GLARE με προσανατολισμό είτε  $0^\circ$  είτε  $90^\circ$ . Κατά την μοντελοποίηση η απόδοση προσανατολισμού στις στρώσεις γίνεται μέσω της απόδοσης προσανατολισμού στα στοιχεία [101].

Τα στοιχεία κατά κανόνα προσανατολίζονται σύμφωνα με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων (Global Cartesian system). Ωστόσο, η πλατφόρμα του ANSYS/LS-DYNA δίνει τη δυνατότητα τροποποίησης του προσανατολισμού αυτού και μάλιστα με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό και ο οποίος προσφέρεται για δομημένη διακριτοποίηση εξάεδρων όγκων είναι να οριστεί αρχικά ένας συγκεκριμένος προσανατολισμός για έναν όγκο και έπειτα τα στοιχεία που θα δημιουργηθούν για να καλύψουν τον όγκο αυτό να υιοθετήσουν τον συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε και στα δικά μας μοντέλα. Ο προσανατολισμός του όγκου ή καλύτερα της στρώσης σύνθετου έγινε μέσω του ορισμού του z άξονά της με τη χρήση δύο κρίσιμων σημείων (keypoints). Συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε ότι τα δύο επιλεγμένα κρίσιμα σημεία συμβολίζονται με KZ1 και KZ2, τότε ο z άξονας αποκτά τη διεύθυνση και τη φορά του διανύσματος  $\overrightarrow{(KZ1)(KZ2)}$ . Αντίστοιχα, οι υπόλοιποι άξονες προκύπτουν με τον κανόνα του δεξιού χεριού και με την υποχρέωση ότι η διεύθυνση κάθε άξονα συμπίπτει με μία από τις ακμές της στρώσης. Στα μοντέλα της εργασίας μας ο z άξονας οριζόταν σε μία από τις ακμές του πάχους της στρώσης ανάλογα με τον προσανατολισμό της κάθε στρώσης και με φορά της κίνησης του βλήματος.

#### 3.2.4.4 Επαλήθευση καταλληλότητας διακριτοποίησης μέσω της ενέργειας Hourglass

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μέθοδος της σύγκλισης είναι ο βασικός οδηγός στο να βρεθεί μία επαρκής πυκνότητα διακριτοποίησης. Ωστόσο, είναι σαφές πως πέρα από την πυκνότητα του κάρναβου κατά την διακριτοποίηση ρυθμίζονται και άλλοι παράμετροι, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος η τελική διακριτοποίηση να οδηγήσει σε σφάλματα κατά την επίλυση του μοντέλου. Ένας αξιόπιστος τρόπος για την επαλήθευση της καταλληλότητας της

διακριτοποίησης έχει να κάνει με την ενέργεια μηδενικής παραμόρφωσης ή αλλιώς hourglass energy.

Η ενέργεια αυτή εμφανίζεται στις περιπτώσεις όπου για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης των στοιχείων χρησιμοποιείται η μέθοδος της μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration), όπως συμβαίνει με το στοιχείο που έχουμε επιλέξει για την μοντελοποίησή μας (§3.2.1). Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατόν το στοιχείο να αποκτήσει παραμορφώσεις οι οποίες όμως αντιστοιχούν, εσφαλμένα, σε μηδενική ενέργεια παραμόρφωσης. Αυτές οι καταστάσεις καλούνται καταστάσεις μηδενικής ενέργειας παραμόρφωσης ή hourglassing modes. Οι καταστάσεις αυτές είναι περιοδικές, έχουν μηδενική ακαμψία και δίνουν στις πλευρές των στοιχείων μία μορφή «ζιγκ-ζαγκ». Αυτού του είδους οι παραμορφώσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.13 [91].



Σχήμα 3.13. Απαραμόρφωτος κάναβος (αριστερά) και παραμορφωμένος κάναβος επηρεασμένος από το φαινόμενο hourglass (δεξιά). [91]

Το φαινόμενο hourglass δεν υφίσταται στις περιπτώσεις, όπου για τον υπολογισμό των στοιχείων χρησιμοποιείται η μέθοδος πλήρους ολοκλήρωσης (full integration). Ωστόσο, η μέθοδος αυτή επιφέρει μεγάλο κόστος τόσο σε χρόνο όσο και σε υπολογιστική ισχύ, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται σπάνια. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί κάποιες πρακτικές που στοχεύουν στην μείωση του φαινομένου hourglass, ενώ και το ίδιο το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA διαθέτει εξειδικευμένες παραμέτρους για τον σκοπό αυτό. Στα μοντέλα μας, λοιπόν, έγινε χρήση τέτοιων παραμέτρων.

Προκειμένου να ελεγχθεί η διακριτοποίηση ως προς την καταλληλότητά της είναι απαραίτητο να επιβεβαιωθεί ότι το φαινόμενο hourglass δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου. Σύμφωνα με έναν γενικό κανόνα αυτό συμβαίνει όταν το μέγεθος της ενέργειας hourglass, δεν ξεπερνά το 10% της μεγαλύτερης τιμής που εμφανίζει η εσωτερική ενέργεια (internal energy) [112]. Τα δεδομένα για τις ενέργειες αυτές συλλέγονται από το αρχείο GLSTAT που παράγεται από το ANSYS/LS DYNA.

Ο συγκεκριμένος έλεγχος εκτελέστηκε σε όλα ανεξαιρέτως τα μοντέλα της εργασίας μας και διαπιστώθηκε ότι η ενέργεια hourglass είναι, όντως, μικρότερη από το 10% της εσωτερικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μέθοδο σύγκλισης, επιβεβαιώνει την επάρκεια και την καταλληλότητα της διακριτοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα μας.

### 3.2.5 Προσδιορισμός Ιδιοτήτων Επαφών (Contact definitions)

Κατά τη διάρκεια μίας δυναμικής ανάλυσης είναι βέβαιο ότι ορισμένα από τα παρελκόμενα που απαρτίζουν το μοντέλο, έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Ο ορισμός των χαρακτηριστικών που διέπουν τις επαφές αυτές είναι κρίσιμης σημασίας για την ικανότητα του μοντέλου να

προσομοιώνει το φυσικό πρόβλημα με ακρίβεια. Για τον σκοπό αυτό το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA [91], [92], [102] παρέχει πληθώρα τύπων επαφών, από τους οποίους άλλοι προορίζονται για εξειδικευμένες περιπτώσεις και άλλοι για χρήση γενικής φύσεως.

Στα μοντέλα της εργασίας μας, καθώς το βλήμα διαπερνάει μία πλάκα αλουμινίου ή μία πλάκα GLARE, έρχεται σε επαφή είτε μόνο με στρώσεις αλουμινίου είτε και με στρώσεις αλουμινίου και με στρώσεις σύνθετου υλικού αντίστοιχα. Επιπλέον, στις πλάκες GLARE οι στρώσεις αλουμινίου και σύνθετου υλικού έρχονται σε επαφή μεταξύ τους προκειμένου να σχηματίσουν τη δομή του. Συνεπώς, στα μοντέλα μας αναπτύσσονται δύο βασικά είδη επαφών:

- Επαφή βλήμα/στρώση, δηλαδή επαφή μεταξύ βλήματος και στρώσης αλουμινίου ή μεταξύ βλήματος και στρώσης σύνθετου υλικού, καθώς το βλήμα διαπερνάει μία πλάκα GLARE ή μία πλάκα αλουμινίου.
- Επαφή στρώση/στρώση, δηλαδή επαφή μεταξύ στρώσης αλουμινίου και στρώσης σύνθετου ή επαφή μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού, καθώς αυτές στοιβάζονται για να σχηματίσουν μία πλάκα GLARE.

Κατά τον ορισμό μίας επαφής ανάμεσα σε δύο παρελκόμενα ενός μοντέλου [102], δηλώνεται ποιο είναι το πρωτεύον (master) και ποιο είναι το δευτερεύον (slave). Πρωτεύον λέγεται το παρελκόμενο που προκαλεί τη διάτρηση, ενώ δευτερεύον λέγεται το παρελκόμενο που λειτουργεί ως στόχος και υφίσταται τη διάτρηση.

Όταν υπάρχει επαφή ανάμεσα σε ένα παραμορφώσιμο και ένα απαραμόρφωτο (rigid) σώμα, τότε ως πρωτεύον λογίζεται πάντοτε το απαραμόρφωτο σώμα και ως δευτερεύον το παραμορφώσιμο. Έτσι, στην επαφή βλήμα/στρώση, που αναλύεται παρακάτω (§3.2.5.1), ως πρωτεύον σώμα λαμβάνεται πάντα το βλήμα ενώ ως δευτερεύον η στρώση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο τύποι επαφών που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα μας, χρησιμοποιούν αλγόριθμους που μπορούν να ανιχνεύσουν διάτρηση όχι μόνο με φορά από την πρωτεύουσα επιφάνεια προς την δευτερεύουσα αλλά και ανάποδα, από την δευτερεύουσα προς την πρωτεύουσα επιφάνεια. Οι επαφές αυτές καλούνται συμμετρικές (symmetric) ή αμφίδρομες (two-way treatment). Η αναζήτηση για διατρήσεις γίνεται ανά το χρονικό βήμα (time step size) που έχει οριστεί.

Η μοντελοποίηση μίας επαφής με το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA [92] απαιτεί, αρχικά, να οριστεί ο τύπος της (contact type) και έπειτα να προσδιοριστούν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά αυτής (contact options). Επίσης, είναι αρκετά σημαντικό να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος υπολογισμού των δυνάμεων επαφής. Τέλος, επιβάλλεται να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία της με κριτήριο την ενέργεια ολίσθησης (sliding energy). Τα βήματα αυτά αναλύονται στη συνέχεια.

### 3.2.5.1 Επαφή βλήμα/στρώση

Για την πρώτη περίπτωση επαφής, δηλαδή για την επαφή βλήμα/στρώση, επιλέχθηκε να γίνει χρήση της επαφής \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE [92]. Ο τύπος επαφής "SURFACE\_TO\_SURFACE" χρησιμοποιείται όταν η επιφάνεια ενός σώματος διαπερνάει την επιφάνεια ενός άλλου σώματος. Ο συγκεκριμένος τύπος επαφής είναι από τους πιο δημοφιλείς καθώς χρησιμοποιείται συνήθως για σώματα με τυχαία σχήματα και σχετικά μεγάλες επιφάνειες επαφής.

Ως συμπληρωματικό χαρακτηριστικό της επαφής αυτής ορίστηκε η ιδιότητα “ERODING”. Η επιλογή αυτή είναι απαραίτητη όταν τα στοιχεία της εξωτερικής επιφάνειας του ενός ή και των δύο σωμάτων που έρχονται σε επαφή υφίστανται αστοχία υλικού. Σε αυτή τη περίπτωση η επαφή διατηρείται μέσω των εσωτερικών στοιχείων. Η χρήση της επιλογής “ERODING” είναι υποχρεωτική για τα προβλήματα διάτρησης, στα οποία έχει γίνει χρήση στοιχείων στερεού τύπου (solid elements), όπως ακριβώς συμβαίνει στα μοντέλα μας. Σε διαφορετική περίπτωση τα στοιχεία που αστοχούν δεν διαγράφονται, με αποτέλεσμα η ανίχνευση βαλλιστικού ορίου να είναι αδύνατη.

Σημειώνεται ότι κατά τον ορισμό της εν λόγω επαφής η ύπαρξη τριβής θεωρήθηκε αμελητέα και έτσι δεν ελήφθη υπόψη.

### 3.2.5.2 Επαφή στρώση/στρώση

Για την δεύτερη περίπτωση επαφής, δηλαδή για την περίπτωση στρώση/στρώση, επιλέχθηκε να γίνει χρήση της επαφής \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK [92]. Ο τύπος επαφής “AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE” χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση κρούσεων όπου λαμβάνουν χώρα μεγάλες παραμορφώσεις και όπου οι διατρήσεις μπορούν να έχουν τυχαία διεύθυνση. Ο χαρακτηρισμός “AUTOMATIC” υποδηλώνει ότι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση διατρήσεων μπορούν να ανιχνεύσουν διάτρηση από οποιαδήποτε πλευρά ενός στοιχείου. Η επιλογή “TIEBREAK” περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι στρώσεις μεταξύ τους. Συγκεκριμένα υποδηλώνει ότι η πρωτεύουσα επιφάνεια (master segment) είναι αρχικά συνεπίπεδη με την δευτερεύουσα επιφάνεια (slave segment) και προσκολλημένη σε αυτήν, ωστόσο, αυτές δεν μένουν προσκολλημένες για πάντα, παρά μόνο για όσο διάστημα δεν πληρείται το κριτήριο αστοχίας. Μόλις το κριτήριο αστοχίας ικανοποιηθεί οι δύο επιφάνειες δύναται είτε να κινηθούν η μία πάνω στην άλλη είτε ακόμα και να αποχωριστούν. Με αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, είναι δυνατό να προσομοιωθεί η αποκόλληση μεταξύ στρώσεων αλουμινίου και στρώσεων σύνθετου υλικού (debonding), καθώς και η αποκόλληση μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού (delamination), που παρατηρείται κατά την αστοχία των πλακών GLARE.

Στη περίπτωση της επαφής \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK το κριτήριο αστοχίας της σύνδεσης των στρώσεων βασίζεται στις αναπτυσσόμενες τάσεις. Το κριτήριο αυτό διατυπώνεται ως εξής:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \quad (3.1)$$

όπου  $\sigma_n$  και  $\sigma_s$  είναι η ορθή και η διατμητική τάση, αντίστοιχα, που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια των στρώσεων, ενώ  $NFLS$  και  $SFLS$  είναι οι αντοχές της διεπιφάνειας σε εφελκυσμό και διάτμηση αντίστοιχα.

Όταν ικανοποιείται η Σχέση 3.1 για τη διεπιφάνεια δύο διαδοχικών στρώσεων, τότε αυτές αποχωρίζονται μεταξύ τους. Επίσης, στα μοντέλα της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε ότι η αστοχία οφείλεται στη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια. Έτσι, για την αντοχή της διεπιφάνειας σε εφελκυσμό χρησιμοποιήθηκε μία αρκετά μεγάλη τιμή,

προκειμένου να μην επιτευχθεί ποτέ. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε  $NFLS = 2 \cdot 10^5 \text{ GPa}$ , ενώ για την αντοχή σε διάτμηση χρησιμοποιήθηκε  $SFLS = 90 \text{ MPa}$  [89].

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τον ορισμό της εν λόγω επαφής, η τριβή θεωρήθηκε αμελητέα, ωστόσο, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος συντελεστής ιξώδους απόσβεσης (viscous damping). Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για την απόσβεση των ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας που εμφανίζουν οι δυνάμεις επαφής κατά τη διάρκεια των προβλημάτων κρούσης.

### 3.2.5.3 Υπολογισμός δυνάμεων επαφής

Στο λογισμικό ANSYS/LS-DYNA, η συμπεριφορά μίας επαφής αναπαρίσταται εσωτερικά με γραμμικά ελατήρια ανάμεσα στους δευτερεύοντες κόμβους (slave nodes) και στις πρωτεύουσες επιφάνειες (master segments). Η σταθερά των ελατηρίων (spring stiffness) αυτών καθορίζει και το μέγεθος των δυνάμεων που θα αναπτυχθούν στους πρωτεύοντες (master) και δευτερεύοντες (slave) κόμβους της επαφής και για αυτό καλείται και ακαμψία της επαφής (contact stiffness).

Στις επαφές \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE και \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK, που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα μας, για τον υπολογισμό της σταθεράς ελατηρίου επιλέχθηκε η μέθοδος “soft constraint-based”. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η σταθερά των γραμμικών ελατηρίων επαφής υπολογίζεται από τις μάζες των κόμβων που έρχονται σε επαφή και από το χρονικό βήμα (time step size) που έχει οριστεί για την ανίχνευση διατρήσεων. Η ακαμψία επαφής, που προκύπτει, είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες των υλικών και προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τη συμπεριφορά επαφών μεταξύ παρελκομένων διαφορετικών υλικών. Η εν λόγω μέθοδος συνίσταται για χρήση σε αναλύσεις κρούσεων [91], [92].

### 3.2.5.4 Ενέργεια ολίσθησης (sliding energy)

Το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA [91], [112] για κάθε επαφή υπολογίζει τέσσερα διαφορετικά είδη ενέργειας:

- την δευτερεύουσα ενέργεια (slave energy)
- την πρωτεύουσα ενέργεια (master energy)
- την ενέργεια τριβής (frictional energy)
- το άθροισμα της δευτερεύουσας και πρωτεύουσας ενέργειας (SoSM)

Αν τα αθροίσματα της δευτερεύουσας και της πρωτεύουσας ενέργειας όλων των επαφών ενός μοντέλου προστεθούν μεταξύ τους, τότε προκύπτει μία συνολική ενέργεια η οποία καλείται ενέργεια ολίσθησης (sliding energy).

Σημειώνεται ότι η ενέργεια τριβής εμπεριέχεται τόσο στην πρωτεύουσα όσο και στην δευτερεύουσα ενέργεια και συνεπώς εμπεριέχεται στο άθροισμα πρωτεύουσας/δευτερεύουσας ενέργειας και κατ' επέκταση και στην ενέργεια ολίσθησης.

Όταν η τριβή αμελείται σε μία επαφή, η πρωτεύουσα και η δευτερεύουσα ενέργεια θα πρέπει να έχουν σχεδόν ίδιο μέγεθος αλλά με αντίθετο πρόσημο και το άθροισμα τους θα πρέπει

να είναι θετικό και σχετικά χαμηλό. Λέγοντας «σχετικά χαμηλό» εννοείται ότι η ενέργεια ολίσθησης του μοντέλου δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής του ενέργειας (internal energy) [112]. Όταν κατά τον ορισμό μίας επαφής έχει ληφθεί υπόψη η τριβή, τότε η ενέργεια επαφής θα πρέπει να είναι θετική, ενώ το μέγεθός της μπορεί να φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα ανάλογα με τους συντελεστές τριβής που χρησιμοποιούνται.

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των παραμέτρων που χρησιμοποιούνταν για τον ορισμό των επαφών στα μοντέλα της εργασίας μας, με το πέρας της επίλυσης κάθε μοντέλου γινόταν έλεγχος της ενέργειας ολίσθησης. Συγκεκριμένα, λαμβάνονταν δεδομένα που παράγονταν από το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA και σχηματίζονταν διαγράμματα ενέργειας. Κάθε διάγραμμα ενέργειας περιείχε την ολική ενέργεια (total energy), την κινητική ενέργεια (kinetic energy), την εσωτερική ενέργεια (internal energy), την ενέργεια hourglass και την ενέργεια ολίσθησης (sliding energy). Σε αυτά τα διαγράμματα γινόταν αφενός έλεγχος ότι η ολική ενέργεια του συστήματος διατηρείται σταθερή και αφετέρου έλεγχος ότι η ενέργεια ολίσθησης δεν εμφανίζει αρνητικές τιμές, δεν έχει υπερβολικά μεγάλο μέγεθος και δεν έχει ακανόνιστη μορφή (π.χ. μορφή βηματικής συνάρτησης).

### 3.3 Προσδιορισμός φορτίων και επίλυση

Αφού ολοκληρωθούν όλα τα βήματα που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους, το μόνο που μένει, πλέον, για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης και την επίλυση του μοντέλου, είναι να οριστούν τα φορτία που επιβάλλονται στο μοντέλο. Λέγοντας φορτία εννοούνται επιβαλλόμενες δυνάμεις, περιστροφές, ροπές, ταχύτητες, πιέσεις κοκ.

Τα φορτία αυτά συνδέονται άμεσα με το φυσικό πρόβλημα που επιχειρεί να προσομοιώσει ένα μοντέλο. Έτσι, στη δική μας περίπτωση αυτά που έπρεπε να οριστούν στο συγκεκριμένο στάδιο ήταν:

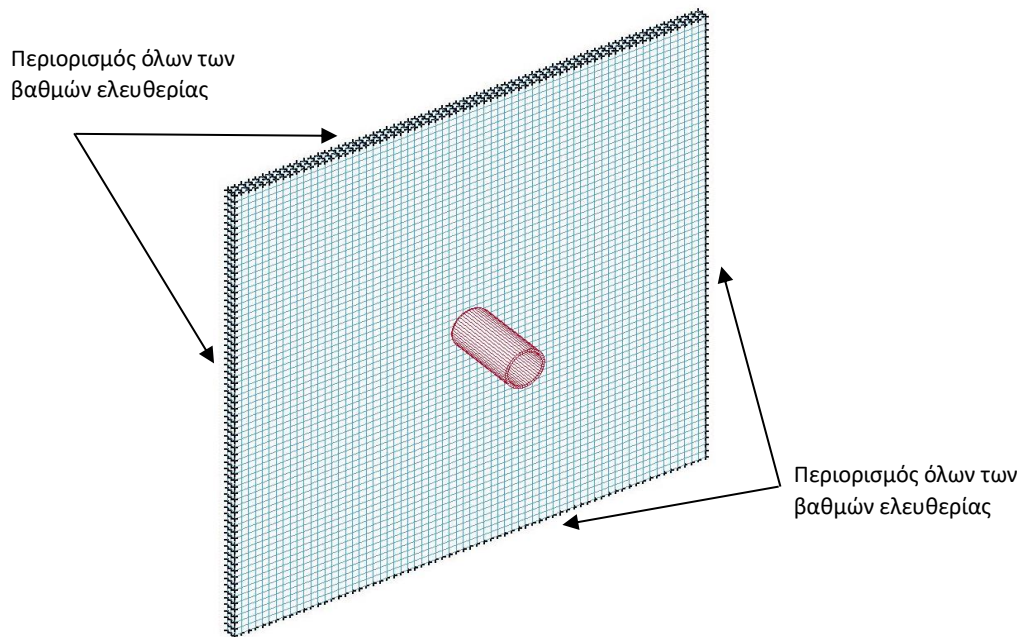
- η αρχική ταχύτητα του βλήματος
- η πάκτωση της πλάκας/δοκίμιο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην εργασία μας χρησιμοποιήθηκαν τόσο μοντέλα πλήρους γεωμετρίας όσο και μοντέλα γεωμετρίας 1/4, με αποτέλεσμα για τον ορισμό των ανωτέρω συνθηκών να εμφανίζονται διαφορές στην ακολουθούμενη διαδικασία. Οι διαφορές αυτές έχουν να κάνουν με τις επιπλέον συνοριακές συνθήκες που πρέπει να εφαρμοστούν στο μοντέλο γεωμετρίας 1/4, προκειμένου να οριστεί η συμμετρία.

#### 3.3.1 Προσδιορισμός φορτίων σε μοντέλο πλήρους γεωμετρίας

Στα μοντέλα πλήρους γεωμετρίας ο ορισμός της αρχικής ταχύτητας του βλήματος έγινε με την χρήση της εντολής \*INITIAL\_VELOCITY [92], όπου δόθηκε αρχική μεταφορική ταχύτητα στους κόμβους του βλήματος με διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της πλάκας, ενώ δεν επιβλήθηκε κανένας άλλος περιορισμός.

Στα μοντέλα πλήρους γεωμετρίας ο ορισμός της πάκτωσης της πλάκας έγινε μέσω της εντολής \*BOUNDARY\_SPC\_SET [92], με την οποία καταργήθηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας των επιφανειών που κείτονταν κατά το πάχος της εκάστοτε πλάκας (Σχήμα 3.14).

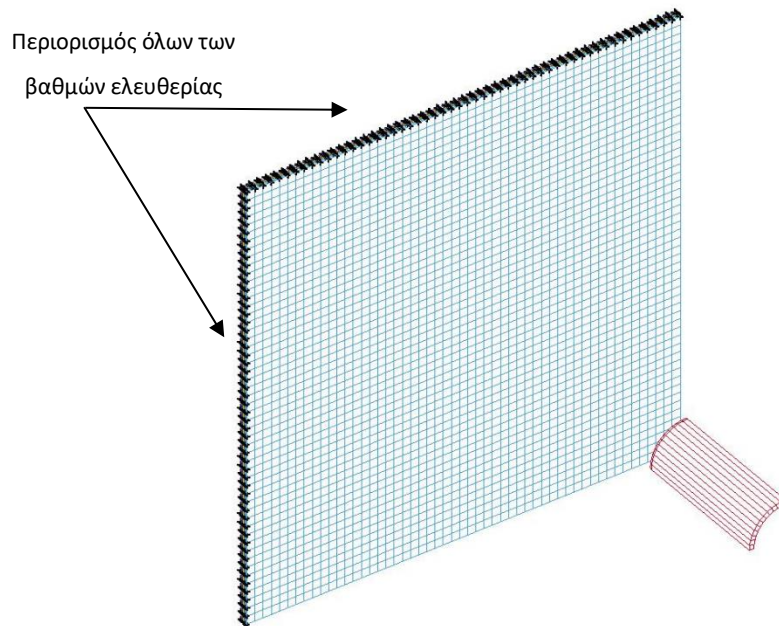


Σχήμα 3.14. Μοντελοποίηση πάκτωσης σε μοντέλο πλήρους γεωμετρίας.

### 3.3.2 Προσδιορισμός φορτίων σε μοντέλο γεωμετρίας 1/4

Στα μοντέλα γεωμετρίας 1/4 ο ορισμός της αρχικής ταχύτητας του βλήματος έγινε όπως και στην περίπτωση της πλήρους γεωμετρίας. Δηλαδή έγινε χρήση της εντολής `*INITIAL_VELOCITY` [92], όπου δόθηκε αρχική μεταφορική ταχύτητα στους κόμβους του βλήματος με διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της πλάκας. Ωστόσο, προκειμένου να οριστεί η συμμετρία του βλήματος, χρειάστηκε σε κάθε «κομμένη» επιφάνειά του να απαγορευτεί οποιαδήποτε κίνηση κάθετη στο επίπεδό της. Αυτό έγινε με χρήση της εντολής `*BOUNDARY_SPC_SET` [92].

Αντίστοιχα, στα μοντέλα γεωμετρίας 1/4 γεωμετρίας ο ορισμός της πάκτωσης της πλάκας έγινε μέσω της εντολής `*BOUNDARY_SPC_SET` [92], με την οποία καταργήθηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας των «μη κομμένων» επιφανειών που κείτονταν κατά το πάχος της εκάστοτε πλάκας (Σχήμα 3.15) και επιπλέον σε κάθε κομμένη επιφάνεια απαγορεύτηκε οποιαδήποτε κίνηση κάθετη στο επίπεδό της.



Σχήμα 3.15: Μοντελοποίηση πάκτωσης σε μοντέλο γεωμετρίας 1/4.

### 3.4 Θεωρητική ανάλυση παραμέτρων LS-DYNA

#### 3.4.1 Χρονικό βήμα (Time step)

Κατά τη διάρκεια μίας επίλυσης το λογισμικό LS-DYNA [91], [112] εκτελεί διαρκώς υπολογισμούς για τα στοιχεία (elements) του προβλήματος με σκοπό τον προσδιορισμό των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτά, καθώς και των τοπικών τους συντεταγμένων. Οι υπολογισμοί αυτοί εκτελούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το χρονικό βήμα (time step) που καθορίζει το πότε θα επαναληφθούν οι υπολογισμοί δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από το σύνολο των στοιχείων και κάθε φορά υπολογίζεται εκ νέου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε στοιχείο υπολογίζεται ένα κρίσιμο χρονικό βήμα και στη συνέχεια το μικρότερο όλων επιλέγεται για την επίλυση του προβλήματος, αφού πρώτα πολλαπλασιαστεί για λόγους σταθερότητας με έναν συντελεστή ασφαλείας  $a$ . Έτσι, αν ο τελευταίος υπολογισμός εκτελέστηκε τη χρονική στιγμή  $t^n$ , τότε το χρονικό διάστημα που θα μεσολαβήσει μέχρι τον επόμενο υπολογισμό τη χρονική στιγμή  $t^{n+1}$ , θα δίνεται από την σχέση:

$$\Delta t^{n+1} = a \cdot \min \{ \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N \} \quad (3.2)$$

όπου,  $\Delta t^{n+1}$  είναι το χρονικό βήμα για τη χρονική στιγμή  $t^{n+1}$

$N$  είναι ο αριθμός των στοιχείων του μοντέλου,

και  $a$  ο συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος είναι μικρότερος της μονάδας και κατά προεπιλογή του LS-DYNA ισούται με 0.90 (τιμή που χρησιμοποιήθηκε και κατά την εργασία μας).

Χρονικό βήμα για στερεά στοιχεία (solid elements)

Από την Σχέση 3.2 [91] γίνεται αντιληπτό ότι για να προσδιοριστεί το χρονικό βήμα του προβλήματος σε μία χρονική στιγμή, θα πρέπει να υπολογιστεί το χρονικό βήμα που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα στοιχεία του μοντέλου. Για τα στερεά στοιχεία (solid elements), όπως είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία μας, το χρονικό βήμα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{Q + \sqrt{Q^2 + c^2}} \quad (3.3)$$

όπου  $Q$  είναι μία συνάρτηση των συντελεστών του ιξώδους διόγκωσης (bulk viscosity)  $C_0$  και  $C_1$  :

$$Q = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}|, & \text{για } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0, & \text{για } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$L_e$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος κάθε στοιχείου το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{8-κομβικά στερεά στοιχεία:} \quad L_e = \frac{V_e}{A_{e,\max}} \quad (3.5)$$

$$\text{4-κομβικά τετράεδρα:} \quad L_e = \text{ελάχιστο ύψος} \quad (3.6)$$

όπου  $V_e$  είναι ο όγκος του στοιχείου,  $A_{e,\max}$  το εμβαδόν της μεγαλύτερης έδρας του στοιχείου και  $c$  η αδιαβατική ταχύτητα του ήχου, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$c = \left[ \frac{4G}{3\rho_0} + \frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s^{1/2} \quad (3.7)$$

όπου  $G$  το μέτρο διάτμησης,  $\rho$  η πυκνότητα και  $p$  η πίεση για την οποία ισχύει:

$$\left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_E + \left( \frac{\partial p}{\partial E} \right)_\rho + \left( \frac{\partial E}{\partial \rho} \right)_s \quad (3.8)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε μία ισηντροπική διεργασία η μεταβολή της ενέργειας,  $dE$ , ισούται με το γινόμενο της πίεσης,  $p$ , επί την μεταβολή του όγκου,  $dV$ , δηλαδή:

$$dE = -pdV \quad (3.9),$$

η Σχέση 3.7 γίνεται:

$$c = \left[ \frac{4G}{3\rho_0} + \frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_E + \left[ \frac{pV^2}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial E} \right]_\rho^{1/2} \quad (3.10)$$

Η Σχέση 3.10 για ελαστικά υλικά με σταθερό μέτρο διόγκωσης (bulk modulus) διαμορφώνεται ως εξής:

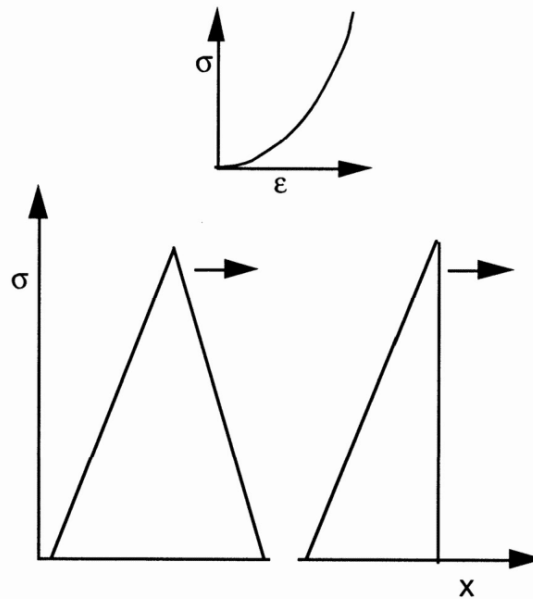
$$c = \left[ \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας και  $\nu$  ο συντελεστής Poisson.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι το κρίσιμο χρονικό βήμα (time step),  $\Delta t_e$ , κάθε στοιχείου εξαρτάται αφενός από το χαρακτηριστικό του μήκος,  $L_e$ , το οποίο σχετίζεται με την γεωμετρία του και αφετέρου από την ταχύτητα του ήχου,  $c$ , στο εσωτερικό του, η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού του στοιχείου (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας και συντελεστής Poisson).

### Ιξώδες Διόγκωσης (Bulk Viscosity)

Το ιξώδες διόγκωσης [91], το οποίο αναφέρθηκε στη Σχέση 3.4, χρησιμοποιείται από το λογισμικό LS-DYNA, προκειμένου να ληφθούν υπόψη κατά την επίλυση τα κρουστικά κύματα (shock waves). Η δημιουργία των κυμάτων αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται όταν αυξάνεται η πίεση στο μέσο διάδοσής του. Έτσι, είναι δυνατό η ομαλή εξάπλωση ενός κύματος πίεσης να γίνει σταδιακά αρκετά απότομη, σε σημείο μάλιστα που να παρατηρείται ασυνέχεια στο πεδίο πίεσης. Η απότομη αυτή χωρική μεταβολή στο πεδίο πίεσης καλείται κρουστικό κύμα και συνοδεύεται από απότομη μεταβολή και άλλων φυσικών μεγεθών όπως η πυκνότητα.



Σχήμα 3.16. Εάν η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τάση, το διαδιδόμενο στον άξονα  $-x$  κύμα πίεσης θα γίνει σταδιακά αρκετά απότομο μέχρι να σχηματίσει τελικά ένα κρουστικό κύμα. [91]

Στη προσομοίωση προβλημάτων με τη βοήθεια του LS-DYNA κύματα πίεσης δημιουργούνται κατά την αλληλεπίδραση των διάφορων σωμάτων. Ωστόσο, το ιξώδες διόγκωσης αφορά κυρίως τις μοντελοποιήσεις όπου έχουν χρησιμοποιηθεί στερεά (solid) στοιχεία, καθώς κατά κανόνα δεν παρατηρούνται ισχυρά κρουστικά κύματα σε κατασκευές μοντελοποιημένες με στοιχεία κελύφους (shell elements) ή στοιχεία δοκού (beam elements).

Όταν, σε ένα πρόβλημα δημιουργηθούν ισχυρά κρουστικά κύματα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση που έχουν στις πιέσεις που αναπτύσσονται σε ένα σώμα. Αυτό γίνεται με τη

βοήθεια του ιξώδους διόγκωσης,  $q$ , το οποίο προστίθεται στην πίεση τόσο στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής και όσο και στις εξισώσεις διατήρησης της ενέργειας. Για τον προσδιορισμό του ιξώδους ελαστικότητας,  $q$ , το LS-DYNA έχει υιοθετήσει ως προεπιλογή την σχέση που πρότεινε το 1955 ο Landshoff [122], στην οποία όμως η απόκλιση της ταχύτητας έχει αντικατασταθεί από τον ρυθμό παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}_{kk}$ :

$$q = \begin{cases} \rho l (C_0 l \dot{\epsilon}_{kk}^2 + C_1 a \dot{\epsilon}_{kk}) & , \text{για } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0 & , \text{για } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

όπου

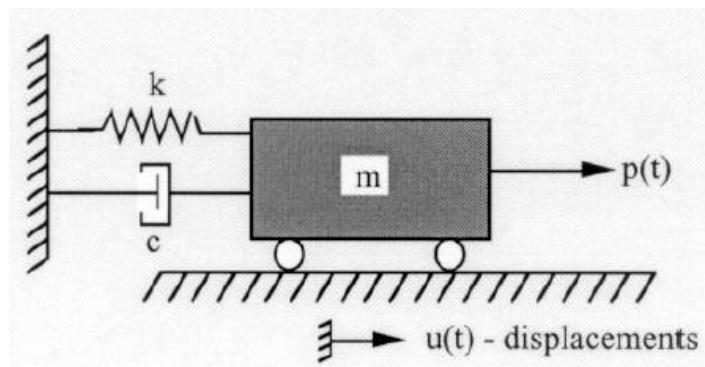
- $\rho$  η πυκνότητα
- $C_0$  και  $C_1$  αδιάστατες σταθερές, οι οποίες κατά προεπιλογή του LS-DYNA ισούνται με 1.5 και 0.6 αντίστοιχα
- $l$  χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου το οποίο για τα 2-Διάστατα (2D) στοιχεία υπολογίζεται από τη σχέση  $l = \sqrt{A}$  όπου  $A$  είναι το εμβαδό, ενώ για τα 3D στοιχεία υπολογίζεται από τη σχέση  $l = \sqrt[3]{V}$ , όπου  $V$  είναι ο όγκος του στοιχείου
- $a$  είναι η ταχύτητα του ήχου, η οποία υπολογίζεται από την σχέση  $a = \left( \frac{K}{\rho_0} \right)^{1/2}$ , όπου  $K$  είναι το μέτρο διόγκωσης (bulk modulus) και  $\rho_0$  η πυκνότητα.

### 3.4.2 Χρονική Ολοκλήρωση (Time Integration)

Η επίλυση κάθε προβλήματος δυναμικής ανάλυσης σε μοριακό επίπεδο βασίζεται στον αλγόριθμο χρονικής ολοκλήρωσης (time integration) [91], [112], ο οποίος απαιτείται για να ενσωματώσει την εξίσωση κίνησης των αλληλεπιδρώντων σωματιδίων και να μπορέσει ακολουθήσει την κίνησή τους. Οι αλγόριθμοι της χρονικής ολοκλήρωσης βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στη μέθοδο αυτή ο χρόνος διαχωρίζεται σε ένα πεπερασμένο πλέγμα, όπου το χρονικό βήμα  $\Delta t$  είναι ουσιαστικά η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων του πλέγματος. Γνωρίζοντας τις θέσεις στο πλέγμα και κάποια από τα παράγωγα του χρόνου για τη χρονική στιγμή  $t$ , η μέθοδος αυτή δίνει τις ίδιες ποσότητες σε μεταγενέστερο χρόνο.

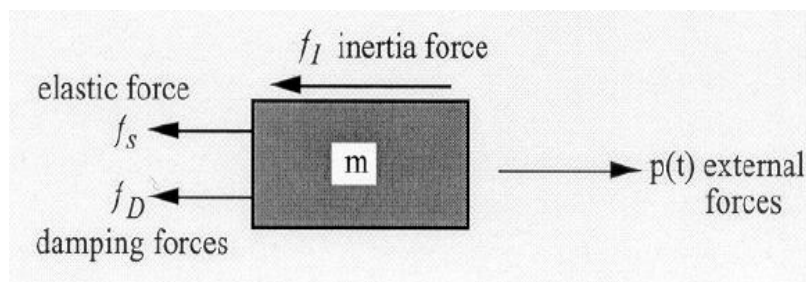
#### Εξίσωση Κίνησης

Το σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας με απόσβεση δίνεται από το σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.17. Σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας με απόσβεση[91].

Ενώ οι δυνάμεις που ασκούνται στη μάζα παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 3.18. Οι δυνάμεις που ασκούνται στη μάζα,  $m$  [91].

Οπότε η εξίσωση ισορροπίας δίνεται από τη σχέση:

$$f_I + f_D + f_{\text{int}} = p(t) \quad (3.13)$$

όπου:

$$\text{Δύναμη αδράνειας: } f_I = m\ddot{u}, \quad \ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2} \text{ (επιτάχυνση), } m \text{ (μάζα)} \quad (3.14)$$

$$\text{Δύναμη αποσβεστήρα: } f_D = c\dot{u}, \quad \dot{u} = \frac{du}{dt} \text{ (ταχύτητα), } c \text{ (συντελεστής απόσβεσης)} \quad (3.15)$$

$$\text{Δύναμη ελατηρίου: } f_{\text{int}} = ku, \quad u \text{ (μετατόπιση), } k \text{ (συντελεστής ακαμψίας)} \quad (3.16)$$

Οπότε η εξίσωση ισορροπίας (3.13) για γραμμική ελαστικότητα γίνεται:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (3.17)$$

Ενώ η εξίσωση ισορροπίας για μη γραμμική ελαστικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_{\text{int}}(u) = p(t) \quad (3.18)$$

όπου

$$p(t) = p_0 \sin \bar{\omega}t \quad (3.19)$$

Η δυναμική απόκριση ενός γραμμικού συστήματος χωρίς απόσβεση και με ασκούμενη αρμονική δύναμη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u(t) = \underbrace{u_0 \cos(\omega t) + \frac{\dot{u}_0}{\omega} \sin(\omega t)}_{\text{homogenous solution}} + \underbrace{\frac{p_0}{k} \frac{1}{1 - \beta^2} \sin(\bar{\omega}t)}_{\text{steady state}} - \underbrace{\beta \sin(\omega t)}_{\text{transient}} \quad (3.20)$$

όπου,

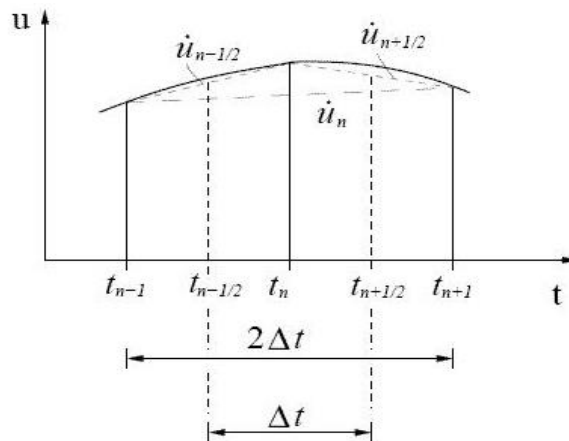
$u_0$  = αρχική μετατόπιση

$\dot{u}_0$  = αρχική ταχύτητα

Στα μη γραμμικά προβλήματα μόνο αριθμητικές λύσεις είναι δυνατές. Το λογισμικό LS-DYNA χρησιμοποιεί τη μέθοδο των κεντρικών διαφορών για να ολοκληρώσει τις εξισώσεις κίνησης.

### Μέθοδος Κεντρικών Διαφορών

Η διαδικασία της διακριτοποίησης παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.19. Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας διακριτοποίησης [112].

Με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών προκύπτουν οι σχέσεις:

Για την ταχύτητα:

$$\dot{u}_n = \frac{1}{\Delta t} (u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (3.21)$$

Για την επιτάχυνση: 
$$\ddot{u}_n = \frac{1}{(\Delta t)^2} (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (3.22)$$

Επίσης η εξίσωση ισορροπίας τη χρονική στιγμή  $t_n$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$M\ddot{u}_n + C\dot{u}_n + Ku_n = P_n \quad (3.23)$$

Με αντικατάσταση των Σχέσεων 3.21 και 3.22 στη Σχέση 3.23, προκύπτει:

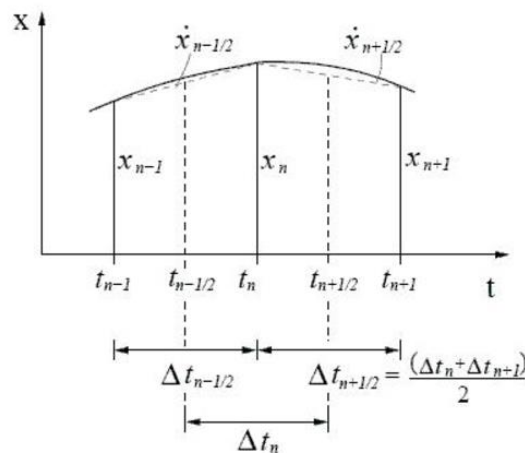
$$(M + \frac{1}{2} \Delta t C)u_{n+1} = \Delta t^2 P_n - (\Delta t^2 K - 2M)u_n - (M - \frac{\Delta t}{2} C)u_{n-1} \quad (3.24)$$

Για  $t=0$  είναι γνωστά τα μεγέθη της αρχικής μετατόπισης  $u_0$  και της αρχικής ταχύτητας  $\dot{u}_0$ . Έτσι υπολογίζεται η αρχική επιτάχυνση  $\ddot{u}_0$ . Από τις εξισώσεις (3.21) και (3.22) προκύπτει:

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_0 \quad (3.25)$$

έτσι ώστε να ξεκινήσει η ολοκλήρωση.

Η διακριτοποίηση στο λογισμικό LS-DYNA πραγματοποιείται με χρήση των συντεταγμένων  $x$  αντί της μετατόπιση. Έτσι το  $u$  αντικαθίσταται από το  $x$ .



Σχήμα 3.20. Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας διακριτοποίησης που ακολουθείται από το LS-DYNA [112].

### Ευστάθεια του σχήματος Κεντρικών Διαφορών

Οι εξισώσεις κίνησης σε ιδιομορφικές συντεταγμένες  $x$  δίνονται από την εξίσωση:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = \varphi^T p \quad (3.26)$$

Από τη μέθοδο των κεντρικών διαφορών προκύπτει:

$$\dot{x}_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{2\Delta t} \quad (3.27)$$

και

$$\ddot{x}_n = \frac{x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}}{\Delta t^2} \quad (3.28)$$

Με αντικατάσταση των Σχέσεων 3.27 και 3.28 στην εξίσωση της κίνησης τη χρονική στιγμή  $t^n$  προκύπτει:

$$x_{n+1} = \frac{2 - \omega^2 \Delta t^2}{1 + 2\xi\omega\Delta t} x_n - \frac{1 - 2\xi\omega\Delta t}{1 + 2\xi\omega\Delta t} x_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{1 + 2\xi\omega\Delta t} Y_n \quad (3.29)$$

$$x_n = x_n \quad (3.30)$$

Σε μορφή μητρώων οι παραπάνω σχέσεις παρουσιάζουν τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2 - \omega^2 \Delta t^2}{1 + 2\xi\omega\Delta t} & -\frac{1 - 2\xi\omega\Delta t}{1 + 2\xi\omega\Delta t} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{1 + 2\xi\omega\Delta t} \\ 0 \end{bmatrix} Y_n \quad (3.31)$$

ή διαφορετικά

$$\hat{x}_{n+1} = A\hat{x}_n + LY_n \quad (3.32)$$

όπου A το μητρώο που δημιουργεί τη ολοκλήρωση του χρόνου.

Μετά από m χρονικά βήματα και για L=0, προκύπτει:

$$\hat{x}_m = A^m \hat{x}_0 \quad (3.33)$$

Επίσης το μητρώο A μπορεί να γραφεί και ως:

$$A^m = (P^T J P)^m = P^T J^m P \quad (3.34)$$

όπου

P το ορθοκανονικό μητρώο που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα του μητρώου A

J το μητρώο σε μορφή Jordan που οι ιδιοτιμές του μητρώου A βρίσκονται στη διαγώνιό του

Το μητρώο  $J^m$  πρέπει να είναι φραγμένο και αυτό ισχύει όταν για τη μεγαλύτερη ιδιοτιμή του μητρώου A ( $\rho(A)$ ) ισχύει:

$$|\rho(A)| \leq 1 \quad (3.35)$$

Οι ιδιοτιμές του μητρώου A υπολογίζονται από την σχέση που ακολουθεί:

$$\begin{aligned} \text{Det} \left( \begin{vmatrix} 2 - \omega^2 \Delta t^2 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} - \lambda \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \right) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \lambda &= \frac{2 - \omega^2 \Delta t^2}{2} \pm \sqrt{\frac{(2 - \omega^2 \Delta t^2)^2}{4} - 1} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Το  $|\lambda| \leq 1$ , δίνει κρίσιμο χρονικό βήμα:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (3.37)$$

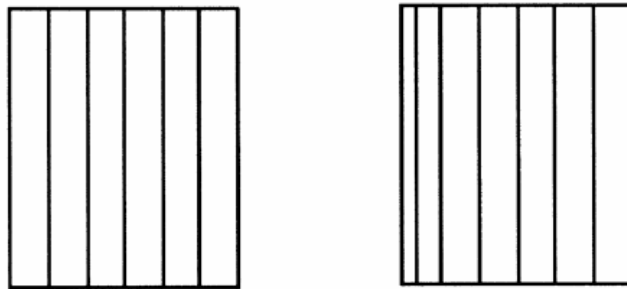
Για αποσβενόμενη εξίσωση κίνησης ισχύει:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi) \quad (3.38)$$

Η Σχέση 3.38 αποδεικνύει ότι το κρίσιμο χρονικό βήμα ελαττώνεται για κίνηση χωρίς απόσβεση.

### Subcycling (Mixed Time Integration)

Κατά τη διαδικασία της χρονικής ολοκλήρωσης [91] το μέγεθος του χρονικού βήματος  $\Delta t$ , περιορίζεται πάντα από ένα συγκεκριμένο στοιχείο του πεπερασμένου πλέγματος. Η ιδέα πάνω στην οποία στηρίζεται το Subcycling είναι η κατηγοριοποίηση και η ομαδοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, βάση του μεγέθους του χρονικού τους βήματος, σε ομάδες στοιχείων των οποίων το χρονικό βήμα είναι πολλαπλάσιο του μικρότερου χρονικού βήματος,  $2^{(n-1)} \Delta t$ , όπου  $n$  ακέραιος αριθμός ίσος ή μεγαλύτερος του ένα. Στόχος της μεθόδου αυτής είναι ο περιορισμός του υπολογιστικού κόστους κατά την ανάλυση μιας διαμόρφωσης.



Σχήμα 3.21. Σχηματική απεικόνιση δύο διαφορετικών διακριτοποιήσεων στις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος Subcycling [91].

Στο παραπάνω Σχήμα 3.21 η δεξιά διακριτοποίηση έχει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με την αριστερή λόγω της λεπτής στήλης.

Στο λογισμικό LS-DYNA η μέθοδος Subcycling βασίζεται στον αλγόριθμο γραμμικής επικόμβιας παρεμβολής που έχει προταθεί από τους Belytschko, Yen και Mullen.

Στη μέθοδο αυτή ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Δίνεται σε κάθε κόμβο  $i$  ένα μέγεθος χρονικού βήματος  $\Delta t_i$ , σύμφωνα με:

$$\Delta t_i = \min\left(\frac{2}{\omega_j}\right) \text{ για όλα τα στοιχεία } j \text{ του συνδέοντα με τον κόμβο } i.$$

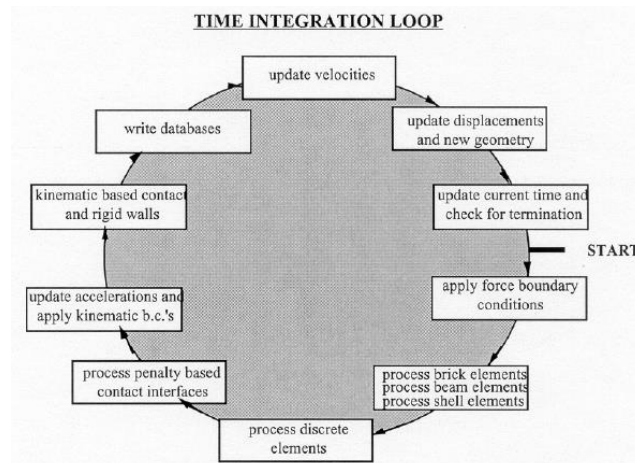
2. Δίνεται σε κάθε κόμβο  $j$  ένα μέγεθος χρονικού βήματος  $\Delta t_j$ , σύμφωνα με:

$$\Delta t_j = \min(\Delta t_i) \text{ για όλους τους κόμβους } i \text{ του στοιχείου } j.$$

3. Ομαδοποίηση όλων των στοιχείων κατά μέγεθος χρονικού βήματος για διανυσματοποίηση (vectorization).

Το πρόβλημα όλων των μεθόδων Subcycling συναντάται στη σύνδεση των στοιχείων με διαφορετικά μεγέθη χρονικού βήματος.

Στο Σχήμα 3.22 που ακολουθεί παρουσιάζεται γραφικά η διαδικασία της χρονικής ολοκλήρωσης που ακολουθείται από το λογισμικό LS-DYNA.



Σχήμα 3.22. Σχηματική απεικόνιση του επαναληπτικού βρόγχου της μεθόδου της χρονικής ολοκλήρωσης που ακολουθείται από το LS-DYNA. [91]

## 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Γενικά

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προβλέψει τη συμπεριφορά σε βαλλιστική κρούση τόσο πλακών GLARE όσο και πλακών μονολιθικού αλουμινίου, μέσω της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ο πιο έγκυρος τρόπος για να ελεγχθεί η εγκυρότητα των μοντέλων που δημιουργήθηκαν είναι η σύγκρισή τους με τυχόν πειραματικά. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης για την βαλλιστική καταπόνηση των πλακών GLARE προσομοιώθηκαν οι συνθήκες και η πειραματική διαδικασία που εφαρμόστηκε από τους Hoo Fatt et al. [38]. Στην υπόψη μελέτη εκτελέστηκαν πειράματα τόσο σε πλάκες GLARE 5 όσο και σε πλάκες μονολιθικού αλουμινίου με σκοπό να προσδιοριστεί το βαλλιστικό τους όριο. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη μας μπορούμε να πούμε ότι συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό.

Συγκεκριμένα, οι διαμορφώσεις πλακών GLARE και πλακών αλουμινίου που μελετήθηκαν από τους Hoo Fatt et al. [38] και μοντελοποιήθηκαν κατά την εργασία μας είναι οι εξής:

- GLARE 5-3/2-0.508 συνολικού πάχους 0.1in (2.54mm)
- GLARE 5-3/2-0.3048 συνολικού πάχους 0.076in (1.93mm)
- GLARE 5-2/1-0.508 συνολικού πάχους 0.06in (1.53mm)
- Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 3.2mm (0.125in)
- Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 1.6mm (0.063in)

Οι ανωτέρω πλάκες GLARE, με εξαίρεση την πλάκα συνολικού πάχους 0.076in, διαθέτουν στρώσεις αλουμινίου 2024-T3, αλλά και πολυστρωματικές στρώσεις σύνθετου υλικού S2-glass/epoxy πάχους 0.508mm (0.2in). Στην δεύτερη πλάκα GLARE (συνολικού πάχους 0.076in) οι πολυστρωματικές στρώσεις σύνθετου υλικού έχουν το ίδιο πάχος, δηλ. 0.508mm, αλλά οι στρώσεις αλουμινίου έχουν πάχος 0.305mm (0.12in). Κάθε πολυστρωματική στρώση σύνθετου υλικού αποτελείται από τέσσερις (4) μονοκατευθυντήριες στρώσεις σύνθετου υλικού πάχους 0.127mm η καθεμία, οι οποίες στοιβάζονται η μία πάνω στην άλλη με την εξής σειρά:  $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ . Οι διαμορφώσεις των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Υλικό	Διαμόρφωση	Πάχος στρώσης Al (mm)	Συνολικό πάχος πλάκας
GLARE 5-3/2-0.508	Al/[0°/90°/90°/0°]/Al/[0°/90°/90°/0°]/Al	0.508	0.1in (2.54mm)
GLARE 5-3/2-0.3048	Al/[0°/90°/90°/0°]/Al/[0°/90°/90°/0°]/Al	0.305	0.076in (1.93mm)
GLARE 5-2/1-0.508	Al/[0°/90°/90°/0°]/Al	0.508	0.06in (1.53mm)
Al plate 3.2mm	Al	3.2	3.2mm (0.125in)
Al plate 1.6mm	Al	1.6	1.6mm (0.063in)

Πίνακας 4.1. Διαμόρφωση πλακών GLARE 5 και πλακών μονολιθικού αλουμινίου.

## 4.2 Μοντελοποίηση πλακών

### 4.2.1 Μοντελοποίηση GLARE πάχους 0.1in

Η μοντελοποίηση της πλάκας GLARE 5-3/2-0.508 συνολικού πάχους 0.1in (2.54mm) έγινε σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Έτσι, κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάρναβο και ένα με πυκνό κάρναβο, που διαθέτει τα διπλάσια σε αριθμό στοιχεία. Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS/LS-DYNA συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) για τους δύο κάρναβους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	78750	151	9.04
Αραιός	39326	166	-

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 0.1in.

### 4.2.2 Μοντελοποίηση GLARE πάχους 0.076in

Αντίστοιχα, η μοντελοποίηση της πλάκας GLARE 5-3/2-0.3048 συνολικού πάχους 0.076in (1.93mm) έγινε σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Έτσι, κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάρναβο και ένα με πυκνό κάρναβο, που διαθέτει τα διπλάσια σε αριθμό στοιχεία. Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS/LS-DYNA συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) για τους δύο κάρναβους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	62846	145	9.94
Αραιός	32256	161	-

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 0.076in.

### 4.2.3 Μοντελοποίηση GLARE πάχους 0.06in

Παρομοίως, η μοντελοποίηση της πλάκας GLARE 5-3/2-0.508 συνολικού πάχους 0.06in (1.53mm) έγινε σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Έτσι, κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάρναβο και ένα με πυκνό κάρναβο, που διαθέτει τα διπλάσια σε αριθμό στοιχεία. Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS/LS-DYNA συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) για τους δύο κάρναβους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Κάναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάναβο (%)
Πυκνός	33750	132	8.97
Αραιός	16854	145	-

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάναβο πλάκας GLARE 0.06in.

#### 4.2.4 Μοντελοποίηση πλάκας Al 2024-T3 πάχους 3.2mm

Όμοια, η μοντελοποίηση της πλάκας Al 2024-T3 πάχους 3.2mm έγινε σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Έτσι, κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάναβο και ένα με πυκνό κάναβο, που διαθέτει τα διπλάσια σε αριθμό στοιχεία. Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS/LS-DYNA συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) για τους δύο κάναβους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Κάναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάναβο (%)
Πυκνός	18050	191	3.54
Αραιός	9248	198	-

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάναβο πλάκας Al 3.2mm.

#### 4.2.5 Μοντελοποίηση πλάκας Al 2024-T3 πάχους 1.6mm

Όμοια, η μοντελοποίηση της πλάκας Al 2024-T3 πάχους 3.2mm έγινε σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Έτσι, κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάναβο και ένα με πυκνό κάναβο, που διαθέτει τα διπλάσια σε αριθμό στοιχεία. Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS/LS-DYNA συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) για τους δύο κάναβους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Κάναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάναβο (%)
Πυκνός	72962	131	9.03
Αραιός	36450	144	-

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάναβο πλάκας Al 1.6mm.

### 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων και μοντελοποίησης ANSYS/LS-DYNA

Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της μελέτης των Hoo Fatt et al. [38] και αυτών που προέκυψαν κατά την εργασία μας από την αριθμητική προσομοίωση με τη χρήση της πλατφόρμας ANSYS/LS-DYNA επικεντρώθηκε στη σύγκριση των βαλλιστικών ορίων για όλα τα υλικά της §4.2. Επίσης, έγινε μία τυπική σύγκριση των διαγραμμάτων μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ), ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ) και φορτίου επαφής-χρόνου ( $P-t$ ), που προέκυψαν από την αναλυτική φόρμουλα που αναπτύχθηκε στην μελέτη [38] και αυτών που προέκυψαν κατά την μοντελοποίηση στο ANSYS/LS-DYNA. Τέλος, επιχειρήθηκε μία οπτική σύγκριση μέσω εικόνων που καταγράφηκαν κατά τα πειράματα των Hoo Fatt et al. [38], αλλά και των Zarei et al. [113] και αυτών που καταγράφηκαν κατά την μοντελοποίησή μας. Σημειώνεται ότι στις εν λόγω συγκρίσεις χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα των πυκνών καννάβων, καθώς θεωρείται ότι αποδίδουν πιο ακριβείς λύσεις σε σχέση με αυτά των αραιών.

#### 4.3.1 Σύγκριση βαλλιστικών ορίων

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Hoo Fatt et al. [38], καθώς και αυτά που προέκυψαν από την μοντελοποίηση που εκτελέστηκε στην παρούσα εργασία με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.7.

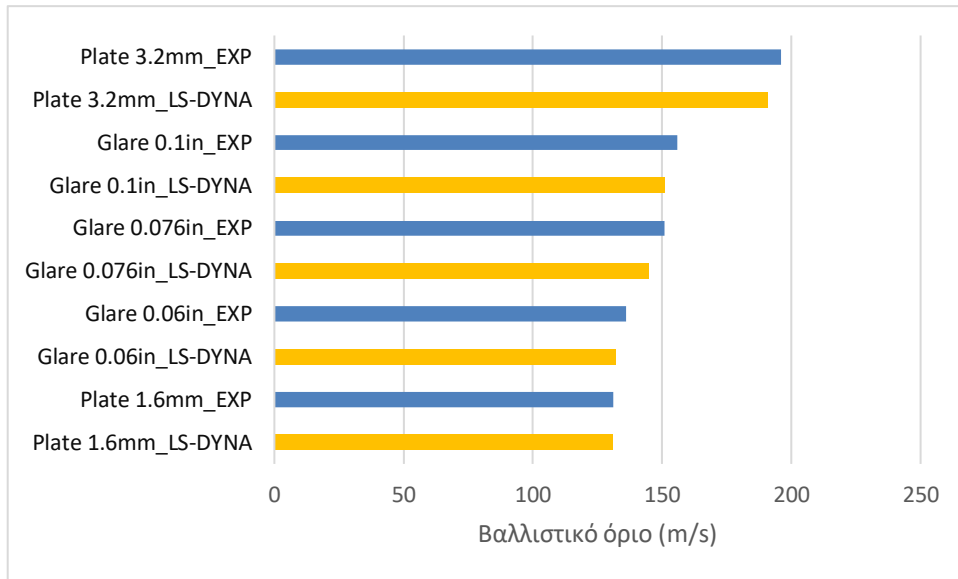
Όπως είναι εμφανές η σύγκλιση των αποτελεσμάτων είναι παραπάνω από ικανοποιητική. Όλα τα μοντέλα εμφανίζουν βαλλιστικά όρια που αποκλίνουν λιγότερο από 4% από τα αντίστοιχα πειραματικά. Μάλιστα, στη περίπτωση της πλάκας μονολιθικού αλουμινίου πάχους 1.6mm, τα δύο αποτελέσματα ταυτίζονται πλήρως. Χαρακτηριστικό είναι, επίσης, ότι τα βαλλιστικά όρια των προσομοιώσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις ελαφρώς χαμηλότερα από εκείνα των πειραμάτων.

Υλικό	Πάχος πλάκας (mm)	Πειραματικό βαλλιστικό όριο [38] (m/s)	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Απόκλιση (%)
GLARE 5-3/2-0.508	2.54	156	151	3.21
GLARE 5-3/2-0.3048	1.93	151	145	3.97
GLARE 5-2/1-0.508	1.53	136	132	2.94
Al plate 1.6mm	1.60	131	131	0.00
Al plate 3.2mm	3.20	196	191	2.55

Πίνακας 4.7. Βαλλιστικά όρια πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων μοντελοποίησης.

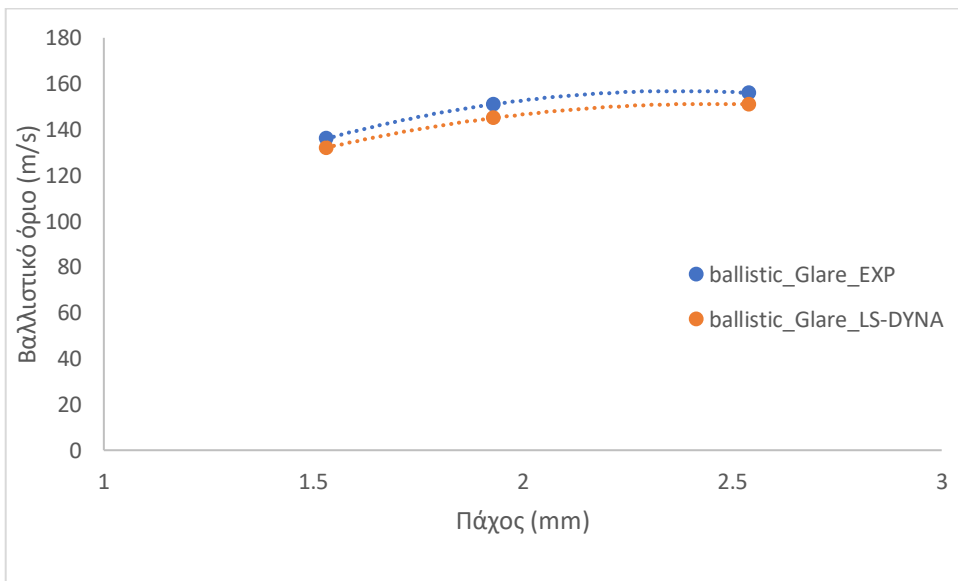
Επιπλέον, παρατηρείται ότι αν ταξινομηθούν τα υπό μελέτη υλικά με φθίνουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό τους όριο, τότε και για την περίπτωση των πειραμάτων αλλά και για την περίπτωση της μοντελοποίησης, προκύπτει η ίδια ακριβώς σειρά (Σχήμα 4.1):

- Al plate 3.2mm
- GLARE 0.1in
- GLARE 0.076in
- GLARE 0.06in.
- Al plate 1.6mm

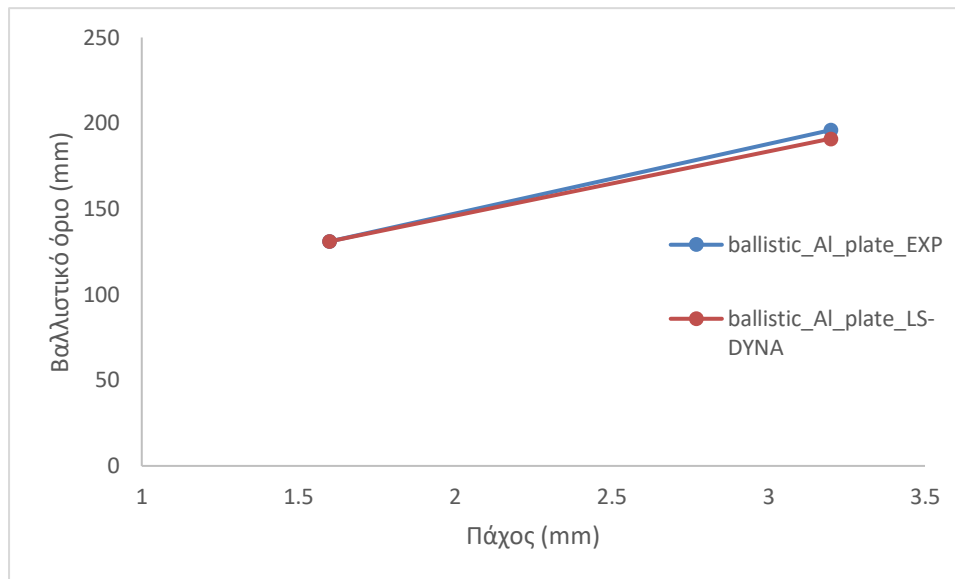


Σχήμα 4.1. Ταξινόμηση υλικών κατά φθίνουσα σειρά βαλλιστικού ορίου.

Επίσης, αναπαριστώντας τα βαλλιστικά όρια σε συνάρτηση με το συνολικό πάχος πλάκας (είτε GLARE είτε μονολιθικού αλουμινίου) προκύπτουν ίδιας μορφής καμπύλες τόσο για τα πειραματικά αποτελέσματα όσο και για αυτά της αριθμητικής προσομοίωσης. (Διάγραμμα 4.1 και Διάγραμμα 4.2)



Διάγραμμα 4.1. Βαλλιστικό όριο συναρτήσει του πάχους πλάκας GLARE 5.

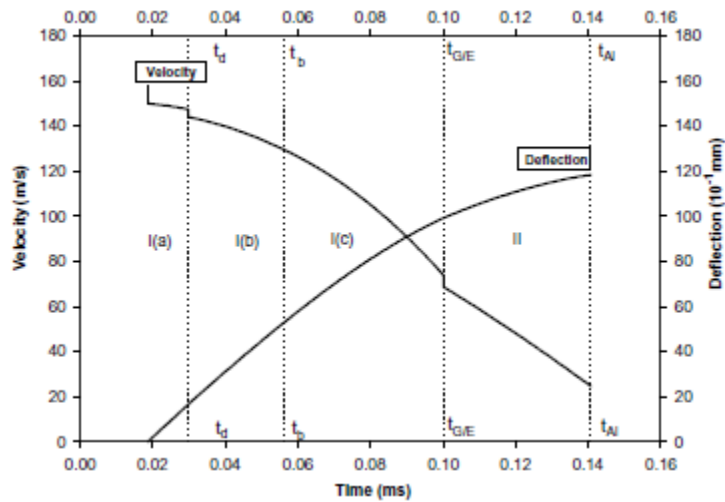


Διάγραμμα 4.2. Βαλλιστικό όριο συναρτήσεως του πάχους πλάκας αλουμινίου.

#### 4.3.2 Σύγκριση διαγραμμάτων μοντελοποίησης ANSYS/LS-DYNA και μονοβάθμιου συστήματος μάζας-ελατηρίου των Hoo Fatt et al. [38]

Οι Hoo Fatt et al. [38] ανέπτυξαν στη μελέτη τους ένα αναλυτικό μοντέλο για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς του GLARE σε βαλλιστική κρούση. Για την ανάπτυξη του μοντέλου αυτού θεωρήθηκε ότι η κινητική ενέργεια του βλήματος δαπανάται σε ενέργεια παραμόρφωσης και πλαστικό έργο κατά την κάμψη της πλάκας και την τάνυση μεμβράνης (membrane stretching), σε ενέργεια αποχωρισμού μεταξύ διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού (delamination), σε ενέργεια αποχωρισμού μεταξύ στρώσης αλουμινίου και στρώσης σύνθετου υλικού (debonding), σε ενέργεια θραύσης των στρώσεων σύνθετου υλικού και, τέλος, σε ενέργεια θραύσης των στρώσεων αλουμινίου. Στο μοντέλο αυτό η συμπεριφορά του GLARE χωρίστηκε σε δύο κύριες φάσεις. Η πρώτη φάση ξεκινάει τη στιγμή της κρούσης και τερματίζεται τη στιγμή που αστοχούν οι στρώσεις σύνθετου υλικού λόγω εφελκυστικής καταπόνησης. Τότε ξεκινάει η δεύτερη φάση, η οποία συνεχίζει μέχρι την θραύση των στρώσεων αλουμινίου, οπότε και θεωρείται ότι επέρχεται η διάτρηση.

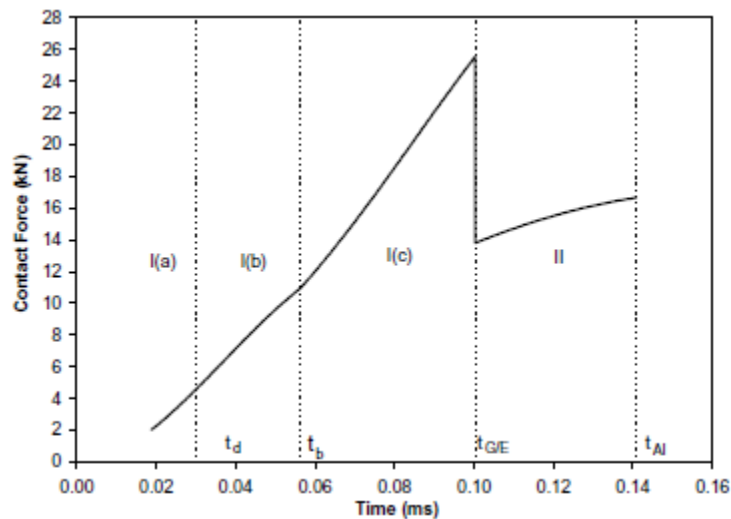
Οι Hoo Fatt et al. [38] βασιζόμενοι στο αναλυτικό τους μοντέλο και θεωρώντας ως αρχική ταχύτητα βλήματος την ταχύτητα βαλλιστικού ορίου, κατασκεύασαν για το GLARE πάχους 0.1in διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου (w-t), ταχύτητας-χρόνου (u-t) και φορτίου επαφής-χρόνου (P-t). (Διάγραμμα 4.3 και Διάγραμμα 4.4)



Διάγραμμα 4.3. Μετατόπιση και ταχύτητα βλήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. [38]

Στο Διάγραμμα 4.3, στη καμπύλη ταχύτητας-χρόνου (Velocity-Time) παρατηρούνται δύο σημεία στα οποία η ταχύτητα εμφανίζει απότομη πτώση ( $t=0.03\text{ms}$  και  $t=0.1\text{ms}$ ). Σύμφωνα με το μοντέλο των Hoo Fatt et al. [1] η πρώτη απότομη πτώση οφείλεται στον αποχωρισμό που λαμβάνει χώρα μεταξύ των στρώσεων σύνθετου υλικού, ενώ η δεύτερη οφείλεται στη θραύση των στρώσεων του σύνθετου υλικού. Τέλος, η διάτρηση επέρχεται όταν αστοχήσουν οι στρώσεις αλουμινίου. Η καμπύλη αυτή εμφανίζει, γενικά, κοίλη κυρτότητα.

Στο Διάγραμμα 4.3, στη καμπύλη μετατόπισης-χρόνου (Deflection-Time) παρατηρείται μία ομαλή αύξηση της μετατόπισης χωρίς να παρουσιάζονται απότομες αυξομειώσεις στο μέγεθός της. Η καμπύλη αυτή εμφανίζει κοίλη κυρτότητα.

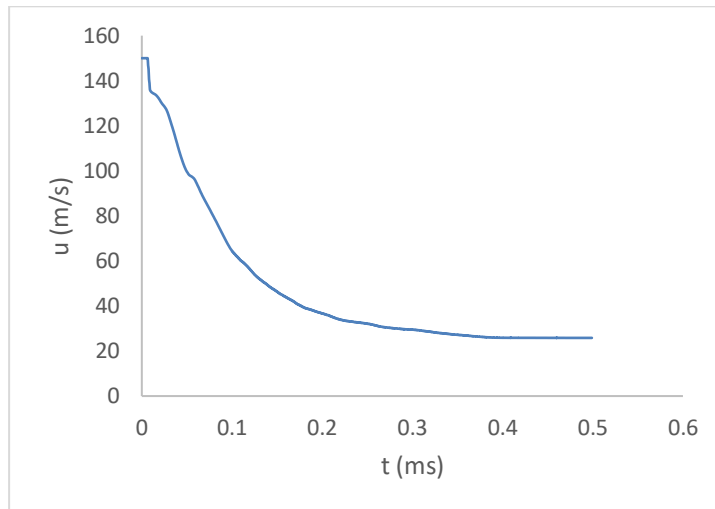


Διάγραμμα 4.4. Δύναμη επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο. [38]

Στο Διάγραμμα 4.4, στη καμπύλη δύναμης επαφής-χρόνου (Contact Force-Time) παρατηρείται μία ομαλή αύξηση της δύναμης μέχρι τη στιγμή που θραύονται οι στρώσεις σύνθετου υλικού, οπότε και η δύναμη εμφανίζει απότομη πτώση, ενώ ύστερα από τη στιγμή αυτή και μέχρι τη θραύση των στρώσεων αλουμινίου η δύναμη αυξάνεται ομαλά.

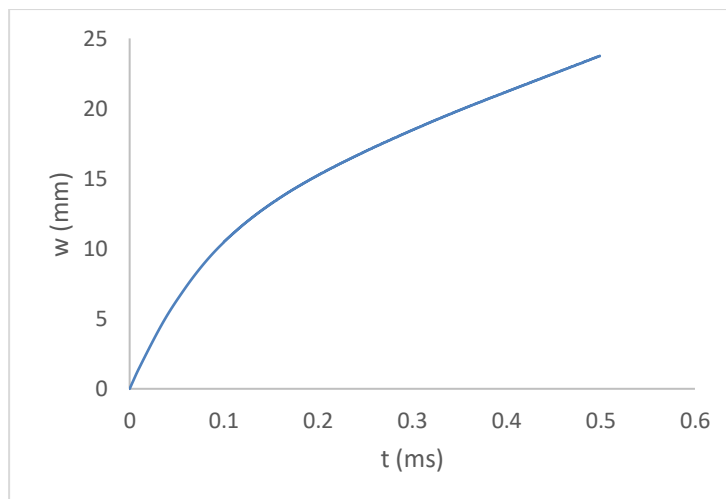
Το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA κατά τη διάρκεια της επίλυσης ενός δυναμικού προβλήματος δύναται να καταγράψει διάφορες πληροφορίες όπως μετατοπίσεις, επιταχύνσεις, ταχύτητες, τάσεις, παραμορφώσεις, ενέργειες κτλ.. Με αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατό να κατασκευάσουμε για το GLARE πάχους 0.1in αντίστοιχα διαγράμματα με αυτά που

κατασκεύασαν στην μελέτη τους οι Hoo Fatt et al. [38], τα οποία φαίνονται παρακάτω (Διάγραμμα 4.5, Διάγραμμα 4.6 και Διάγραμμα 4.7). Σημειώνεται ότι τα εν λόγω διαγράμματα αντιστοιχούν στη ταχύτητα βαλλιστικού ορίου, ήτοι 151m/s.



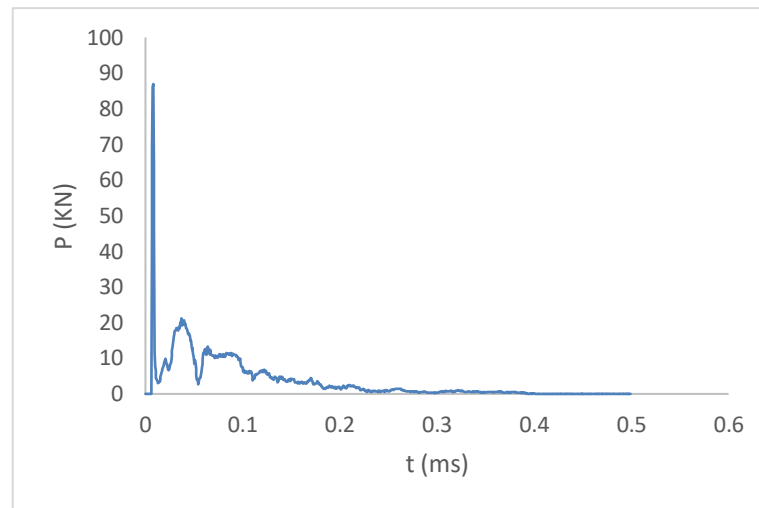
Διάγραμμα 4.5. Ταχύτητα βλήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Στο Διάγραμμα 4.5 απεικονίζεται η καμπύλη  $u-t$  (ταχύτητας βλήματος - χρόνου). Παρατηρείται ότι η ταχύτητα τη στιγμή της κρούσης εμφανίζει μία απότομη πτώση στο μέγεθός της, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η ταχύτητα μειώνεται ομαλά μέχρι την διάτρηση και την έξοδο του βλήματος από την πλάκα GLARE με σταθερή ταχύτητα. Η καμπύλη αυτή εμφανίζει, γενικά, κυρτή κυρτότητα.



Διάγραμμα 4.6. Μετατόπιση βλήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο.

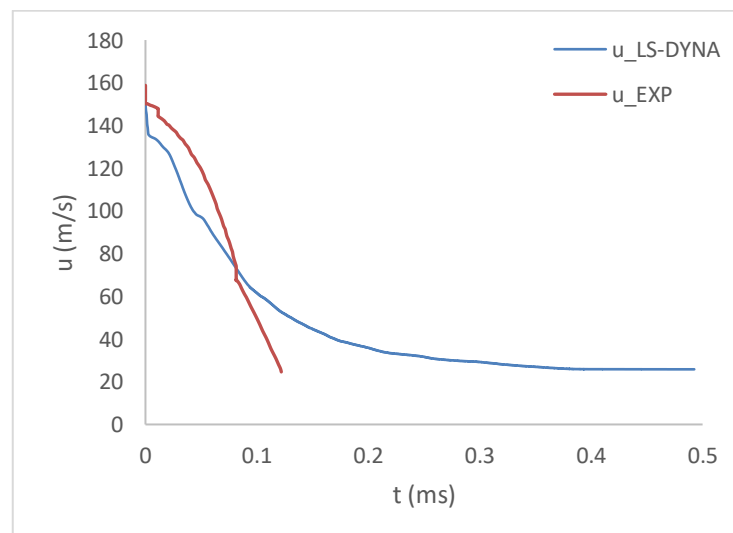
Στο Διάγραμμα 4.6, απεικονίζεται η καμπύλη  $w-t$  (μετατόπισης βλήματος-χρόνου). Παρατηρείται μία ομαλή αύξηση της μετατόπισης σε συνάρτηση με τον χρόνο χωρίς να παρουσιάζονται απότομες αυξομειώσεις στο μέγεθός της. Η καμπύλη αυτή εμφανίζει κοίλη κυρτότητα μέχρι τη στιγμή της διάτρησης, γεγονός που δείχνει ότι η ταχύτητα του βλήματος μειώνεται συνεχώς μέχρι τότε. Έπειτα από τη στιγμή αυτή, η κλίση της καμπύλης  $w-t$  γίνεται σταθερή, καθώς το βλήμα έχει πλέον διαπεράσει την πλάκα και κινείται με σταθερή ταχύτητα χωρίς να δέχεται κάποια αντίσταση.



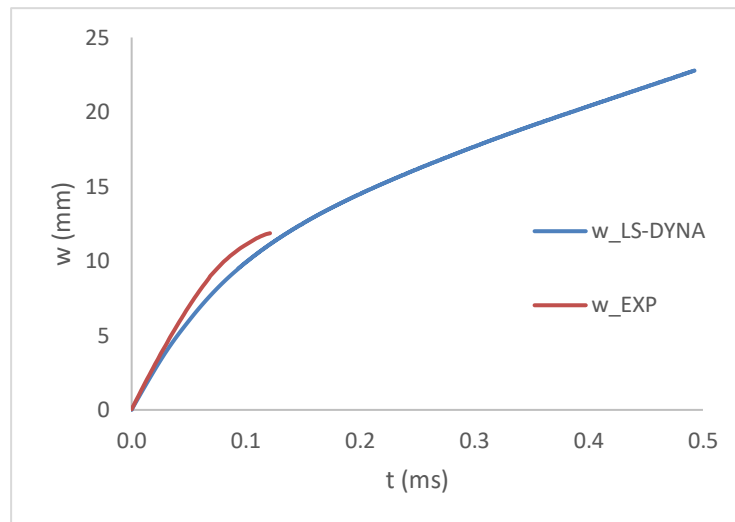
Διάγραμμα 4.7. Δύναμη που δέχεται το βλήμα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Στο Διάγραμμα 4.7, απεικονίζεται η καμπύλη P-t (δύναμης επαφής-χρόνου). Παρατηρείται μία αρκετά υψηλή τιμή φορτίου κατά την έναρξη της κρούσης, η οποία μειώνεται σχεδόν ακαριαία. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην γεωμετρία του βλήματος, το οποίο δεν είναι ένα συνηθισμένο βλήμα με αιχμηρό μετωπικό άκρο, αλλά διαθέτει μεγάλη και επίπεδη μετωπική επιφάνεια. Έπειτα, η καμπύλη P-t παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις σε συνάρτηση με τον χρόνο, οι οποίες σχετίζονται με τους αποχωρισμούς που λαμβάνουν χώρα τόσο μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού (delamination) όσο και μεταξύ στρώσεων αλουμινίου και στρώσεων σύνθετου υλικού (debonding), αλλά και με την θραύση των στρώσεων καθώς το βλήμα διαπερνάει την πλάκα GLARE. Αξίζει να σημειωθεί ότι αντίστοιχης μορφής διαγράμματα P-t έχουν προκύψει στις μελέτες [123] και [124], αλλά και στις πιο σύγχρονες [83] και [89].

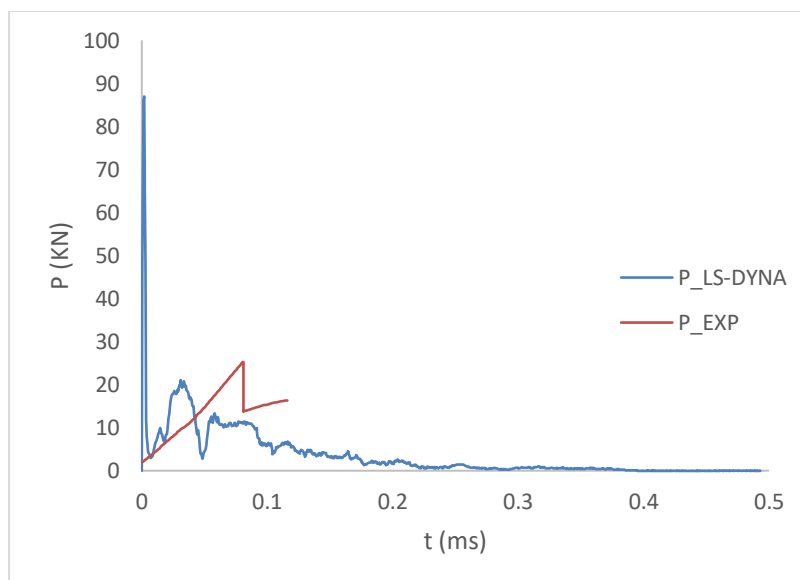
Για λόγους σύγκρισης οι καμπύλες που κατασκεύασαν οι Hoo Fatt et al. [38] και αυτές που κατασκευάστηκαν κατά την μοντελοποίησή μας στο ANSYS/LS-DYNA για το GLARE πάχους 0.1in, τοποθετήθηκαν σε κοινά διαγράμματα, τα οποία φαίνονται παρακάτω.



Διάγραμμα 4.8: Συγκριτικό διάγραμμα u-t.



Διάγραμμα 4.9. Συγκριτικό διάγραμμα  $w-t$ .

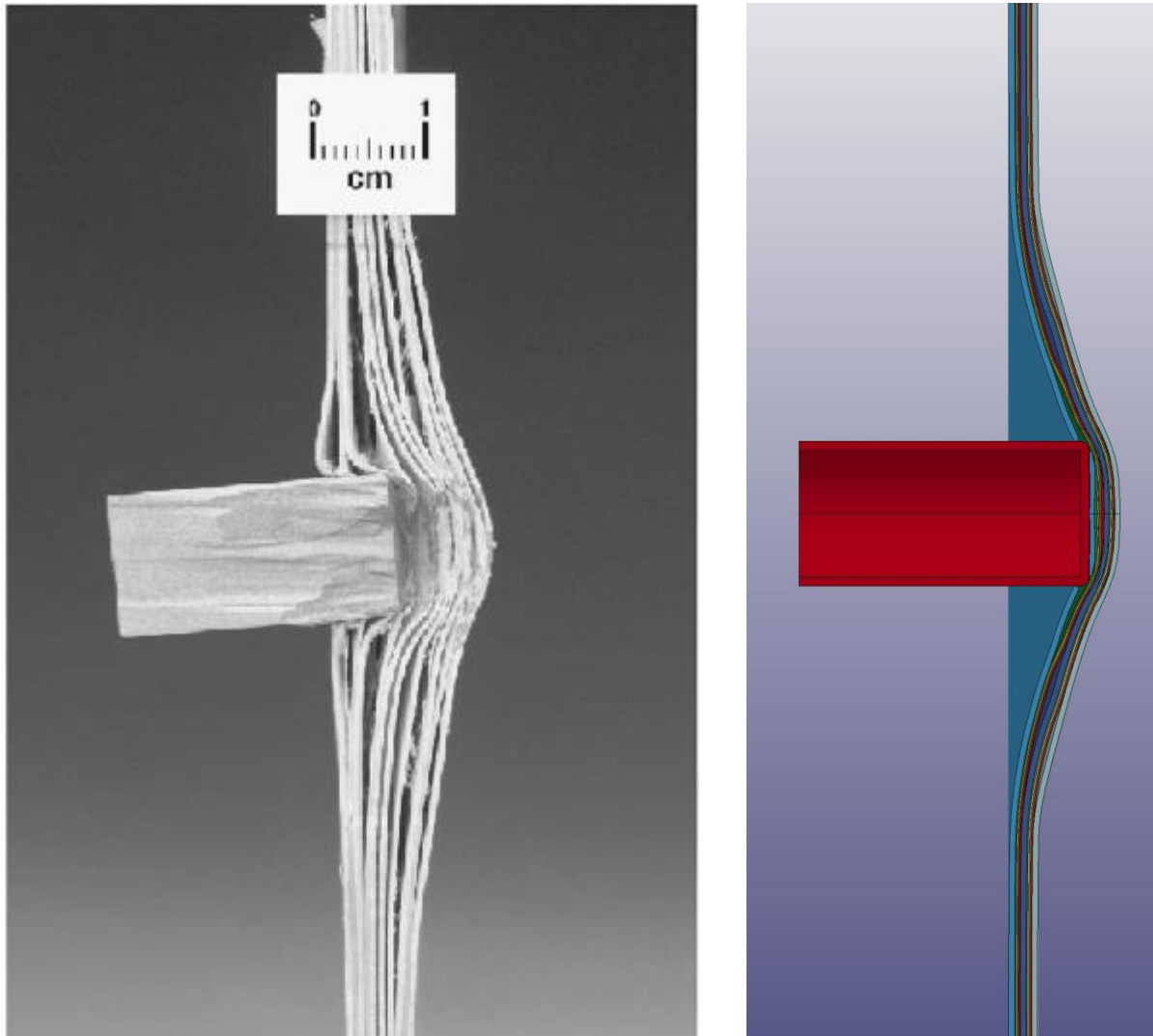


Διάγραμμα 4.10. Συγκριτικό διάγραμμα  $P-t$ .

Από τα ανωτέρω συγκριτικά διαγράμματα προκύπτει ότι οι καμπύλες  $w-t$  σχεδόν ταυτίζονται μέχρι τη χρονική στιγμή που επέρχεται η διάτρηση στο μοντέλο των Hoo Fatt et al. [38]. Επίσης, μεγάλη ομοιότητα παρουσιάζουν και οι καμπύλες  $u-t$ . Μεγάλη διαφορά εντοπίζεται στο διάγραμμα  $P-t$ , ωστόσο αν απαλείψουμε την απότομη αύξηση του φορτίου στη καμπύλη που προέκυψε από την μοντελοποίησή μας, τότε η διαφορά των δύο καμπυλών είναι μικρή. Επίσης, σημαντική διαφορά παρατηρείται και στην απαιτούμενη για διάτρηση χρονική διάρκεια. Συγκεκριμένα, οι Hoo Fatt et al. [38] υπολόγισαν αυτή την διάρκεια σε 0.14ms, ενώ από την μοντελοποίησή μας προκύπτει ότι είναι ίση με περίπου 0.3ms, ωστόσο η απόκλιση αυτή είναι πιθανό να οφείλεται στο ότι οι Hoo Fatt et al. [38] για να προσομοιώσουν τη δυναμική συμπεριφορά της πλάκας GLARE χρησιμοποίησαν στο μοντέλο τους ελαστικές σταθερές μεγαλύτερες κατά 50% σε σχέση με τις πραγματικές, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ακαμψία της και να διατρυπάται συντομότερα.

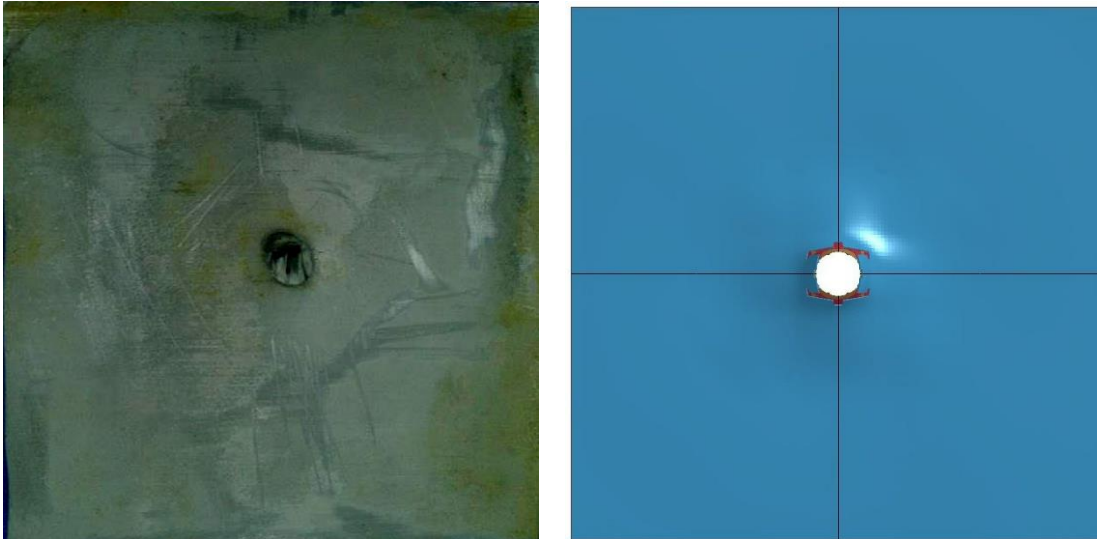
### 4.3.3 Οπτική σύγκριση

Οι Hoo Fatt et al. [38] έχουν συμπεριλάβει στην μελέτη τους μία φωτογραφία με την τομή ενός «διπλού» GLARE 0.1in, καθώς το διαπερνάει βλήμα. Λέγοντας «διπλό» GLARE 0.1in εννοείται ότι δύο πλάκες GLARE πάχους 0.1in η καθεμία έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους για να σχηματίσουν την εν λόγω δομή. Στην παρούσα εργασία δεν μελετήθηκε το εν λόγω GLARE, ωστόσο στιγμιότυπα που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης πλάκας GLARE πάχους 0.1in μέσω του ANSYS/LS-DYNA, παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με την εικόνα των πειραμάτων (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. Βλήμα διαπερνάει πλάκα «διπλού» GLARE 0.1in κατά τα πειράματα των Hoo Fatt et al. [38] (αριστερά) και βλήμα διαπερνάει πλάκα GLARE 0.1in κατά την μοντελοποίηση στο ANSYS/LS-DYNA (δεξιά).

Επίσης, η επιφάνεια θραύσης της πίσω πλευράς των GLARE 5, που μοντελοποιήθηκαν κατά την παρούσα εργασία σε περιβάλλον ANSYS/LS-DYNA παρουσιάζει την ίδια ακριβώς μορφή, με αυτήν που παρατηρήθηκε κατά τα πειράματα βαλλιστικής κρούσης, που εκτέλεσαν οι Zarei et al. [113] σε τετραγωνικές πλάκες GLARE 5 χρησιμοποιώντας βλήμα επίπεδης μετωπικής επιφάνειας (flat impactor), παρόμοιας δηλαδή γεωμετρίας με το βλήμα που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη μας. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες.



Σχήμα 4.3. Επιφάνεια θραύσης πλάκας GLARE 5 πειραμάτων Zarei et al. [113] (αριστερά) και επιφάνεια θραύσης πλάκας GLARE 5 κατά την μοντελοποίηση στο ANSYS/LS-DYNA (δεξιά).

## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ GLARE ΙΣΟΥ ΠΑΧΟΥΣ

### 5.1 Γενικά

Με αφορμή την ελάχιστη απόκλιση που παρατηρήθηκε μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών που προέκυψαν από την ανάλυσή μας για τις διαμορφώσεις GLARE του προηγούμενου Κεφαλαίου 4, αποφασίστηκε να μελετηθεί η συμπεριφορά κάποιων διαμορφώσεων GLARE για τα οποία δεν υπάρχουν αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Οι πλάκες GLARE που μοντελοποιήθηκαν είναι ίδιου συνολικού πάχους, το οποίο είναι ίσο με 2mm και διαθέτουν στρώσεις αλουμινίου κράματος 2024-T3. Οι στρώσεις σύνθετου υλικού είναι μονοκατευθυντήριες στρώσεις S2-glass/epoxy πάχους 0.125mm, οι οποίες στοιβάζονται σε προσανατολισμούς 0° και 90° με διαφορετική αλληλουχία κάθε φορά. Επιπλέον, στην μελέτη συμπεριλήφθηκε και μία πλάκα μονολιθικού αλουμινίου ίδιου πάχους.

Αναλυτικότερα, οι διαμορφώσεις πλακών GLARE και πλακών αλουμινίου που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο είναι οι εξής:

- GLARE 2A-3/2-0.5
- GLARE 2A-4/3-0.31
- GLARE 3 3/2-0.5
- GLARE 4A-3/2-0.42
- GLARE 5-3/2-0.33
- GLARE 3-4/3-0.31
- GLARE 4A-4/3-0.22
- GLARE 5-2/1-0.75
- Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 2mm

Οι διαμορφώσεις των ανωτέρω υλικών φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Υλικό	Διαμόρφωση	Πάχος στρώσης Al (mm)	Πάχος πλάκας (mm)	Αριθμός στρώσεων
GLARE 2A-3/2-0.5	Al/[0°/0°]/Al/[0°/0°]/Al	0.50	2	7
GLARE 2A-4/3-0.31	Al/[0°/0°]/Al/[0°/0°]/Al/[0°/0°]/Al	0.31	2	10
GLARE 3 3/2-0.5	Al/[0°/90°]/Al/[90°/0°]/Al	0.50	2	7
GLARE 4A-3/2-0.42	Al/[0°/90°/0°]/Al/[0°/90°/0°]/Al	0.42	2	9
GLARE 5-3/2-0.33	Al/[0°/90°/90°/0°]/Al/[0°/90°/90°/0°]/Al	0.33	2	11
GLARE 3-4/3-0.31	Al/[0°/90°]/Al/[0°/90°]/Al/[90°/0°]/Al	0.31	2	10
GLARE 4A-4/3-0.22	Al/[0°/90°/0°]/Al/[0°/90°/0°]/Al/[0°/90°/0°]/Al	0.22	2	13
GLARE 5-2/1-0.75	Al/[0°/90°/90°/0°]/Al/[0°/90°/90°/0°]/Al	0.75	2	6
Al plate 2mm	Al	2.00	2	1

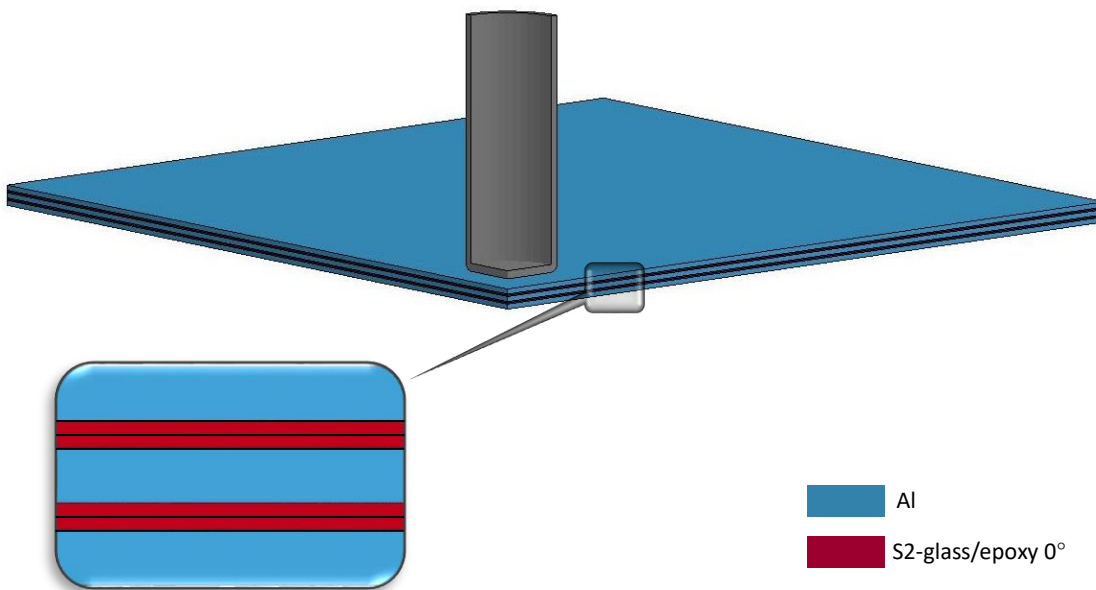
Πίνακας 5.1. Διαμόρφωση πλακών GLARE και πλακών μονολιθικού αλουμινίου.

## 5.2 Μοντελοποίηση πλακών - Αποτελέσματα

Η μοντελοποίηση των πλακών του Πίνακα 5.1 έγινε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Έτσι, για κάθε πλάκα κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάνναβο και ένα με πυκνό, προκειμένου να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων ως προς το βαλλιστικό όριο. Παράλληλα, έγινε έλεγχος ορθότητας της διακριτοποίησης και των επαφών (contacts) που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση μέσω των διαγραμμάτων των ενεργειών hourglass και sliding αντίστοιχα. Επιπλέον, με την βοήθεια των δεδομένων που καταγράφονται από το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA κατά την επίλυση, κατασκευάστηκαν διαγράμματα με σκοπό να μελετηθεί όσο το δυνατόν πληρέστερα η συμπεριφορά των εν λόγω πλακών σε βαλλιστική κρούση. Επισημαίνεται ότι για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των πυκνών καννάβων.

### 5.2.1 Πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 2A-3/2-0.5 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

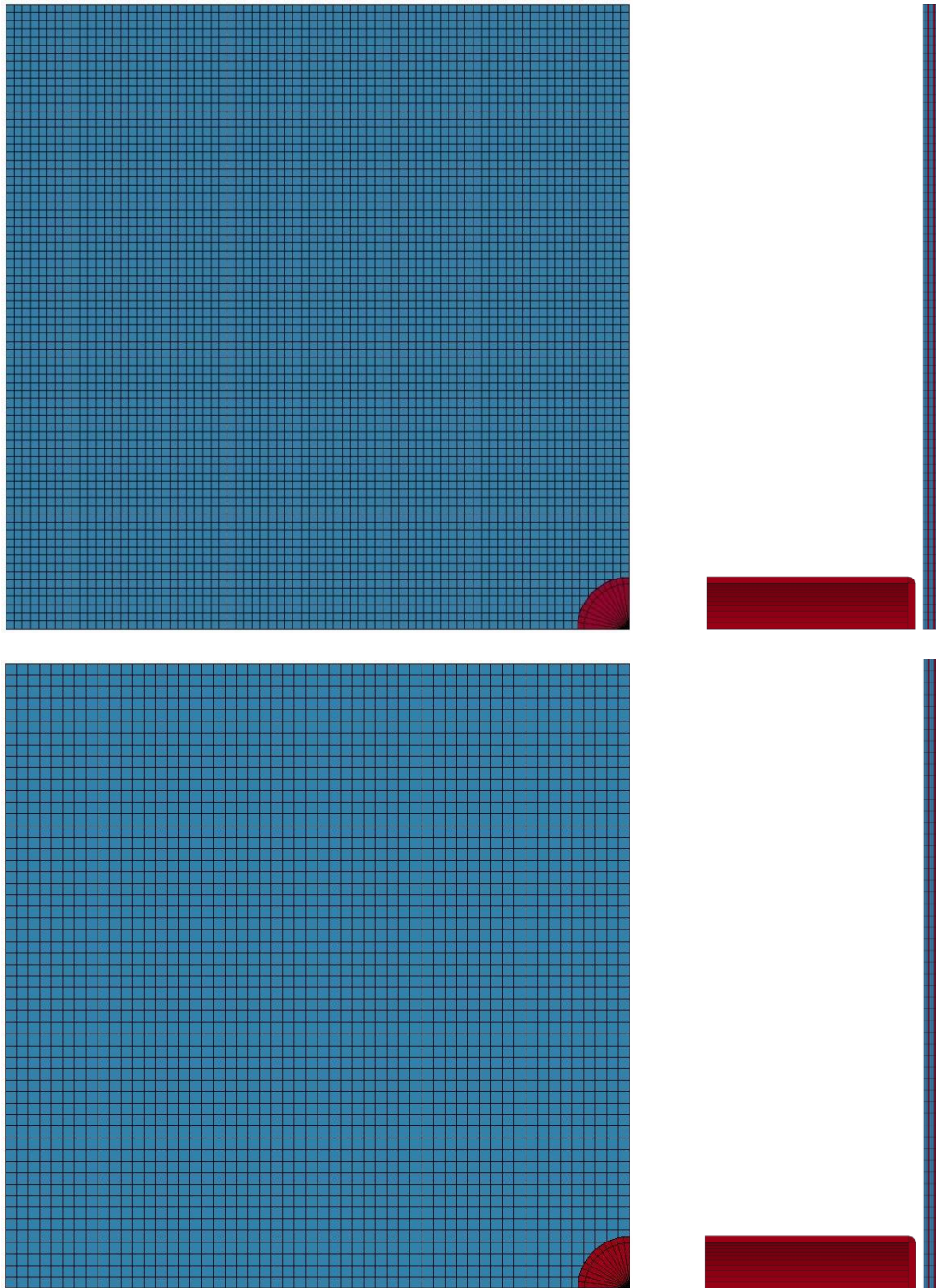


Σχήμα 5.1. Πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5 .

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	57760	145	12.12
Αραιός	29160	165	-

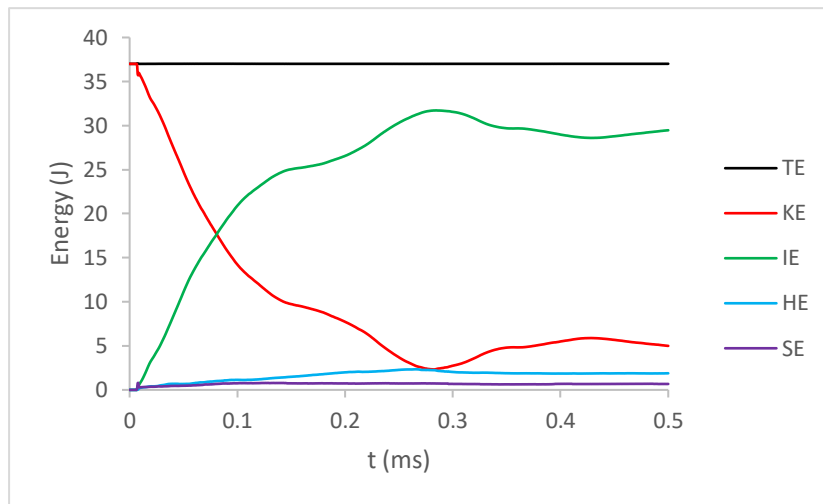
Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 2A-3/2-0.5 .



Σχήμα 5.2. Πυκνός κάνναβος (πάνω) και αραιός κάνναβος (κάτω).

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται ο πυκνός και ο αραιός κάνναβος, που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση της πλάκας GLARE 2A-3/2-0.5. Όπως είναι εμφανές ο πυκνός κάνναβος αποτελείται από μικρότερα σε μέγεθος στοιχεία συγκρινόμενα με αυτά του αραιού, με αποτέλεσμα να διαθέτει τα διπλά σε αριθμό στοιχεία.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.1. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

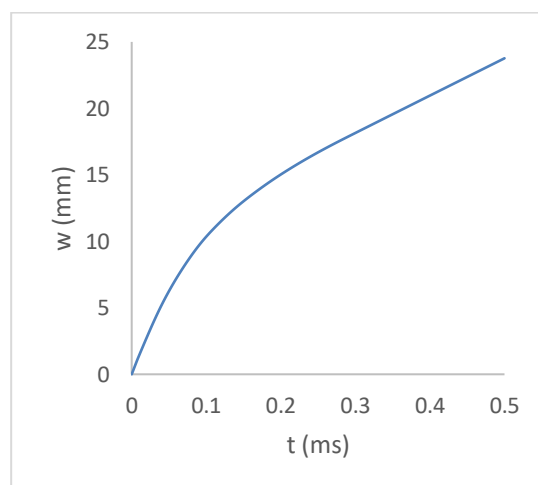


Διάγραμμα 5.1. Διάγραμμα ενεργειών - χρόνου για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Το διάγραμμα ενεργειών - χρόνου περιέχει την ολική ενέργεια του συστήματος (TE), την κινητική (KE), την εσωτερική (IE), την hourglass (HE) και την sliding (SE) σε συνάρτηση με τον χρόνο. Όπως είναι λογικό η ολική ενέργεια του συστήματος παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της κρούσης και είναι ίση με την αρχική κινητική ενέργεια του συστήματος, η οποία ισοδυναμεί με την κινητική ενέργεια του βλήματος στην ταχύτητα του βαλλιστικού ορίου. Η κινητική ενέργεια μειώνεται, καθώς το βλήμα συναντά αντίσταση κατά την διέλευσή του από την πλάκα GLARE, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται. Οι μικρές αυξομειώσεις που παρατηρούνται οφείλονται στη κινητική ενέργεια της πλάκας, η οποία πάλλεται ελαφρώς κατά την διέλευση του βλήματος. Αντίθετα, η εσωτερική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται και μάλιστα με τρόπο ανάλογο με αυτόν που μειώνεται η κινητική ενέργεια. Αυτό συμβαίνει γιατί η δαπανώμενη κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια μέσω της δημιουργίας παραμορφώσεων στην πλάκα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 2A-3/2-0.5 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

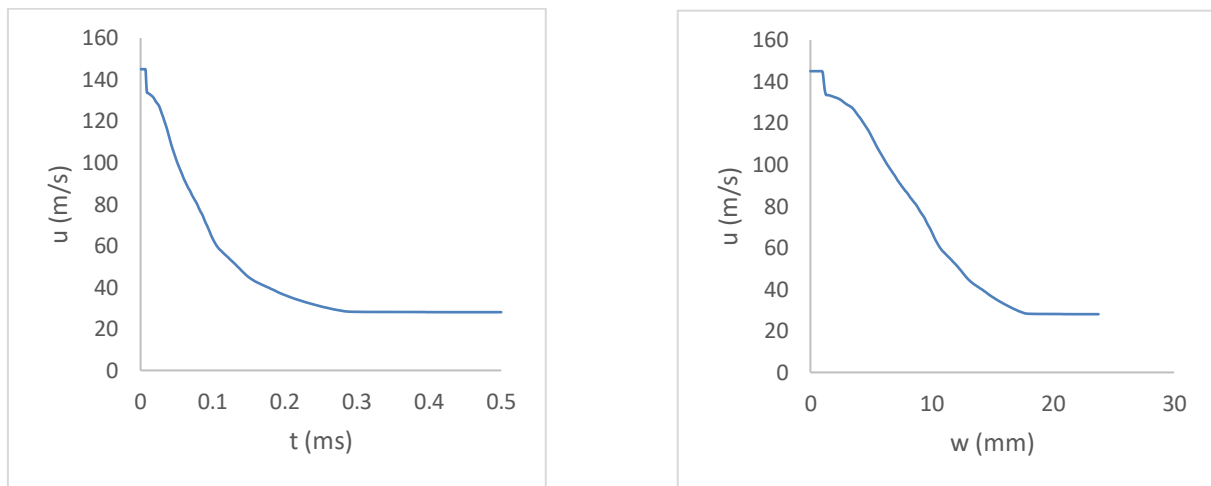
#### Διάγραμμα (w-t)



Διάγραμμα 5.2. Διάγραμμα (w-t) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

Το διάγραμμα  $w-t$  απεικονίζει τη μεταβολή της μετατόπισης του βλήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η μετατόπιση παρουσιάζει μία ομαλή αύξηση σε συνάρτηση με τον χρόνο χωρίς να παρατηρούνται απότομες αυξομειώσεις στο μέγεθός της. Η καμπύλη αυτή εμφανίζει κοίλη κυρτότητα μέχρι τη στιγμή της διάτρησης, γεγονός που δείχνει ότι η ταχύτητα του βλήματος μειώνεται συνεχώς μέχρι τότε. Έπειτα από τη στιγμή αυτή, η κλίση της καμπύλης  $w-t$  γίνεται σταθερή, καθώς το βλήμα έχει πλέον διαπεράσει την πλάκα και κινείται με σταθερή ταχύτητα, χωρίς να δέχεται κάποια αντίσταση.

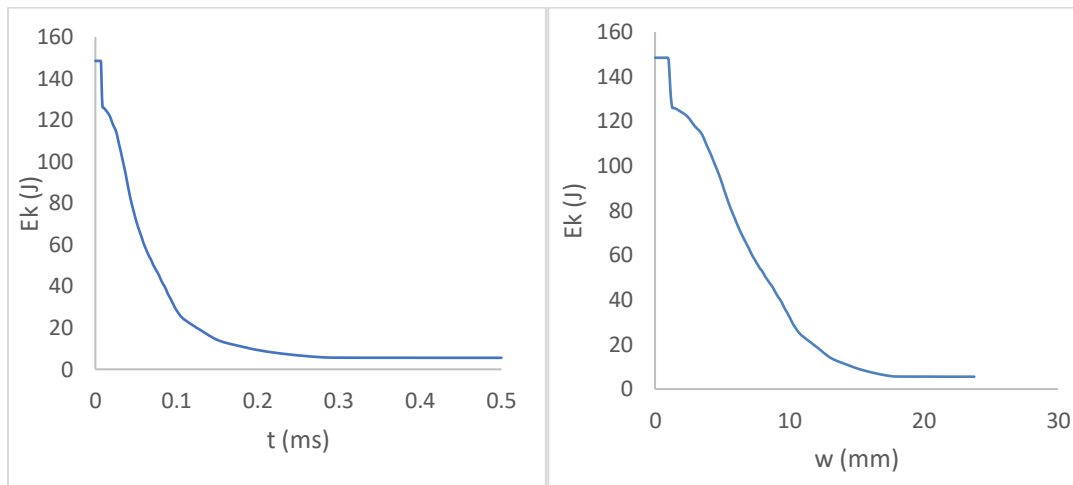
### Διαγράμματα ( $u-t$ ) και ( $u-w$ )



Διάγραμμα 5.3. Διαγράμματα ( $u-t$ ) και ( $u-w$ ) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

Το διάγραμμα  $u-t$  απεικονίζει τη μεταβολή της ταχύτητας του βλήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η ταχύτητα του βλήματος τη στιγμή της κρούσης εμφανίζει μία απότομη πτώση στο μέγεθός της, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η ταχύτητα μειώνεται ομαλά μέχρι την διάτρηση και την έξοδο του βλήματος από την πλάκα GLARE με σταθερή ταχύτητα. Η καμπύλη αυτή εμφανίζει, γενικά, κυρτή κυρτότητα.

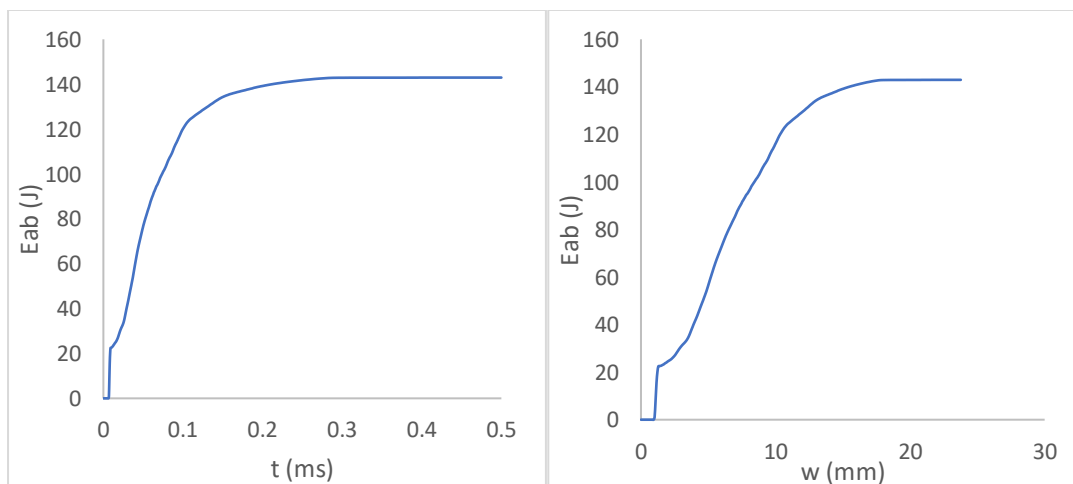
Αντίστοιχα, το διάγραμμα  $u-w$  απεικονίζει τη μεταβολή της ταχύτητας του βλήματος σε συνάρτηση με την μετατόπισή του. Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η ταχύτητα του βλήματος τη στιγμή της κρούσης εμφανίζει μία απότομη πτώση στο μέγεθός της, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η ταχύτητα μειώνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την διάτρηση και την έξοδο του βλήματος από την πλάκα GLARE με σταθερή ταχύτητα.

Διαγράμματα ( $E_k-t$ ) και ( $E_k-w$ )

Διάγραμμα 5.4. Διαγράμματα ( $E_k-t$ ) και ( $E_k-w$ ) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

Το διάγραμμα  $E_k-t$  απεικονίζει τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του βλήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Δεδομένου ότι η κινητική ενέργεια εξαρτάται από την ταχύτητα του βλήματος, το διάγραμμα  $E_k-t$  παρουσιάζει την ίδια ακριβώς μορφή με το διάγραμμα  $u-t$ . Έτσι, η κινητική ενέργεια του βλήματος τη στιγμή της κρούσης εμφανίζει μία απότομη πτώση στο μέγεθός της, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η κινητική ενέργεια μειώνεται σταθερά μέχρι να αποκτήσει μία σταθερή τιμή, όταν το βλήμα διαπεράσει την πλάκα GLARE.

Αντίστοιχα, το διάγραμμα  $E_k-w$  απεικονίζει τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του βλήματος σε συνάρτηση με την μετατόπιση. Όπως και πριν, το διάγραμμα  $E_k-w$  παρουσιάζει την ίδια ακριβώς μορφή με το διάγραμμα  $u-w$ . Έτσι, η κινητική ενέργεια του βλήματος τη στιγμή της κρούσης εμφανίζει μία απότομη πτώση στο μέγεθός της, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η κινητική ενέργεια μειώνεται σταθερά μέχρι να αποκτήσει μία σταθερή τιμή, όταν το βλήμα διαπεράσει την πλάκα GLARE.

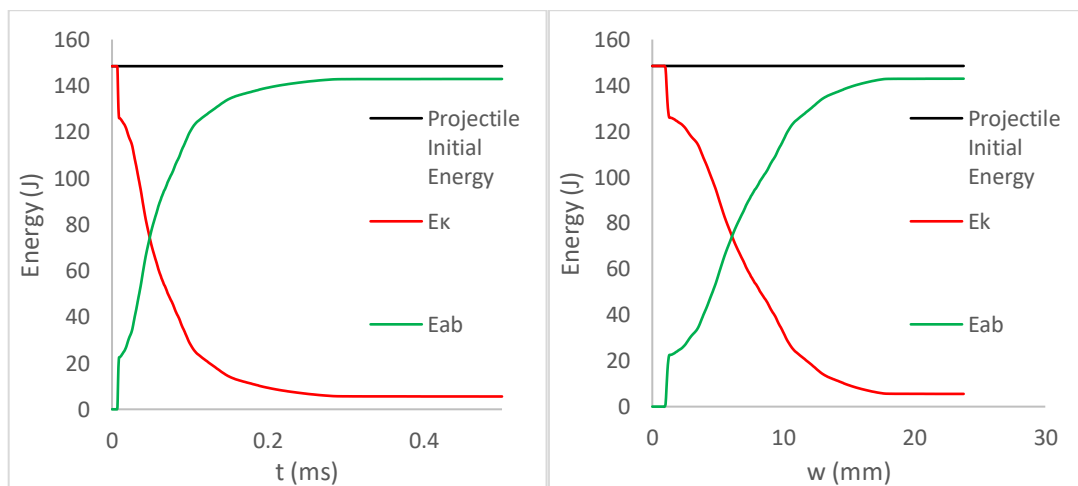
Διαγράμματα ( $E_{ab}-t$ ) και ( $E_{ab}-w$ )

Διάγραμμα 5.5. Διαγράμματα ( $E_{ab}-t$ ) και ( $E_{ab}-w$ ) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

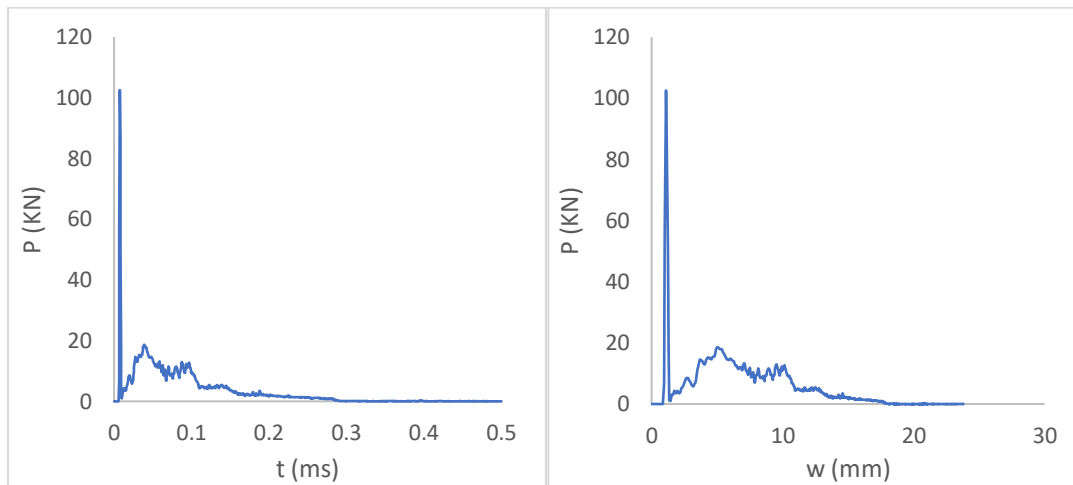
Το διάγραμμα  $E_{ab}$ - $t$  απεικονίζει τη μεταβολή της απορροφούμενης ενέργειας σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η ενέργεια αυτή αντιπροσωπεύει την κινητική ενέργεια του βλήματος που απορροφάται από την πλάκα κατά τη διάρκεια της βαλλιστικής κρούσης. Για τον λόγο αυτό η μεταβολή της  $E_{ab}$  είναι αντίθετη από αυτήν της  $E_k$ . Έτσι, η απορροφούμενη κινητική ενέργεια του βλήματος εμφανίζει μία απότομη αύξηση στο μέγεθός της τη στιγμή της κρούσης, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η  $E_{ab}$  αυξάνεται σταθερά μέχρι να αποκτήσει μία σταθερή τιμή, όταν το βλήμα διαπεράσει την πλάκα GLARE.

Αντίστοιχα, το διάγραμμα  $E_{ab}$ - $w$  απεικονίζει τη μεταβολή της απορροφούμενης κινητικής ενέργειας του βλήματος σε συνάρτηση με την μετατόπισή του. Όπως και πριν, η καμπύλη  $E_{ab}$ - $w$  παρουσιάζει αντίθετη μεταβολή από την  $E_k$ - $w$ . Η απορροφούμενη κινητική ενέργεια του βλήματος τη στιγμή της κρούσης εμφανίζει μία απότομη αύξηση στο μέγεθός της, η οποία οφείλεται στο αρκετά υψηλό κρουστικό φορτίο που δέχεται εκείνη τη στιγμή το βλήμα από την πλάκα GLARE. Έπειτα, η  $E_{ab}$  αυξάνεται σταθερά μέχρι να αποκτήσει μία σταθερή τιμή, όταν το βλήμα διαπεράσει την πλάκα GLARE.

Τοποθετώντας σε κοινά διαγράμματα τις ενέργειες  $E_k$  και  $E_{ab}$ , καθώς και την αρχική κινητική ενέργεια του βλήματος, προκύπτουν οι παρακάτω καμπύλες (Διάγραμμα 5.6) όπου φαίνεται η αλληλεξάρτηση των εν λόγω ενεργειών.



Διάγραμμα 5.6. Διαιγράμματα ( $E_k$ ,  $E_{ab}$ - $t$ ) και ( $E_k$ ,  $E_{ab}$ - $w$ ) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

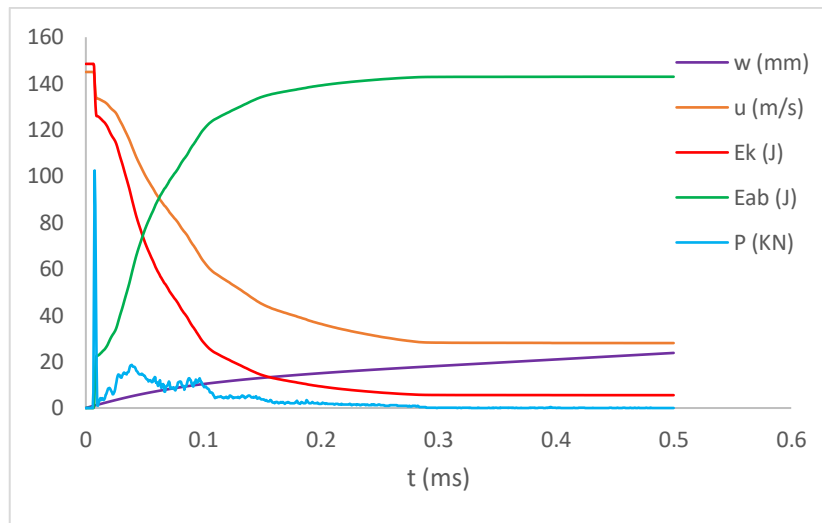
Διαγράμματα (P-t) και (P-w)

Διάγραμμα 5.7. Διαγράμματα (P-t) και (P-w) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

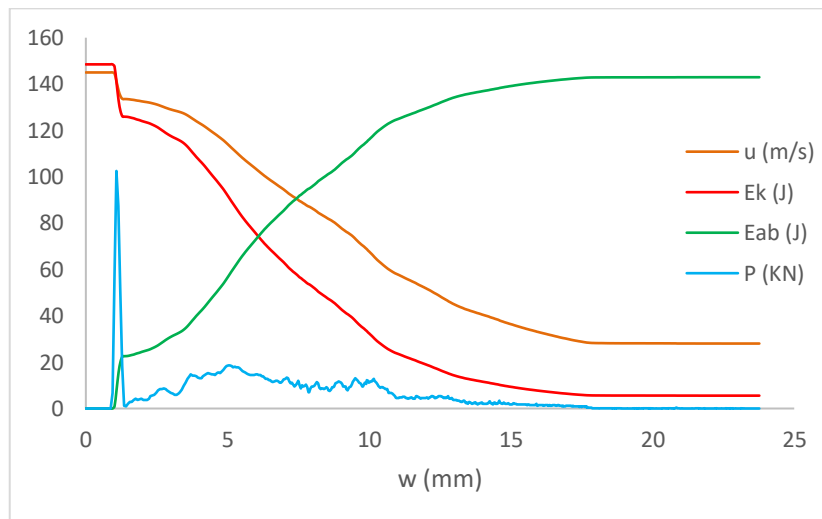
Το διάγραμμα P-t απεικονίζει τη μεταβολή της δύναμης που δέχεται το βλήμα από την πλάκα σε συνάρτηση με τον χρόνο. Κατά την έναρξη της κρούσης παρατηρείται μία απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μία μέγιστη τιμή, η οποία μειώνεται σχεδόν ακαριαία. Αυτό οφείλεται στην γεωμετρία του βλήματος, το οποίο δεν είναι ένα συνηθισμένο βλήμα με αιχμηρό μετωπικό άκρο, αλλά διαθέτει μεγάλη και επίπεδη μετωπική επιφάνεια. Έπειτα, η καμπύλη P-t παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις σε συνάρτηση με τον χρόνο, οι οποίες, όμως, είναι αρκετά μικρότερες από την μέγιστη τιμή. Αυτές οι αυξομειώσεις σχετίζονται με τους αποχωρισμούς που λαμβάνουν χώρα τόσο μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού (delamination) όσο και μεταξύ στρώσεων αλουμινίου και στρώσεων σύνθετου υλικού (debonding), αλλά και με την θραύση των εκάστοτε στρώσεων καθώς το βλήμα διαπερνάει την πλάκα GLARE. Τέλος, η δύναμη μηδενίζεται όταν, πλέον, το βλήμα έχει διαπεράσει την πλάκα.

Το διάγραμμα P-w απεικονίζει τη μεταβολή της δύναμης που δέχεται το βλήμα από την πλάκα σε συνάρτηση με την μετατόπισή του. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εμβαδόν της επιφάνειας που σχηματίζεται κάτω από την καμπύλη P-w εκφράζει την ενέργεια παραμόρφωσης. Όπως και στη καμπύλη P-t, έτσι και εδώ, κατά την έναρξη της κρούσης παρατηρείται μία απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μία μέγιστη τιμή, η οποία μειώνεται σχεδόν ακαριαία. Έπειτα, η καμπύλη P-w παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις σε συνάρτηση με τον χρόνο, οι οποίες, όμως, είναι αρκετά μικρότερες από την μέγιστη τιμή. Αυτές οι αυξομειώσεις σχετίζονται με τους αποχωρισμούς που λαμβάνουν χώρα τόσο μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων σύνθετου υλικού (delamination) όσο και μεταξύ στρώσεων αλουμινίου και στρώσεων σύνθετου υλικού (debonding), αλλά και με την θραύση των εκάστοτε στρώσεων καθώς το βλήμα διαπερνάει την πλάκα GLARE. Τέλος, η δύναμη μηδενίζεται όταν, πλέον, το βλήμα έχει διαπεράσει την πλάκα.

### Συνδυαστικά Διαγράμματα ως προς (t) και ως προς (w)



Διάγραμμα 5.8. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.



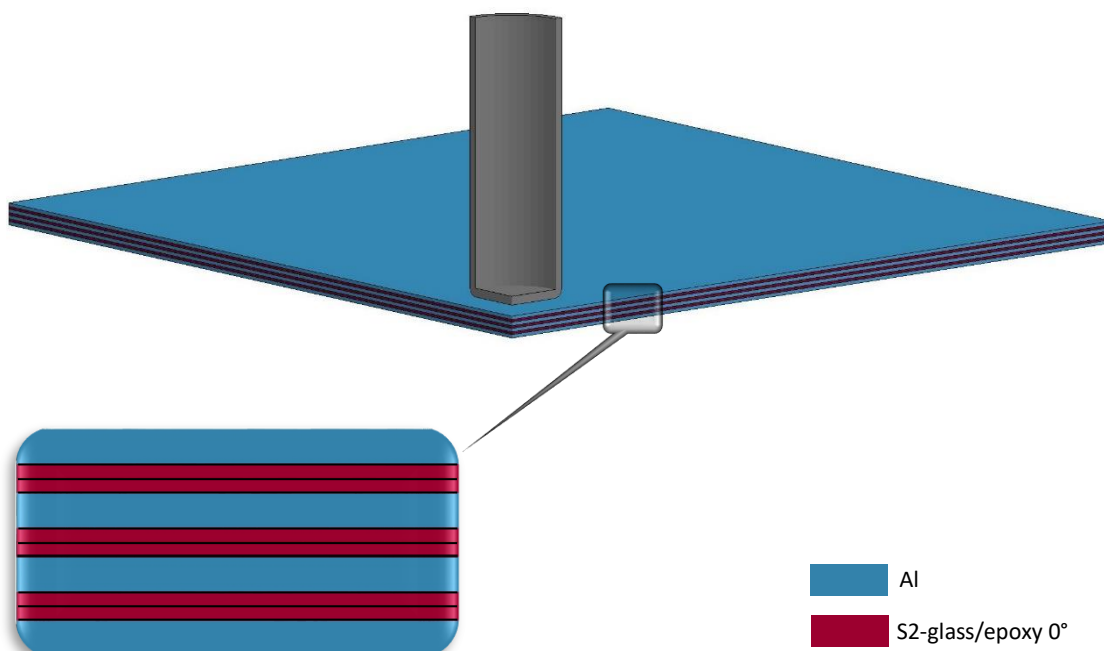
Διάγραμμα 5.9. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 2A-3/2-0.5.

Το συνδυαστικό Διάγραμμα 5.8 περιέχει τις καμπύλες  $w-t$ ,  $u-t$ ,  $E_k-t$ ,  $E_{ab}-t$  και  $P-t$ , ενώ το Διάγραμμα 5.9 περιέχει τις καμπύλες  $u-w$ ,  $E_k-w$ ,  $E_{ab}-w$  και  $P-w$ . Τα διαγράμματα αυτά συμβάλλουν στην ταχύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων και προσφέρουν μία σφαιρική εικόνα της μεταβολής των εξεταζόμενων μεγεθών.

Για λόγους οικονομίας, στις επόμενες παραγράφους για κάθε πλάκα θα παρατίθενται μόνο τα συνδυαστικά διαγράμματα.

### 5.2.2 GLARE 2A-4/3-0.31

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 2A-4/3-0.31 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



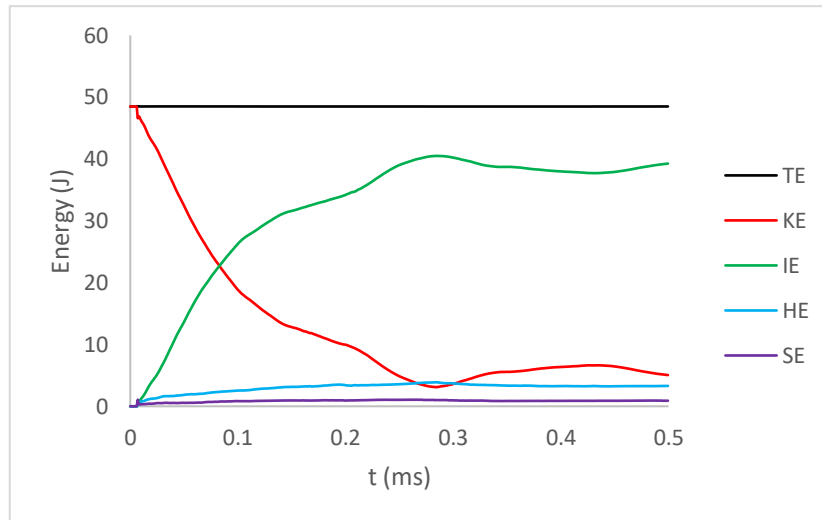
Σχήμα 5.3. Πλάκα GLARE 2A-4/3-0.31.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	48734	166	14.87
Αραιός	24696	195	-

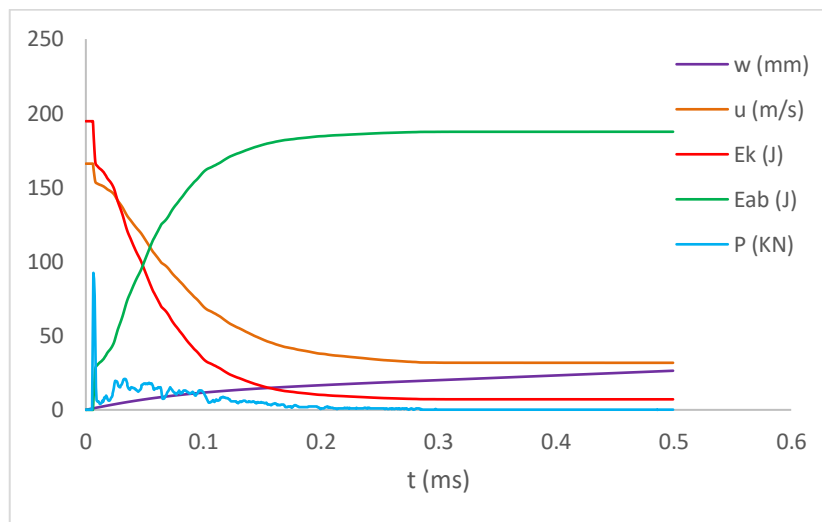
Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 2A-4/3-0.31.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.10. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

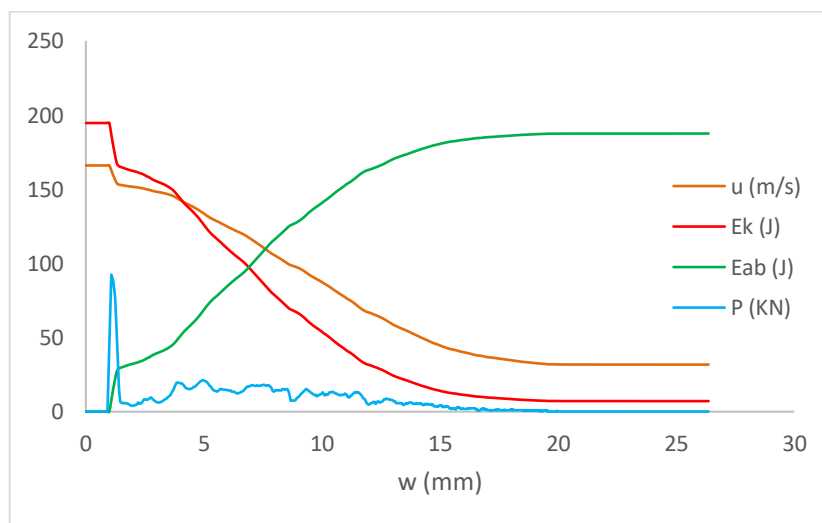


Διάγραμμα 5.10. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 2A-4/3-0.31. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 2A-4/3-0.31 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



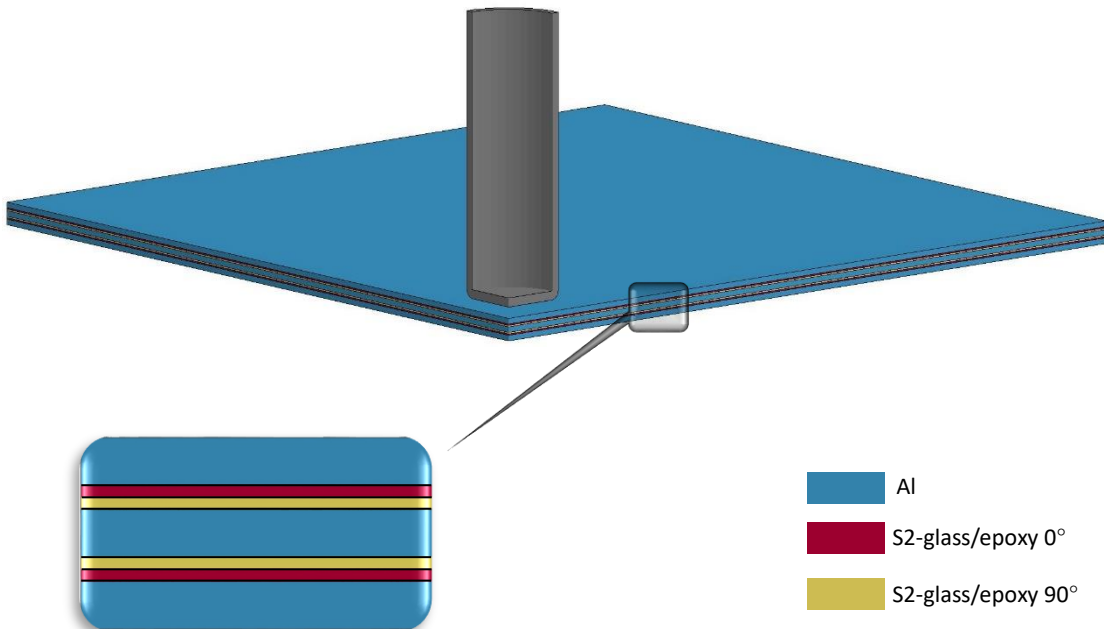
Διάγραμμα 5.11. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 2A-4/3-0.31.



Διάγραμμα 5.12. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 2A-4/3-0.31.

### 5.2.3 GLARE 3 3/2-0.5

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 3 3/2-0.5 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



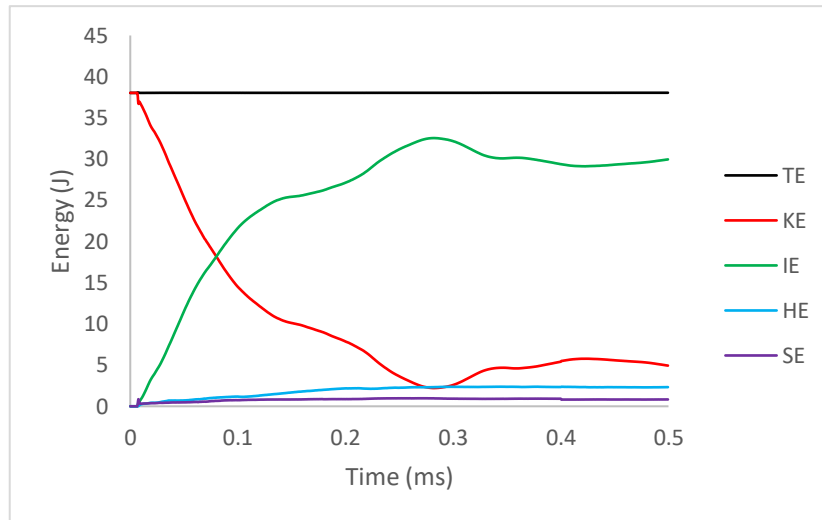
Σχήμα 5.4. Πλάκα GLARE 3 3/2-0.5.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	57760	147	14.04
Αραιός	29160	171	-

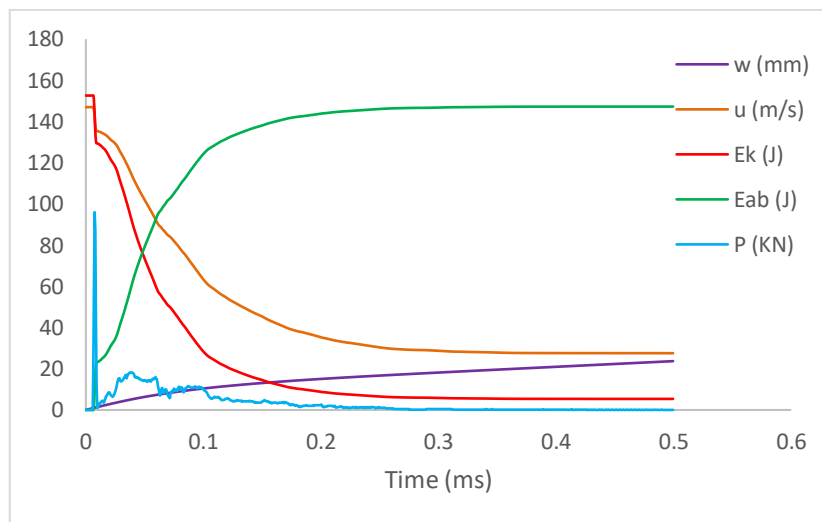
Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 3 3/2-0.5.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.13. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

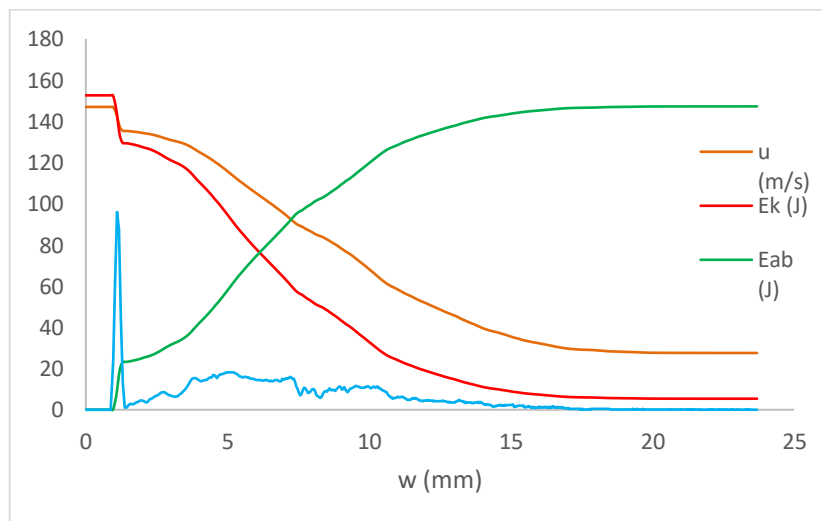


Διάγραμμα 5.13. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 3 3/2-0.5. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 3 3/2-0.5 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



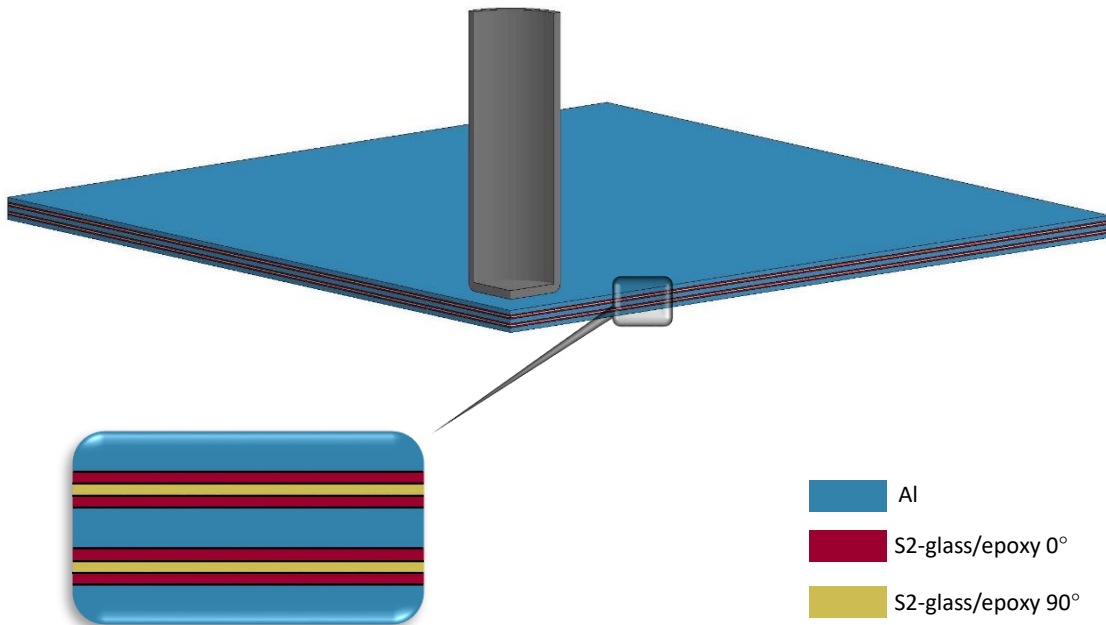
Διάγραμμα 5.14. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 3 3/2-0.5.



Διάγραμμα 5.15. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 3 3/2-0.5.

### 5.2.4 GLARE 4A-3/2-0.42

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 4A-3/2-0.42 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



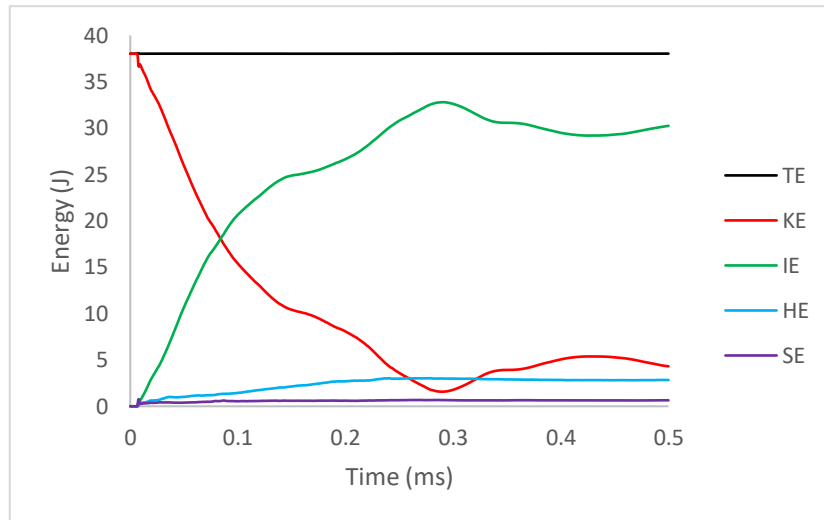
Σχήμα 5.5. Πλάκα GLARE 4A-3/2-0.42.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	55488	147	13.53
Αραιός	27648	170	-

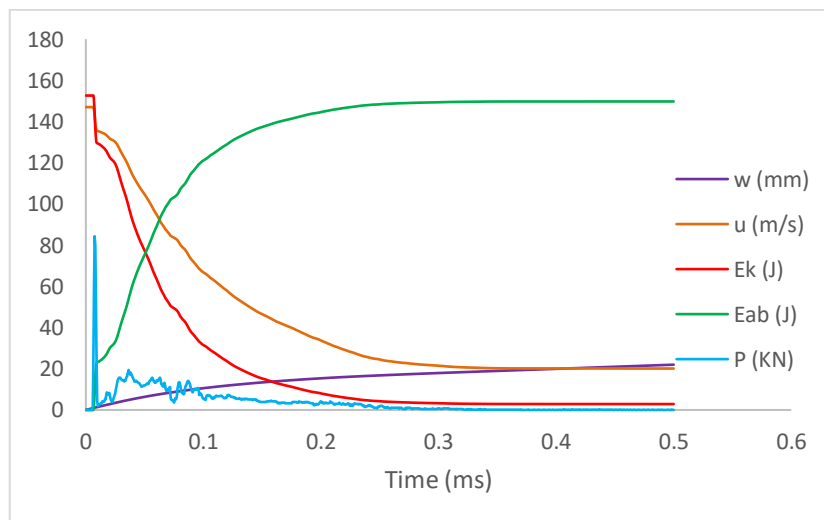
Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 4A-3/2-0.42.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.16. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

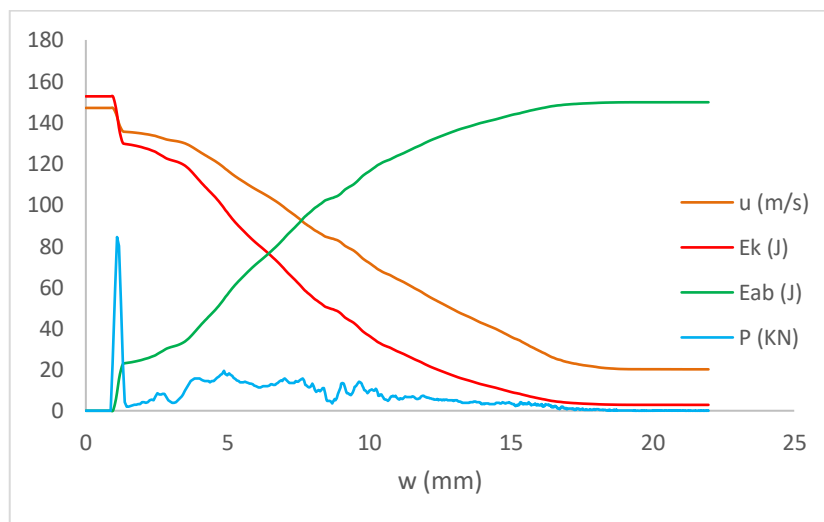


Διάγραμμα 5.16. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 4A-3/2-0.42. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 4A-3/2-0.42 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



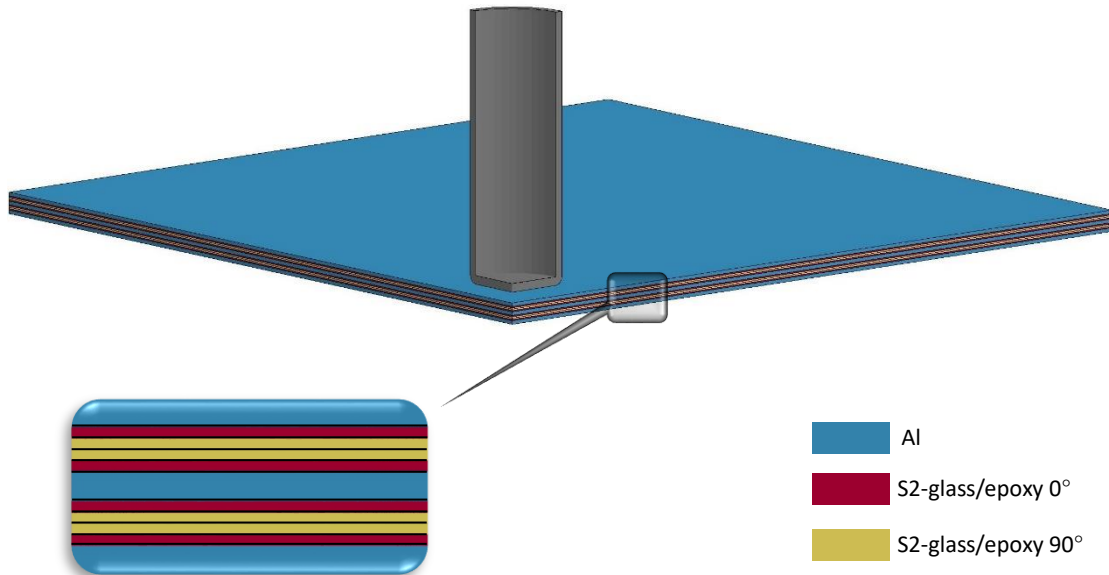
Διάγραμμα 5.17. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 4A-3/2-0.42.



Διάγραμμα 5.18. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 4A-3/2-0.42.

### 5.2.5 GLARE 5-3/2-0.33

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 5-3/2-0.33 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



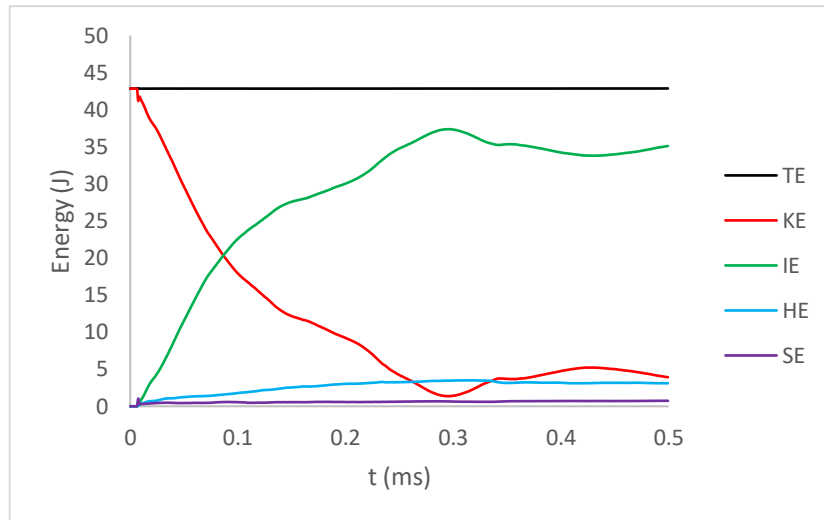
Σχήμα 5.6. Πλάκα GLARE 5-3/2-0.33.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	52094	156	13.19
Αραιός	25886	182	-

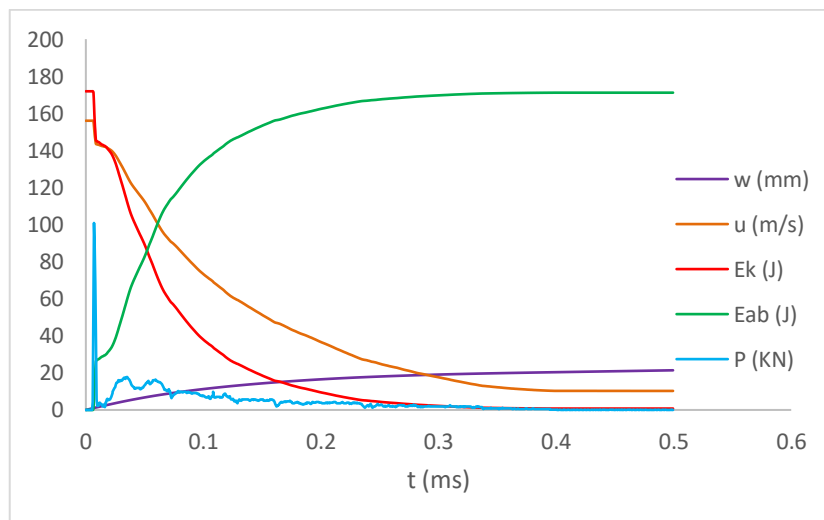
Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5-3/2-0.33.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.19. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

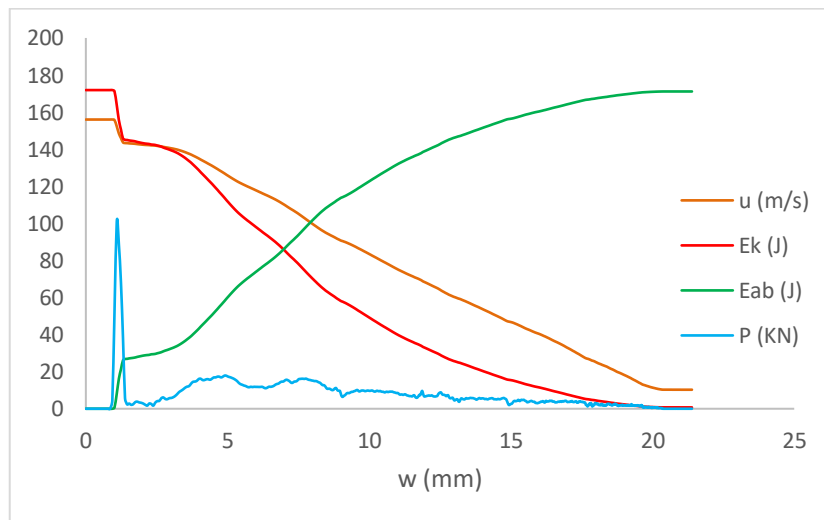


Διάγραμμα 5.19. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5-3/2-0.33. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5-3/2-0.33 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



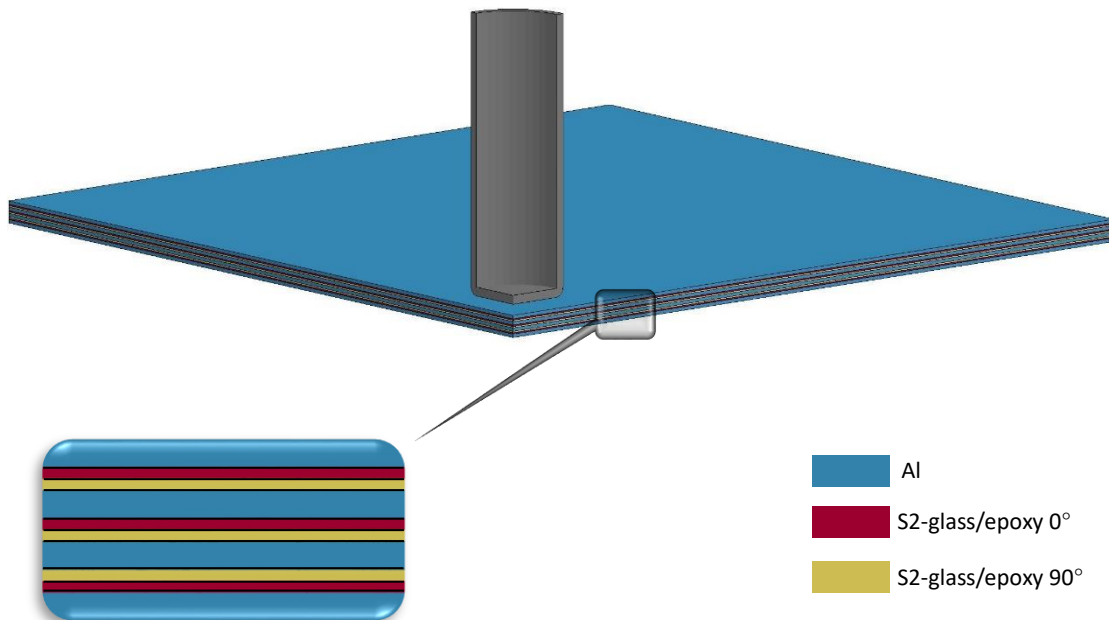
Διάγραμμα 5.20. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5-3/2-0.33.



Διάγραμμα 5.21. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5-3/2-0.33.

### 5.2.6 GLARE 3-4/3-0.31

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 3-4/3-0.31 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



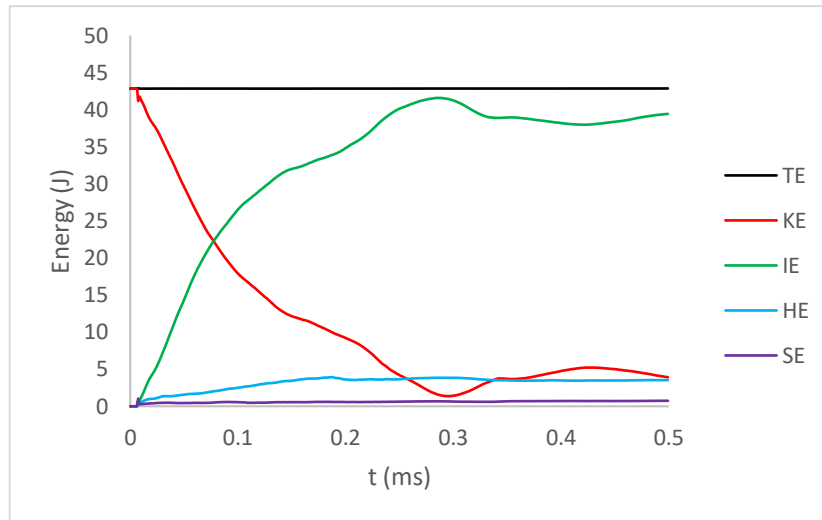
Σχήμα 5.7. Πλάκα GLARE 3-4/3-0.31.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	48734	168	14.72
Αραιός	24696	197	-

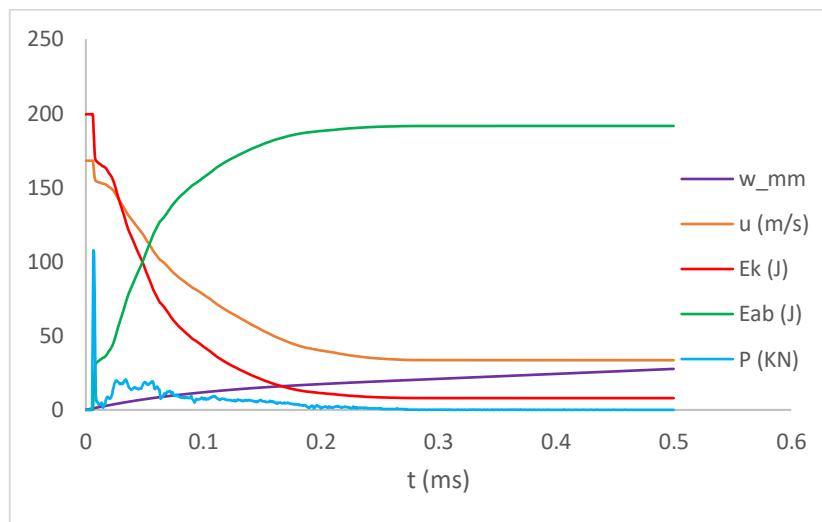
Πίνακας 5.7. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 3-4/3-0.31.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.22. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

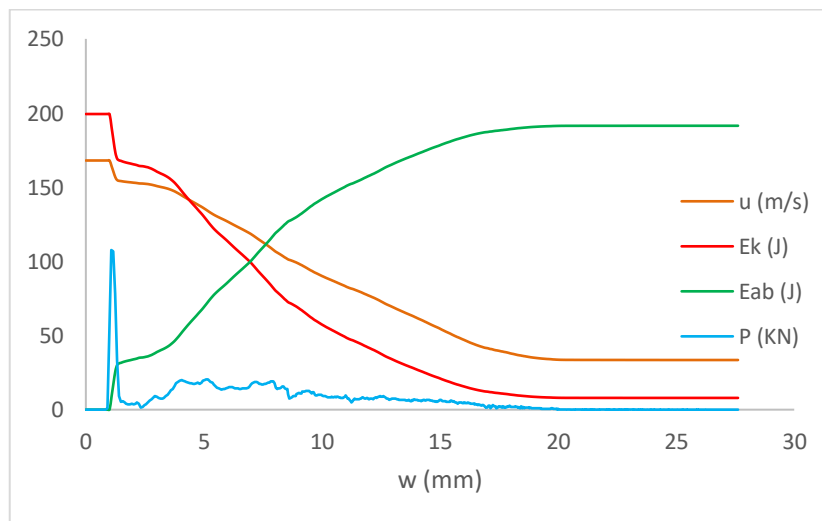


Διάγραμμα 5.22. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 3-4/3-0.31. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 3-4/3-0.31 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



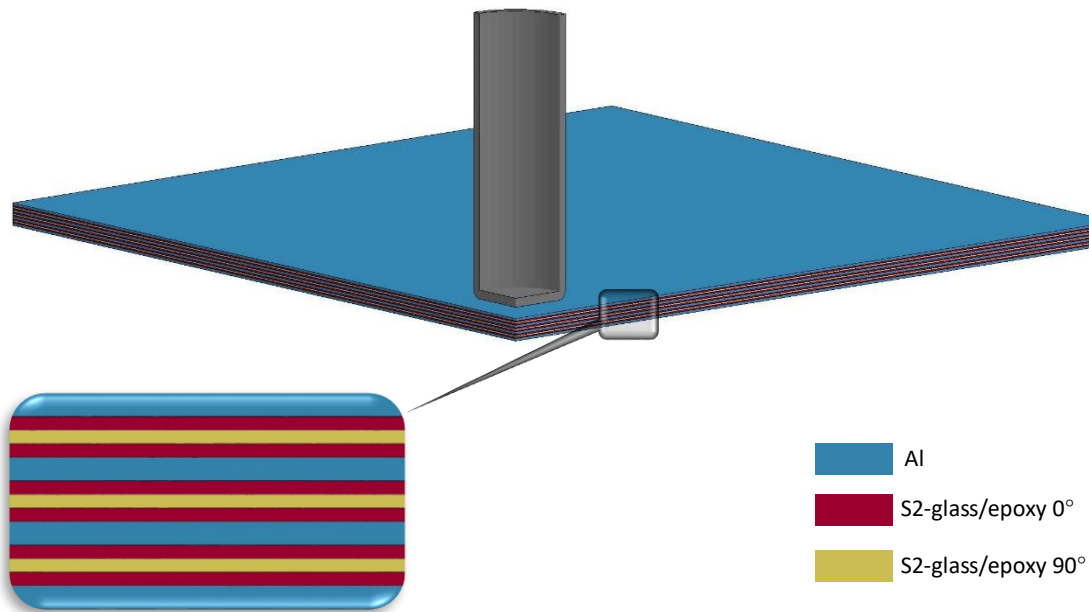
Διάγραμμα 5.23. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 3-4/3-0.31.



Διάγραμμα 5.24. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 3-4/3-0.31.

### 5.2.7 GLARE 4A-4/3-0.22

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 4A-4/3-0.22 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.8.



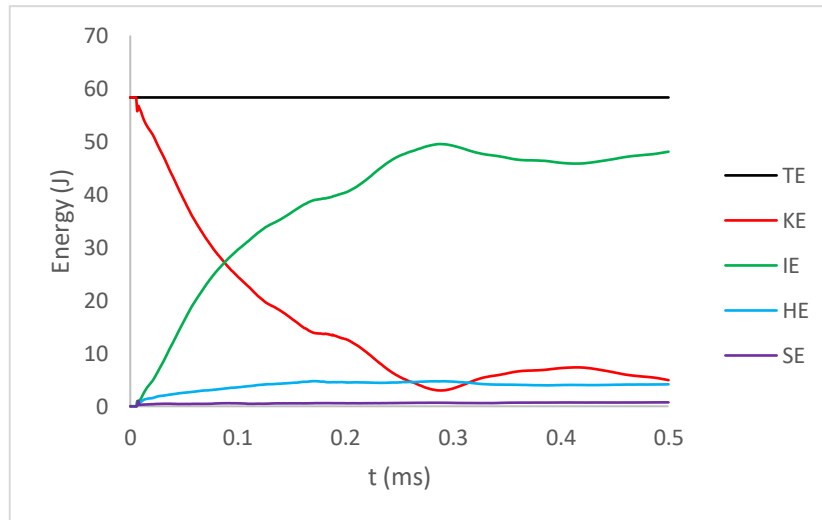
Σχήμα 5.8. Πλάκα GLARE 4A-4/3-0.22.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	42500	182	13.33
Αραιός	22032	210	-

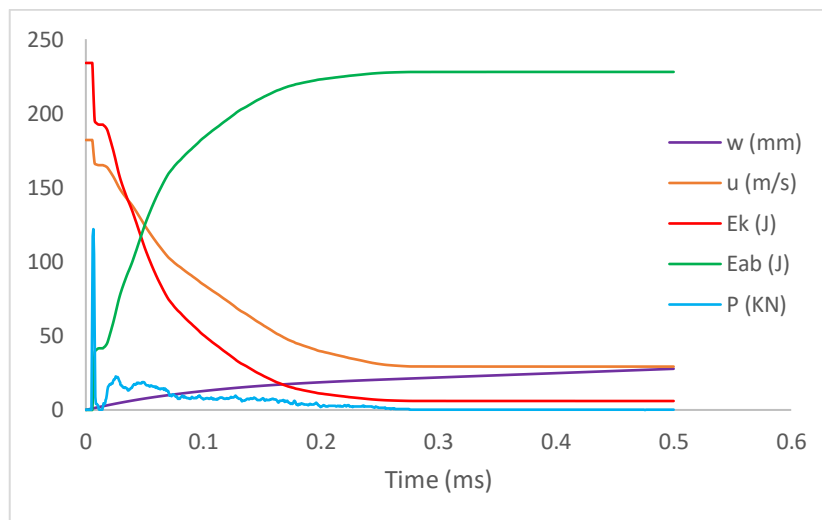
Πίνακας 5.8. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 4A-4/3-0.22.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.25. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

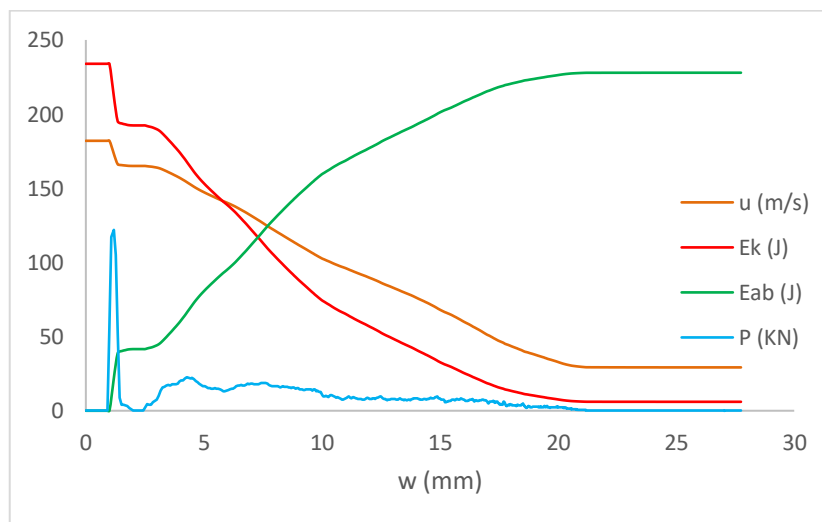


Διάγραμμα 5.25. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 4A-4/3-0.22. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 4A-4/3-0.22 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



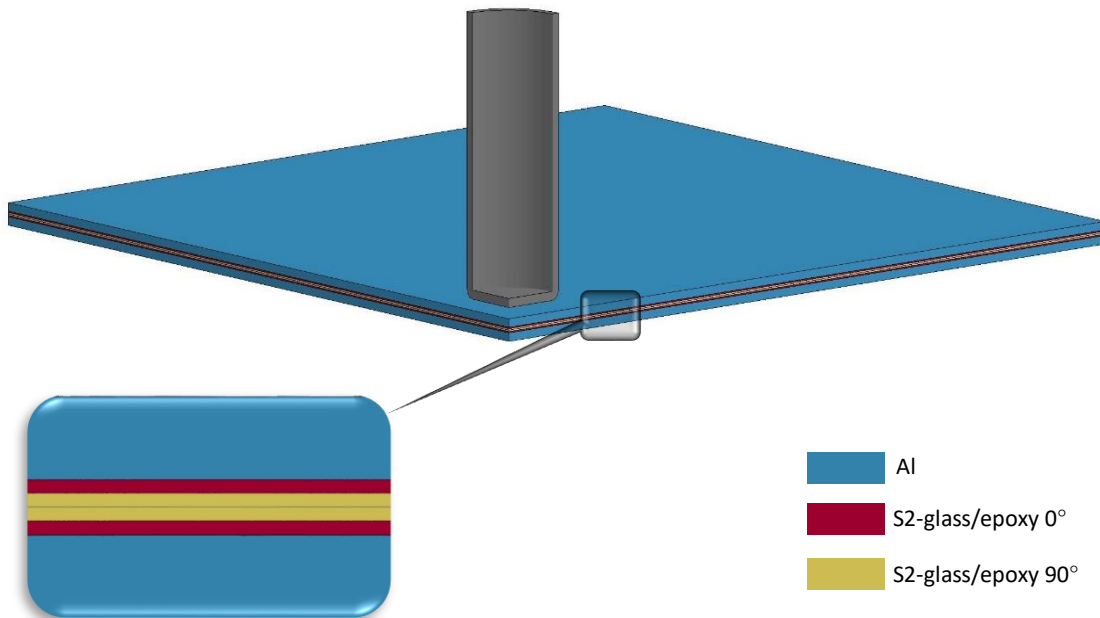
Διάγραμμα 5.26. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 4A-4/3-0.22.



Διάγραμμα 5.27. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 4A-4/3-0.22.

### 5.2.8 GLARE 5-2/1-0.75

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 5-2/1-0.75 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.9.



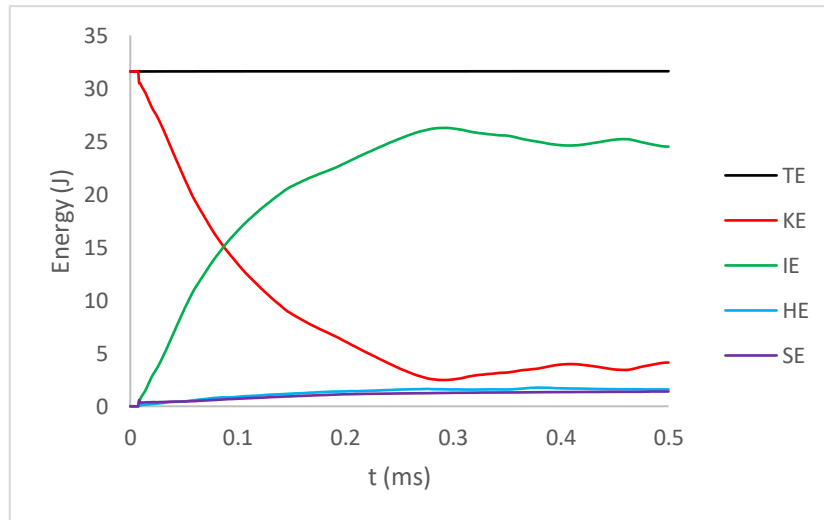
Σχήμα 5.9. Πλάκα GLARE 5-2/1-0.75.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	66248	134	8.22
Αραιός	33800	146	-

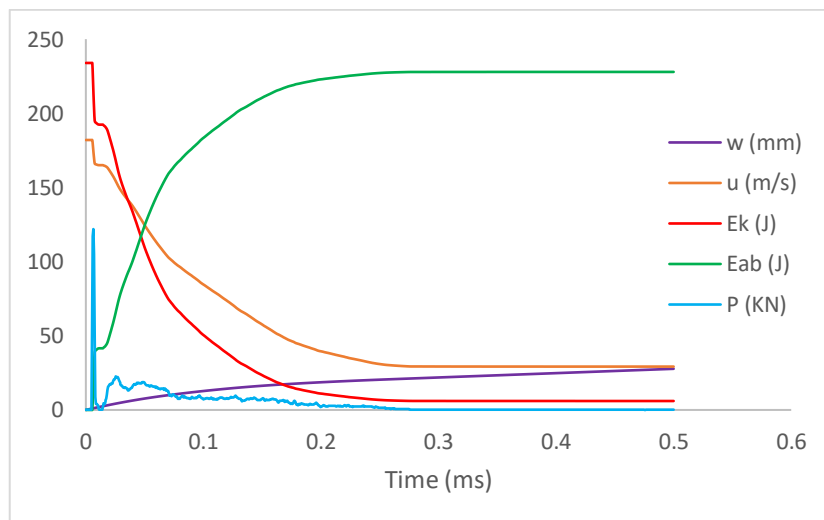
Πίνακας 5.9. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5-2/1-0.75.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.28. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

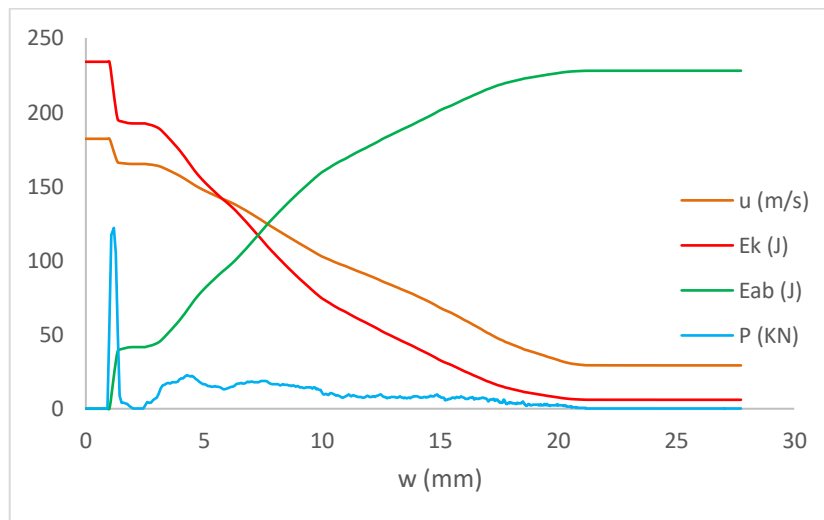


Διάγραμμα 5.28. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5-2/1-0.75. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5-2/1-0.75 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



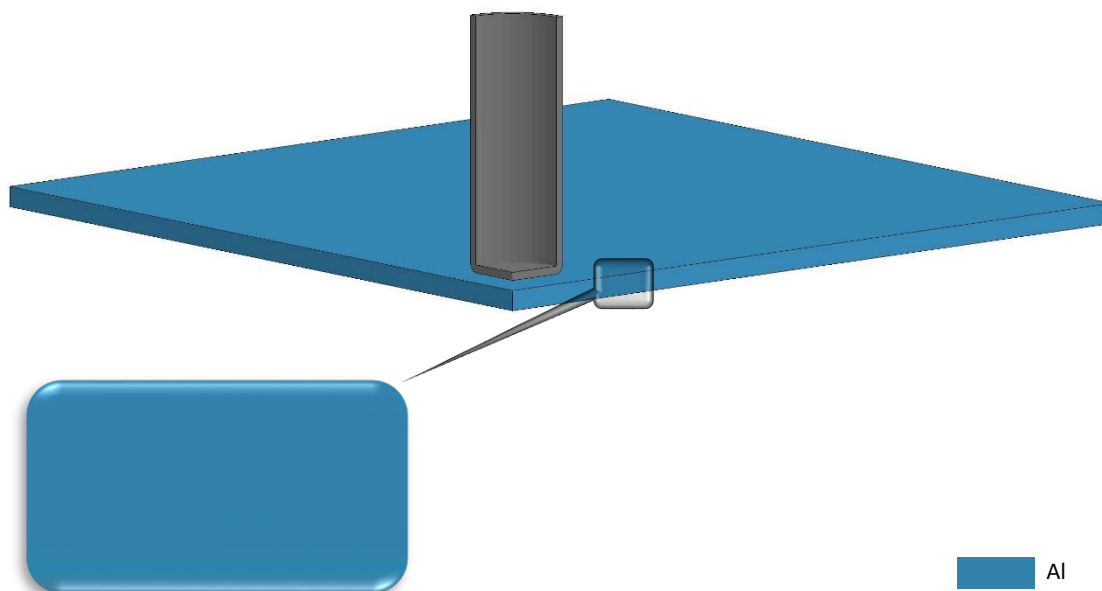
Διάγραμμα 5.29. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5-2/1-0.75.



Διάγραμμα 5.30. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5-2/1-0.75.

### 5.2.9 Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 2mm

Το μοντέλο της πλάκας Al 2024-T3 πάχους 2mm που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



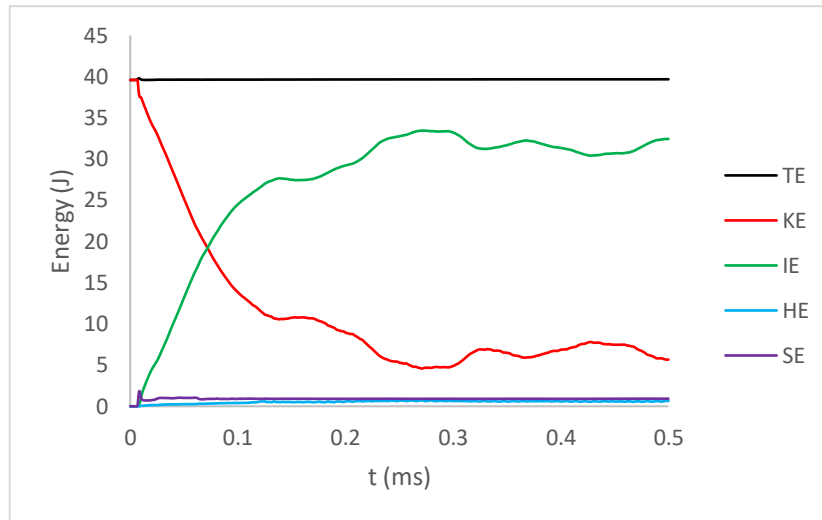
Σχήμα 5.10. Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 2mm.

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	11552	150	9.09
Αραιός	5832	165	-

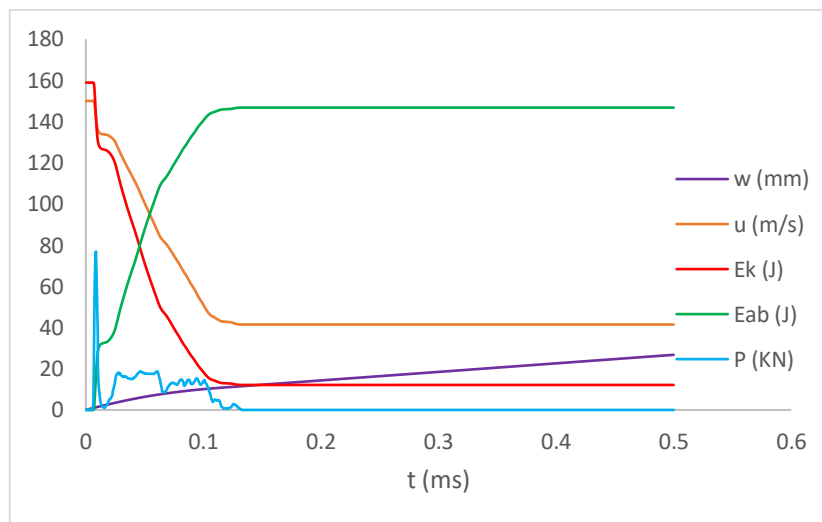
Πίνακας 5.10. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al 2024-T3 πάχους 2mm.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 5.31. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

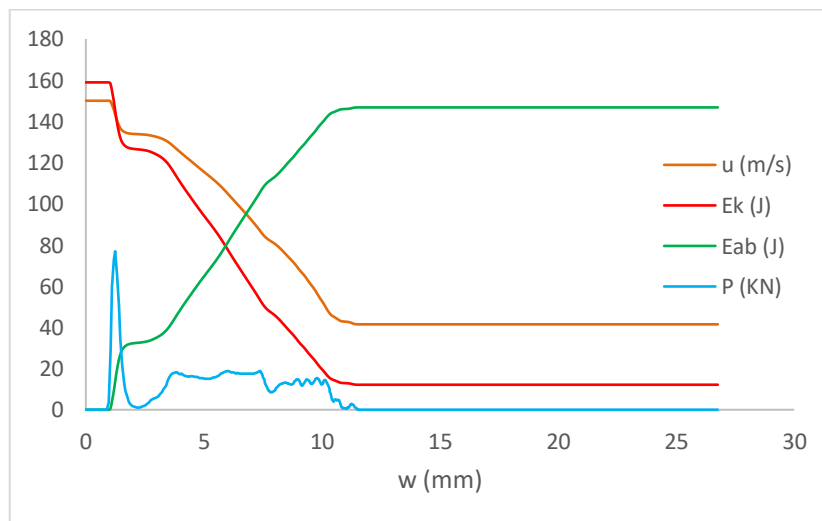


Διάγραμμα 5.31. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al 2024-T3. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al 2024-T3 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα συνδυαστικά διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 5.32. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα Al 2024-T3.

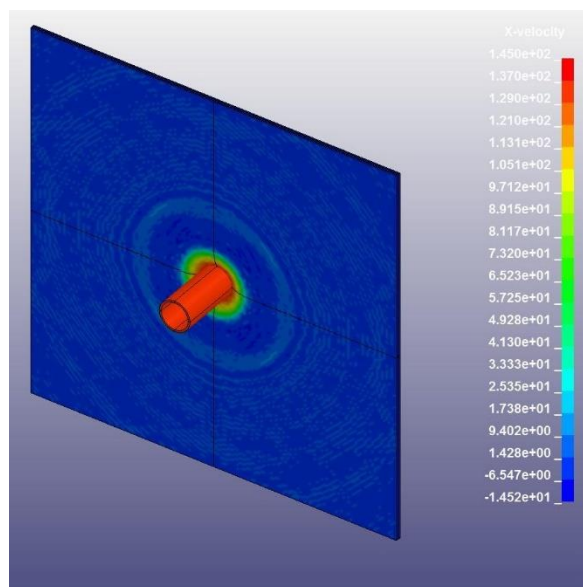


Διάγραμμα 5.33. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al 2024-T3.

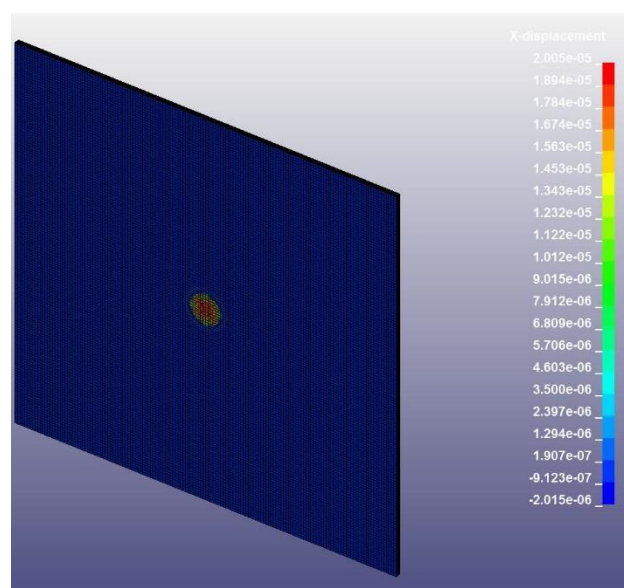
## 5.3 Σχολιασμός - Συμπεράσματα

### 5.3.1 Μελέτη αποτελεσμάτων σε περιβάλλον LS-DYNA

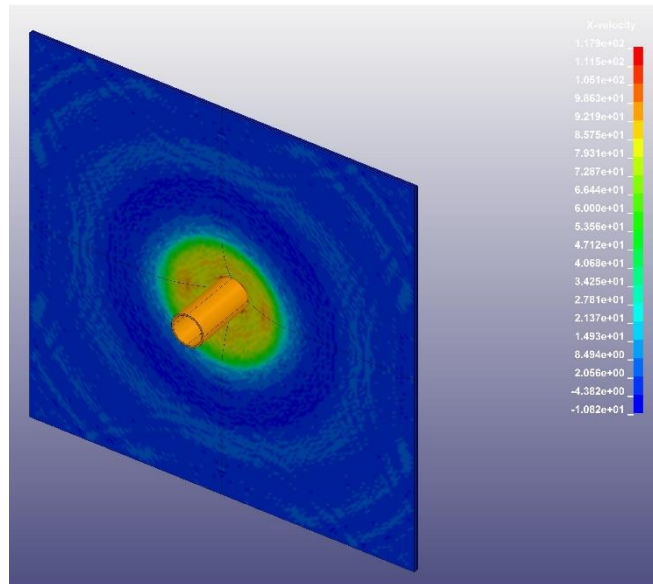
Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των μοντέλων της §5.2, ήταν εφικτό με τη βοήθεια της πλατφόρμας του LS-DYNA να συλλεχθούν χρήσιμες πληροφορίες για την μελέτη της συμπεριφοράς των πλακών GLARE σε βαλλιστική κρούση, όπως είναι η κατανομή των ταχυτήτων και οι κάθετες μετατοπίσεις. Λόγω της ομοιότητας που εμφανίζουν όλες οι πλάκες στον τρόπο αστοχίας τους, κρίθηκε επαρκές να παρατεθούν παρακάτω ως ενδεικτικές μόνο οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν για την πλάκα GLARE 3-3/2-0.5.



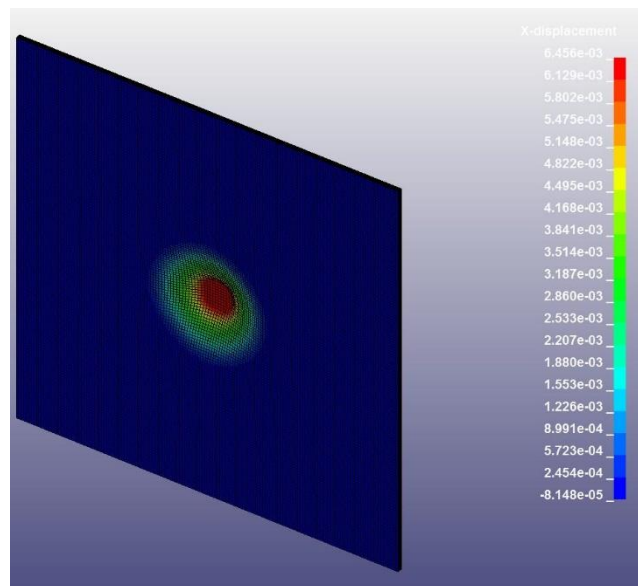
Σχήμα 5.11. Κατανομή κάθετων ταχυτήτων (σε m/s) κοντά στην έναρξη της κρούσης.



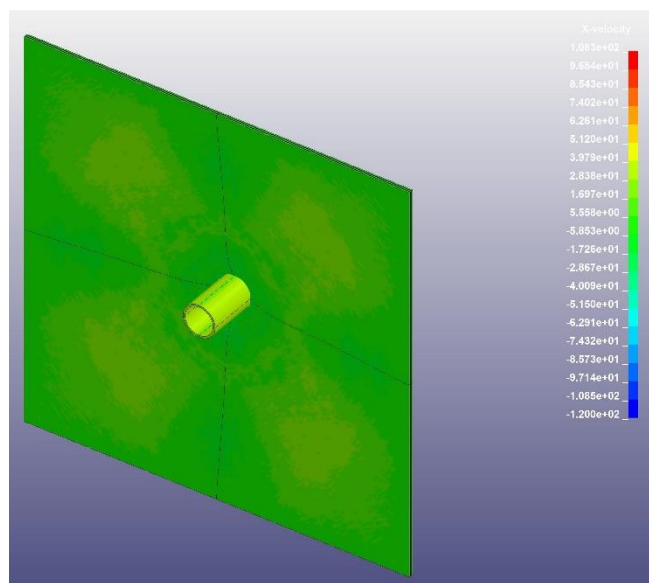
Σχήμα 5.12. Κάθετες μετατοπίσεις (σε m) τη στιγμή της έναρξης της κρούσης.



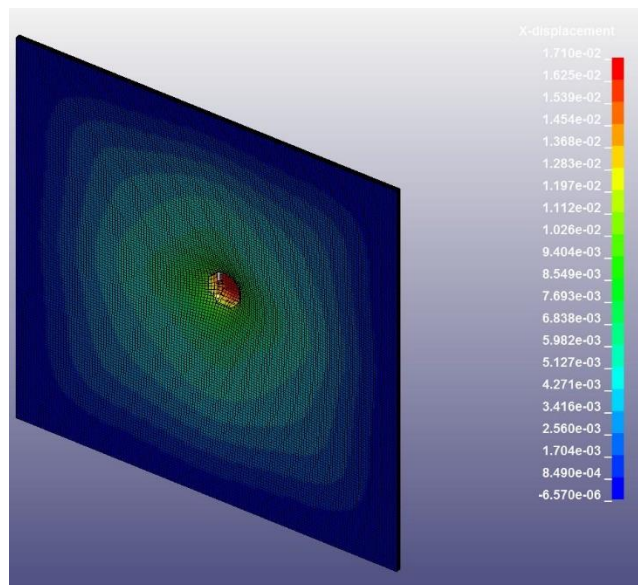
Σχήμα 5.13 Κατανομή κάθετων ταχυτήτων (σε m/s) πριν την πρόκληση αστοχίας.



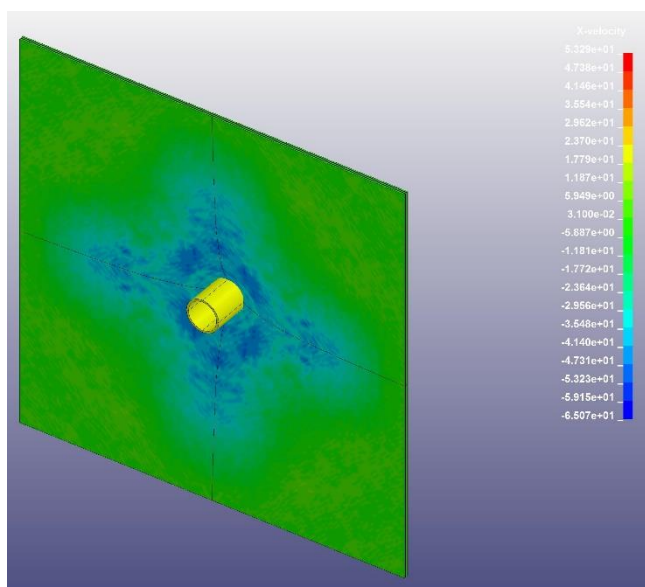
Σχήμα 5.14. Κάθετες μετατοπίσεις (σε m) πριν την πρόκληση αστοχίας.



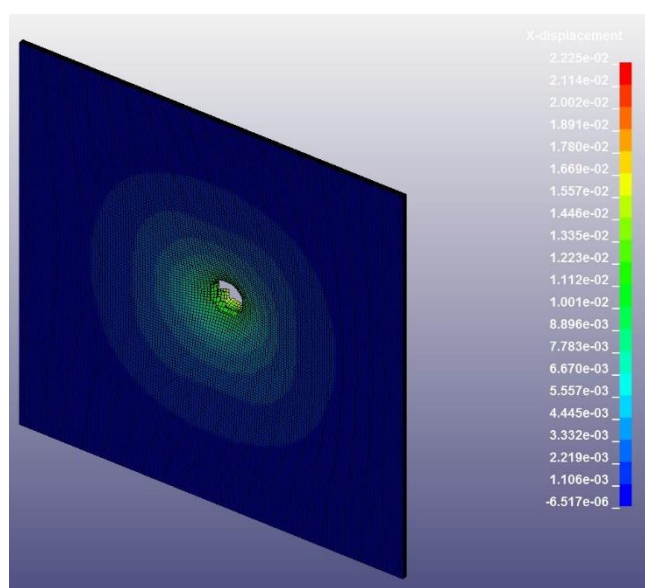
Σχήμα 5.15. Κατανομή κάθετων ταχυτήτων (σε m/s) τη στιγμή της έναρξης της διάτρησης.



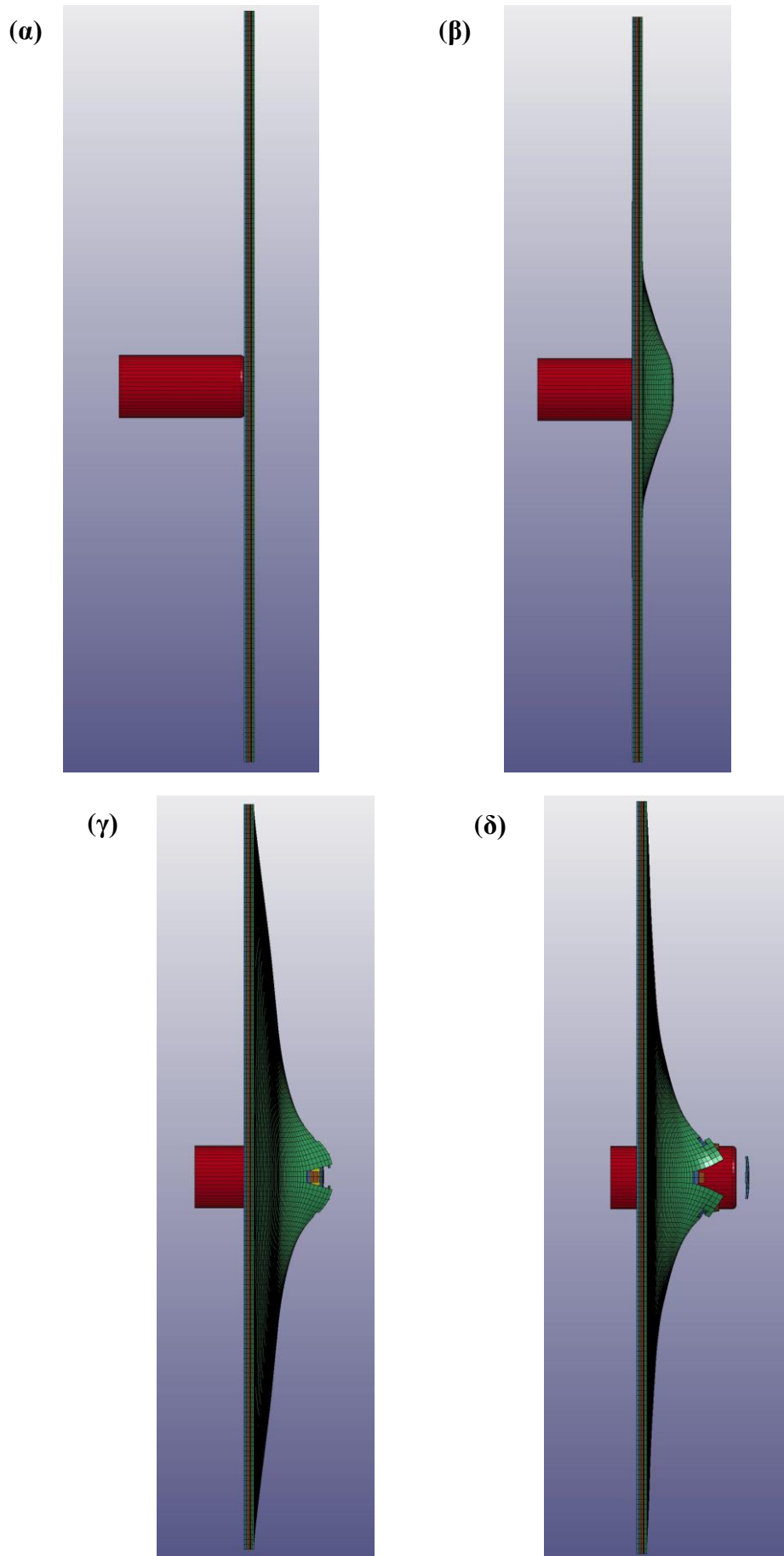
Σχήμα 5.16. Κάθετες μετατοπίσεις (σε m) τη στιγμή της έναρξης της διάτρησης



Σχήμα 5.17. Κατανομή κάθετων ταχυτήτων (σε m/s) αφού ολοκληρωθεί η διάτρηση.



Σχήμα 5.18. Κάθετες μετατοπίσεις (σε m) αφού ολοκληρωθεί η διάτρηση.



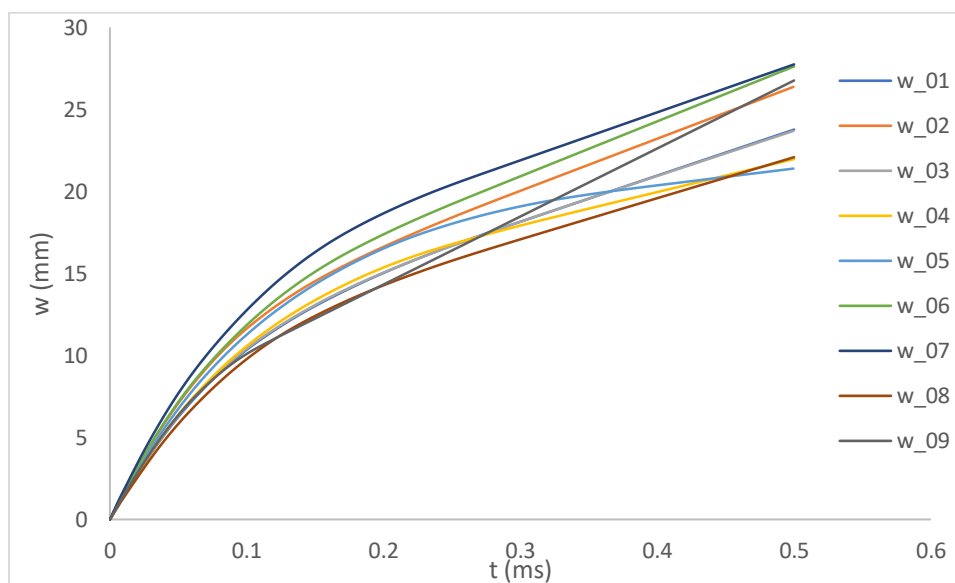
Σχήμα 5.19. Στιγμιότυπα βαλλιστικής κρούσης. (α) Στιγμή έναρξης της κρούσης. (β) Στιγμή πριν προκληθεί αστοχία. (γ) Στιγμή κατά την έναρξη της διάτρησης. (δ) Στιγμή αφού έχει ολοκληρωθεί η διάτρηση.

### 5.3.2 Συγκριτικά Διαγράμματα

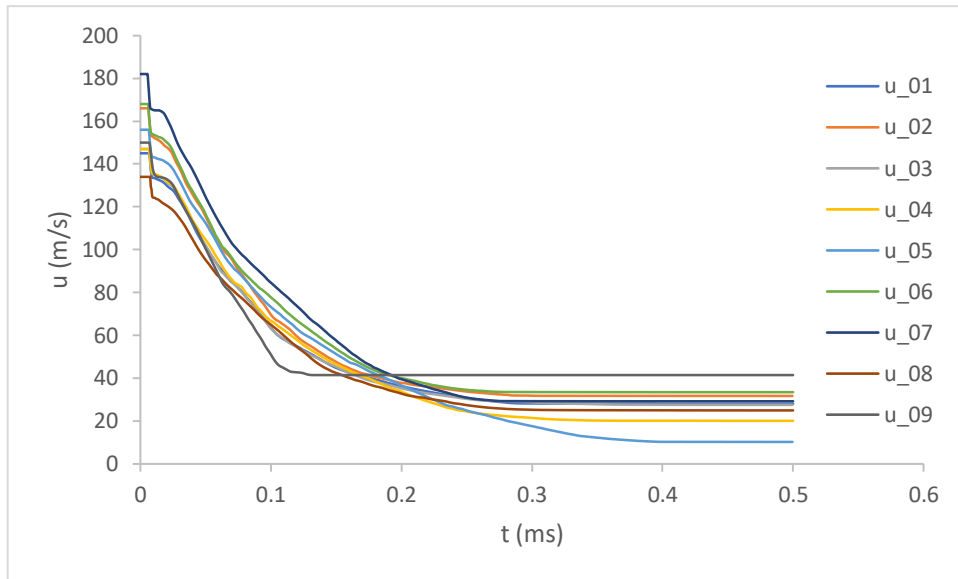
Στη προσπάθεια για να εξαχθούν συμπεράσματα για την συμπεριφορά των πλακών GLARE ίσου πάχους σε βαλλιστική κρούση χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της §5.2 κατασκευάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα  $w-t$ ,  $u-t$ ,  $E_k-t$ ,  $E_{ab}-t$ ,  $P-t$ ,  $u-w$ ,  $E_k-w$ ,  $E_{ab}-w$  και  $P-w$ . Στα διαγράμματα αυτά, αλλά και στη συνέχεια της παραγράφου, για λόγους απλοποίησης ακολουθήθηκε η ακόλουθη συντομογραφία:

1. GLARE 2A-3/2-0.5 συμβολίζεται ως «01»
2. GLARE 2A-4/3-0.31 συμβολίζεται ως «02»
3. GLARE 3 3/2-0.5 συμβολίζεται ως «03»
4. GLARE 4A-3/2-0.42 συμβολίζεται ως «04»
5. GLARE 5-3/2-0.33 συμβολίζεται ως «05»
6. GLARE 3-4/3-0.31 συμβολίζεται ως «06»
7. GLARE 4A-4/3-0.22 συμβολίζεται ως «07»
8. GLARE 5-2/1-0.75 συμβολίζεται ως «08»
9. Πλάκα Al 2024-T3 συμβολίζεται ως «09»

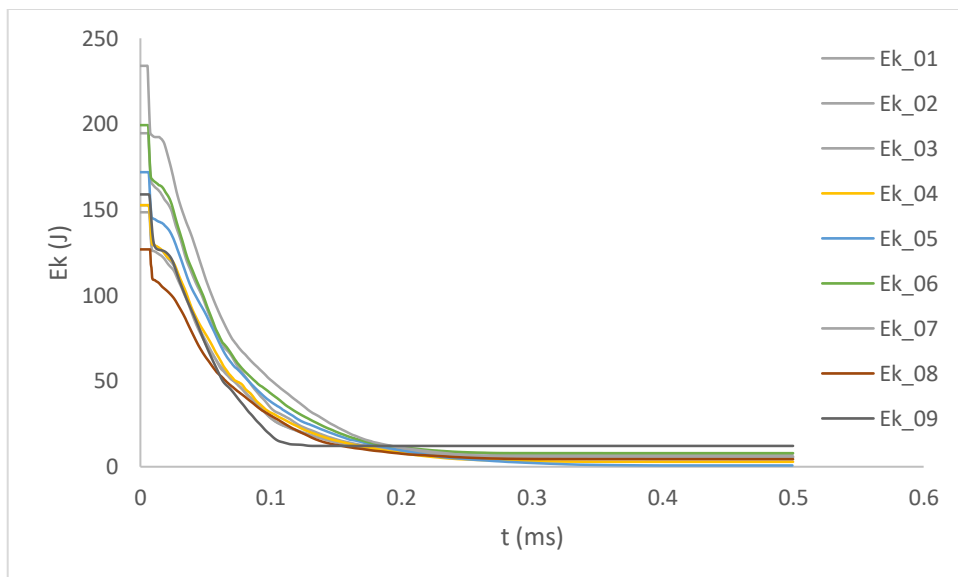
Έτσι, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα.



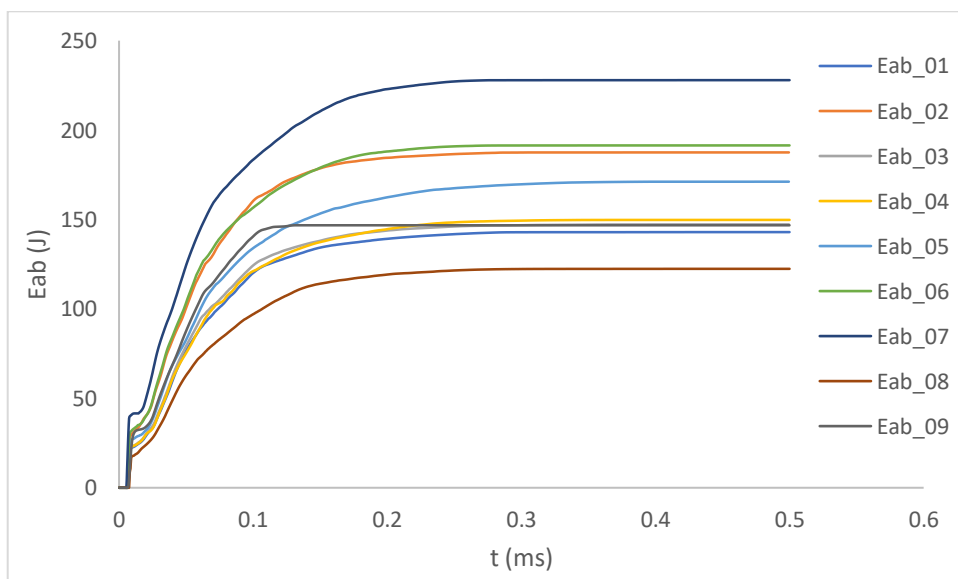
Διάγραμμα 5.34. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



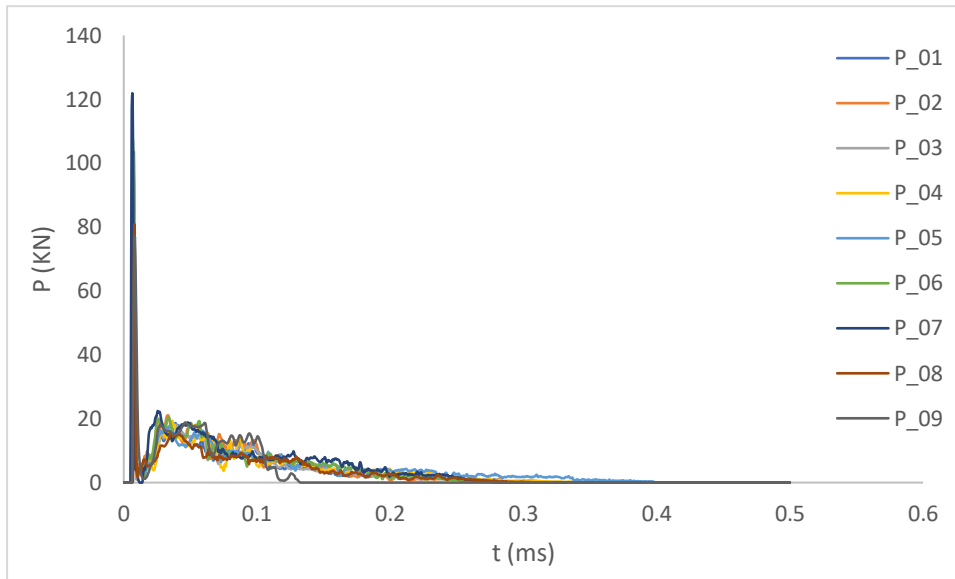
Διάγραμμα 5.35. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



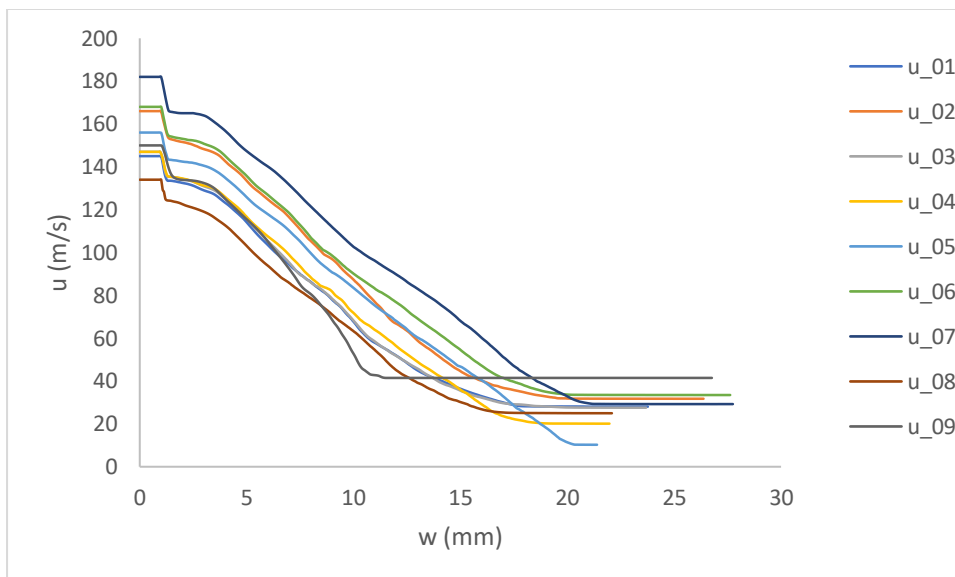
Διάγραμμα 5.36. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



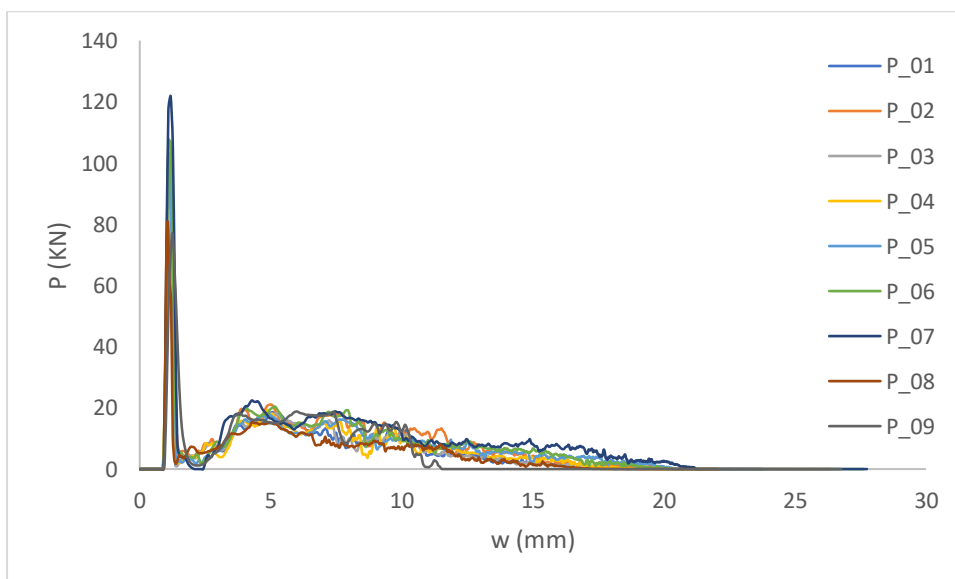
Διάγραμμα 5.37. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



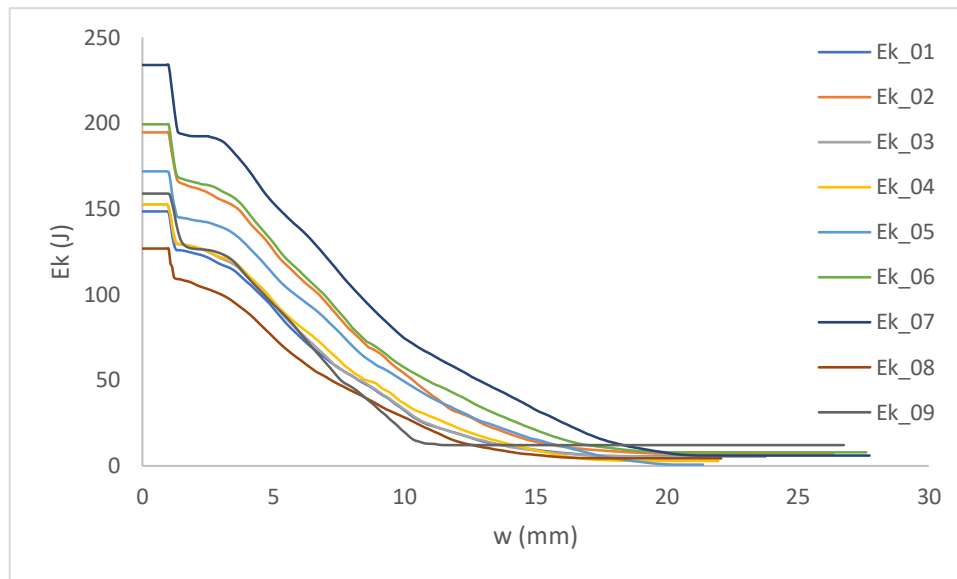
Διάγραμμα 5.38. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου (P-t).



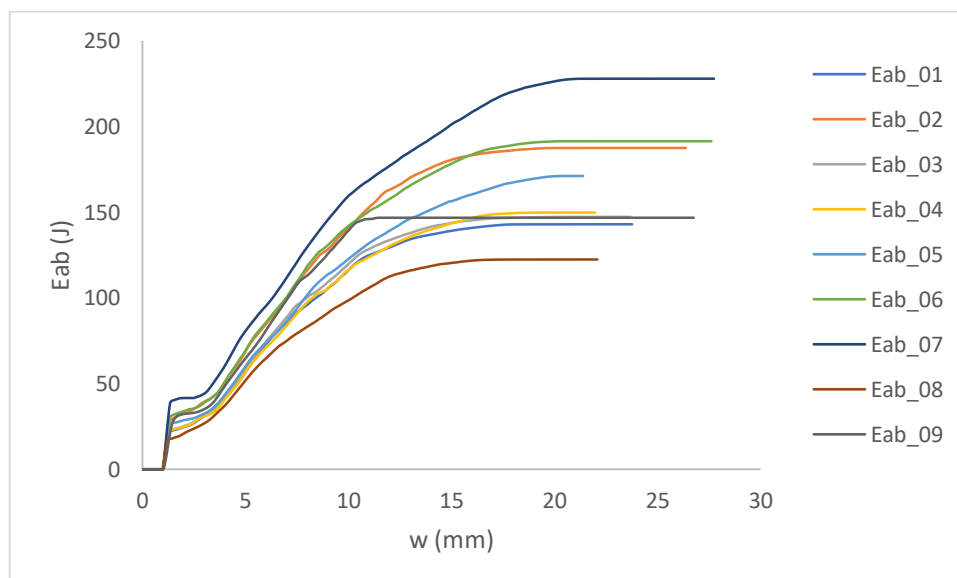
Διάγραμμα 5.39. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης (u-w).



Διάγραμμα 5.40. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης (P-w).



Διάγραμμα 5.41. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης. ( $E_k-w$ ).



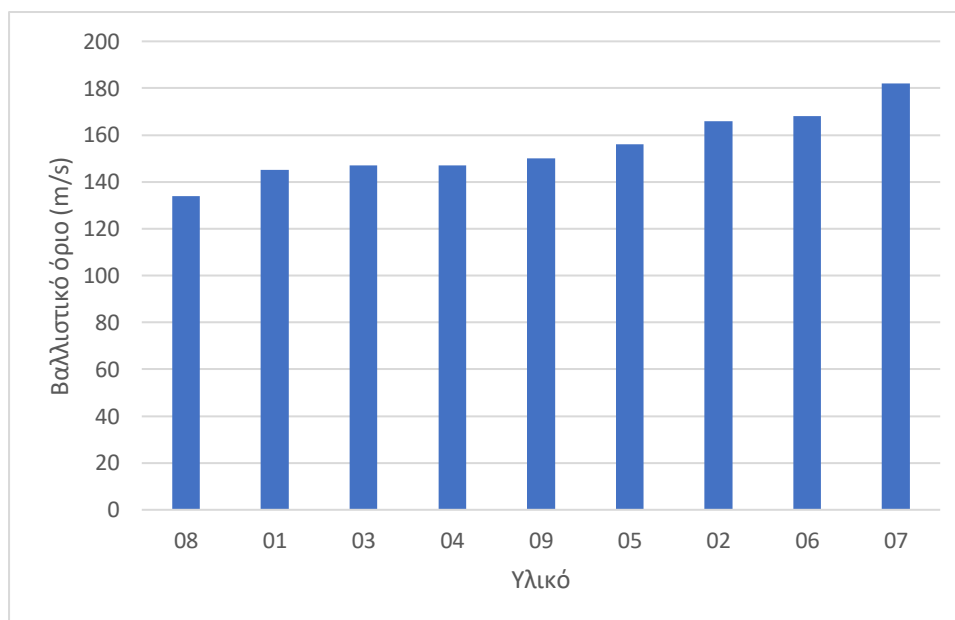
Διάγραμμα 5.42. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας-χρόνου ( $E_{ab}-w$ ).

Κατά την μελέτη της συμπεριφοράς των πλακών GLARE ίσου πάχους σε βαλλιστική κρούση δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο βαλλιστικό όριο τους και στο τρόπο που αυτό επηρεάζεται από διάφορες ιδιότητες όπως το κλάσμα όγκου του μετάλλου (MVF), ο αριθμός των στρώσεων αλουμινίου και σύνθετου υλικού καθώς και ο προσανατολισμός τους. Επίσης, εξετάστηκε η σχέση μεταξύ βαλλιστικού ορίου και ενεργειών όπως είναι η απορροφούμενη ενέργεια, η ειδική απορροφούμενη ενέργεια (S.Eab) και η ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E). Στον Πίνακα 5.11 παρουσιάζονται συνοπτικά χρήσιμα δεδομένα για την ανάλυση.

ΥΛΙΚΟ	Συντ/φία	Βαλλιστικό όριο (m/s)	Αριθμός Στρώσεων AI & GE*	MVF (%)	Eab (J)	S.Eab (J/kg)	S.P.E. (J/kg)
GLARE 2A-3/2-0.5	01	145	7	75.00	142.9	1196.2	1242.6
GLARE 2A-4/3-0.31	02	166	10	62.31	187.5	1640.9	1703.2
GLARE 3 3/2-0.5	03	147	7	75.00	147.3	1232.3	1277.1
GLARE 4A-3/2-0.42	04	147	9	64.18	149.8	1289.9	1314.5
GLARE 5-3/2-0.33	05	156	11	49.75	171.1	1560.3	1567.1
GLARE 3-4/3-0.31	06	168	10	62.31	191.4	1675.2	1744.5
GLARE 4A-4/3-0.22	07	182	13	43.89	227.9	2103.4	2159.1
GLARE 5-2/1-0.75	08	134	6	75.00	122.4	1024.4	1061.2
Al plate	09	150	1	100.00	146.8	1140.6	1235.0

Πίνακας 5.11. Συνοπτικά αποτελέσματα. (\*GE= S2-Glass/epoxy)

Τοποθετώντας τα μελετώμενα υλικά με αύξουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό όριο προκύπτει το Διάγραμμα 5.43.

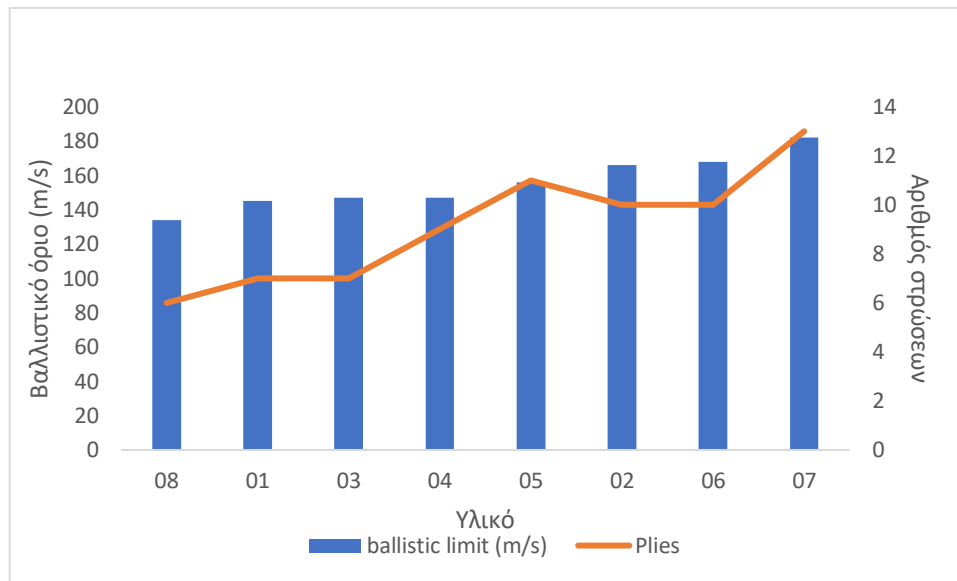


Διάγραμμα 5.43. Ταξινόμηση υλικών με αύξουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό όριο.

### 5.3.3 Επίδραση του αριθμού στρώσεων AI & GE στο βαλλιστικό όριο

Στο Διάγραμμα 5.44 οι μελετώμενες πλάκες GLARE έχουν τοποθετηθεί με αύξουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό όριο και επίσης, έχει σχεδιαστεί η καμπύλη η οποία αναπαριστά των αριθμό των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται κάθε πλάκα.

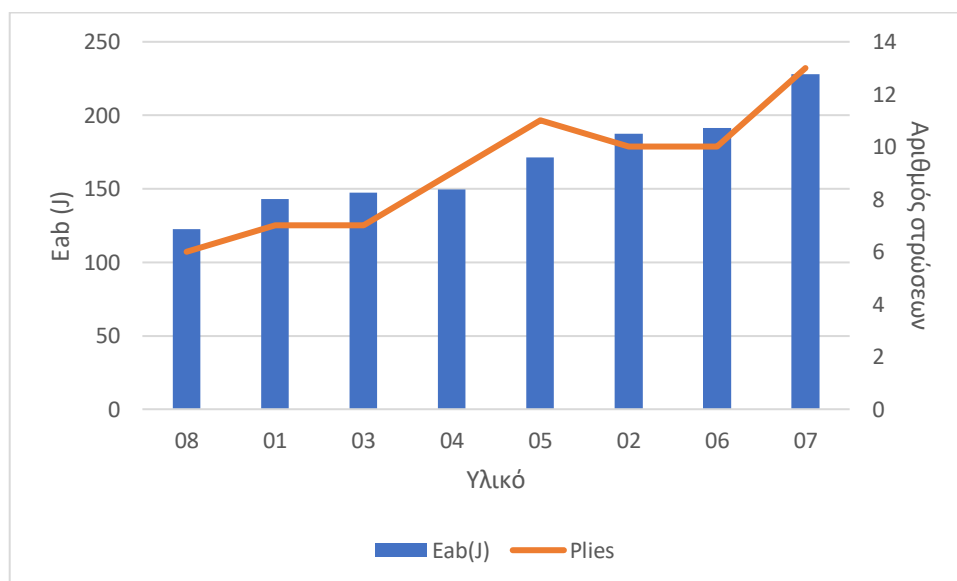
Στο Διάγραμμα 5.44 είναι εμφανές ότι στις πλάκες GLARE υπάρχει η τάση όσο αυξάνεται ο αριθμός των στρώσεων να αυξάνεται το βαλλιστικό όριο. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όσο περισσότερες είναι οι στρώσεις τόσο περισσότερες είναι οι μεταξύ τους διεπιφάνειες, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν χώρα περισσότεροι αποχωρισμοί (delamination και debonding). Οι αποχωρισμοί αυτοί είναι ο κύριος μηχανισμός απορρόφησης της κινητικής ενέργειας του βλήματος κατά την βαλλιστική κρούση [88] και συνεπώς, όσο περισσότεροι είναι τόσο μεγαλύτερη ενέργεια απαιτείται για διάτρηση και άρα τόσο μεγαλύτερο βαλλιστικό όριο. Σημειώνεται ότι το GLARE «05» αποκλίνει ελαφρώς από την συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών ως προς την σχέση βαλλιστικού ορίου και αριθμού στρώσεων.



Διάγραμμα 5.44. Βαλλιστικό όριο και αριθμός στρώσεων πλακών GLARE.

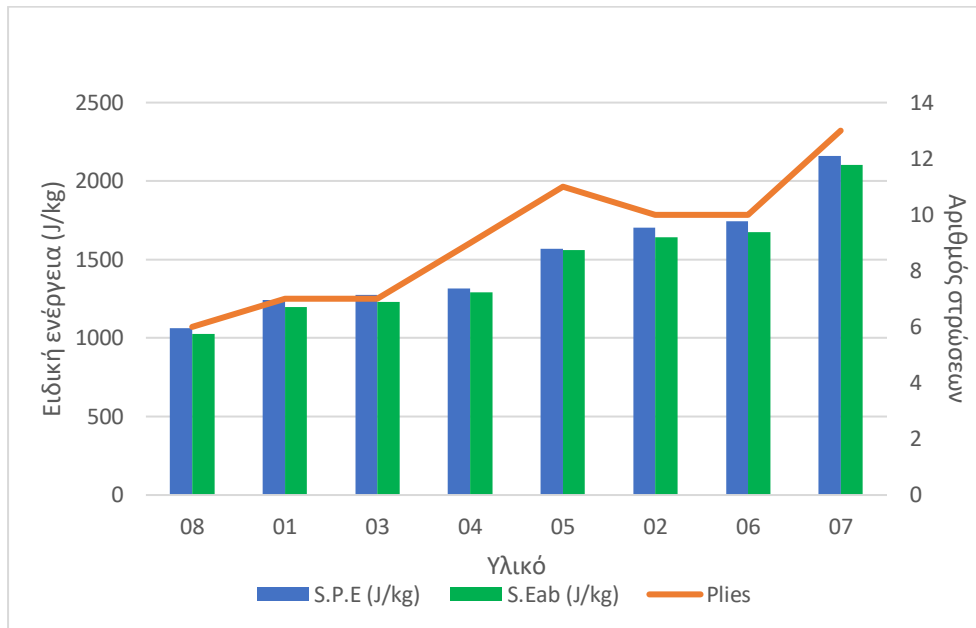
### 5.3.4 Επίδραση του αριθμού στρώσεων AI & GE στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E

Σε αντιστοιχία με τα προαναφερθέντα στην §5.3.3 η ενέργεια Eab που απορροφάται από την πλάκα GLARE κατά τη διάρκεια της βαλλιστικής κρούσης αυξάνει όσο αυξάνει ο αριθμός των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται. Αυτό αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 5.45, όπου οι μελετώμενες πλάκες GLARE έχουν τοποθετηθεί με αύξουσα σειρά ως προς την απορροφούμενη ενέργεια, ενώ έχει σχεδιαστεί και καμπύλη η οποία αναπαριστά τον αριθμό των στρώσεων για κάθε πλάκα. Όπως είναι αναμενόμενο, το Διάγραμμα 5.45 βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με το Διάγραμμα 5.44. Σημειώνεται ότι το GLARE «05» αποκλίνει ελαφρώς από την συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών ως προς την σχέση απορροφούμενης ενέργειας και αριθμού στρώσεων.



Διάγραμμα 5.45. Απορροφούμενη ενέργεια (Eab) και αριθμός στρώσεων πλακών GLARE.

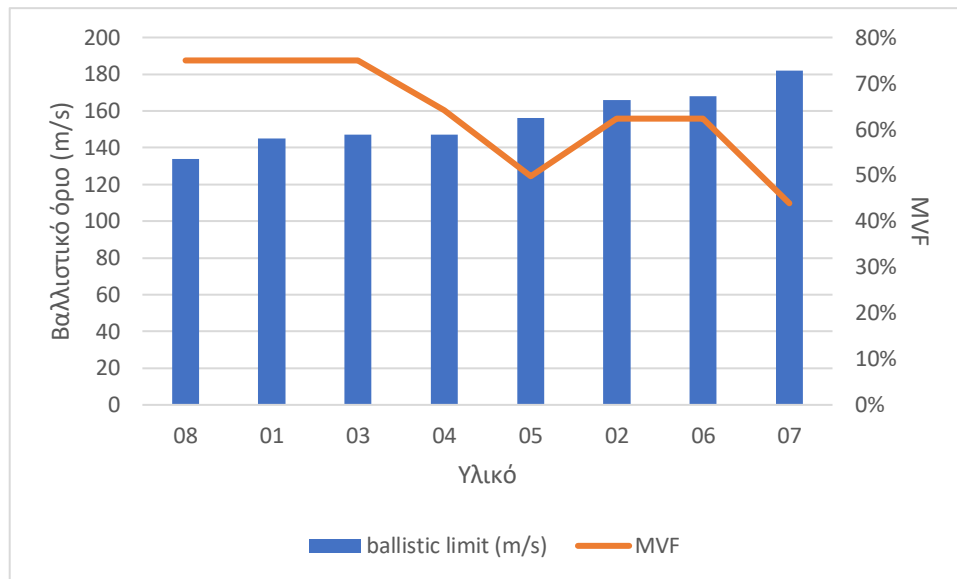
Αντίστοιχη είναι η επίδραση του αριθμού στρώσεων AI & GE στην ειδική απορροφούμενη ενέργεια (S.Eab) και στην ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E). Ως ειδική απορροφούμενη ενέργεια S.Eab ορίζεται η απορροφούμενη ενέργεια Eab ανά μονάδα μάζας της πλάκας, ενώ ως ειδική ενέργεια διάτρησης S.P.E ορίζεται η αρχική κινητική ενέργεια του βλήματος στη βαλλιστική ταχύτητα ανά μονάδα μάζας της πλάκας. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.46 όσο αυξάνεται ο αριθμός των στρώσεων τόσο αυξάνεται η εκάστοτε ειδική ενέργεια και συνεπώς τόσο βελτιώνεται η βαλλιστική συμπεριφορά της πλάκας GLARE. Σημειώνεται ότι το GLARE «05» αποκλίνει ελαφρώς από την συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών ως προς την σχέση των S.Eab και S.P.E με τον αριθμό στρώσεων.



Διάγραμμα 5.46. Ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E) και ειδική απορροφούμενη ενέργεια (S.Eab) σε συνάρτηση με τον αριθμό στρώσεων.

### 5.3.5 Επίδραση του MVF στο βαλλιστικό όριο

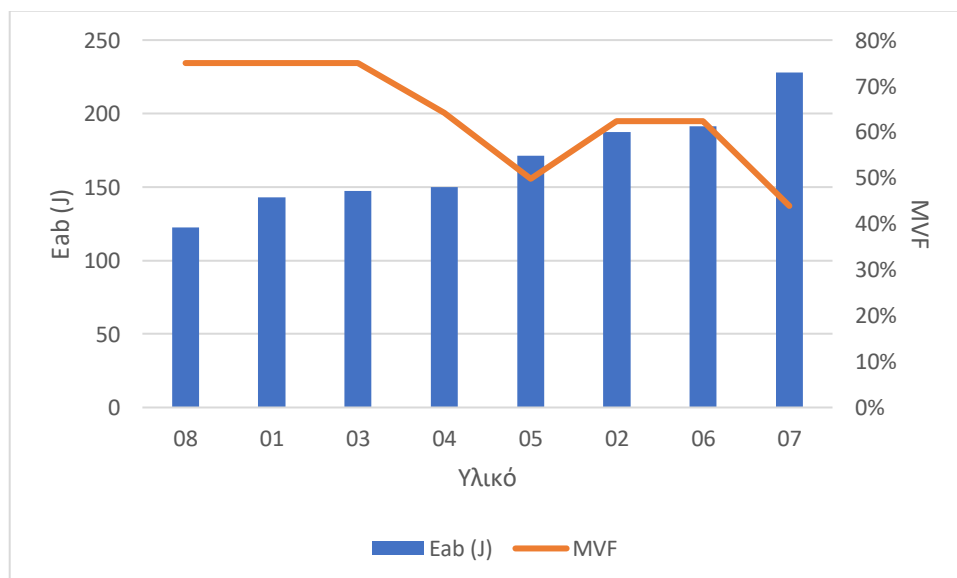
Στο Διάγραμμα 5.47 οι μελετώμενες πλάκες GLARE έχουν τοποθετηθεί με αύξουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό όριο και επίσης, έχει σχεδιαστεί η καμπύλη η οποία αναπαριστά το κλάσμα MVF. Παρατηρείται ότι το βαλλιστικό όριο μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το κλάσμα MVF των πλακών GLARE. Με λίγα λόγια όσο αυξάνεται η κατ' όγκο περιεκτικότητα μίας πλάκας GLARE σε αλουμίνιο, τόσο μειώνεται το βαλλιστικό της όριο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο εμφανίζει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τις στρώσεις σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα μία πλάκα GLARE να αποκτά πιο ψαθυρή συμπεριφορά όταν αυξάνεται το MVF. Όσο πιο ψαθυρή γίνεται μία πλάκα GLARE τόσο πιο εύκολα διατρύπεται και συνεπώς τόσο μικρότερο βαλλιστικό όριο εμφανίζει. Σημειώνεται ότι το GLARE «05» αποκλίνει ελαφρώς από την συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών ως προς την σχέση βαλλιστικού ορίου και κλάσματος MVF.



Διάγραμμα 5.47. Βαλλιστικό όριο και MVF πλακών GLARE.

### 5.3.6 Επίδραση MVF στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E

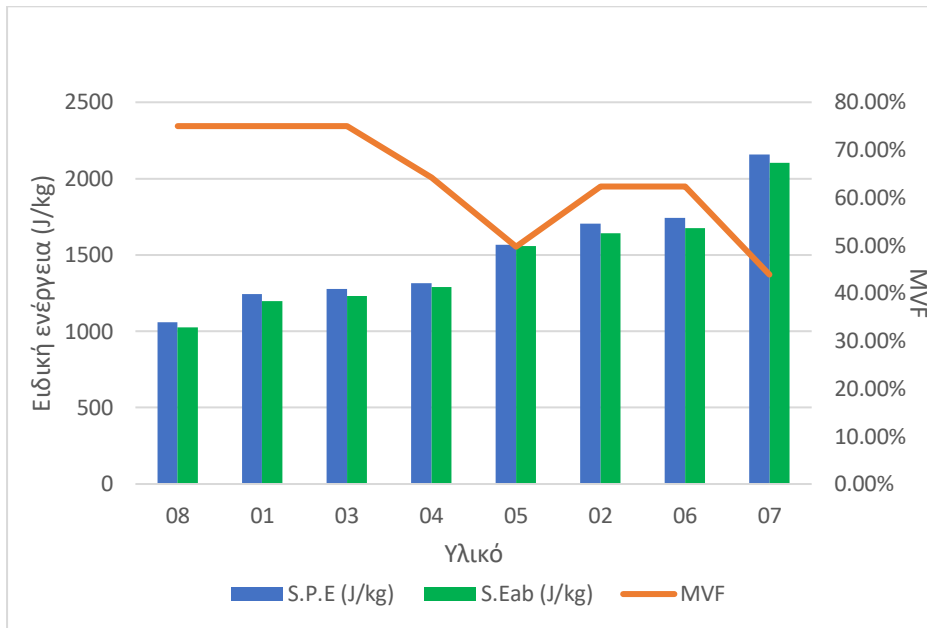
Σε αντιστοιχία με τα προαναφερθέντα η ενέργεια Eab που απορροφάται από την πλάκα GLARE κατά τη διάρκεια της βαλλιστικής κρούσης αυξάνεται όσο μειώνεται το κλάσμα MVF. Αυτό αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 5.48, όπου οι μελετώμενες πλάκες GLARE έχουν τοποθετηθεί με αύξουσα σειρά ως προς την απορροφούμενη ενέργεια, ενώ έχει σχεδιαστεί και καμπύλη η οποία απεικονίζει το κλάσμα MVF. Όπως είναι αναμενόμενο, το Διάγραμμα 5.48 βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με το Διάγραμμα 5.47. Σημειώνεται ότι το GLARE «05» αποκλίνει ελαφρώς από την συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών ως προς την σχέση απορροφούμενης ενέργειας και κλάσματος MVF.



Διάγραμμα 5.48. Απορροφούμενη ενέργεια (Eab) και MVF πλακών GLARE.

Αντίστοιχη είναι η επίδραση του κλάσματος MVF στην ειδική απορροφούμενη ενέργεια (S.Eab) και στην ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.49 όσο μειώνεται το κλάσμα MVF τόσο αυξάνεται η εκάστοτε ειδική ενέργεια και συνεπώς τόσο

βελτιώνεται η βαλλιστική συμπεριφορά της πλάκας GLARE. Σημειώνεται ότι το GLARE «05» αποκλίνει ελαφρώς από την συμπεριφορά των υπόλοιπων υλικών ως προς την σχέση των S.Eab και S.P.E με το κλάσμα MVF.



Διάγραμμα 5.49. Ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E) και ειδική απορροφούμενη ενέργεια (S.Eab) σε συνάρτηση με το κλάσμα MVF.

Παρόμοια ευρήματα έχουν βρεθεί και από τους Zarei H. et al. [113], οι οποίοι διαπίστωσαν σε δοκίμια GLARE 5, ότι όσο μικρότερο είναι το πάχος της στρώσης αλουμινίου τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική ενέργεια S.P.E.

### 5.3.7 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στο βαλλιστικό όριο

Ένας ακόμη ενδιαφέρων παράγοντας που εξετάστηκε είναι η επίδραση του προσανατολισμού των ινών των στρώσεων σύνθετου υλικού στο βαλλιστικό όριο. Οι πλάκες GLARE «01» και «03» διαθέτουν την ίδια δομή, δηλαδή ίδιο αριθμό στρώσεων και ίδιο πάχος στρώσεων αλουμινίου με την διαφορά, όμως, ότι οι στρώσεις σύνθετου υλικού είναι τοποθετημένες με διαφορετικούς προσανατολισμούς. Στη μεν πλάκα «01» όλες οι στρώσεις έχουν τοποθετηθεί με προσανατολισμό 0°, στη δε πλάκα «03» οι διαδοχικές στρώσεις έχουν τοποθετηθεί με σταυρωτή διαστρωμάτωση (cross-ply), δηλαδή με κάθετο μεταξύ τους προσανατολισμό 0° και 90°. Το ίδιο συμβαίνει και με τις πλάκες «02» και «06».

Από τον Πίνακα 5.11 παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις οι πλάκες με σταυρωτή διαστρωμάτωση εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερο βαλλιστικό όριο (κατά 2m/s). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δύο διαδοχικές στρώσεις σύνθετου υλικού με διαφορετικό προσανατολισμό εμφανίζουν διαφορετικό μέτρο ακαμψίας (bending stiffness), με αποτέλεσμα η αποκόλλησή τους να είναι πιο έντονη [88] και έτσι να απορροφάται μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από το βλήμα, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο βαλλιστικό όριο.

Η εν λόγω παρατήρηση έρχεται σε συμφωνία με τους Liu Y. and Liaw B. [44], οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά πλακών FML σε κρούση με αντικείμενα απορριπτόμενα με το ίδιο βάρος και διαπίστωσαν ότι οι πλάκες GLARE 3 με διασταυρούμενες στρώσεις εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με τις πλάκες GLARE 2 με στρώσεις σύνθετου προσανατολισμένες με 0°.

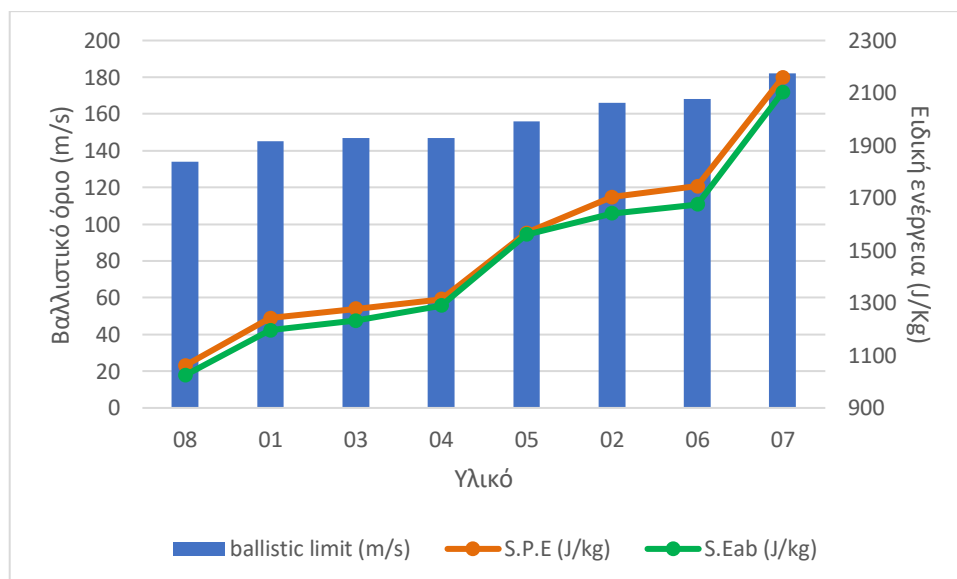
Όσον αφορά στο μικρό μέγεθος της διαφοράς μεταξύ σταυρωτής και μονοκατευθυντήριας διαστρωμάτωσης, που παρατηρήθηκε κατά την προσομοίωσή μας, αυτό έρχεται σε συμφωνία με τους A. S. Yaghoubi et al. [88], [89], οι οποίοι μελέτησαν πειραματικά και αριθμητικά πλάκες GLARE 5-3/2 και διαπίστωσαν ότι η διαστρωμάτωση με διαφορετικούς προσανατολισμούς δεν επιφέρει μεγάλες αλλαγές στο βαλλιστικό όριο. Επίσης, έρχεται σε συμφωνία με αναλυτικά μοντέλα [58],[114],[115] και πειραματικά δεδομένα [55] που έχουν αναπτυχθεί για κρούσης χαμηλών ταχυτήτων σε πλάκες GLARE, σύμφωνα με τα οποία δεν προκύπτει σημαντική επίδραση του προσανατολισμού των στρώσεων σύνθετου υλικού στη συμπεριφορά των πλακών GLARE.

### 5.3.8 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E

Σε αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω για τη σχέση βαλλιστικού ορίου και προσανατολισμού ινών, έτσι και εδώ παρατηρείται ότι οι ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στις πλάκες με σταυρωτή διαστρωμάτωση.

### 5.3.9 Βαλλιστικό όριο και ειδικές ενέργειες

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του GLARE είναι οι καλές μηχανικές ιδιότητές του σε σχέση με το βάρος του, γεγονός που έπαιξε σημαντικό ρόλο στη καθιέρωσή του στην Αεροναυπηγική (Κεφάλαιο 1). Το πλεονέκτημα αυτό επιβεβαιώνεται στο Διάγραμμα 5.50, όπου είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο βαλλιστικό όριο έχει μία πλάκα GLARE τόσο μεγαλύτερη ειδική απορροφούμενη ενέργεια και ειδική ενέργεια διάτρησης εμφανίζει. Ως ειδική απορροφούμενη ενέργεια ορίζεται η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας της πλάκας, ενώ ως ειδική ενέργεια διάτρησης ορίζεται η αρχική κινητική ενέργεια του βλήματος στη βαλλιστική ταχύτητα ανά μονάδα μάζας της πλάκας.



Διάγραμμα 5.50. Βαλλιστικό όριο, ειδική απορροφούμενη ενέργεια (Eab) και ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E.).

### 5.3.10 Σύνοψη

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν μέχρι στιγμής στην §5.3, προκύπτει ότι η βαλλιστική συμπεριφορά των πλακών GLARE ίδιου πάχους και ίδιου κράματος αλουμινίου επηρεάζεται από δύο κυρίως παράγοντες: τον αριθμό των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται η πλάκα GLARE και το κλάσμα MVF, ενώ δύναται να βελτιωθεί ελάχιστα ανάλογα με τον προσανατολισμό των στρώσεων σύνθετου υλικού κατά την διαστρωμάτωση. Πιο συγκεκριμένα, καλύτερη βαλλιστική συμπεριφορά επιτυγχάνεται όταν ο αριθμός των στρώσεων AI και GE αυξάνεται, αλλά και όταν το κλάσμα MVF μειώνεται. Αυτό μεταφράζεται σε χρήση αφενός περισσότερων στρώσεων σύνθετου υλικού και αφετέρου λεπτότερων στρώσεων AI, αντίστοιχα. Τέλος, την βαλλιστική συμπεριφορά δύναται να βελτιώσει ελαφρώς η υιοθέτηση σταυρωτής διαστρωμάτωσής έναντι της μονοκατευθυντήριας.

## 6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ GLARE ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ AL

### 6.1 Γενικά

Με αφορμή την ελάχιστη απόκλιση που παρατηρήθηκε μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών που προέκυψαν από την ανάλυσή μας για τις διαμορφώσεις GLARE του Κεφαλαίου 4, αποφασίστηκε σε αυτές τις διαμορφώσεις οι στρώσεις Al 2024-T3 να αντικατασταθούν από στρώσεις άλλων κραμάτων αλουμινίου και να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε βαλλιστική κρούση. Σημειώνεται ότι για τα ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα που προέκυψαν τελικά δεν υπάρχουν αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Οι πλάκες, λοιπόν, που μοντελοποιήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο είναι οι εξής:

- GLARE 5 3/2-0.508 συνολικού πάχους 0.1in (2.54mm)
- GLARE 5 3/2-0.3048 συνολικού πάχους 0.076in (1.93mm)
- GLARE 5 2/1-0.508 συνολικού πάχους 0.06in (1.53mm)
- Πλάκα αλουμινίου πάχους 3.2mm (0.125in)
- Πλάκα αλουμινίου πάχους 1.6mm (0.063in)

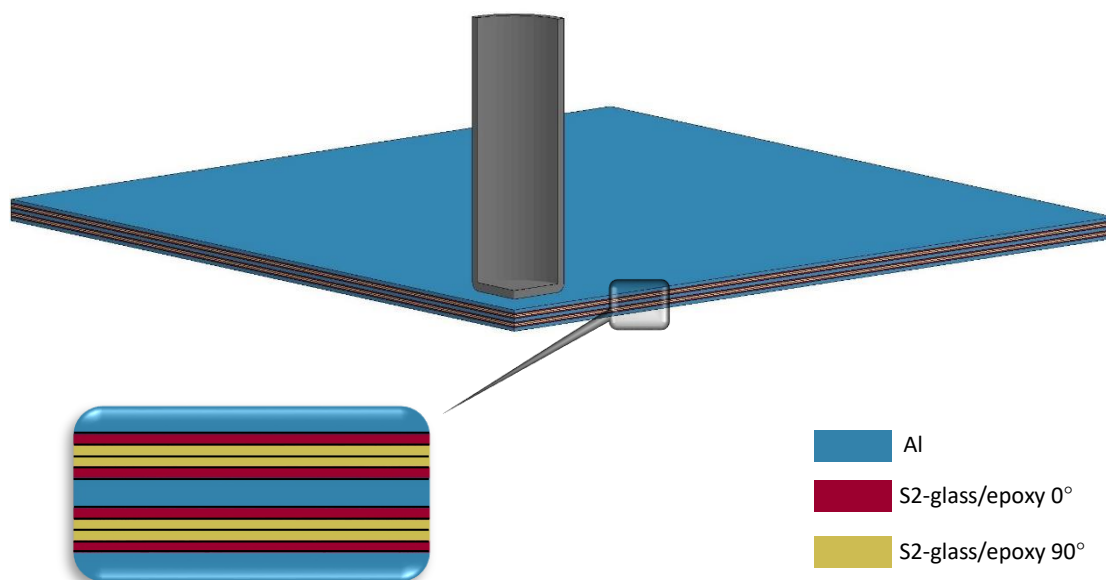
Αντίστοιχα, τα κράματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις στρώσεις αλουμινίου είναι τα ακόλουθα:

- Al 2024-T351
- Al 2024-O
- Al 6061-T6
- Al 7075-T6
- Al 7039
- Al 2024-T3

Η μοντελοποίηση των ανωτέρω πλακών έγινε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, ενώ για κάθε κράμα χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες που αναφέρονται στην §3.2. Έτσι, για κάθε πλάκα κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, ένα με αραιό κάνναβο και ένα με πυκνό, προκειμένου να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων ως προς το βαλλιστικό όριο. Παράλληλα, έγινε έλεγχος ορθότητας της διακριτοποίησης και των επαφών (contacts) που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση μέσω των διαγραμμάτων των ενεργειών hourglass και sliding αντίστοιχα. Επιπλέον, με την βοήθεια των δεδομένων που καταγράφονται από το λογισμικό ANSYS/LS-DYNA κατά την επίλυση, κατασκευάστηκε πληθώρα διαγραμμάτων με σκοπό να μελετηθεί όσο το δυνατόν πληρέστερα η συμπεριφορά των εν λόγω πλακών σε βαλλιστική κρούση. Επισημαίνεται ότι για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των πυκνών καννάβων.

## 6.2 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508.

Τα αποτελέσματα της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 για τα διάφορα κράματα αλουμινίου παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

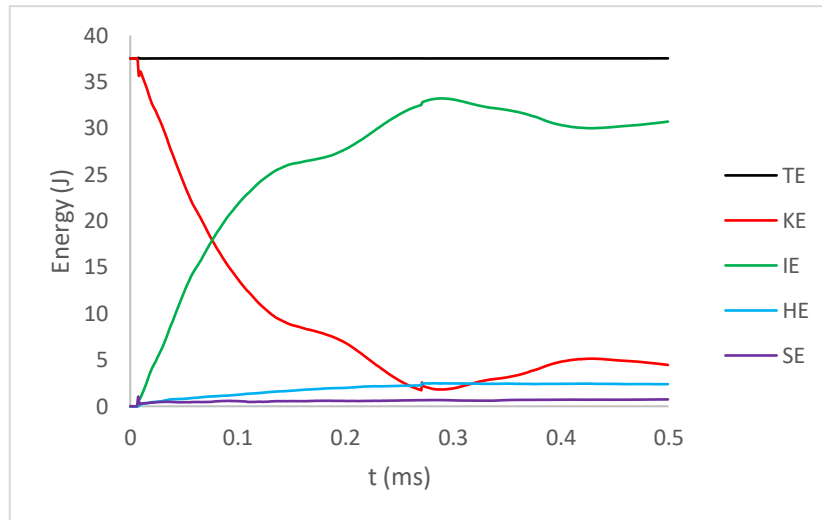
### 6.2.1 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T351

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T351 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	78750	146	14.62
Αραιός	39329	171	-

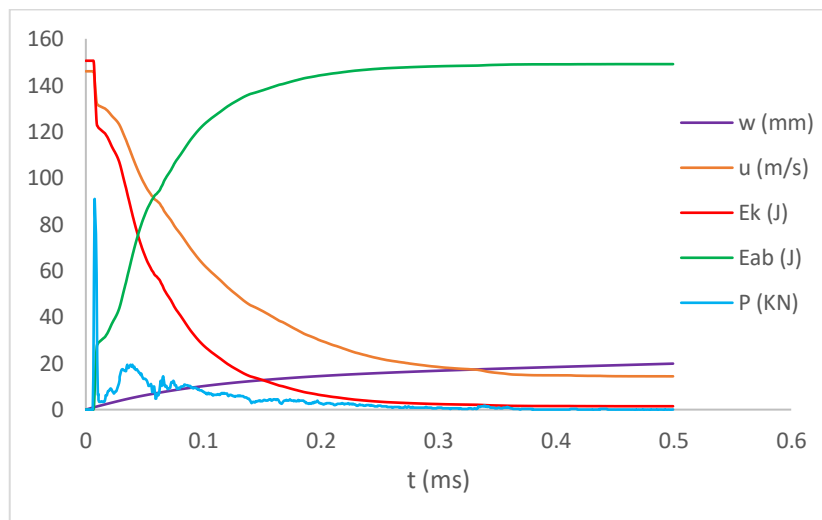
Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T351.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.1. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

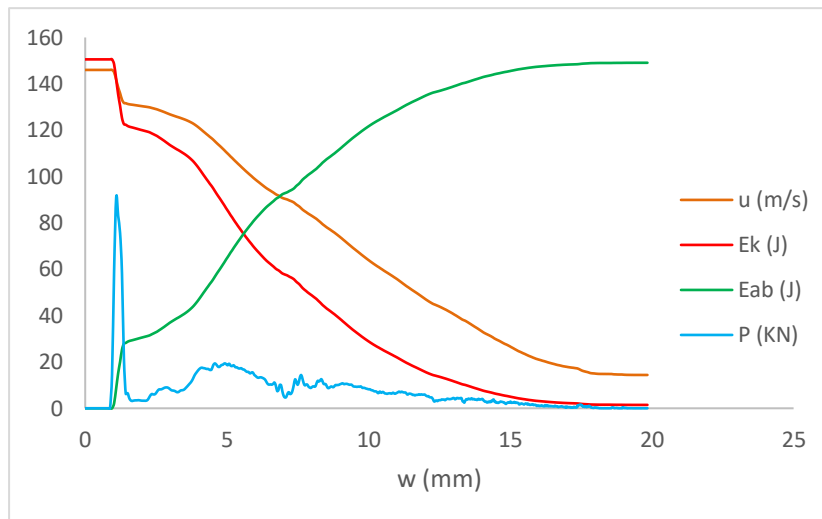


Διάγραμμα 6.1. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T351. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T351 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.2: Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-508 κράματος Al 2024-T351.



Διάγραμμα 6.3: Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-508 κράματος Al 2024-T351.

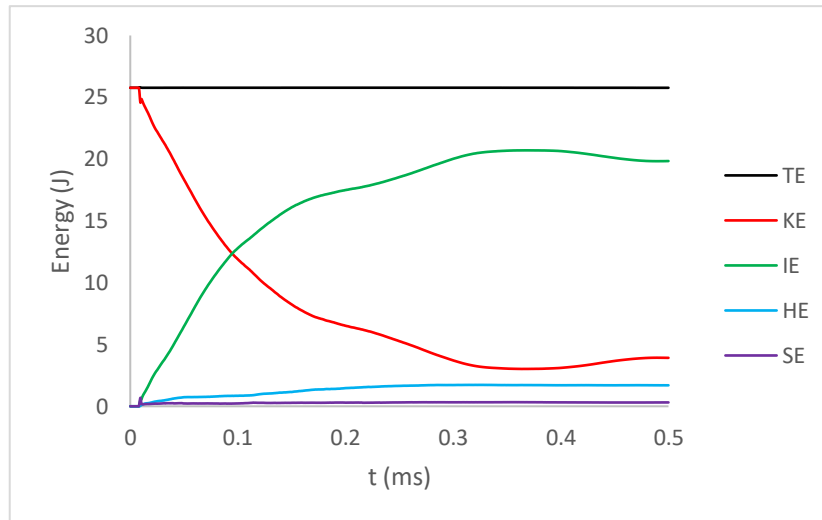
### 6.2.2 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	78750	121	14.78
Αραιός	39329	141	-

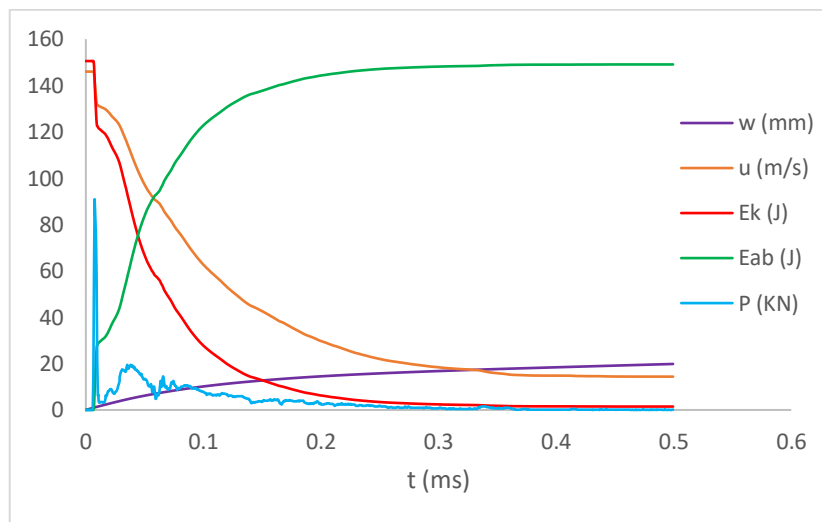
Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.4. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

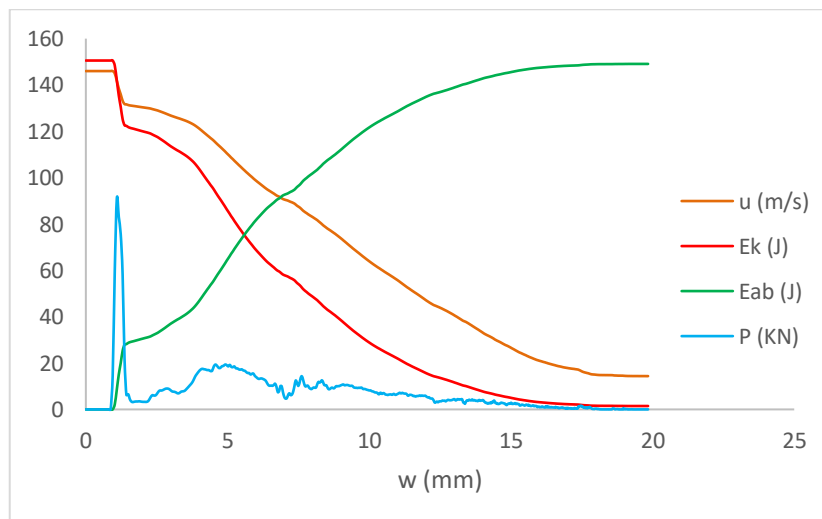


Διάγραμμα 6.4. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.5. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P-t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O.



Διάγραμμα 6.6. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P-w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-O.

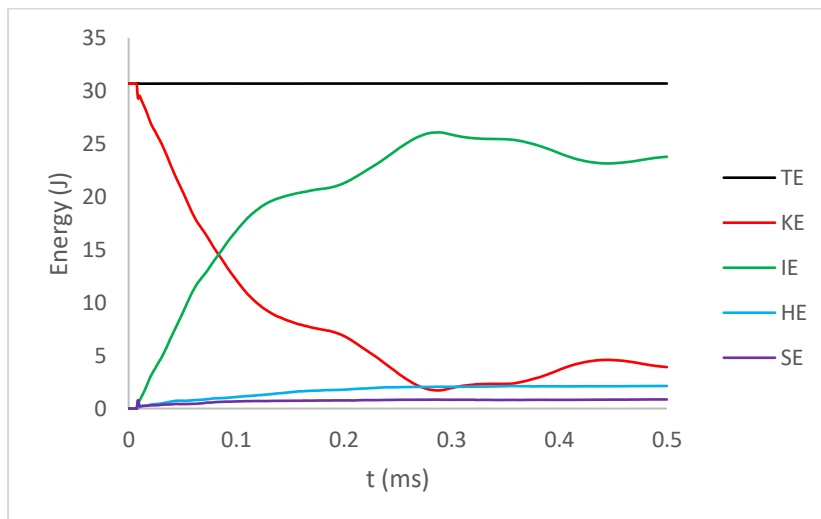
### 6.2.3 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	78750	132	14.84
Αραιός	39329	155	-

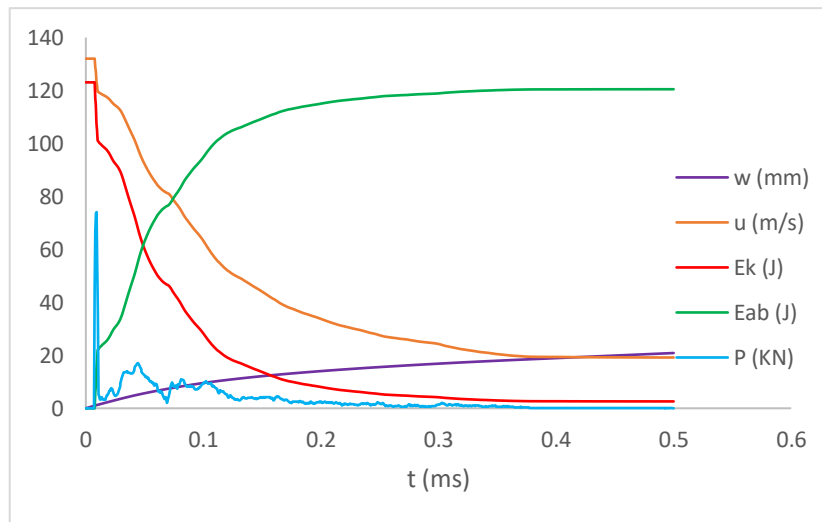
Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.7. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

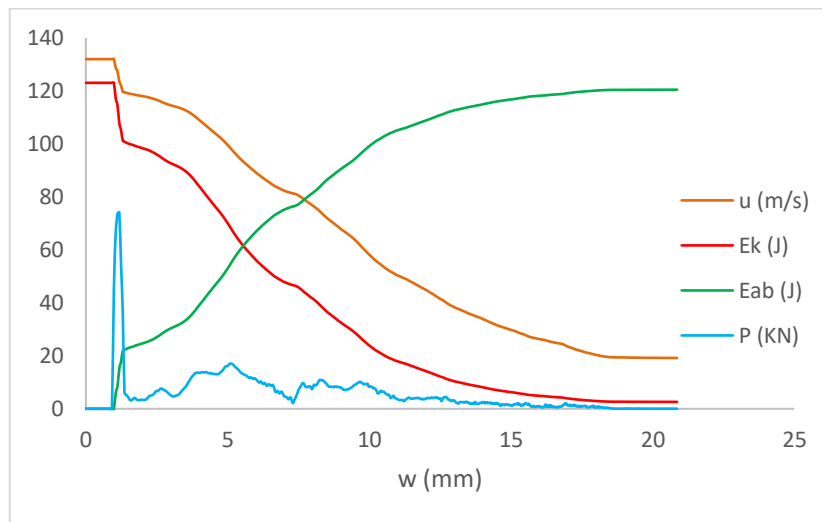


Διάγραμμα 6.7. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.8. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P-t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6.



Διάγραμμα 6.9. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P-w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 6061-T6.

### 6.2.4 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7075-T6

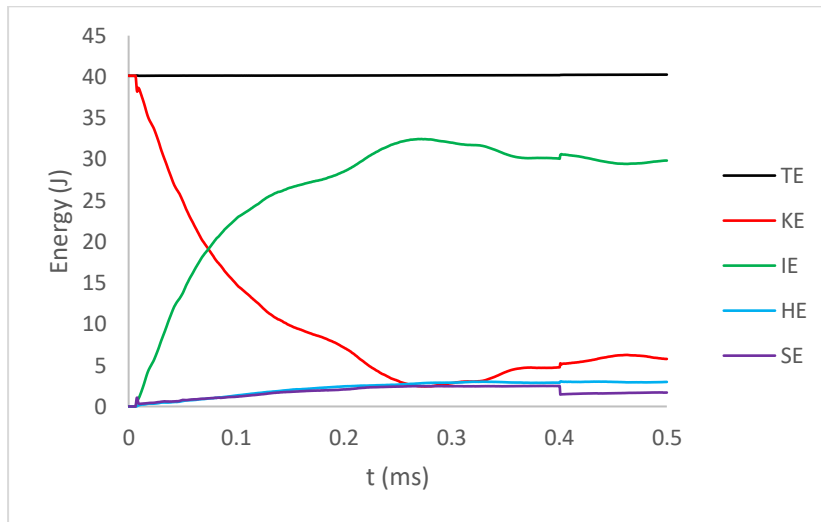
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7075-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	78750	151	13.71
Αραιός	39329	175	-

Πίνακας 6.4. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7075-T6.

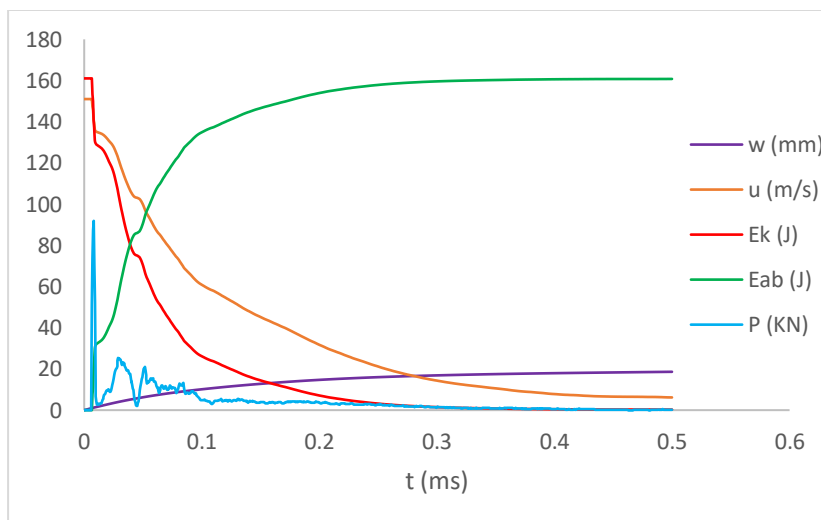
Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται

στο Διάγραμμα 6.10. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

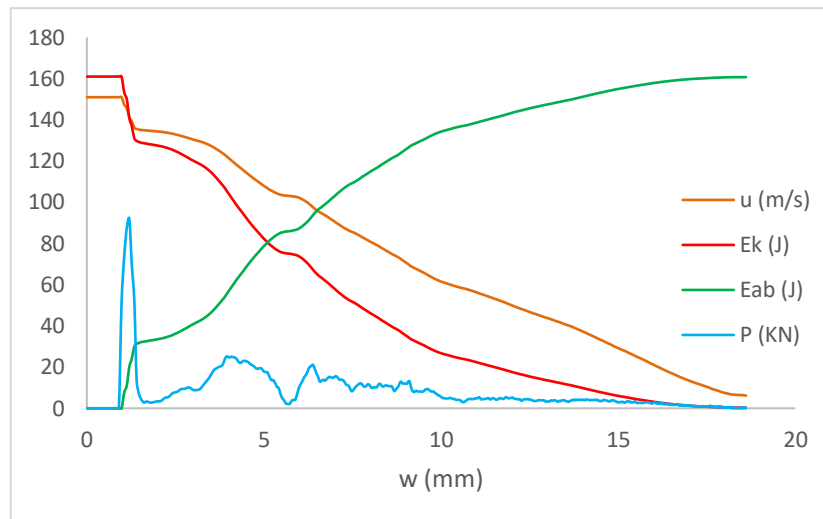


Διάγραμμα 6.10. Διάγραμμα ενεργειών - χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7075-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7075-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.11. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7075-T6.



Διάγραμμα 6.12. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-508 κράματος Al 7075-T6.

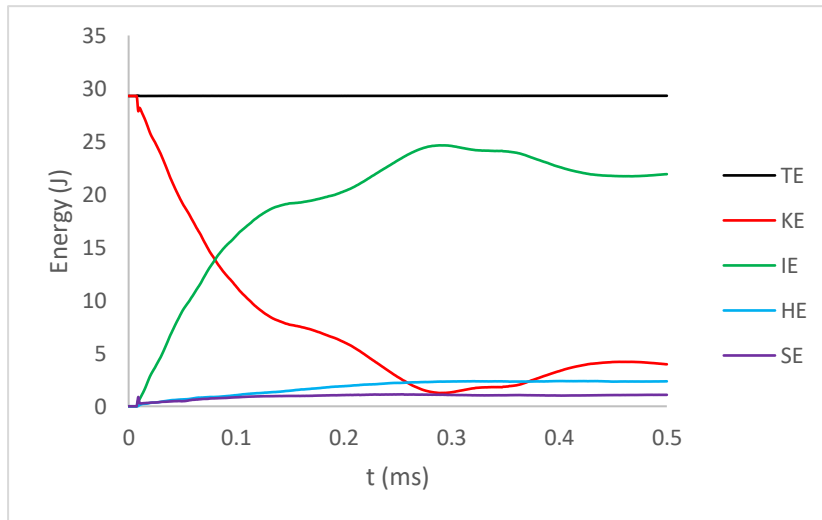
### 6.2.5 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	78750	129	14.00
Αραιός	39329	150	-

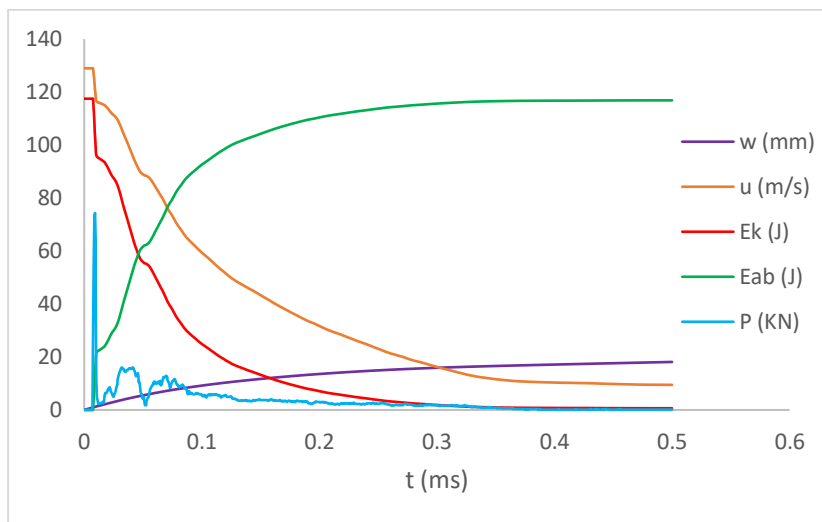
Πίνακας 6.5. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.13. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

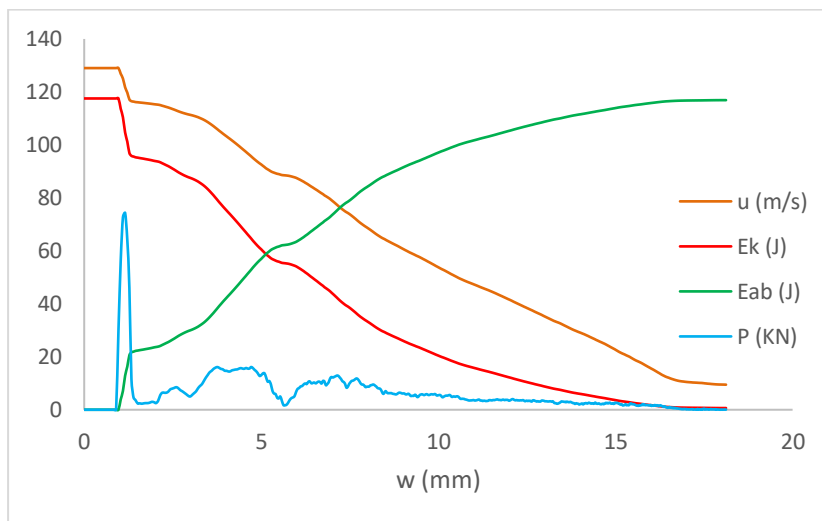


Διάγραμμα 6.13. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.14. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039.

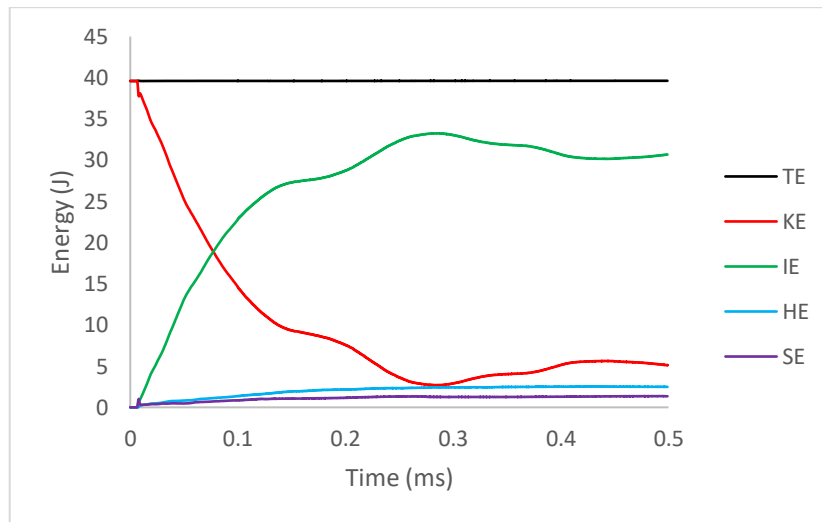


Διάγραμμα 6.15. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 7039.

### 6.2.6 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T3

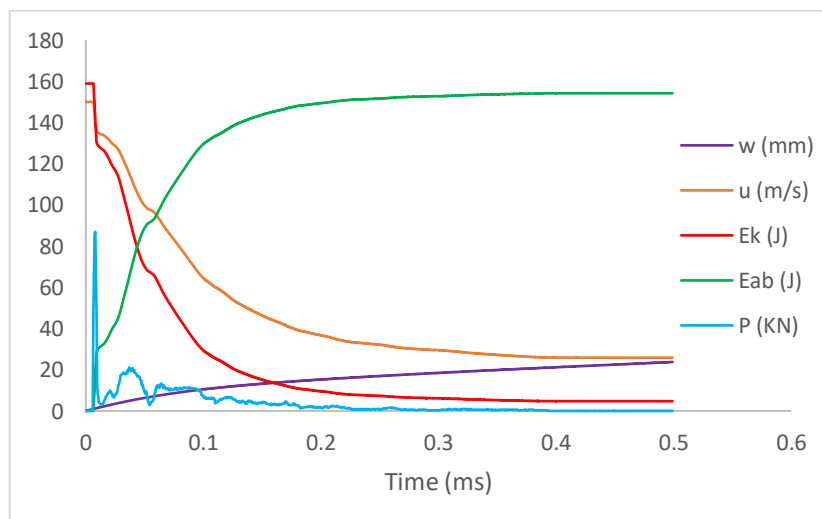
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T3 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και έχουν παρουσιασθεί στον Πίνακα 4.2.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.16. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

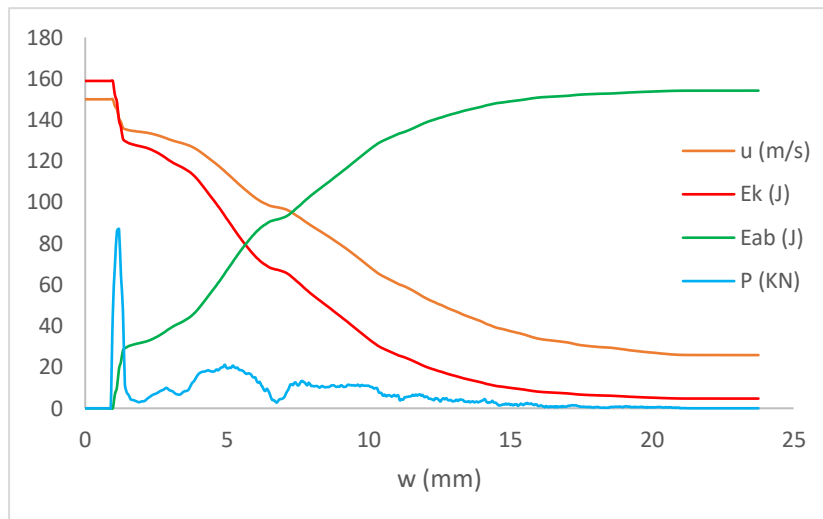


Διάγραμμα 6.16. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T3. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T3 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



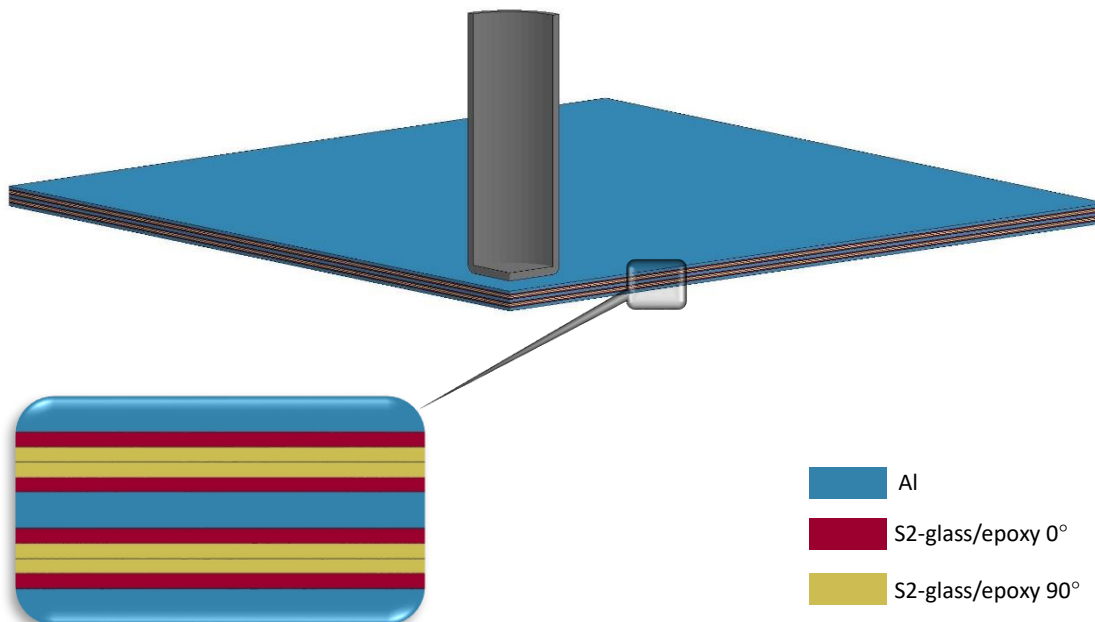
Διάγραμμα 6.17. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T3.



Διάγραμμα 6.18. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.508 κράματος Al 2024-T3.

### 6.3 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2. Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048.

Τα αποτελέσματα της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 για τα διάφορα κράματα αλουμινίου παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

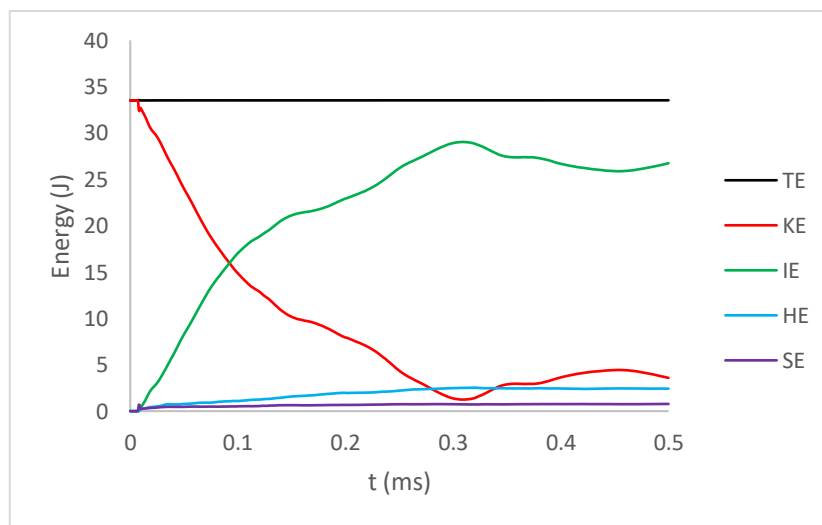
#### 6.3.1 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	62846	138	14.28
Αραιός	32256	161	-

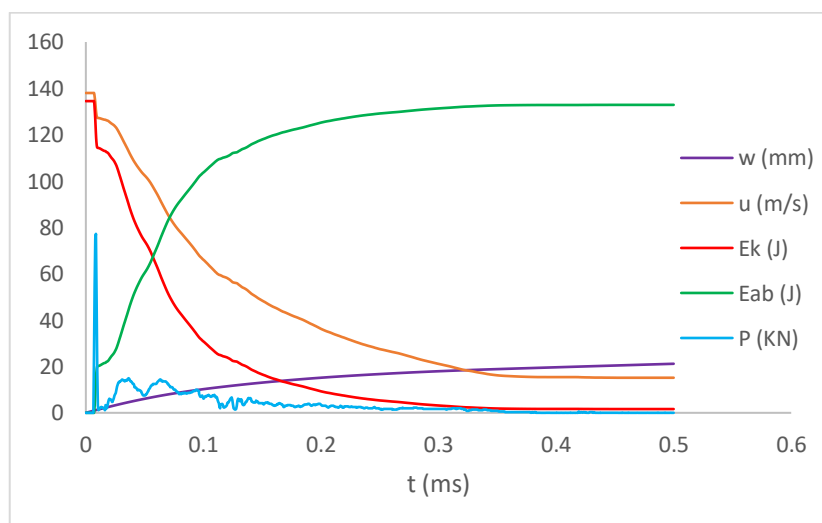
Πίνακας 6.6. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.19. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

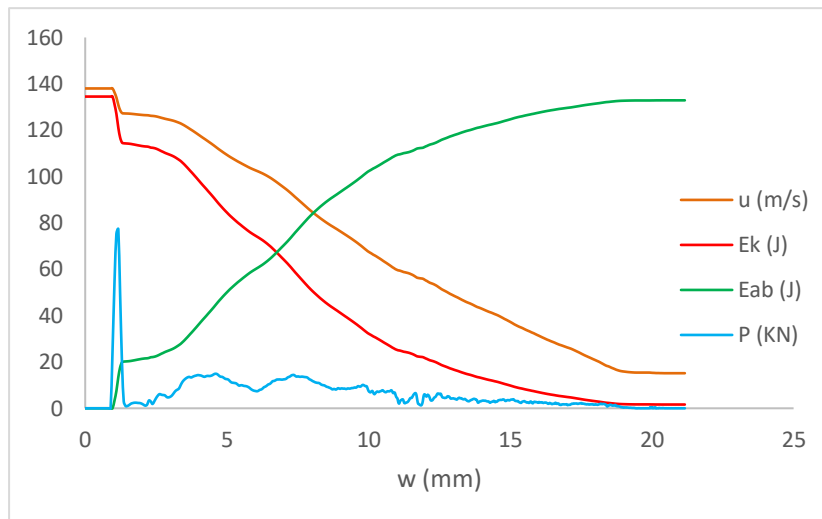


Διάγραμμα 6.19. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.20. Συνδυαστικό διάγραμμα (w, u, Ek, Eab, P – t) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351.



Διάγραμμα 6.21. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T351.

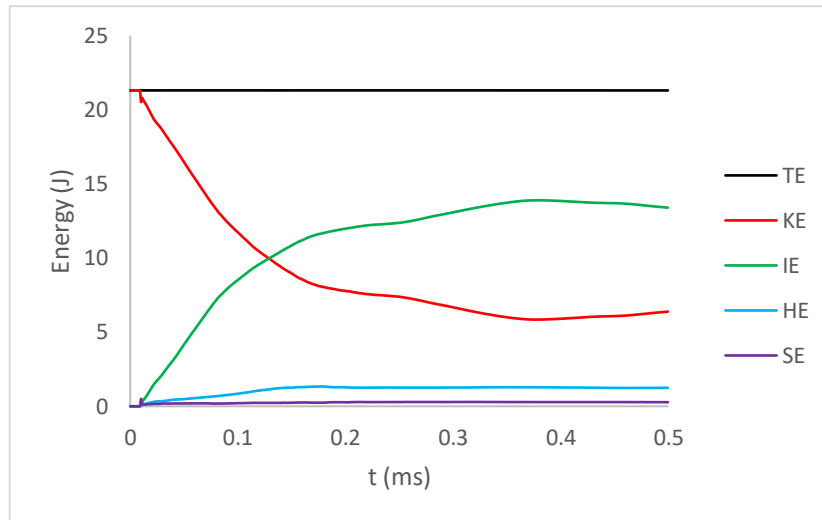
### 6.3.2 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	62846	110	13.39
Αραιός	32256	127	-

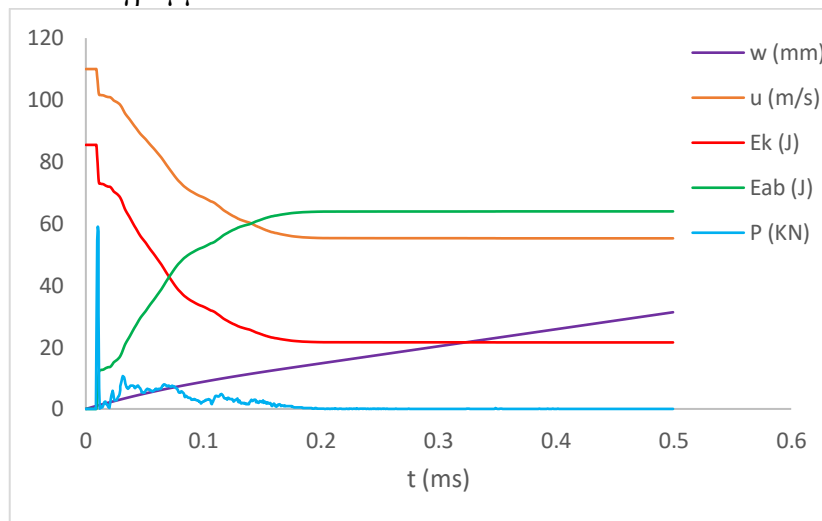
Πίνακας 6.7. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.22. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

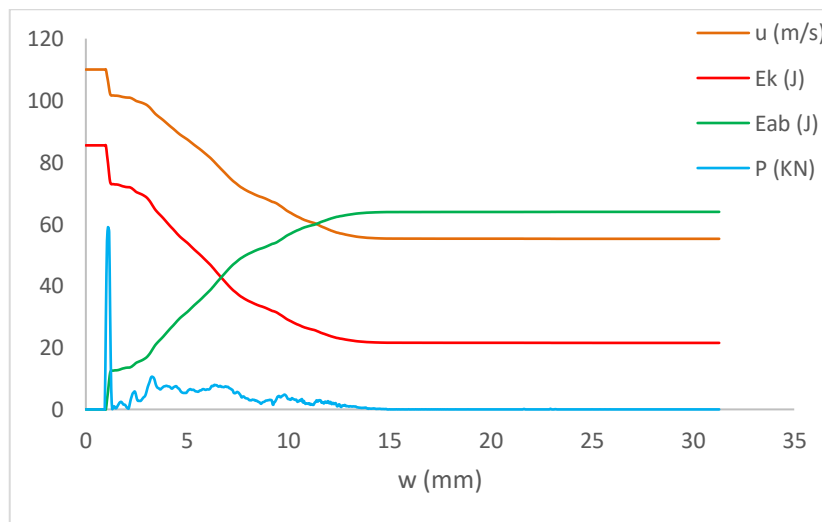


Διάγραμμα 6.22. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.23. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O.



Διάγραμμα 6.24. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-O.

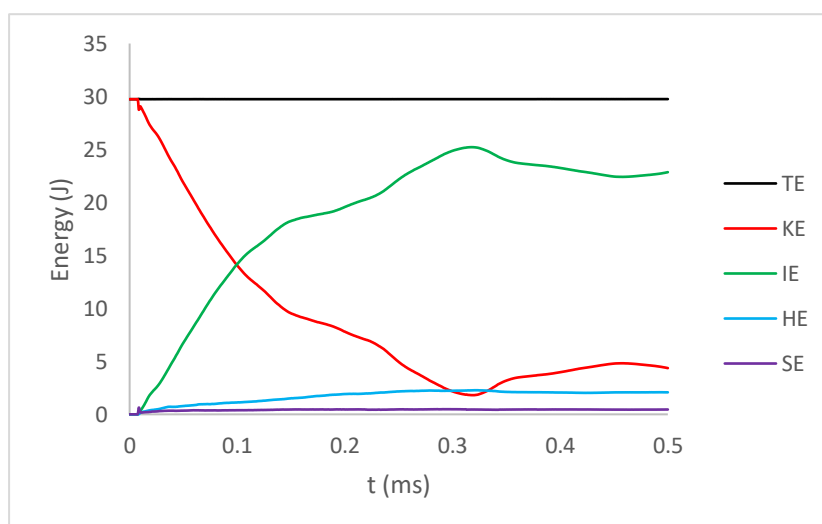
### 6.3.3 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	62846	130	13.91
Αραιός	32256	151	-

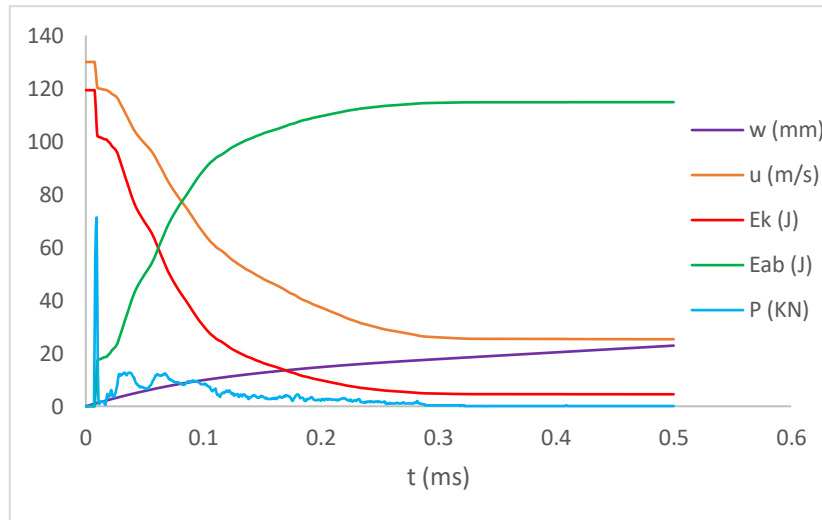
Πίνακας 6.8. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.25. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

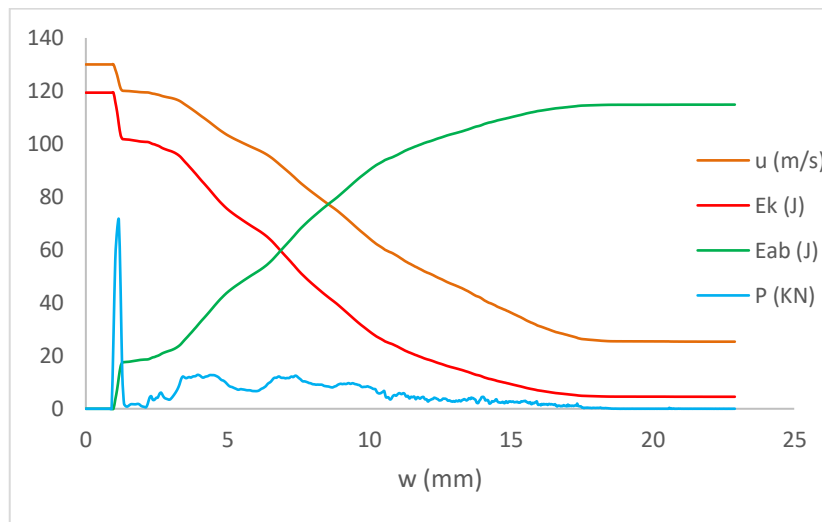


Διάγραμμα 6.25. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.26. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6.



Διάγραμμα 6.27. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 6061-T6.

### 6.3.4 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6

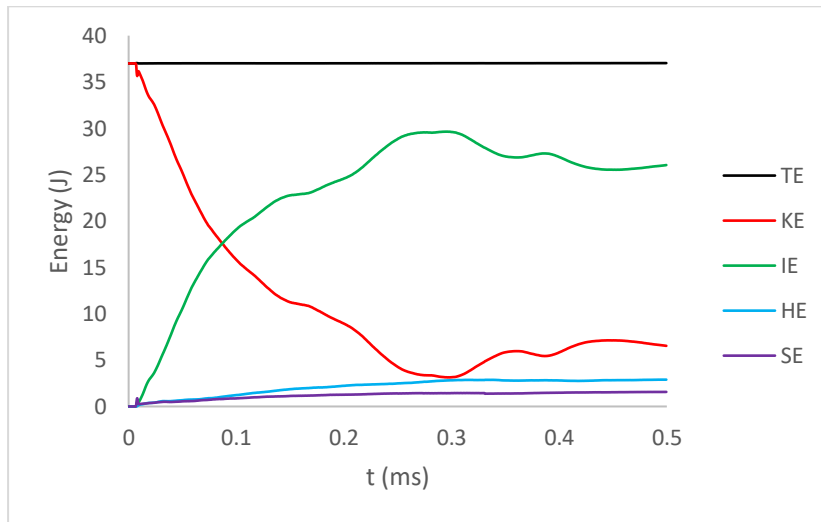
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.9.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	62846	145	14.20
Αραιός	32256	169	-

Πίνακας 6.9. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6.

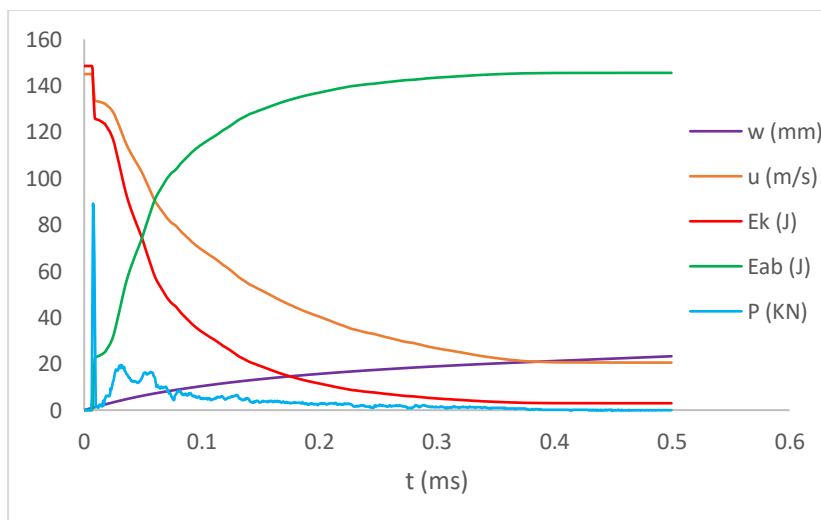
Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται

στο Διάγραμμα 6.28. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

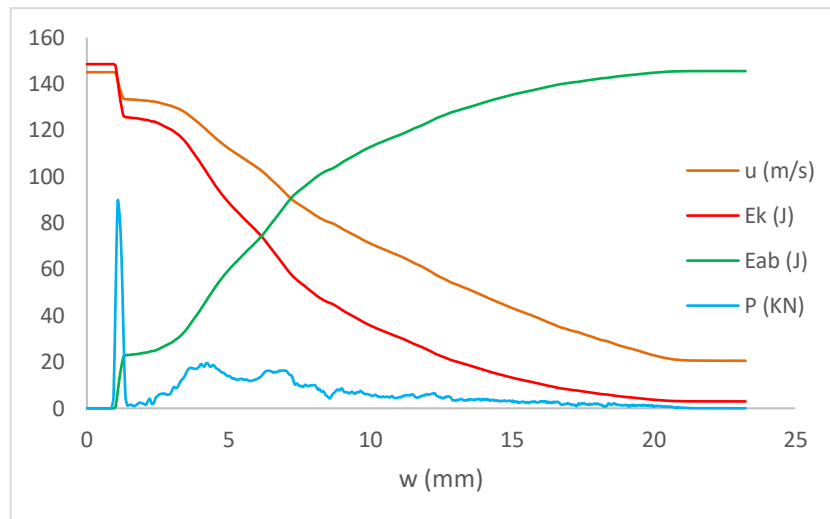


Διάγραμμα 6.28. Διάγραμμα ενεργειών - χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.29. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6.



Διάγραμμα 6.30. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7075-T6.

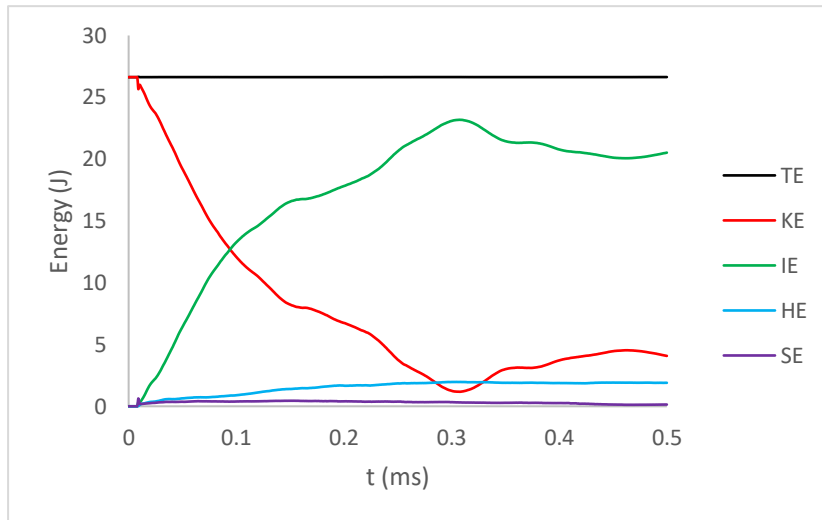
### 6.3.5 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.10.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	62846	123	13.99
Αραιός	32256	143	-

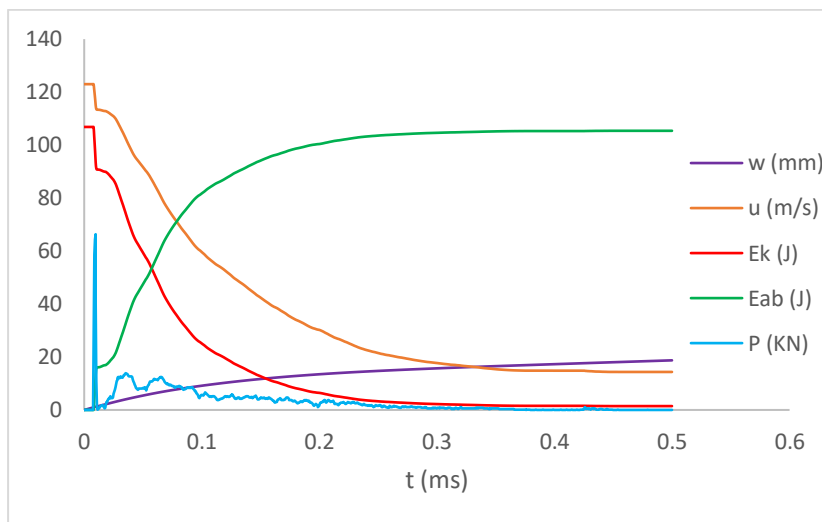
Πίνακας 6.10. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.31. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

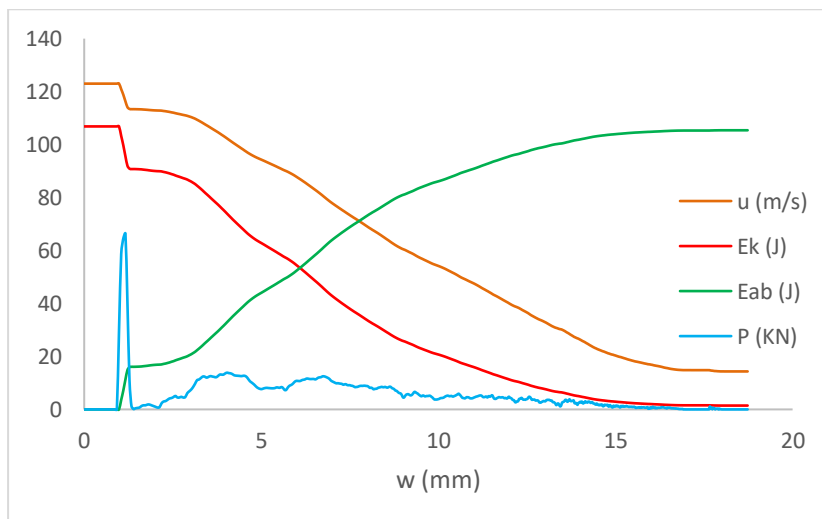


Διάγραμμα 6.31. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.32. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039.

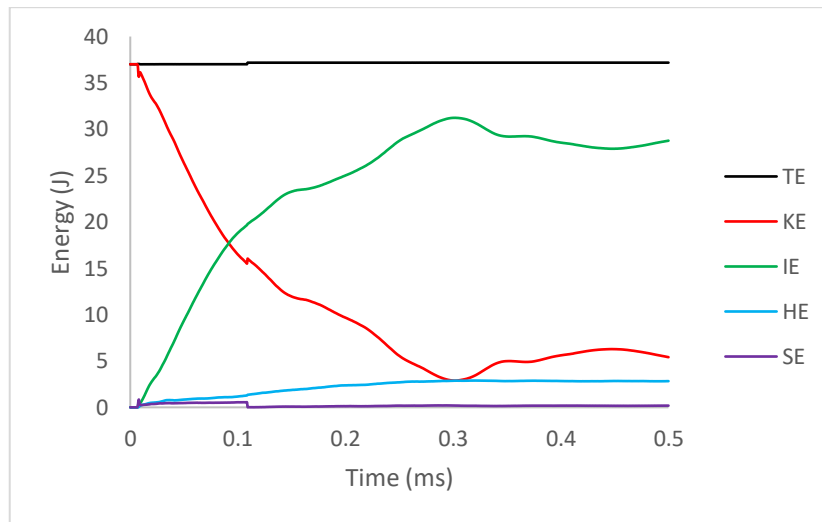


Διάγραμμα 6.33. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 7039.

### 6.3.6 Πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος ΑΙ 2024-T3

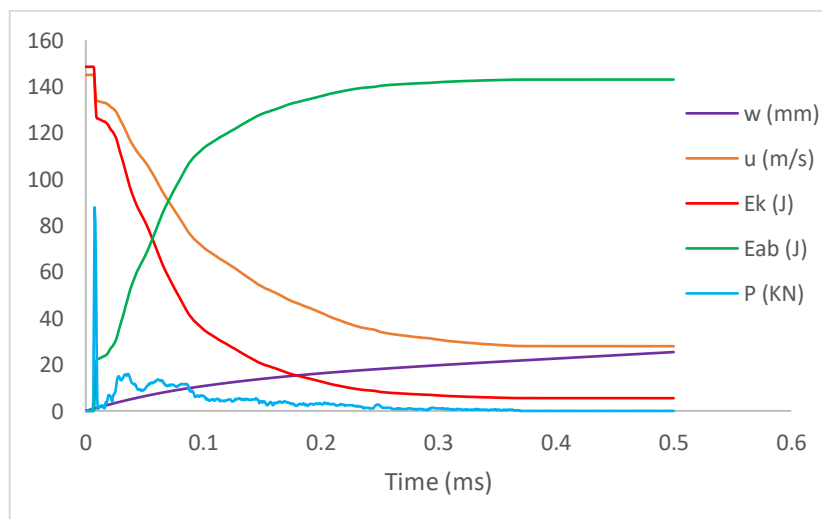
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος ΑΙ 2024-T3 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και έχουν παρουσιασθεί στον Πίνακα 4.3.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.34. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

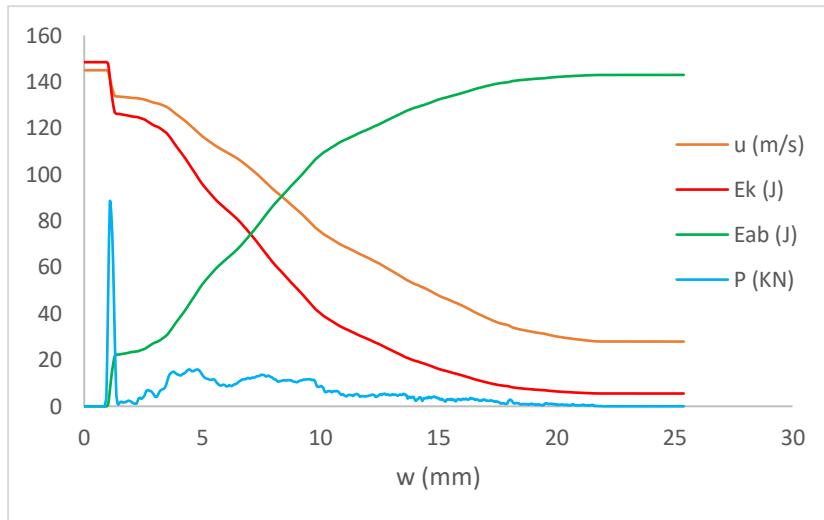


Διάγραμμα 6.34. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος ΑΙ 2024-T3. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος ΑΙ 2024-T3 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



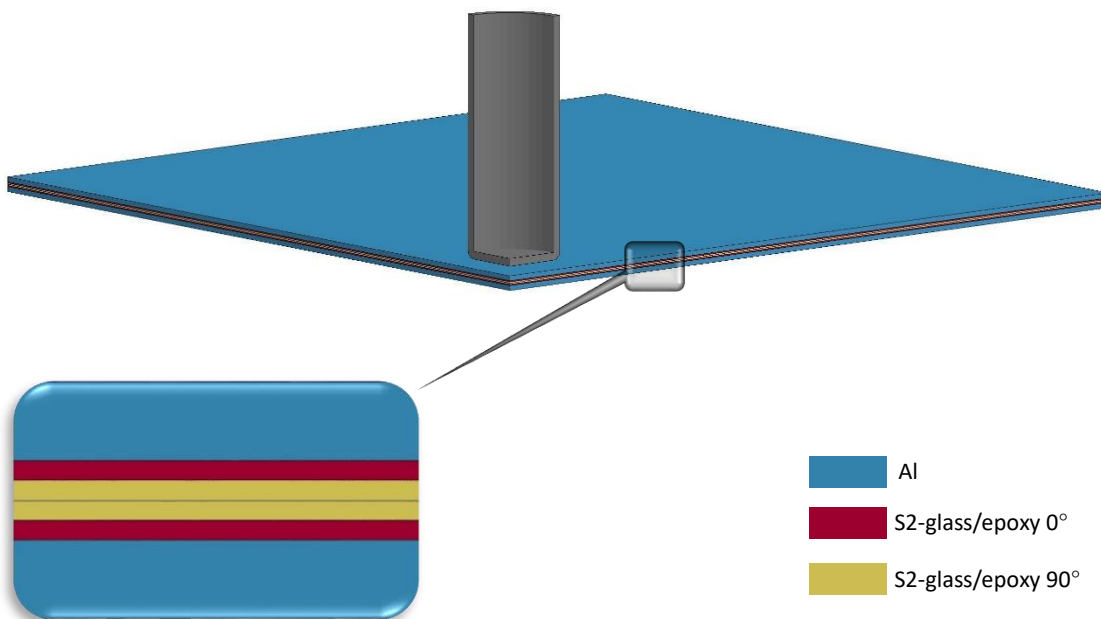
Διάγραμμα 6.35. Συνδυαστικό διάγραμμα (w,u,Ek, Eab, P – t) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος ΑΙ 2024-T3.



Διάγραμμα 6.36. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 3/2-0.3048 κράματος Al 2024-T3.

### 6.4 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508

Το μοντέλο της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3. Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508.

Τα αποτελέσματα της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 για τα διάφορα κράματα αλουμινίου παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

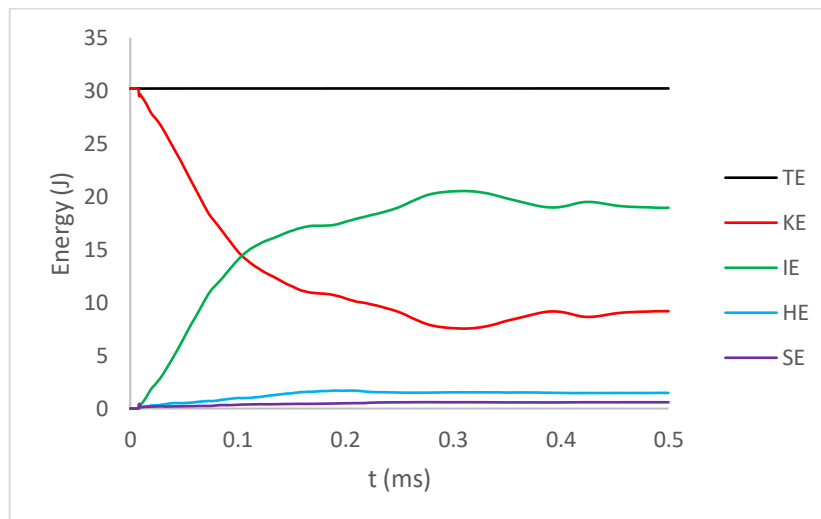
### 6.4.1 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	45000	131	10.88
Αραιός	22472	147	-

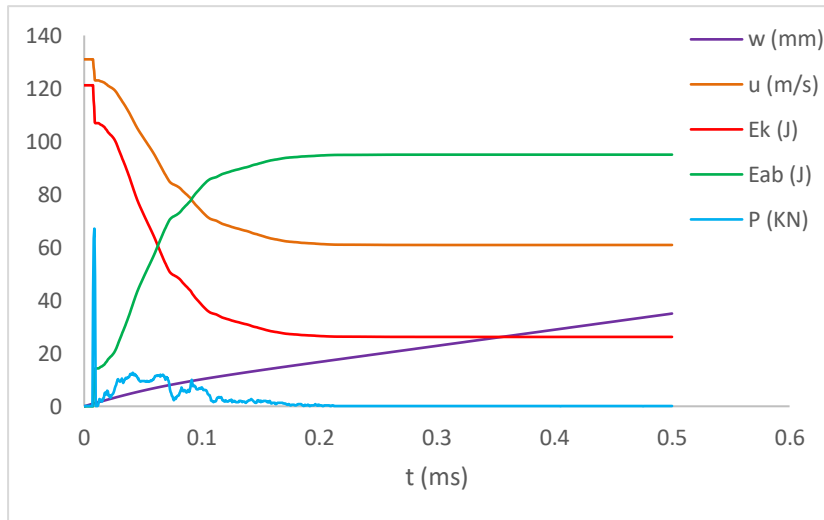
Πίνακας 6.11. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.37. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

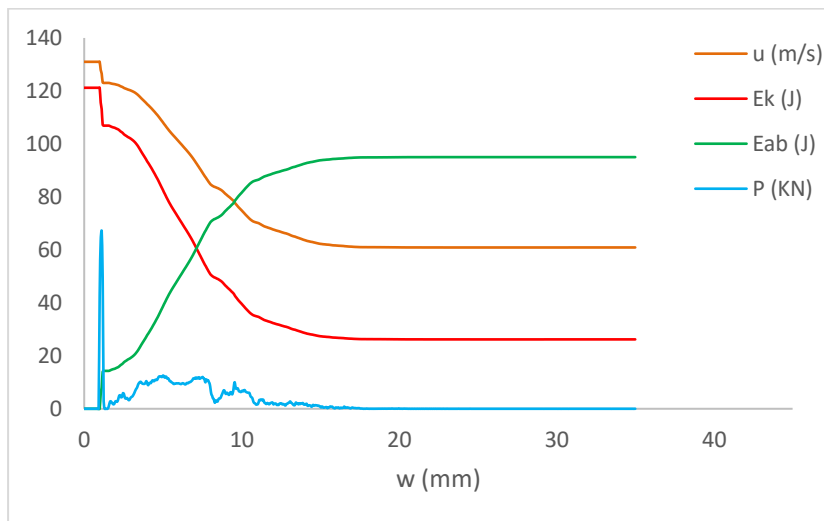


Διάγραμμα 6.37. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.38. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351.



Διάγραμμα 6.39. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T351.

### 6.4.2 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O

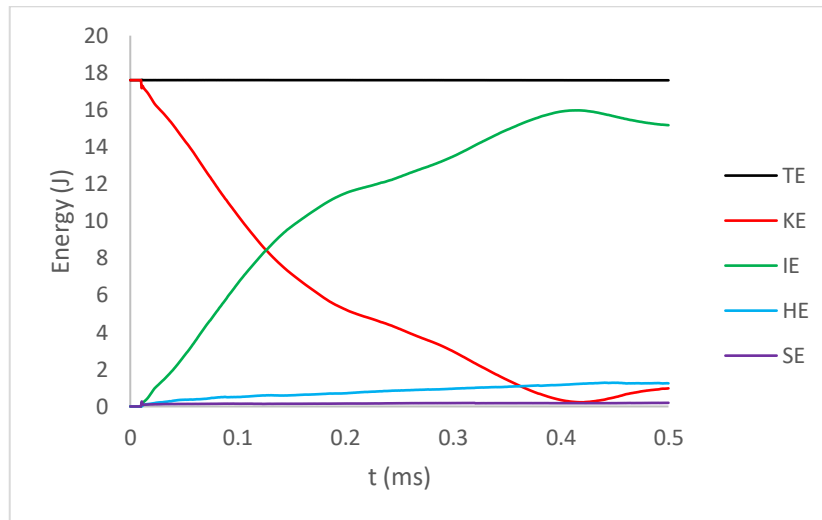
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.12.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	45000	100	12.28
Αραιός	22472	114	-

Πίνακας 6.12. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O.

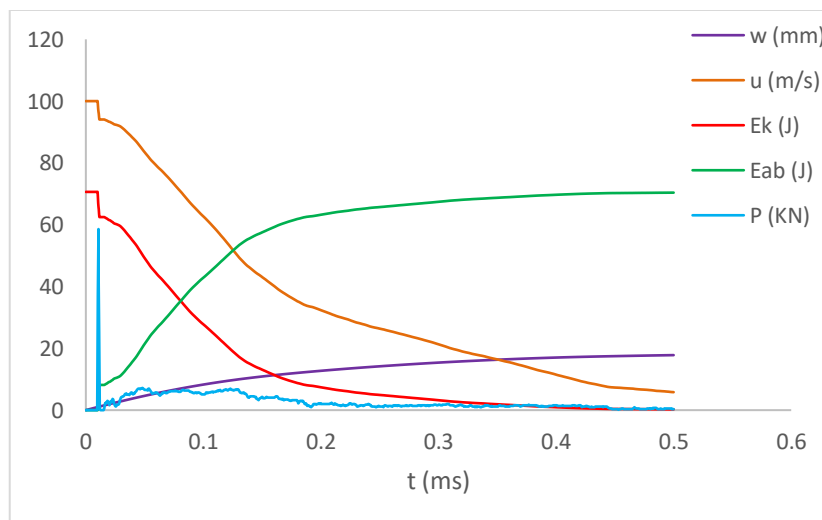
Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται

στο Διάγραμμα 6.40. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

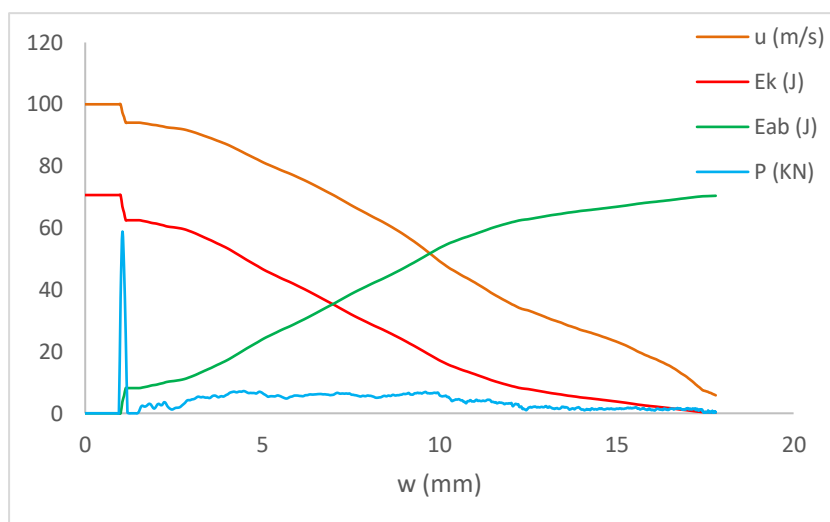


Διάγραμμα 6.40. Διάγραμμα ενεργειών - χρόνου για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.41. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-t$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O.



Διάγραμμα 6.42. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P-w$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-O.

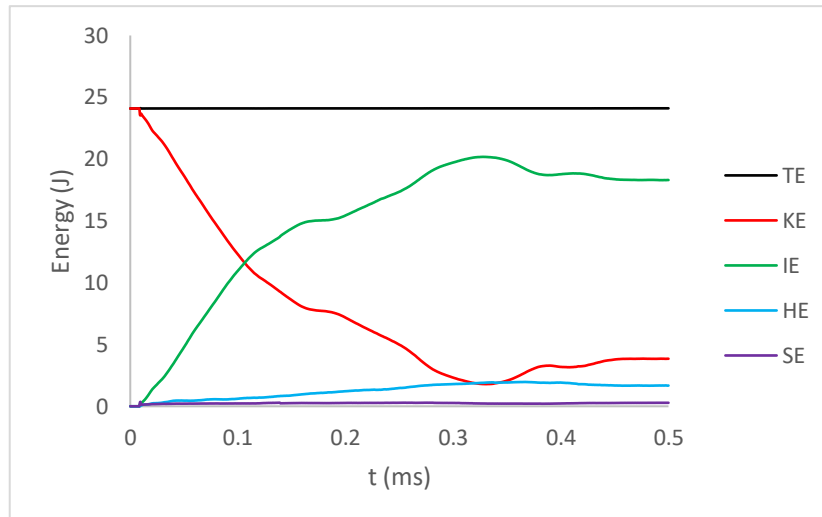
### 6.4.3 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.13.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	45000	117	12.69
Αραιός	22472	134	-

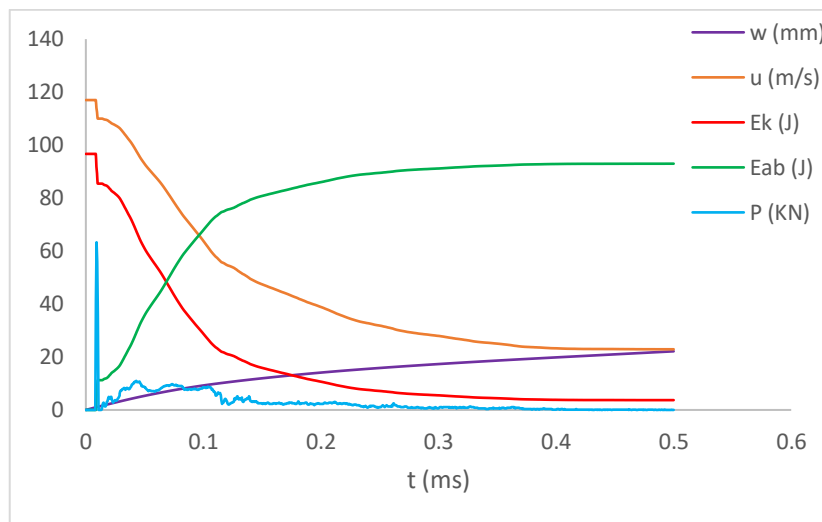
Πίνακας 6.13. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.43. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

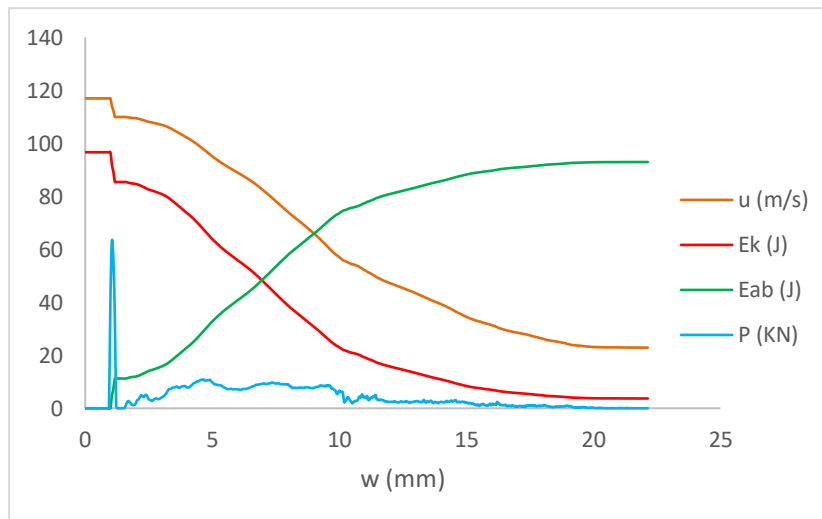


Διάγραμμα 6.43. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.44. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6.



Διάγραμμα 6.45. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-w$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 6061-T6.

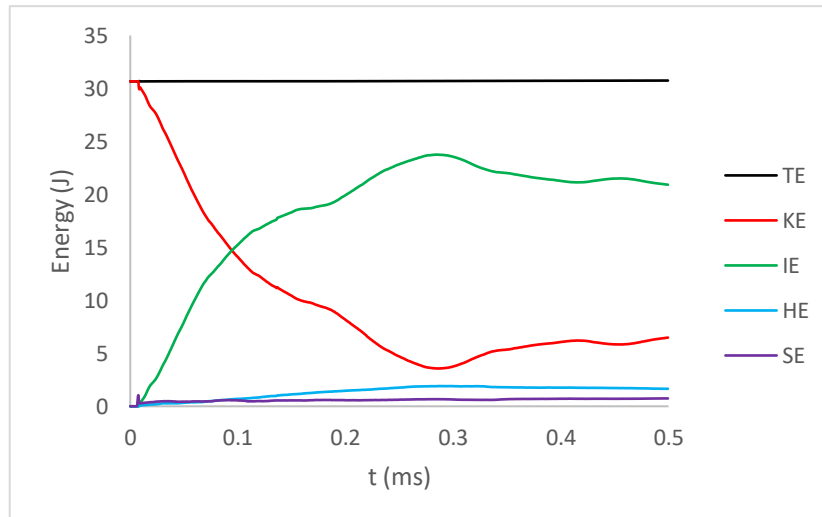
#### 6.4.4 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 15%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.14.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	45000	132	11.41
Αραιός	22472	149	-

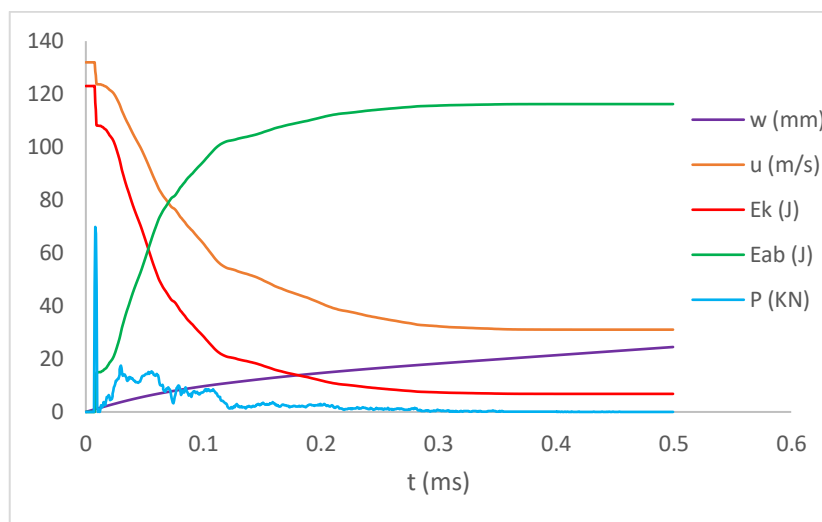
Πίνακας 6.14. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.46. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

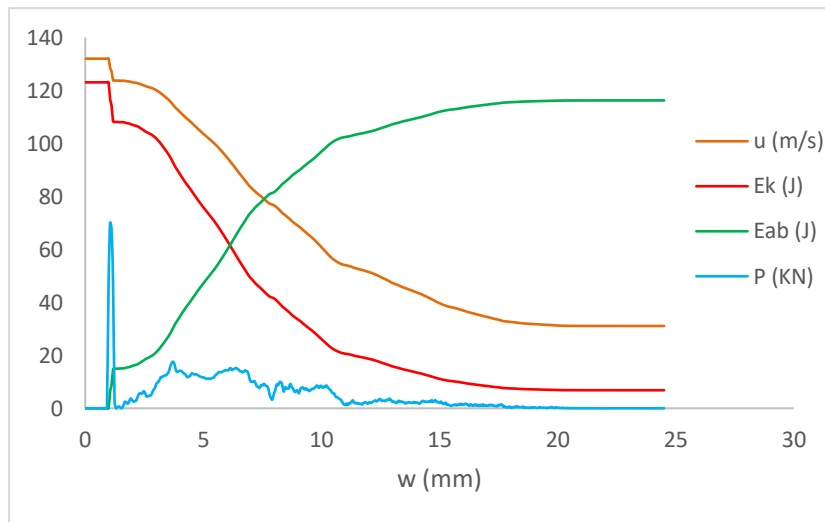


Διάγραμμα 6.46. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.47. Συνδυαστικό διάγραμμα (w, u, Ek, Eab, P - t) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6.



Διάγραμμα 6.48. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7075-T6.

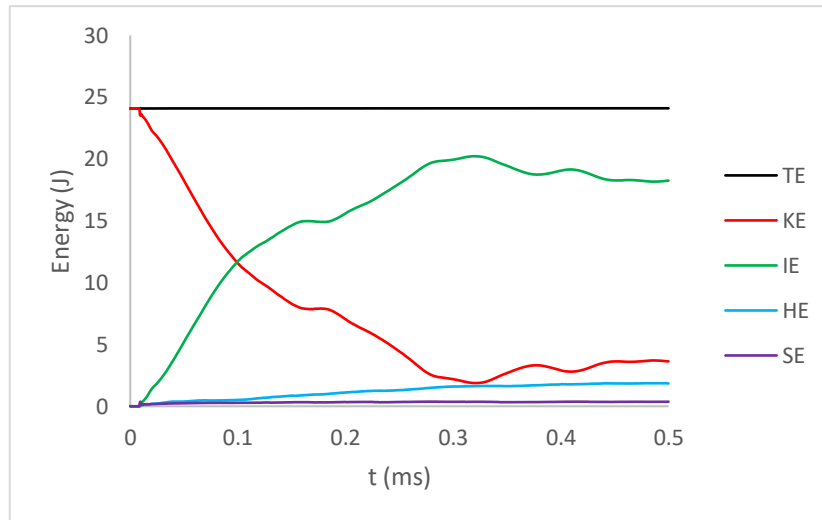
#### 6.4.5 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.15.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	45000	117	8.59
Αραιός	22472	128	-

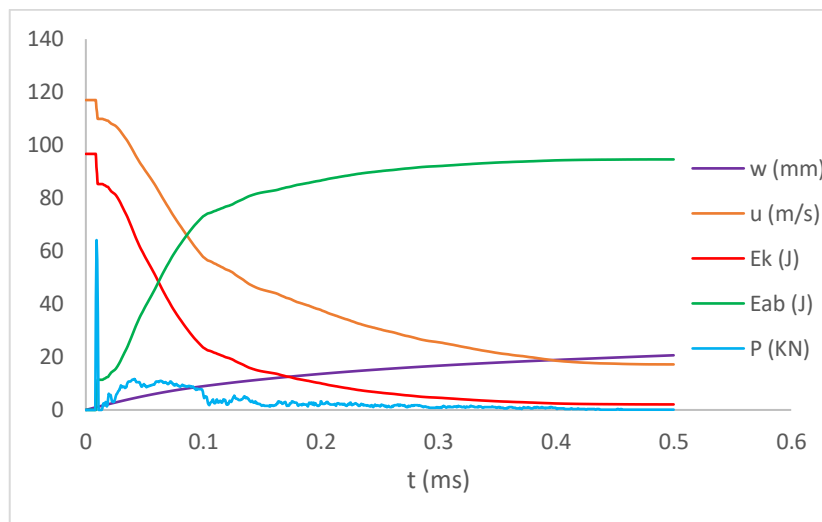
Πίνακας 6.15. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.49. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

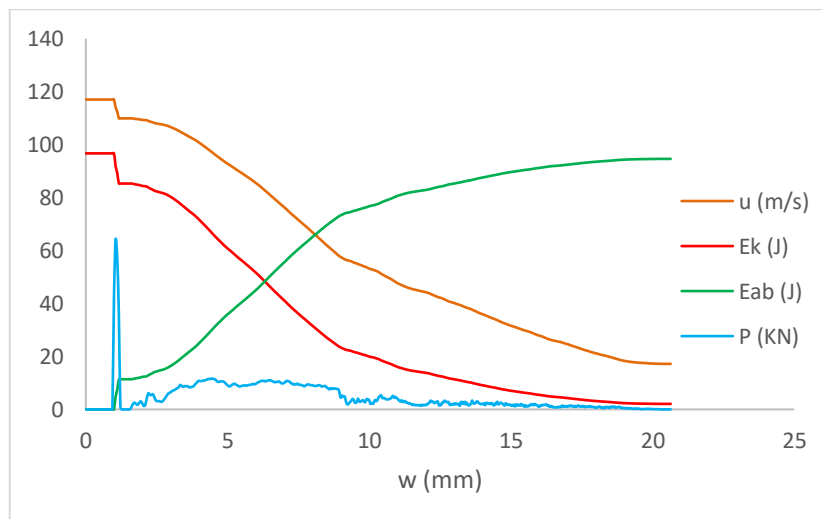


Διάγραμμα 6.49. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.50. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039.

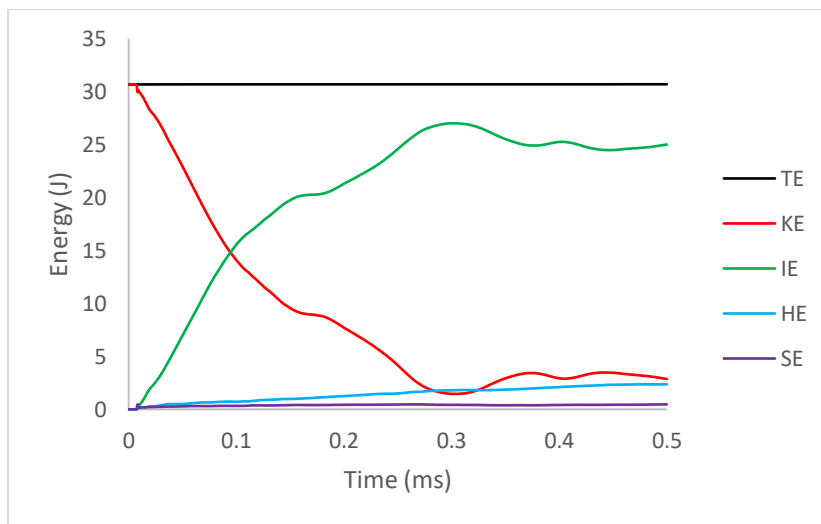


Διάγραμμα 6.51. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 7039.

#### 6.4.6 Πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3

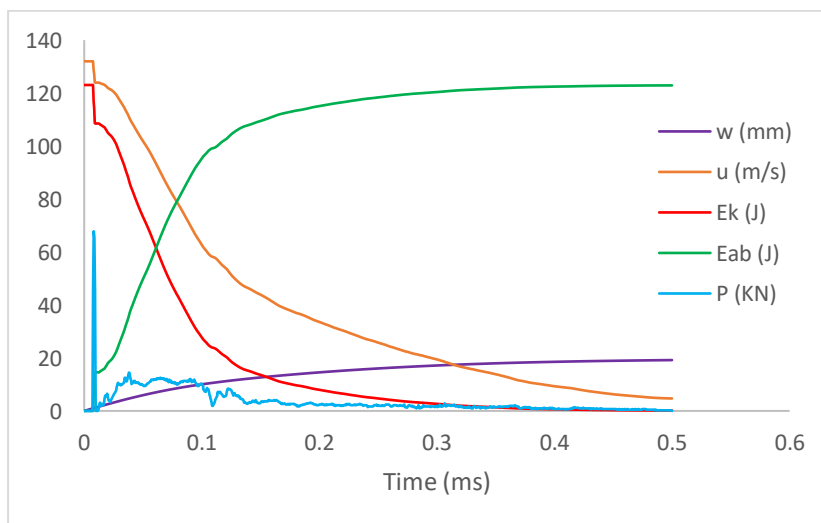
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 4.4.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.52. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

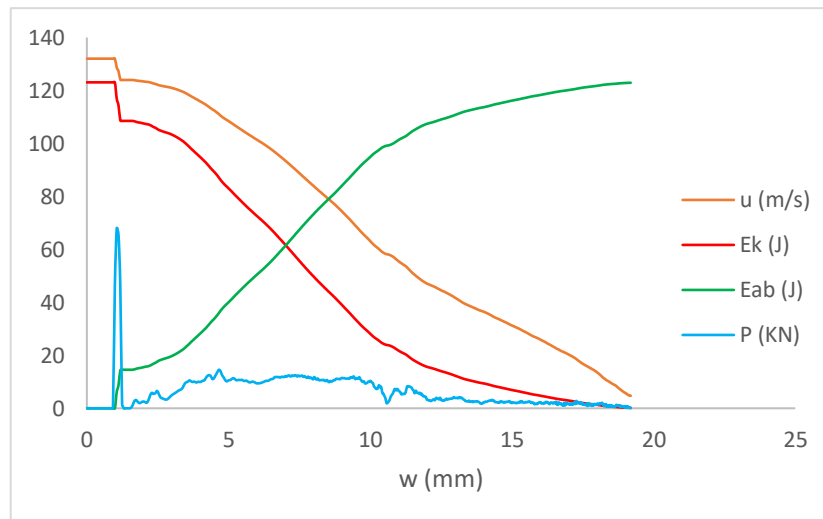


Διάγραμμα 6.52. Διάγραμμα ενεργειών - χρόνου για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



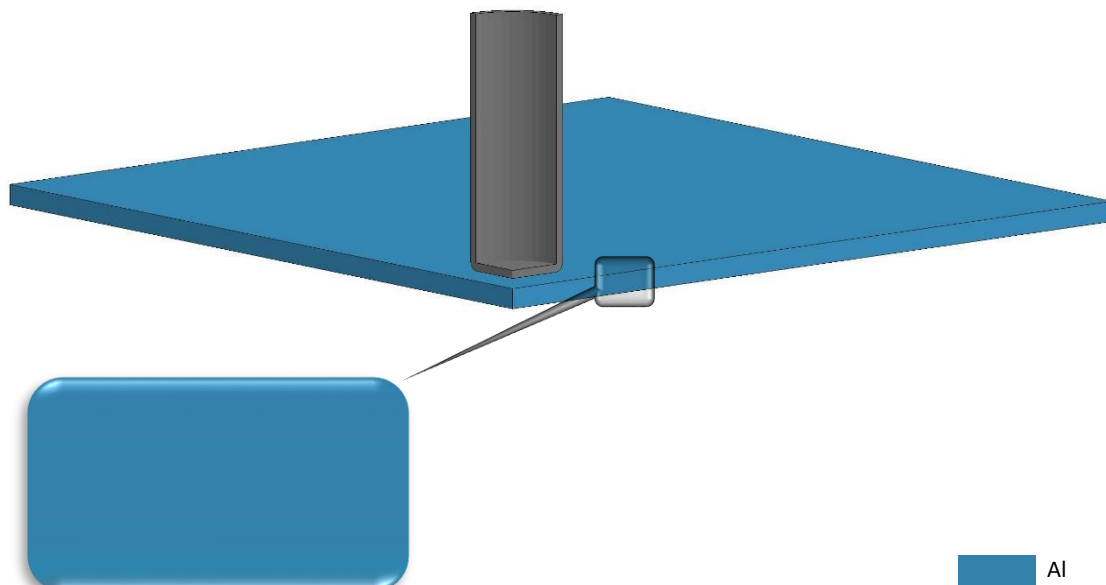
Διάγραμμα 6.53. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3.



Διάγραμμα 6.54. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-w$ ) για την πλάκα GLARE 5 2/1-0.508 κράματος Al 2024-T3.

## 6.5 Πλάκα Al πάχους 3.2mm

Το μοντέλο της πλάκας Al πάχους 3.2mm που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4. Πλάκα Al πάχους 3.2mm.

Τα αποτελέσματα της πλάκας Al πάχους 3.2mm για τα διάφορα κράματα αλουμινίου παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

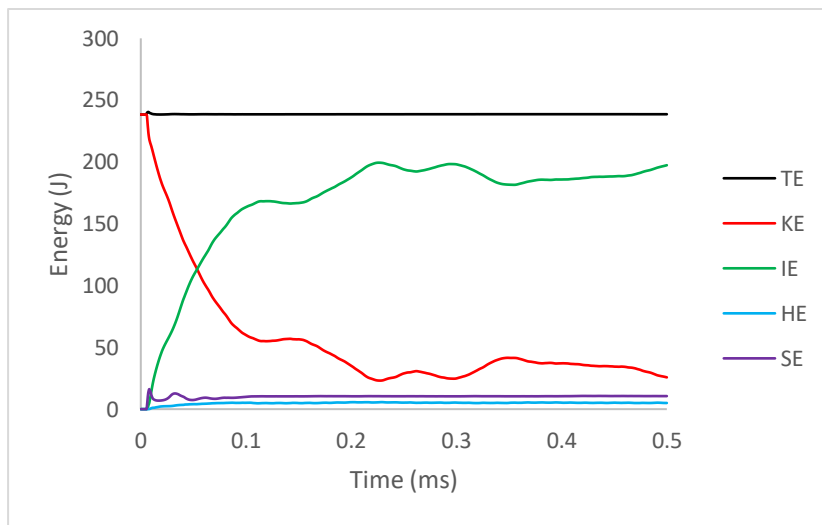
### 6.5.1 Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.16.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	18050	184	4.17
Αραιός	9248	192	-

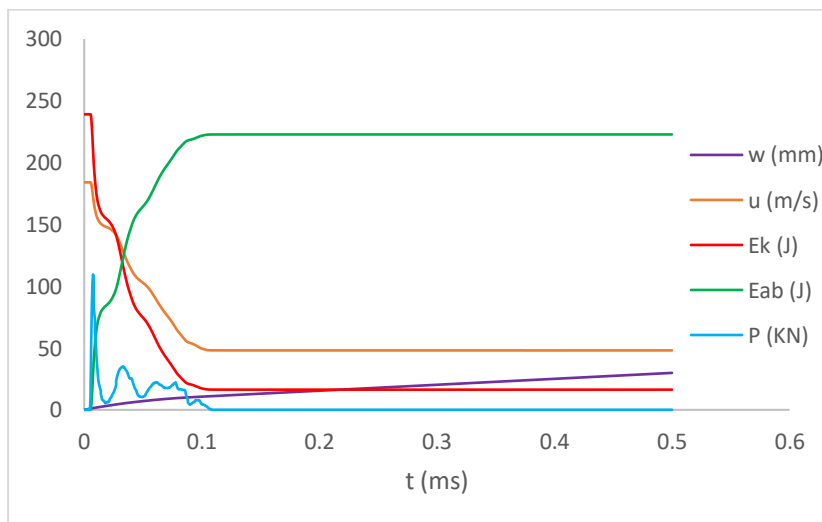
Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.55. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

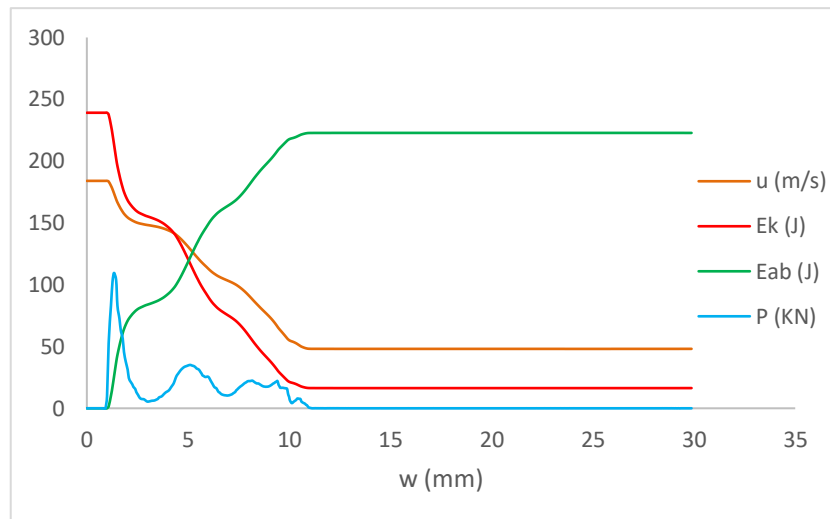


Διάγραμμα 6.55. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.56. Συνδυαστικό διάγραμμα (w, u, Ek, Eab, P – t) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351.



Διάγραμμα 6.57. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P-w$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T351.

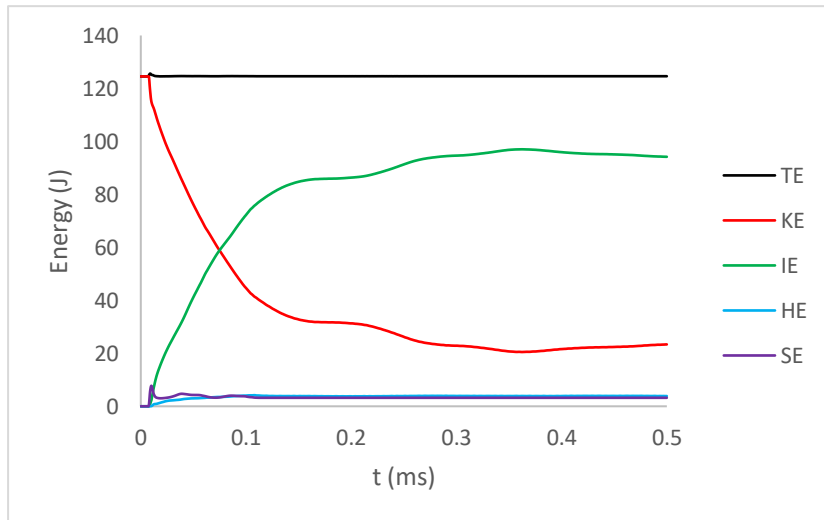
### 6.5.2 Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.17.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	18050	133	6.99
Αραιός	9248	143	-

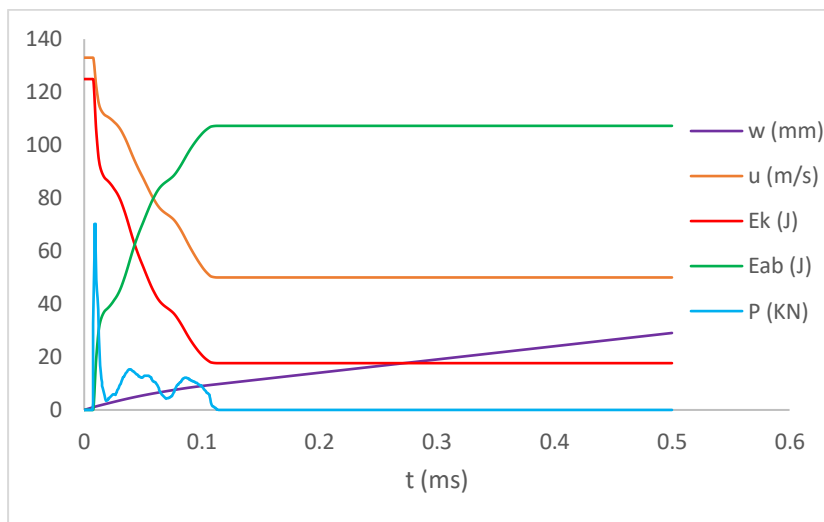
Πίνακας 6.17. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.58. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

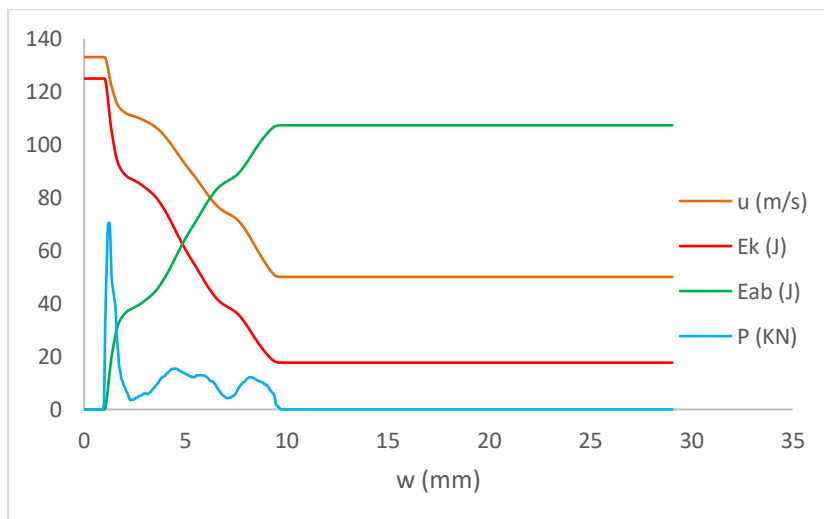


Διάγραμμα 6.58. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.59. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P-t$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O.



Διάγραμμα 6.60. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P-w$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-O.

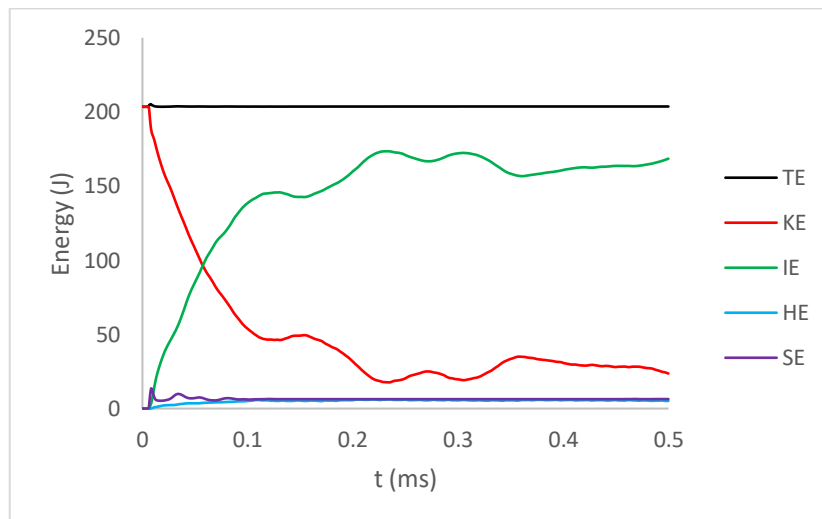
### 6.5.3 Πλάκα ΑΙ πάχους 3.2mm κράματος ΑΙ 6061-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας ΑΙ πάχους 3.2mm κράματος ΑΙ 6061-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.18.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	18050	170	3.95
Αραιός	9248	177	-

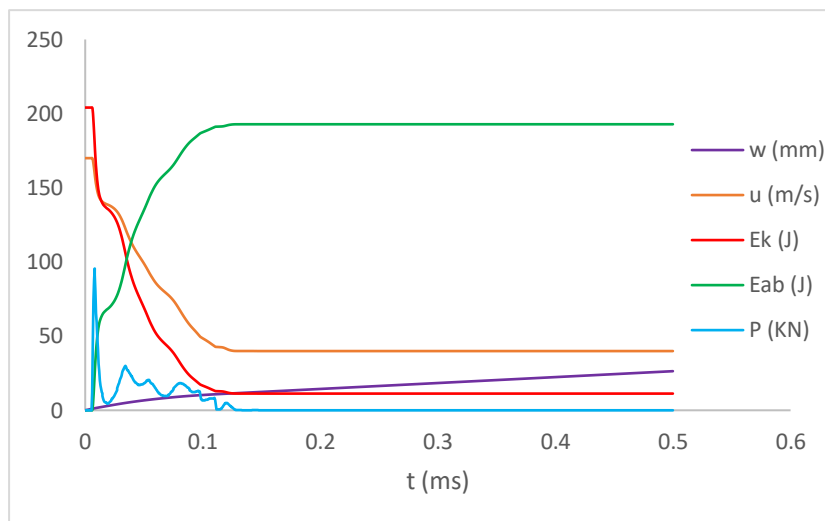
Πίνακας 6.18. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας ΑΙ πάχους 3.2mm κράματος ΑΙ 6061-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.61. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

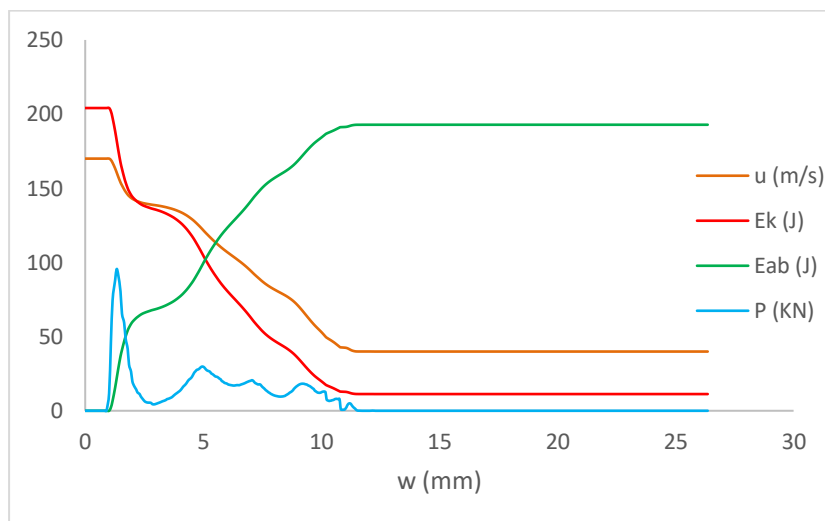


Διάγραμμα 6.61. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα ΑΙ πάχους 3.2mm κράματος ΑΙ 6061-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας ΑΙ πάχους 3.2mm κράματος ΑΙ 6061-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.62. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 6061-T6.



Διάγραμμα 6.63. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 6061-T6.

#### 6.5.4 Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6

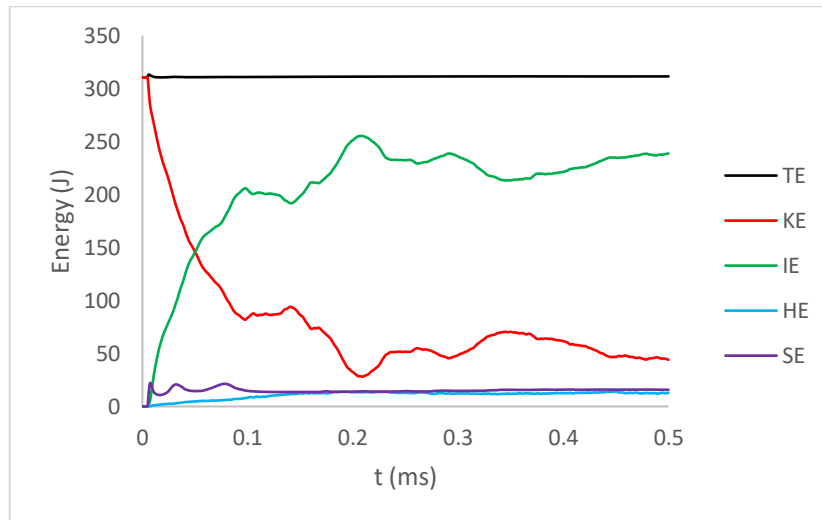
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.19.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	18050	210	1.87
Αραιός	9248	214	-

Πίνακας 6.19. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6.

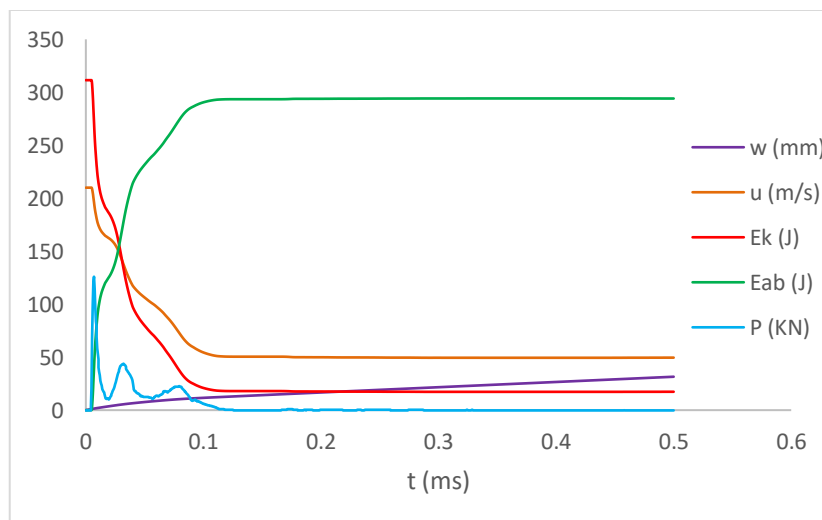
Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται

στο Διάγραμμα 6.64. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

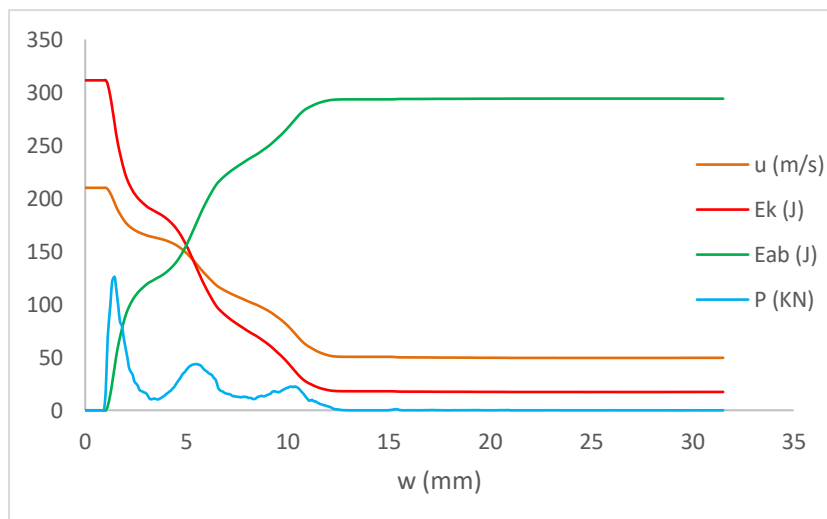


Διάγραμμα 6.64. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.65. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6.



Διάγραμμα 6.66. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7075-T6.

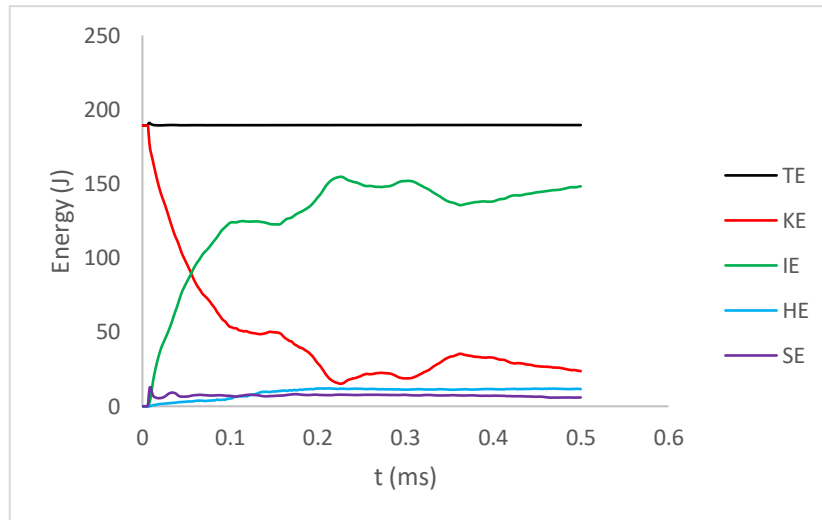
### 6.5.5 Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.20.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSY/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	18050	164	4.09
Αραιός	9248	171	-

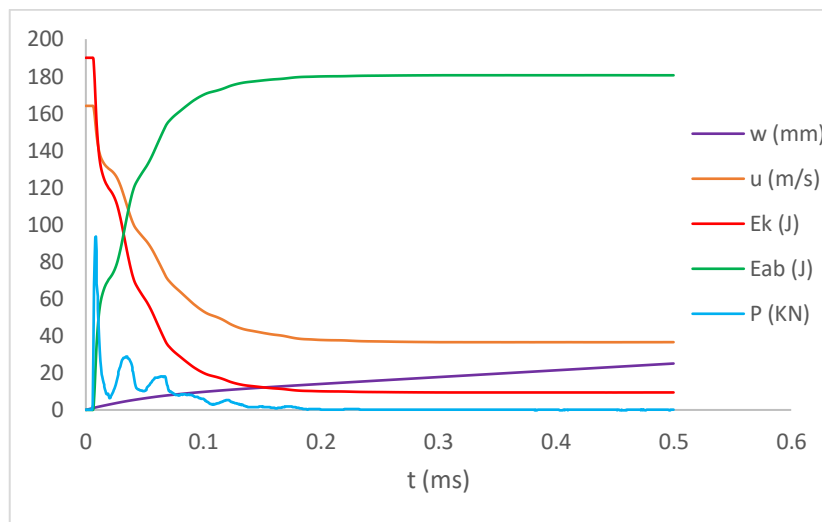
Πίνακας 6.20. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.67. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

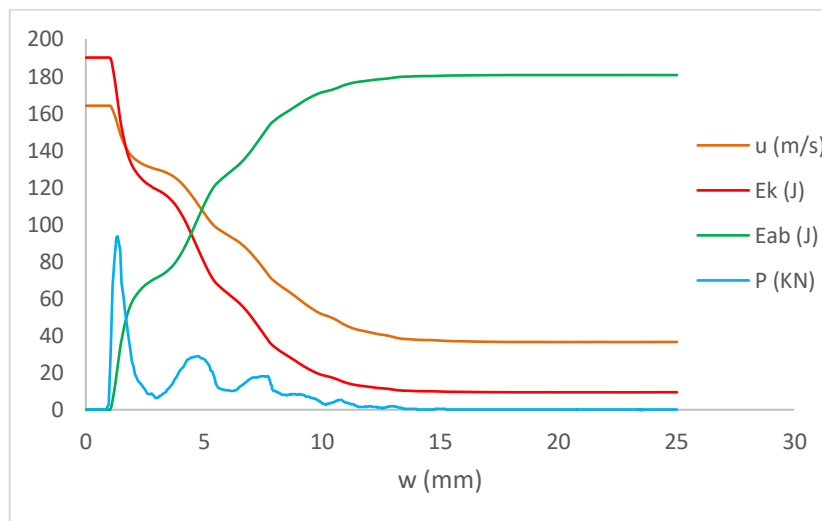


Διάγραμμα 6.67. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.68. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w, u, E_k, E_{ab}, P - t$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039.

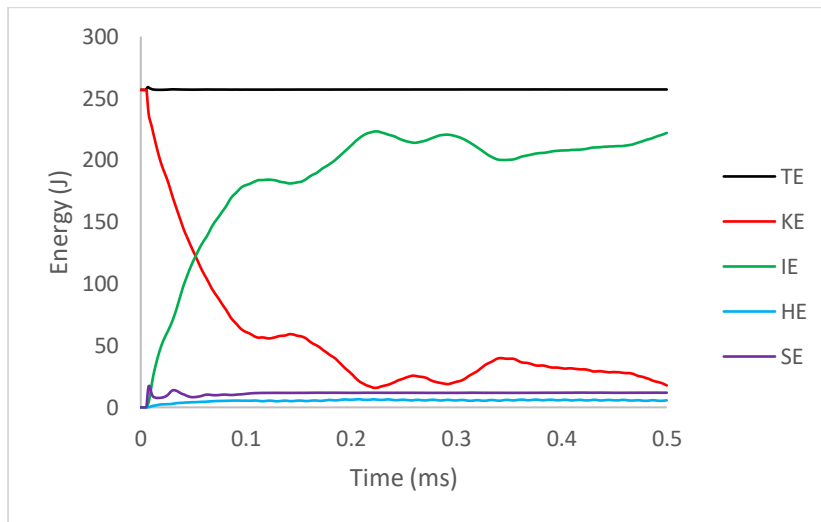


Διάγραμμα 6.69. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 7039.

### 6.5.6 Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3

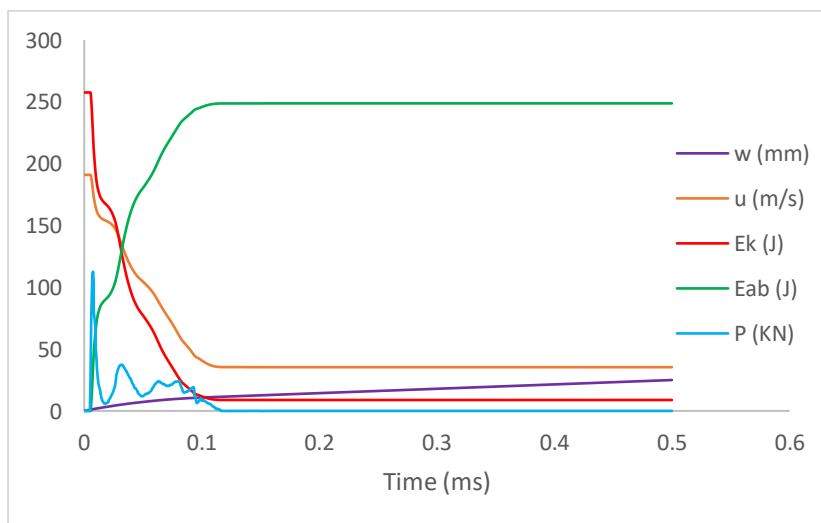
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 4.5.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.70. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

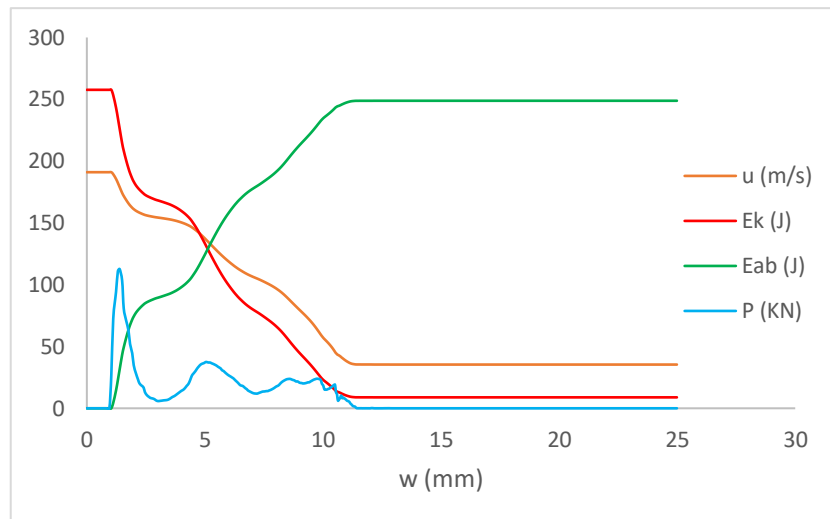


Διάγραμμα 6.70. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



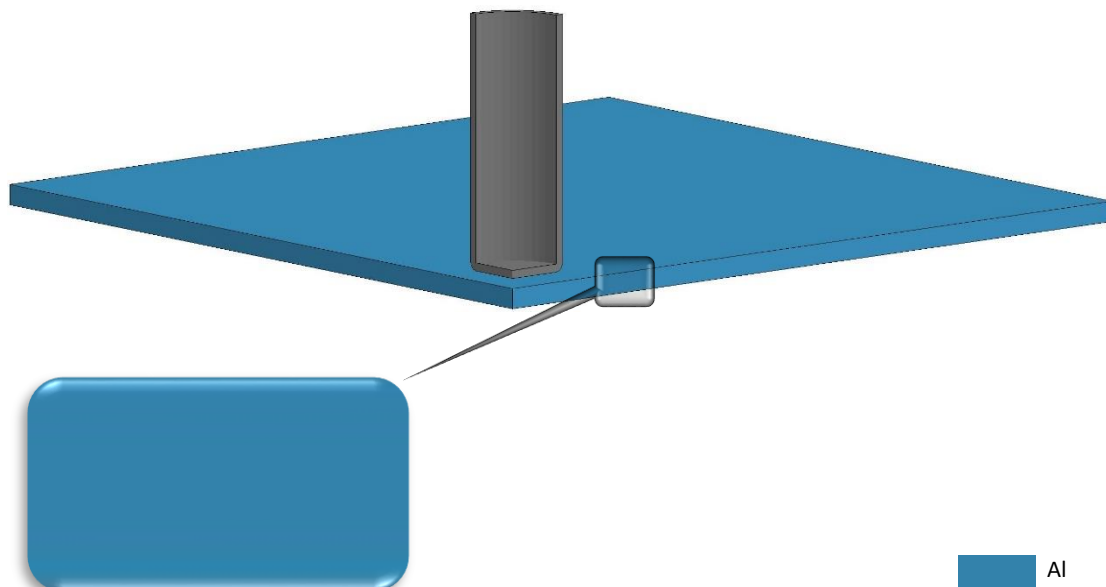
Διάγραμμα 6.71. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3.



Διάγραμμα 6.72. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 2024-T3.

## 6.6 Πλάκα Al πάχους 1.6mm

Το μοντέλο της πλάκας Al πάχους 1.6mm που κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα ANSYS/LS-DYNA φαίνεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Πλάκα Al πάχους 1.6mm.

Τα αποτελέσματα της πλάκας Al πάχους 1.6mm για τα διάφορα κράματα αλουμινίου παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

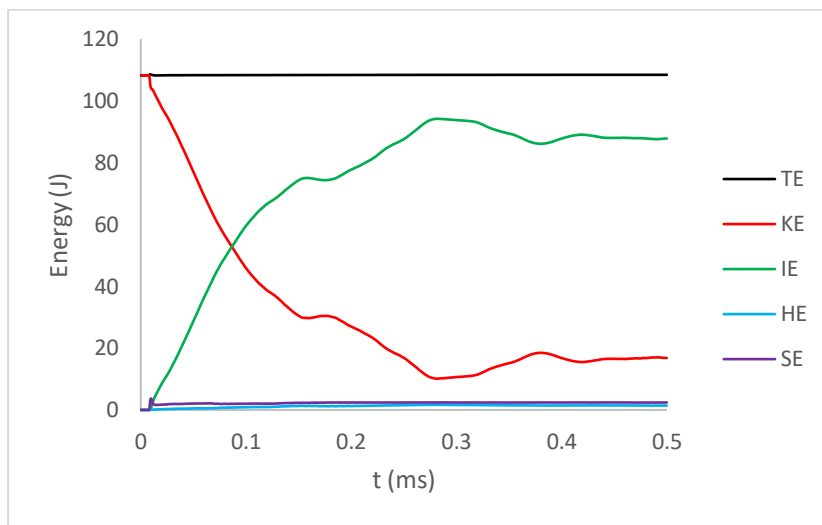
### 6.6.1 Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.21.

Κάνναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάνναβο (%)
Πυκνός	72962	124	9.49
Αραιός	38088	137	-

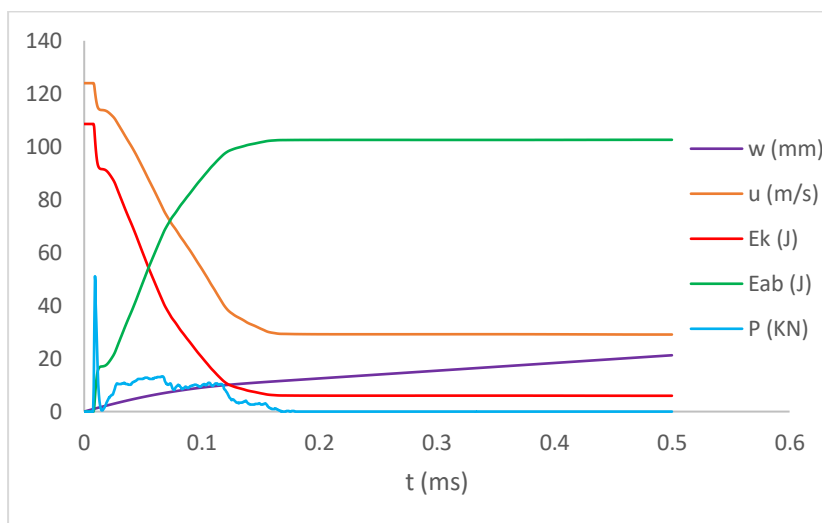
Πίνακας 6.21. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάνναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.73. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

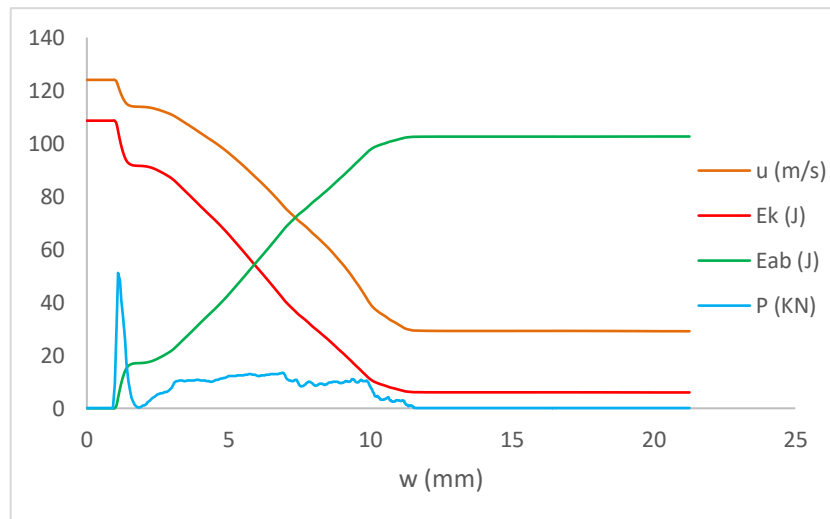


Διάγραμμα 6.73. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.74. Συνδυαστικό διάγραμμα (w, u, Ek, Eab, P – t) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351.



Διάγραμμα 6.75. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u, E_k, E_{ab}, P-w$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T351.

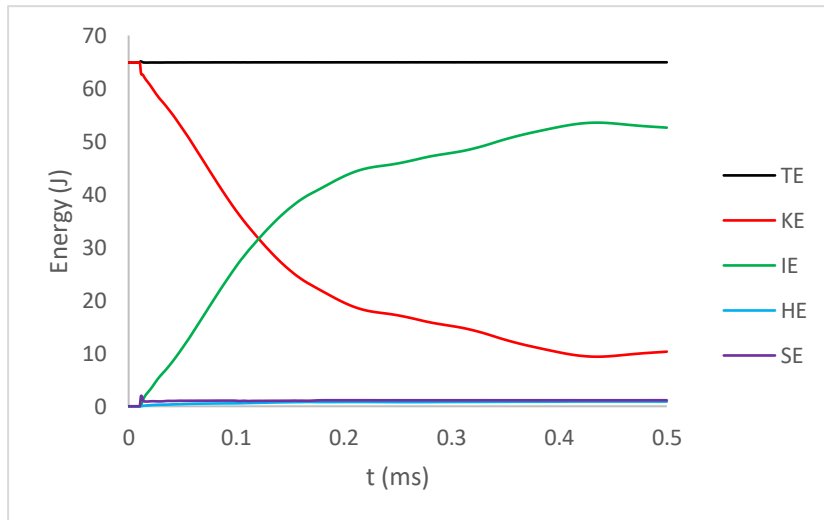
### 6.6.2 Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.22.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	72962	96	9.43
Αραιός	38088	106	-

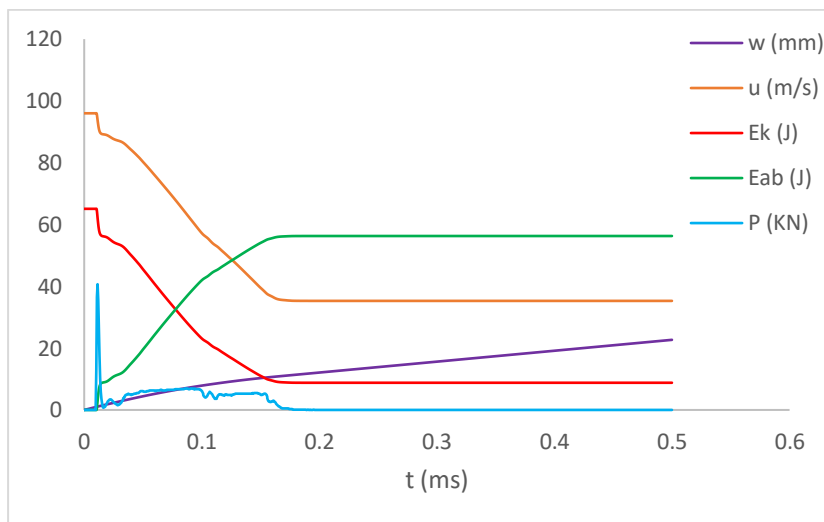
Πίνακας 6.22. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.76. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

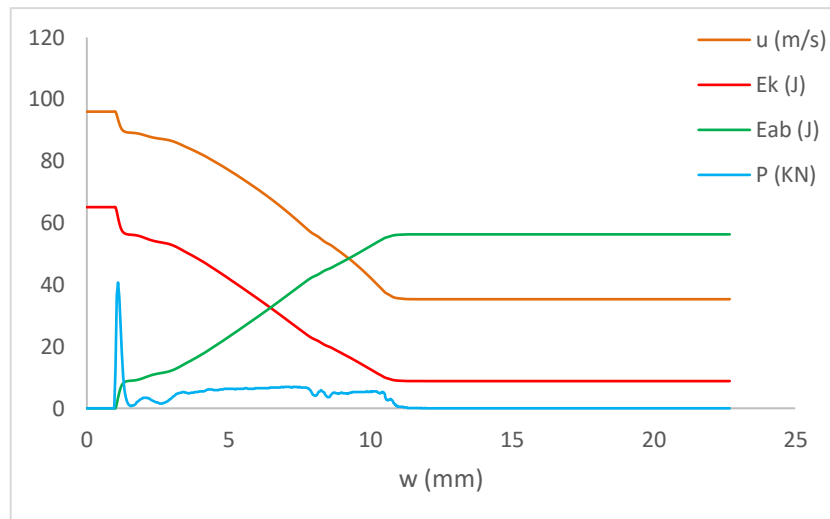


Διάγραμμα 6.76. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.77. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-t$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O.



Διάγραμμα 6.78. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-O.

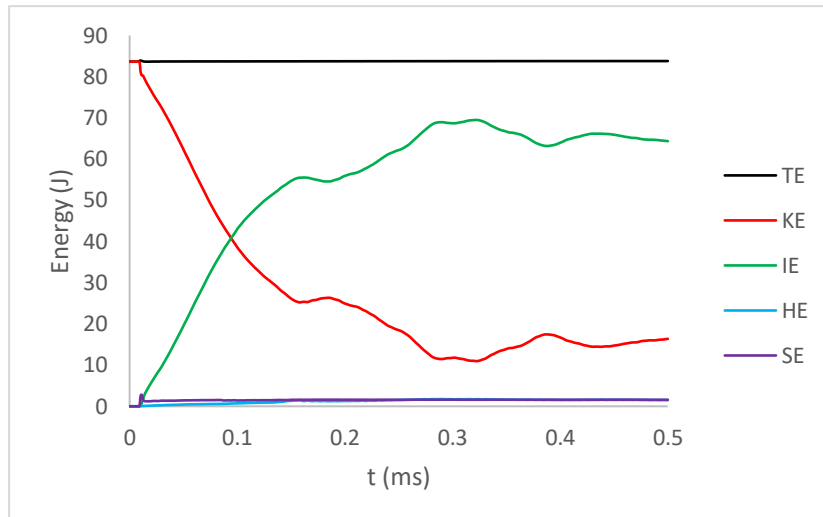
### 6.6.3 Πλάκα Al πάχους 3.2mm κράματος Al 6061-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 6061-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.23.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	72962	109	9.92
Αραιός	38088	121	-

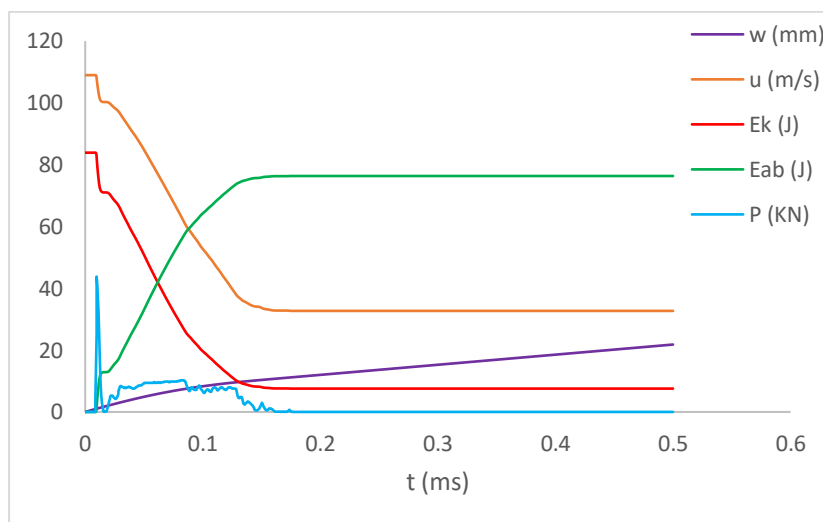
Πίνακας 6.23. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 6061-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.79. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

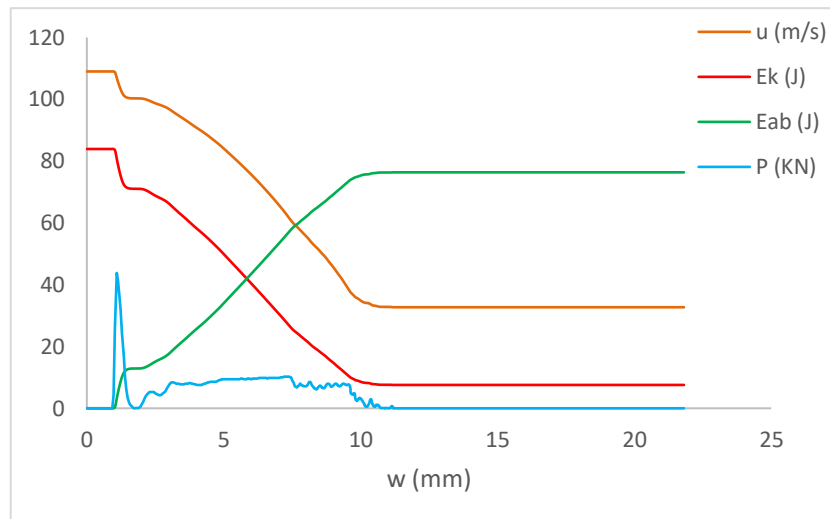


Διάγραμμα 6.79. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 6061-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 6061-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.80. Συνδυαστικό διάγραμμα (w, u, Ek, Eab, P – t) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 6061-T6.



Διάγραμμα 6.81. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P-w$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 6061-T6.

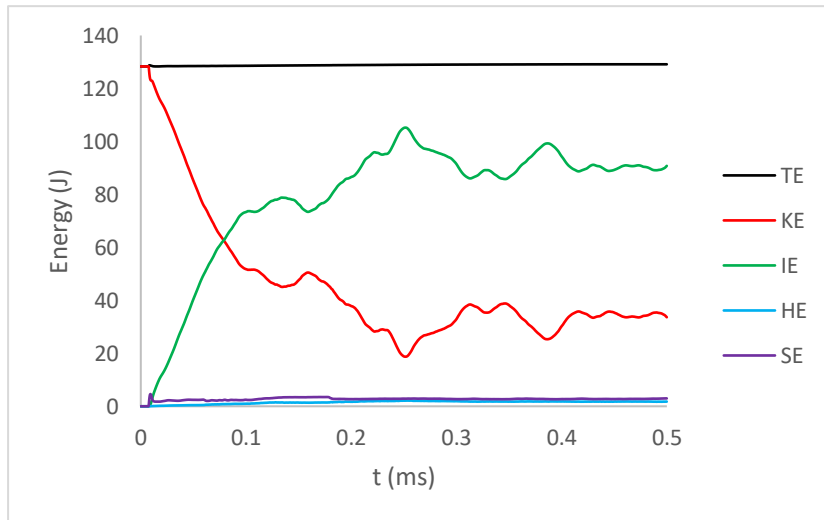
#### 6.6.4 Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.24.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	72962	135	8.78
Αραιός	38088	148	-

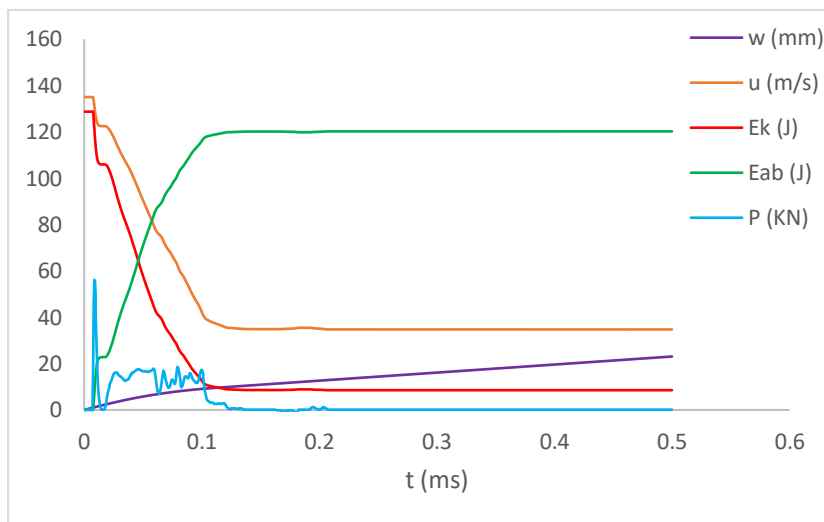
Πίνακας 6.24. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.82. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

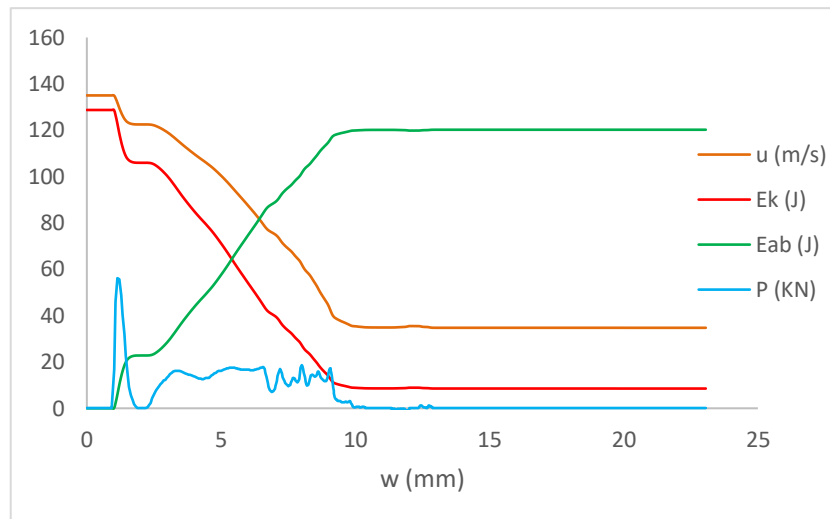


Διάγραμμα 6.82. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.83. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6.



Διάγραμμα 6.84. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7075-T6.

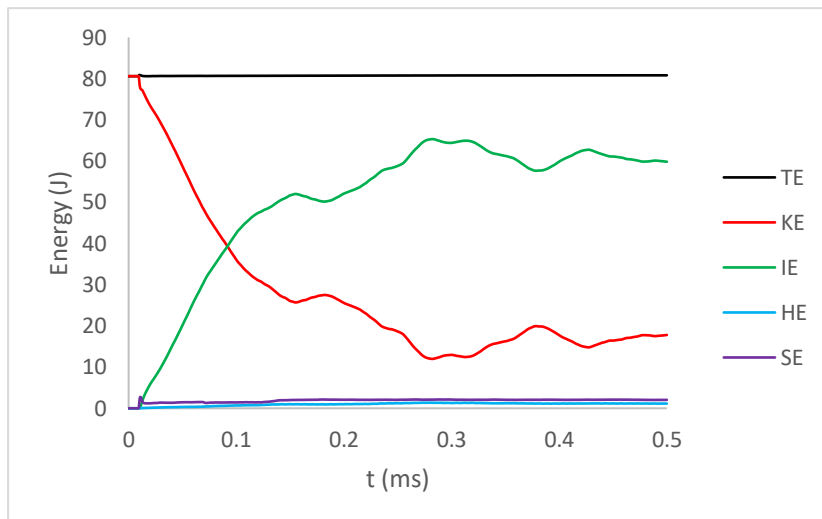
### 6.6.5 Πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039

Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.25.

Κάρναβος	Αριθμός στοιχείων	Βαλλιστικό όριο με χρήση ANSYS/LS-DYNA (m/s)	Σύγκλιση με αραιό κάρναβο (%)
Πυκνός	72962	107	8.54
Αραιός	38088	117	-

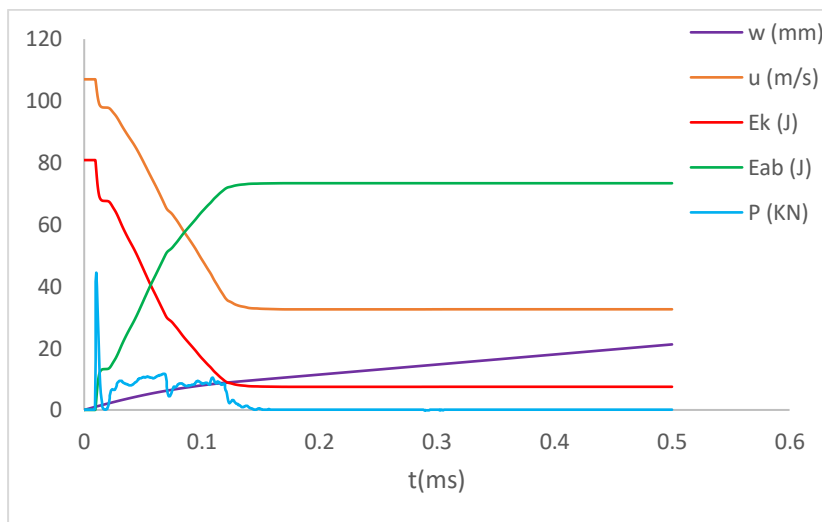
Πίνακας 6.25. Αποτελέσματα βαλλιστικών ορίων για πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.85. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

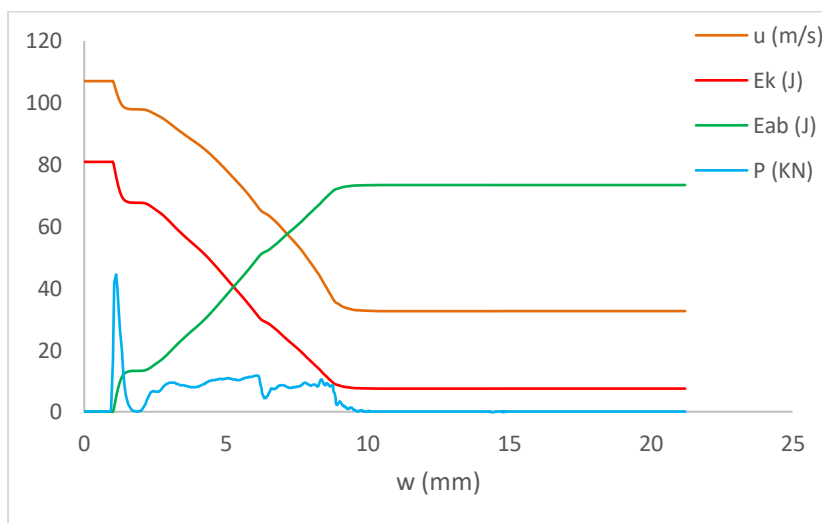


Διάγραμμα 6.85. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE-Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.86. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039.

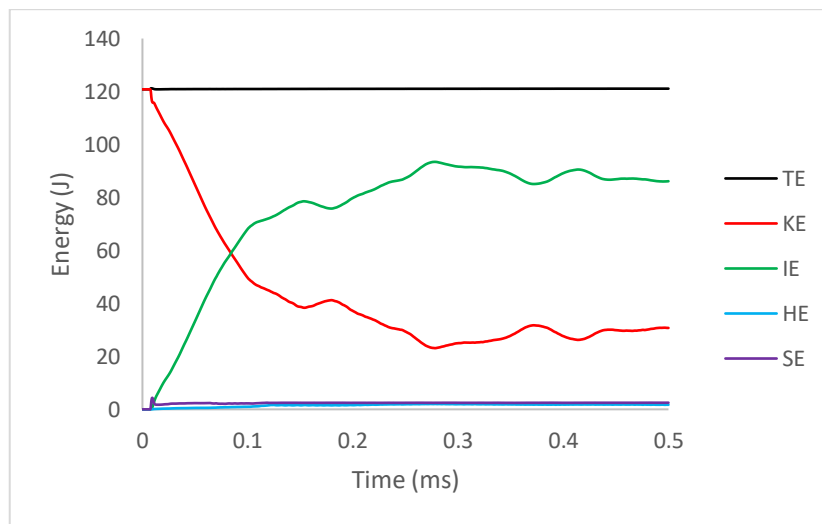


Διάγραμμα 6.87. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 7039.

### 6.6.6 Πλάκα ΑΙ πάχους 1.6mm κράματος ΑΙ 2024-T3

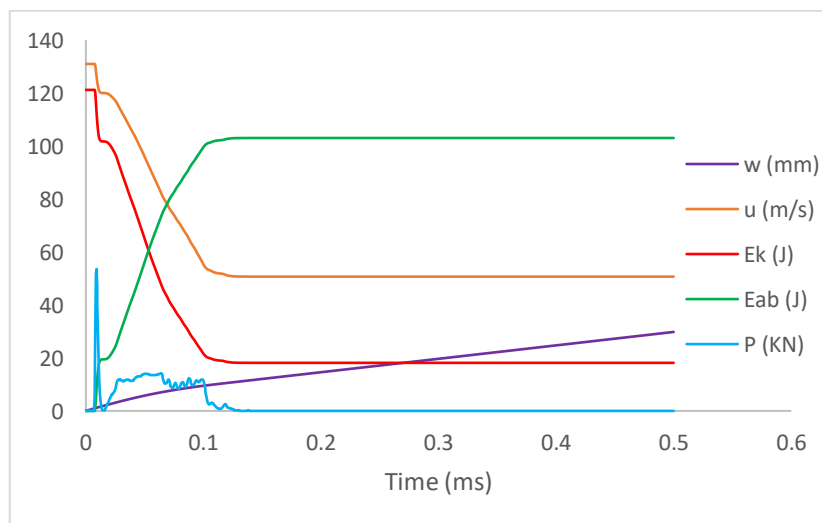
Τα αποτελέσματα των βαλλιστικών ορίων που προέκυψαν για τον πυκνό και αραιό κάρναβο πλάκας ΑΙ πάχους 1.6mm κράματος ΑΙ 2024-T3 συγκλίνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό (απόκλιση μικρότερη από 10%) και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 4.6.

Το διάγραμμα ενεργειών που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο αφενός της διακριτοποίησης και αφετέρου των επαφών που ορίστηκαν κατά την μοντελοποίηση φαίνεται στο Διάγραμμα 6.88. Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα αυτό τόσο η ενέργεια hourglass όσο και η sliding βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων, καθώς και οι δύο είναι μικρότερες από το 10% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας.

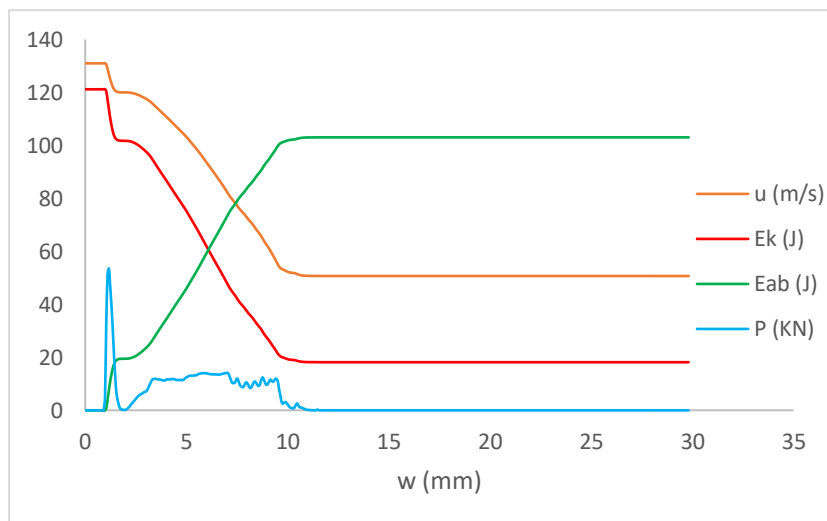


Διάγραμμα 6.88. Διάγραμμα ενεργειών – χρόνου για την πλάκα ΑΙ πάχους 1.6mm κράματος ΑΙ 2024-T3. (TE= Total Energy, KE=Kinetic Energy, IE=Internal Energy, HE=Hourglass Energy, SE=Sliding Energy)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της βαλλιστικής κρούσης της πλάκας ΑΙ πάχους 1.6mm κράματος ΑΙ 2024-T3 με τη χρήση του ANSYS/LS-DYNA αποτυπώνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 6.89. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $w$ ,  $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - t$ ) για την πλάκα ΑΙ πάχους 1.6mm κράματος ΑΙ 2024-T3.



Διάγραμμα 6.90. Συνδυαστικό διάγραμμα ( $u$ ,  $E_k$ ,  $E_{ab}$ ,  $P - w$ ) για την πλάκα Al πάχους 1.6mm κράματος Al 2024-T3.

## 6.7 Σχολιασμός - Συμπεράσματα

### 6.7.1 Γενικά

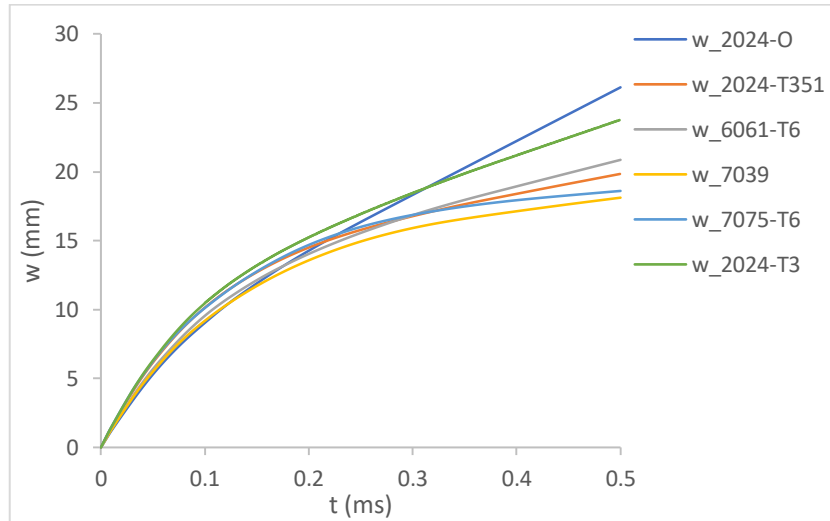
Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την συμπεριφορά σε βαλλιστική κρούση των πλακών GLARE και αλουμινίου που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των παραγράφων §6.2-6.6, αλλά και του Κεφ.4 (για κράμα Al 2024-T3) και κατασκευάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα  $w-t$ ,  $u-t$ ,  $E_k-t$ ,  $E_{ab}-t$ ,  $P-t$ ,  $u-w$ ,  $E_k-w$ ,  $E_{ab}-w$  και  $P-w$ . Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάστηκαν, ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης δύο κύριων παραγόντων αφενός της διαμόρφωσης των πλακών (πάχος, αριθμός στρώσεων, κτλ.) και αφετέρου του κράματος κατασκευής των στρώσεων αλουμινίου. Έτσι, κατασκευάστηκαν δύο σειρές διαγραμμάτων. Στη πρώτη σειρά για κάθε πλάκα GLARE/Αλουμινίου τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται σε συνάρτηση με το κράμα αλουμινίου, ενώ στη δεύτερη παρουσιάζονται για κάθε κράμα αλουμινίου συναρτήσεως των πλακών GLARE/Αλουμινίου.

Στα διαγράμματα αυτά, αλλά και στη συνέχεια της παραγράφου, για λόγους απλοποίησης ακολουθήθηκε η ακόλουθη συντομογραφία:

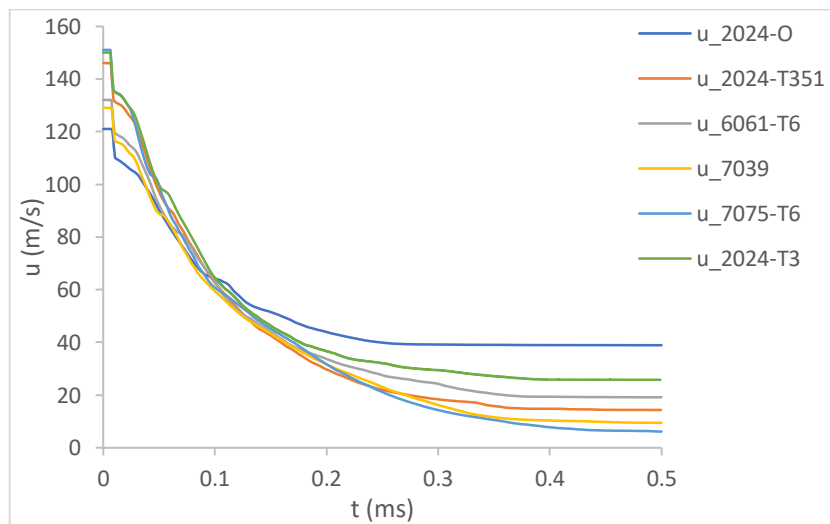
1. GLARE 5-3/2-0.508 συμβολίζεται ως «GLARE\_0.1in»
2. GLARE 5-3/2-0.3048 συμβολίζεται ως «GLARE\_0.076in»
3. GLARE 5-2/1-0.508 συμβολίζεται ως «GLARE\_0.06in»
4. Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 3.2mm συμβολίζεται ως «plate\_3.2mm»
5. Πλάκα Al 2024-T3 πάχους 1.6mm συμβολίζεται ως «plate\_1.6mm»

## 6.7.2 Συνδυαστικά Διαγράμματα με μεταβλητή το κράμα Al

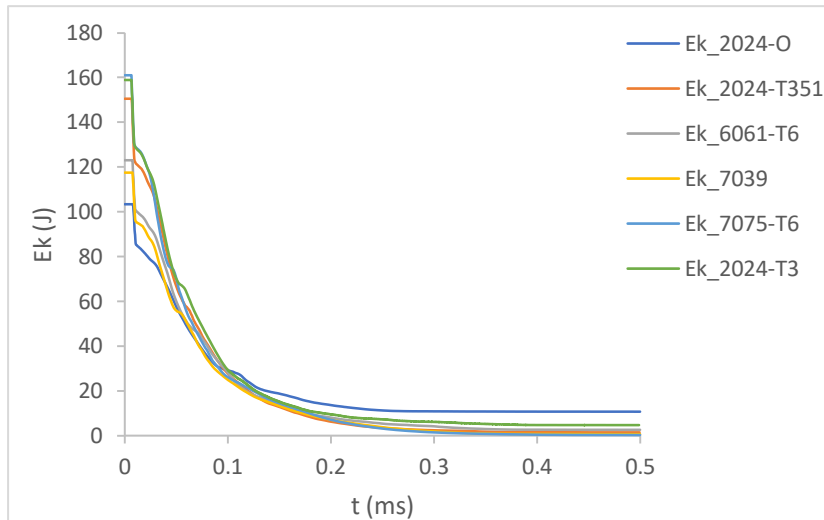
### 6.7.2.1 Πλάκα GLARE 3/2-0.508



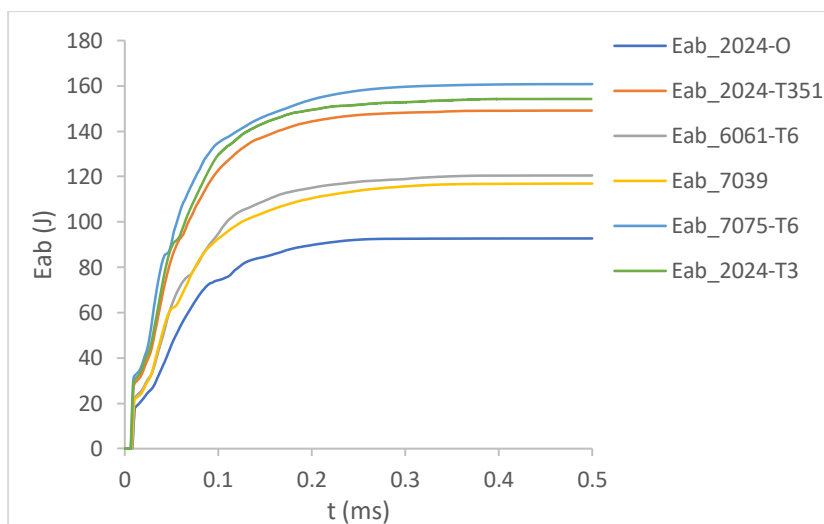
Διάγραμμα 6.91. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



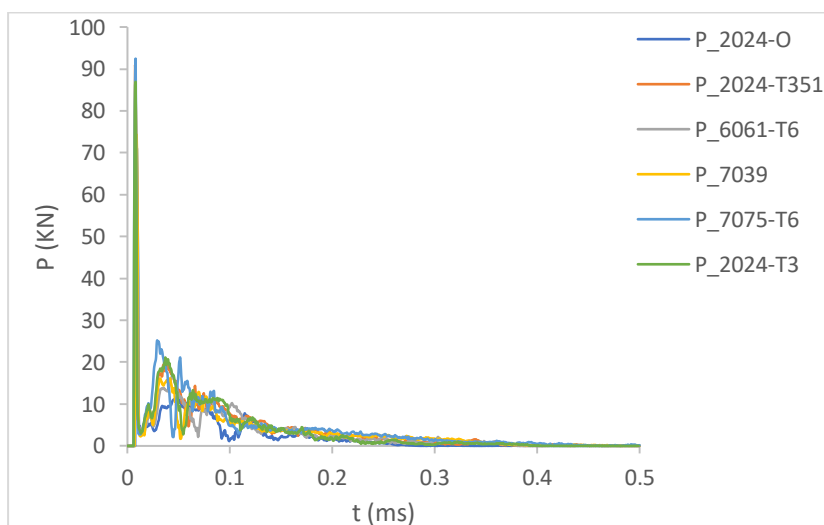
Διάγραμμα 6.92. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



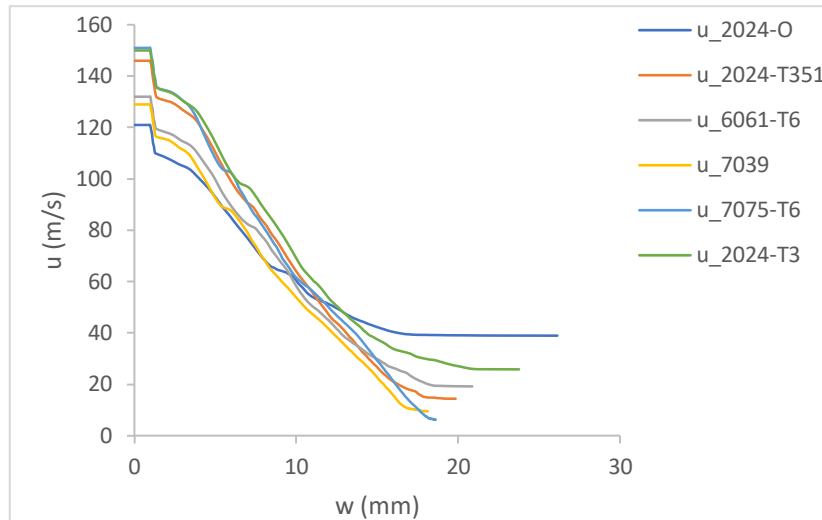
Διάγραμμα 6.93. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



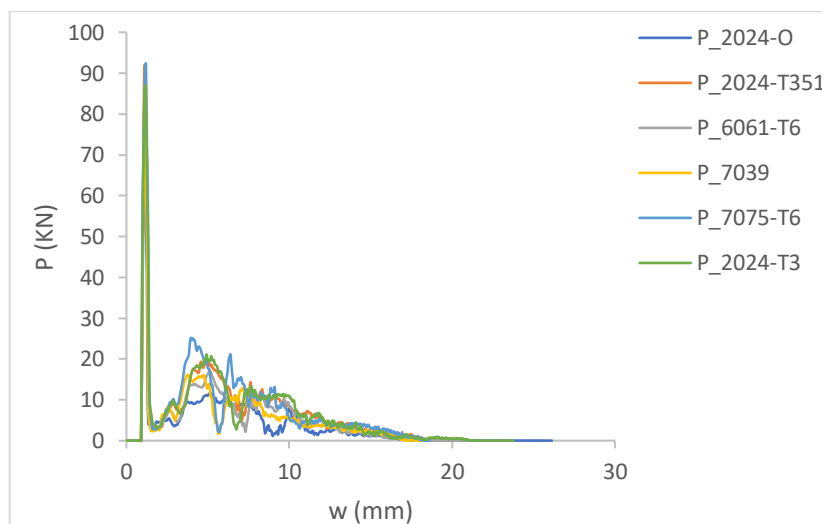
Διάγραμμα 6.94. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



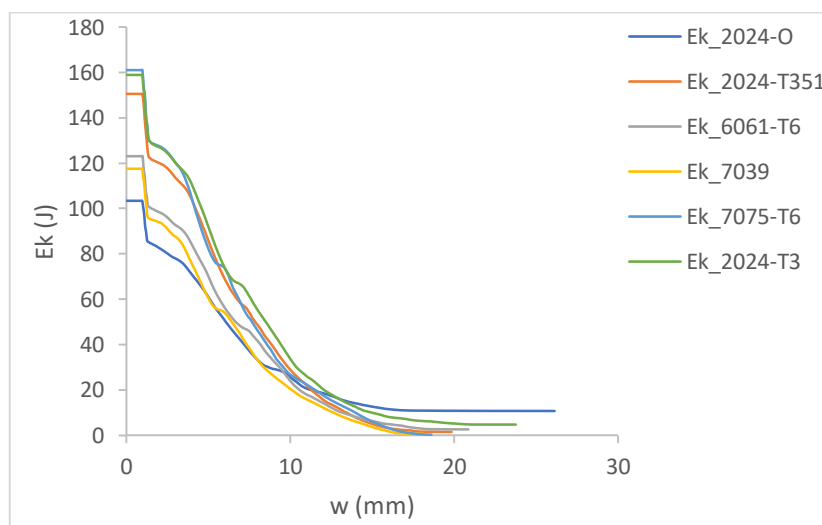
Διάγραμμα 6.95. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



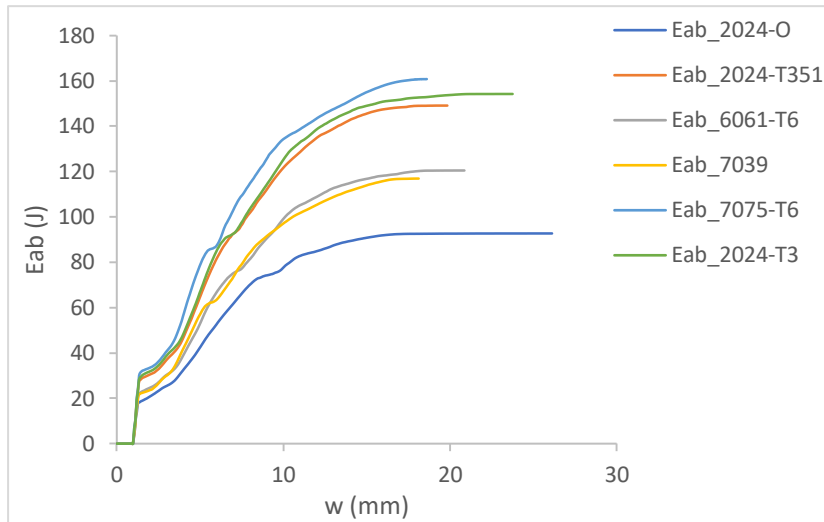
Διάγραμμα 6.96. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.97. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

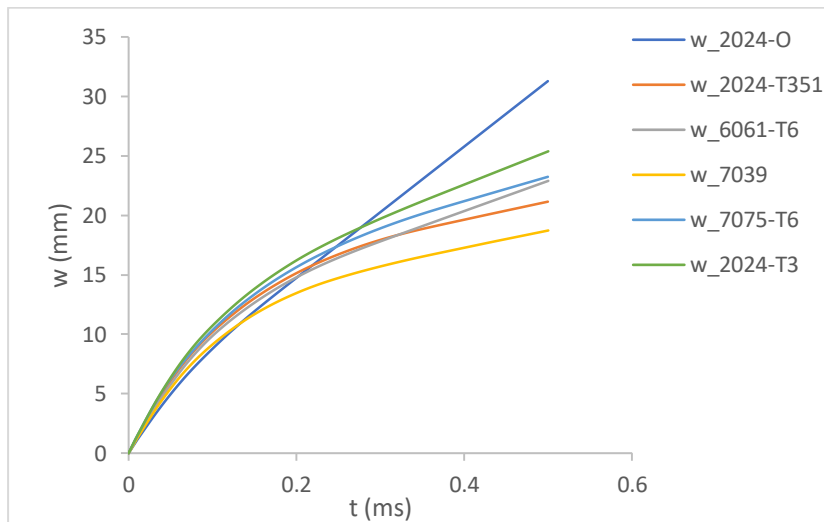


Διάγραμμα 6.98. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης. ( $E_k-w$ ).

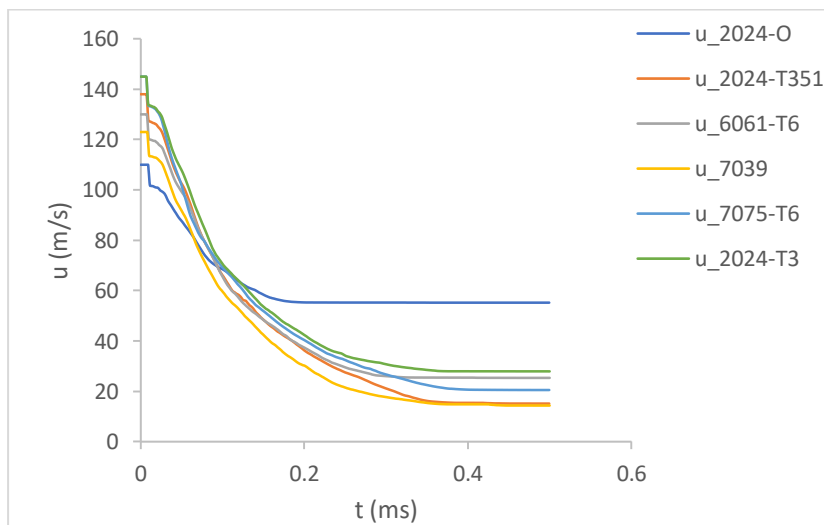


Διάγραμμα 6.99. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας-μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

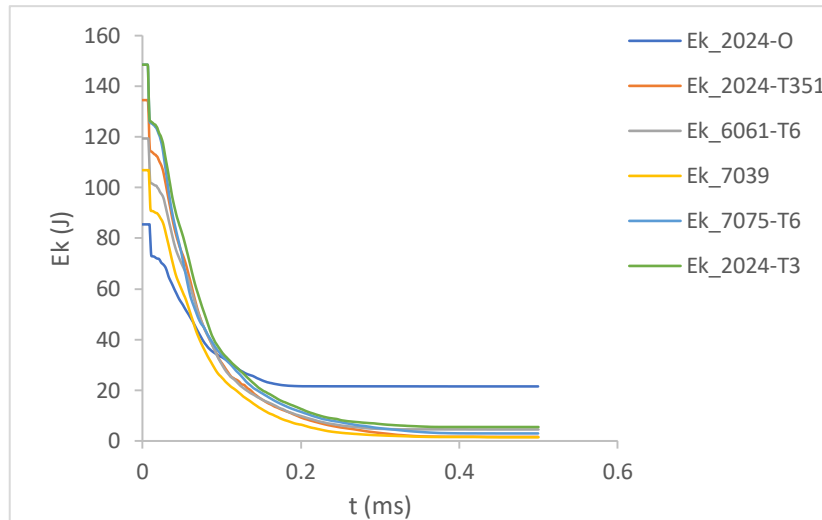
### 6.7.2.2 Πλάκα GLARE 3/2-0.3048



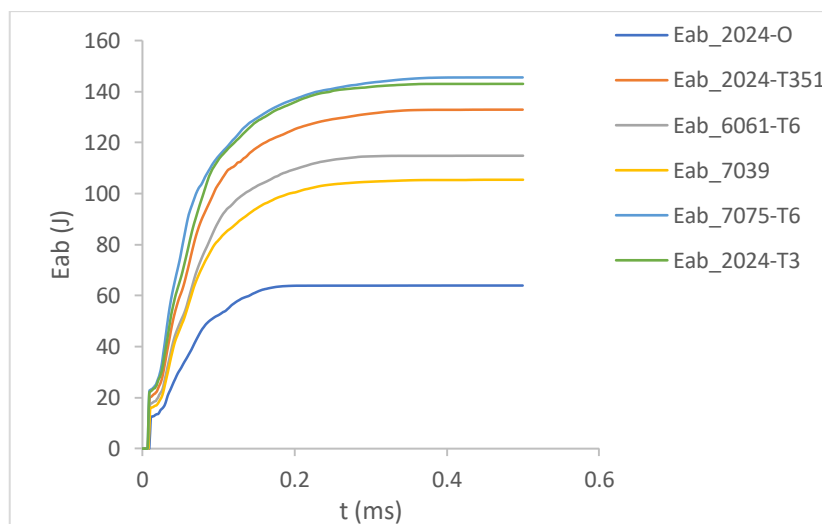
Διάγραμμα 6.100. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



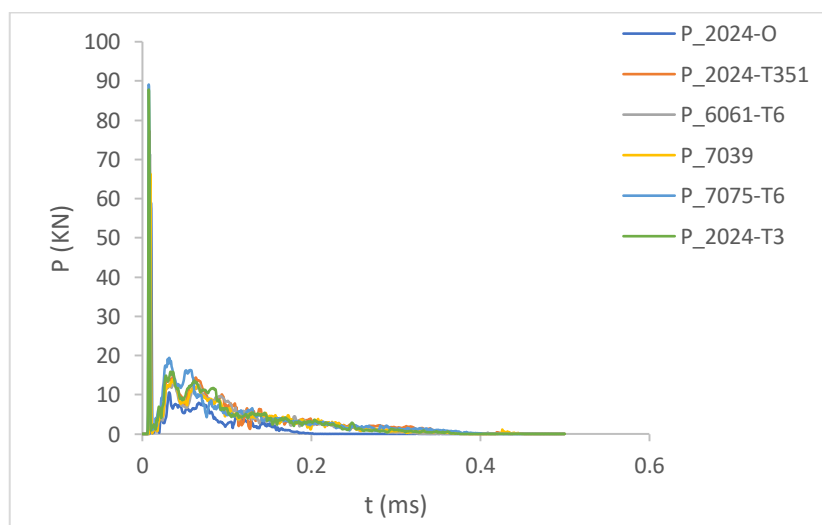
Διάγραμμα 6.101. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



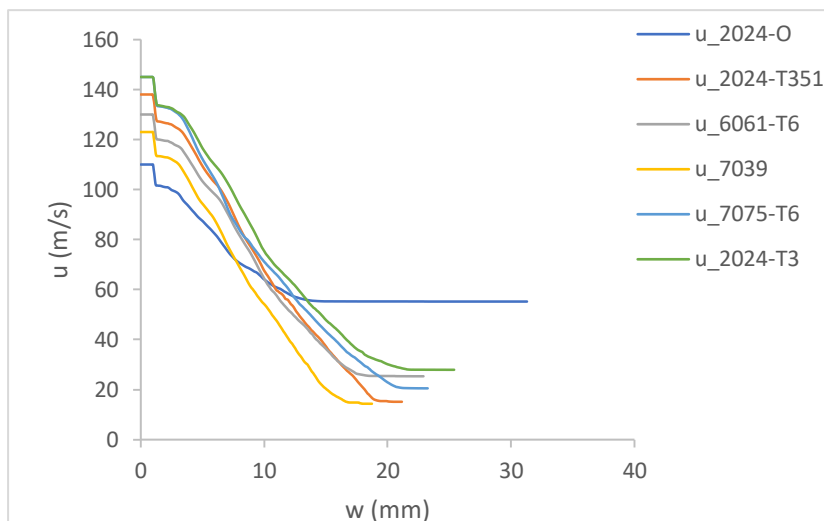
Διάγραμμα 6.102: Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



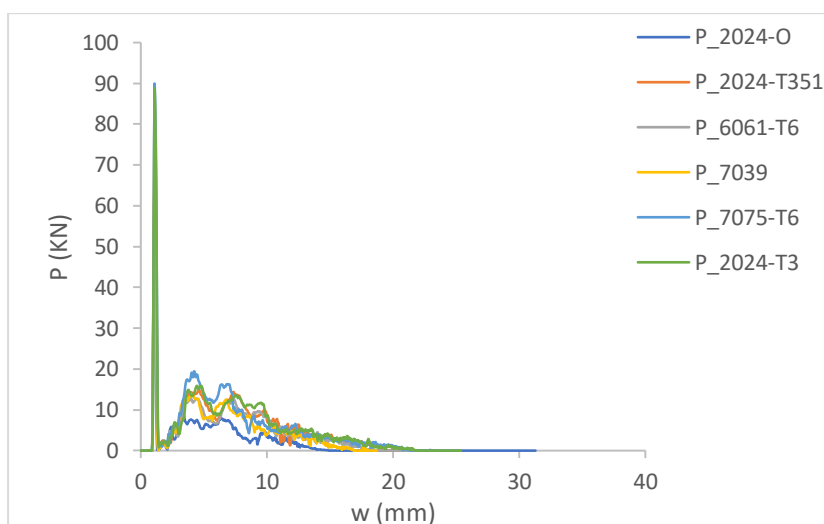
Διάγραμμα 6.103: Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



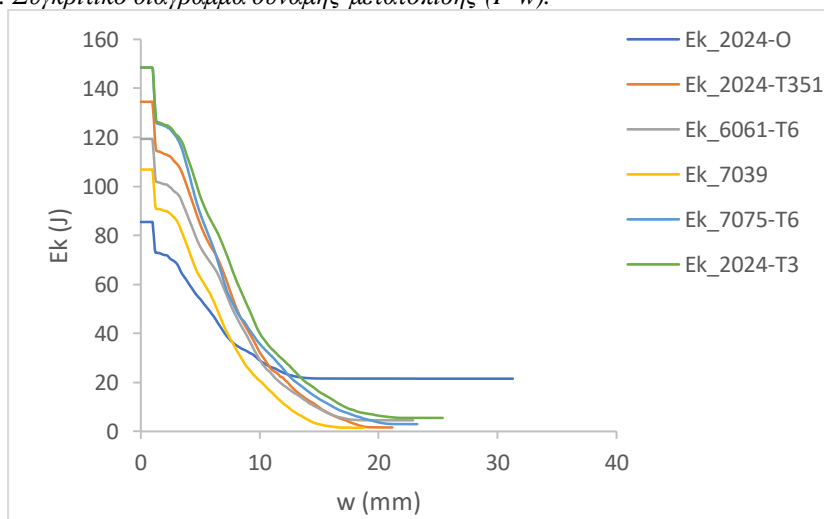
Διάγραμμα 6.104: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



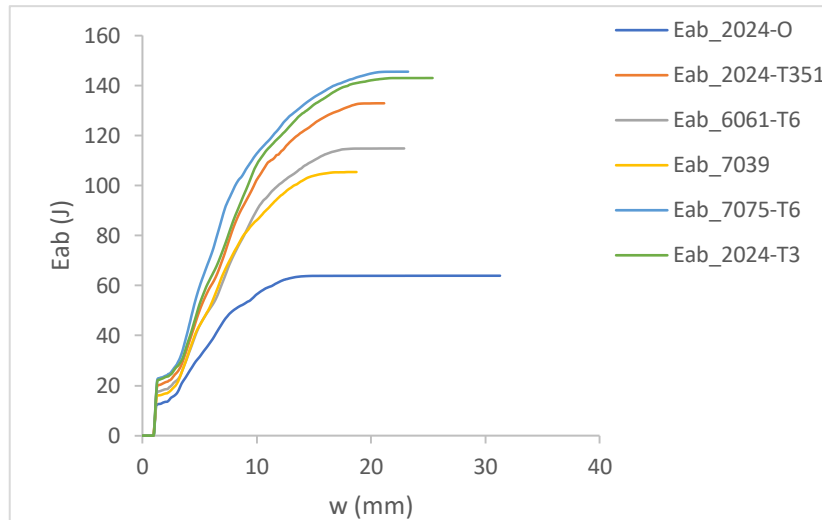
Διάγραμμα 6.105. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.106. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

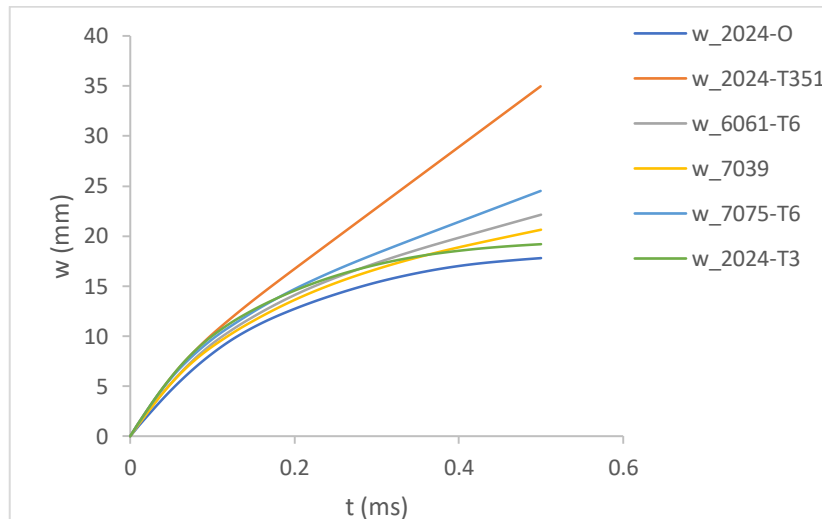


Διάγραμμα 6.107. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης ( $E_k-w$ ).

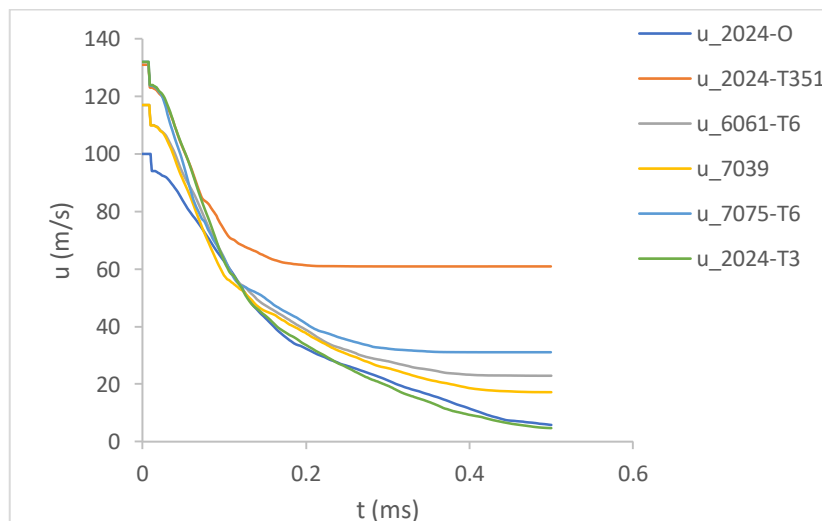


Διάγραμμα 6.108. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

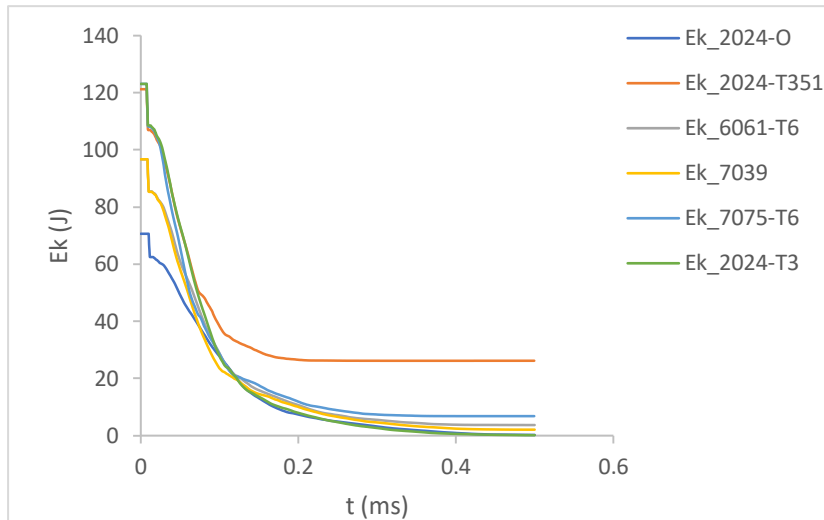
### 6.7.2.3 Πλάκα GLARE 2/1-0.508



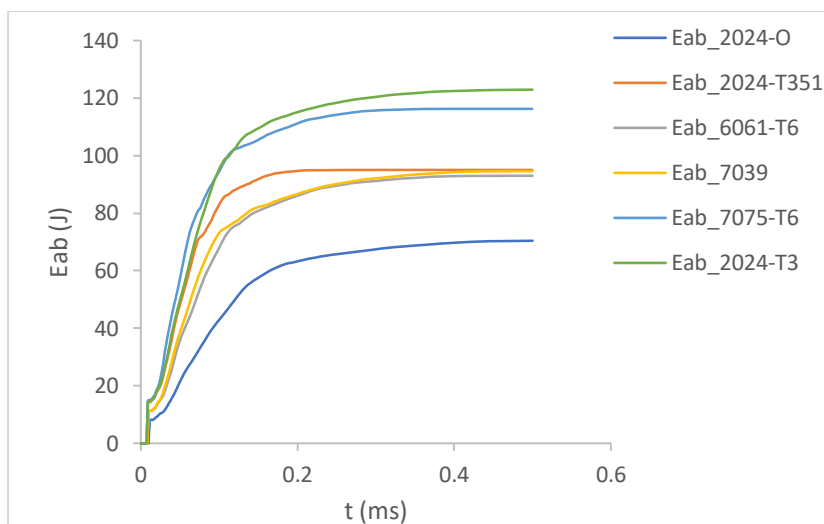
Διάγραμμα 6.109. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



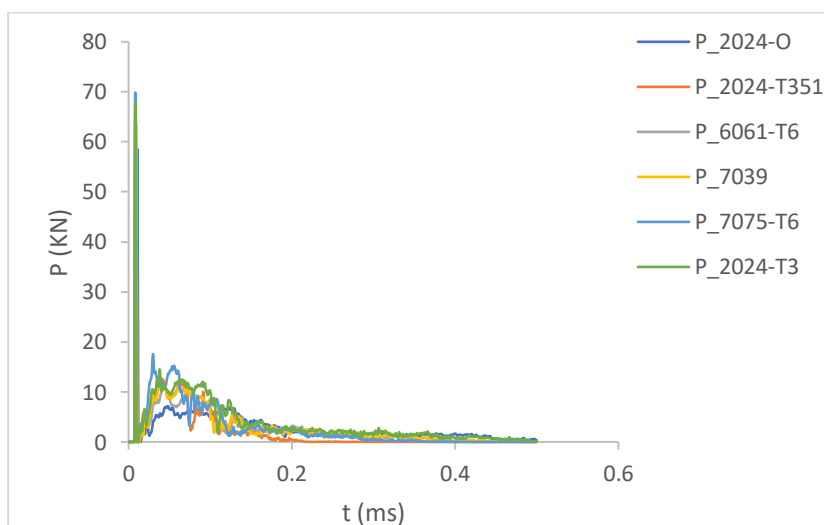
Διάγραμμα 6.110. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



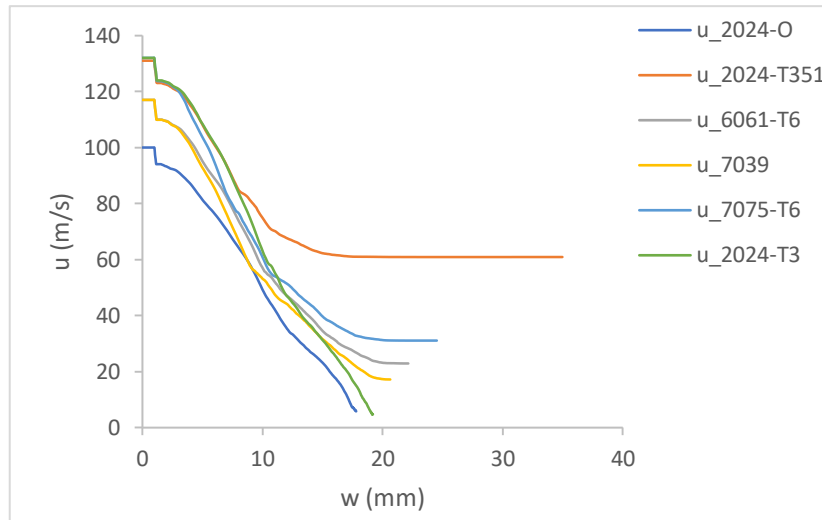
Διάγραμμα 6.111. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



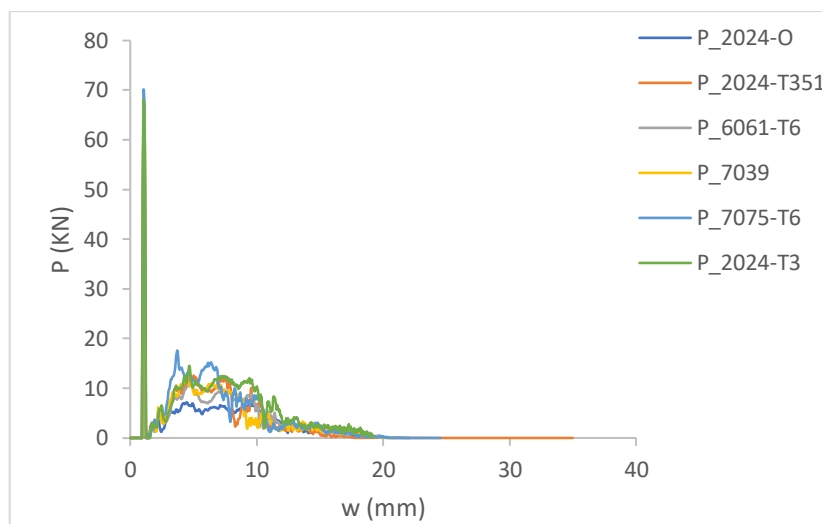
Διάγραμμα 6.112. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



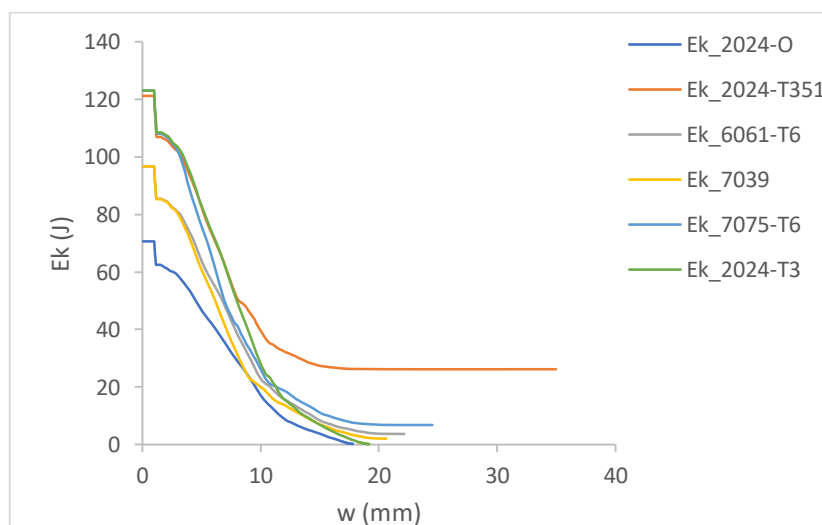
Διάγραμμα 6.113. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



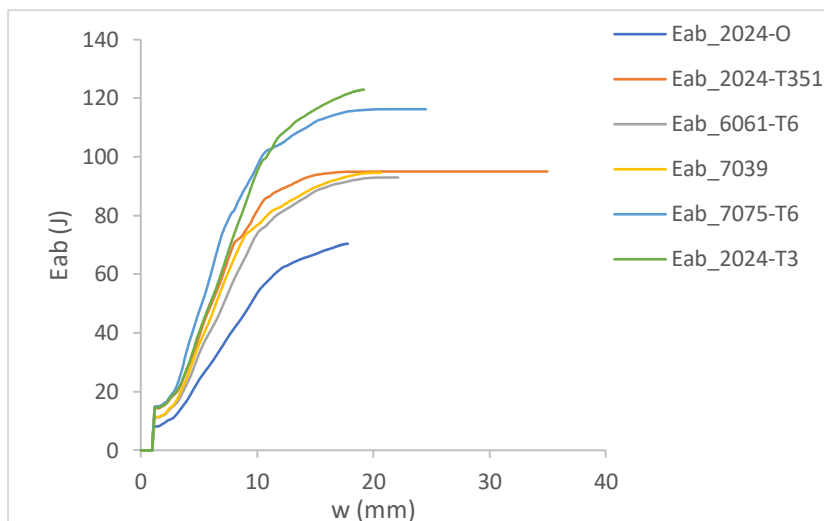
Διάγραμμα 6.114. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.115. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

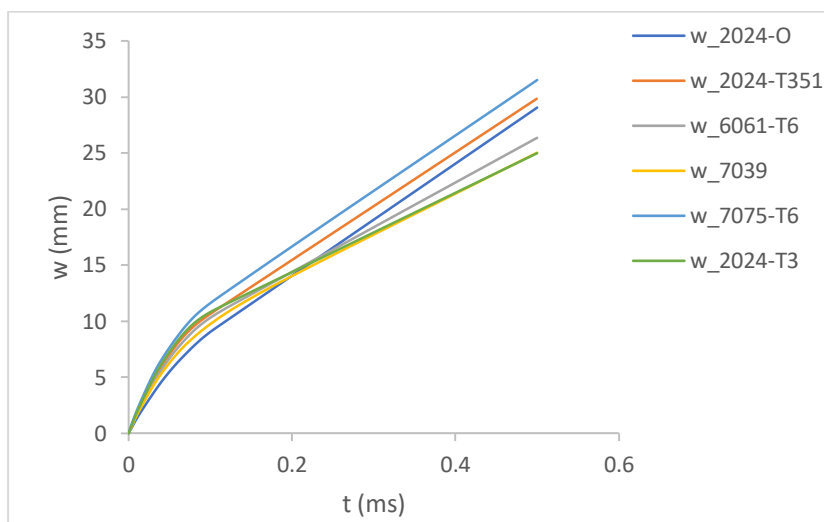


Διάγραμμα 6.116. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης. ( $E_k-w$ ).

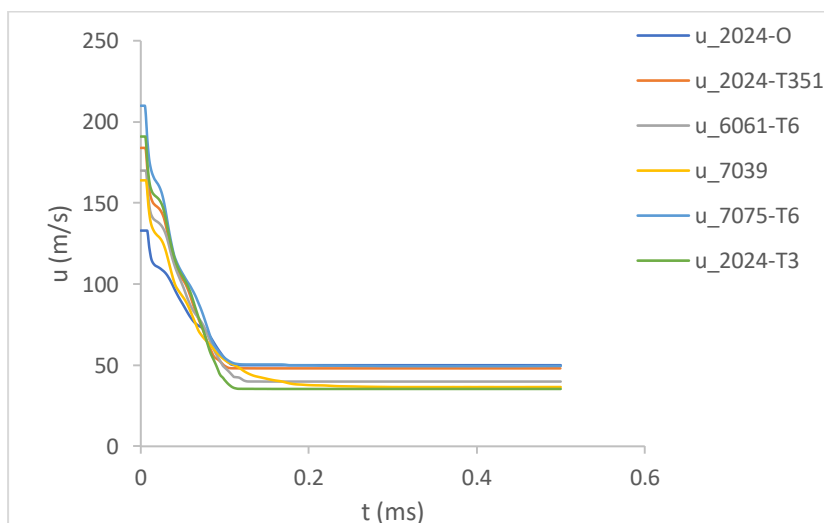


Διάγραμμα 6.117. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

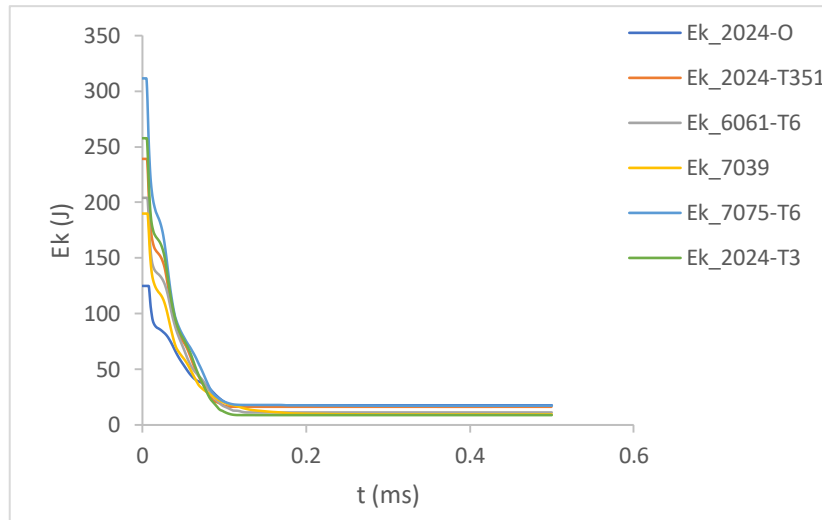
### 6.7.2.4 Πλάκα Al πάχους 3.2mm



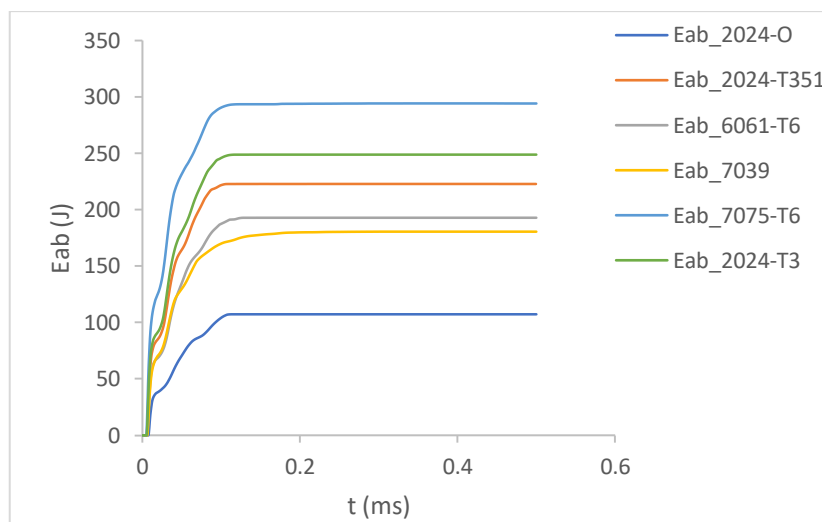
Διάγραμμα 6.118. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



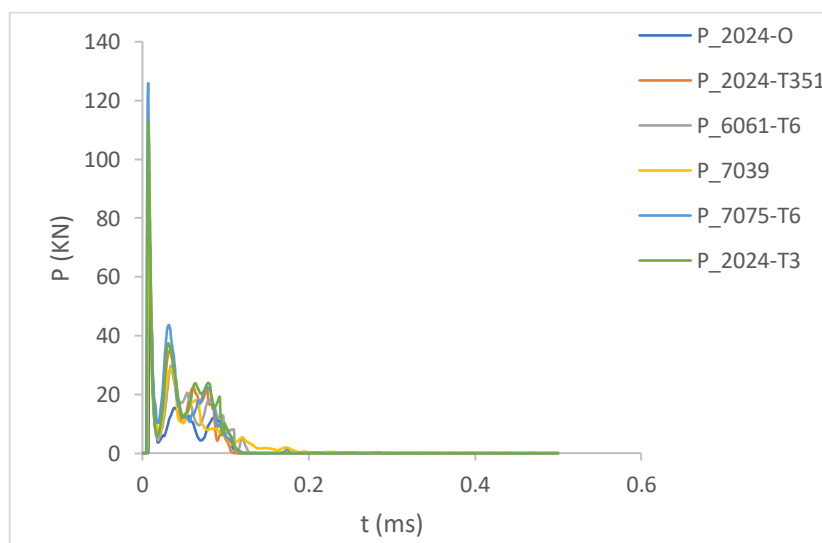
Διάγραμμα 6.119. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



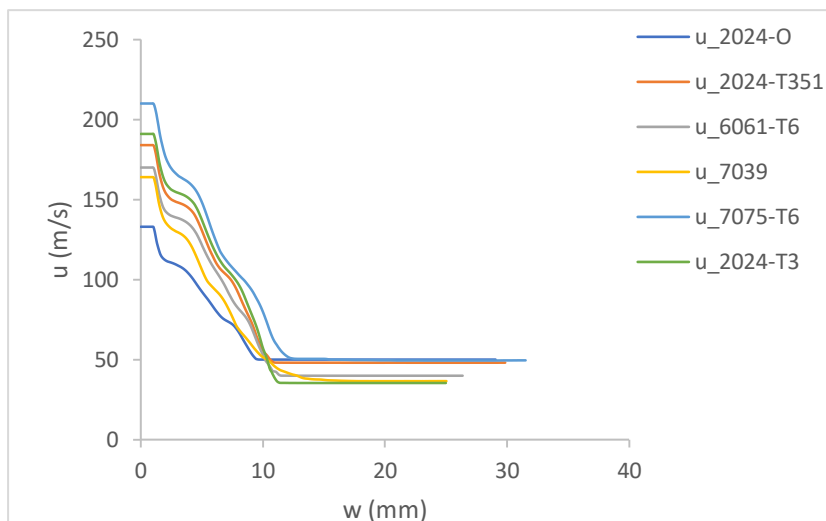
Διάγραμμα 6.120. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



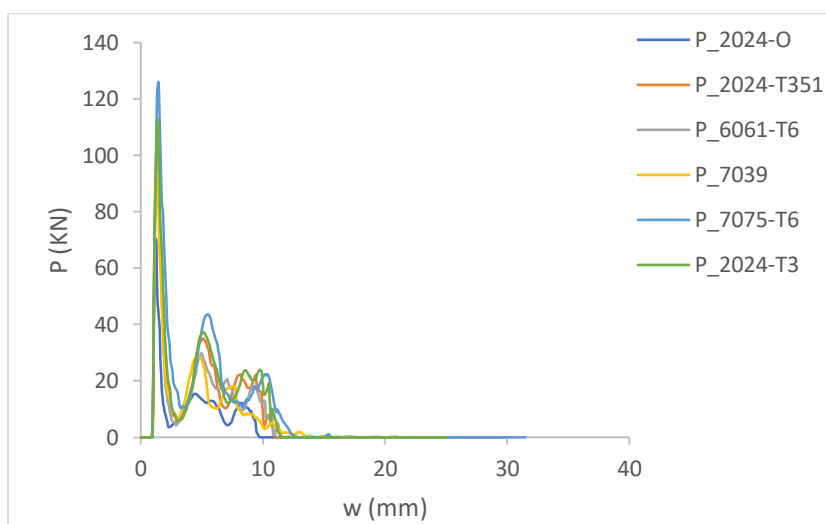
Διάγραμμα 6.121. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



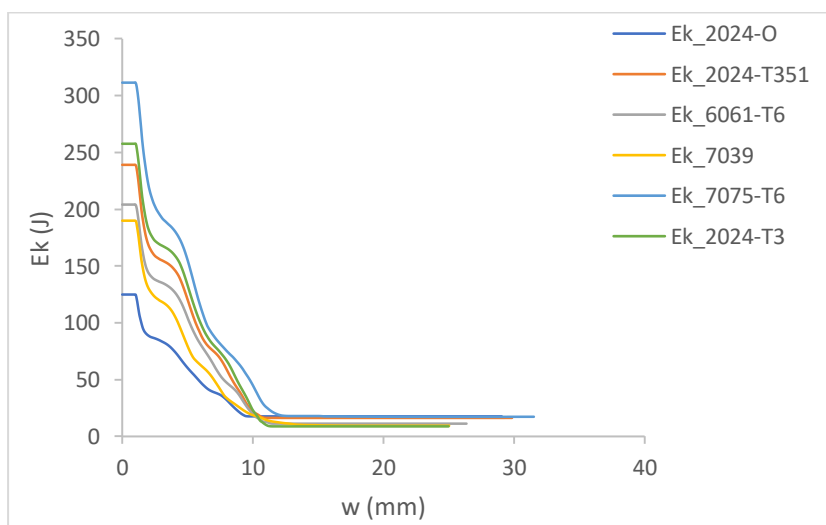
Διάγραμμα 6.122. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



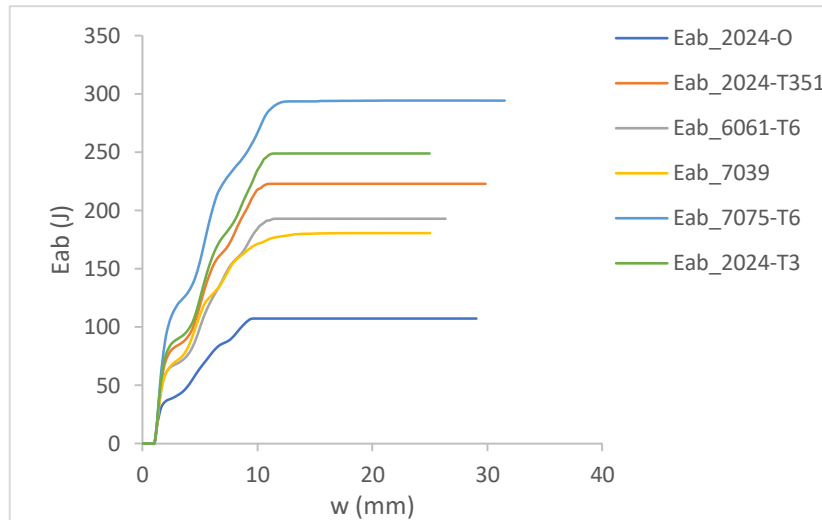
Διάγραμμα 6.123. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.124. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

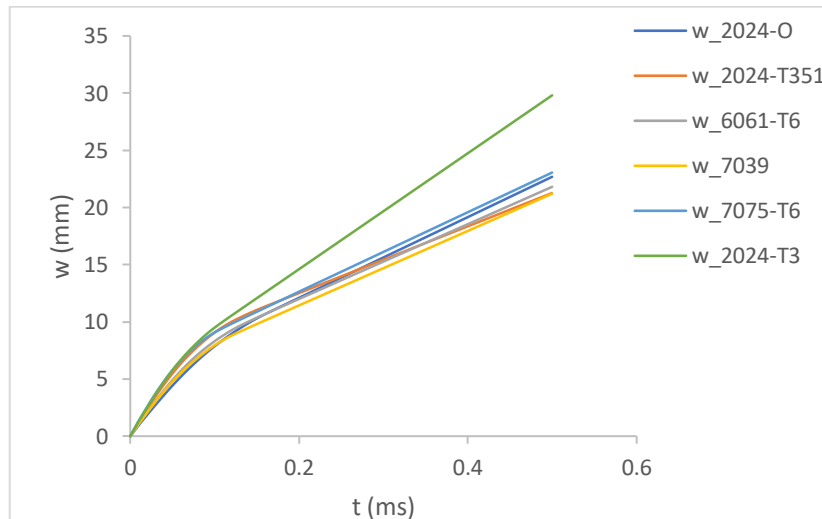


Διάγραμμα 6.125. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης ( $Ek-w$ ).

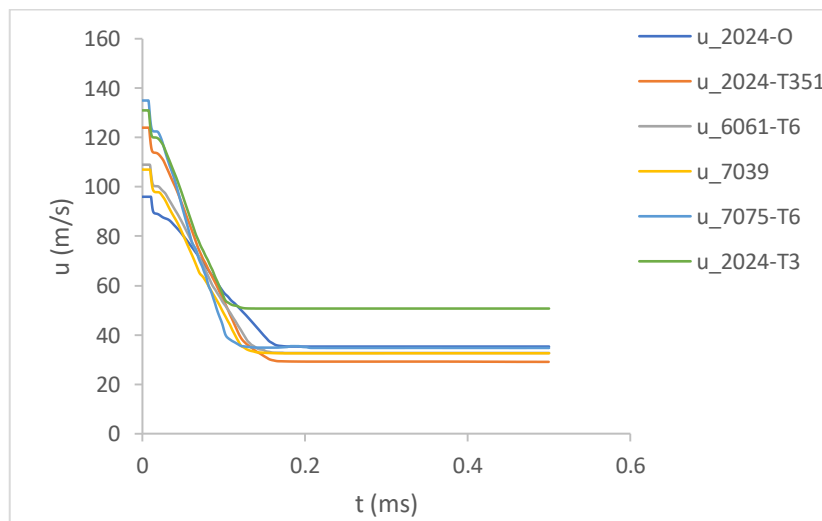


Διάγραμμα 6.126. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

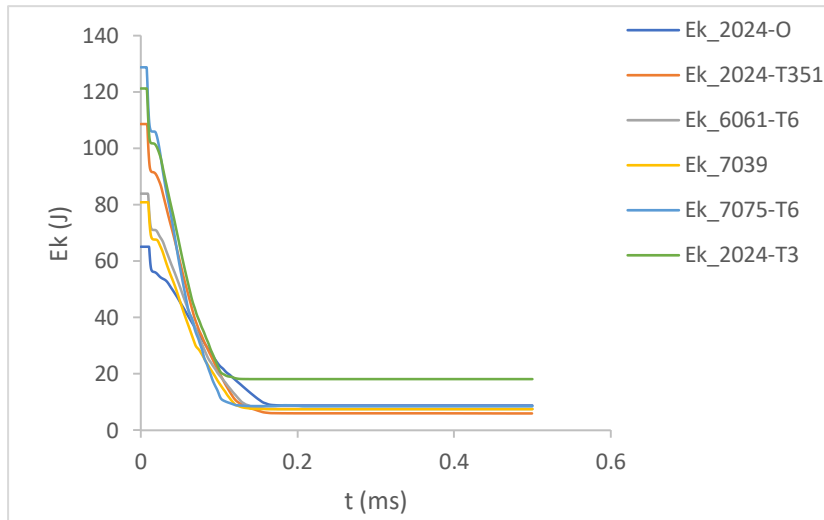
### 6.7.2.5 Πλάκα ΑΙ πάχους 1.6mm



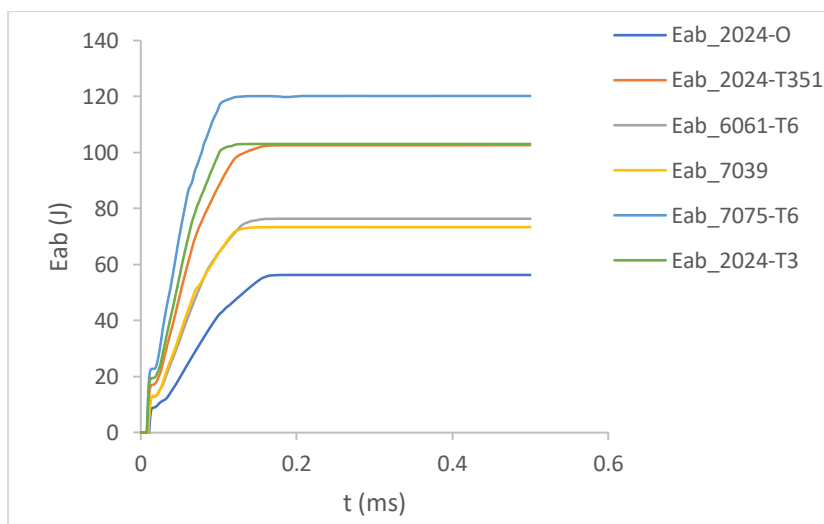
Διάγραμμα 6.127. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



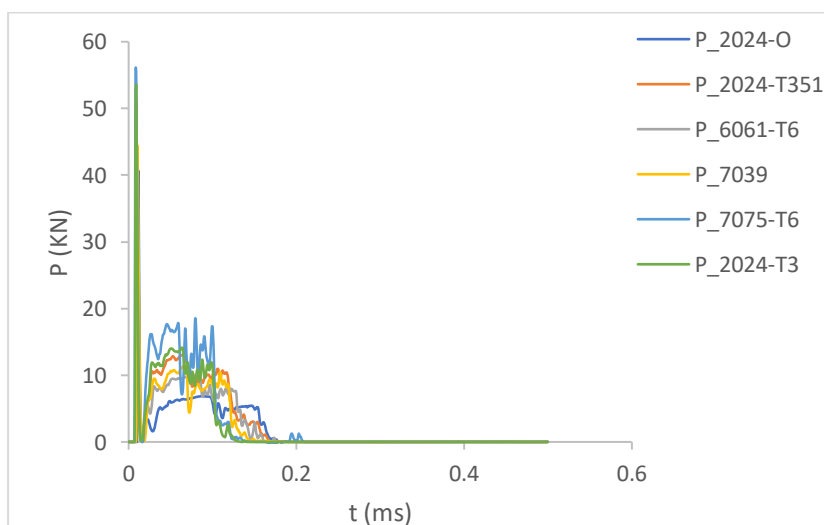
Διάγραμμα 6.128. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



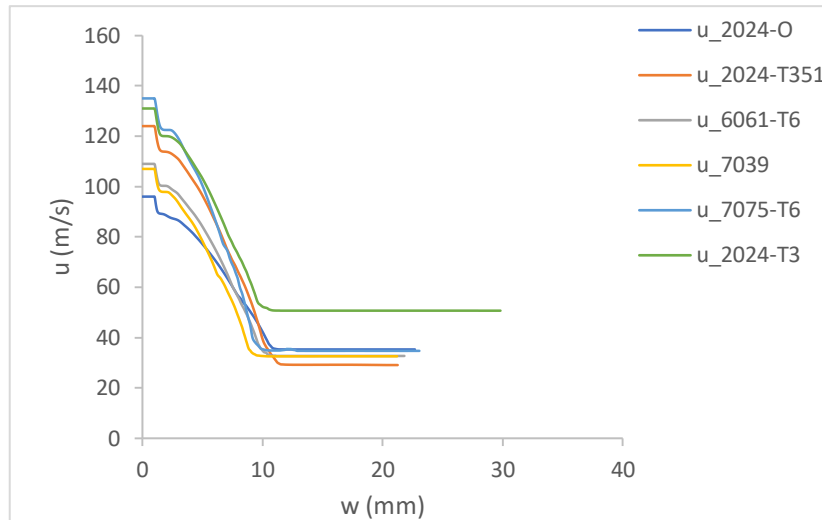
Διάγραμμα 6.129. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



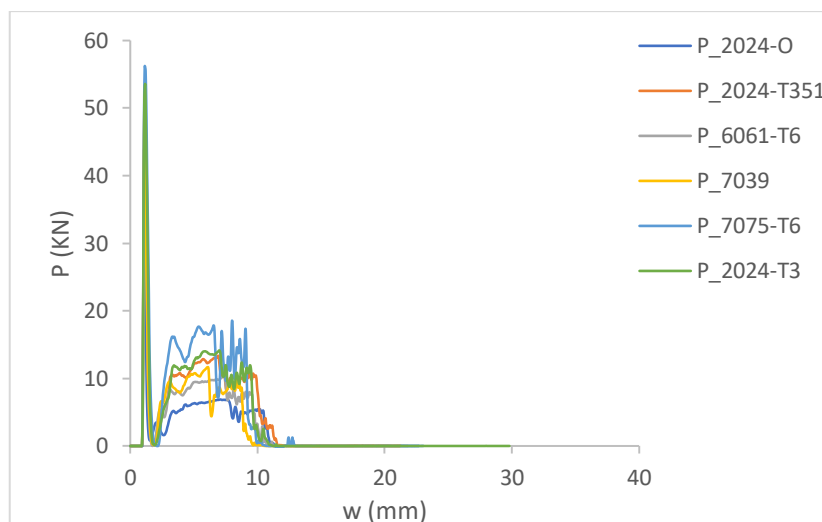
Διάγραμμα 6.130. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



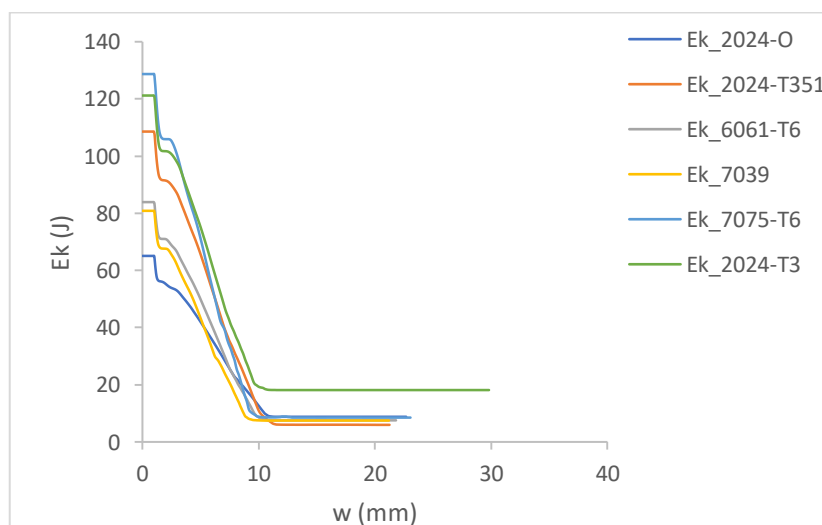
Διάγραμμα 6.131. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



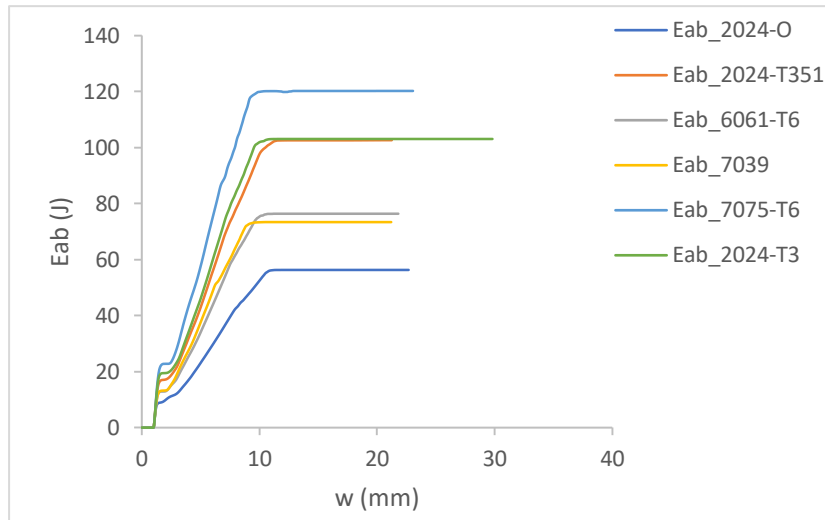
Διάγραμμα 6.132. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.133. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).



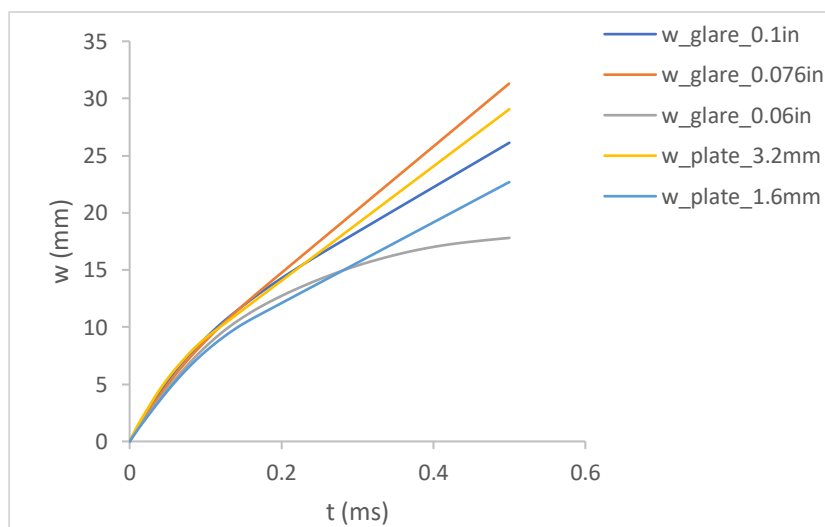
Διάγραμμα 6.134. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης. ( $E_k-w$ ).



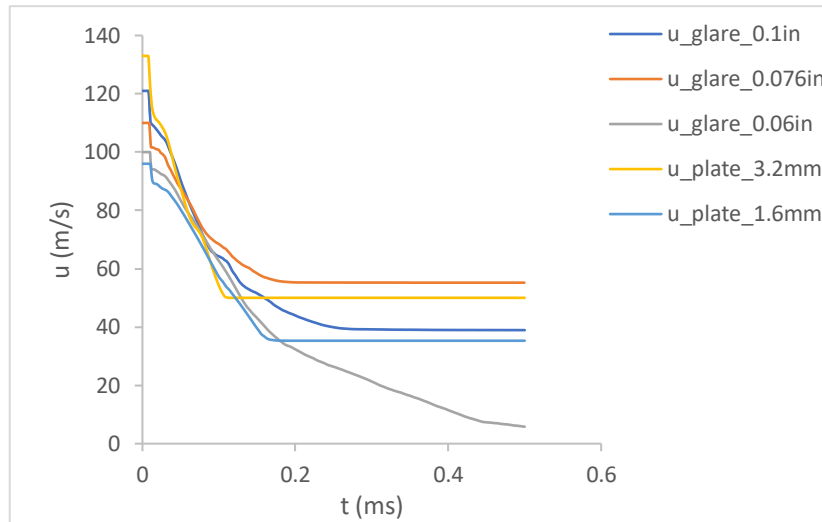
Διάγραμμα 6.135. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}$ - $w$ ).

### 6.7.3 Συνδυαστικά Διαγράμματα με μεταβλητή τη διαμόρφωση της πλάκας

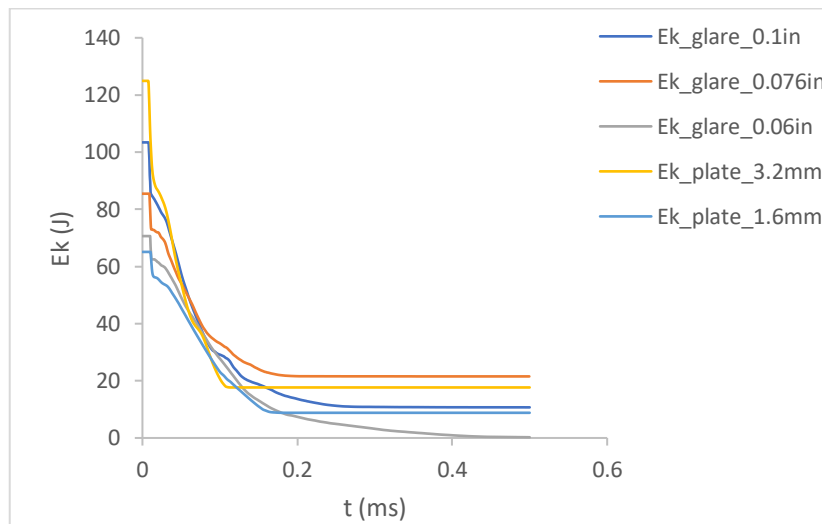
#### 6.7.3.1 Κράμα Al 2024-O



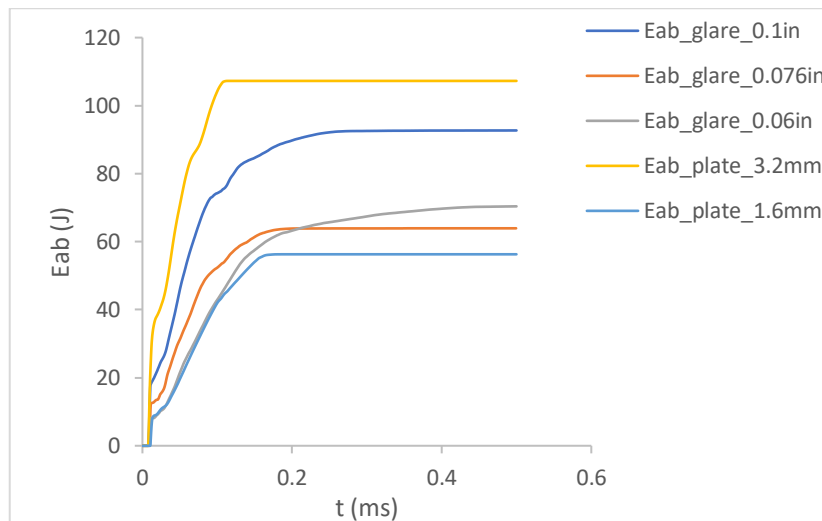
Διάγραμμα 6.136. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w$ - $t$ ).



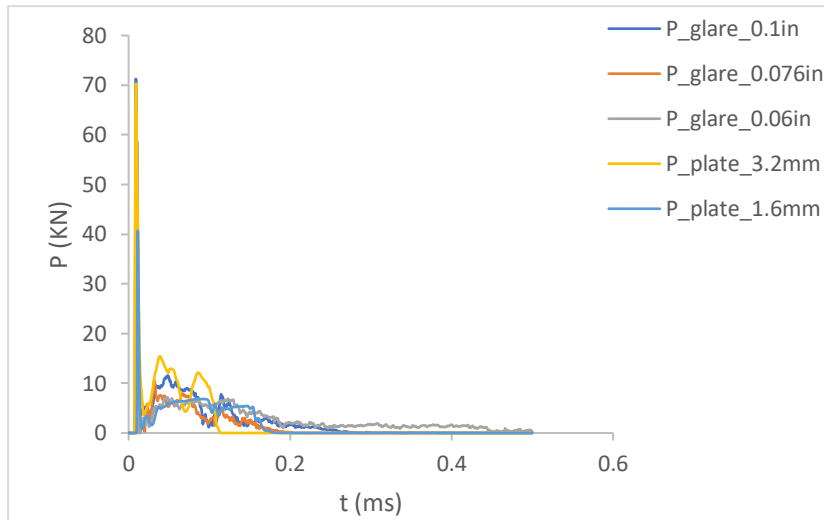
Διάγραμμα 6.137. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου (u-t).



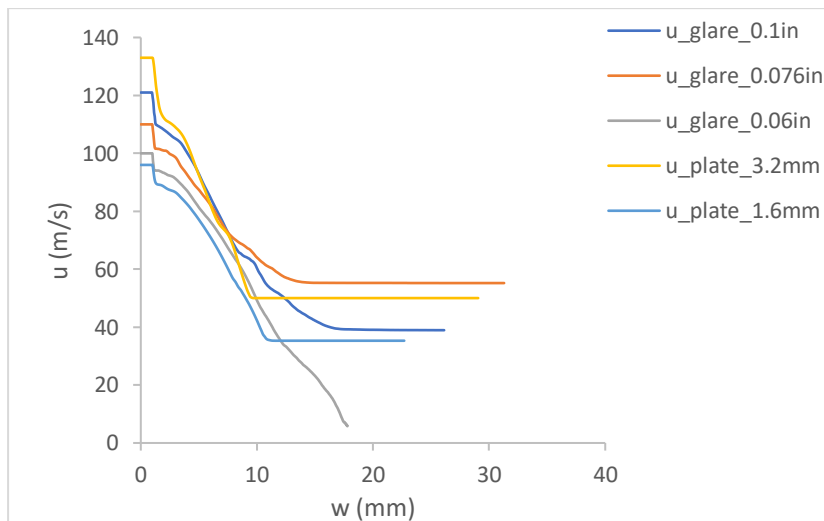
Διάγραμμα 6.138. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου (Ek-t).



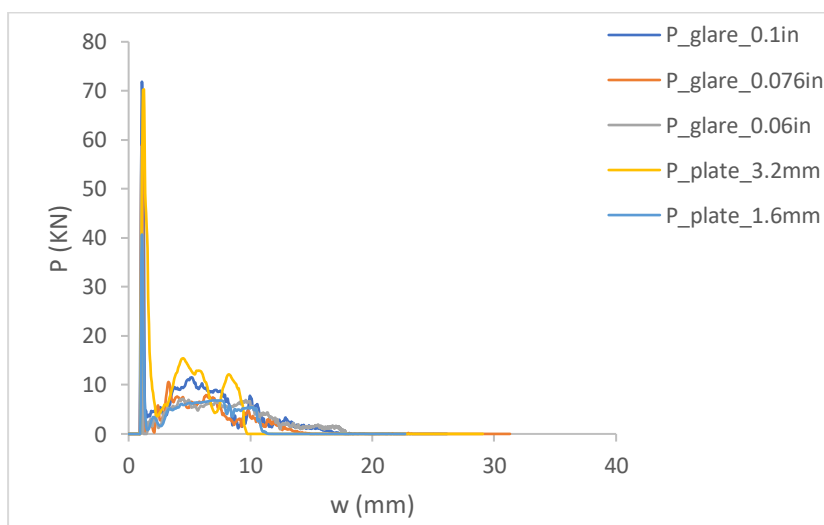
Διάγραμμα 6.139. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου (Eab-t).



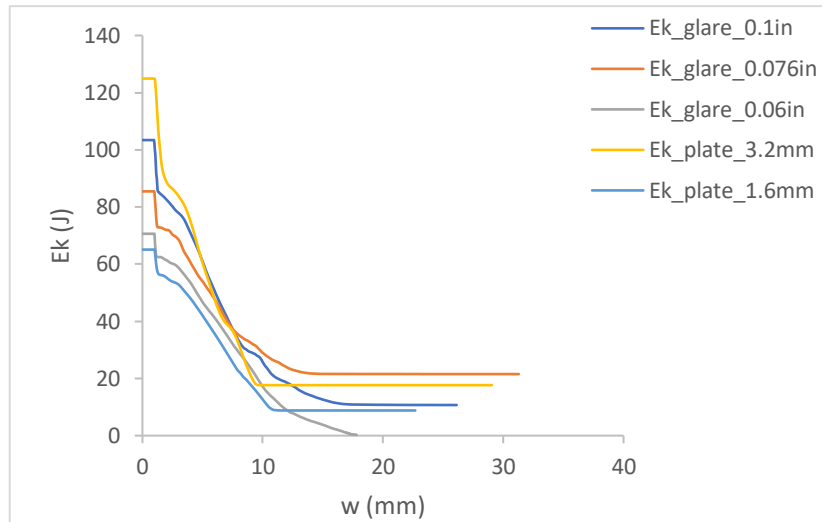
Διάγραμμα 6.140. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



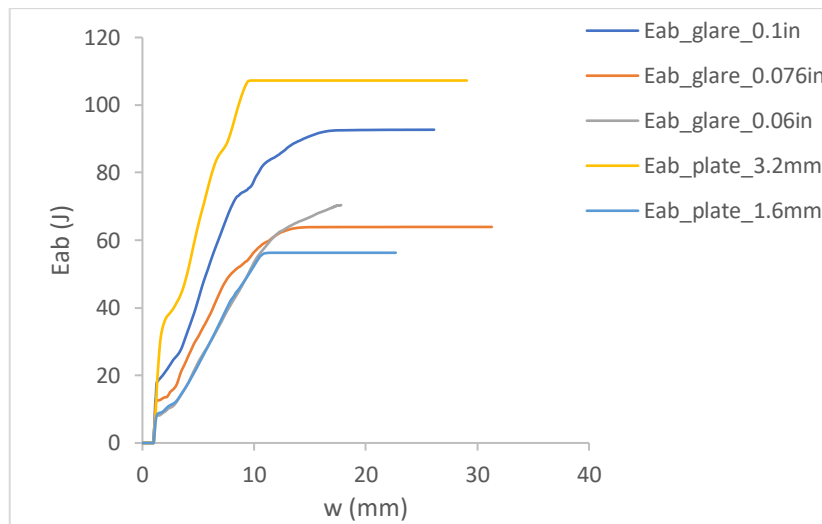
Διάγραμμα 6.141. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.142. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

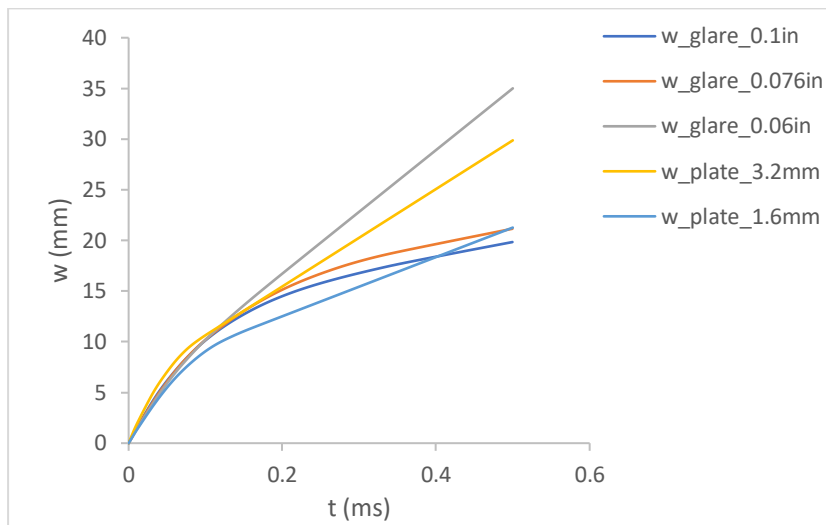


Διάγραμμα 6.143. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης. ( $E_k-w$ ).

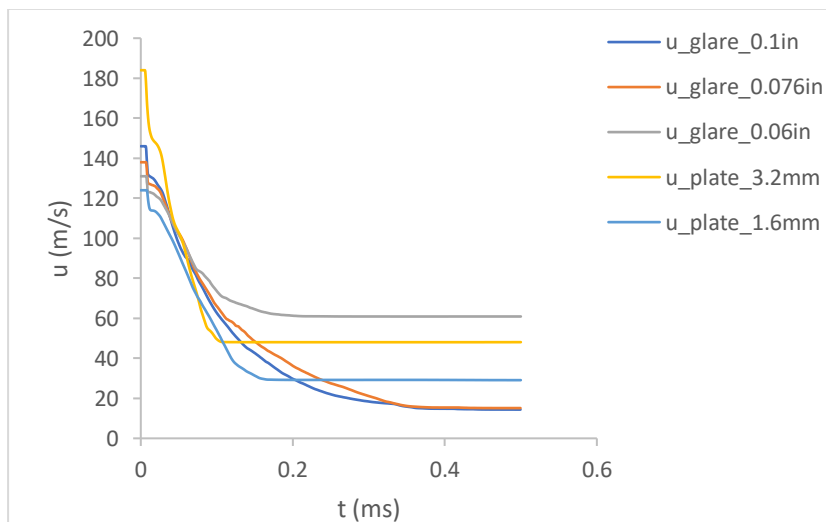


Διάγραμμα 6.144. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

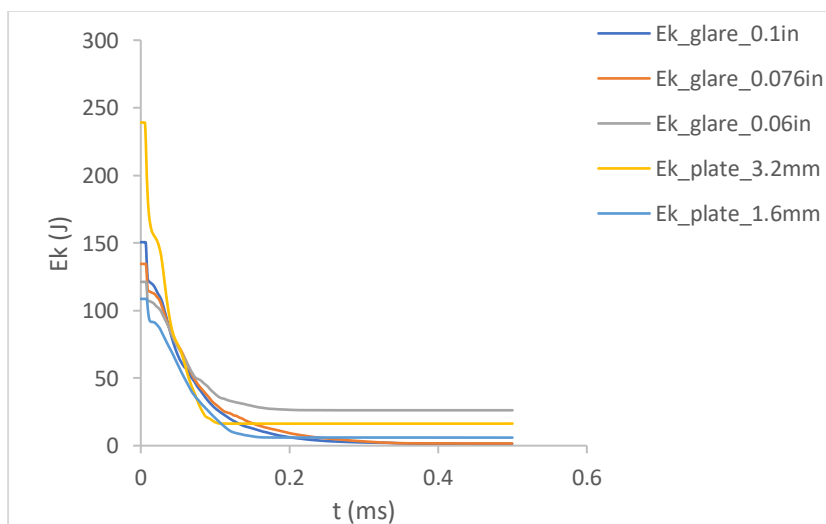
### 6.7.3.2 Κράμα ΑΙ 2024-T351



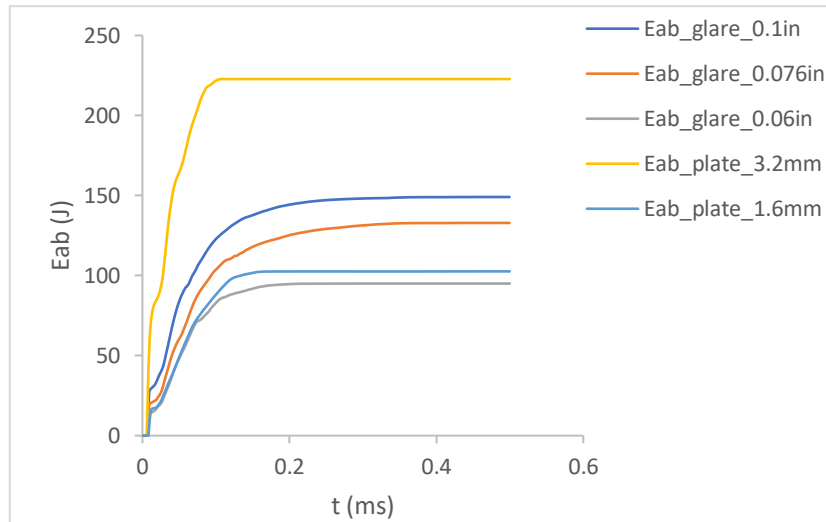
Διάγραμμα 6.145. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



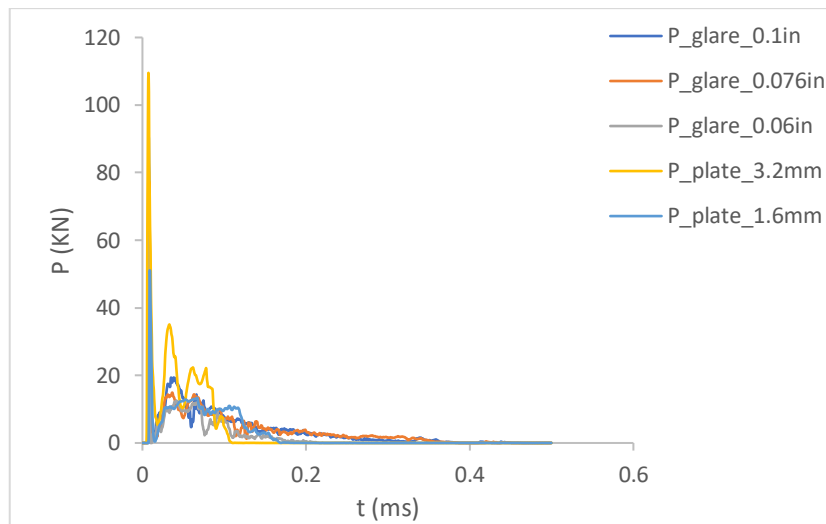
Διάγραμμα 6.146. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



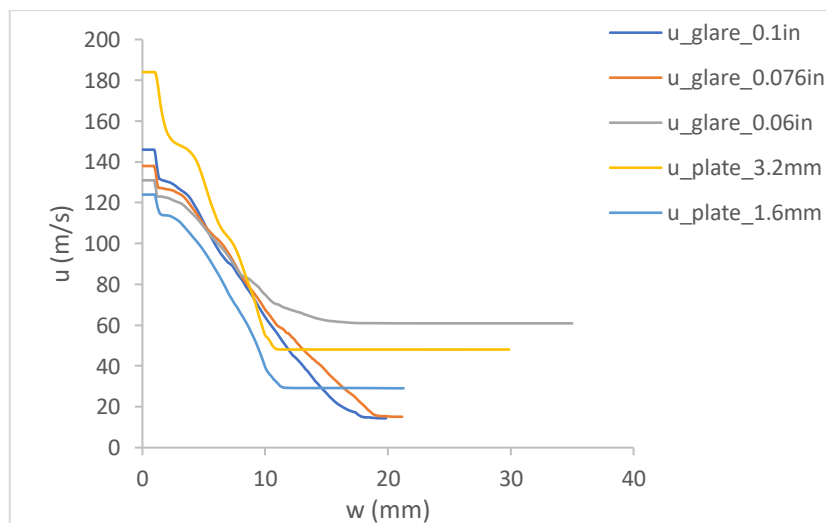
Διάγραμμα 6.147. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



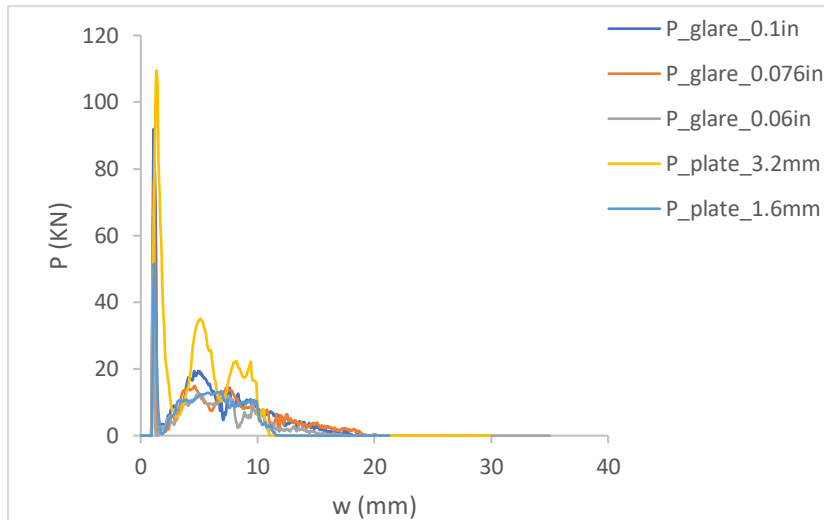
Διάγραμμα 6.148. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}$ - $t$ ).



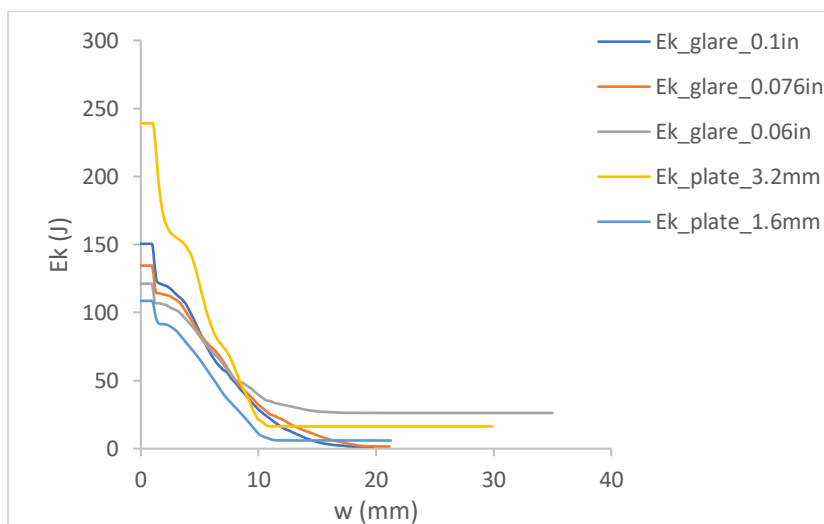
Διάγραμμα 6.149. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P$ - $t$ ).



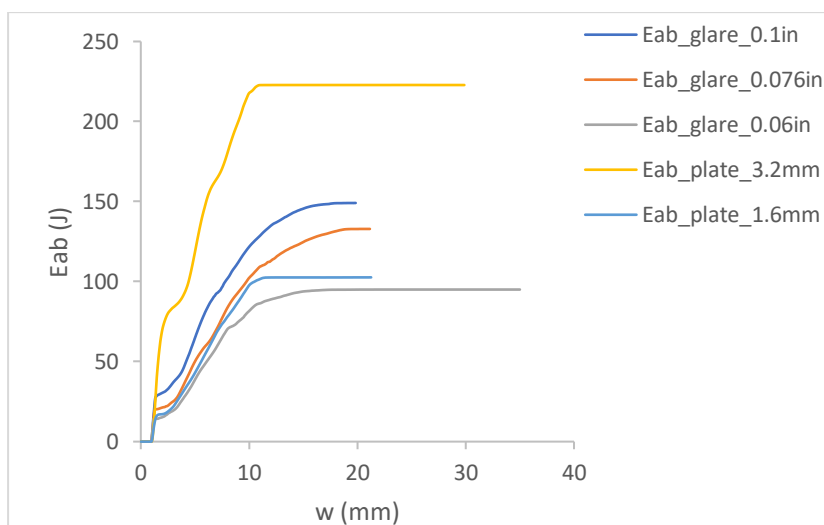
Διάγραμμα 6.150. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u$ - $w$ ).



Διάγραμμα 6.151. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

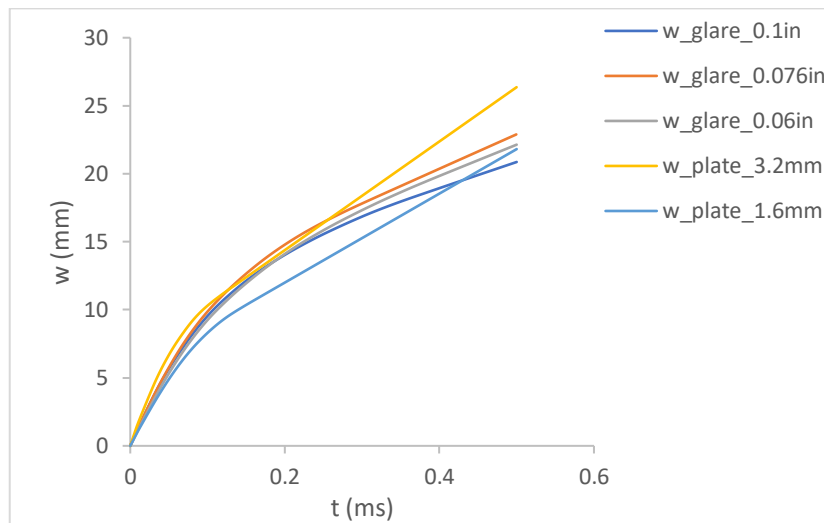


Διάγραμμα 6.152. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης ( $E_k-w$ ).

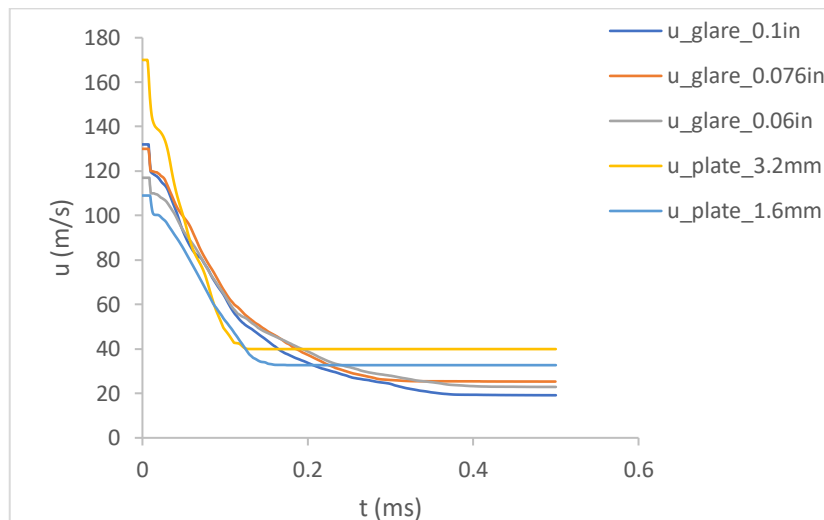


Διάγραμμα 6.153. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

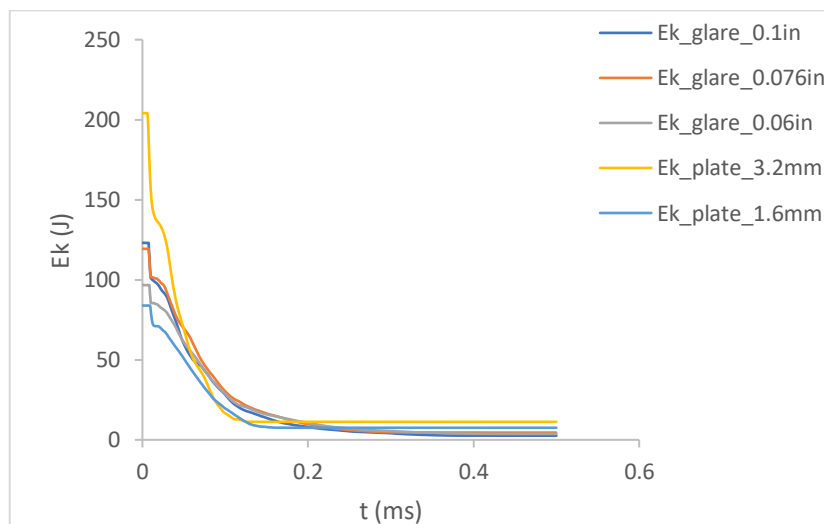
### 6.7.3.3 Κράμα ΑΙ 6061-Τ6



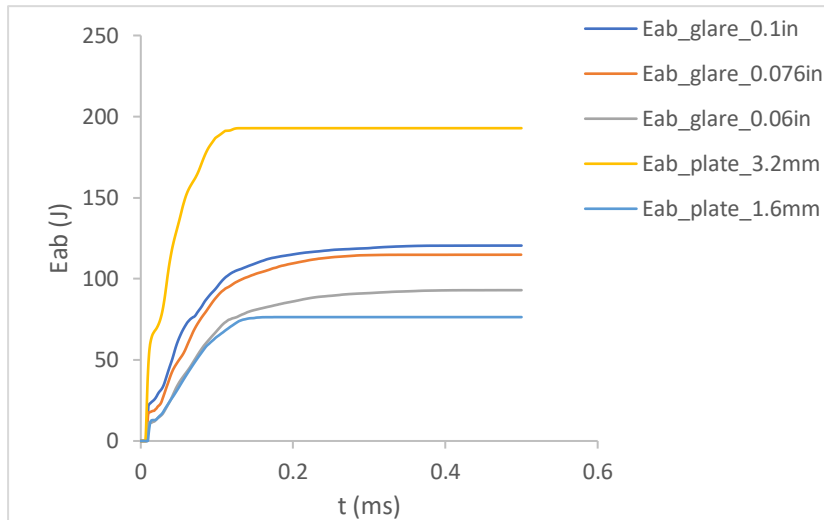
Διάγραμμα 6.154. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου (w-t).



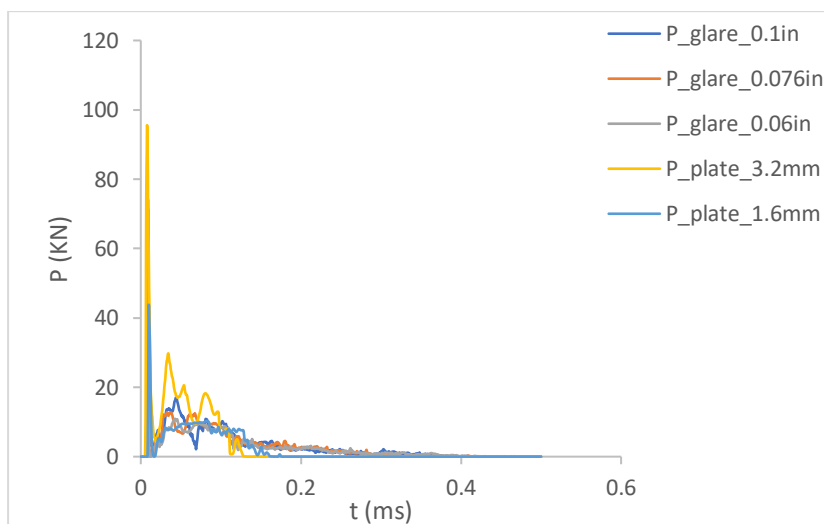
Διάγραμμα 6.155. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου (u-t).



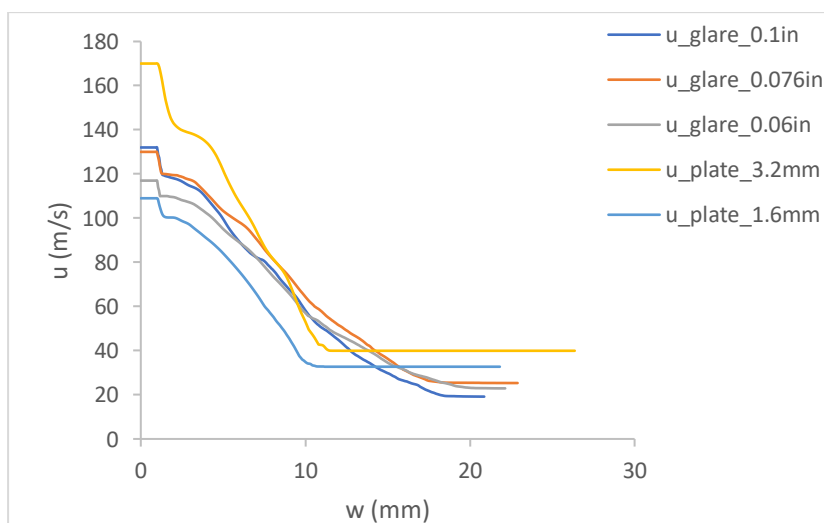
Διάγραμμα 6.156. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου (Ek-t).



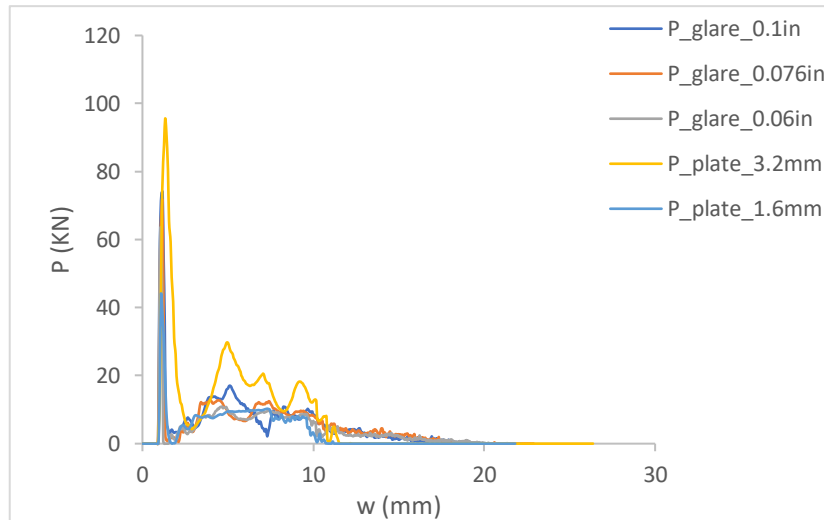
Διάγραμμα 6.157. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



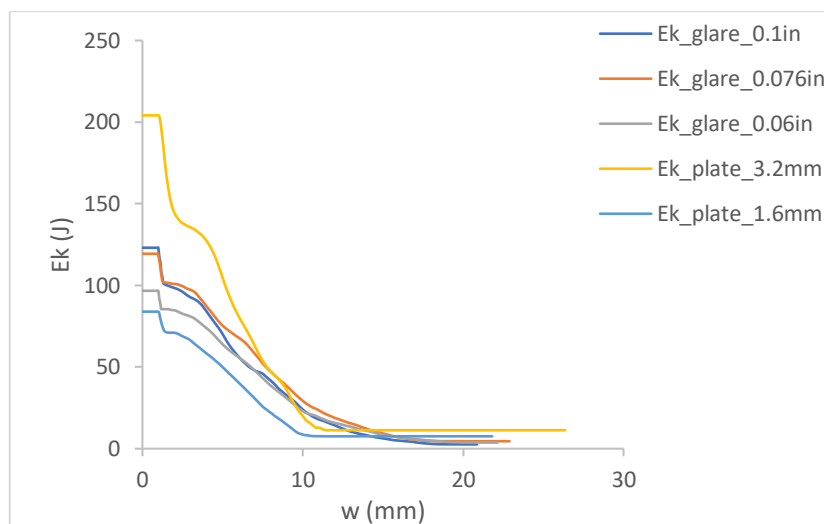
Διάγραμμα 6.158. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



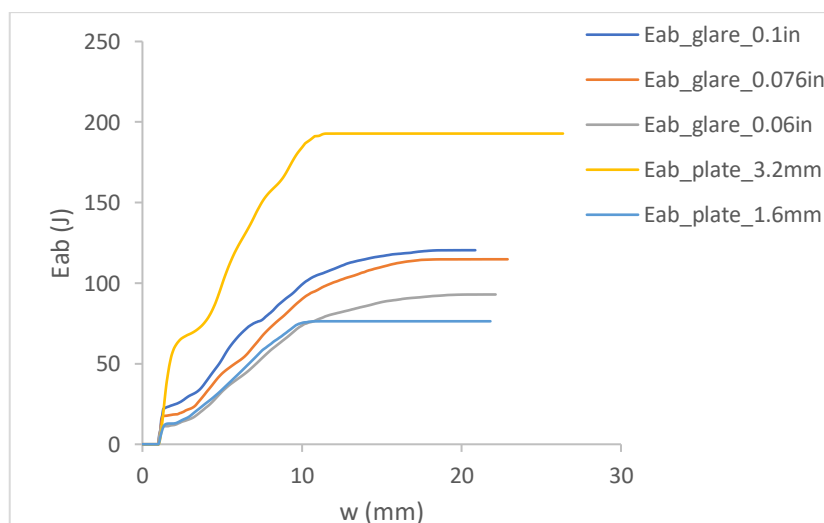
Διάγραμμα 6.159. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.160. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

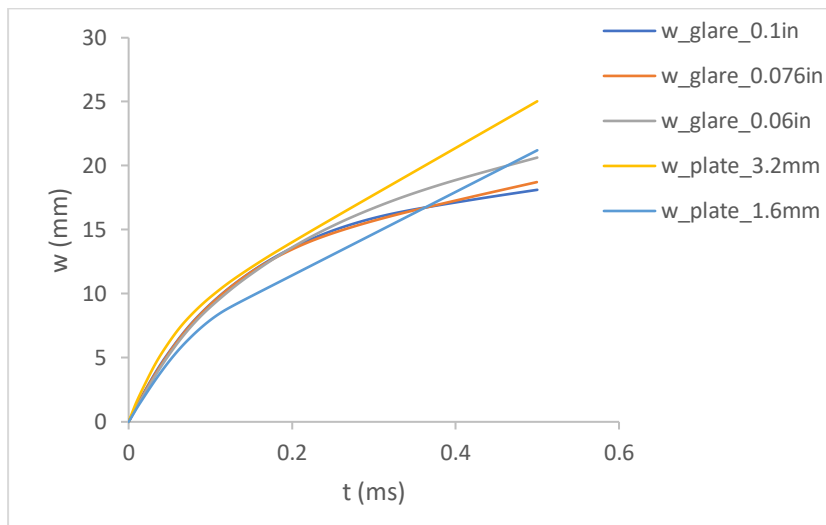


Διάγραμμα 6.161. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - μετατόπισης ( $E_k-w$ ).

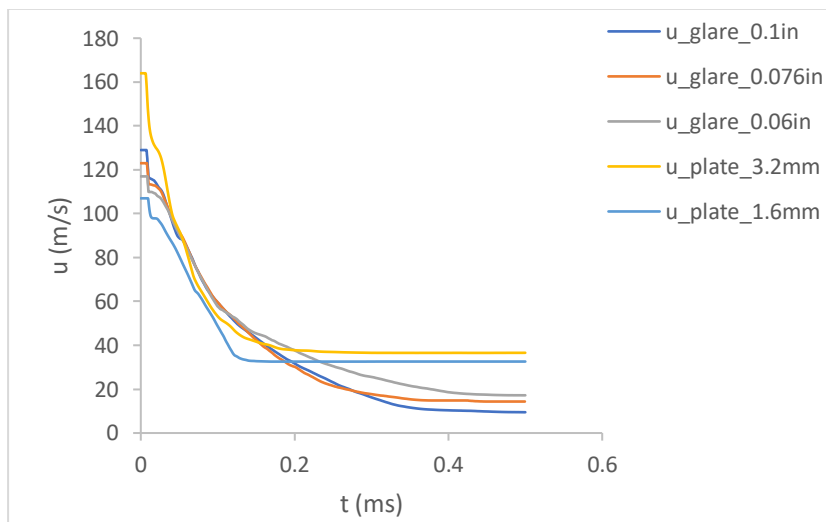


Διάγραμμα 6.162. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

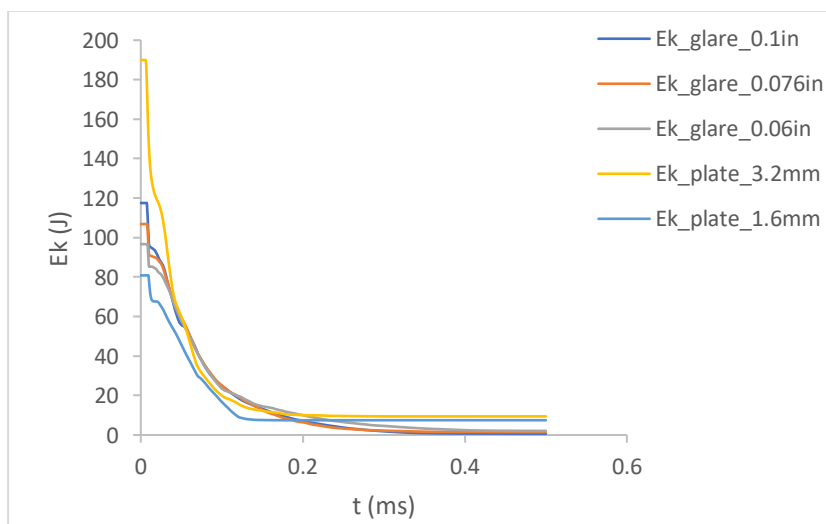
### 6.7.3.4 Κράμα ΑΙ 7039



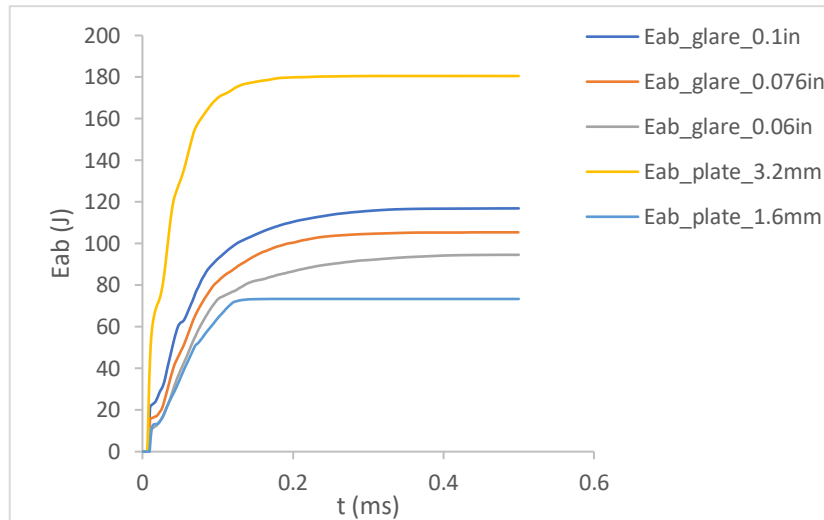
Διάγραμμα 6.163. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



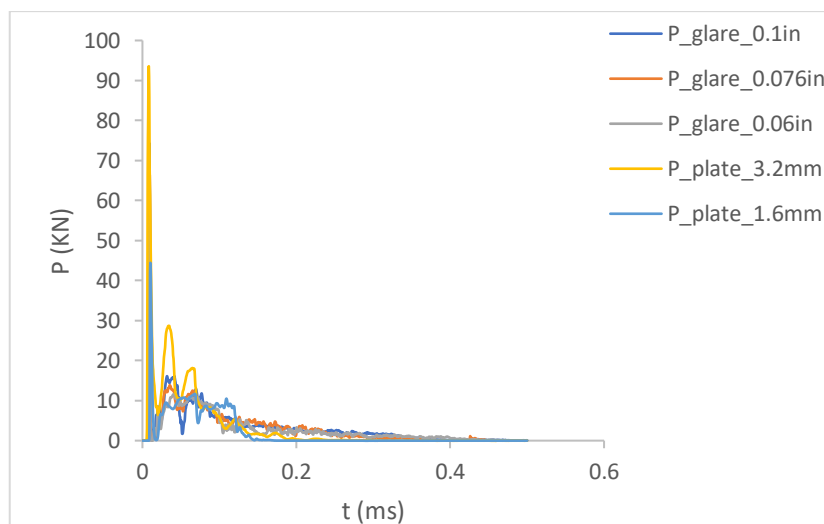
Διάγραμμα 6.164. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



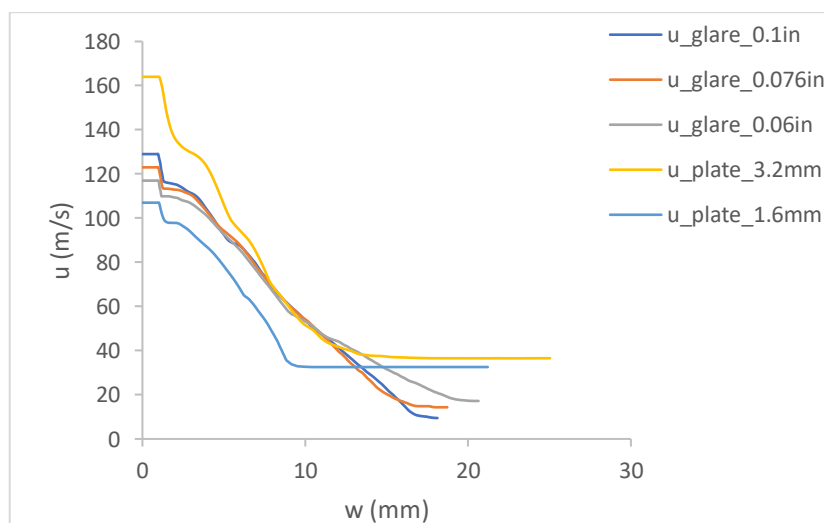
Διάγραμμα 6.165. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



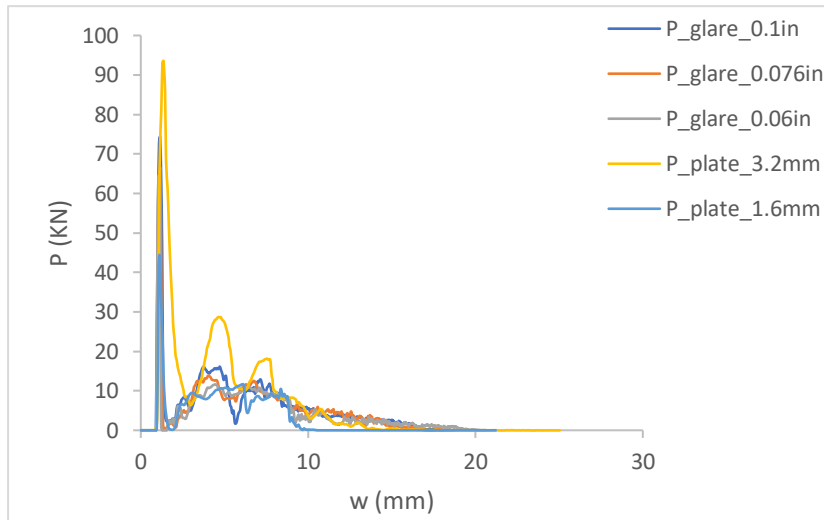
Διάγραμμα 6.166. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



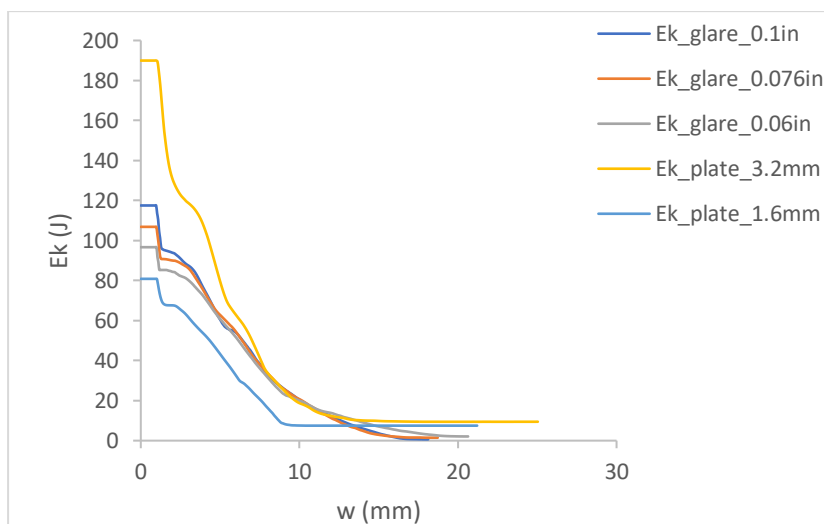
Διάγραμμα 6.167. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



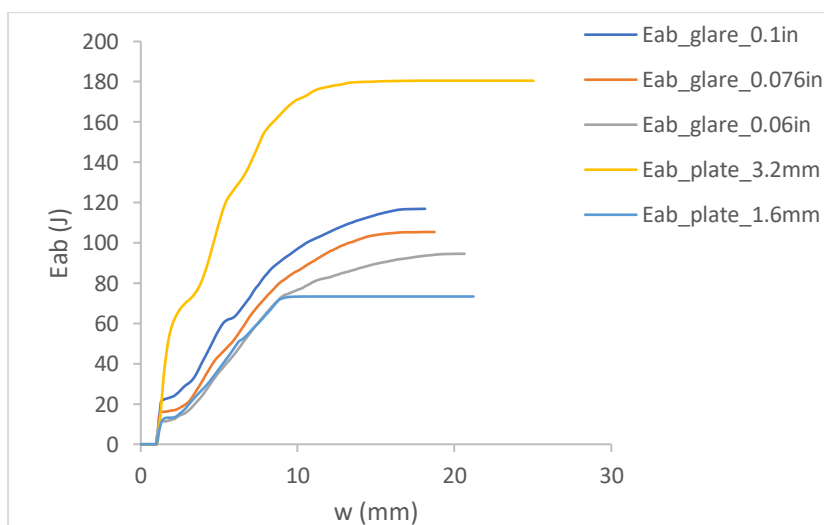
Διάγραμμα 6.168. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.169. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης (P-w).

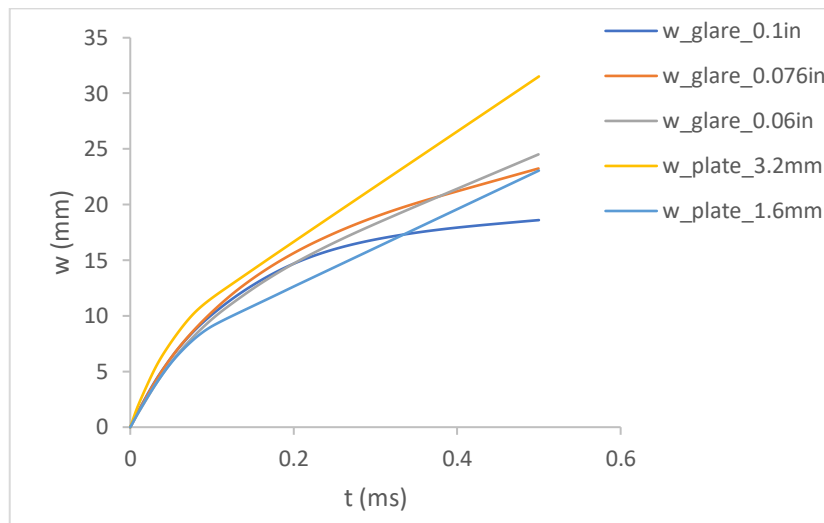


Διάγραμμα 6.170. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης. (Ek-w).

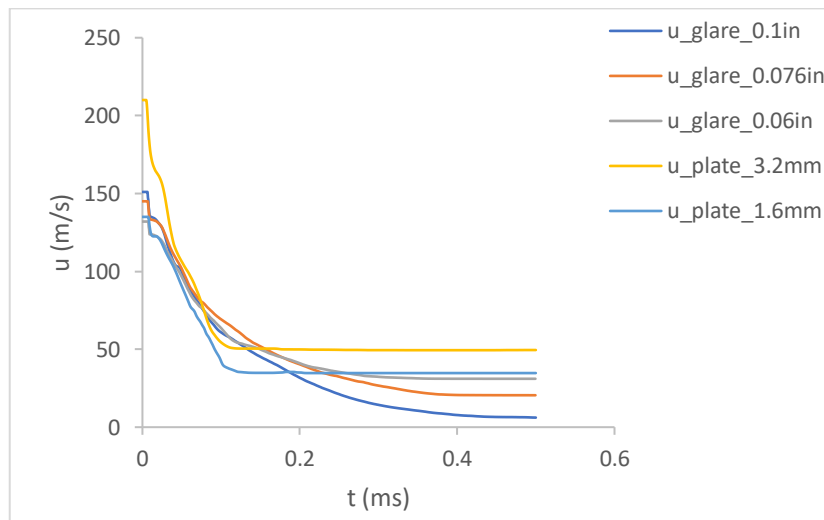


Διάγραμμα 6.171. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης (Eab-w).

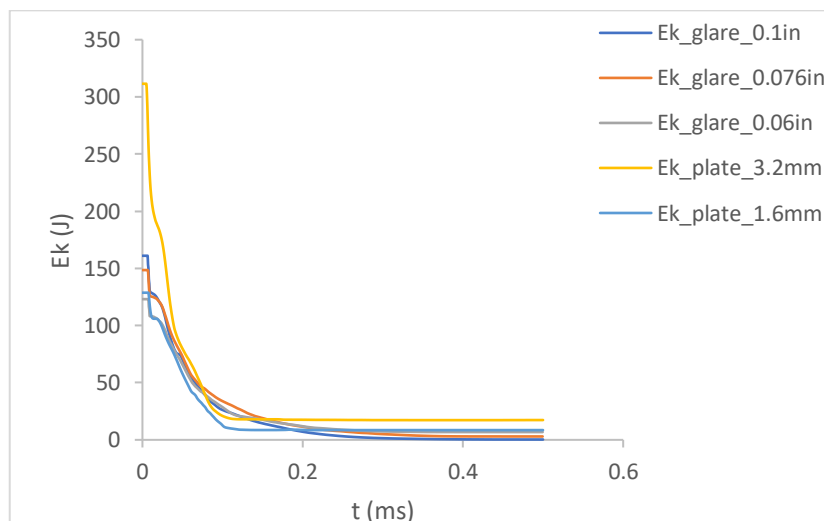
### 6.7.3.5 Κράμα ΑΙ 7075-T6



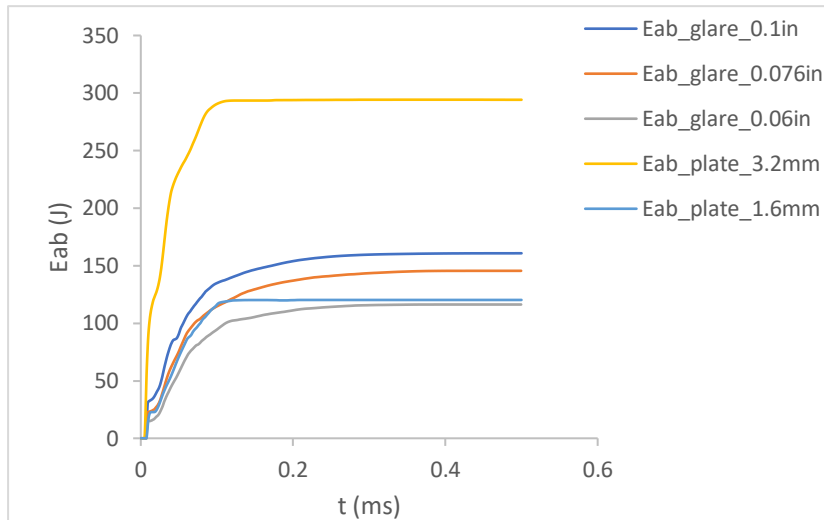
Διάγραμμα 6.172. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



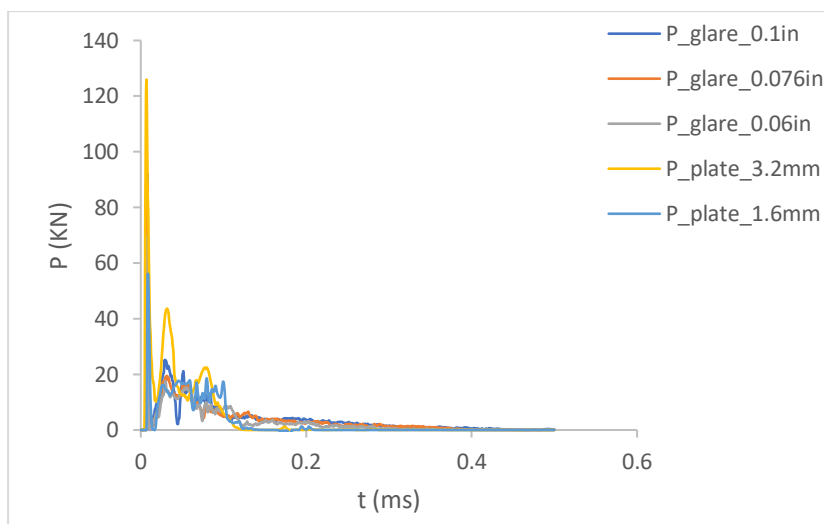
Διάγραμμα 6.173. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



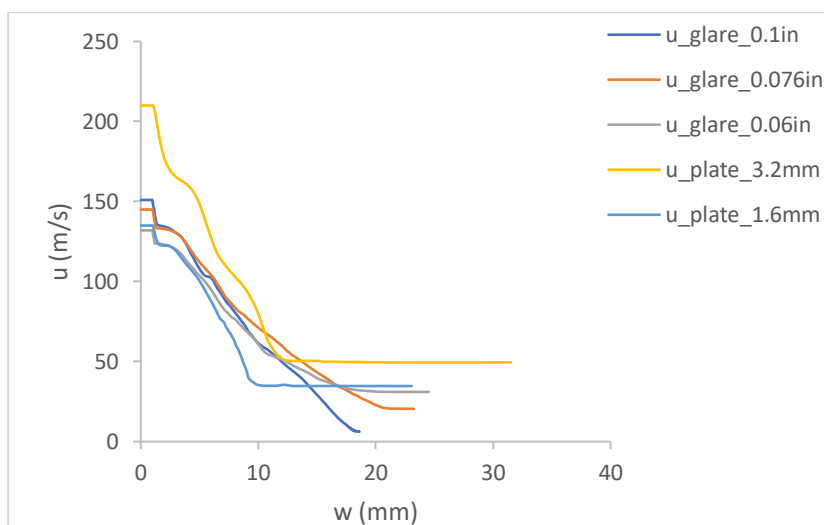
Διάγραμμα 6.174. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $E_k-t$ ).



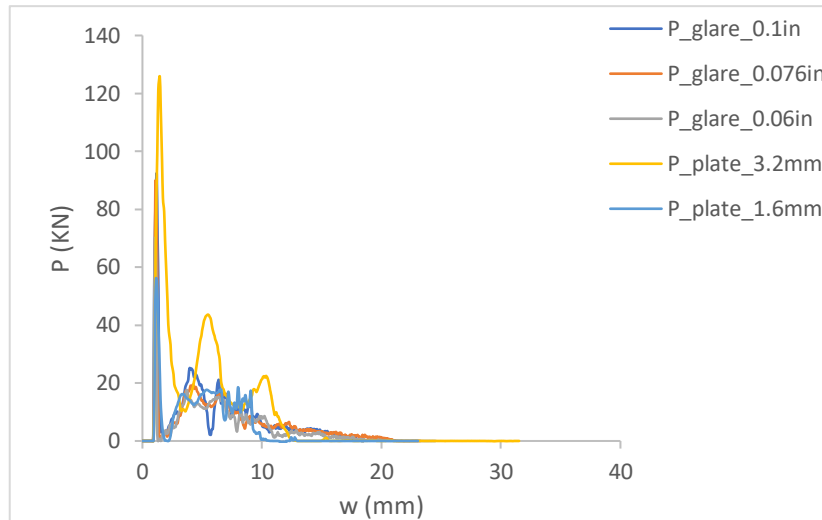
Διάγραμμα 6.175. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



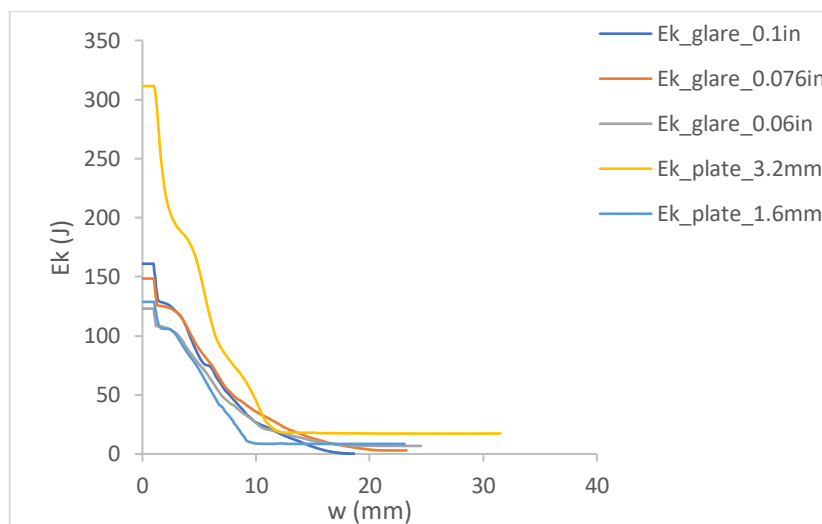
Διάγραμμα 6.176. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



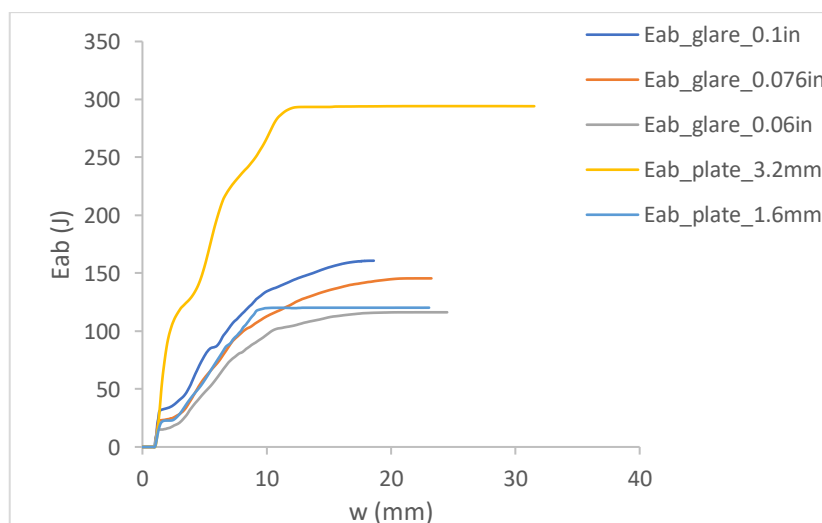
Διάγραμμα 6.177. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.178. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).

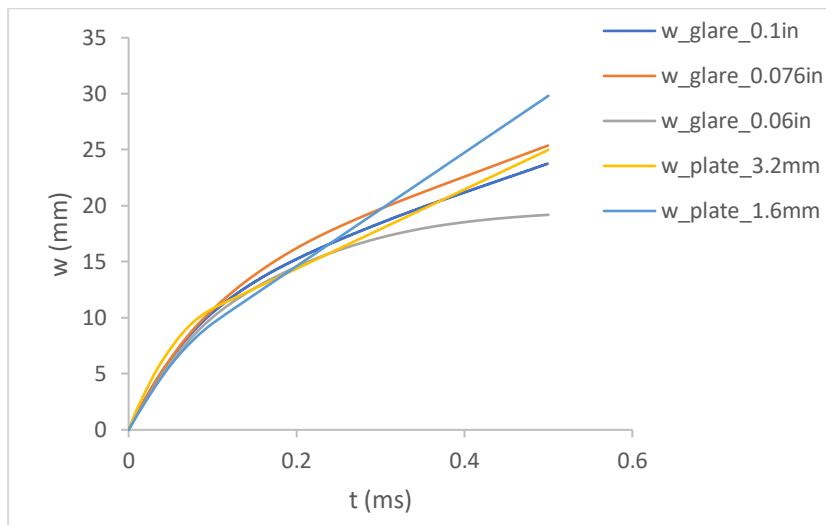


Διάγραμμα 6.179. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - μετατόπισης ( $E_k-w$ ).

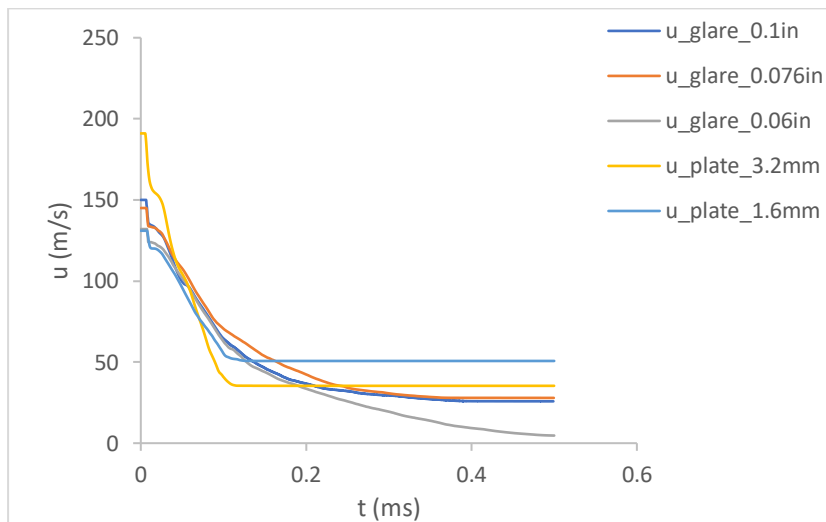


Διάγραμμα 6.180. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

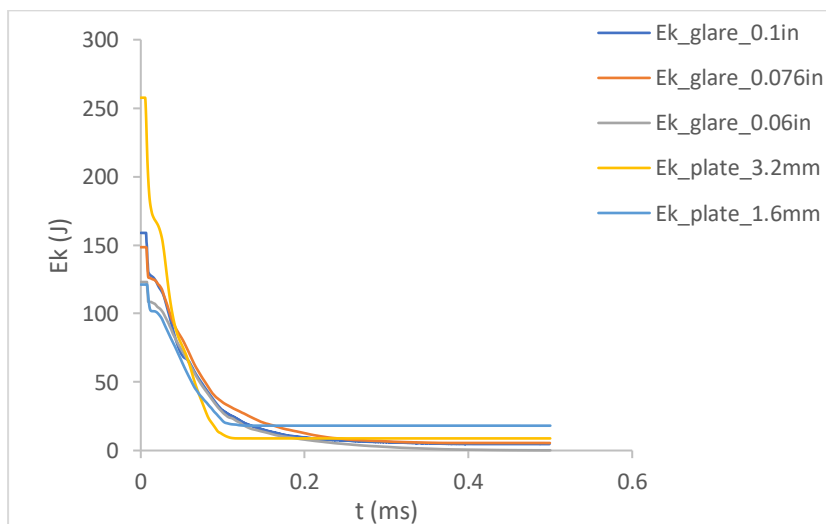
### 6.7.3.6 Κράμα ΑΙ 2024-T3



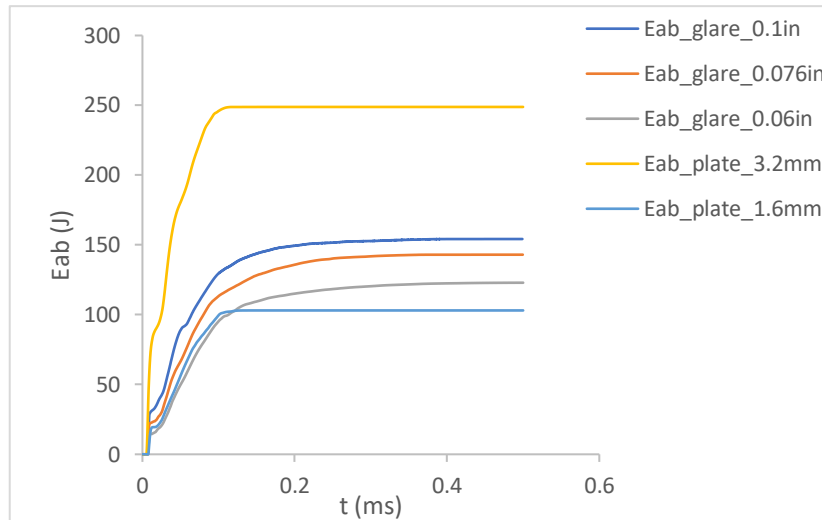
Διάγραμμα 6.181. Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου ( $w-t$ ).



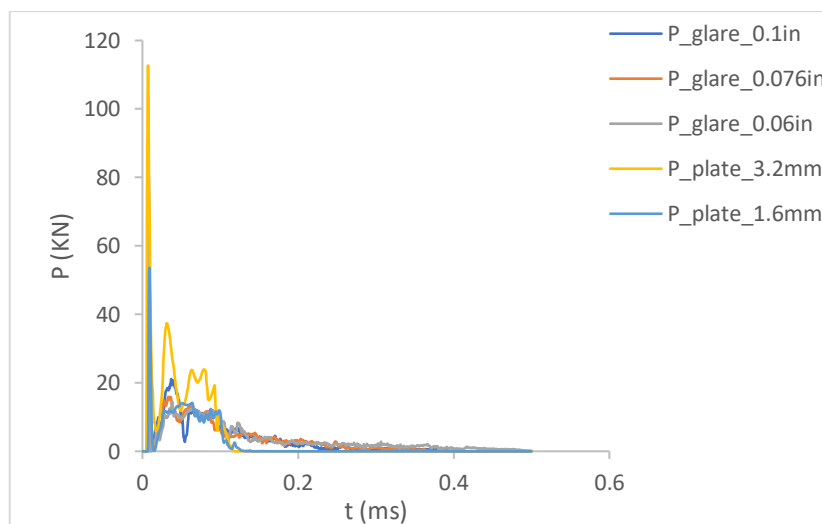
Διάγραμμα 6.182. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου ( $u-t$ ).



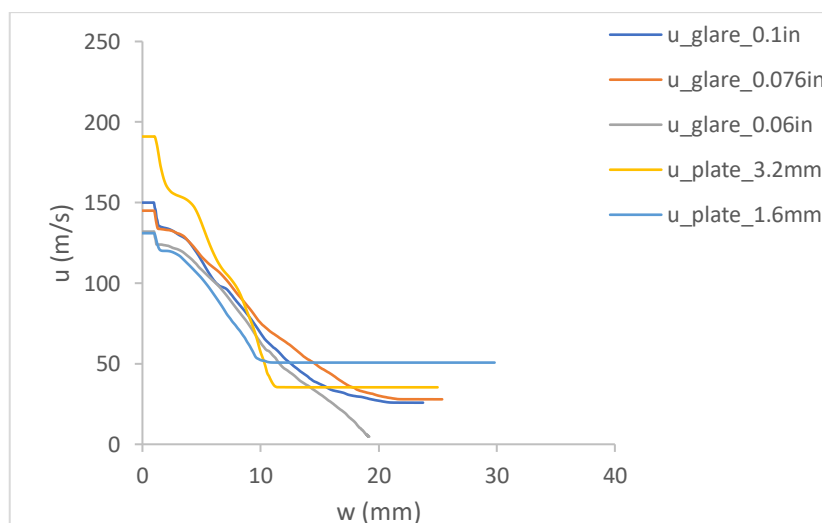
Διάγραμμα 6.183. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας - χρόνου ( $Ek-t$ ).



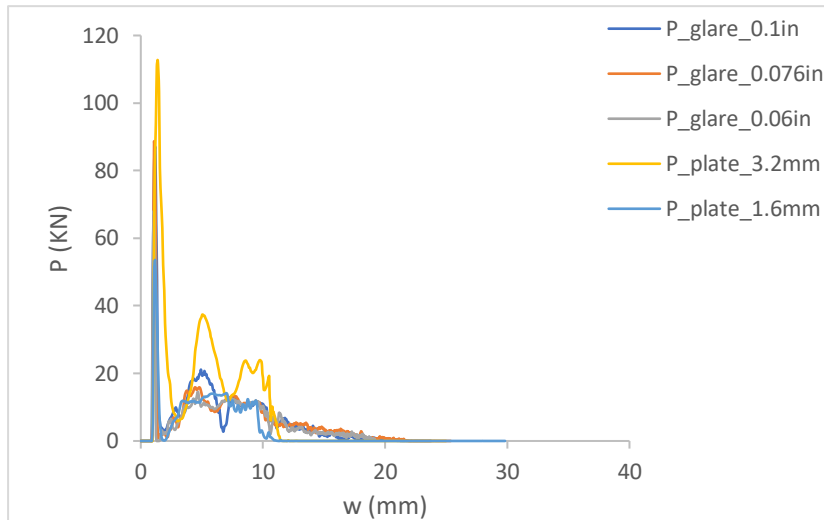
Διάγραμμα 6.184. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας - χρόνου ( $E_{ab}-t$ ).



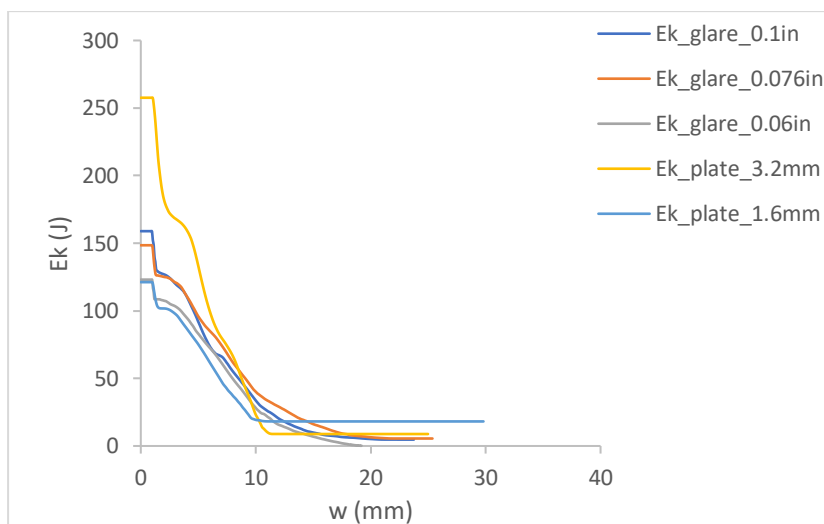
Διάγραμμα 6.185. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-χρόνου ( $P-t$ ).



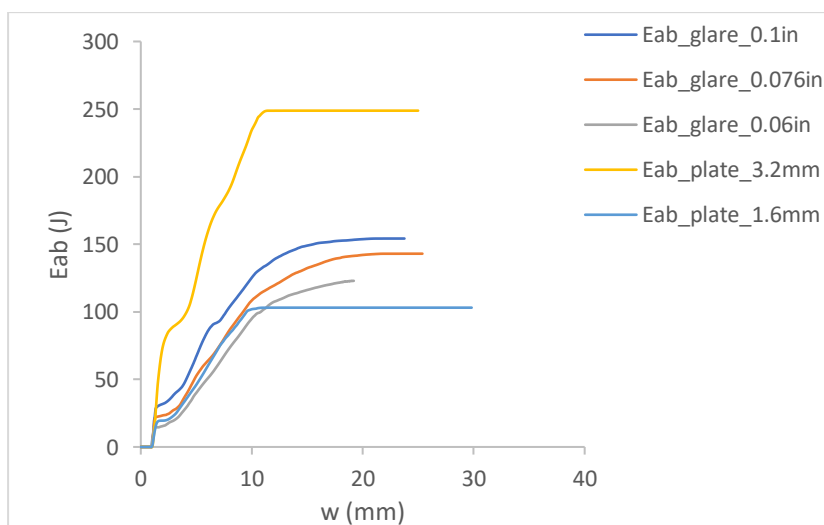
Διάγραμμα 6.186. Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-μετατόπισης ( $u-w$ ).



Διάγραμμα 6.187. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ( $P-w$ ).



Διάγραμμα 6.188. Συγκριτικό διάγραμμα κινητικής ενέργειας – μετατόπισης ( $E_k-w$ ).



Διάγραμμα 6.189. Συγκριτικό διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας- μετατόπισης ( $E_{ab}-w$ ).

## 6.7.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

### 6.7.4.1 Γενικά

Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πλακών GLARE και αλουμινίου, που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο βαλλιστικό όριο και τις ενέργειες Eab (απορροφούμενη ενέργεια), S.Eab (ειδική απορροφούμενη ενέργεια) και S.P.E (ειδική ενέργεια διάτρησης), καθώς και στον τρόπο που αυτά επηρεάζονται ανάλογα με τη δομή της εκάστοτε πλάκας και ανάλογα το κράμα αλουμινίου που έχει χρησιμοποιηθεί στις στρώσεις μετάλλου. Στον Πίνακα 6.26 παρουσιάζονται συνοπτικά χρήσιμα δεδομένα για την ανάλυση.

Material	ALLOY	MVF	Ballistic limit (m/s)	Eab (J)	P.E (J)	S.Eab	S.P.E
GLARE 0.06in	7039	66.67%	117	94.59	96.68	1074.69	1098.39
GLARE 0.06in	2024-O	66.67%	100	70.39	70.63	793.30	795.99
GLARE 0.06in	2024-T3	66.67%	132	122.90	123.06	1385.17	1386.93
GLARE 0.06in	2024-T351	66.67%	131	95.01	121.20	1070.77	1366.00
GLARE 0.06in	6061-T6	66.67%	117	92.97	96.68	1067.74	1110.30
GLARE 0.06in	7075-T6	66.67%	132	116.24	123.06	1296.30	1372.33
GLARE 0.076in	7039	47.37%	123	105.39	106.85	1004.58	1018.44
GLARE 0.076in	2024-O	47.37%	110	63.93	85.46	605.68	809.62
GLARE 0.076in	2024-T3	47.37%	145	142.98	148.49	1354.63	1406.80
GLARE 0.076in	2024-T351	47.37%	138	132.88	134.50	1258.93	1274.25
GLARE 0.076in	6061-T6	47.37%	130	114.83	119.36	1103.41	1146.95
GLARE 0.076in	7075-T6	47.37%	145	145.52	148.49	1367.64	1395.57
GLARE 0.1in	7039	60.00%	129	116.89	117.53	813.42	817.82
GLARE 0.1in	2024-O	60.00%	121	92.70	103.40	640.30	714.25
GLARE 0.1in	2024-T3	60.00%	151	154.20	161.03	1065.14	1112.33
GLARE 0.1in	2024-T351	60.00%	146	149.09	150.54	1029.81	1039.89
GLARE 0.1in	6061-T6	60.00%	132	120.46	123.06	846.58	864.82
GLARE 0.1in	7075-T6	60.00%	151	160.76	161.03	1099.73	1101.56
Plate 1.6mm	7039	100.00%	107	73.37	80.86	720.53	794.12
Plate 1.6mm	2024-O	100.00%	96	56.29	65.09	546.84	632.31
Plate 1.6mm	2024-T3	100.00%	131	103.05	121.20	1001.10	1177.42
Plate 1.6mm	2024-T351	100.00%	124	102.62	108.59	996.90	1054.95
Plate 1.6mm	6061-T6	100.00%	109	76.36	83.91	761.01	836.29
Plate 1.6mm	7075-T6	100.00%	135	120.20	128.71	1151.07	1232.62
Plate 3.2mm	7039	100.00%	164	180.51	189.95	886.41	932.77

Material	ALLOY	MVF	Ballistic limit (m/s)	Eab (J)	P.E (J)	S.Eab	S.P.E
Plate 3.2mm	2024-O	100.00%	133	107.26	124.93	521.00	606.82
Plate 3.2mm	2024-T3	100.00%	191	248.81	257.65	1208.55	1251.48
Plate 3.2mm	2024-T351	100.00%	184	222.79	239.11	1082.15	1161.43
Plate 3.2mm	6061-T6	100.00%	170	192.85	204.11	961.01	1017.12
Plate 3.2mm	7075-T6	100.00%	210	294.13	311.46	1408.35	1491.32

Πίνακας 6.26. Συνοπτικά αποτελέσματα. (\*GE= S2-Glass/epoxy)

#### 6.7.4.2 Επίδραση της δομής των πλακών

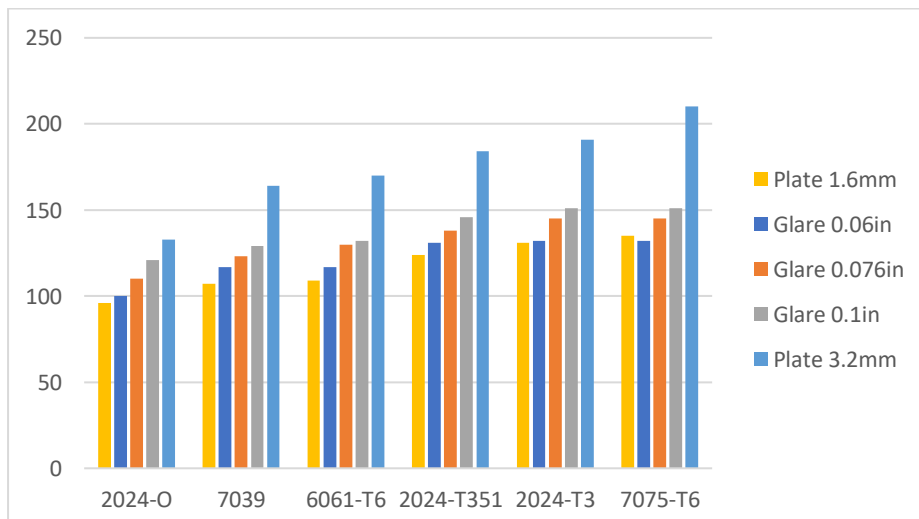
##### Επίδραση του πάχους στο βαλλιστικό όριο

Το πάχος των πλακών έχει σημαντική επίδραση στο βαλλιστικό όριο. Όπως είναι αναμενόμενο και όπως έχει επιβεβαιωθεί από διάφορες μελέτες ([38],[55],[58],[88],[89],[114],[115]) όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος μίας πλάκας τόσο μεγαλύτερο βαλλιστικό όριο εμφανίζει.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.26, προκύπτει ότι για όλα τα κράματα αλουμινίου πλην του Al 7075-T6, αν οι πλάκες ταξινομηθούν με αύξουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό τους όριο ακολουθούν την εξής σειρά:

- Plate 1.6mm
- GLARE 0.06in (1.53mm)
- GLARE 0.076in (1.93mm)
- GLARE 0.1in (2.54mm)
- Plate 3.2mm

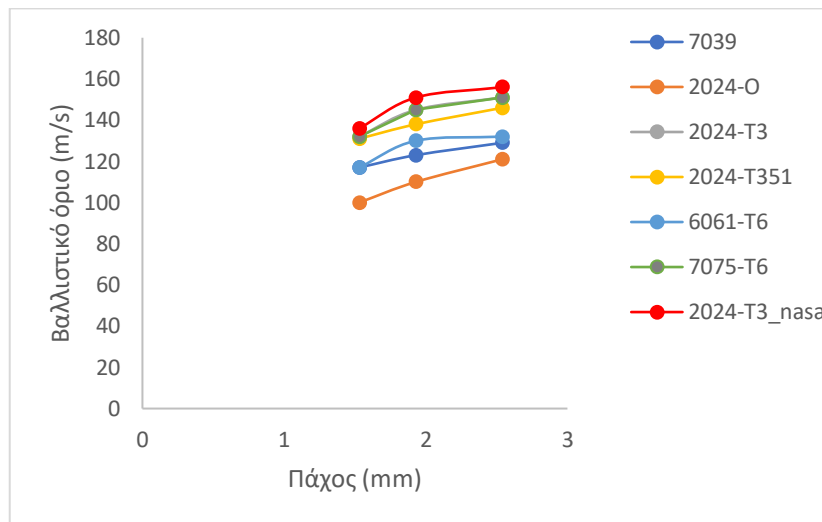
Επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη σειρά παρατηρήθηκε και κατά τα πειράματα των Hoo Fatt, et al [38] σε πλάκες GLARE κράματος Al 2024-T3. Στο Διάγραμμα 6.190 οι πλάκες έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με την εν λόγω σειρά ανά κράμα αλουμινίου. Όπως προαναφέρθηκε, εξαίρεση αποτελεί το κράμα 7075-T6, όπου το GLARE 0.06in έχει μικρότερο βαλλιστικό από το Plate 1.6mm κατά 3m/s.



Διάγραμμα 6.190. Βαλλιστικά όρια πλακών GLARE και αλουμινίου.

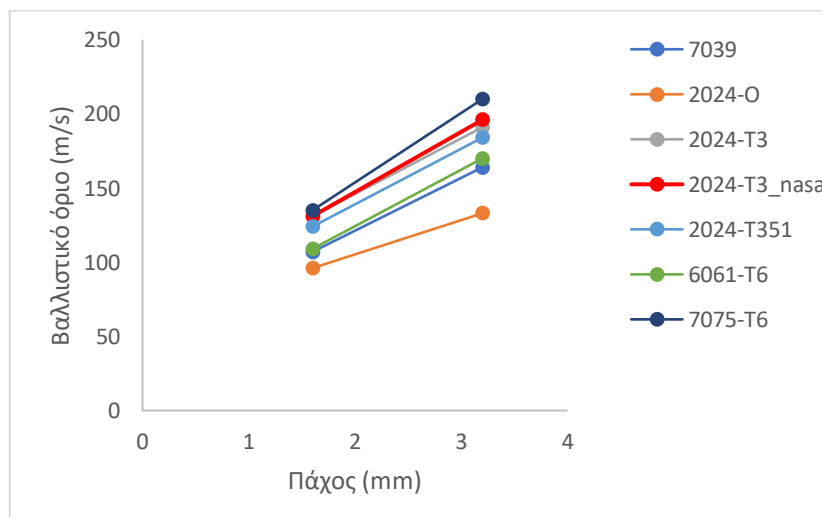
Επίσης, συγκρίνοντας τα βαλλιστικά όρια των πλακών GLARE 0.06in (1.53mm) και των Plate1.6mm, προκύπτει ότι για δεδομένο πάχος πλάκας το GLARE υπερτερεί έναντι του μονολιθικού αλουμινίου ως προς το βαλλιστικό όριο.

Εξετάζοντας ξεχωριστά για τις πλάκες GLARE τη μεταβολή του βαλλιστικού τους ορίου σε συνάρτηση με το πάχος τους προκύπτει το Διάγραμμα 6.191. Σε αυτό φαίνεται ότι το βαλλιστικό όριο αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος και μάλιστα η αύξηση αυτή περιγράφεται από μία πολυωνυμική καμπύλη 2<sup>ου</sup> βαθμού, η οποία γίνεται σχεδόν γραμμική για τα κράματα 7039, 2024-O και 2024-T351. Στο Διάγραμμα 6.176 έχουν συμπεριληφθεί με τον συμβολισμό «2024\_T3\_nasa» τα δεδομένα από τα πειράματα των Hoo Fatt, et al [38], τα οποία, όπως είναι εμφανές, έρχονται σε αντιστοιχία με τα ευρήματα της εργασίας μας.



Διάγραμμα 6.191. Βαλλιστικό όριο πλακών GLARE σε συνάρτηση με το πάχος τους.

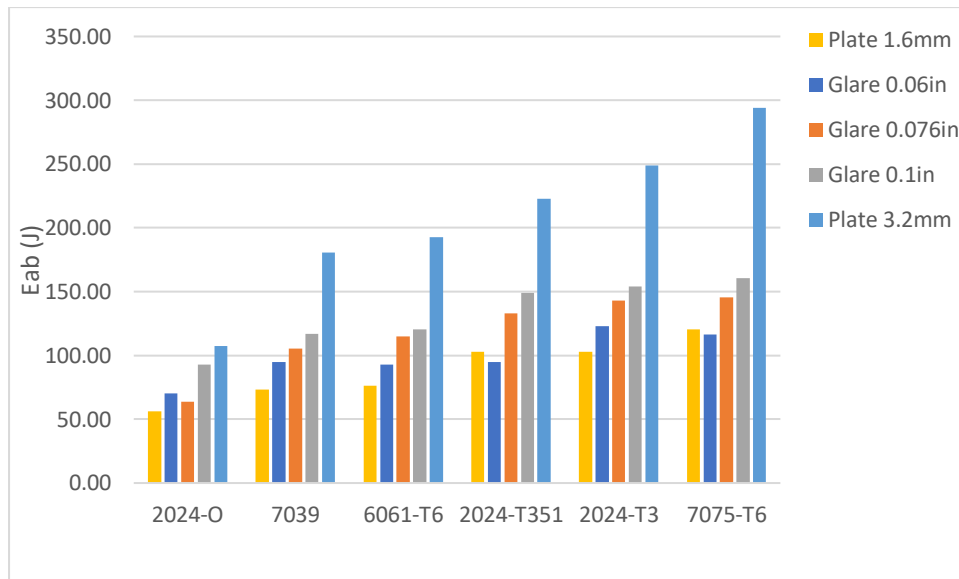
Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 6.192 φαίνεται η μεταβολή του βαλλιστικού ορίου των πλακών μονολιθικού αλουμινίου σε συνάρτηση με το πάχος τους, όπου επίσης παρουσιάζεται αντιστοιχία με τα πειράματα των Hoo Fatt, et al [38] (συμβολισμός ως «2024-T3\_nasa»).



Διάγραμμα 6.192. Βαλλιστικό όριο πλακών αλουμινίου σε συνάρτηση με το πάχος τους.

### Επίδραση του πάχους στις ενέργειες Eab, S.Eab και S.P.E

Η απορροφούμενη ενέργεια συνδέεται άμεσα με το βαλλιστικό όριο, καθώς όσο αυτή αυξάνεται τόσο αυξάνεται και το βαλλιστικό όριο. Έτσι, η απορροφούμενη ενέργεια επηρεάζεται από το πάχος της πλάκας με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζεται το βαλλιστικό όριο. Αυτό αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 6.193. Μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται στα κράματα Al 2024-O και Al 2024-T351, όπου στη πρώτη περίπτωση το GLARE 0.076in απορροφά λιγότερη ενέργεια από το GLARE 0.06in, ενώ στη δεύτερη το GLARE 0.06in απορροφά λιγότερη ενέργεια από το Plate 1.6mm.

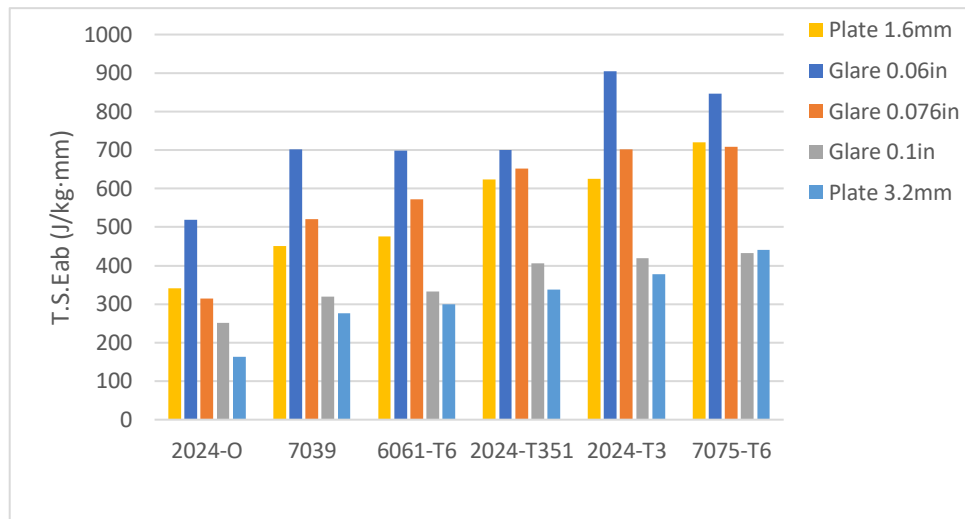


Διάγραμμα 6.193. Απορροφούμενη ενέργεια (Eab) πλακών GLARE και αλουμινίου.

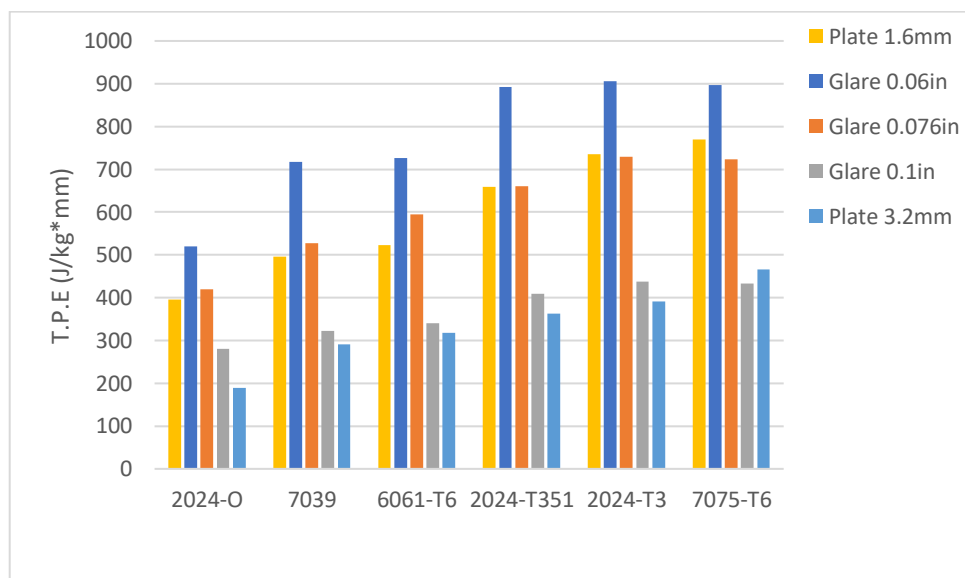
Για την μελέτη της επίδρασης του πάχους των πλακών στις ειδικές ενέργειες ορίστηκαν δύο νέα μεγέθη: η ειδική απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα πάχους (T.S.Eab) και η ειδική ενέργεια διάτρησης ανά μονάδα πάχους (T.S.P.E). Στα Διαγράμματα 6.194-6.195 φαίνονται οι τιμές αυτών των ενεργειών για τις πλάκες που μελετήθηκαν.

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα αυτά, στις πλάκες GLARE η αύξηση του πάχους συνοδεύεται από μείωση των ενεργειών T.S.Eab και T.S.P.E. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις κραμάτων αλουμινίου τις μεγαλύτερες τιμές σε αυτές τις ενέργειες εμφανίζει το GLARE 0.06in, ακολουθεί το GLARE 0.076in και έπειτα το GLARE 0.1in. Η ίδια σχέση πάχους και ενεργειών T.S.Eab και T.S.P.E. παρατηρείται και στις πλάκες μονολιθικού αλουμινίου, όπου η Plate 1.6mm έχει σταθερά μεγαλύτερες τιμές από την Plate 3.2mm.

Επίσης, συγκρίνοντας τις ίσου περίπου πάχους πλάκες GLARE 0.06in (1.53mm) και Plate 1.6mm, προκύπτει ότι για δεδομένο πάχος πλάκας το GLARE υπερτερεί έναντι του μονολιθικού αλουμινίου ως προς τις ενέργειες T.S.Eab και T.S.P.E.



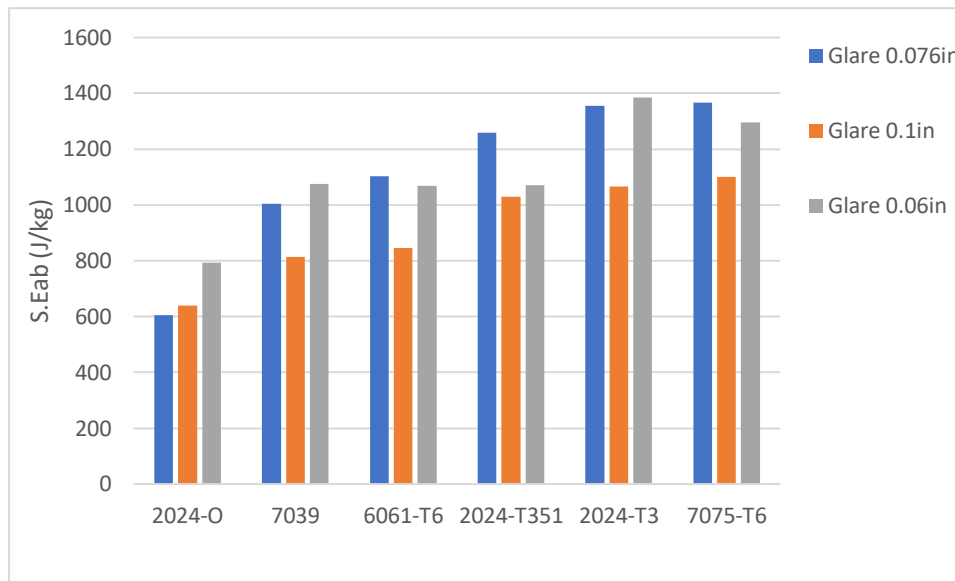
Διάγραμμα 6.194. Ειδική απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα πάχους (T.S.Eab) πλακών GLARE και αλουμινίου.



Διάγραμμα 6.195. Ειδική ενέργεια διάτρησης ανά μονάδα πάχους (T.S.E.P) πλακών GLARE και αλουμινίου.

### Επίδραση του αριθμού στρώσεων και του MVF στο βαλλιστικό όριο

Εξετάζοντας τις πλάκες GLARE και λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα του Πίνακα 6.26 και του Διαγράμματος 6.190, προκύπτει ότι οι πλάκες με τις περισσότερες στρώσεις (GLARE 0.076in και GLARE 0.1in) εμφανίζουν μεγαλύτερο βαλλιστικό όριο. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι πλάκες διαθέτουν διαφορετικά πάχη εμποδίζει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Το ίδιο συμβαίνει και με το κλάσμα MVF, όπου επίσης δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα, καθώς οι πλάκες διαθέτουν διαφορετικά πάχη μεταξύ τους. Ωστόσο, ενδιαφέροντα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν για τις ειδικές ενέργειες S.Eab και S.P.E.



Διάγραμμα 6.196. Ειδική απορροφούμενη ενέργεια (S.Eab) πλακών GLARE.

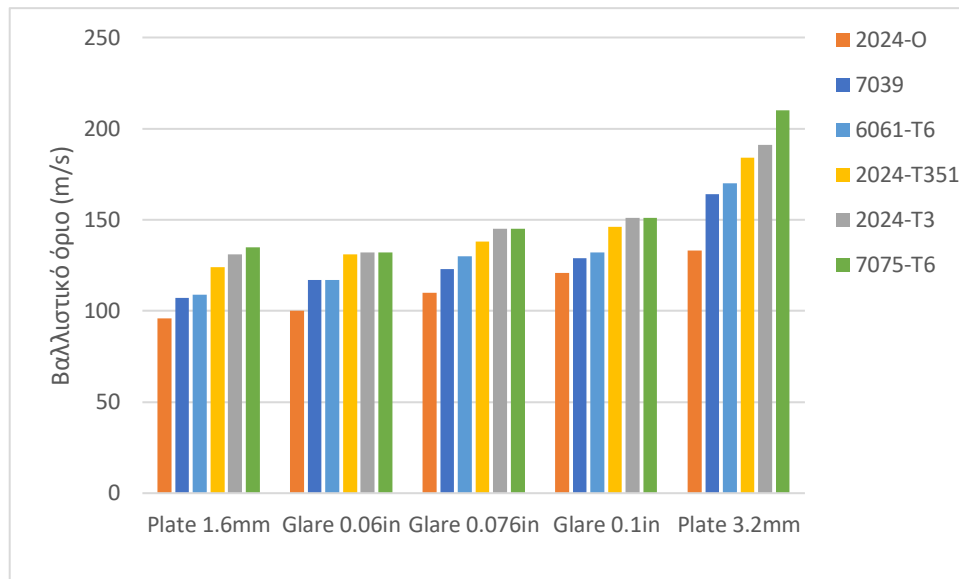
Στο Διάγραμμα 6.196, όπου οι πλάκες GLARE έχουν τοποθετηθεί με αύξουσα σειρά ως προς το κλάσμα MVF, παρατηρείται ότι μεταξύ των πλακών GLARE που διαθέτουν ίσου πάχους στρώσεις αλουμινίου (GLARE 0.06in και GLARE 0.1in) μεγαλύτερη S.Eab παρουσιάζει εκείνο με το μεγαλύτερο κλάσμα MVF (GLARE 0.06in), ενώ μεταξύ των πλακών με τον ίδιο αριθμό στρώσεων (GLARE 0.076in και GLARE 0.1in) μεγαλύτερη S.Eab παρουσιάζει εκείνο με το μικρότερο κλάσμα MVF (GLARE 0.076in). Αντίστοιχη συμπεριφορά με την S.Eab εμφανίζει και η S.P.E.

### 6.7.4.3 Επίδραση του κράματος αλουμινίου

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.26 για όλες τις πλάκες GLARE και αλουμινίου, προκύπτει ότι αν τα κράματα αλουμινίου ταξινομηθούν με αύξουσα σειρά ως προς το βαλλιστικό όριο στο οποίο οδηγούν, ακολουθείται η εξής σειρά:

1. Al 2024-O
2. Al 7039
3. Al 6061-T6
4. Al 2024-T351
5. Al 2024-T3
6. Al 7075-T6

Η σειρά αυτή αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 6.197 και αξίζει να σημειωθεί ότι έρχεται σε πλήρη συμφωνία με την μελέτη των Vo et al [106], οι οποίοι μελετώντας την συμπεριφορά τεσσάρων κραμάτων αλουμινίου σε εκρηκτικά φορτία χαμηλής συχνότητας (low-impulse blast) και ταξινομώντας τα με αύξουσα σειρά ως προς την αντίστασή τους κατέληξαν στην εξής σειρά: Al 2024-O < Al 6061-T6 < Al 2024-T3 < Al 7075-T6.



Διάγραμμα 6.197. Βαλλιστικά όρια πλακών GLARE και αλουμινίου.

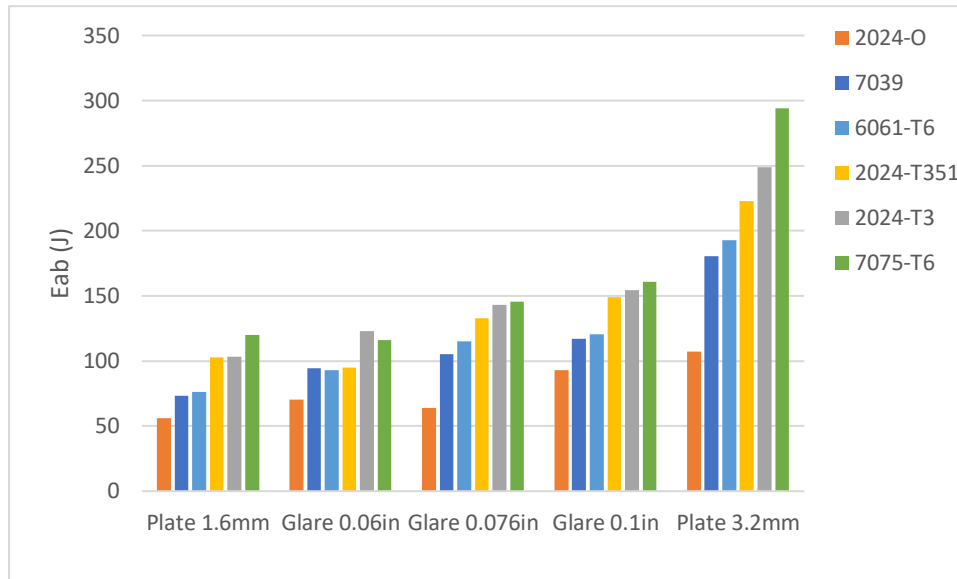
Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 6.197 το κράμα Al 2024-T3 επιδεικνύει αρκετά καλύτερη βαλλιστική συμπεριφορά από το κράμα Al 2024-O. Αντίστοιχο συμπέρασμα είχε προκύψει και κατά την μελέτη των Cantwell et al. [51], οι οποίοι εκτέλεσαν βαλλιστικές κρούσεις σε πλάκες FML, στις οποίες οι στρώσεις σύνθετου υλικού ήταν ενισχυμένες με ίνες και είχαν ως βάση το πολυπροπυλένιο.

Επίσης, παρατηρείται ότι το κράμα Al 2024-T351 εμφανίζει κοντινά αλλά ελαφρώς μικρότερα βαλλιστικά όρια από το 2024-T3 (απόκλιση μικρότερη από 5%). Αυτό ισχύει σε όλες τις πλάκες.

Επίσης, το Al 7075-T6 έχει, γενικά, παραπλήσια βαλλιστικά όρια με το Al 2024-T3. Συγκεκριμένα, στις πλάκες GLARE τα βαλλιστικά τους όρια ταυτίζονται, ενώ στις πλάκες αλουμινίου το Al 7075-T6 δίνει μεγαλύτερα βαλλιστικά όρια. Αυτό εξηγείται αν δούμε τι συμβαίνει με τα βαλλιστικά όρια των πλακών αλουμινίου για τα δύο αυτά κράματα. Εκεί βλέπουμε ότι η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στα βαλλιστικά όρια που δίνουν τα δύο κράματα στην πλάκα 3.2mm ( $210-191=19\text{m/s}$ ) μειώνεται αρκετά στην πλάκα 1.6mm ( $135-131=4\text{m/s}$ ). Έτσι, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι στρώσεις αλουμινίου που υπάρχουν στις πλάκες GLARE εξαιτίας του αρκετά μικρού τους πάχους (0.508mm & 0.3048mm) έχουν πρακτικά το ίδιο βαλλιστικό όριο για τα συγκεκριμένα κράματα, με αποτέλεσμα να προκύπτει τελικά και ίδιο βαλλιστικό όριο για ολόκληρη την πλάκα GLARE, δεδομένου ότι οι στρώσεις του σύνθετου υλικού είναι οι ίδιες για όλα τα μοντέλα.

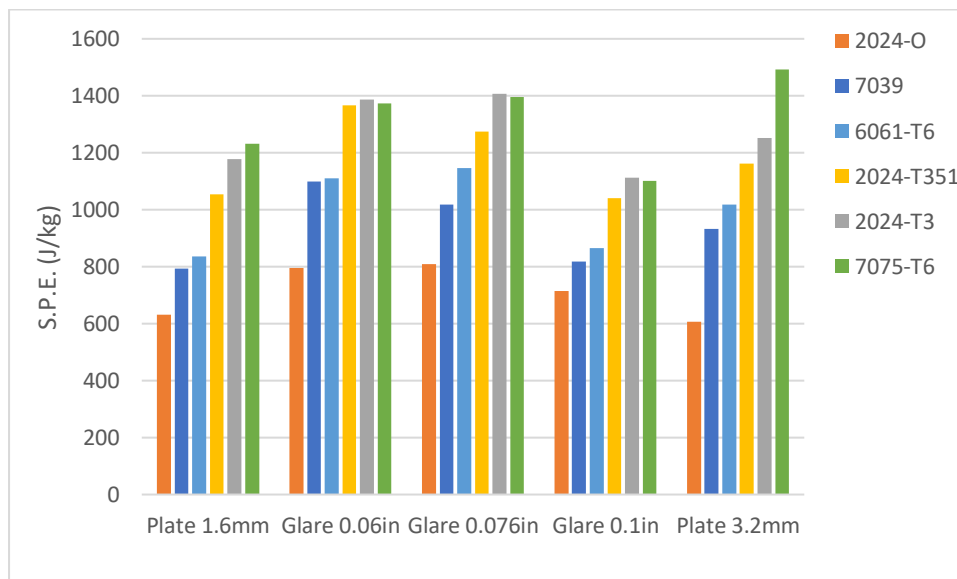
Τα κράματα Al 7039 και Al 6061-T6 δίνουν κοντινά βαλλιστικά όρια με το δεύτερο να δίνει ελαφρώς υψηλότερα. Ωστόσο, εδώ δεν παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο της ταύτισης των βαλλιστικών ορίων στις πλάκες GLARE, αλλά διατηρείται μία μικρή διαφορά σε όλες τις πλάκες. Αυτό, εξηγείται, επίσης, παρατηρώντας τα βαλλιστικά όρια των πλακών αλουμινίου. Εδώ βλέπουμε ότι η διαφορά που υπάρχει στα βαλλιστικά όρια των δύο κραμάτων για τις δύο πλάκες εμφανίζει μικρότερη ποσοστιαία μείωση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (τώρα  $(6-2)\div 6=66.67\%$ , πριν  $(19-4)\div 19=78.95\%$ ).

Αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή του βαλλιστικού ορίου, προκύπτει αν τα κράματα αλουμινίου εξεταστούν ως προς την απορροφούμενη ενέργεια. Αυτή αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 6.198.



Διάγραμμα 6.198. Απορροφούμενη ενέργεια (Eab) πλακών GLARE και αλουμινίου.

Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των κραμάτων αλουμινίου ως προς την αντίστασή τους σε διάτρηση ανά μονάδα βάρους. Εξετάζοντας, λοιπόν, την ειδική ενέργεια διάτρησης (S.P.E.), προκύπτει ότι στις πλάκες μονολιθικού αλουμινίου η ταξινόμηση των κραμάτων με αύξουσα σειρά ως προς την S.P.E. συμβαδίζει με την αντίστοιχη ως προς το βαλλιστικό όριο. Ωστόσο, στις πλάκες GLARE το κράμα Al 2024-T3 εμφανίζει την υψηλότερη τιμή, ξεπερνώντας αυτή του κράματος Al 7075-T6, γεγονός που εξηγεί το ότι το κράμα Al 2024-T3 θεωρείται το πλέον κατάλληλο κράμα αλουμινίου για χρήση σε πλάκες GLARE βαλλιστικών εφαρμογών. Η S.P.E των πλακών GLARE και αλουμινίου για τα διάφορα κράματα φαίνεται στο Διάγραμμα 6.199.



Διάγραμμα 6.199. Ειδική ενέργεια διάτρησης πλακών GLARE και αλουμινίου.

Παρατηρώντας γενικά την συμπεριφορά των κραμάτων και την συμβολή τους στην αντίσταση των πλακών σε διάτρηση, φαίνεται ότι καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η δυσθραυστότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, αν ταξινομήσουμε τα κράματα με αύξουσα σειρά ως προς την δυσθραυστότητά τους προκύπτει η ίδια ακριβώς σειρά με την ταξινόμηση τους ως προς το βαλλιστικό όριο. Για τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας χρησιμοποιείται η σχέση:

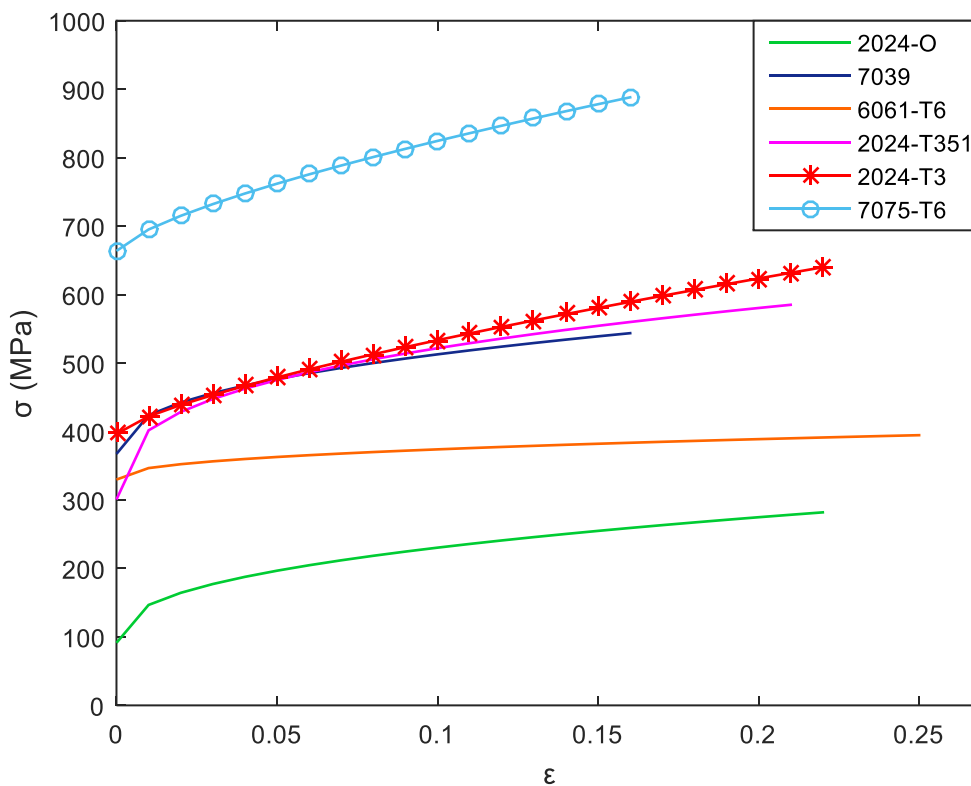
$$U_T = \int_0^{\varepsilon^f} \sigma d\varepsilon \quad (6.1)$$

όπου,  $U_T$  είναι η δυσθραυστότητα,  $\sigma$  η τάση διαρροής σύμφωνα με το απλουστευμένο μοντέλο Johnson-Cook (Σχέσης 2.11),  $\varepsilon$  η πλαστική παραμόρφωση και  $\varepsilon^f$  η τάση θραύσης. Υπενθυμίζεται ότι η Σχέση 2.11 εμπεριέχει ρυθμό παραμόρφωσης.

Έτσι, εφαρμόζοντας την ανωτέρω Σχέση 6.1 για τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυσή μας και χρησιμοποιώντας ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 8000/s προκύπτει η ακόλουθη ταξινόμηση με αύξουσα σειρά ως προς την δυσθραυστότητα:

1. Al 2024-O με  $U_T = 50.04 J / m^3$
2. Al 7039 με  $U_T = 78.78 J / m^3$
3. Al 6061-T6 με  $U_T = 93.87 J / m^3$
4. Al 2024-T351 με  $U_T = 107.72 J / m^3$
5. Al 2024-T3 με  $U_T = 118.18 J / m^3$
6. Al 7075-T6 με  $U_T = 127.20 J / m^3$

Η δυσθραυστότητα μπορεί να φανεί και γραφικά στο Διάγραμμα 6.200, όπου αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν που σχηματίζει η καμπύλη  $\sigma$ - $\varepsilon$  με τον οριζόντιο άξονα.



Διάγραμμα 6.200. Καμπύλες  $\sigma$ - $\varepsilon$  κραμάτων αλουμινίου για  $\dot{\varepsilon} = 8000 / s$ .



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ. Σ. Μπικάκης. Διδακτορική Διατριβή. Συμβολή στην μελέτη της αντοχής μηχανολογικών κατασκευών από σύγχρονα πολύστρωτα υλικά. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. 2010.
- [2] Ε. Καραϊσκος. Μεταπτυχιακή εργασία. Μελέτη της κρουστικής απόκρισης πλακών αποτελούμενων από σύγχρονα πολύστρωτα υλικά. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. 2015.
- [3] Γ. Τσαμασφύρος, Γ. Καντεράκης. Ειδικά Κεφάλαια Συνθέτων Υλικών. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. 2004.
- [4] Tamer Sinmazelik, Egemen, Onur Hoban. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials and Design*. 2011; 3671-3685
- [5] Villanueva GR, Cantwell WJ. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology*. 2004; 64:35–54.
- [6] Asundi A, Choi Alta YN. Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft. *Journal of Material Processing Technology*. 1997; 63:384–394.
- [7] Botelho EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Materials Research*. 2006; 9(3):247–256.
- [8] Schut JE, Alderliesten RC. Delamination growth rate at low and elevated temperatures in GLARE. In: *25th International congress of the aeronautical sciences*. 2006 September 3–8; Hamburg, Germany: 2006; 1–7.
- [9] Chang PY, Yeh PC, Yang JM. Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates. *Material Science and Engineering*. 2008; A 496:273–280.
- [10] Alderliesten RC, Benedictus R. Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures. *Journal of Aircraft*. 2008; 45(4): 1182-1189
- [11] Vlot A. Impact loading on fibre metal laminates. *Int J Impact Eng* 1996; 18(3):291–307.
- [12] Beumler T, Pellenkoff F, Tillich A, Wohlers W, Smart C. Airbus costumer benefit from fiber metal laminates. Airbus Deutschland GmbH; 2006 May, Ref. no: L53pr0605135-Issue 1. p. 1–18.
- [13] Castrodeza EM, Bastian FL, Perez JEI. Critical fracture toughness,  $J_c$  and  $\delta 5_c$ , of unidirectional fibre–metal laminates. *Thin-Walled Structures*. 2003; 4:1089–1101
- [14] Vogelesang LB, Vlot A. Development of fibre metal laminates for advanced. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000; 103:1–5.
- [15] Vogelesang B, Gunnink JW, Roebroeks GHJJ, Mu Ller RPG. Toward the supportable and durable aircraft fuselage structure. In: Grandage JM, Jost GS, editors.

- Proceedings of the 18th symposium of the international committee on aeronautical fatigue, 1995 May 3–5, Melbourne, Australia; 1995. p. 257–272.
- [16] Cortes P, Cantwell WJ. The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre–metal laminates. *Composites Science Technology*. 2006; 66:2306–2316.
- [17] Cortes P, Cantwell WJ. Fracture properties of a fiber–metal laminates based on magnesium alloy. *Journal of Materials Science*. 2004; 39:1081–3.
- [18] Alderliesten R. On the development of hybrid material concepts for aircraft structures. *Recent Patents Eng* 2009; 3:25–38.
- [19] Roebroeks GHJJ. Fibre–metal laminates recent developments and applications. *International Journal of Fatigue*. 1994;1 6(1):33–42.
- [20] Yehia A, Bahei-El-Din A, Amany G, Botrous B. Analysis of progressive fiber debonding in elastic laminates. *International Journal of Solids and Structures*. 2003; 40:7035–7053.
- [21] William D. Callister, Jr. Material Science and Engineering, An Introduction. *John Wiley & Sons Inc*. 2007.
- [22] Guocai Wu and J.-M. Yang. The Mechanical Behavior of GLARE Laminates for Aircraft Structures. *Failure in Structural Materials*. 2005; 72-79
- [23] C.A.J.R. Vermeeren, Th. Beumler, J. L. C. G. De Kanter, O. C. Van Der Jagt, B. C. L. Out. GLARE Design Aspects and Philosophies. *Applied Composite Materials*. 2003; 10:257–276.
- [24] C.A.J.R. Vermeeren, Residual Strength Predictions for Fiber Metal Laminates: The R-curve Approach. *Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-717*. 1993
- [25] J. Macheret and R.J. Bucci. A Crack Growth Resistance Curve Approach to Fiber/Metal Laminate Fracture Toughness Evaluation. *Engineering Fracture Mechanics*. 1993; 45(6): 729–739.
- [26] M. Papakyriacou, J. Schijve, and S.E. Stanzl-Tschegg. Fatigue Crack Growth Behavior of Fiber-Metal Laminate GLARE-1 and Metal Laminate 7475 with Different Blunt Notches. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1997; 20(11): 1573-1584
- [27] M. Papakyriacou et al.. Fatigue Crack Growth in GLARE, Role of Glass Fibers. *Proc. of 10th European Conference of Fracture*. 1994; 1193–1199.
- [28] J.R. Yeh. Fracture Crack Growth in Fiber-Metal Laminates. *Int. J. Solids Structures*. 1995; 32(14): 2063–2075.
- [29] R. Alderliesten, Fatigue crack propagation and delamination growth in GLARE. *DUP Science, Delft, The Netherlands*. 2005.
- [30] T.J. de Vries, “Blunt and sharp notch behaviour of GLARE laminates”, *PhD dissertation, TU Delft, Delft University of Technology*. 2001.
- [31] J.J. Homan. Fatigue initiation in fibre metal laminates. *International Journal of Fatigue*. 2006; 28(4): 366-374.
- [32] R.C. Alderliesten, J.J. Homan. Fatigue and damage tolerance issues of GLARE in aircraft structures. *International Journal of Fatigue*. 2006; 28(10): 1116-1123.

- [33] T. Beumler et al. Environmental Influence on GLARE Riveted Joints. *A materials and processes odyssey*. 2001; 389-401.
- [34] M.F.H.C. Boertien. Strength of GLARE after Exposure to Moisture. *Thesis report, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology*. 1996
- [35] B. Borgonje and M.S. Ypma. Long Term Behavior of GLARE. *Applied Composite Materials*. 2003; 10(4):243-255.
- [36] Vlot A. Impact properties of fiber-metal laminates. *Composites Engineering*. 1993; 3(10): 911-927.
- [37] Vlot A. Low velocity impact loading on fiber reinforced aluminium laminates (Arall and GLARE) and other aircraft sheet materials. *Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-718*. 1993.
- [38] Hoo Fatt MS, Lin C, Revilock Jr DM, Hopkins DA. Ballistic impact of GLARE fiber metal laminates. *Composites Structures*. 2003; 61: 73-88.
- [39] Compston P, Cantwell WJ, Jones C, Jones N. Impact perforation resistance and fracture mechanisms of a thermoplastic based fiber-metal laminate. *Journal of material science letters*. 2001; 20:597-599
- [40] Johnson WS. Impact and residual fatigue behaviour of Arall and AS6/5245 composite materials. *NASA Technical Memorandum 89013*. 1986.
- [41] R.C. Alderliesten, M. Hagenbeek, J.J. Homan, P.A. Hooijmeijer, T.J. De Vries, C.A.J.R. Vermeeren. Fatigue and damage tolerance of GLARE. *Applied Composite Materials*. 2003; 10: 223–242.
- [42] Caprino G, Spataro G, Del Luongo S. Low-velocity impact behaviour of fibre glass aluminium laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004; 35: 605-616.
- [43] Vlot A. Fatigue and residual strength characteristics of fiber metal laminates subjected to incidental damage. *NASA STI/Recon Technical Report N 94*. 1992.
- [44] Liu Y, Liaw B. Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates. *Applied Composite Materials*. 2010; 43-62
- [45] Johnson WS, Li E, Miller JL. High temperature hybrid titanium composite laminates: An early analytical assessment. *Applied Composite Materials*. 1996; 3: 379-390
- [46] Johnson WS, Hammond MW. Crack growth of internal titanium plies of a fiber metal laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008; 39: 1705-1715.
- [47] Tarpani JR, Maluf O, Gatti CA. Charpy impact toughness of conventional and advanced composite laminates for aircraft construction. *Material Research*. 2009; 12(4): 395-403.
- [48] Van Rooijen RGJ. Bearing strength characteristics of standard and steel reinforced GLARE, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2006.
- [49] Cortes P, Cantwell WJ. The impact properties of high-temperature fiber-metal laminates. *Journal of Composite Materials*. 2007; 41(5): 613-632.
- [50] Reyes G, Kang H. Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fiber-metal laminates. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 186: 284-290.

- [51] Abdullah MR, Cantwell WJ. The impact resistance of propylene-based fiber-metal laminates. *Composites Science Technology*. 2006; 66: 1682-1693.
- [52] Reyes Villanueva G, Cantwell WJ. The high velocity impact response of composites and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology*. 2004; 64: 35-54.
- [53] Abrate S. Impact on composite structures. *Cambridge University Press*. 1998
- [54] Liaw BM, Liu YX, Villars EA. Impact damage mechanisms in fiber-metal laminates. In: *Proceedings of the SEM Annual Conference on experimental and applied mechanics*. 2001; 536-539
- [55] Seyed Yaghoubi A, Liu Y, Liaw B. Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE5 (3/2) fiber-metal laminates. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2012; 25(2): 223-247.
- [56] Vlot A, Krull M. Impact damage resistance of various fiber-metal laminates. *Le Journal de Physique IV*. 1997; C3-1045.
- [57] Vlot A. Impact tests on aluminium 2024 - T3. Aramid and glass reinforced laminates and thermoplastic composites. *Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-534*. 1987.
- [58] Tsamasphyros, George J., and George S. Bikakis. Dynamic response of circular GLARE fiber—metal laminates subjected to low velocity impact. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011; 30(11): 978-987.
- [59] Seyed Yaghoubi A, Liu Y, Liaw B. Low-velocity impact on GLARE 5 fiber-metal laminates: influences of specimen thickness and impactor mass. *Journal of Aerospace Engineering*. 2012; 25: 409-420.
- [60] Fan J, Cantwell WJ, Guan ZW. The low-velocity impact response of fiber-metal laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011; 26-35.
- [61] Laliberte JF, Straznicky PV, Poon C. Impact damage in fiber-metal Laminates, Part 1: experiment. *AIAA Journal*. 2005; 43(11): 2445-2453.
- [62] McKown S, Cantwell WJ, Jones N. Investigation of scaling effects in fiber-metal laminates. *Journal of Composite Materials*. 2008; 42(9): 865-888.
- [63] Liu YX, Liaw BM. Drop-weight impact on fiber-metal laminates using various indenters. *SEM X International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics Costa Mesa, CA*. 2004.
- [64] Langdon GS, Nurick GN, Karagiozova D, Cantwell WJ. Fiber-metal laminate panels subjected to blast loading. *Dynamic Failure of Materials and Structures*. Springer US. 2009; 269-296.
- [65] Langdon GS, Nurick GN, Haupt P. Response of GLARE panels to blast loading. *Engineering Structures*. 2009; 31(12): 3116-3120.
- [66] Vlot A. Impact tests on fiber-metal laminates under a tensile load. *Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-714*. 1993.
- [67] Tsamasphyros GJ, Bikakis GS. Response of circular GLARE fiber-metal laminates under lateral indentation. In: Topping BHV, Papadrakakis M. *Proceeding of the 9th international Conference on Computational Structures Technology (CST2008)*. Athens: Greece. 2008.

- [68] Tsamasphyros GJ, Bikakis GS. Finite element modeling and analytical simulation of circular GLARE fiber-metal laminates subjected to lateral indentation. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2009; 3(2): 67-80.
- [69] Caprino G, Lopresto V, Iaccarino P. A simple mechanistic model to predict the macroscopic response of fiberglass- aluminium laminates under low-velocity impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007; 38(2): 290-300.
- [70] Abatan A, Hu H. Effect of cross section material distribution on impact response of hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2002; 15(5): 375-387.
- [71] A. Seyed Yaghoubi, B. Liaw, Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies. *Composite Structures*. 2012; 94: 2585-2598.
- [72] Wu G, Yang JM, Hahn HT. The impact properties and damage tolerance and of bidirectionally reinforced fiber metal laminates. *Journal of Material Science*. 2007; 42(3): 948-957.
- [73] Laliberte JF, Poon C, Strazincky PV, Fahr A. Post-impact fatigue damage growth in fiber-metal laminates. *International Journal of Fatigue*. 2002; 24(2): 249-256.
- [74] Bagnoli F, Bernabei M, Gordan DF, Irving PE. The response of aluminium/GLARE hybrid materials to impact and to in-plane fatigue. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 523(1): 118-124.
- [75] Vlot A, Kroon E, La Rocca G. Impact response of fiber-metal laminates. *Key Engineering Materials, Trans Tech Publications*. 1998; 141: 235-276.
- [76] Carrillo JG, Cantwell WJ. Scaling effects in the low velocity impact response of fiber-metal laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008; 893-907.
- [77] Vlot A. Impact tests on fiber-metal laminates under a tensile load. *Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-714* 1993.
- [78] Langdon GS, Cantwell WJ, Nurick GN. The blast response of novel thermoplastic based fiber-metal laminates e some preliminary results and observations. *Composites Science and Technology*. 2005; 65(6): 861-872.
- [79] Langdon GS, Nurick GN, Cantwell WJ. Localized blast loading of fiber-metal laminates with a polyamide matrix. *Composites Part B: Engineering*. 2007; 38(7): 902-913.
- [80] Langden GS, Nurick GN, Lemanski SL, Simmons MC, Cantwell WJ, Schleyer GK. Failure characterization of blast-loaded fiber-metal laminate panels based on aluminium and glass-fiber reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*. 2007; 67(7): 1385-1405.
- [81] Sun CT, Dicken A, Wu HF. Characterization of impact damage in Arall laminates. *Composites Science and Technology*. 1993; 49(2): 139-144.
- [82] Hagenbeek M. Impact properties. In: *Fibre Metal Laminates*. Springer Science+Business Media Dordrecht, Kluwer Academic Publisher. 2001; 409-426
- [83] A. Seyed Yaghoubi, B. Liaw. Effect of lay-up orientation on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML beams. *International Journal of Impact Engineering*. 2013; 54:138-148.

- [84] Keisuke Fujii, et al. Impact perforation behavior of CFRPs using high-velocity steel sphere. *International Journal of Impact Engineering*. 2002; 27(5): 497-508.
- [85] J. Lopez-Puente, et al. An analytical model for high velocity impacts on thin CFRPs woven laminated plates. *International journal of solids and structures*. 2007; 44(9): 2837-2851.
- [86] Alastair F. Johnson, Martin Holzapfel. Modelling soft body impact on composite structures. *Composite Structures*. 2003; 61: 103-113
- [87] M. Guida, et al. SPH-Lagrangian study of bird impact on leading edge wing. *Composite Structures*. 2011; 93: 1060-1071.
- [88] Yaghoubi, A. Seyed, and B. Liaw. Influences of thickness and stacking sequence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML plates: Part I-experimental studies. *Journal of Composite Materials*. 2014; 48(16): 2011-2021.
- [89] Yaghoubi, A. Seyed, and B. Liaw. Influences of thickness and stacking sequence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML plates: Part II-Numerical studies. *Journal of Composite Materials*. 2014; 48(19): 2363-2374.
- [90] Børvik, Tore, et al. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*. 2011; 38(7): 577-589.
- [91] John O. Hallquist. LS-DYNA Theory Manual. *Livermore Software Technology Corporation*. 2006
- [92] Manual, LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume I, LS-DYNA R7.1. *Livermore Software Technology Corporation*. 2014.
- [93] Manual, LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II, LS-DYNA R7.1. *Livermore Software Technology Corporation*. 2014
- [94] Johnson, Gordon R., and William H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. 1983; 21: 541-547.
- [95] Jankowiak, Tomasz, et al. Ballistic behavior of steel sheet subjected to impact and perforation. *Steel and Composite Structures*. 2014; 16(6): 595-609.
- [96] Gu, Bohong, and Jingyi Xu. Finite element calculation of 4-step 3-dimensional braided composite under ballistic perforation. *Composites Part B: Engineering*. 2004; 35(4): 291-297.
- [97] Chang, Fu-Kuo, and Kuo-Yen Chang. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure. *Journal of Composite Materials*. 1987; 21(9): 809-833.
- [98] Chang, Fu-Kuo, and Kuo-Yen Chang. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of composite materials*. 1987; 21(9): 834-855.
- [99] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of applied mechanics*. 1980; 47(2): 329-334.
- [100] Manual. ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide. *ANSYS Inc*. 2013
- [101] Manual. ANSYS Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide. *ANSYS Inc*. 2013
- [102] Manual. ANSYS LS-DYNA User's Guide. *ANSYS Inc*. 2013

- [103] [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- [104] [www.glemco.com](http://www.glemco.com)
- [105] [www.amazon.com](http://www.amazon.com)
- [106] Thuc T. Vo, Guan Z. W., Cantwell W. J. & Schleyer G. K. Modelling of the low-impulse blast behaviour of fibre–metal laminates based on different aluminium alloys. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 44(1): 141-151.
- [107] Seidt, J. D., and A. Gilat. Plastic deformation of 2024-T351 aluminum plate over a wide range of loading conditions. *International Journal of Solids and Structures*. 2013; 50(10): 1781-1790.
- [108] Lesuer, Donald R., G. Kay, and M. LeBlanc. "Modeling large strain, high rate deformation in metals. *Lawrence Livermore National Laboratory*. 2001
- [109] Sara J. Pérez-Bergquist, G.T. (Rusty) Gray III, et al. The dynamic and quasi-static mechanical response of three aluminum armor alloys: 5059, 5083 and 7039. *Materials Science and Engineering: A*. 2011; 528(29): 8733– 8741
- [110] Ding-Ni Zhang, Qian-Qian Shangguan, Can-Jun Xie b, Fu Liu. A modified Johnson–Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014; 619: 186-194
- [111] Datasheet. Aluminium 7075-T6; 7075-T651. *CRP Meccanica*.
- [112] [www.dynasupport.com](http://www.dynasupport.com)
- [113] Zarei, Hamed, Mojtaba Sadighi, and Giangiacomo Minak. Ballistic analysis of fiber metal laminates impacted by flat and conical impactors. *Composite Structures*. 2017; 161: 65-72.
- [114] Bikakis G.S.E., Karaiskos E., and Sideridis E.P.. Low-velocity impact response of fiber-metal laminates consisting of different standard GLARE grades. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016; 35(13): 1029-1040.
- [115] Tsamasphyros G.J., Bikakis G.S.E. Dynamic response of circular GLARE fiber-metal laminates subjected to low velocity impact. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*. 2011; 30(11) 978-987.
- [116] Sadighi, M., R. C. Alderliesten, and R. Benedictus. Impact resistance of fiber-metal laminates: a review. *International Journal of Impact Engineering*. 2012; 49: 77-90.
- [117] Grujicic, M., et al. A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors. *Applied Surface Science*. 2006; 253(2): 730-745.
- [118] Ε. Σικουτρής. Διδακτορική διατριβή. Ανάλυση της απόκρισης σύνθετων πολυμερών υλικών υπό συνθήκες φωτιάς. Εφαρμογή σε αεροπορικές κατασκευές. *Πανεπιστήμιο Πάτρας*. (2012).
- [119] [www.agy.com](http://www.agy.com)
- [120] Vermeeren, C. A. J. R. An historic overview of the development of fibre metal laminates. *Applied Composite Materials*. 2003; 10(4-5): 189-205.
- [121] Johnson, Gordon R., and William H. Cook. "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures." *Engineering fracture mechanics*. 1985; 21(1): 31-48.
- [122] Landshoff, Rolf. A numerical method for treating fluid flow in the presence of shocks. *Los Alamos Scientific Laboratory*. 1955; LA-1930

- [123] Børvik, T., et al. "Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: part II: numerical simulations." *International Journal of Impact Engineering*. 2002; 27.1: 37-64.
- [124] Kurtaran, H., M. Buyuk, and A. Eskandarian. "Ballistic impact simulation of GT model vehicle door using finite element method." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2003; 40.2: 113-121.