

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΠΜΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη της κρουστικής απόκρισης πλακών
αποτελούμενων από σύγχρονα πολύστρωτα υλικά»



Επιβλέποντες:

Δρ. Αιμίλιος Σιδερίδης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Δρ. Γεώργιος Μπικάκης
Λιδάκτωρ Τομέα Μηχανικής ΕΜΠ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής :

Ευάγγελος Καραΐσκος

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

...στη μνήμη των γονιών μου Ελπινίκης & Ιωάννη,
για την απέραντη αγάπη τους που με καθοδηγεί ακόμα...
στη γυναίκα μου Φωτεινή,
στην πρώτη μου κόρη Ελπινίκη,
στην τρίτη μου κόρη που μόλις γεννήθηκε,
και ιδιαιτέρως στην δεύτερή μου κόρη Αικατερίνη,
που σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού ήταν η
καθημερινή μου καταπληκτική συντροφιά!

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Πρόλογος</u>	A4
<u>Κεφάλαιο 1^ο</u>	
1. Σύνθετα Υλικά.....	1
2. Κατηγορίες σύνθετων υλικών	2
3. Ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά(fiber-metal laminates / FMLs).....	4
3.1 Πλεονεκτήματα των FMLs... ..	7
4. Υλικό GLARE (GLAss REinforced FML)	9
4.1 Ονοματολογία και βασικοί τύποι του GLARE	11
4.2 Κατασκευή του GLARE	12
4.3 Μηχανικές ιδιότητες του GLARE	14
5. Αντοχή σε κρούση των FMLs.	22
5.1 Πειραματικές μελέτες της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs.....	23
5.1.1 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης & φορτίου-χρόνου.	24
5.1.2 Κριτήρια εκτίμησης κρουστικής αστοχίας.	27
5.2 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με το υλικό.	27
5.3 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με τις συνθήκες κρούσης	35
6. Προσομοίωση της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs.	41
6.1 Σχεδόν στατική διείδυση.	41
6.2 Κρούση χαμηλής ταχύτητας.	42
6.3 Κρούση υψηλών ταχυτήτων.	44
7. Μοντελοποίηση κρούσεων με πεπερασμένα στοιχεία.	44
<u>Κεφάλαιο 2^ο</u>	
1. Γενικά.....	46
2. Αντικειμενικός σκοπός εργασίας.	46
3. Καθορισμός του προβλήματος.	48
4. Μοντελοποίηση αναλυτικής μεθόδου.	51
4.1 Διαφορική εξίσωση κίνησης.....	51

4.2 Αρχικές συνθήκες	53
4.3 Τα στάδια της κρούσης	55
 <u>Κεφάλαιο 3^ο</u>	
1. Γεωμετρία προβλήματος – Ιδιότητες υλικών	59
2. Αποτελέσματα ανά τύπο Glare.....	60
2.1 Glare2A-4/3-0.238	60
2.2 Glare2A-3/2-0.4	64
2.3 Glare3-3/2-0.4	68
2.4 Glare4-3/2-0.342	72
2.5 Glare5-3/2-0.283	76
2.6 Glare2A-4/3-0.256	80
2.7 Glare4-3/2-0.317	84
2.8 Glare5-3/2-0.233	88
 <u>Κεφάλαιο 4^ο</u>	
1. Σύγκριση δοκιμών ίδιου βάρους	92
2. Σύγκριση δοκιμών με ίδια διάσταση πάχους	105
3. Σύγκριση δοκιμών ως προς την ακτίνα	116
 <u>Κεφάλαιο 5^ο</u>	
1. Επίλυση μέσω LS-Dyna/ANSYS FE code.....	121
2. Κατηγοριοποίηση των FE models.....	124
3. Μοντελοποίηση κρούσης σε κράματα αλουμινίου 2024-T3	124
4. Μοντελοποίηση κρούσης σε δοκίμια Glare	131
5. Μοντελοποίηση κρούσης σε δοκίμια Glare του 3ου κεφαλαίου	143
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 153

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα σύνθετα υλικά συνιστούν μία αποτελεσματική λύση στην αναζήτηση υλικών με ιδιαίτερους συνδυασμούς ιδιοτήτων που απαιτούνται από τις σύγχρονες τεχνολογίες, τους οποίους συνδυασμούς, 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, κυκλικών πλακών (κατασκευασμένες από διαφορετικούς εμπορικά διαθέσιμους τύπους GLARE), που υπόκεινται σε κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων από ένα κάθετο ημισφαιρικού σχήματος βλήμα. Η συγκεκριμένη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς πραγματοποιείται αφενός χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις, και αφετέρου μέσω της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (με χρήση του εμπορικού προγράμματος LS-Dyna/ANSYS). Οι τιμές των βασικών μεγεθών και παραμέτρων σχεδίασης (αντιπροσωπευτικών της κρουστικής απόκρισης) που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα. Η γενική σύγκλιση των αποτελεσμάτων εκτιμάται ότι είναι πολύ ικανοποιητική.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δύναται να παράσχουν σε ερευνητές και μηχανικούς, που επικεντρώνονται στην κρουστική απόκριση πλακών GLARE, 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 άψογη συνεργασία που είχαμε τους τελευταίους οκτώ μήνες στο πλαίσιο 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

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 [3]. 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 τυγχάνει 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.

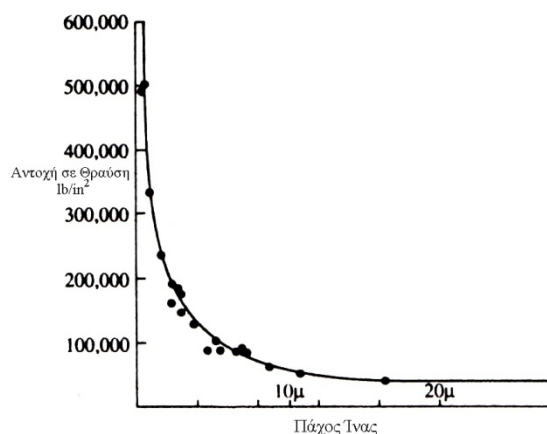
Με σκοπό την σχεδίαση σύνθετων υλικών, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί έχουν συνδυάσει με ιδιοφυή τρόπο διάφορα μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή για να παράγουν μία νέα γενεά υλικών. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά έχουν δημιουργηθεί με αντικειμενικό σκοπό τη βελτίωση του συνδυασμού των μηχανικών χαρακτηριστικών 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 διασπαρμένη φάση. Οι τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού αποτελεί συνάρτηση των ιδιοτήτων των συνιστωσών τους φάσεων, των σχετικών ποσών 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 [2], όπως φαίνεται στο σχήμα 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 θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς.

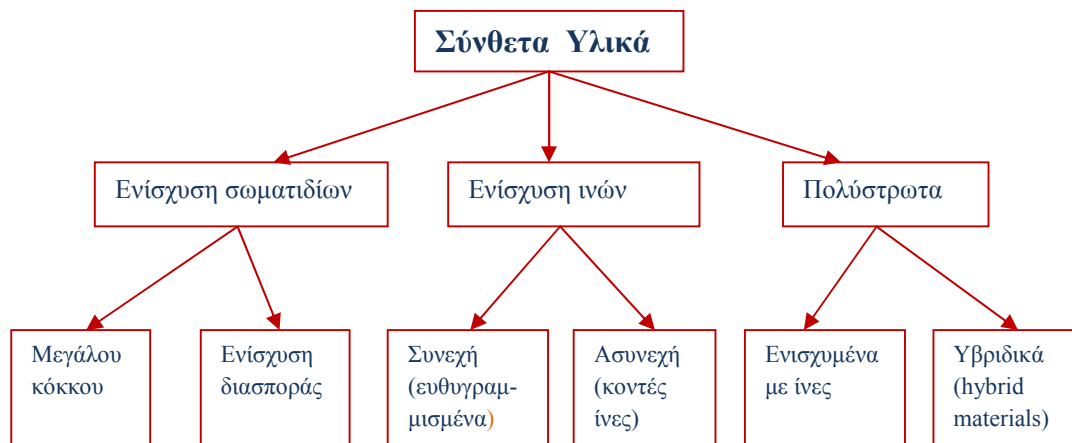
Το παράδοξο αυτό οφείλεται στην ύπαρξη τελειότερης δομής (δηλαδή με λιγότερες μικρορωγμές) και στον προσανατολισμό των κρυστάλλων του υλικού κατά διεύθυνση παράλληλη με το διαμήκη άξονα της ίνας. Αντίθετα, στην ακατέργαστη μορφή, οι κρύσταλλοι έχουν τυχαία διεύθυνση, ενώ παρουσιάζονται περισσότερες εσωτερικές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



Σχήμα 1. Αντοχή σε θραύση ίνας γυαλιού ως προς το πάχος της.

2. Κατηγορίες σύνθετων υλικών.

Ένας απλός τρόπος για την ταξινόμηση των σύνθετων υλικών παρουσιάζεται στο σχήμα 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].



Σχήμα 2. Κατάταξη σύνθετων υλικών.

α) Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites) [3].

Τα ινώδη σύνθετα υλικά 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.

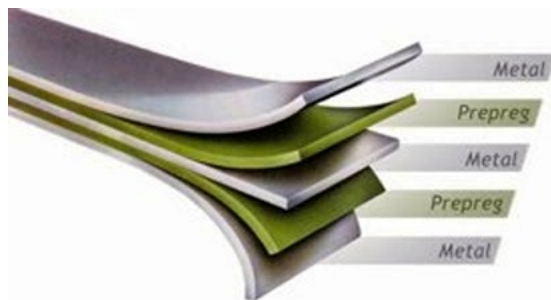
β) Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites)

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.

γ) Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites / laminates)

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερες στρώσεις (laminates) 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 3.

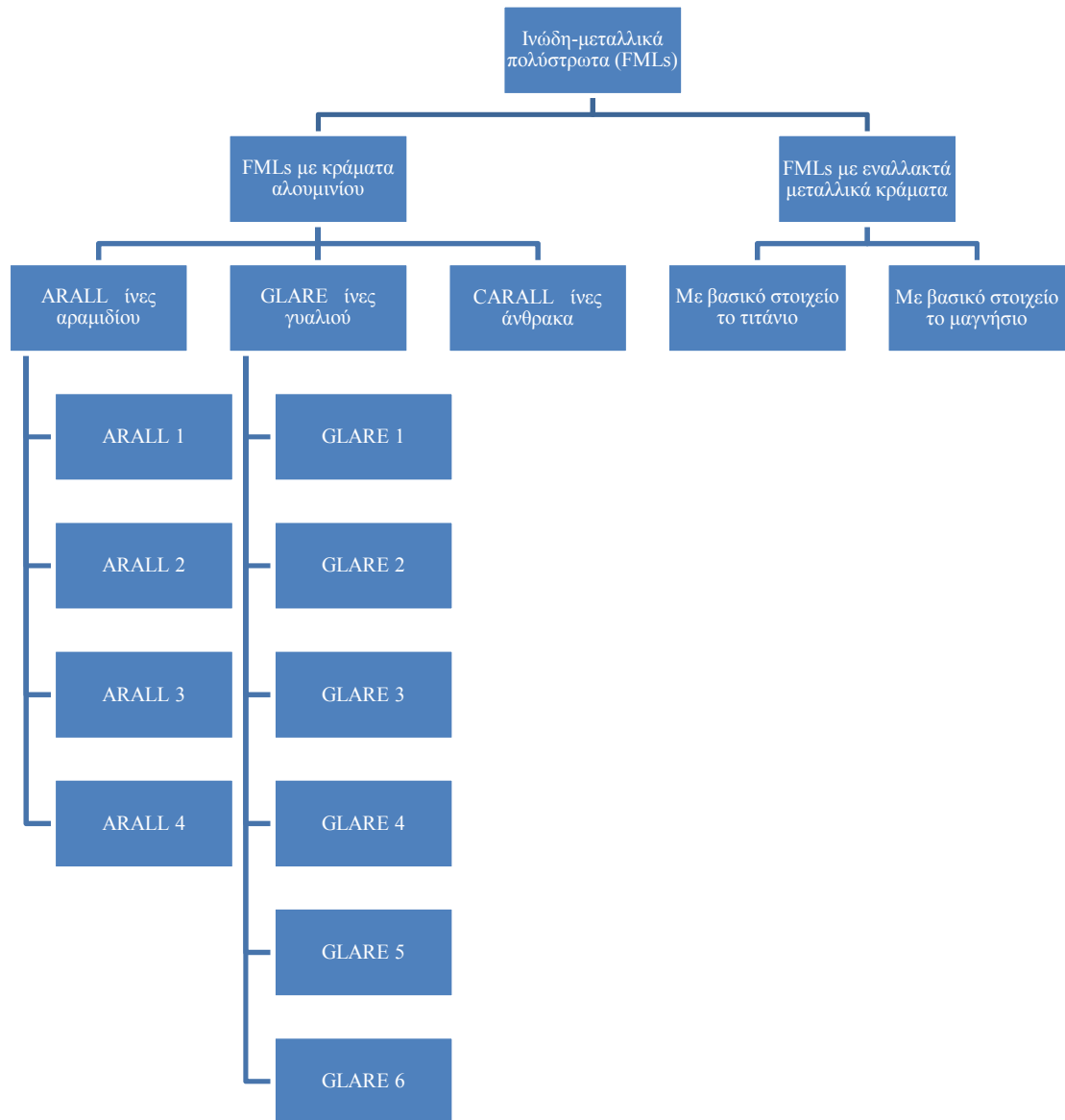


Σχήμα 3. Τυπική δομή των FMLs.

3. Ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά (fiber-metal laminates / FMLs)

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.

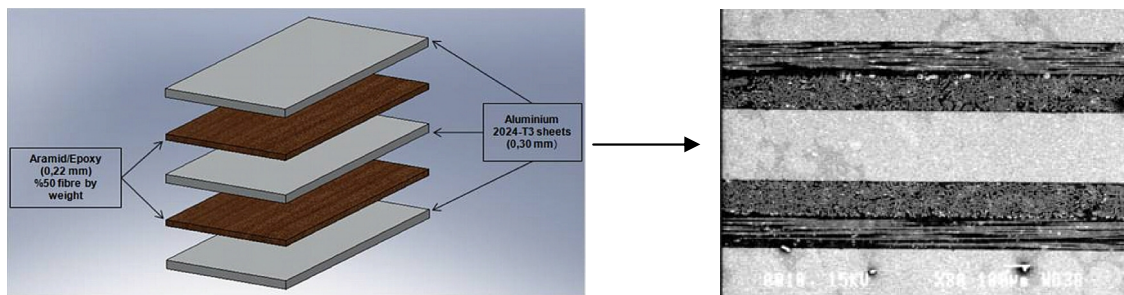
Τα ινώδη-μεταλλικά πολύστρωτα υλικά (FMLs) μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με το σχήμα 4 [4]. Τα περισσότερο εμπορικά διαθέσιμα FMLs μέχρι σήμερα είναι το ARALL 1, που βασίζεται στις ίνες αραμιδίου, και το GLARE 1, που βασίζεται σε υψηλής αντοχής ίνες γυαλιού.



Σχήμα 4. Κατηγοριοποίηση των FMLs.

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 ± 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

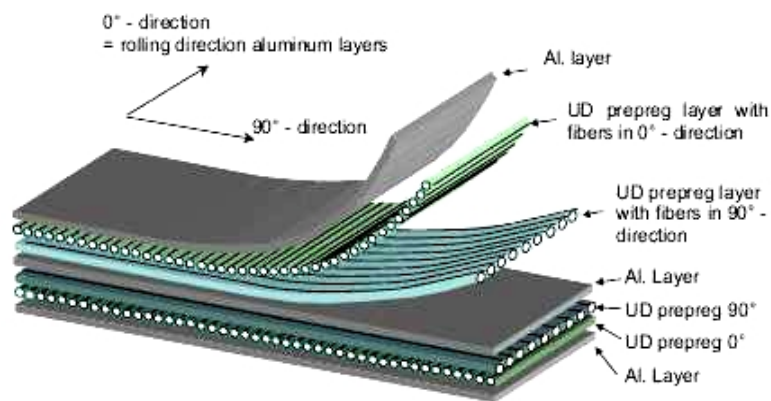
στρώσεις του αλουμίνιο 2024 [7]. Η χαρακτηριστική δομή του ARALL φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5. Η δομή του ARALL.

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). 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 (GLAs REinforced aluminium) 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 6.



Σχήμα 6. Τοπική δομή GLARE.

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 :

α. Μηχανική συμπεριφορά.

- Υψηλή αντοχή σε κόπωση. Επιτυγχάνεται χάρη στο φαινόμενο της γεφύρωσης των ινών (το οποίο θα αναλυθεί 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.

β. 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].

γ. 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 κλασσικών σύνθετων υλικών [10].

δ. Ασφάλεια.

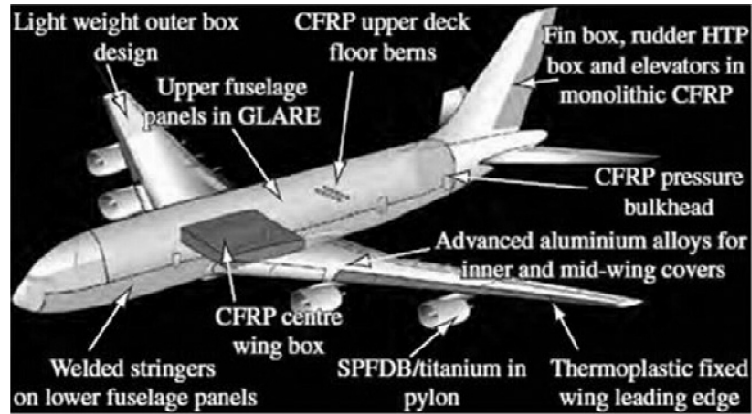
- Αντοχή στη φωτιά. Το υψηλό σημείο τήξης των ινών των FMLs, αποτρέπει την εισχώρηση της φωτιάς στα εσωτερικά στρώματα του υλικού π.χ. οι ίνες γυαλιού στα πολυστρωματικά υλικά GLARE μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 1100°C. Έτσι η αντοχή σε φλόγα των FMLs είναι κατά πολύ καλύτερη σε σχέση 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].

ε. Μειώνουν τα κόστη.

- 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 λιγότερος σε σχέση με αυτών 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].

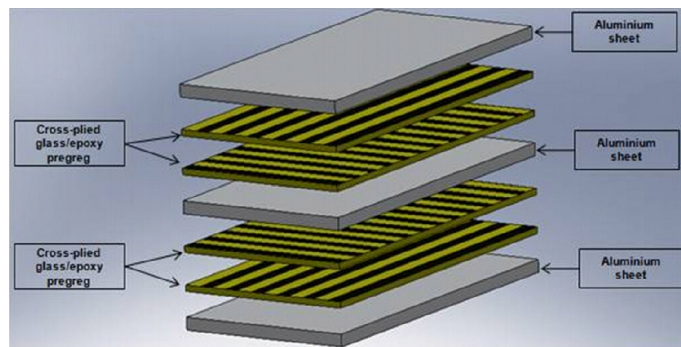
Κατόπιν των ανωτέρω καθίσταται σαφές ότι τα FMLs είναι κατάλληλα για χρήση σε πληθώρα εφαρμογών, και ειδικά σε αεροναυπηγικές κατασκευές. Ένας μεγάλος αριθμός βιομηχανιών έχουν επενδύσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών κραμάτων αλουμινίου με FMLs [10]. Σε σύγχρονα αεροσκάφη συναντώνται κατά κόρον υλικά όπως το ARALL και το GLARE, π.χ. στο Airbus A380 [12]. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται τα μέρη του Airbus A380 που χρησιμοποιούνται FMLs [7],[20].



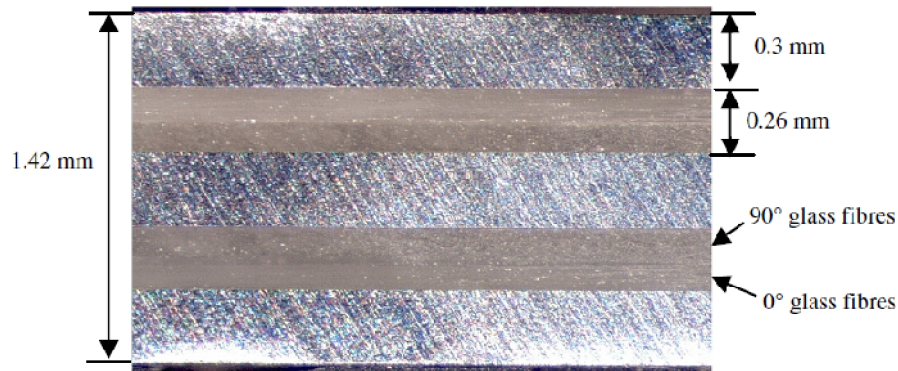
Εικόνα 1. Χρήση FMLs στο Airbus A380.

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]. 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 7 & 8 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 7. Σχηματική απεικόνιση δομής GLARE.



Σχήμα 8. Διαστρωμάτωση του GLARE 3.

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. Στον πίνακα 1. αναγράφονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 2024-T3 [21]. Το σύνθετο υλικό είναι επίσης ελαφρύ και οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού που διαθέτει προσφέρουν στο GLARE υψηλή αντοχή κατά τη διεύθυνσή τους και συμβάλλουν στη βελτίωση σημαντικών μηχανικών ιδιοτήτων του όπως η αντοχή σε κόπωση και κρούση. Στον πίνακα 2. αναγράφονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες στρώσης σύνθετου υλικού με μήτρα εποξικής ρητίνης και ίνες S2-glass UD [21].

Σύμβολο [μονάδες]	Τιμή	Μηχανική ιδιότητα
E [MPa]	70150	Μέτρο ελαστικότητας
m [-]	0.33	Λόγος Poisson
σ_0 [MPa]	351	Τάση διαρροής
σ_{ult} [MPa]	480	Τάση θραύσης
τ_0 [MPa]	264	Διατμητική τάση διαρροής
τ_{ult} [MPa]	283	Διατμητική τάση θραύσης
ρ [Kg/m ³]	2770	Πυκνότητα

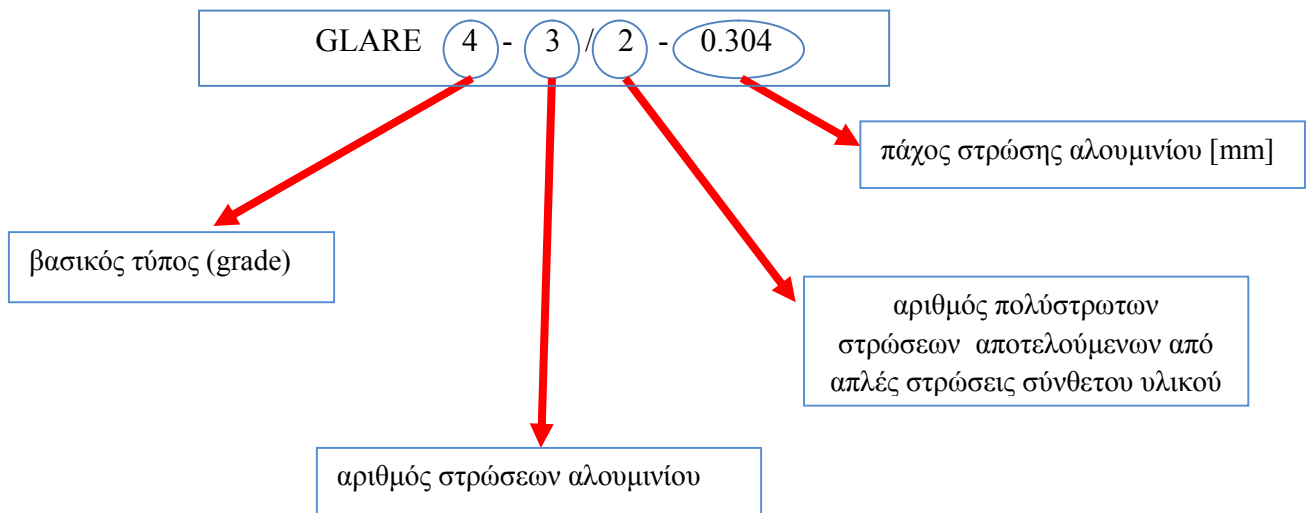
Πίνακας 1: Στατικές μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 2024-T3

Σύμβολο [μονάδες]	Τιμή	Μηχανική ιδιότητα
E_1 [MPa]	48600	Διάμηκες μέτρο ελαστικότητας
E_2 [MPa]	8500	Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας
ν_{12} [-]	0.33	Λόγος Poisson
X [MPa]	1900	Διαμήκης τάση θραύσης
Y [MPa]	56	Εγκάρσια τάση θραύσης
S [MPa]	38	Διατμητική τάση θραύσης
P [Kg/m ³]	1980	Πυκνότητα

Πίνακας 2: Στατικές μηχανικές ιδιότητες UD FM94/S2 prepeg.

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 7 έχει πάχος κάθε στρώσης αλουμινίου 0.304 mm, τότε αυτό ονομάζεται GLARE 4 - 3 / 2 - 0.304.



Παραδείγματα :

α. GLARE 4 - 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]

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, ανωδίωση 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 πολυστρωτω σώμα, είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα και την απόδοση του τελικού προϊόντος.

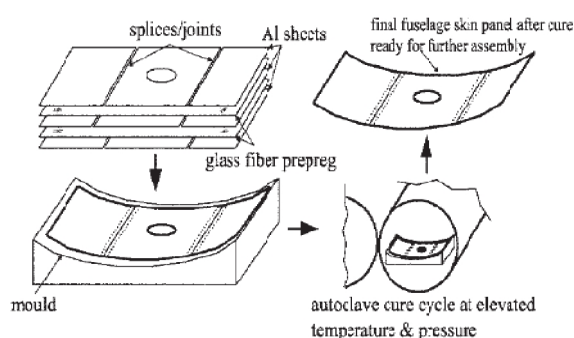
Οι στρώσεις αλουμινίου έχουν πάχος που κυμαίνεται από 0,2mm έως 0,5mm mm για κράματα αλουμινίου 2024-T3 και από 0,3 mm έως 0,4 mm για κράματα αλουμινίου 7475-T761 [108]. Το πάχος κάθε απλής στρώσης σύνθετου υλικού εξαρτάται από τη διαδικασία παραγωγής με συνήθη τιμή 0,13 mm. Εκτός από το συνήθη τύπο S2-glass, οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού μπορεί να είναι και τύπου R-glass. Στον πίνακα 3 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)	Χρώμα 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 3: 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 9.



Σχήμα 9. Κατασκευή μεγάλων διαστάσεων πάνελ με τη μέθοδο των αρμών.

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) καθώς και η σύγκρισή τους με την αντίστοιχη συμπεριφορά των αλουμινίων 2024-T3 και 7075-T76 φαίνεται στον πίνακα 4. Το μέτρο ελαστικότητας όλων των τύπων GLARE προκύπτει να είναι μικρότερο σε σχέση με το μονολιθικό κράμμα 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.

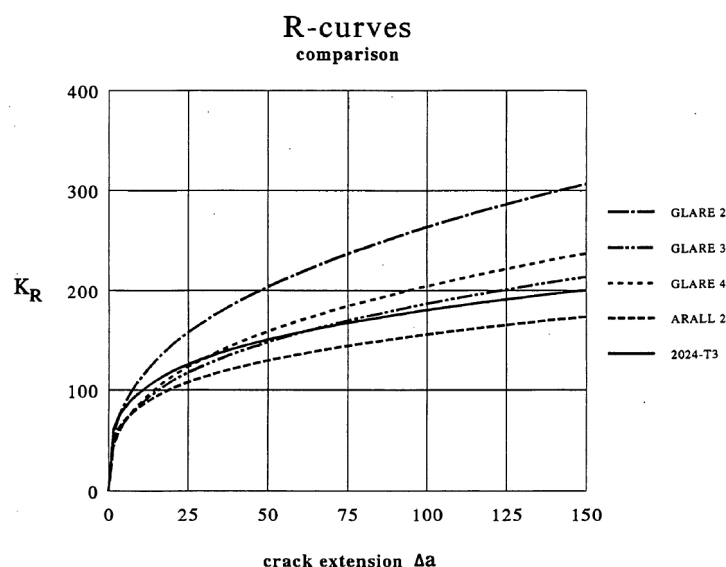
Laminates	Τάση θραύσης (MPa)		Τάση διαρροής (MPa)		Μέτρο Young (GPa)		Παραμόρφωση θραύσης (%)	
	διαμήκης	εγκάρσια	διαμήκης	εγκάρσια	διαμήκη	εγκάρσιο	διαμήκης	εγκάρσια
GLARE 1								
3/2	1,282	352	545	333	65	50	4.2	7.7
2/1	1,077	436	525	342	66	54	4.2	7.7
GLARE 2								
3/2	1,214	317	360	228	66	50	4.7	10.8
2/1	992	331	347	244	67	55	4.7	10.8
GLARE 3								
3/2	717	716	305	283	58	58	4.7	4.7
2/1	662	653	315	287	60	60	4.7	4.7
GLARE 4								
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
GLARE 5								
2/1	683	681	297	275	59	59	4.7	4.7
2024-T3	455	448	359	324	72	72	19	19
7075-T76	545	545	476	476	69	69	13	13

Πίνακας 4. Εφελκυστικές ιδιότητες πολυστρωματικών GLARE και κράματων αλουμινίου.

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.

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 προωγατωμένων δοκιμίων με κεντρικές ρωγμές [24],[25]. Στο σχήμα 10 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.

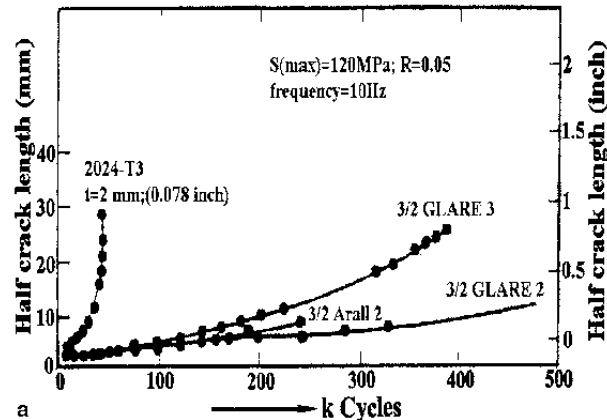


Σχήμα 10. Καμπύλες αντίστασης στην ανάπτυξη των ρωγμών (R-curves).

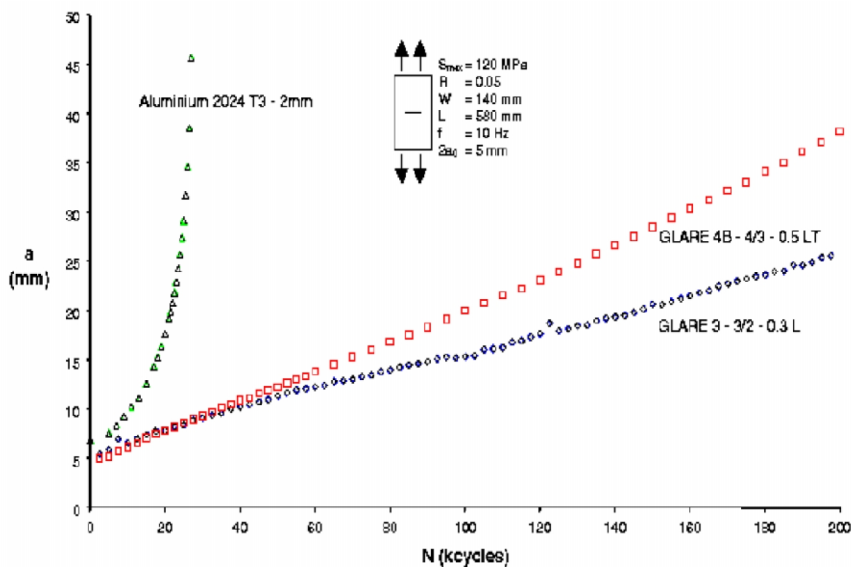
Συμπεριφορά του GLARE στο φαινόμενο της κόπωσης.

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 11 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 12 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.



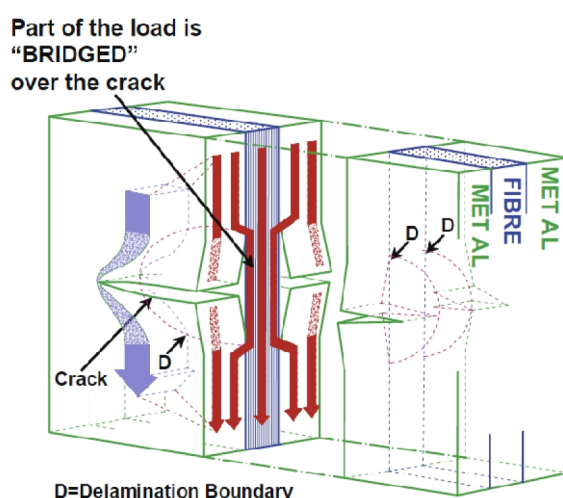
Σχήμα 11. Διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης σε δοκίμια GLARE-Al.



Σχήμα 12. Διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης σε δοκίμια GLARE-Al.

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 13, 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 13. Το φαινόμενο της γεφύρωσης των ινών στο GLARE.

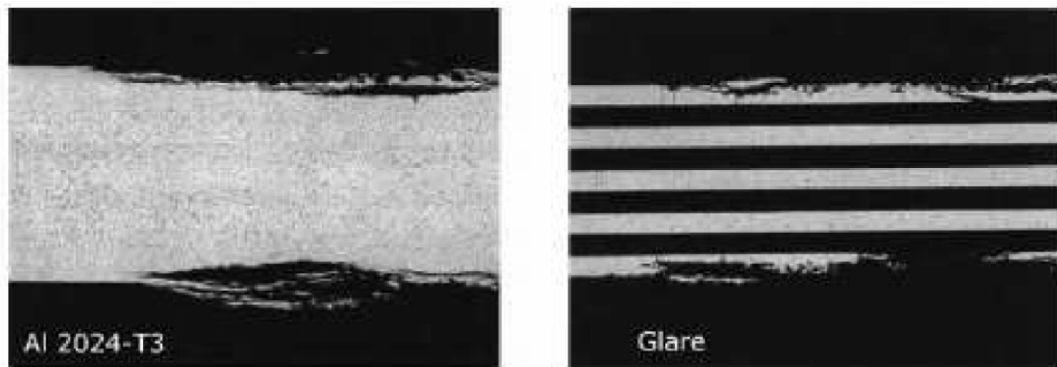
Συμπεριφορά του GLARE στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

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 ιών 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 ιών-εποξικής ρητίνης που ουσιαστικά δρα ως αδιαπέραστο εμπόδιο στη διάδοση της διάβρωσης.



Εικόνα 2. Σύγκριση διάβρωσης των Al 2024-T3 & GLARE.

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 στην εικόνα 2. 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.

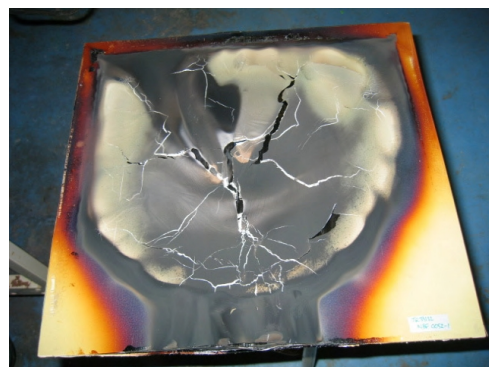
Η αντίσταση του GLARE στην φλόγα είναι κατά πολύ ανώτερη σε σχέση με την αντίστοιχη που έχει το μονολιθικό αλουμίνιο [14],[106]. Ο χρόνος έναρξης της τήξης των σημερινών ατράκτων των αεροσκαφών που είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο, προβλέπεται να είναι 20-30 sec σε περίπτωση εξωτερικής πυρκαγιάς από κηροζίνη. Συνεπώς οι επιβάτες πρόκειται να εκτεθούν σε αυτές τις θερμοκρασίες καθώς σύμφωνα με τις αρχές αξιοπλοϊμότητας 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.

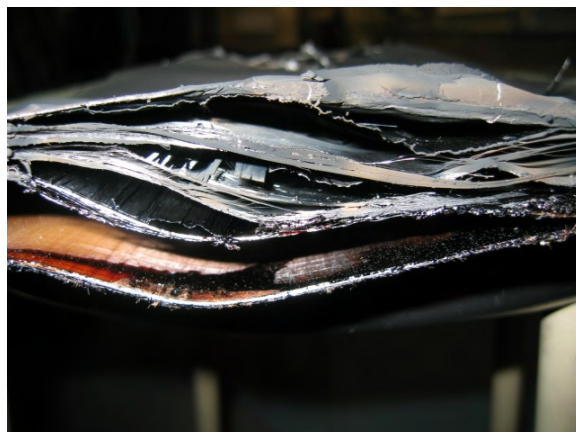
Η εξαιρετική αντοχή του GLARE σε φλόγα οφείλεται στον αποχωρισμό μεταξύ των στρώσεων που συμβαίνει λόγω της θερμότητας. Ο αποχωρισμός συμβάλλει στη σημαντική βελτίωση της θερμικής μόνωσης μεταξύ των στρώσεων. Έτσι, ενώ η εξωτερική στρώση αλουμινίου λιώνει άμεσα, οι μεταλλικές στρώσεις πίσω από τις πρώτες 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]. Παραδείγματα θερμικής καταπόνησης σε θερμοκρασίες των 1170°C σε δοκίμια GLARE φαίνονται στις εικόνες 1.1.1 [106].



Εικόνα 3α. Δοκίμιο GLARE πριν το τεστ.



Εικόνα 3β. Δοκίμιο GLARE μετά το τεστ



Εικόνα 3γ. Λεπτομέρεια αποκόλλησης των στρώσεων GLARE μετά το τεστ.

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 κοντέινερ ECOS-3 που φαίνεται στην εικόνα 4 από την εταιρία Galaxy Scientific Corporation, το οποίο ολοκλήρωσε επιτυχώς τα τεστ εκρηκτικών της FAA (ομοσπονδιακή αρχή αξιοπλοϊμότητας της Αμερικής) το 1995, και έκτοτε έχει βγει σε παραγωγή για εμπορική χρήση σε επιβατικά αεροσκάφη.



Εικόνα 4. Το ECOS-3 πριν και μετά τα τεστ εκρηκτικών.

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.

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 αποπροσγείωσης (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 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 της ίδιας έκτασης πυκνότητας. Η υπόψη βελτιωμένη απόδοση αναμένεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη σε FMLs θερμοπλαστικής βάσης σε κρούσεις υψηλών ταχυτήτων [39].

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 5 συνοψίζονται οι κυριότερες από αυτές. Από την πειραματική αυτή μελέτη έχουν προκύψει οι γενικές παρατηρήσεις που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Δημοσί- ευση	Τύπος FML	Τύπος μήτρας	Τύπος ινών	Τύπος Μετάλλων	Εφαρμογή φορτίων	Αντικείμενο μελέτης
[42]	FGA	Ths	G1	Al2	LV	Load deflection curves
[72]	Glare 4, Glare 5	Ths	G1	Al2	LV	Ply configuration, post impact fatigue behaviour
[73]	Glare3,4 &5	Ths	G1	Al2	LV	Post impact fatigue
[61]	Glare3,4, &5	Ths	G1	Al2	LV	Test fixture and ply configuration
[63]	Glare 2,3	Ths	G1	Al2	LV	Impactor geometry, ply configuration
[74]	Glare	Ths	G1	Al3,Al4	LV	Glare on a substrate
[54]	Glare1,2 &Arall 3	Ths	G1,Ke	Al5,Al2	LV	Fiber, metal, number of layers effects and configuration
[44]	Glare1,2,& 3	Ths	G1,Ke	Al5,Al2	LV	Fiber, metal, number of layers effects and configuration

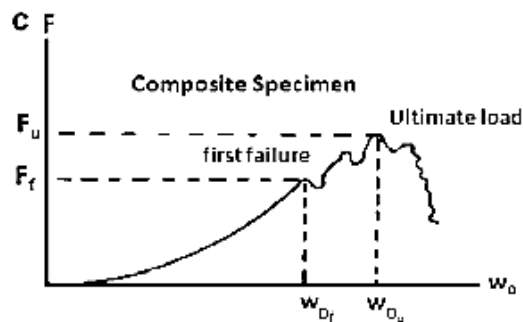
[75]	Glare1,3,5 & Arall2,1	Ths	Gl,Ke	A11,A12	LV,HV	Fiber, metal pretension ply configuration
[11]	Arall1,2 & Glare 2,3	Ths	Gl,Ke	A11,A12	LV,HV	Fiber,metal configuration effects
[36]	Arall2& Glare3	Ths	Gl,Ke	A11,A12,A14	LV,HV	Fiber,metal configuration effects & pretension
[56]	Glare3,5	Ths	Gl	A12	LV,HV	Configuration
[62]	FML	Thp	Po	Al6	LV	Scaling effects
[76]	FML	Thp	Po	Al6	LV	Scaling effects (ply configurations)
[57]	Glare, Arall	Ths	Gl,Ke	A11,A12	LV	Fiber,metal and configuration impact
[77]	Glare, Arall	Ths	Gl,Ke	A11,A12	LV,HV,QS	Pretension
[38]	Glare, Arall	Ths	Gl,Ke	A11,A12	LV,HV,QS	Fiber,metal and configuration pretension
[43]	Arall, Glare	Ths	Gl,Ke	A11,A14	LV	Post-impact fatigue behavior
[75]	FML	Ths	Gl	Al6	LV	Target thickness and diameter impactor radius effects
[39]	FML	Thp	Gl	A12	HV	Matrices and impactor nose effects
[38]	Glare5	Ths	Gl	A12	HV	(Ballistic) Perforation& ballistic limit
[52]	FML(sand wich)	Thp	Gl	A12	HV	Ballistic limit
[64]	Glare	Thp&Ths	Gl	A12,A16	Blast	Blast local and uniformly distributed blast loading
[78]	FML	Thp	Gl	A12	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	A12	QS,LV	Strength degradation
[82]	Glare	Ths	Gl	A12	LV,HV	Damage quantification
[55]	Glare	Ths	Gl	A12	LV	Stacking sequence, Geometrical effects
[59]	Glare	Ths	Gl	A12	LV	Specimen thickness, Impactor mass

Επεξήγηση συντομούσεων : Ths: thermoset, Thp: thermoplastic, Ke: Kevlar, Gl: glass, Gr: graphite, PP: polypropylene, A11:A17075-T6, A12:A12024-T3, A13:A17085-T7651, A14:A17475-T761, A15:A17475-T6, A16:A12024-0, Mg: magnesium, Ti: titanium, QS: quasi-static, LV: low-velocity, HV: high-velocity

Πίνακας 5. Πειραματικές μελέτες της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs

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 στα σχήματα 13a,b&c [37]. Οι συγκεκριμένες καμπύλες προέκυψαν από στατική φόρτιση ημισφαιρική διεισδυτή με ακτίνα καμπυλότητας στο άκρο του 7,5mm, πάνω σε τετράγωνα 100X100mm πακτωμένα δοκίμια.



Σχήμα 14. Στατικές καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης

Η διαφορετική συμπεριφορά των ανωτέρω υλικών φαίνεται καθαρά στο σχήμα 14a. Ειδικότερα :

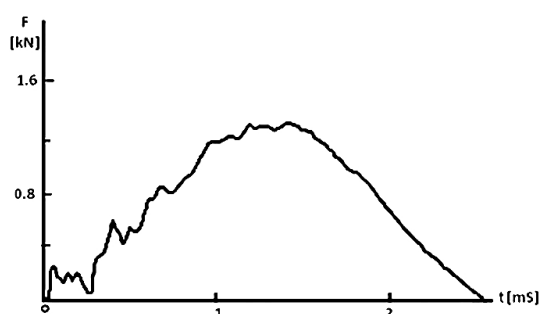
-Το μονολιθικό αλουμίνιο (σχήμα 14a) παρουσιάζει μόνιμα αυξητική εξάρτηση της δύναμης ως προς την παραμόρφωση, η οποία διατηρείται έως την αστοχία. Μέχρι το σημείο της πρώτης αστοχίας το υλικό έχει μόνο πλαστική παραμόρφωση. Η πρώτη αστοχία συμβαίνει στο μέγιστο ή στο απόλυτο φορτίο που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο. Μετά τη θραύση η δύναμη μειώνεται ραγδαία, δημιουργείται μία οπή και ο διεισδυτής διαπερνά το δοκίμιο.

-Στο σύνθετο υλικό (σχήμα 14c) 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.

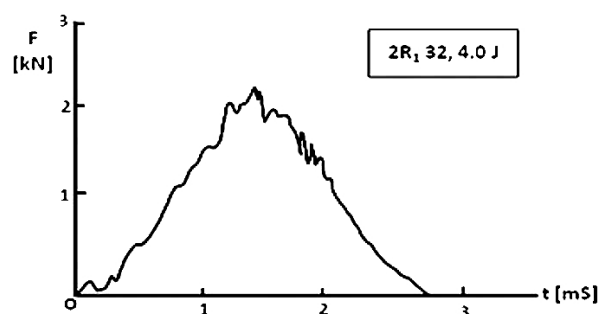
-Στα FMLs (Afall) διακρίνεται μια παρόμοια συμπεριφορά με την αντίστοιχη των σύνθετων υλικών (σχήμα 14b). Παρόλα αυτά τα FMLs παρουσιάζουν μία αστοχία που καθορίζεται δραστικά είτε από τις ίνες, είτε από το αλουμίνιο. Για το FML, με αστοχία που καθορίζεται από τις ίνες, η πρώτη αστοχία εμφανίζεται στη 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 ρωγή στην εξωτερική στρώση αλουμινίου απέναντι από την πλευρά που εφαρμόζεται η καταπόνηση [40]. Όταν στο αλουμίνιο εμφανιστεί κρίσιμη αστοχία, η ρωγή 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 διεσδυτής πλέον θα διαπεράσει το δοκίμιο.

Οι τυπικές καμπύλες δύναμης ως προς το χρόνο για τα FMLs Arall και Glare φαίνονται στα σχήματα 15 και 16 αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες καμπύλες προέκυψαν από χαμηλής ταχύτητας κρούση ενός 575gr ημισφαιρικού διεσδυτή με ακτίνα καμπυλότητας άκρου 7.5mm, πάνω σε τετράγωνα πακτωμένα δοκίμια διαστάσεων 100mmX100mm. Οι ενέργειες πρόσκρουσης για τα πολυστρωματικά Arall και Glare επιλέχθηκαν να είναι 1.4J και 4J αντίστοιχα [37], [11].



Σχήμα 15. Load Vs time για ARALL.



Σχήμα 16. Load Vs time για GLARE.

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 διεσδυτή 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 15, υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της καμπύλης που οφείλονται στις ταλαντώσεις του δοκιμίου, και στην εσωτερικές αστοχίες που λαμβάνουν χώρα. Μετά το σημείο της μέγιστης δύναμης εκλείπει η υψηλόσυχνη ταλάντωση. Συνεπώς, σε FMLs όπως το Arall, που έγκειται στις περιπτώσεις αστοχιών λόγω «κρίσιμότητας 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 15.

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 16 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].

5.1.2 Κριτήρια εκτίμησης κρουστικής αστοχίας.

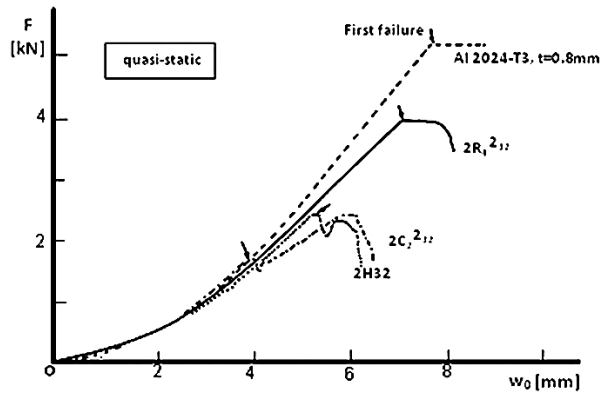
Με σκοπό την αντικειμενικότητα, στην περιγραφή και στην σύγκριση των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζονται από την κρουστική συμπεριφορά των FMLs, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια :

- 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 περίξ της αστοχούσας περιοχής).

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 17 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 Caral 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.

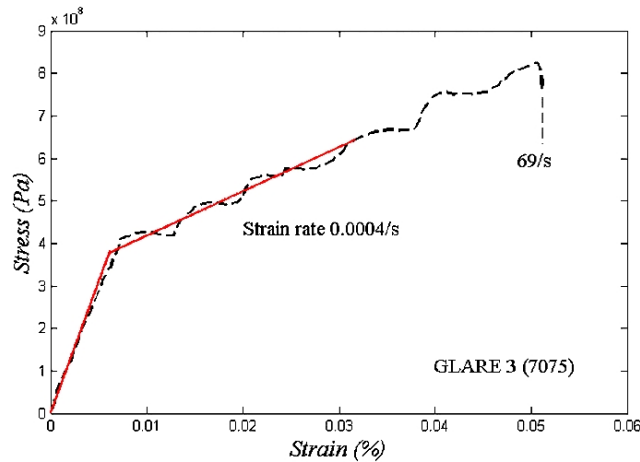


Σχήμα 17. Επίδραση του τύπου ινών στις στατικές καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης (2H32 : Arall, 2C32 : Caral, 2R32 : Glare).

Γενικά τα προεμποτισμένα στρώματα γυαλιού-εποξικής ρητίνης που υπάρχουν στο Glare, είναι ισχυρότερα και περισσότερο ελατά από τα αντίστοιχα αραμιδιού-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 17 από την οπτική των κριτηρίων κρουστικής αστοχίας, το Caral 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 Caral 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 18 παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες τάσεων συναρτήσει του χρόνου, σε διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική του ιδιότητα, οδηγεί και στην αυξημένη απορρόφηση ενέργειας σε κρούσεις μεγάλων ταχυτήτων.



Σχήμα 18. Σχέση ρυθμού παραμόρφωσης-χρόνου σε δοκίμια Glare.

β. Τύπος μετάλλου.

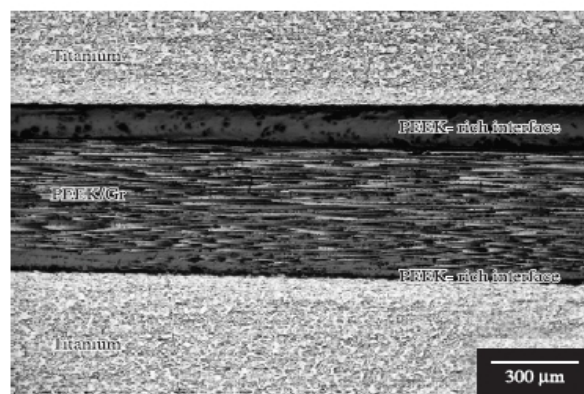
Δύο τύποι κραμάτων μετάλλου αποτελούν τις κύριες επιλογές στις μεταλλικές στρώσεις των FMLs, :

- 2024-T3
- 7075-T6 (ή 7475-T6)

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 είναι 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 7075-T6 (δυσθραυστότητα) σε σχέση με το αντίστοιχο εμβαδό του 2024-T3. Το συγκεκριμένο γεγονός δικαιολογεί την αξιοσημείωτα χαμηλότερη ενέργεια αστοχίας του 7075-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 7075-T6) που η απορροφούμενη ενέργεια οδηγεί γρηγορότερα στη θραύση του, σε σχέση με το Glare2 (με κράμα 2024-T6) 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 (7075-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 μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με χρήση κραμάτων της σειράς 7000.

Τελευταία έχει υπάρξει ενδιαφέρον στη βιβλιογραφία για τη χρήση του τιτανίου [45],[46], ως εναλλακτικού των μεταλλικών στρώσεων των FMLs. Στην εικόνα 5 φαίνεται στο μικροσκόπιο η διαστρωμάτωση ενός πολυστρωματικού τιτανίου με ίνες γραφίτη. Το τιτάνιο προδίδει 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 ολκιμότητα 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.



Εικόνα 5. Λεπτομέρεια σε μικροσκόπιο διαστρωμάτωσης FML τιτανίου.

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].

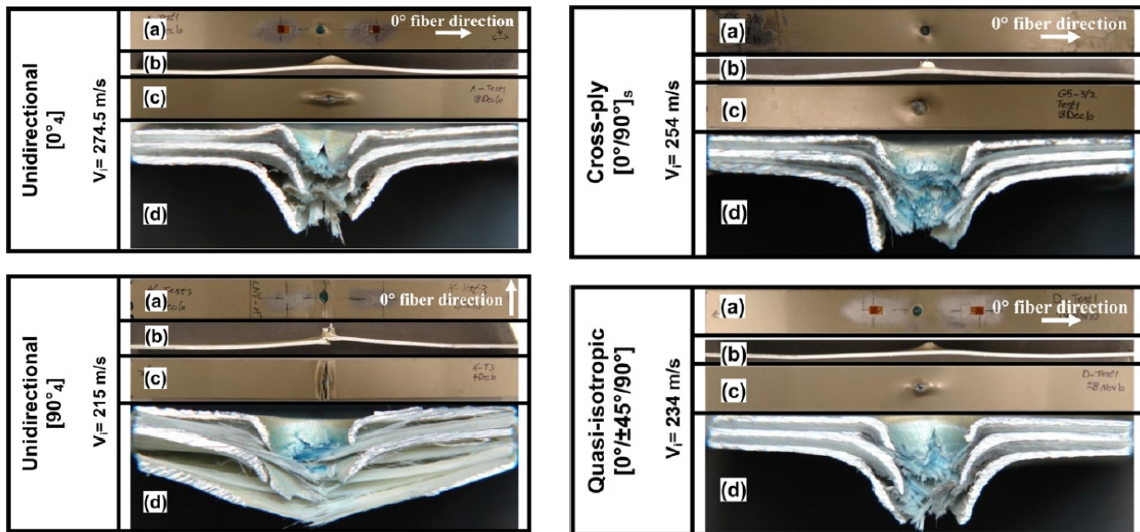
Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των πολυστρωματικών που εμπεριέχουν στη μήτρα τους πολυπροπυλένιο είναι η αυξημένη κατά 50% της βαλλιστικής τους αντοχής, σε σύγκριση με το μονολιθικό κράμα αλουμινίου, το οποίο είναι και 35% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του Glare5 σύμφωνα με τον Hoo Fat [38]. Η πολύ καλή αυτή 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 Caral, 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 υψηλών ταχυτήτων, 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]. Στην εικόνα 6 φαίνονται οι διαφορετικές αστοχίες από κρούσεις πάνω σε δοκίμια Glare5 3/2 με διαφορετικό προσανατολισμό στρώσεων.



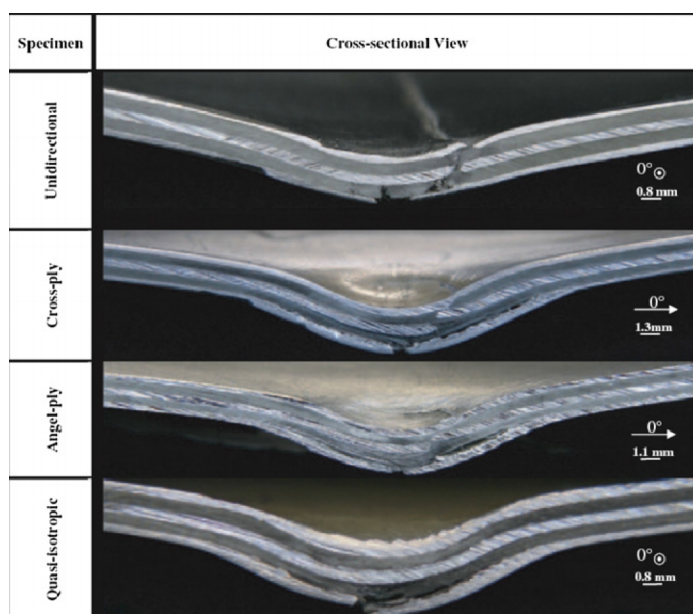
Εικόνα 6. Αστοχίες που προκαλούνται από κρούσεις επάνω σε δοκίμια Glare5 3/2 με διαφορετικό προσανατολισμό στρώσεων, όπου, α.επιφάνεια που δέχεται την κρούση, β. πλάγια όψη, γ.κάτω επιφάνεια,δ.τομή.

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 ισοτροπική 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)₄. Σημειώνεται ότι οι μονοκατευθυντήριες στρώσεις ινών (unidirectional-UD) παρουσιάζουν την χειρότερη συμπεριφορά στα κρουστικές καταπονήσεις, αλλά και στην καθυστέρηση ανάπτυξης ρωγμών [54]. Σε αυτά τα αποτελέσματα κατέληξε και η μελέτη του Seyed Yaghobi [55] που εστιάστηκε στη συμπεριφορά των

γεωμετρικών επιπτώσεων δοκιμών Glare5 από κρούσεις χαμηλής ταχύτητας. Οι διαφορετικές επιπτώσεις αναλόγως της περίπτωσης φαίνονται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7. Τομές σε τετράγωνα δοκίμια Glare5-3/2, διαφορετικών δομών, υπό την ενέργεια κρούσης 40J.

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 ρωγή 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.

Κατά τη διάρκεια προσομοίωσης της στατικής καταπόνησης, η δυσκαμψία, η μέγιστη αντοχή και η αντίσταση σε διάτρηση, αυξάνεται με την αύξηση του πάχους των στρώσεων του συνθέτου στο ενδιάμεσο των μεταλλικών στρώσεων. 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 Abdolah & Cantwell [51] η ύπαρξη σύνθετου πάχους 6.5mm σύνθετου 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 σύνθετου. 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.

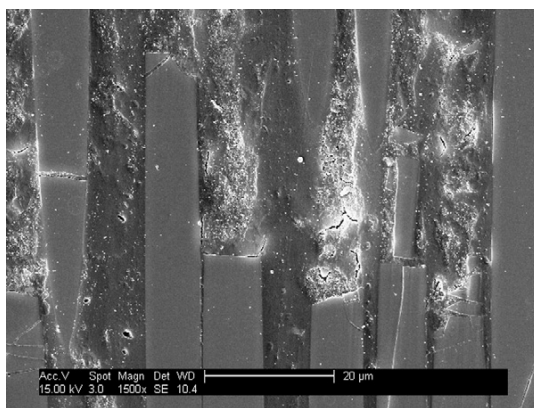
Για δεδομένο πάχος FML, παχύτερες στρώσεις αλουμινίου προσφέρουν ανώτερη αντοχή σε σχέση με τα αντίστοιχα πολυστρωματικά που διαθέτουν λεπτές στρώσεις. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχτεί [51] ότι υπάρχει ένα κατώφλι στο πάχος των FMLs, άνω του οποίου η κανονικοποιημένη ενέργεια διάτρησης (δηλ ο λόγος της ενέργειας 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 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'' κατέληξε 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 κρούσεις 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 στην εικόνα 8.



Εικόνα 8. Μικρογραφία SEM που φαίνονται οι θραύσεις ινών και μήτρας του δεύτερου στρώματος προεμποτισμένων ινών γυαλιού σε Glare, υπό κρούση 40J ενέργειας.

5.3 Παράμετροι κρούσης που σχετίζονται με τις συνθήκες κρούσης.

Οι συνθήκες μέσα στις οποίες πραγματοποιείται η εκάστοτε κρούση διαδραματίζει 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 τετράγωνα 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 : $\lambda^2, \lambda, 1, 1, \lambda^{-1}$, όπου το λ 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 λ : $1/4, 1/2, 3/4$ 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[62].

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 πέριξ 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 διακρίνονταν 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 επιμήκες-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, ξεκινάει 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 διαμερή 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.

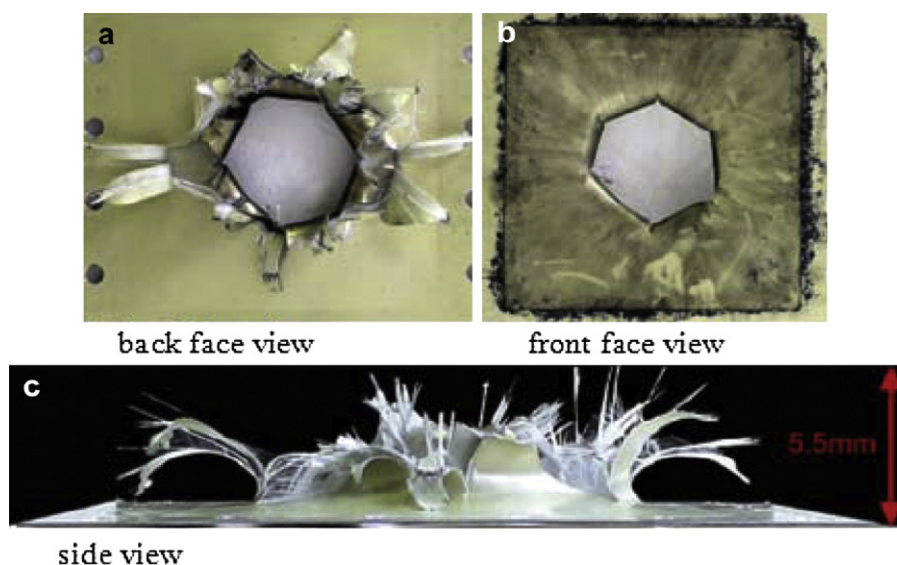
- Σύμφωνα με δημοσιευμένη μελέτη [38], έχει επιτευχθεί η ποσοτικοποίηση μέσω αναλυτικών μοντέλων, της κατανομής της απορροφούμενης κρουστικής ενέργειας από κρούσεις υψηλών ταχυτήτων πάνω σε δοκίμια Glare. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το 84%-92% του συνόλου της ενέργειας που απορροφάται είναι 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 σύνθετου 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.

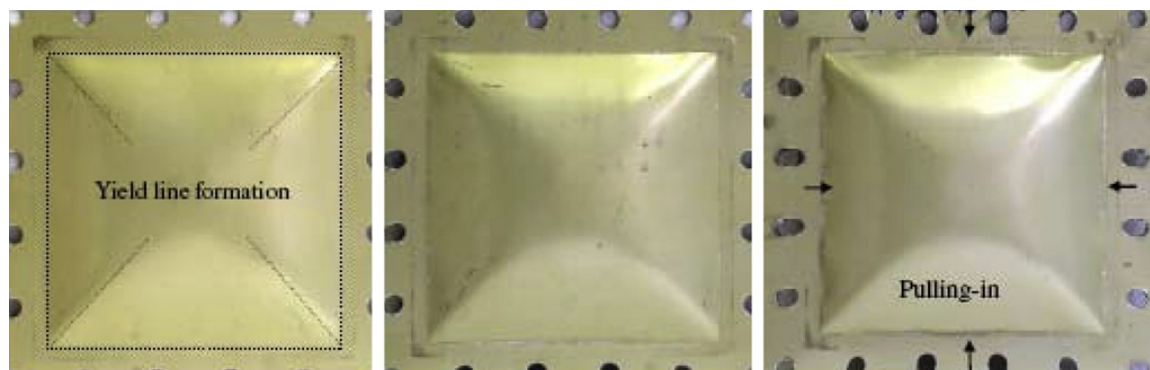
δ3. Καταπόνηση εκρηκτικού τύπου.

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 στις εικόνες 9a,b&c.



Εικόνες 9a,b&c. Φωτογραφίες Glare 3 υπό τοπική κρούση εκρηκτικού τύπου.

Στις περιπτώσεις ομοιόμορφης καταπόνησης κρούσεων εκρηκτικού τύπου σε δοκίμια επίσης Glare3, παρατηρήθηκε συμπεριφορά παρόμοια με αυτή που παρουσιάζουν τα φύλλα μονολιθικών μετάλλων, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. στις οποίες είναι εμφανής ο σχηματισμός γραμμών διαρροής, αλλά και η μεγάλη πλαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 10. Πάνελ Glare3, υπό ομοιόμορφης κατανομής κρούση εκρηκτικού τύπου.

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].

6. Προσομοίωση της κρουστικής συμπεριφοράς των FMLs.

Μία συστηματική βήμα προς βήμα προσέγγιση προσομοίωσης της κρουστικής συμπεριφοράς των FML κατασκευών, 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.

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 συναρτήσεως 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 αποκόλλσεων 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.

6.2 Κρούση χαμηλής ταχύτητας.

Με 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 και ένα μη γραμμικό ελαστοπλαστικής κρούσης μοντέλο για χαμηλών ταχυτήτων κρουστικών καταπονήσεων σε FMLs.

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 :

$$T_{plate} + T_{impactor} + U_{plate} + E_{impactor} + E_{plate} = 1/2 m_p V_0^2, \text{ όπου :}$$

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 σ_y και την κράτυνση α . 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 Carugno [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 γραμμικά 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.

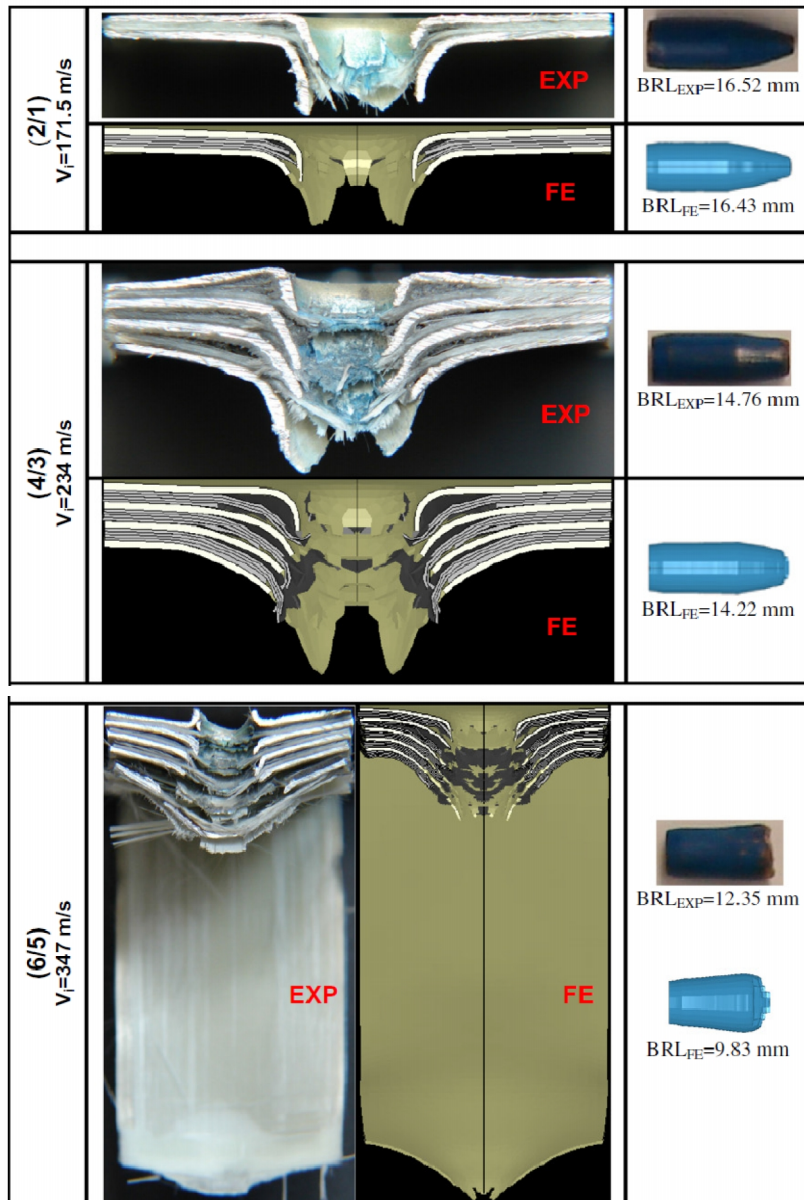
6.3 Κρούση υψηλών ταχυτήτων.

Μία από τις ελάχιστες αναλυτικές έρευνες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και αφορά κρούσεις υψηλών ταχυτήτων είναι των Hoo Fat [38]. Στη συγκεκριμένη εργασία οι εξισώσεις κίνησης έχουν γραφτεί 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.

7. Μοντελοποίηση κρούσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

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.

Μία αρκετά ενδιαφέρουσα μοντελοποίηση βαλλιστικής καταπόνησης Glare, με πεπερασμένα στοιχεία έγινε από τους Yaghoubi & Liaw [71]. Στην υπόψη μελέτη οι κρούσεις πραγματοποιήθηκαν σε λεπτούς δοκούς από Glare5 με διαφορετικό πάχος, ενώ η μοντελοποίηση και η ανάλυση έγινε μέσω του λογισμικού LS-Dyna. Στην εικόνα 11 φαίνεται η πολύ καλή σύγκλιση των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων των κρούσεων.



Εικόνα 11. 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

1. Γενικά.

Το μεταλλικό-πολύστρωτο υλικό GLARE αποτελεί ένα εξαιρετικό κατασκευαστικό υλικό με πολύ καλές ιδιότητες, (όπως αναλύθηκαν στο 1^ο κεφάλαιο), που θα μπορούσαν να συνοψιστούν στα ακόλουθα :

- μεγάλη αντοχή σε κόπωση,
- χαμηλό ειδικό βάρος,
- εξαιρετική ανθεκτικότητα στην υγρασία και σε διαβρωτικά περιβάλλοντα,
- μεγάλη αντοχή σε συνθήκες φλόγας αλλά και σε εκρήξεις,
- πολύ καλή κρουστική συμπεριφορά.

Ο καταλυτικός παράγοντας που συντελεί ώστε το GLARE να διαθέτει τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, είναι ο μελετημένος συνδυασμός μετάλλου και συμβατικών στρώσεων συνθέτου υλικού.

Η συμπεριφορά του GLARE σε κρουστικές καταπονήσεις αποτελεί χαρακτηριστικό ζωτικής σημασίας σε αεροναυπηγικές εφαρμογές, επειδή κρουστικού τύπου ζημιά (η οποία δύναται να μειώσει δραματικά την αξιοπιστία της αεροπορικής κατασκευής), μπορεί να προκληθεί από πλήθος διαφόρων αιτιών κατά τις εργασίες συντήρησης και εξυπηρέτησης των αεροσκαφών. Το GLARE ως υλικό που εξ' αρχής σχεδιάστηκε για χρήση σε αεροναυπηγικές κατασκευές, διαθέτει πολύ καλύτερη κρουστική απόκριση σε σχέση με τα συμβατικά σύνθετα υλικά και τα κράματα αλουμινίου [98], [14]. Η συγκεκριμένη αυτή συμπεριφορά αποδίδεται στο φαινόμενο ενίσχυσης της αντοχής που συσχετίζεται με τον μεγάλο ρυθμό παραμόρφωσης που παρουσιάζουν οι ίνες γυαλιού κατά τη φάση της κρούσης, αλλά και στην σχετικά μεγάλη παραμόρφωση αστοχίας τους [41],[99].

2. Αντικειμενικός σκοπός εργασίας.

Η κατανόηση σε βάθος, της κρουστικής συμπεριφοράς των κατασκευών GLARE είναι βασικής σημασίας, και ως εκ τούτου ένας σημαντικός αριθμός μελετητών και επιστημόνων έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο φαινόμενο [73],[36],[11],[38],[88],[42],[69],[76],[96]. Οι υπόψη μελέτες εστιάζουν στην απόκριση του GLARE όσον αφορά σε :

- κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων,
- κρούσεις υψηλών ταχυτήτων,
- βαλλιστικές κρούσεις.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς λεπτών, κυκλικών, πακτωμένων πλακών GLARE που υπόκεινται σε κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων. Οι χαμηλής ταχύτητας κρούσεις, όσον αφορά τις αεροπορικές κατασκευές, αντιπροσωπεύουν τις ζημιές που δύναται να προκληθούν από τα διάφορα οχήματα εξυπηρέτησης των αεροσκαφών, από τα κοντέινερ φόρτωσης καθώς και από την ακούσια πτώση εργαλείων κατά τη διάρκεια τεχνικών εργασιών συντήρησης [11].

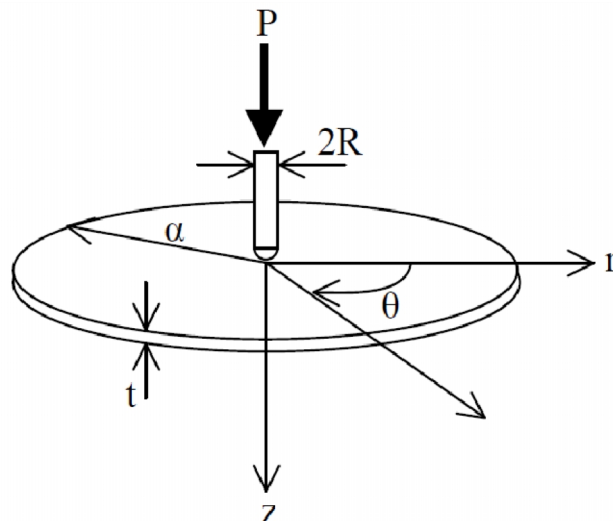
Μία τυπική μέθοδος πραγματοποίησης πειραμάτων μελέτης της συμπεριφοράς GLARE σε κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων (η οποία τυγχάνει ευρείας αποδοχής) είναι η εφαρμογή των κρουστικών φορτίων σε κυκλικές, πακτωμένες, λεπτές πλάκες GLARE, χρησιμοποιώντας κρουστική συσκευή ελεύθερης πτώσης βάρους, εξοπλισμένη με ημισφαιρικό διεισδυτή [4],[11],[72]. Συνεπώς υιοθετώντας την ανωτέρω μορφή πειραματικής μεθόδου, τα αποτελέσματα των τεστ μπορούν με αξιοπιστία να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των θεωρητικών μελετών (όπως αυτή που θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου) εξάγοντας με αυτόν τον τρόπο πολύτιμα πρακτικά συμπεράσματα.

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να προβλέψει, χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις, αλλά και μέσω της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (με χρήση του εμπορικού προγράμματος LS-Dyna/ANSYS) την δυναμική απόκριση λεπτών, πακτωμένων, κυκλικών πλακών GLARE, που υπόκεινται σε κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων από ένα κάθετο ημισφαιρικού σχήματος βλήμα. Οι αναλυτικές σχέσεις εφαρμόζονται σε τρεις διαφορετικές ακτίνες δοκιμίων αποτελούμενα το κάθε ένα από τα παρακάτω υλικά GLARE :

- Glare2A-4/3-0.238
- Glare2A-4/3-0.256
- Glare2A-3/2-0.4
- Glare3-3/2-0.4
- Glare4-3/2-0.317
- Glare4-3/2-0.342
- Glare5-3/2-0.283
- Glare5-3/2-0.233

3. Καθορισμός του προβλήματος.

Θεωρούμε μία λεπτή πακτωμένη κυκλική πλάκα υλικού GLARE με ακτίνα a και πάχος h όπως φαίνεται στην εικόνα 1. Στο κέντρο της πλάκας προσκρούει βλήμα μάζας M_0 και αρχικής κινητικής ενέργειας E_k . Επισημαίνεται ότι θεωρείται μεγάλη μάζα βλήματος επειδή τα διάφορα τεστ κρουστικής αντοχής των σύνθετων υλικών, εφαρμόζονται συμβατικά χρησιμοποιώντας μικρά δοκίμια με μεγάλης μάζας διεισδυτές [90]. Συνεπώς η αναλυτική μοντελοποίηση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν έγκυρη όσον αφορά μικρής μάζας κρούσεις, οι οποίες παρουσιάζονται όταν η μάζα του βλήματος είναι μικρότερη του 25% της μάζας της μεγαλύτερης πιθανής περιοχής για την οποία τα κύματα δεν παρεμβάλλονται από το σύνορο της πλάκας [90],[101]. Το βλήμα διαθέτει ημισφαιρικό σχήμα ακτίνας καμπυλότητας R . Ο λόγος a/h θεωρείται υψηλός έτσι ώστε η διατμητική παραμόρφωση καθώς και η τοπική αστοχία λόγω διείσδυσης να θεωρούνται αμελητέες.



Εικόνα 1. Γεωμετρία του προβλήματος κρούσης

Η πλάκα GLARE πακτώνεται περιμετρικά στο σύνορό της. Καθώς το βλήμα προχωρά και διεισδύει στην πλάκα, το φορτίο P λόγω της ολικής παραμόρφωσης της πλάκας αλλά και η αντίστοιχη κεντρική παραμόρφωση της πλάκας, αυξάνονται, ενώ αντίθετα η ταχύτητα του βλήματος μειώνεται μέχρι το σημείο όπου η πλάκα φτάνει στη μέγιστη παραμόρφωση. Σε αυτό το σημείο εξ' αιτίας της ελαστικής παραμορφωσιακής ενέργειας των προεμποτισμένων στρωμάτων συνθέτου, τα οποία έχουν υποστεί τάνυση κατά τη φάση της φόρτισης, καθώς και των στρωμάτων αλουμινίου, η πλάκα ξεκινάει να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση έως ότου το φορτίο κρούσης P να μηδενιστεί.

Οι διαφορικές εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν το ανωτέρω φυσικό φαινόμενο έχουν επιλυθεί στη δημοσίευση [98]. Μία βασική υπόθεση που γίνεται

στην υπόψη δημοσίευση είναι ότι η αρχική κινητική ενέργεια του βλήματος είναι αρκετά υψηλή ώστε να είναι ικανή να προκαλέσει μεγάλες παραμορφώσεις στην πλάκα του GLARE, αλλά δεν είναι υψηλότερη του ενεργειακού επιπέδου που προκαλεί την πρώτη αστοχία στις στρώσεις ιών γυαλιού και εποξικής ρητίνης λόγω της θραύσης εφελκυσμού των ιών. Ένα συντηρητικό μέγιστο αρχικό όριο κινητικής ενέργειας του βλήματος ώστε να αποφευχθεί το σημείο πρώτης αστοχίας των στρώσεων του συνθέτου μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη δημοσίευση [96]. Μία μοντελοποίηση ελατηρίου-μάζας χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να προσομοιάσει την κρούση χαμηλής ταχύτητας σε τρία στάδια.

Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, το βλήμα ξεκινάει να παραμορφώνει την πλάκα μέχρι το σημείο που παρουσιάζεται εσωτερική αστοχία λόγω αποκολλήσεων που λαμβάνουν χώρα στις διεπιφάνειες των προεμποτισμένων στρώσεων. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρώτο στάδιο κρούσης είναι [96] :

$$(M_o + m_e)\ddot{w}_o + K_p w_o + K_{el} w_o^3 = 0 \quad (1)$$

Όπου m_e είναι η δραστική μάζα της πλάκας που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$m_e = \frac{a^2(3\pi^2 - 28)p_{av}h}{2\pi} \quad (2)$$

και p_{av} είναι η μέση πυκνότητα μάζας της πλάκας Glare.

Οι συντελεστές K_p και K_{el} προκύπτουν ως ακολούθως [26] :

$$K_p = 0.576N_x + 0.576N_y + 0.734N_{xy} \quad (3)$$

$$K_{el} = [0.62A_{11} + 0.62A_{22} + 0.412(A_{12} + 2A_{66})] \frac{1}{\alpha^2}, \quad (4)$$

Οι συνεπίπεδες δυνάμεις N_x , N_y και N_{xy} των στρώσεων του αλουμινίου είναι :

$$N_x = N_y = m\sigma_o t_{Al}, \quad N_{xy} = m \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} t_{Al}, \quad (5)$$

όπου m είναι ο αριθμός των στρώσεων αλουμινίου, σ_o είναι η τάση διαρροής του αλουμινίου, και t_{al} είναι το πάχος εκάστου στρώματος αλουμινίου. A_{ij} είναι οι εφελκυστικές ακαμψίες του συνθέτου.

Δεδομένου ότι η πλάκα είναι αρχικά απαραμόρφωτη και η ταχύτητά της στο σημείο πρόσκρουσης του βλήματος ισούται με την αρχική ταχύτητα v του βλήματος, προκύπτουν οι ακόλουθες αρχικές συνθήκες :

$$w_o(0) = 0 \quad \text{και} \quad \dot{w}_o(0) = v, \quad (6)$$

Η αρχική ταχύτητα του βλήματος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{M_o}} \quad (7)$$

Το δεύτερο στάδιο της κρούσης ξεκινάει μετά το σημείο εμφάνισης αποκόλλησης των στρώσεων, και ολοκληρώνεται στη θέση της μέγιστης παραμόρφωσης της πλάκας. Η διαφορική εξίσωση (1) ισχύει και στο δεύτερο στάδιο κρούσης ως έχει. Δεδομένου όμως τώρα ότι η πλάκα είναι αρχικώς παραμορφωμένη και έχει κάποια ταχύτητα στο σημείο πρόσκρουσης του βλήματος, οι νέες αρχικές συνθήκες διαμορφώνονται πλέον ως εξής :

$$w_o(0) = w_o^d \quad \text{και} \quad \dot{w}_o(0) = \dot{w}_{o2} \quad (8)$$

όπου w_o^d είναι η κεντρική μετατόπιση της πλάκας GLARE όπου λαμβάνει χώρα η αποκόλληση των προεμποτισμένων στρώσεων του συνθέτου εξαιτίας της κρούσης, και \dot{w}_{o2} είναι η ταχύτητα του σημείου της πλάκας που έρχεται σε επαφή με την αιχμή του βλήματος μετά του φαινομένου της αποκόλλησης των στρώσεων.

Το τρίτο στάδιο κρούσης ξεκινάει από το σημείο της μέγιστης μετατόπισης της πλάκας και ολοκληρώνεται μόλις το φθίνον κρουστικό φορτίο μηδενιστεί. Η διαφορική εξίσωση κίνησης που περιγράφει αυτό το τελικό στάδιο είναι [96] :

$$(M_o + m_e)\dot{w}_o + 2K_p w_o + K_{el} w_o^3 - K_p w_o^{\max} = 0, \quad (9)$$

όπου w_o^{\max} είναι η μέγιστη μετατόπιση του κεντρικού σημείου της πλάκας εξαιτίας της κρούσης. Δεδομένου ότι η πλάκα έχει αρχικά μηδενική ταχύτητα στη θέση της μέγιστης παραμόρφωσης, οι αντίστοιχες αρχικές συνθήκες λαμβάνουν τη μορφή :

$$w_o(0) = w_o^{\max}, \quad \dot{w}_o(0) = 0 \quad (10)$$

Οι διαφορικές εξισώσεις (1) και (9) σε συνδυασμό με τις αρχικές συνθήκες (6), (8) και (10) διαμορφώνουν τρία διακριτά προβλήματα αρχικών τιμών τα οποία αντικατοπτρίζουν το φυσικό φαινόμενο της κρούσης. Τα συγκεκριμένα προβλήματα αρχικών τιμών επιλύονται με αναλυτικό τρόπο. Αρχικά προσδιορίζονται οι άγνωστες τιμές w_o^d , \dot{w}_{o2} και w_o^{\max} των σχέσεων (8) και (10) και στη συνέχεια επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις κίνησης. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν καταστρώνονται οι καμπύλες συσχέτισης των μεγεθών : (\dot{w}_o, w_o) , (E_k, w_o) , (P, w_o) , (w_o, t) , (\dot{w}_o, t) , (E_k, t) και (P, t) .

4. Μοντελοποίηση αναλυτικής μεθόδου.

Οι διαφορικές εξισώσεις κίνησης (1) και (9) είναι μη γραμμικές δευτέρας τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες μπορούν να γραφτούν στη μορφή :

$$\dot{w}_o = \gamma + \alpha w_o + \beta w_o^3, \quad (11)$$

όπου α , β και γ είναι γνωστοί σταθεροί συντελεστές.

Η εξίσωση (11) είναι μία εξίσωση Duffing. Οι εξισώσεις Duffing περιγράφουν πλήθος φυσικών φαινομένων, όπως π.χ. την κίνηση μη γραμμικών ταλαντωτών, την κίνηση ελατηριωτών εκκρεμών, την δυναμική συμπεριφορά ηλεκτρικών κυκλωμάτων κτλ. Οι εξισώσεις Duffing δεν έχουν ακριβή συμβολική λύση [89], εξαιτίας της ύπαρξης του μη γραμμικού όρου βw_o^3 . Στο πρόβλημά μας χρησιμοποιώντας κατάλληλη αλλαγή μεταβλητών, η ταχύτητα \dot{w}_o του μηχανικού συστήματος θα προσδιοριστεί αναλυτικά συναρτήσει της θέσης w_o .

Για δεδομένη γνωστή ταχύτητα $\dot{w}_o = \dot{w}_o(w_o)$, η άγνωστη κινητική ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $E_k = (1/2)M_o(\dot{w}_o)^2$. Επιπλέον το κρουστικό φορτίο μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις $P = P(w_o)$ από την αναφορά [96]. Έπειτα δύνανται να προβλεφθούν οι άγνωστες προϊστορίες των μεγεθών w_o , \dot{w}_o , E_k και P . Στην παράγραφο 3.1 επιλύεται η διαφορική εξίσωση (11), ενώ στην παράγραφο 3.2 υπολογίζονται οι άγνωστες τιμές των w_o^d , \dot{w}_{o2} και w_o^{\max} των σχέσεων (8) και (10).

4.1 Διαφορική εξίσωση κίνησης.

Με σκοπό να αποκομίσουμε μία αναλυτική έκφραση ώστε να προβλέψουμε την ταχύτητα του μηχανικού συστήματος θέτουμε $\dot{w}_o = \frac{dw_o}{dt} = V_o$ και βρίσκουμε την δεύτερη παράγωγο. Έπειτα χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας, και συνδυάζοντας τις σχέσεις που προκύπτουν αντικαθιστούμε στην διαφορική (11) και προκύπτει η σχέση :

$$V_o \frac{dV_o}{dw_o} = \gamma + \alpha w_o + \beta w_o^3 \quad (12)$$

Η ανωτέρω εξίσωση (12) είναι διαφορική χωριστών μεταβλητών και ολοκληρώνοντας έχουμε :

$$\frac{V_o^2}{2} = c_1 + \gamma w_o + \frac{\alpha}{2} w_o^2 + \frac{\beta}{4} w_o^4 \quad (13)$$

Όπου c_1 είναι η σταθερά ολοκλήρωσης. Η εξίσωση (13) μπορεί να γραφτεί και στη μορφή :

$$V_o = \pm \sqrt{c + 2\gamma w_o + a w_o^2 + \frac{\beta}{2} w_o^4}, \quad (14)$$

όπου $c = 2c_1$ και $c + 2\gamma w_o + a w_o^2 + \frac{\beta}{2} w_o^4 \geq 0$.

Από την εξίσωση (14) η ταχύτητα του συστήματος $V_o = \dot{w}_o$ εκφράζεται ως συνάρτηση της θέσης w_o .

Το χρονικό διάστημα Δt που απαιτείται για το βλήμα να μετακινηθεί από τη θέση w_o^1 στη θέση w_o^2 , μπορεί να υπολογιστεί από το ολοκλήρωμα :

$$\Delta t = \int_{w_o^1}^{w_o^2} \frac{dw_o}{V_o}, \quad (15)$$

Ενώ ο συνδυασμός των σχέσεων (14) και (15) οδηγεί στη σχέση :

$$\Delta t = \int_{w_o^1}^{w_o^2} \frac{dw_o}{\pm \sqrt{c + 2\gamma w_o + a w_o^2 + \frac{\beta}{2} w_o^4}}, \quad (16)$$

Η κινητική ενέργεια του βλήματος μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση της θέσης w_o χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση :

$$E_k = \frac{1}{2} M_o (\dot{w}_o(t))^2, \quad (17)$$

Ενώ από το συνδυασμό των (14) και (17) προκύπτει :

$$E_k = M_o \left(\frac{c}{2} + \gamma w_o + \frac{a}{2} w_o^2 + \frac{\beta}{4} w_o^4 \right), \quad (18)$$

Για την περίπτωση μεγάλων παραμορφώσεων της πλάκας, και όσον αφορά το κρουστικό φορτίο κατά τη διάρκεια της φόρτισης δίδεται από [96] :

$$P_L(w_o) = K_p w_o + K_{el} w_o^3, \quad \text{όπου δηλ. } 0 \leq w_o \leq w_o^{\max} \quad (19)$$

Αντίστοιχα για το στάδιο της αποφόρτισης ισχύει [26] :

$$P_U(w_o) = K_p (2w_o - w_o^{\max}) + K_{el} w_o^3, \quad (20)$$

όπου $w_o^f \leq w_o \leq w_o^{\max}$, και w_o^f είναι η θέση μηδενικού κρουστικού φορτίου.

Από τις εξισώσεις (14), (18), (19) και (20) προκύπτουν οι άγνωστες καμπύλες για τα ζεύγη μεγεθών (\dot{w}_o, w_o) , (E_k, w_o) και (P, w_o) . Αντίστοιχα από την εξίσωση (16) δύναται να υπολογιστεί η καμπύλη (w_o, t) χρησιμοποιώντας αριθμητική ολοκλήρωση. Κατόπιν την εκτέλεση των ανωτέρω, οι καμπύλες (\dot{w}_o, t) , (E_k, t) και (P, t) είναι πλέον εφικτό να προσδιοριστούν.

4.2 Αρχικές συνθήκες.

Η πρώτη άγνωστη αρχική συνθήκη που πρέπει να υπολογιστεί είναι η θέση w_o^d όπου λαμβάνει χώρα η αποκόλληση σύμφωνα με τη σχέση (8). Η αποκόλληση ανάμεσα στις στρώσεις ινών γυαλιού και εποξικής ρητίνης του συνθέτου θα πραγματοποιηθεί όταν το συνεχώς αυξανόμενο κρουστικό φορτίο P_L κατά τη φάση της φόρτισης, προσεγγίσει μία κρίσιμη τιμή αποκόλλησης P_d . Στην περίπτωση που εξαιτίας μιας χαμηλής αρχικής κινητικής ενέργειας το P_L δεν φτάσει την τιμή του P_d ακόμα και στη θέση της μέγιστης παραμόρφωσης της πλάκας, τότε δεν πρόκειται να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο της αποκόλλησης. Στην υπόψη περίπτωση όλη η αρχική κινητική ενέργεια του βλήματος θα καταναλωθεί στην παραμόρφωση μόνο της πλάκας GLARE. Η κρίσιμη τιμή του φορτίου αποκόλλησης υπολογίζεται από τη σχέση [38],[88],[86] :

$$P_d = \sqrt{\frac{8\pi^2 E_{av} h^3 G_{IIC}}{9(1-\nu^2)}} \quad (21)$$

Όπου το ν είναι ο λόγος Poisson, E_{av} είναι η μέση δυσκαμψία του πάνελ, και G_{IIC} είναι η ενδοστρωματική διατμητική αντοχή θραύσης mode II του συνθέτου γυαλιού-εποξικής ρητίνης.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (19) η συνθήκη αποκόλλησης είναι :

$$K_p w_o^d + K_{el} w_o^{d3} = P_d \quad (22)$$

Στην οποία το w_o^d είναι η άγνωστη θέση που συμβαίνει η αποκόλληση.

Η μοναδική πραγματική ρίζα της ανωτέρω αλγεβρικής εξίσωσης τρίτου βαθμού προκύπτει ότι είναι [98]:

$$w_o^d = \frac{\lambda}{6K_{el}} - \frac{2K_p}{\lambda} \quad (23)$$

$$\text{Όπου } \lambda = \sqrt[3]{108P_d K_{el}^2 + 12\sqrt{3}K_{el}^2 \sqrt{\frac{4K_p^3 + 27P_d^2 K_{el}}{K_{el}}}} \quad (24)$$

Σύμφωνα με την σχέση (8), η δεύτερη άγνωστη αρχική συνθήκη είναι η ταχύτητα \dot{w}_{o2} του μηχανικού συστήματος μετά τη στιγμή της αποκόλλησης των προεμποτισμένων στρώσεων. Η χρονική στιγμή που συμβαίνει η αποκόλληση συμβολίζεται με t_d και συμπίπτει με το τέλος του πρώτου σταδίου κρούσης.

Τη χρονική στιγμή t_d θεωρείται ότι παρουσιάζεται μια απότομη πτώση της κινητικής ενέργειας του βλήματος που ισούται με την απαιτούμενη ενέργεια αποκόλλησης [38] η οποία μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$E_{del} = \frac{2h\pi E_{av} G_{ILC}^2}{9(1-\nu^2)ILSS^2} \quad (25)$$

Όπου $ILSS$ είναι η διατμητική αντοχή ανάμεσα στις στρώσεις του συνθέτου.

Η καινούργια ταχύτητα του μηχανικού συστήματος, μετά την αποκόλληση, υπολογίζεται με εφαρμογή του ισοζυγίου ενέργειας :

$$\frac{1}{2}(M_o + m_e)\dot{w}_{o1}^2 - E_{del} = \frac{1}{2}(M_o + m_e)\dot{w}_{o2}^2 \quad (26)$$

Όπου \dot{w}_{o1}^2 και \dot{w}_{o2}^2 είναι οι ταχύτητες του μηχανικού συστήματος πριν και μετά την αποκόλληση αντίστοιχα. Επομένως η ταχύτητα \dot{w}_{o2}^2 προκύπτει ότι είναι :

$$\dot{w}_{o2} = \sqrt{\dot{w}_{o1}^2 - \frac{2E_{del}}{M_o + m_e}} \quad (27)$$

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον υπολογισμό της \dot{w}_{o2}^2 είναι η εύρεση της \dot{w}_{o1}^2 . Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η σχέση (14) για $w_o = w_o^d$, και δεδομένου ότι για το πρώτο στάδιο της κρούσης ισχύει ότι $\gamma=0$ και $c=\nu^2$, προκύπτει η ταχύτητα \dot{w}_{o1}^2 ως:

$$\dot{w}_{o1} = \sqrt{\nu^2 + a w_o^{d2} + \frac{\beta}{2} w_o^{d4}} \quad (28)$$

Έτσι εφόσον είναι γνωστό το w_o^d από τη σχέση (23) μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση (28) η \dot{w}_{o1}^2 , και στη συνέχεια από τη σχέση (27) να υπολογιστεί η \dot{w}_{o2}^2 .

Η τελευταία άγνωστη αρχική συνθήκη είναι η μέγιστη κεντρική μετατόπιση της πλάκας w_o^{\max} λόγω της κρούσης που φαίνεται στη σχέση (10). Σε αυτό το σημείο η

ταχύτητα $V_o = \dot{w}_o$ γίνεται ίση με μηδέν. Από τη σχέση (14) η θέση της μέγιστης μετατόπισης w_o^{\max} είναι η ρίζα της αλγεβρικής εξίσωσης :

$$\frac{\beta}{2} w_o^{\max 4} + \alpha w_o^{\max 2} + c = 0 \quad (29)$$

Η μοναδική αποδεκτή πραγματική ρίζα της ανωτέρω αλγεβρικής εξίσωσης τετάρτου βαθμού προκύπτει ότι είναι [98] :

$$w_o^{\max} = \frac{-1}{\beta} \sqrt{-\alpha\beta - \beta\sqrt{\alpha^2 - 2\beta c}} \quad (30)$$

4.3 Τα στάδια της κρούσης.

Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου της κρούσης οι τιμές των σταθερών συντελεστών της διαφορικής εξίσωσης (11) είναι :

$$a = \frac{-K_p}{M_o + m_e}, \quad \beta = \frac{-K_{el}}{M_o + m_e}, \quad \text{και} \quad \gamma = 0 \quad (31)$$

Η δε ταχύτητα σε αυτό το στάδιο είναι πάντα θετική :

$$V_o = \dot{w}_o > 0 \quad (32)$$

Με σκοπό να προσδιοριστεί η σταθερά ολοκλήρωσης c της εξίσωσης (19), λαμβάνεται υπόψη η δεύτερη αρχική συνθήκη της σχέσης (6), η οποία σε συνδυασμό με την σχέση (19) δίνει ότι :

$$c = v^2 \quad (33)$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων (31), (32) και (33) δίνει την τιμή της ταχύτητας σε όλο το πρώτο στάδιο της κρούσης :

$$\dot{w}_o = \sqrt{v^2 - \frac{K_p w_o^2}{M_o + m_e} - \frac{K_{el} w_o^4}{2(M_o + m_e)}} \quad (34)$$

Η αντίστοιχη κινητική ενέργεια είναι :

$$E_k = \frac{1}{2} M_o \left(v^2 - \frac{K_p w_o^2}{M_o + m_e} - \frac{K_{el} w_o^4}{2(M_o + m_e)} \right) \quad (35)$$

Όσον αφορά το πρώτο στάδιο της κρούσης και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (15) και (34) το χρονικό διάστημα Δt_1 που απαιτείται ώστε το βλήμα να μετακινηθεί

από μία αρχική θέση $w_o^1 = 0$ σε μία δεύτερη αυθαίρετη θέση $w_o^2 \leq w_o^d$ υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση της παρακάτω σχέσης :

$$\Delta t_1 = \int_0^{w_o^2} \frac{dw_o}{\sqrt{v^2 - \frac{K_p w_o^2}{M_o + m_e} - \frac{K_{el} w_o^4}{2(M_o + m_e)}}} \quad (36)$$

Η ολική διάρκεια του πρώτου σταδίου κρούσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης (36) για $w_o^2 = w_o^d$, όπου το w_o^d δίδεται από τη σχέση (23).

Κατά τη διάρκεια του δευτέρου σταδίου της κρούσης, οι συντελεστές της διαφορικής εξίσωσης (11) δίδονται επίσης από την εξίσωση (31). Η ταχύτητα παραμένει θετική, ενώ η σταθερά ολοκλήρωσης c μεταβάλλεται. Η νέα τιμή της σταθεράς c κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου σταδίου προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τις αρχικές συνθήκες της σχέσης (8). Αντικατάσταση των αρχικών συνθηκών στην εξίσωση (14) σε συνδυασμό με τις σχέσεις (27) και (28) οδηγούν στη σχέση :

$$c = \dot{w}_{o2}^2 + \frac{K_p w_o^{d2}}{M_o + m_e} + \frac{K_{el} w_o^{d4}}{2(M_o + m_e)} = v^2 - \frac{2E_{del}}{M_o + m_e} \quad (37)$$

Και εφόσον (όπως έχει αποδειχτεί προηγουμένως) οι ποσότητες K_{el} και K_p είναι θετικές, τότε όπως προκύπτει από την σχέση (37), και η σταθερά c θα είναι ομοίως θετική.

Ο συνδυασμός των σχέσεων (31), (32), (37) και (14) δίνει την ταχύτητα κατά τη διάρκεια του δευτέρου σταδίου ης κρούσης :

$$\dot{w}_o = \sqrt{v^2 - \frac{2E_{del}}{M_o + m_e} - \frac{K_p w_o^2}{M_o + m_e} - \frac{K_{el} w_o^4}{2(M_o + m_e)}} \quad (38)$$

Η αντίστοιχη κινητική ενέργεια είναι :

$$E_k = \frac{1}{2} M_o \left(v^2 - \frac{2E_{del}}{M_o + m_e} - \frac{K_p w_o^2}{M_o + m_e} - \frac{K_{el} w_o^4}{2(M_o + m_e)} \right) \quad (39)$$

Για το δεύτερο στάδιο κρούσης, λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (15) και (38) το χρονικό διάστημα Δt_1 που απαιτείται ώστε το βλήμα να μετακινηθεί από μία αρχική θέση $w_o^1 = w_o^d$ σε μία δεύτερη αυθαίρετη θέση $w_o^2 \leq w_o^{\max}$ υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση της παρακάτω σχέσης :

$$\Delta t_2 = \int_{w_o^d}^{w_o^2} \frac{dw_o}{\sqrt{v^2 - \frac{2E_{del}}{M_o + m_e} - \frac{K_p w_o^2}{M_o + m_e} - \frac{K_{el} w_o^4}{2(M_o + m_e)}}} \quad (40)$$

Η ολική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση του δευτέρου σταδίου της κρούσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (40) για $w_o^2 = w_o^{\max}$ όπου w_o^{\max} δίνεται από την εξίσωση (30). Από την εξίσωση (19) το αντίστοιχο μέγιστο κρουστικό φορτίο προκύπτει ότι είναι :

$$P_L^{\max} = K_p w_o^{\max} + K_{el} w_o^{\max 3} \quad (41)$$

Κατά τη διάρκεια του τρίτου σταδίου της κρούσης οι συντελεστές της διαφορικής εξίσωσης (11) είναι :

$$a = \frac{-2K_p}{M_o + m_e}, \beta = \frac{-K_{el}}{M_o + m_e} \quad \text{και} \quad \gamma = \frac{K_p w_o^{\max}}{M_o + m_e}, \quad (42)$$

Το πρόσημο της ταχύτητας αλλάζει κατά τη φάση του σταδίου της αποφόρτισης :

$$V_o = \dot{w}_o < 0 \quad (43)$$

Οι αρχικές συνθήκες επαναχρησιμοποιούνται ώστε να υπολογιστεί ξανά η τιμή της σταθερά ολοκλήρωσης c , κατά το στάδιο της αποφόρτισης. Η αντικατάσταση των αρχικών συνθηκών της σχέσης (10) στη σχέση (14) δίνει :

$$c = \frac{K_{el} w_o^{\max 4}}{2(M_o + m_e)} \quad (44)$$

Επίσης, εφόσον έχει αποδειχτεί ότι η ποσότητα K_{el} είναι θετική, τότε όπως προκύπτει από την σχέση (47), και η σταθερά c θα είναι ομοίως θετική.

Ο συνδυασμός των σχέσεων (42), (43) και (44) προσδιορίζει την ταχύτητα κατά το τρίτο στάδιο της κρούσης :

$$\dot{w}_o = -\sqrt{\frac{2K_p w_o (w_o^{\max} - w_o) + 0.5K_{el} (w_o^{\max 4} - w_o^4)}{M_o + m_e}} \quad (45)$$

Ενώ η αντίστοιχη κινητική ενέργεια είναι :

$$E_k = \frac{1}{2} M_o \left(\frac{2K_p w_o (w_o^{\max} - w_o) + 0.5K_{el} (w_o^{\max 4} - w_o^4)}{M_o + m_e} \right) \quad (46)$$

Από την εξίσωση (20) η θέση του μηδενικού φορτίου κρούσης w_o^f , όπου το τρίτο στάδιο κρούσης ολοκληρώνεται, είναι η ρίζα της ακόλουθης εξίσωσης :

$$2K_p w_o^f + K_{el} w_o^{f^3} - K_p w_o^{\max} = 0 \quad (47)$$

Όπου w_o^f είναι η άγνωστη θέση της μηδενικής άσκησης φορτίου.

Αποδεικνύεται ότι [97] ότι η εξίσωση (47) έχει μοναδική πραγματική ρίζα η οποία είναι και η μοναδική αποδεκτή λύση της w_o^f . Αυτή η πραγματική ρίζα δίνεται από τη σχέση :

$$w_o^f = \frac{\sqrt[3]{12}}{6K_{el}} \lambda_1 - \frac{K_p \sqrt[3]{144}}{3\lambda_1} \quad (48)$$

Όπου :

$$\lambda_1 = \sqrt[3]{K_p K_{el}^2 \left(9w_o^{\max} + \sqrt{\frac{96K_p + 81K_{el} w_o^{\max^2}}{K_{el}}} \right)} \quad (49)$$

Για το τρίτο στάδιο κρούσης, λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (15) και (45) το χρονικό διάστημα Δt_1 που απαιτείται ώστε το βλήμα να μετακινηθεί από μία αρχική θέση $w_o^1 = w_o^{\max}$ σε μία δεύτερη αυθαίρετη θέση $w_o^2 \geq w_o^f$ υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση της παρακάτω σχέσης :

$$\Delta t_3 = \int_{w_o^{\max}}^{w_o^2} \frac{-dw_o}{\sqrt{\frac{2K_p w_o (w_o^{\max} - w_o) + 0.5K_{el} (w_o^{\max^4} - w_o^4)}{M_o + m_e}}} \quad (50)$$

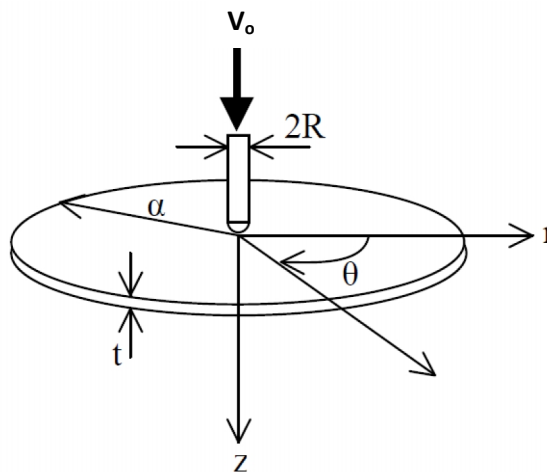
Η ολική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση του δευτέρου σταδίου της κρούσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (50) για $w_o^2 = w_o^f$ όπου w_o^f δίνεται από την εξίσωση (48). Αθροίζοντας τη χρονική διάρκεια του πρώτου και του δεύτερου σταδίου της κρούσης προκύπτει η ολική διάρκεια της φόρτισης. Η ολική διάρκεια της κρούσης υπολογίζεται στη συνέχεια αθροίζοντας τα χρονικά διαστήματα της φόρτισης και της αποφόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

1. Γεωμετρία προβλήματος – Ιδιότητες υλικών.

Στο σχήμα 1. εικονίζεται η γεωμετρία της διάταξης κρούσης που μελετήθηκε. Ειδικότερα, σε κάθε περίπτωση κρούσης θεωρείται μία λεπτή πακτωμένη κυκλική πλάκα υλικού GLARE στο κέντρο της οποίας προσκρούει βλήμα μάζας $M_0=6.29\text{kg}$, αρχικής ταχύτητας $v_0=2.03\text{m/sec}$, και κινητικής ενέργειας $E_k=13\text{j}$. Το βλήμα διαθέτει ημισφαιρικό σχήμα ακτίνας καμπυλότητας $R=6.35\text{mm}$. Η ακτίνα της πλάκας κυμαίνεται ανάμεσα σε τρεις διακριτές τιμές ($\alpha:50\text{mm},65\text{mm},80\text{mm}$) ενώ το πάχος (h) προκύπτει την εκάστοτε φορά ανάλογα με τον τύπο του δοκιμίου Glare.



Εικόνα 1. Γεωμετρία του προβλήματος κρούσης

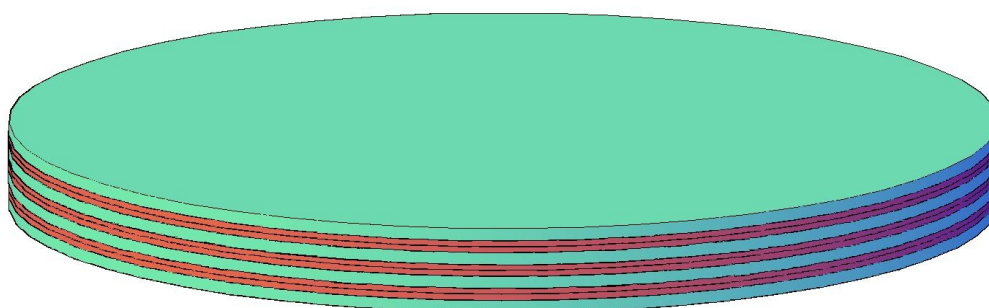
Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση παρουσιάζονται ομαδοποιημένες στον πίνακα 1.

$E_{11} = 47.3\text{GPa}$ (long. prepreg stiffness [30])	$\sigma_o = 350\text{MPa}$ (aluminum yield strength [13])
$E_{22} = 17\text{GPa}$ (trans. prepreg stiffness [13])	$\nu_{Al} = 0.33$ (aluminum Poisson's ratio[2])
$G_{12} = 7\text{GPa}$ (in-plane shear modulus [13])	$E_{Al} = 72\text{GPa}$ (aluminum Young's modulus [30])
$\rho_{av} = 2314\text{kg/m}^3$ (GLARE 4-3/2 average mass density [12])	$D_{Al}=2779\text{kg}/\text{m}^3$ (Al density [12])
$ILSS = 20\text{MPa}$ (interlaminar shear strength [13])	$D_{gl}=1950\text{kg}/\text{m}^3$ (Gl density[12])
$GIIC = 2\text{KJ}/\text{m}^2$ (mode II interlaminar shear fracture toughness [13])	$\nu_{12} = 0.25$ (prepreg Poisson's ratio [13])


Πίνακας 1. Ιδιότητες Υλικών

2. Αποτελέσματα ανά τύπο Glare

2.1 Glare2A-4/3-0.238

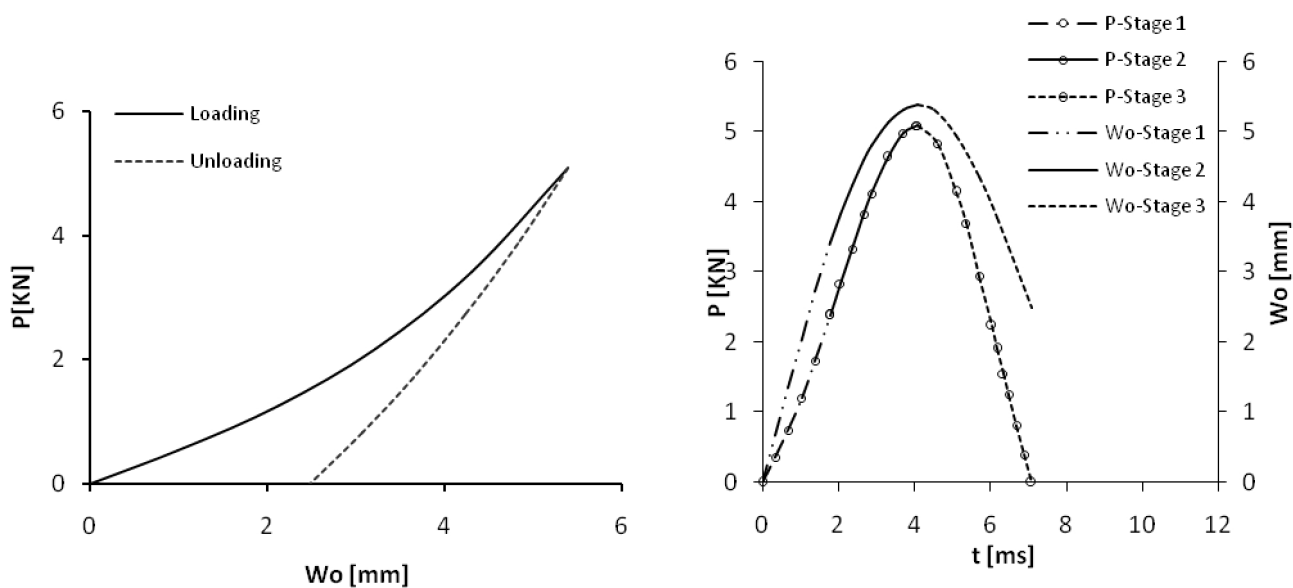


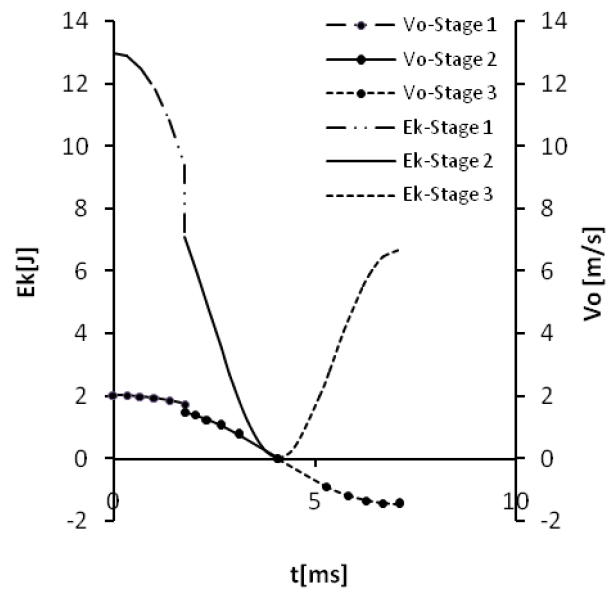
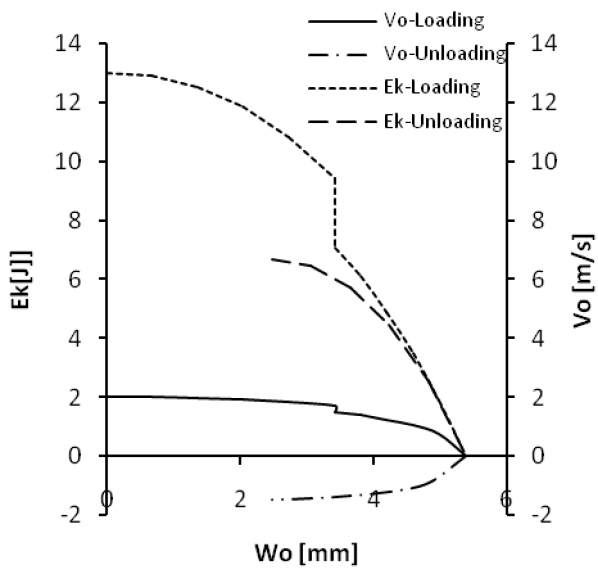
 : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.238mm)

 : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 0° (πάχος : 0.125mm)

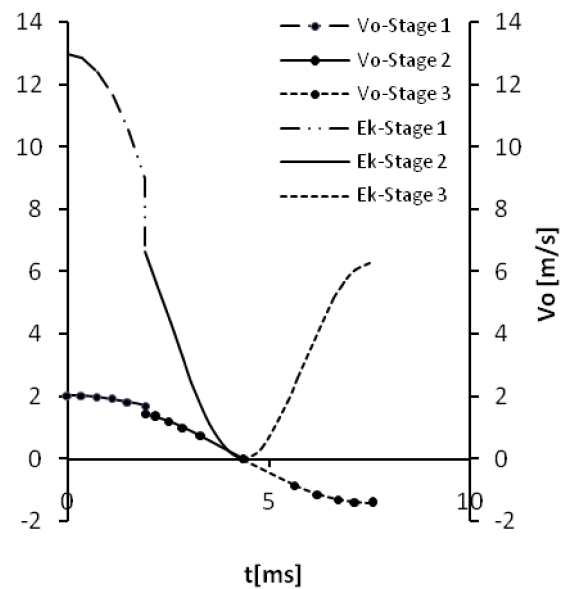
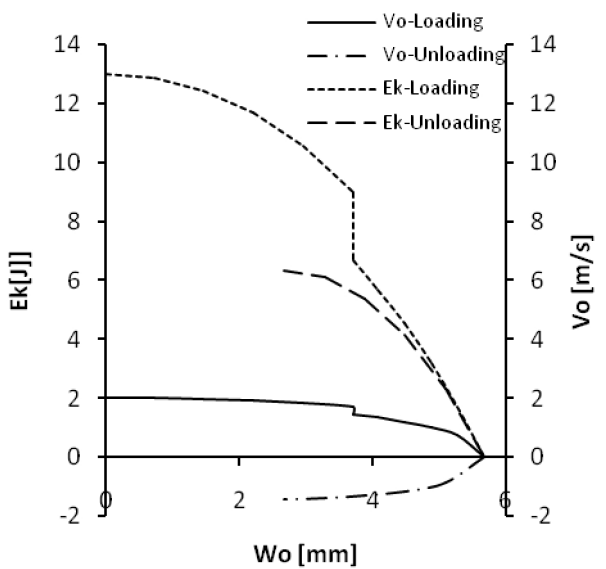
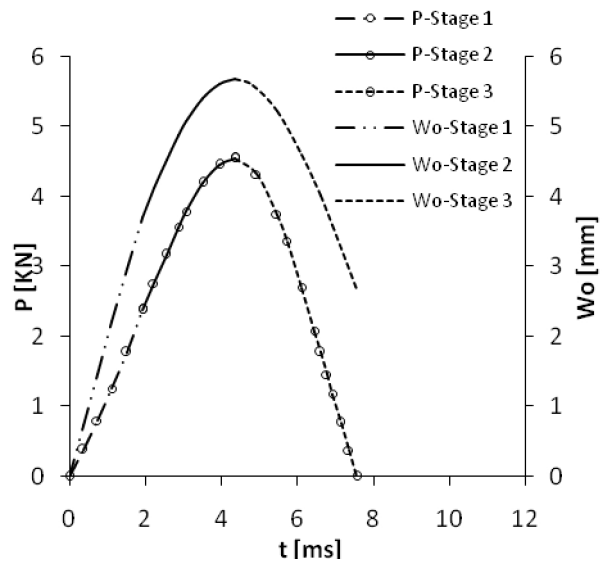
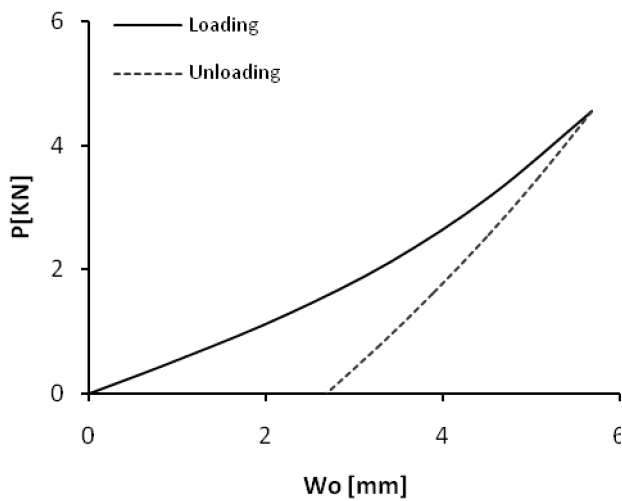
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

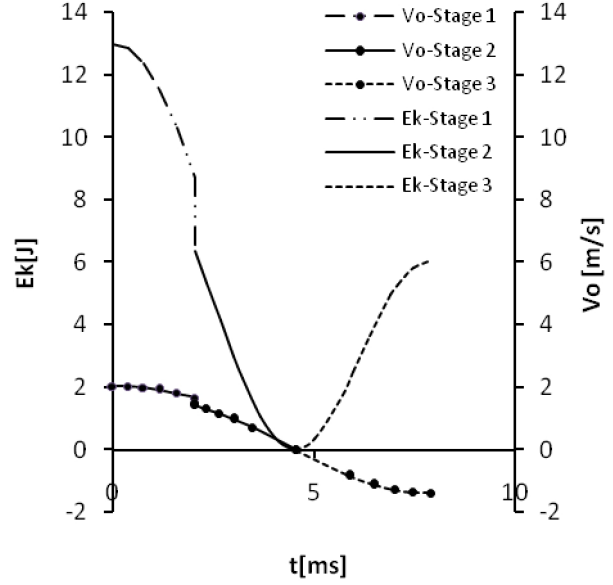
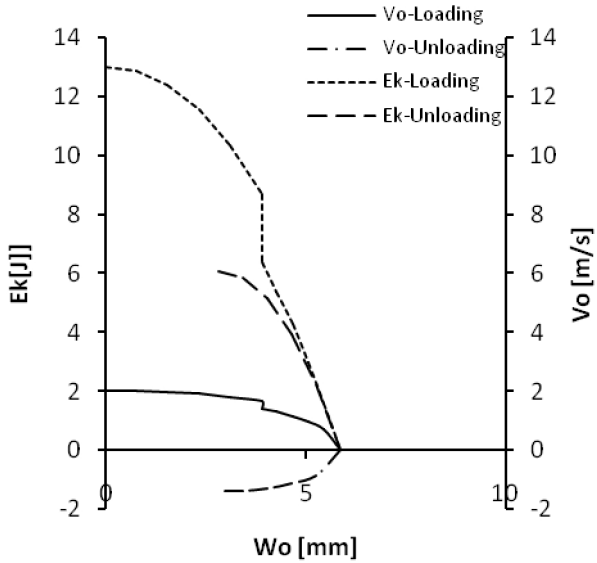
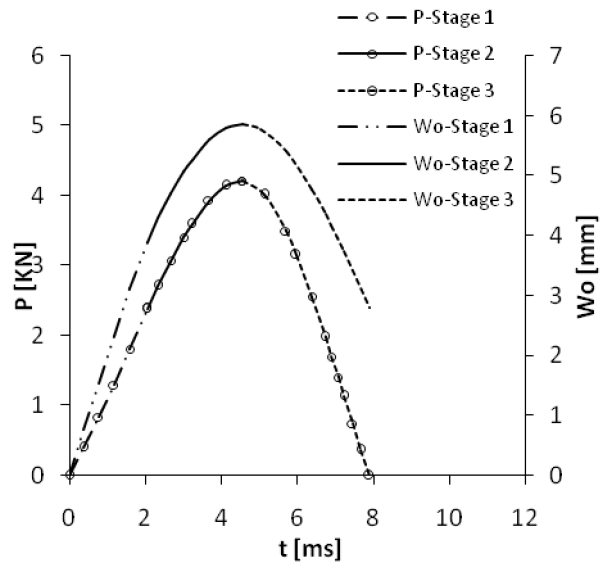
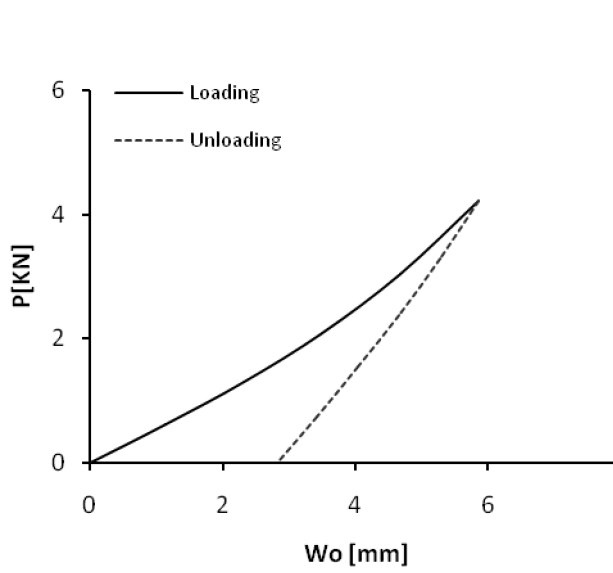




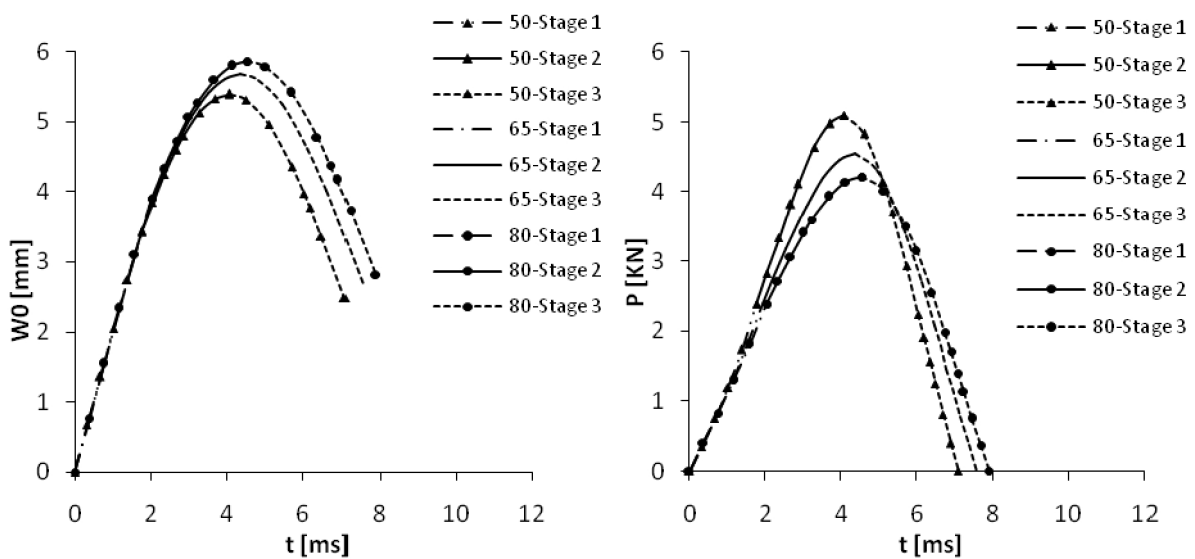
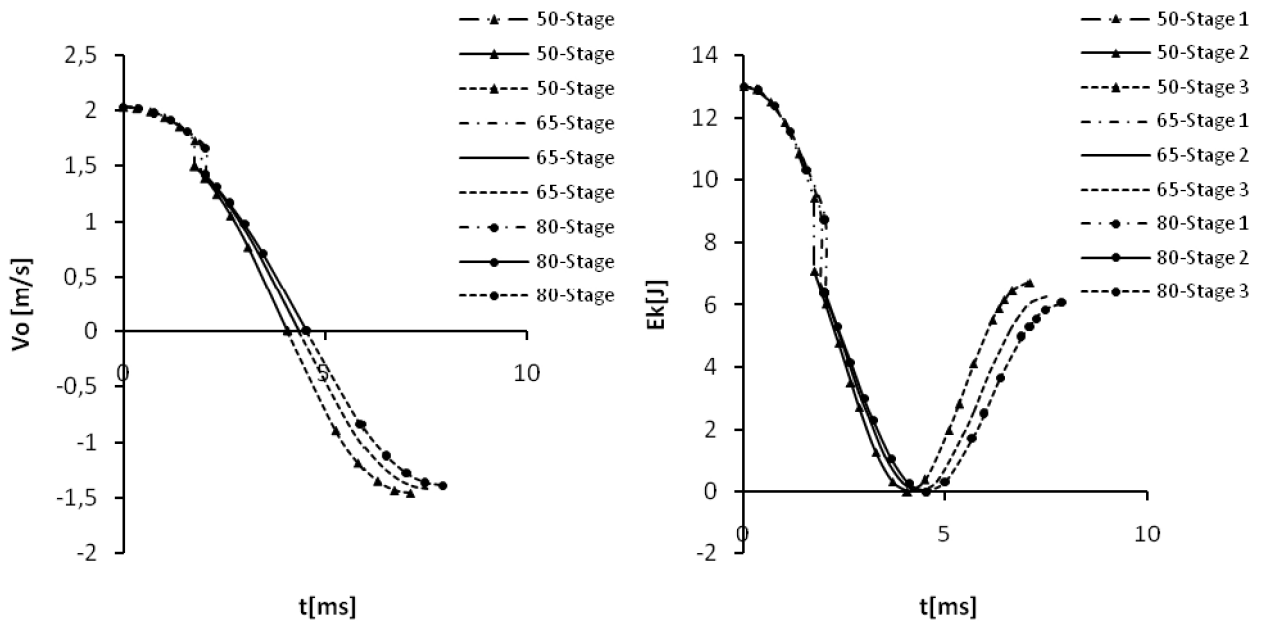
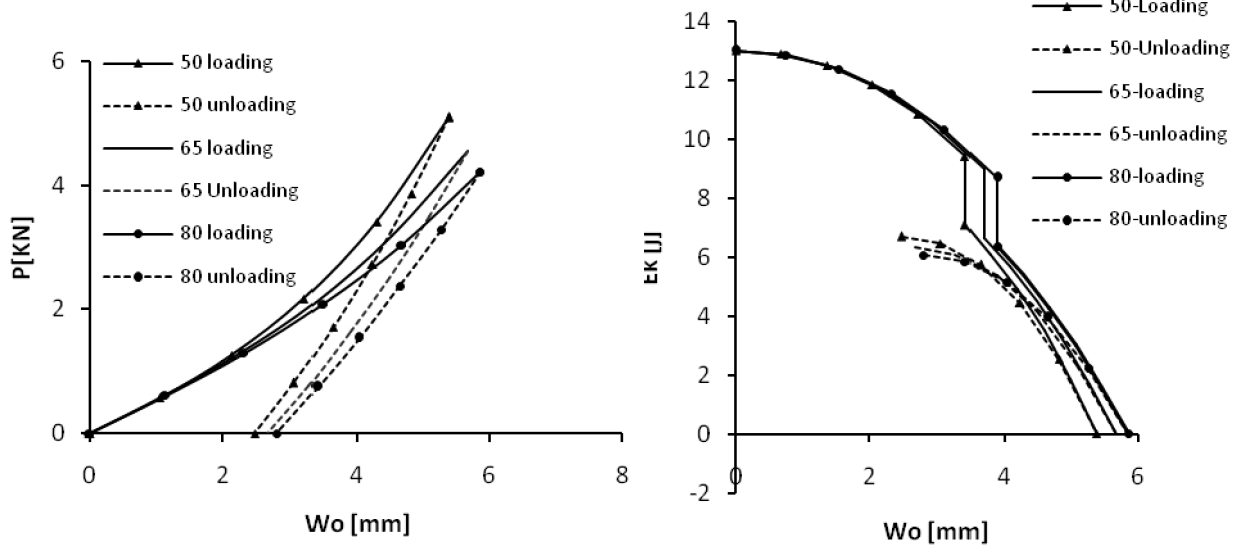
- radius 65mm



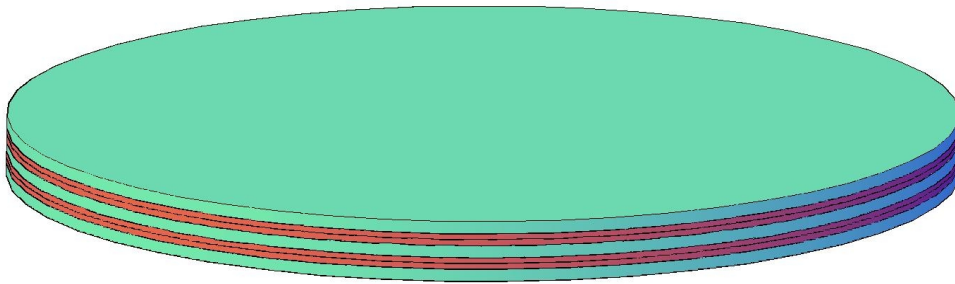
- radius 80mm




- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.



2.2 Glare2A-3/2-0.4

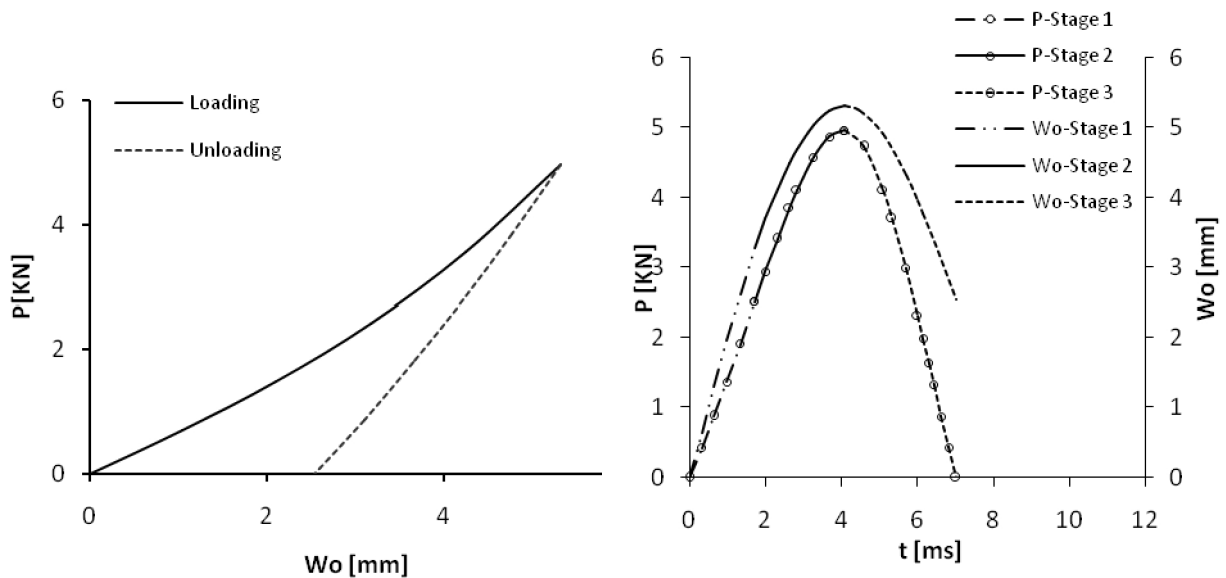


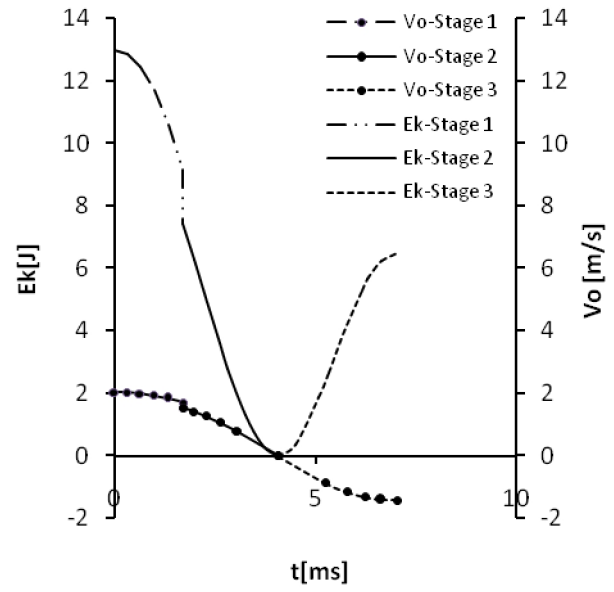
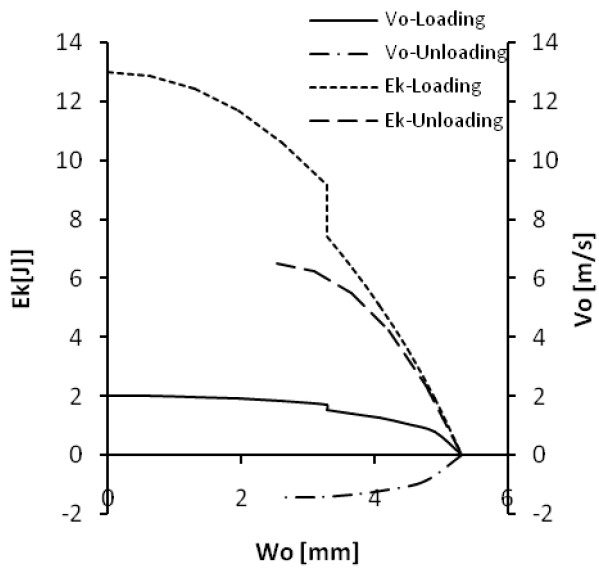
 : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.4mm)

 : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 0° (πάχος : 0.125mm)

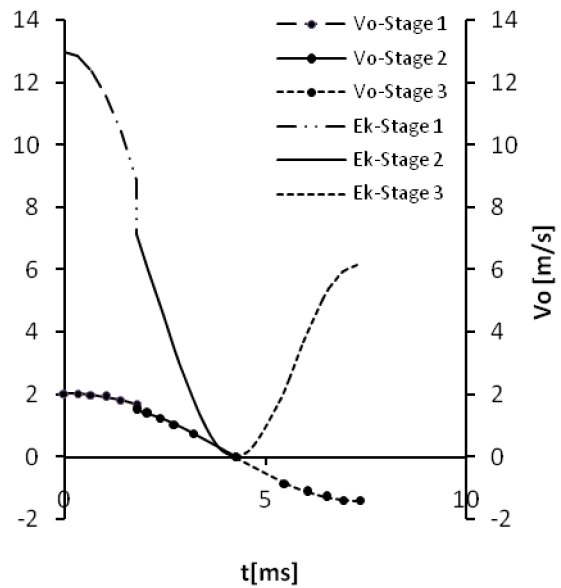
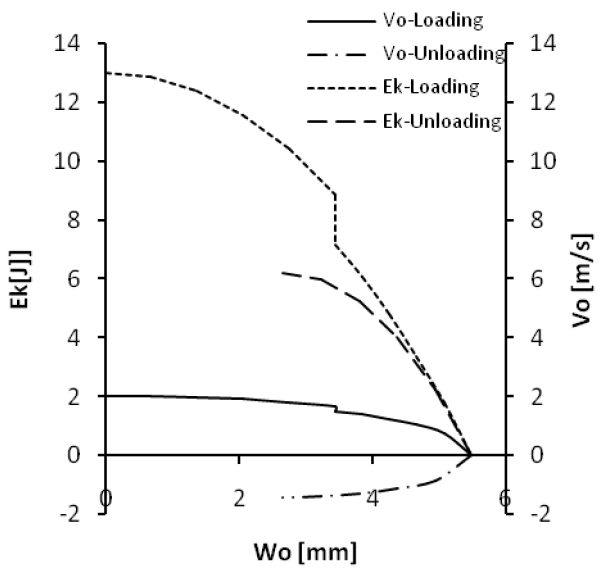
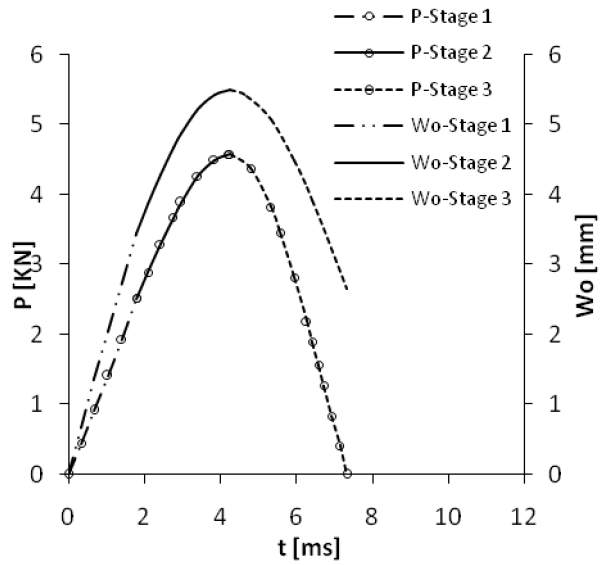
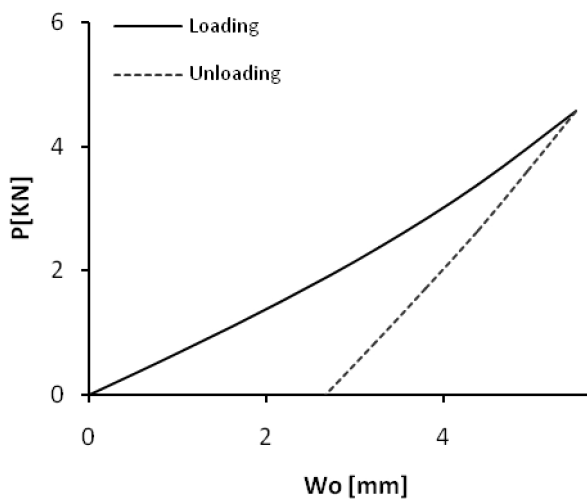
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

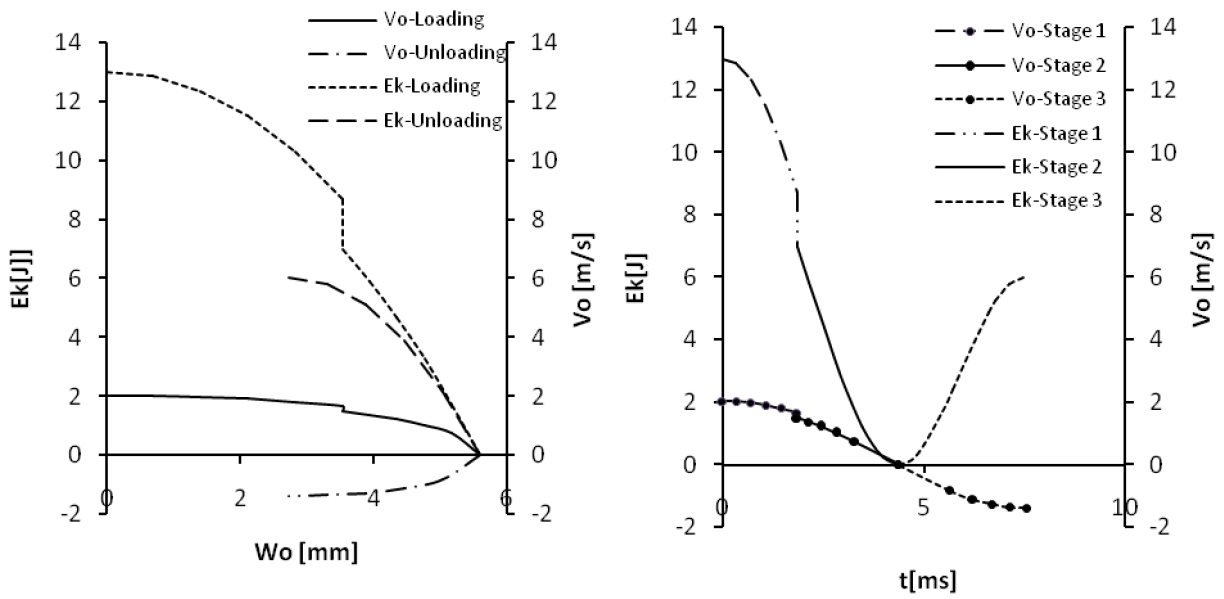
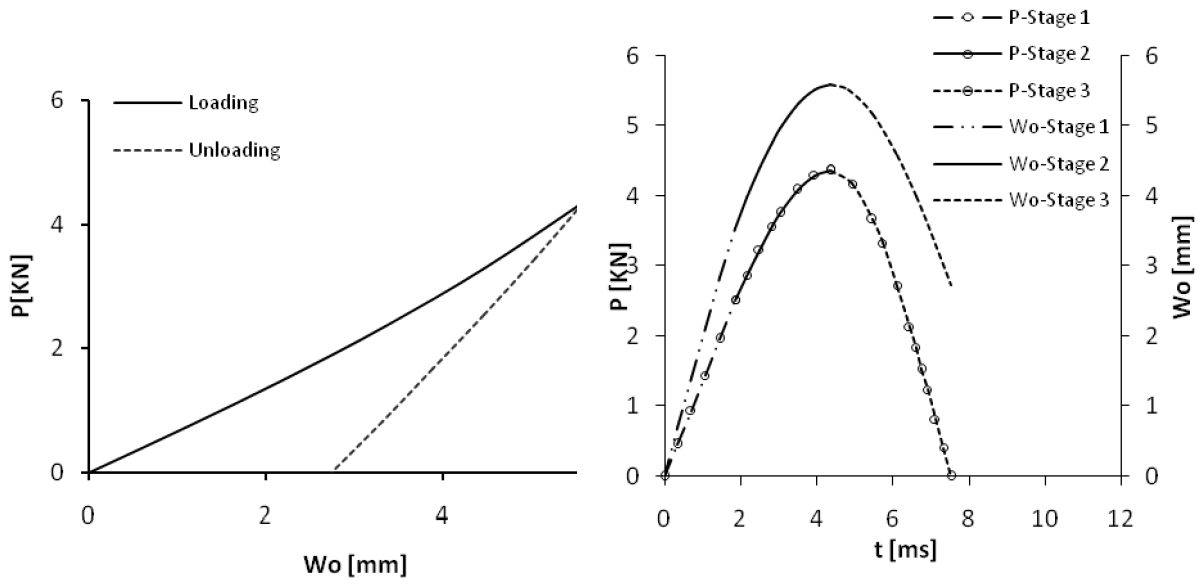




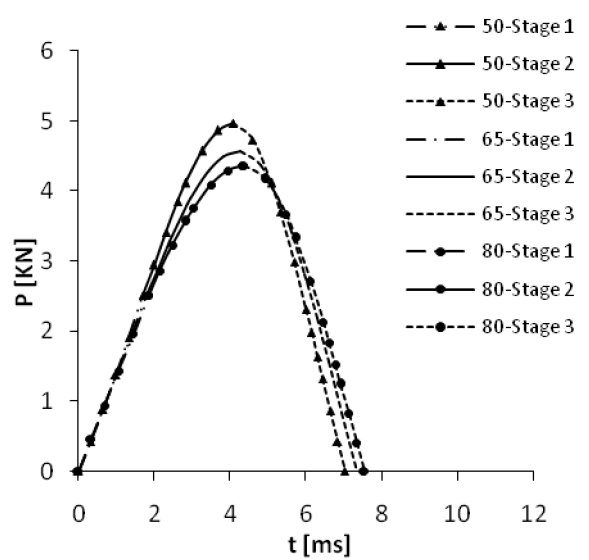
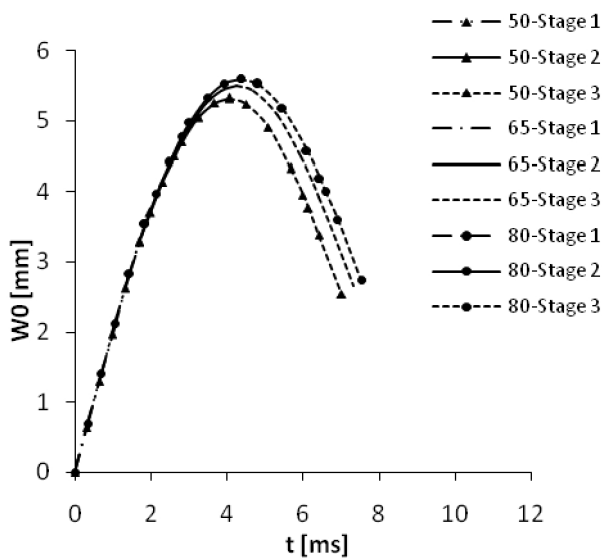
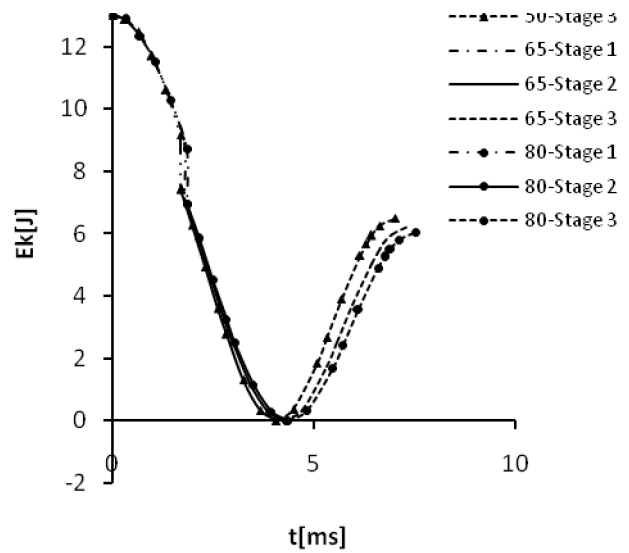
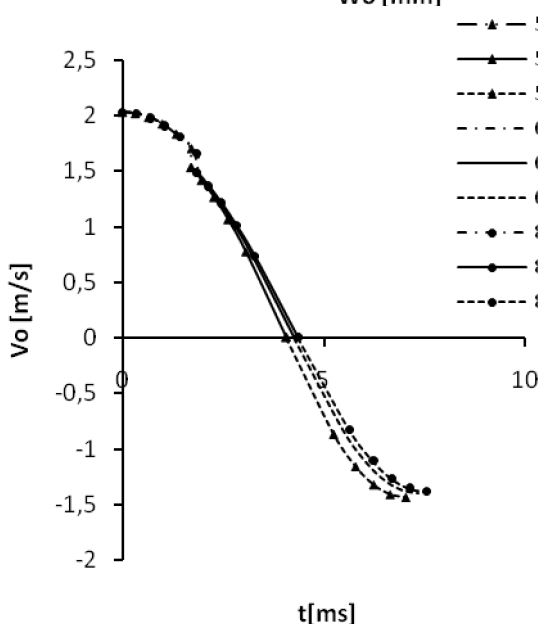
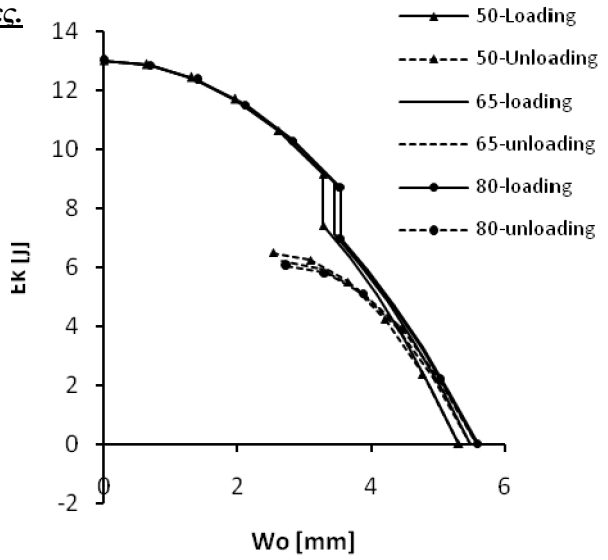
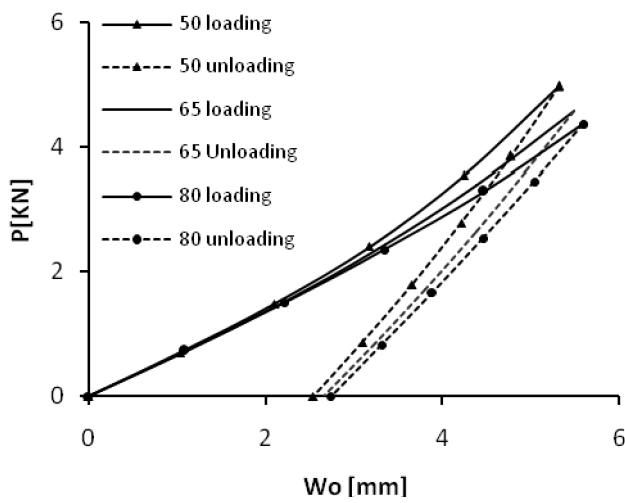
- radius 65mm



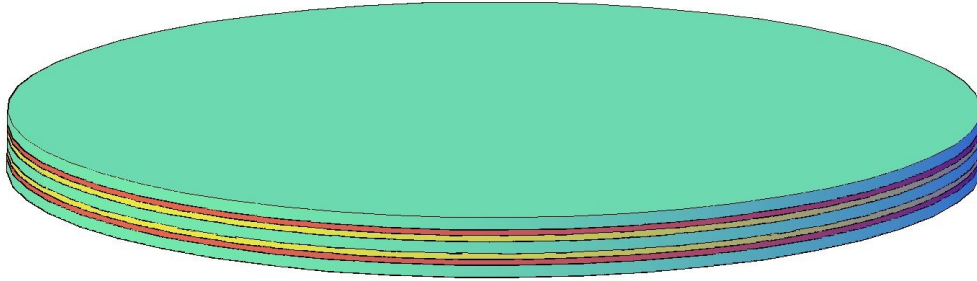
- radius 80mm




- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.




2.3 Glare3-3/2-0.4



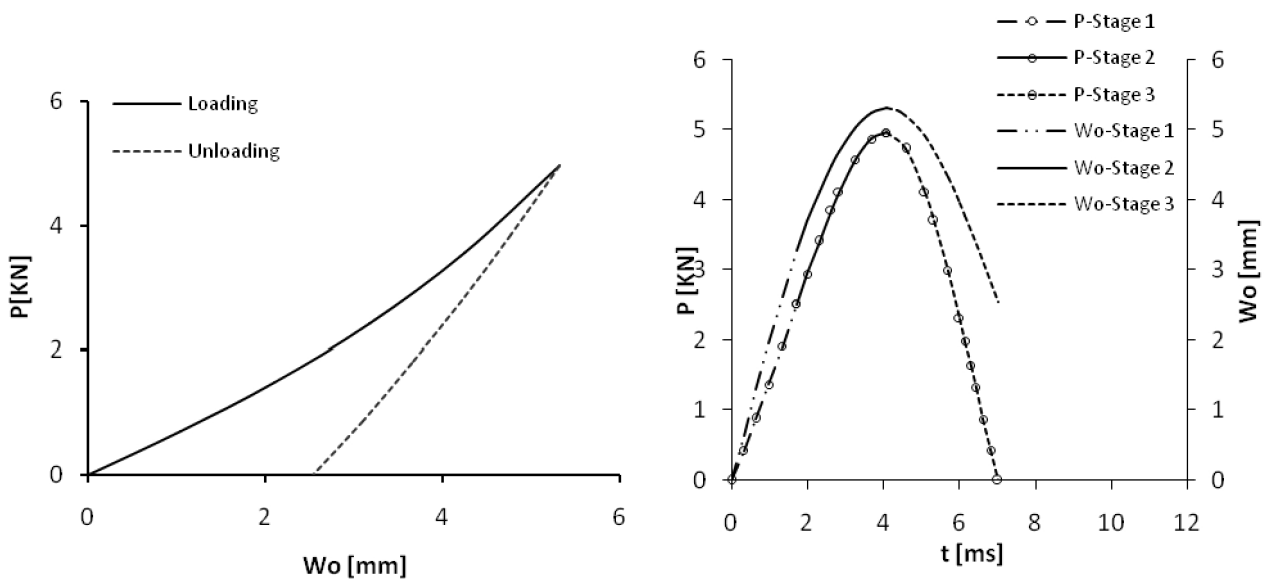
 : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.4mm)

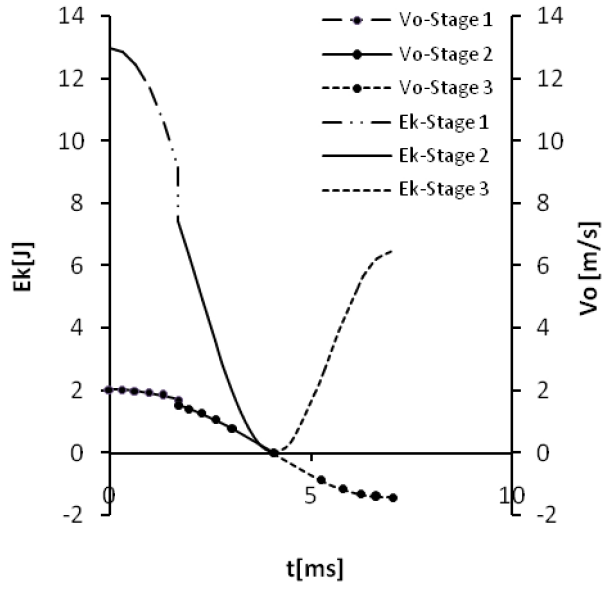
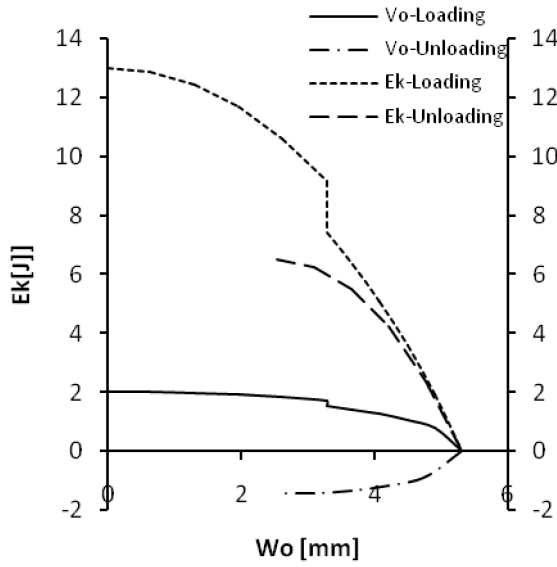
 : Στρώση UD FM94/S2 prepreg 0° (πάχος : 0.125mm)

 : Στρώση UD FM94/S2 prepreg 90° (πάχος : 0.125mm)

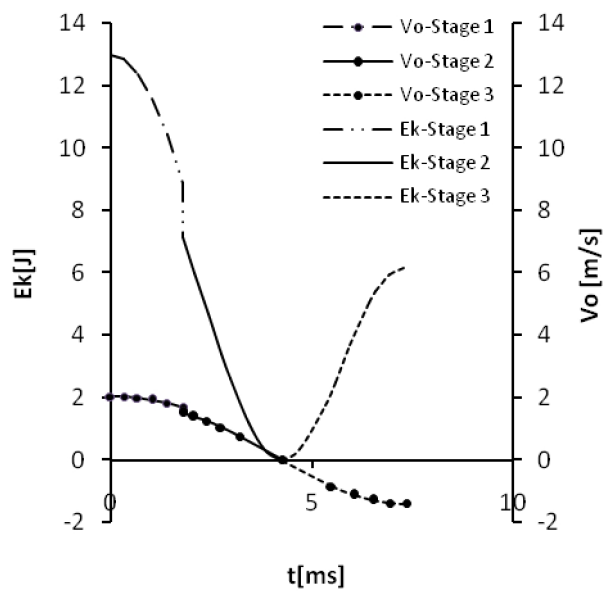
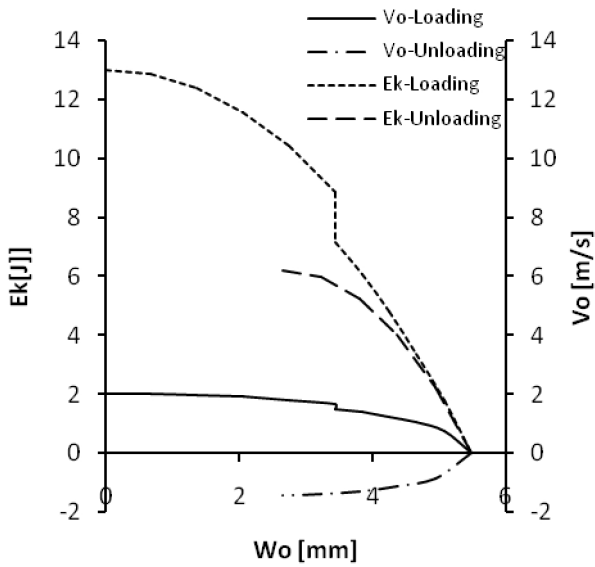
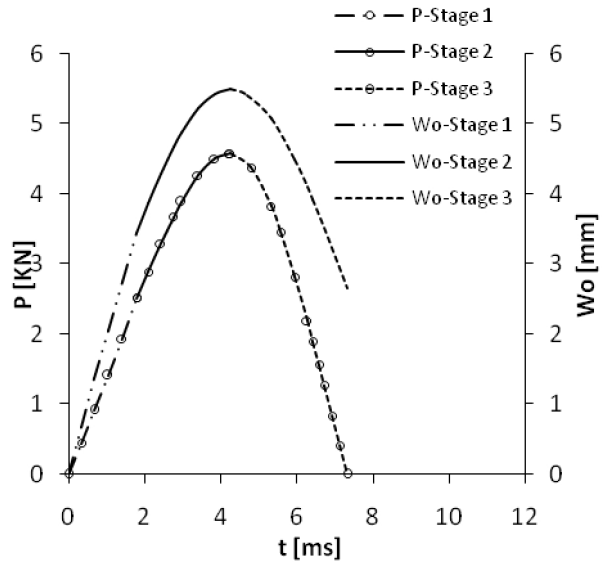
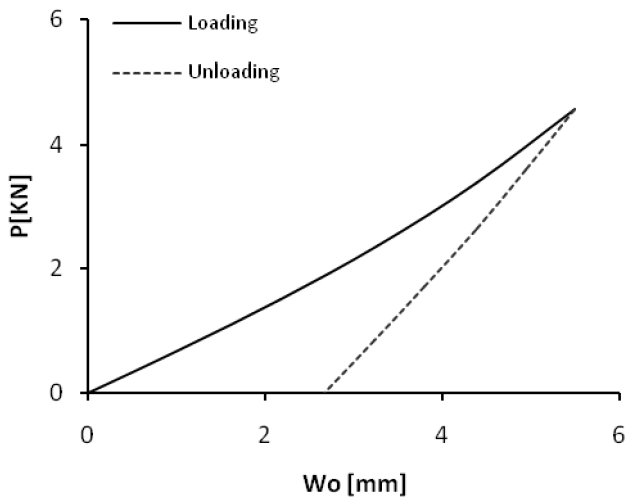
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

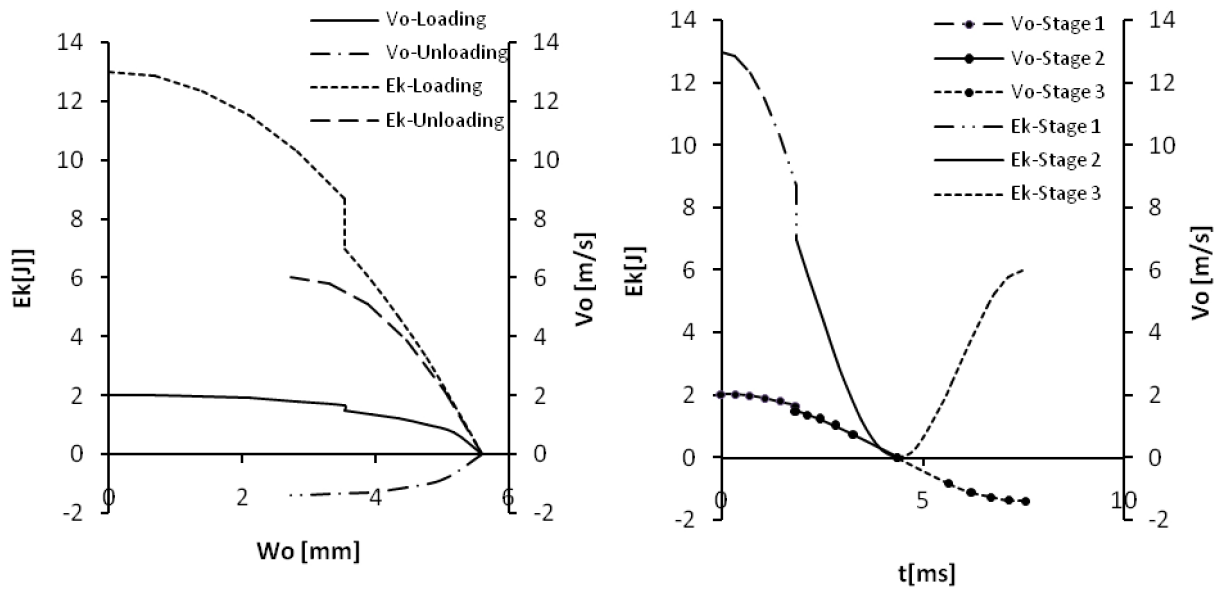
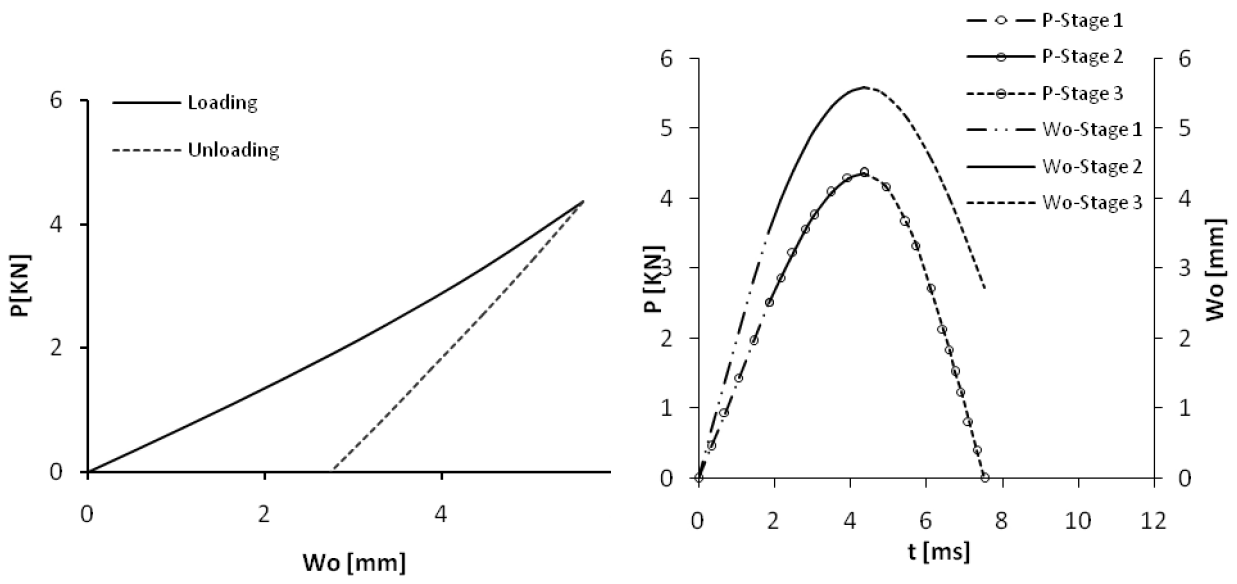




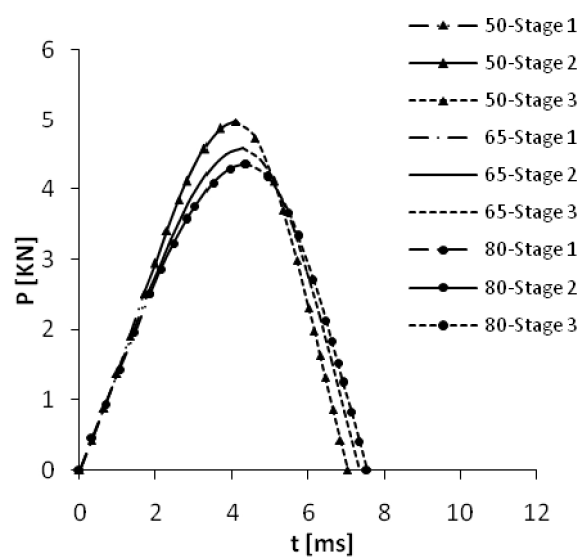
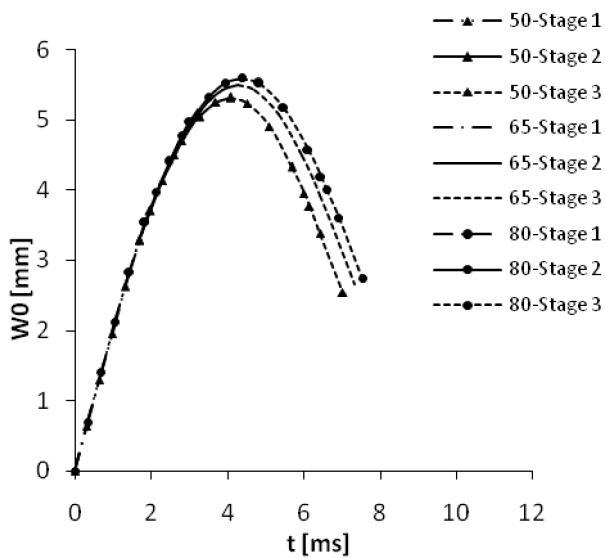
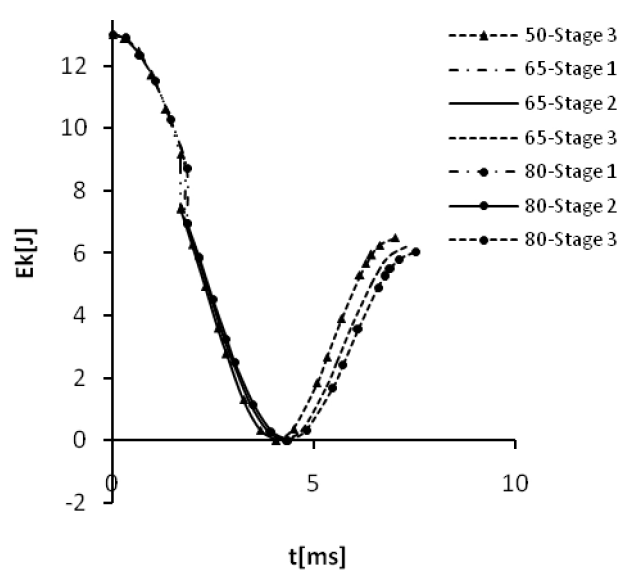
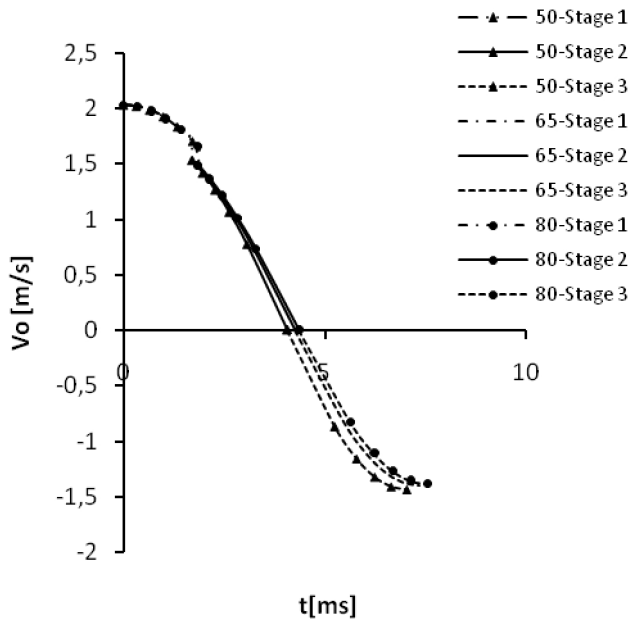
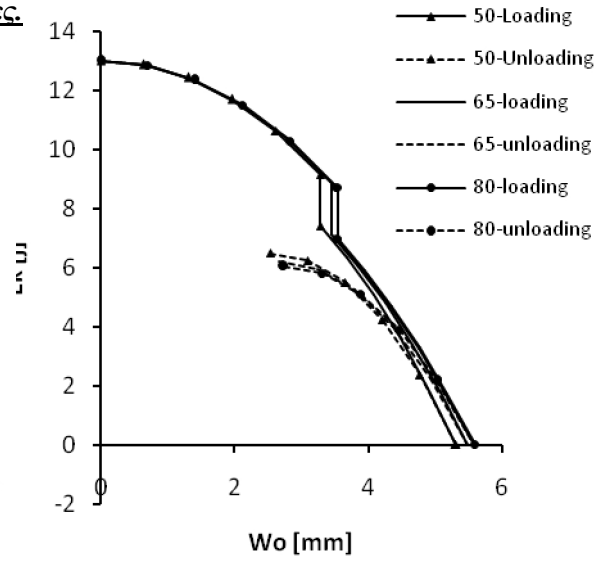
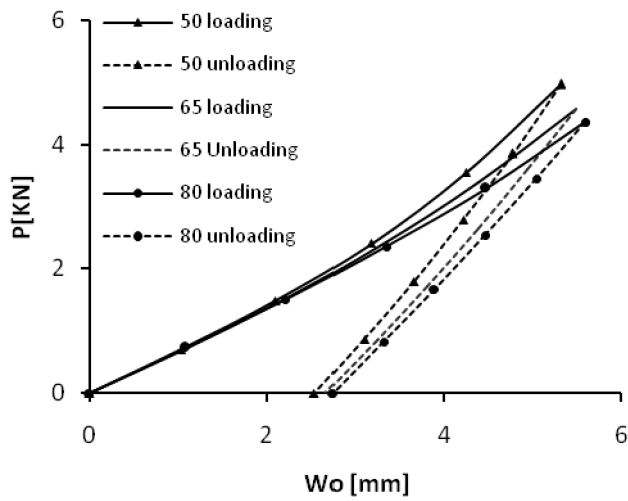
- radius 65mm



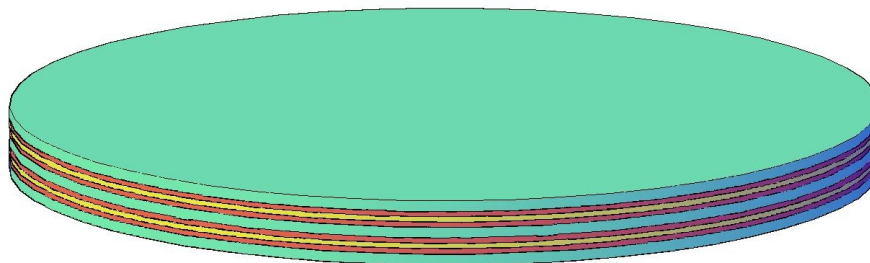
- radius 80mm



- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.



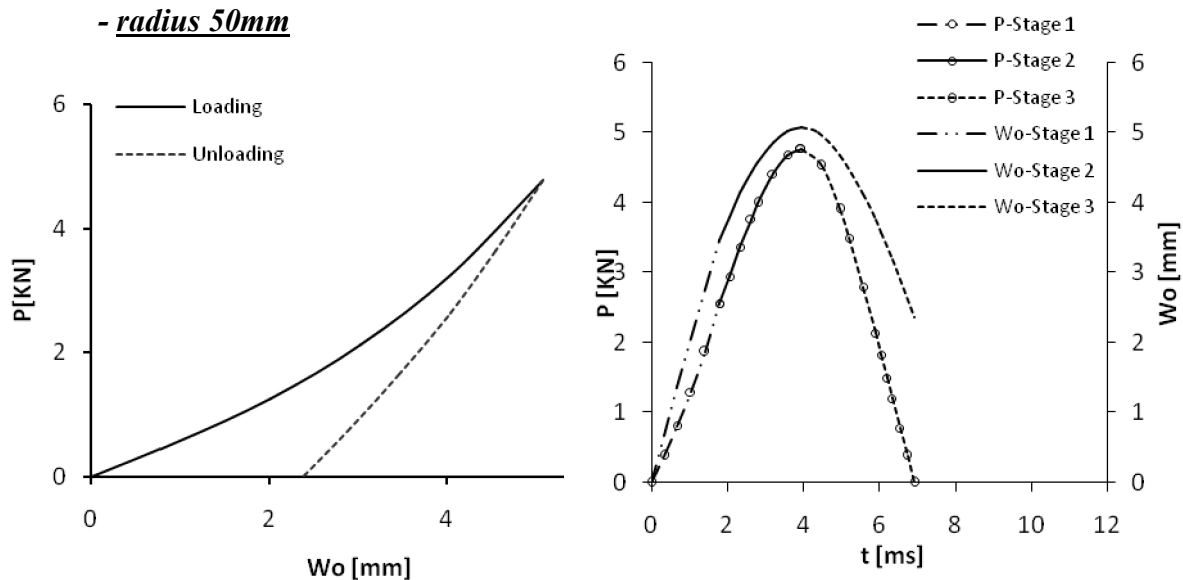
2.4 Glare4-3/2-0.342

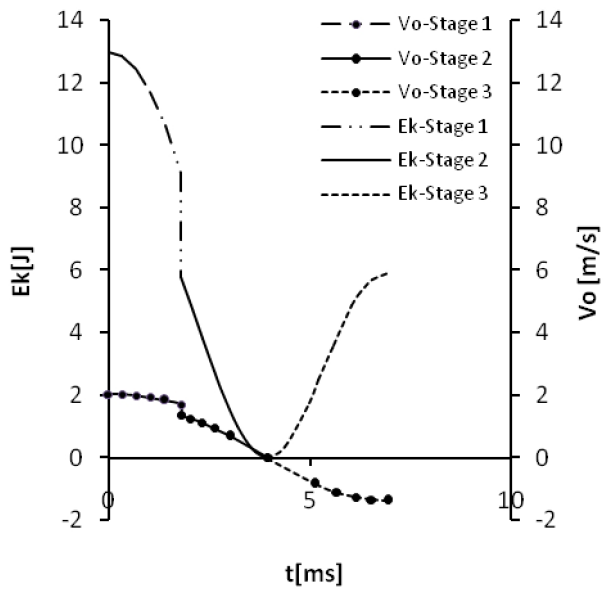
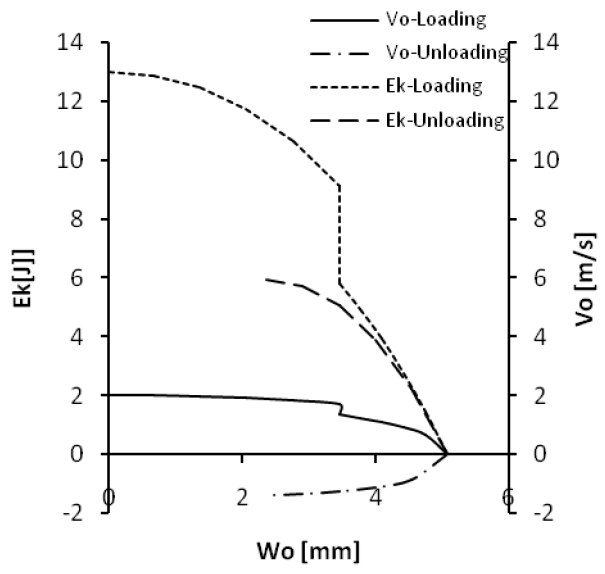


- : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.342mm)
- : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 0° (πάχος : 0.125mm)
- : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 90° (πάχος : 0.125mm)

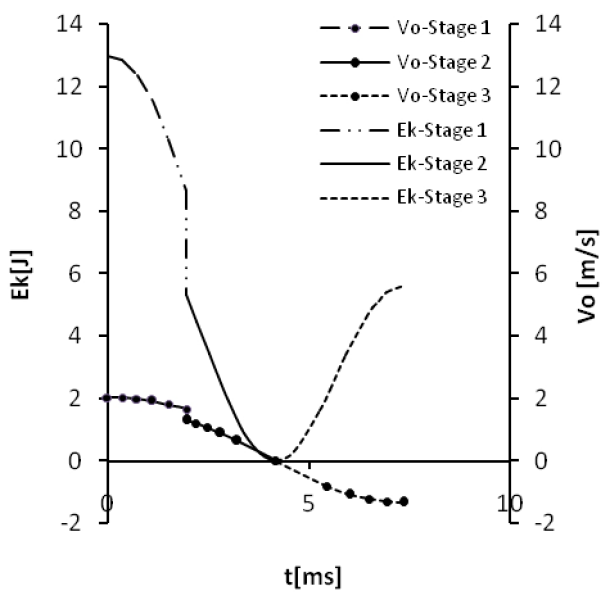
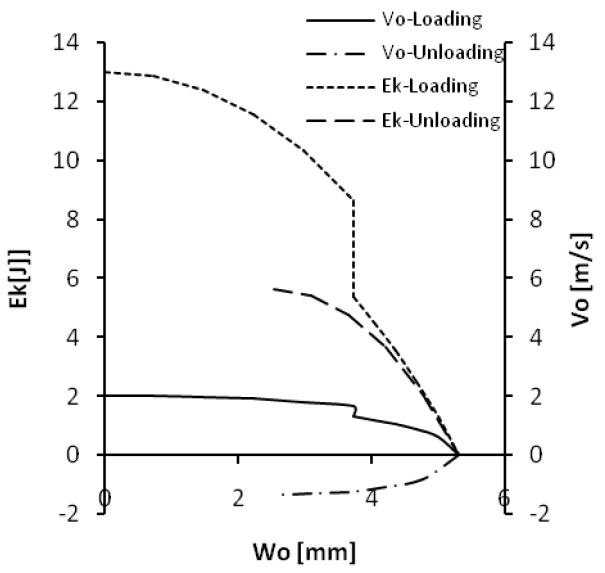
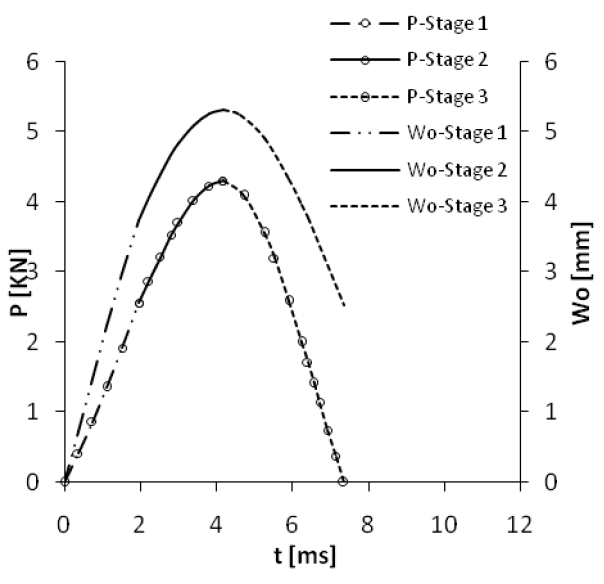
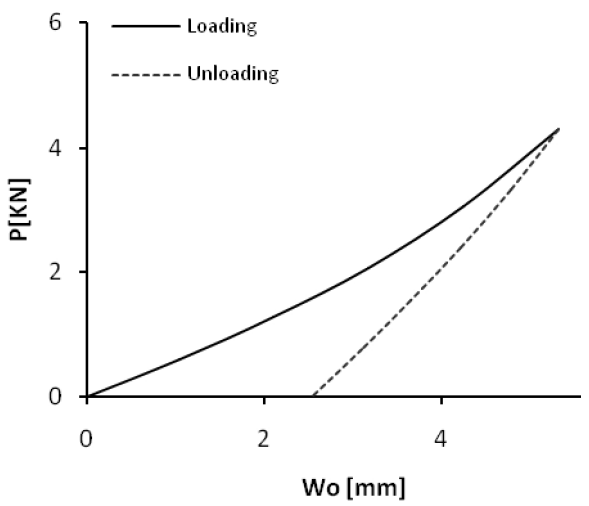
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

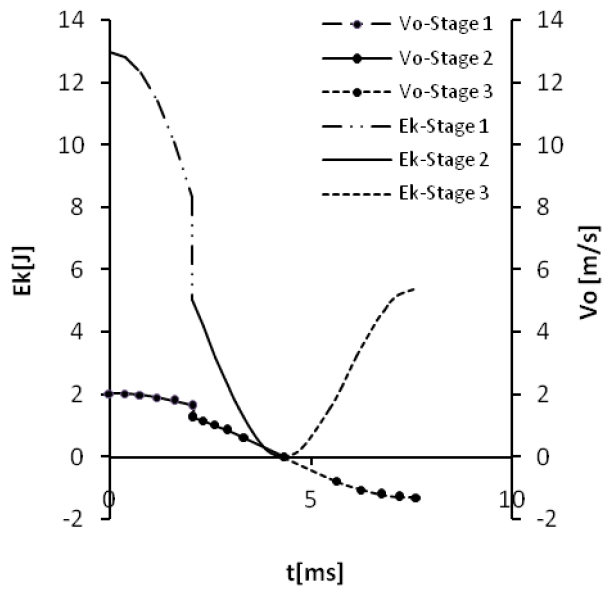
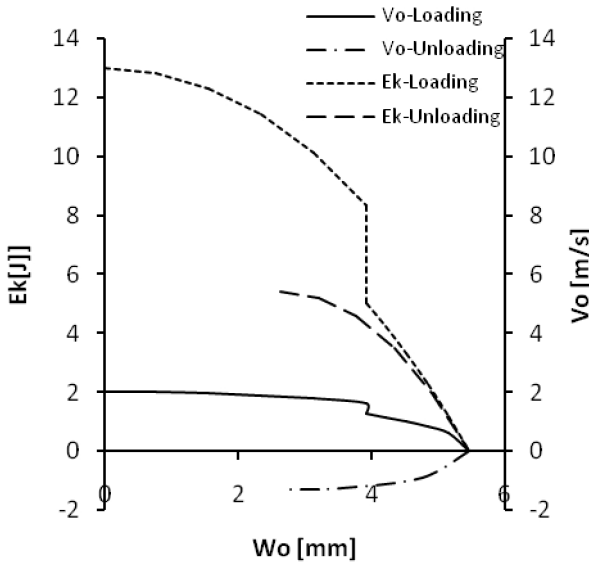
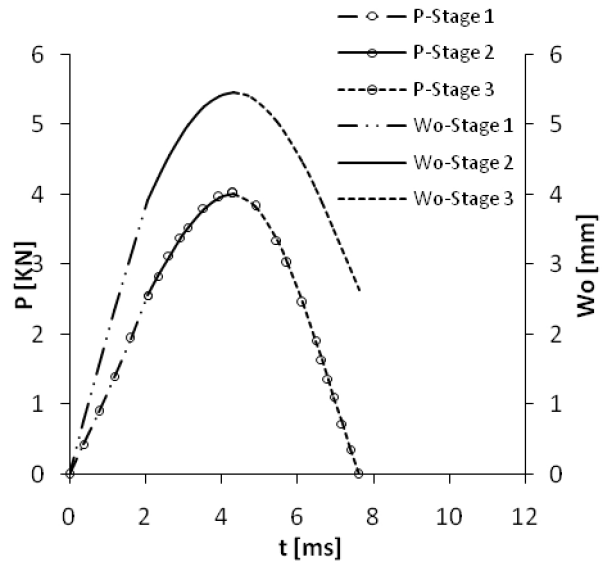
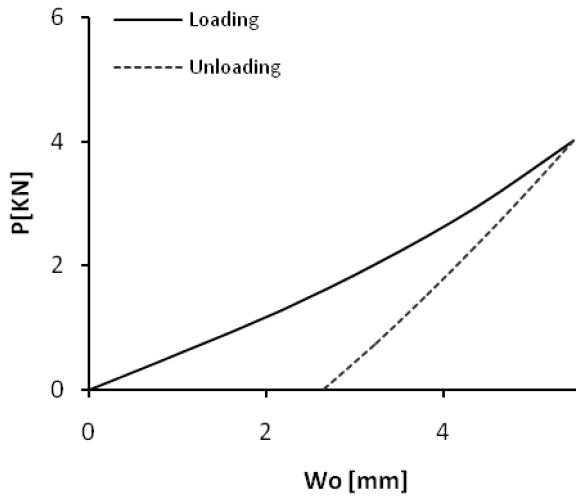




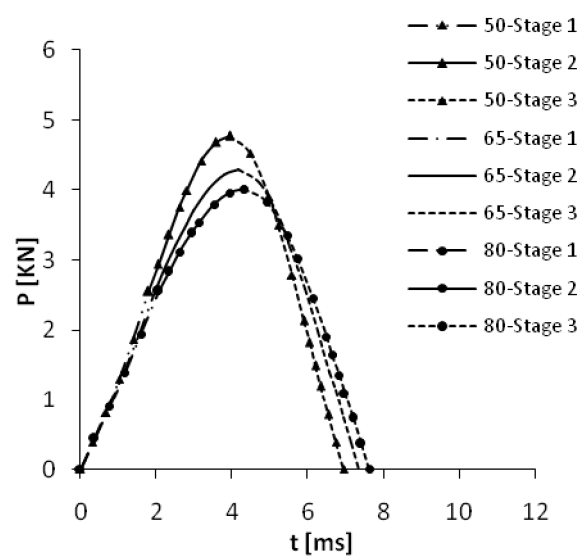
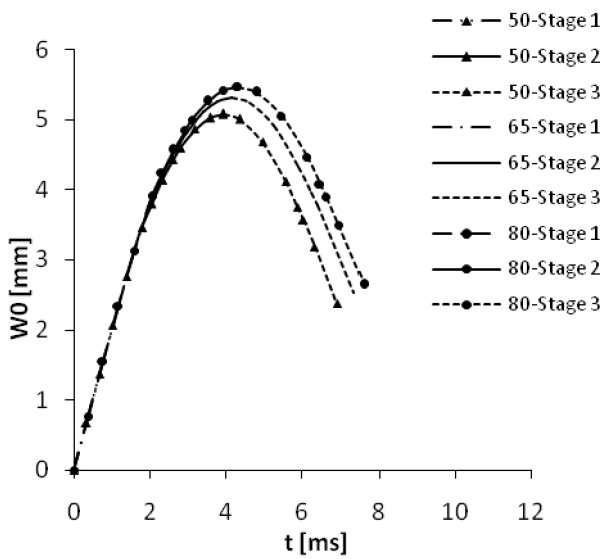
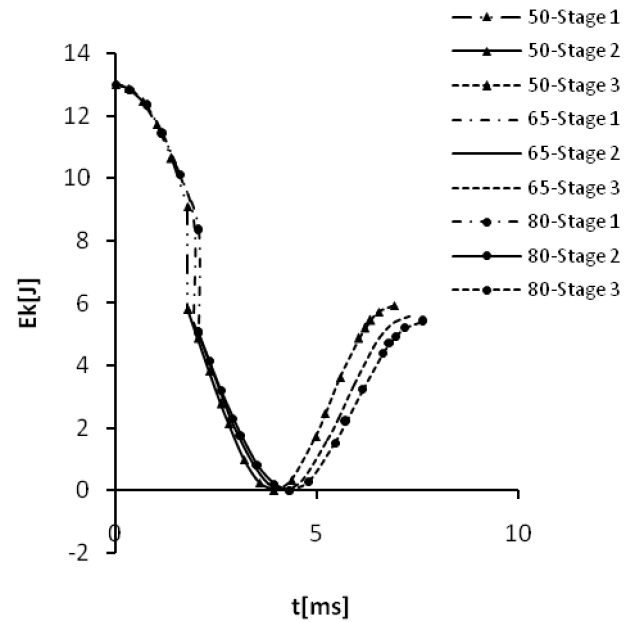
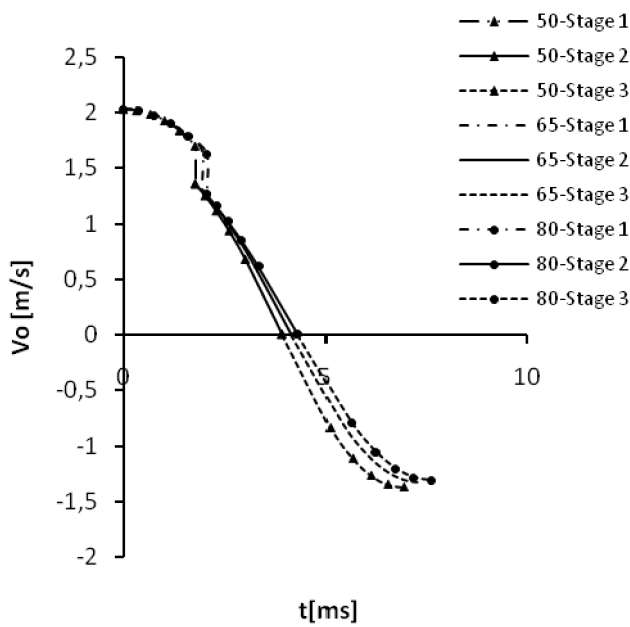
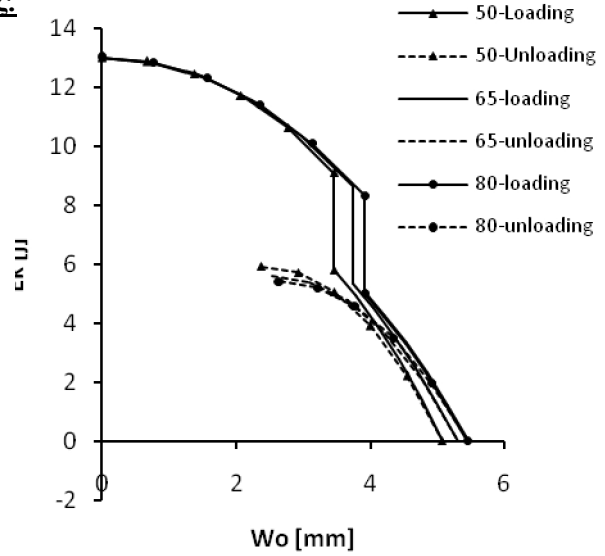
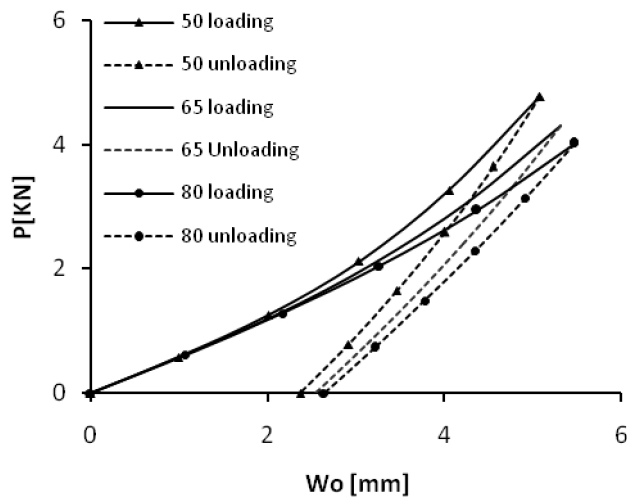
- radius 65mm



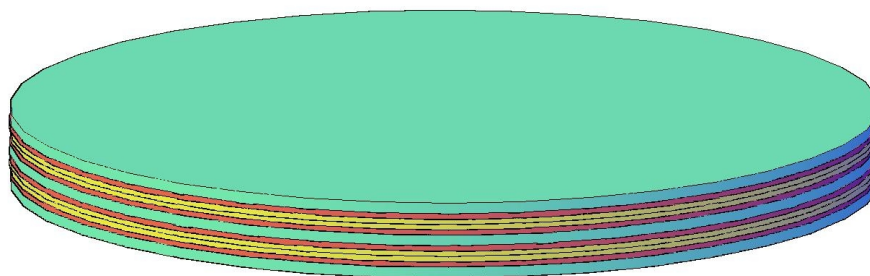
- radius 80mm



- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.



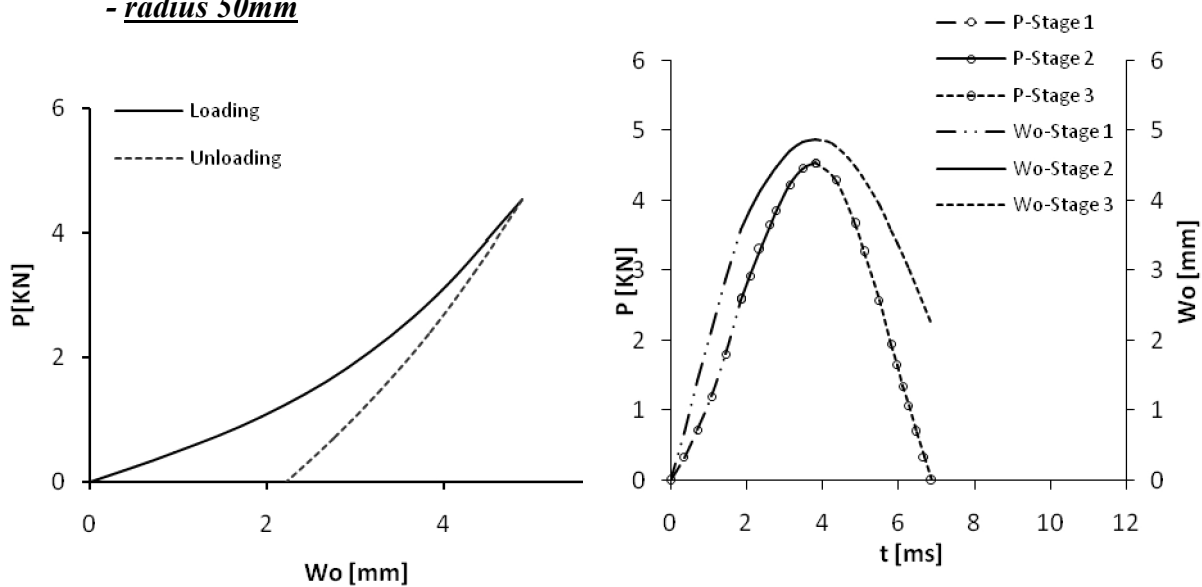
2.5 Glare5-3/2-0.283

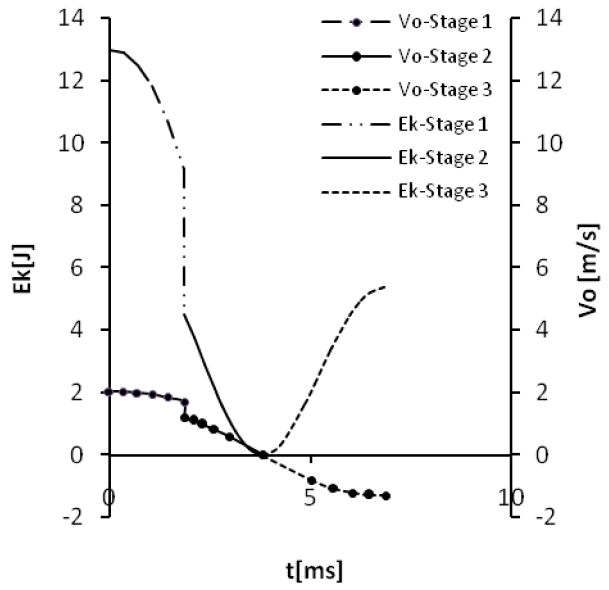
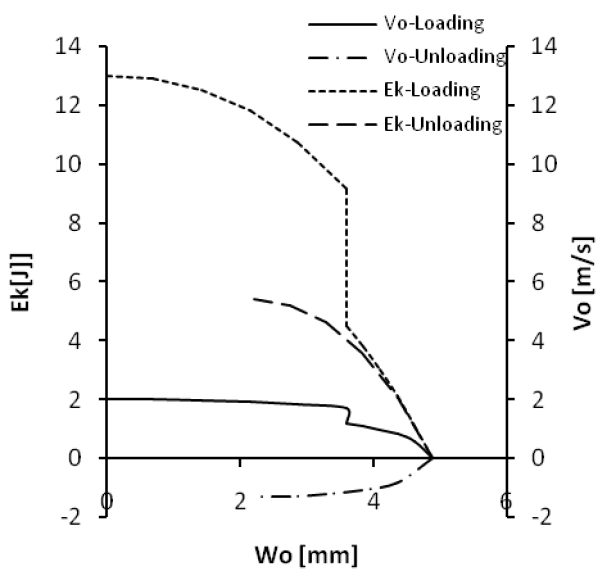


- : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.283mm)
- : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 0° (πάχος : 0.125mm)
- : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 90° (πάχος : 0.125mm)

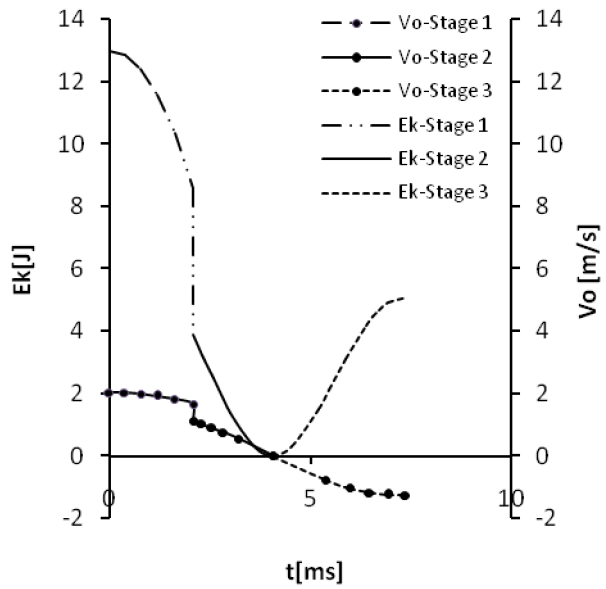
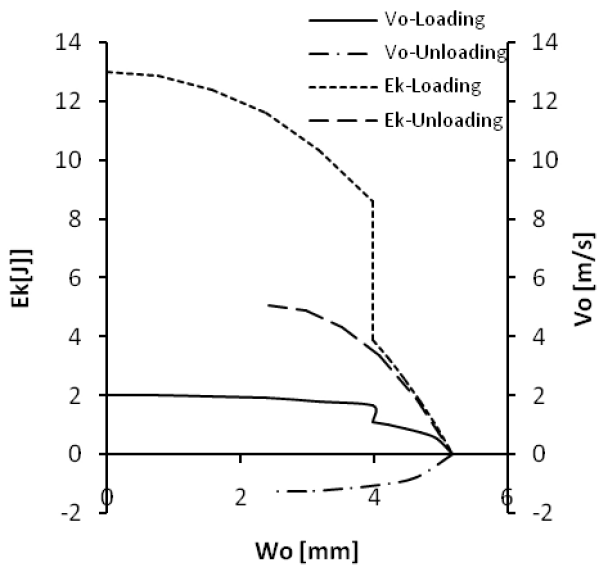
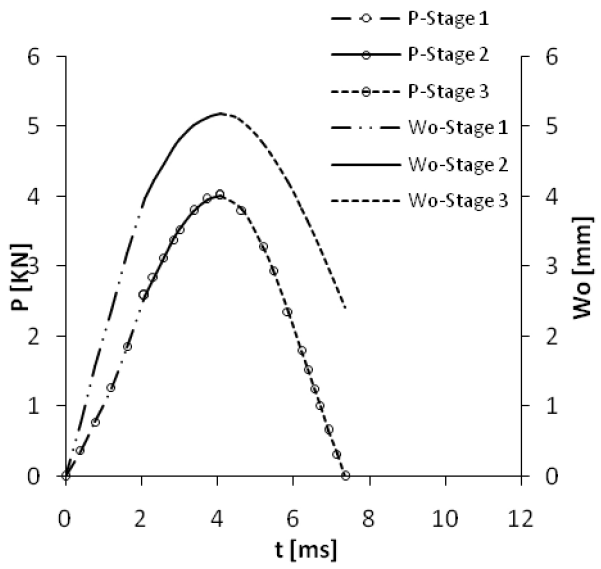
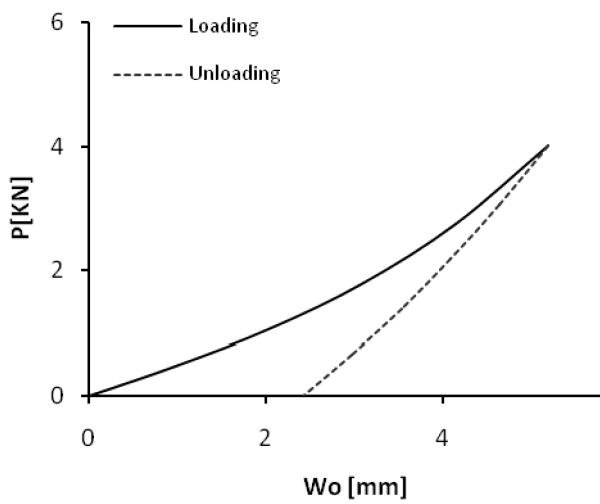
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

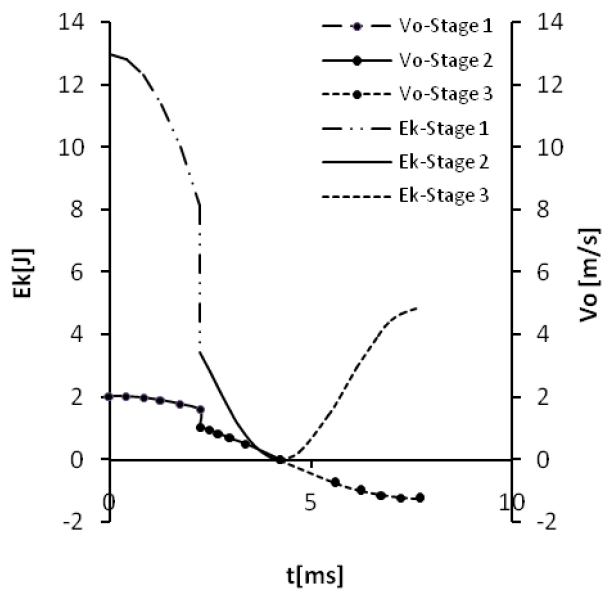
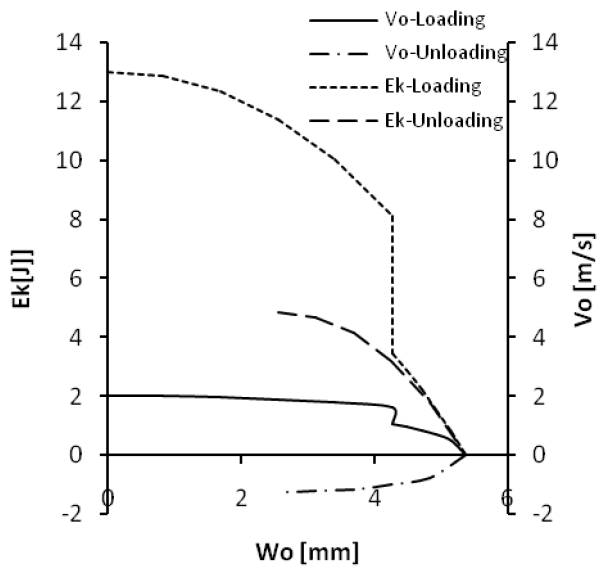
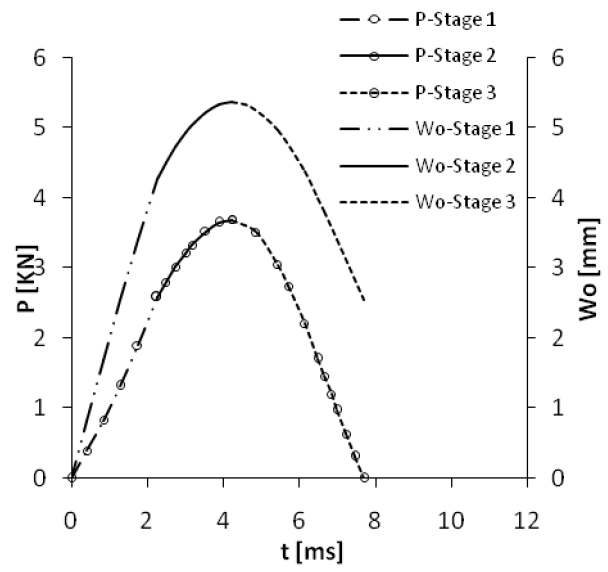
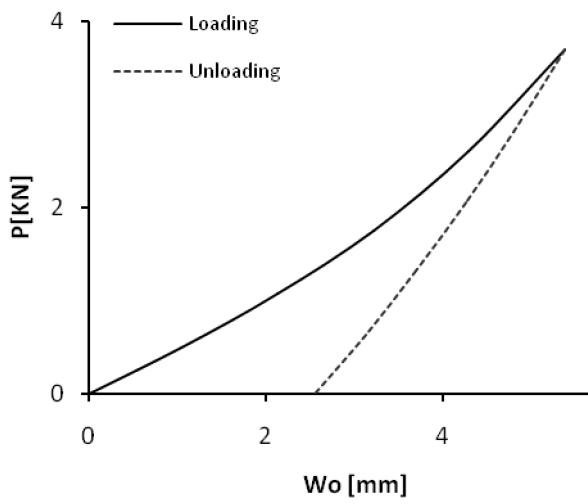




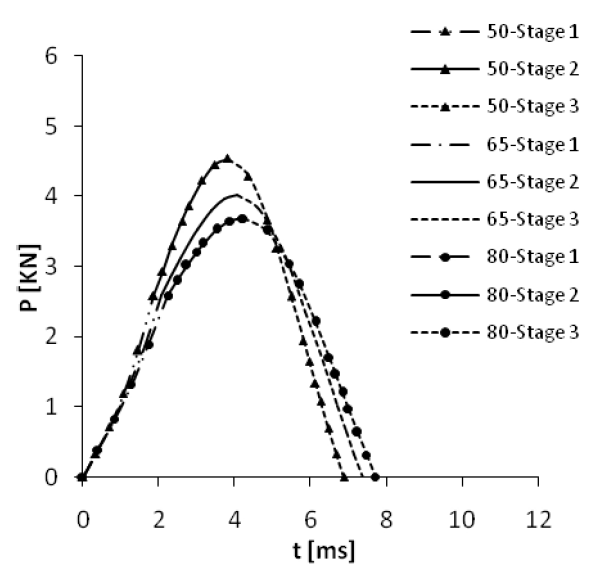
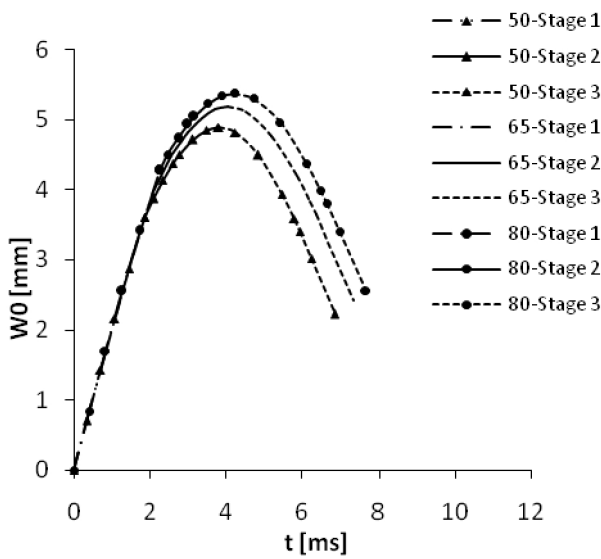
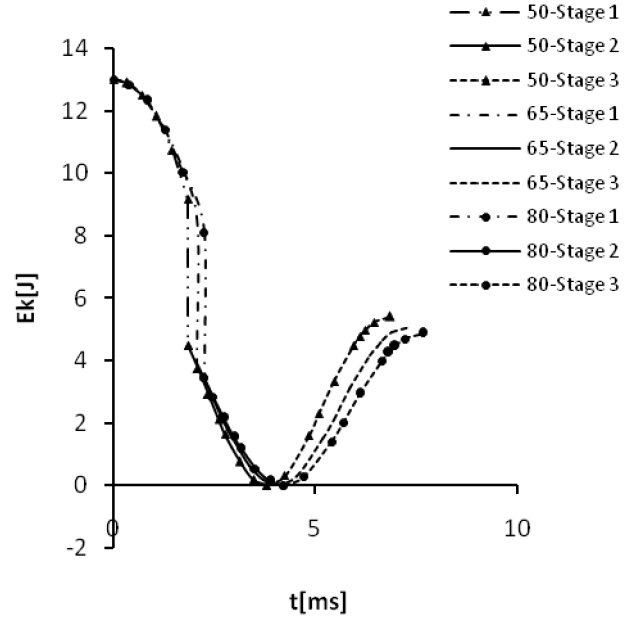
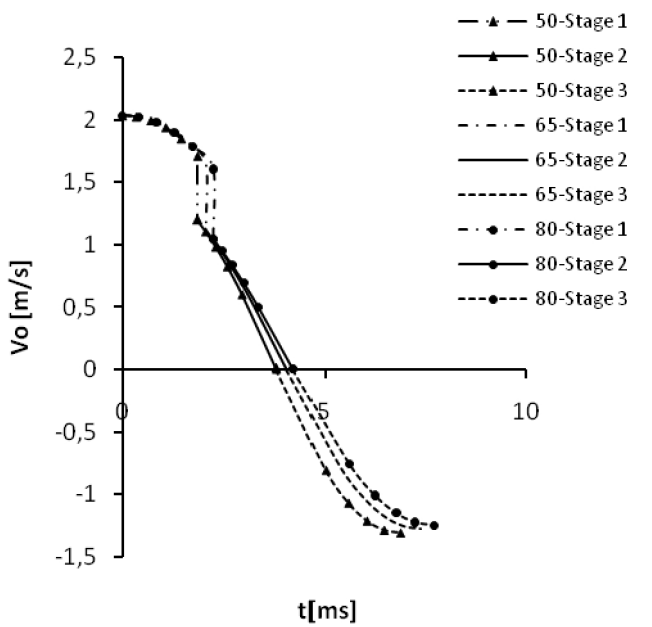
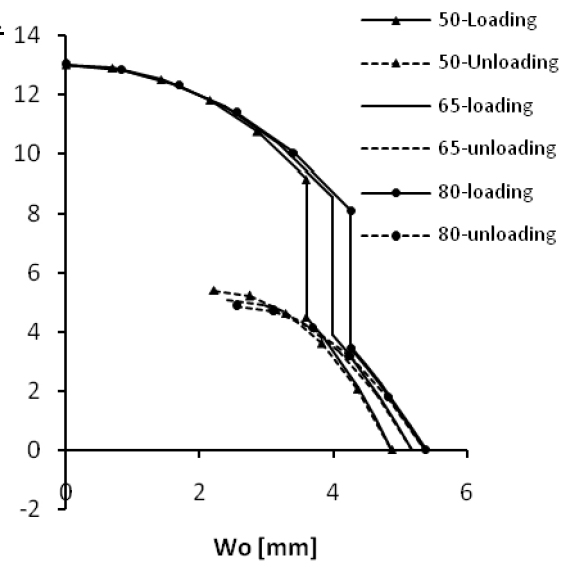
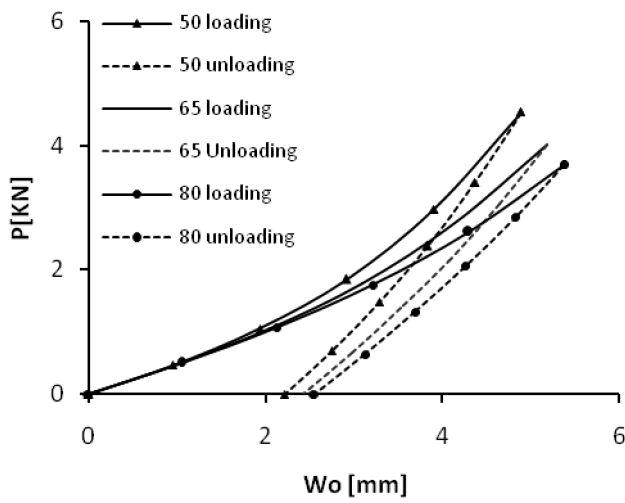
- radius 65mm



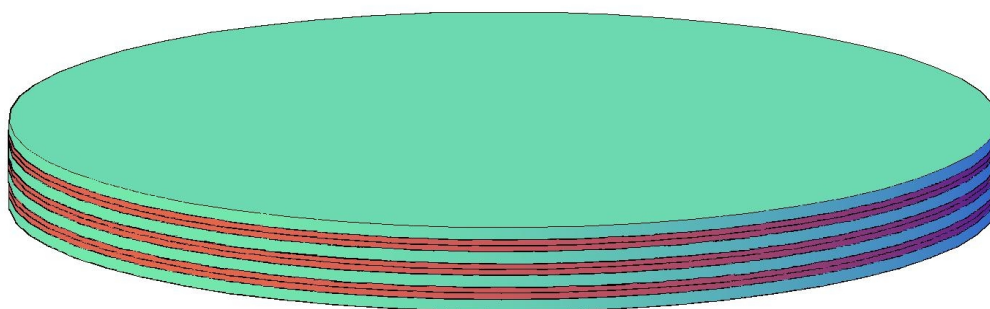
- radius 80mm




- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες



2.6 Glare2A-4/3-0.256

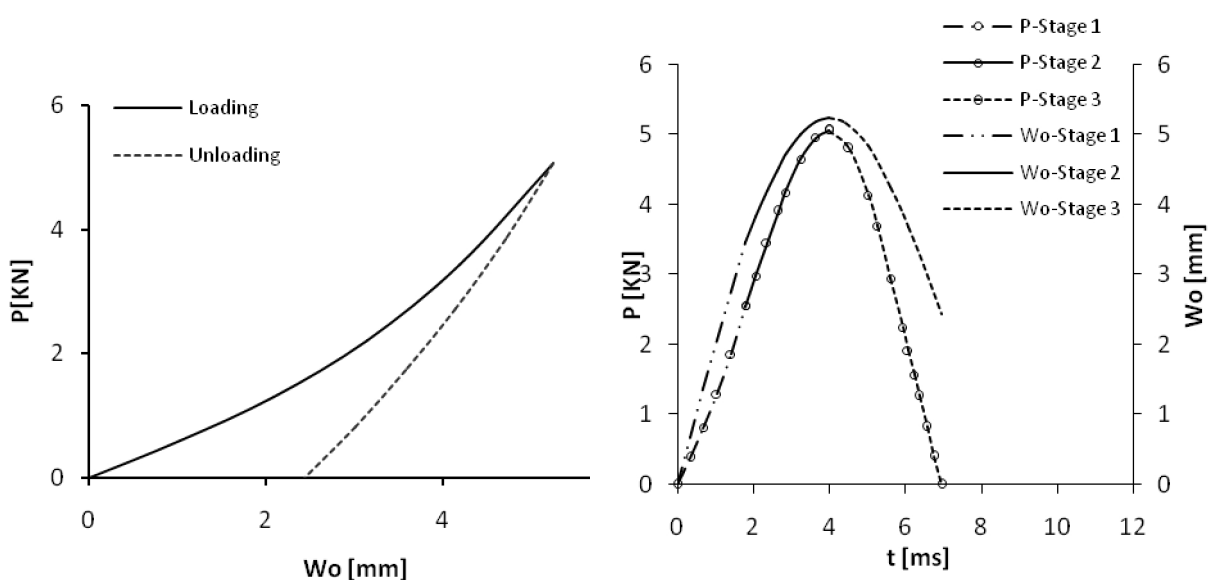


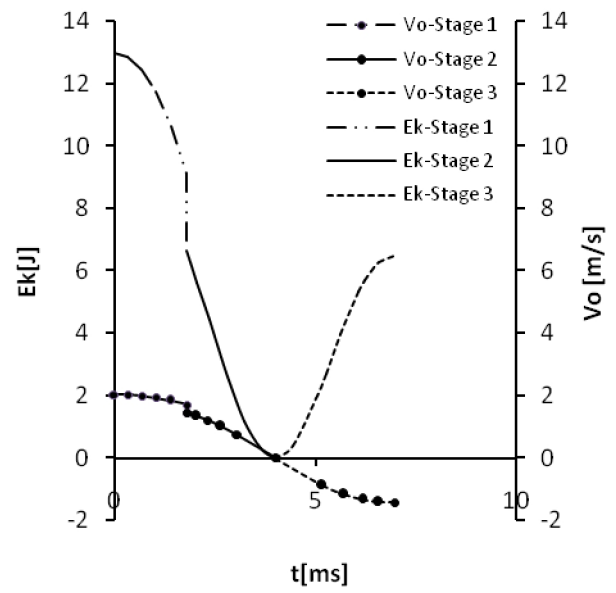
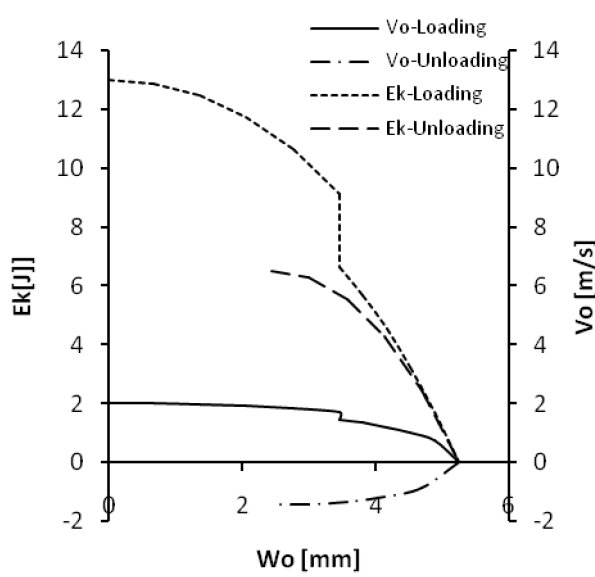
 : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.256mm)

 : Στρώση UD FM94/S2 prepreg 0° (πάχος : 0.125mm)

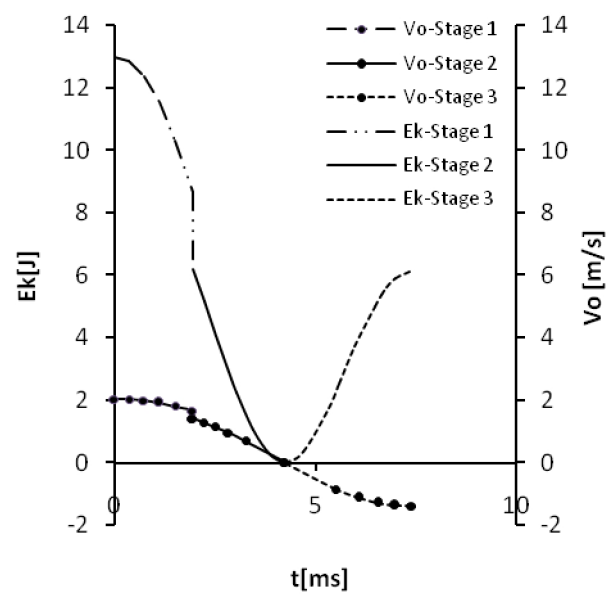
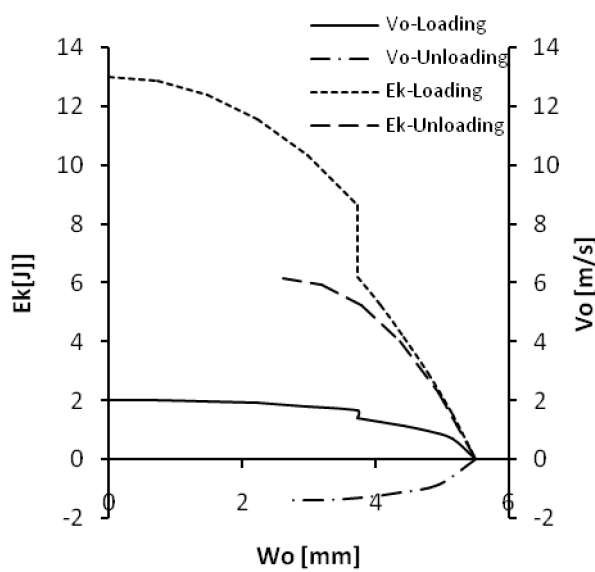
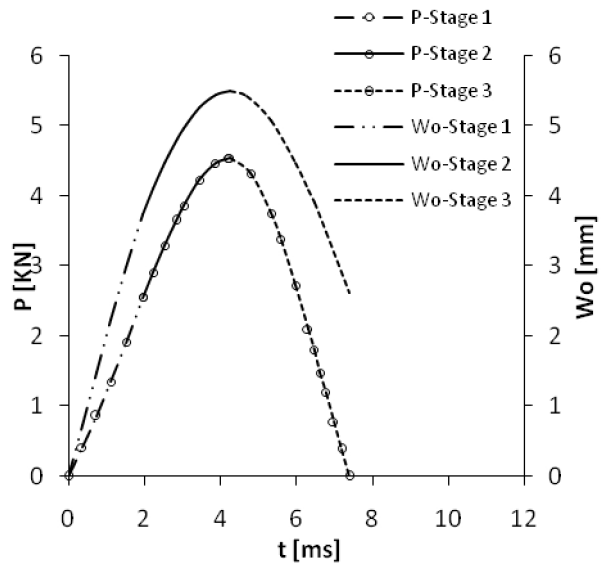
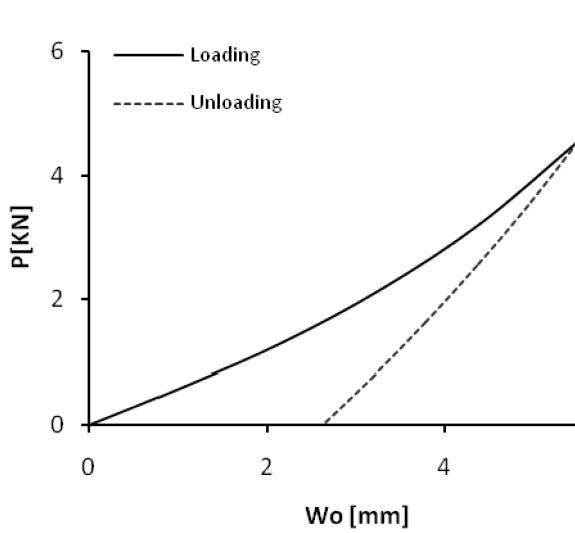
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

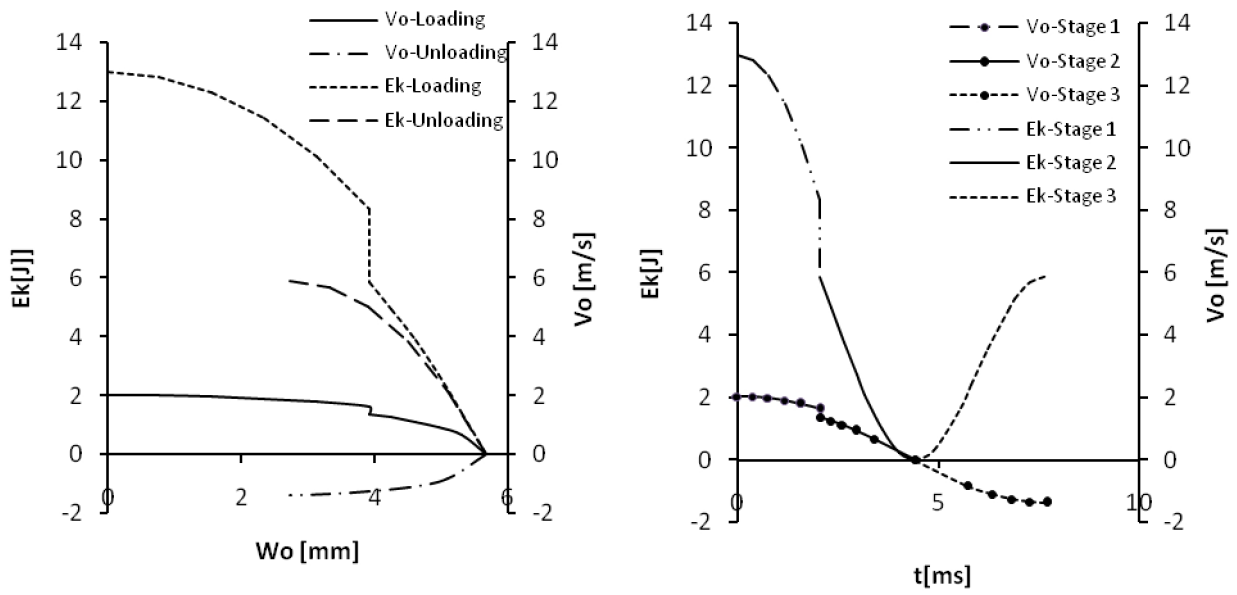
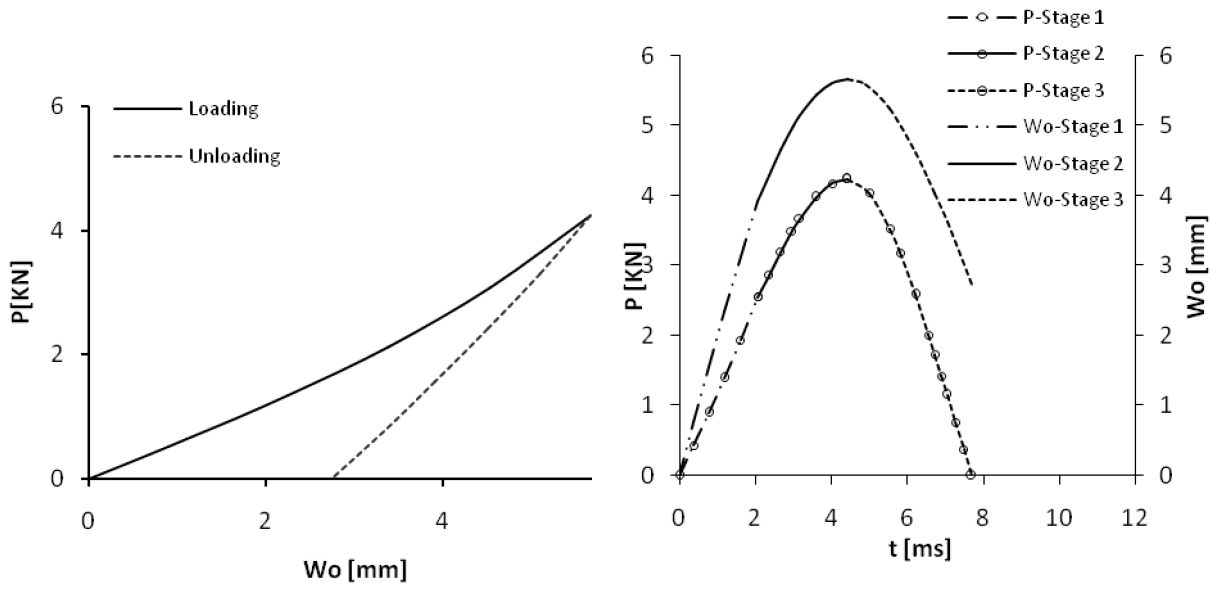




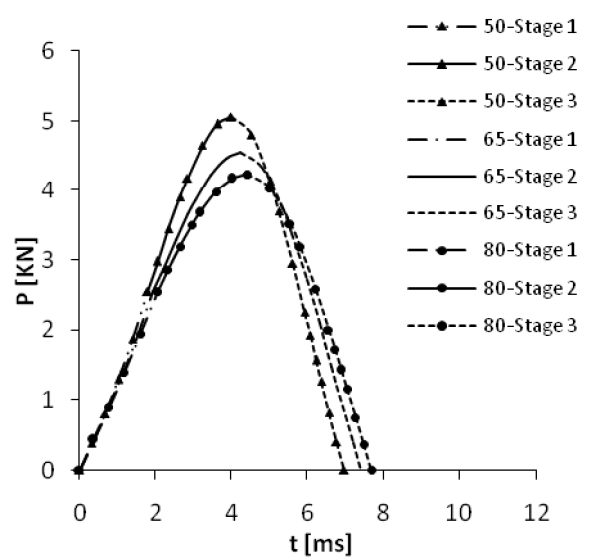
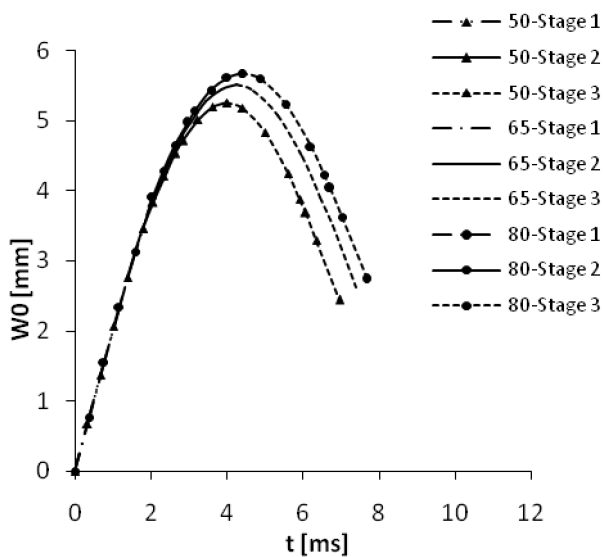
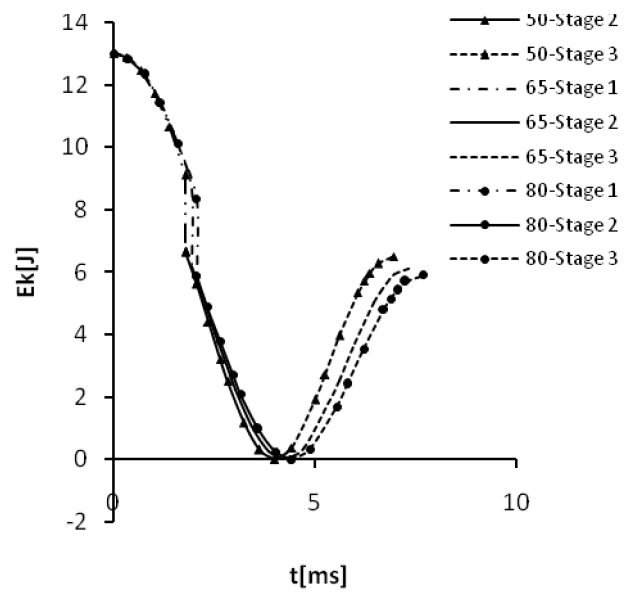
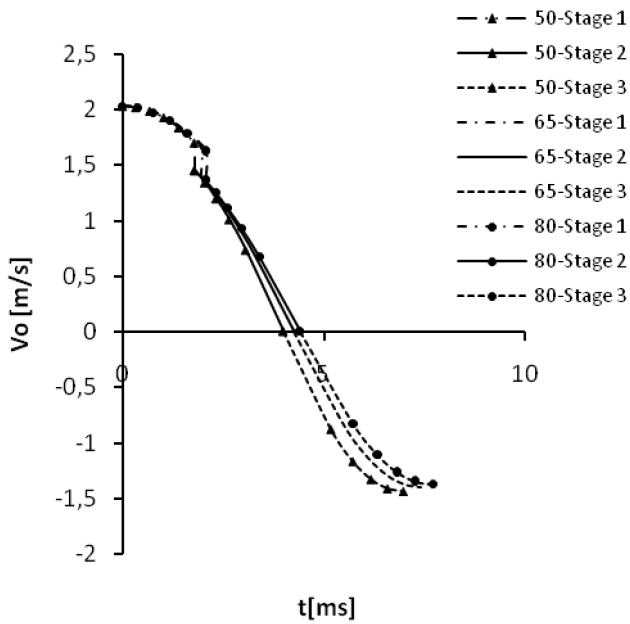
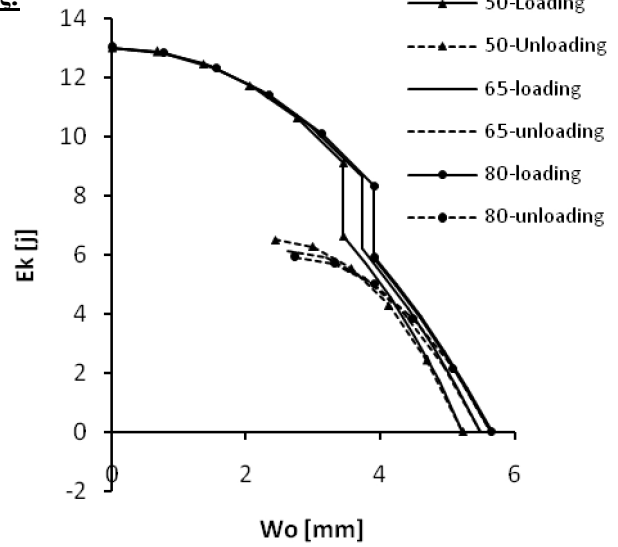
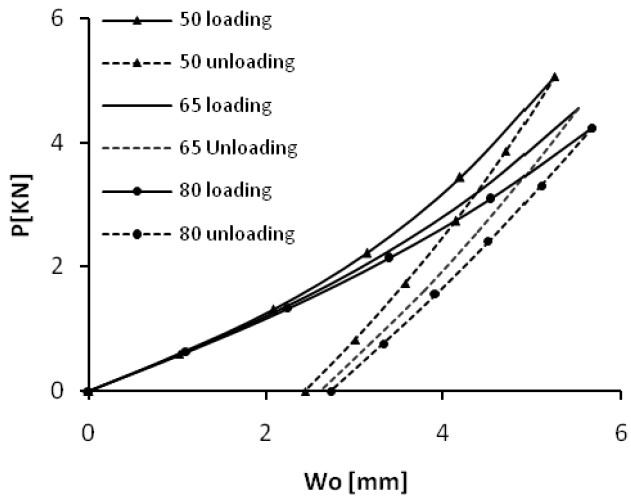
- radius 65mm



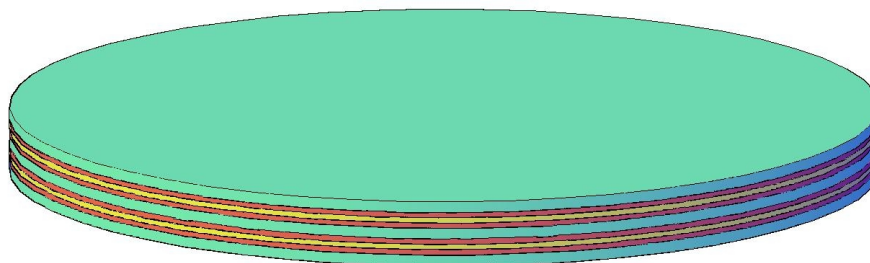
- radius 80mm




- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.




2.7 Glare4-3/2-0.317



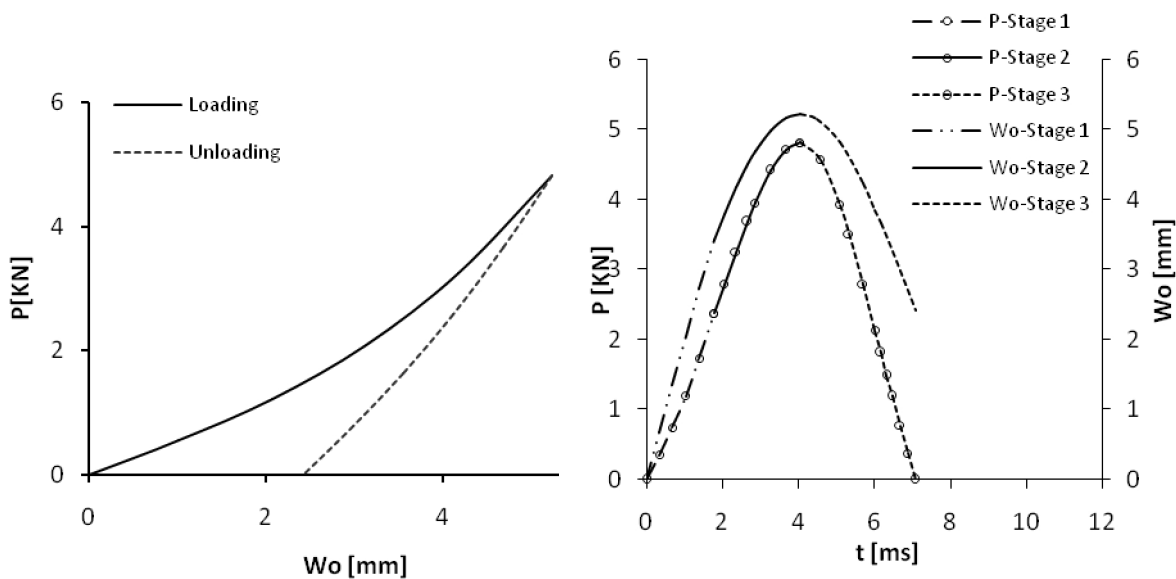
 : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.317mm)

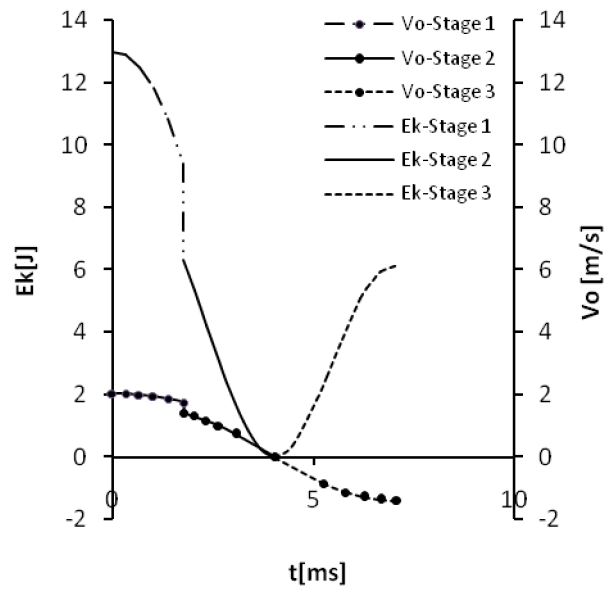
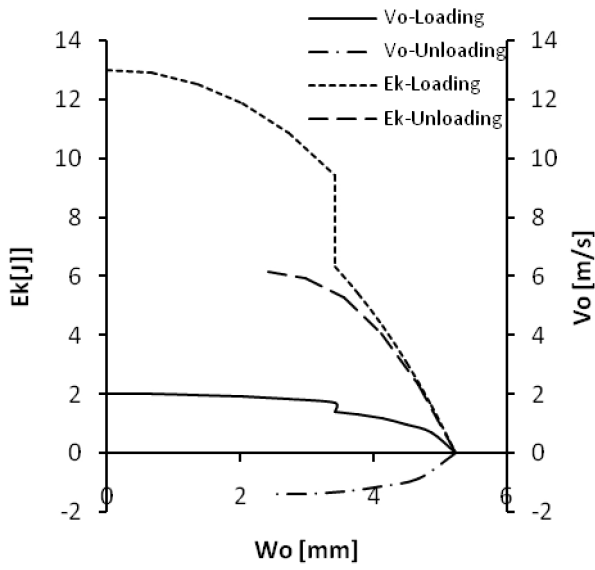
 : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 0° (πάχος : 0.125mm)

 : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 90° (πάχος : 0.125mm)

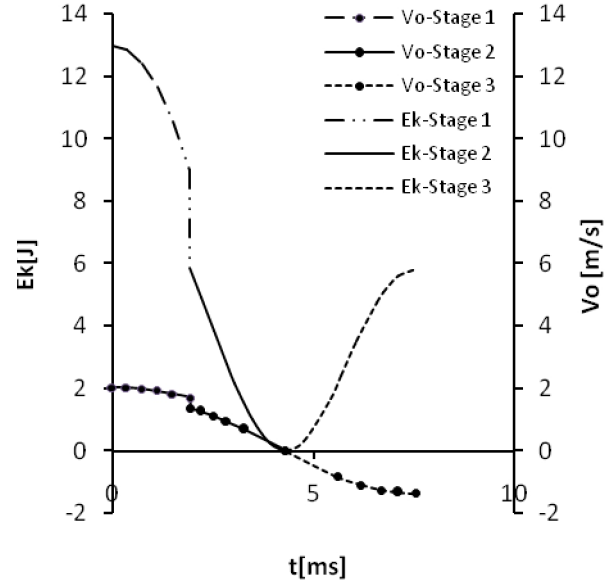
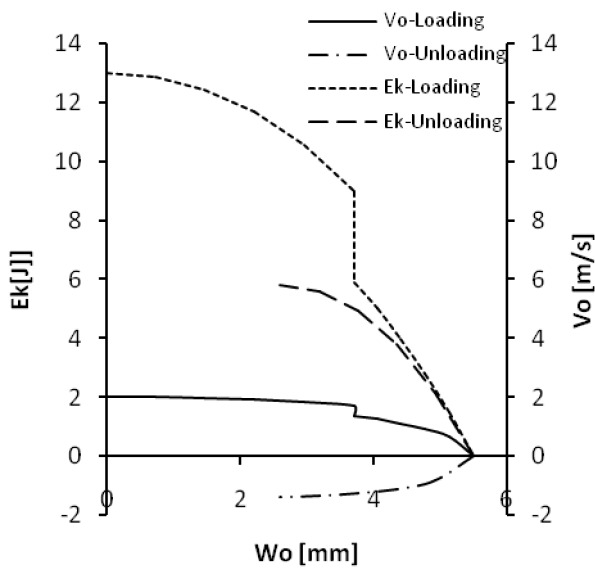
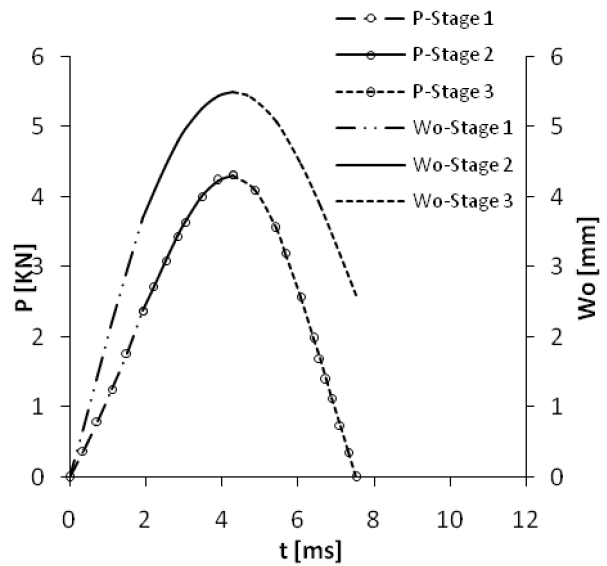
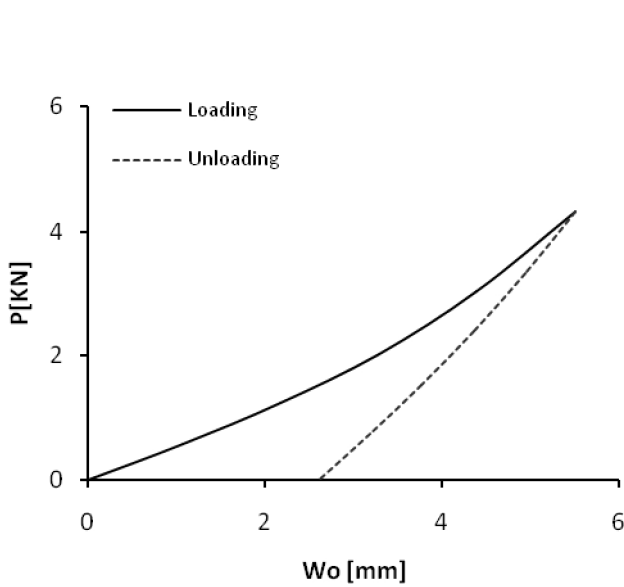
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

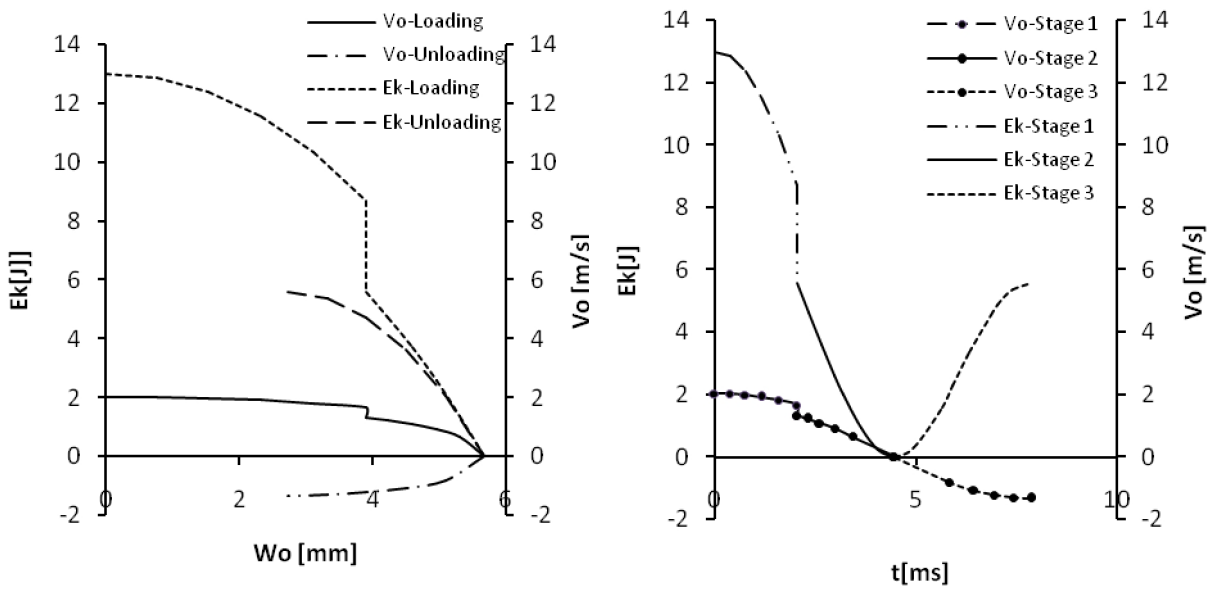
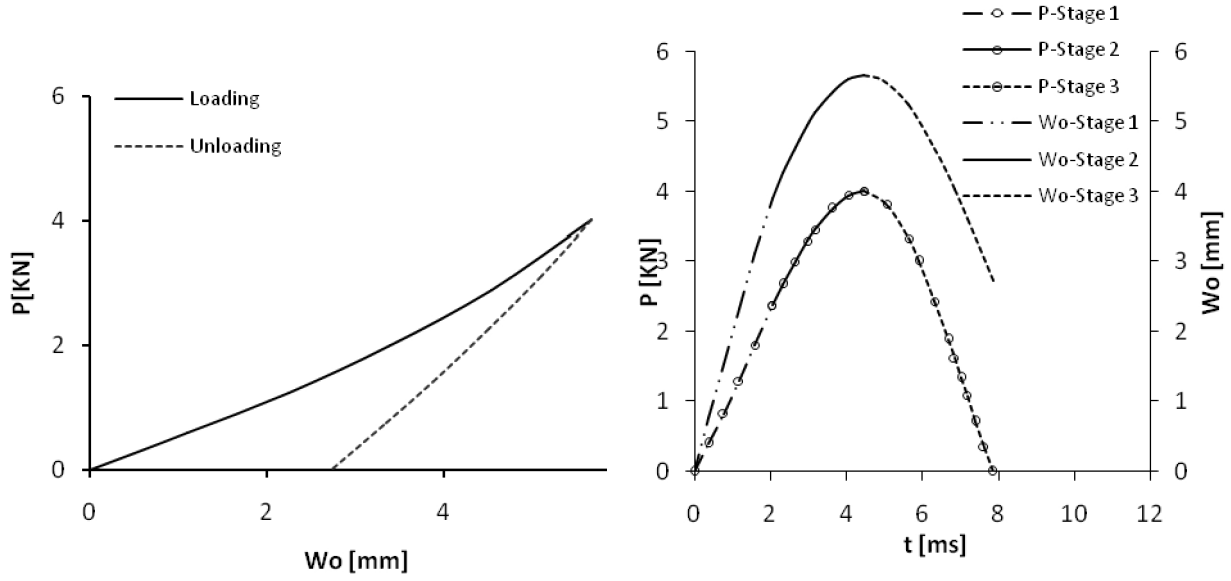




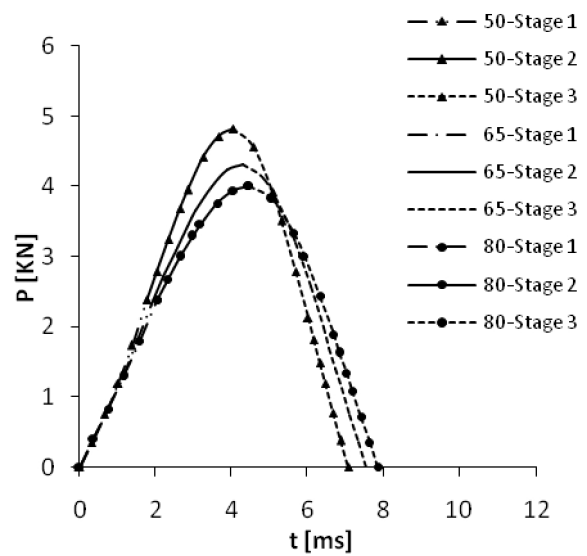
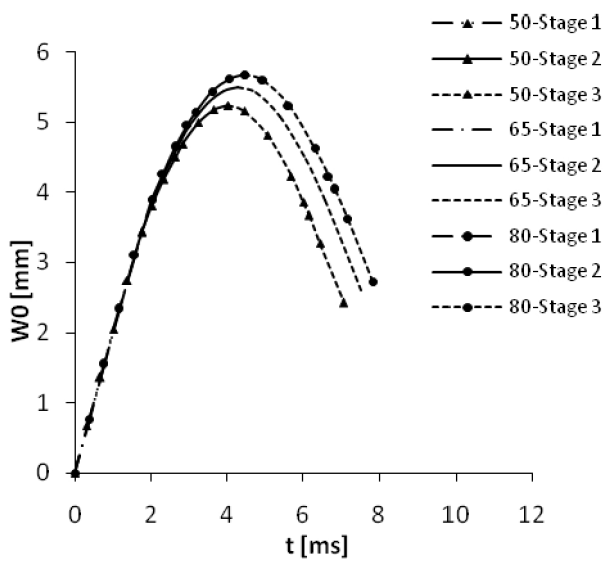
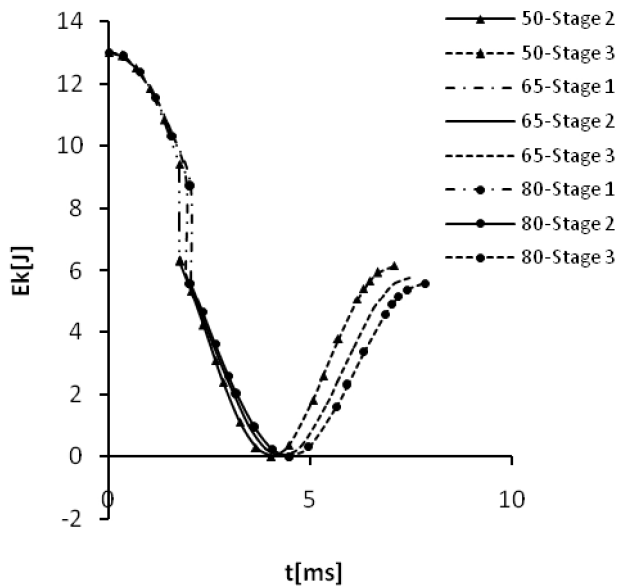
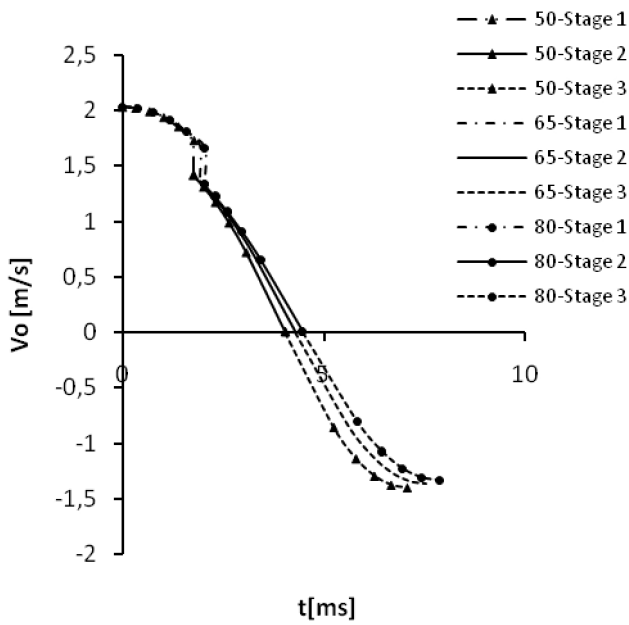
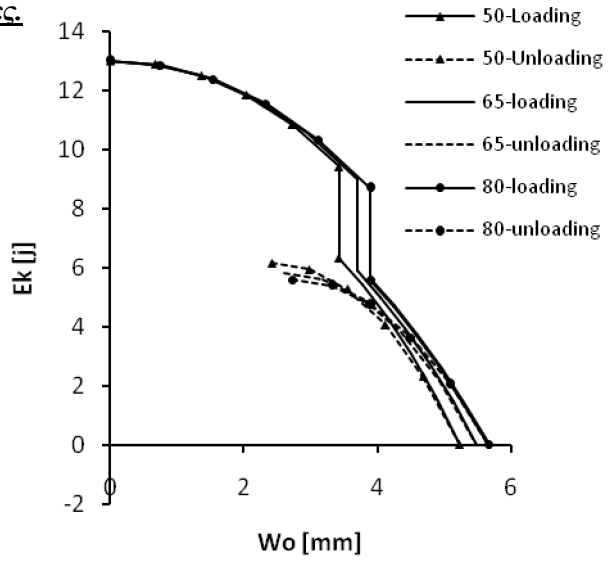
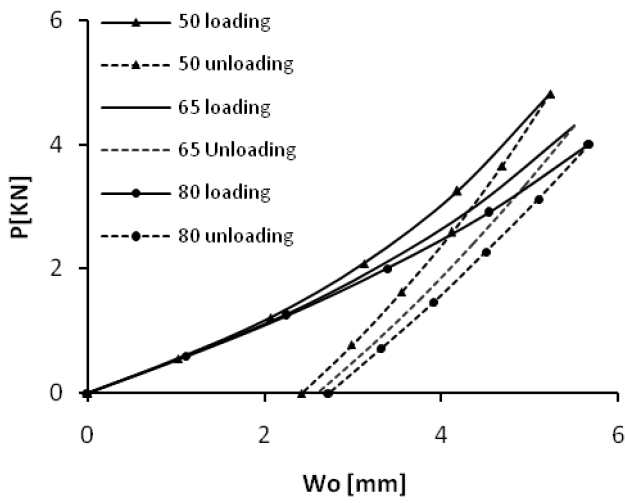
- radius 65mm



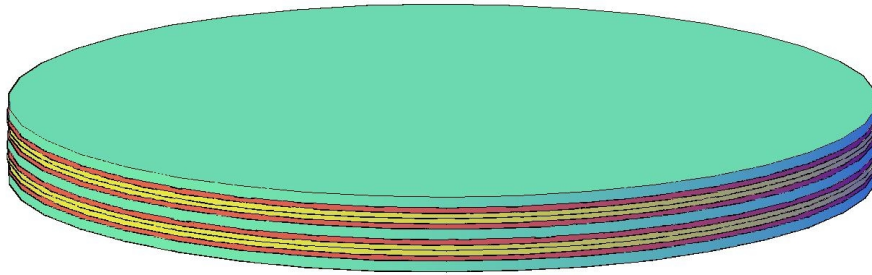
- radius 80mm




- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.




2.8 Glare5-3/2-0.233



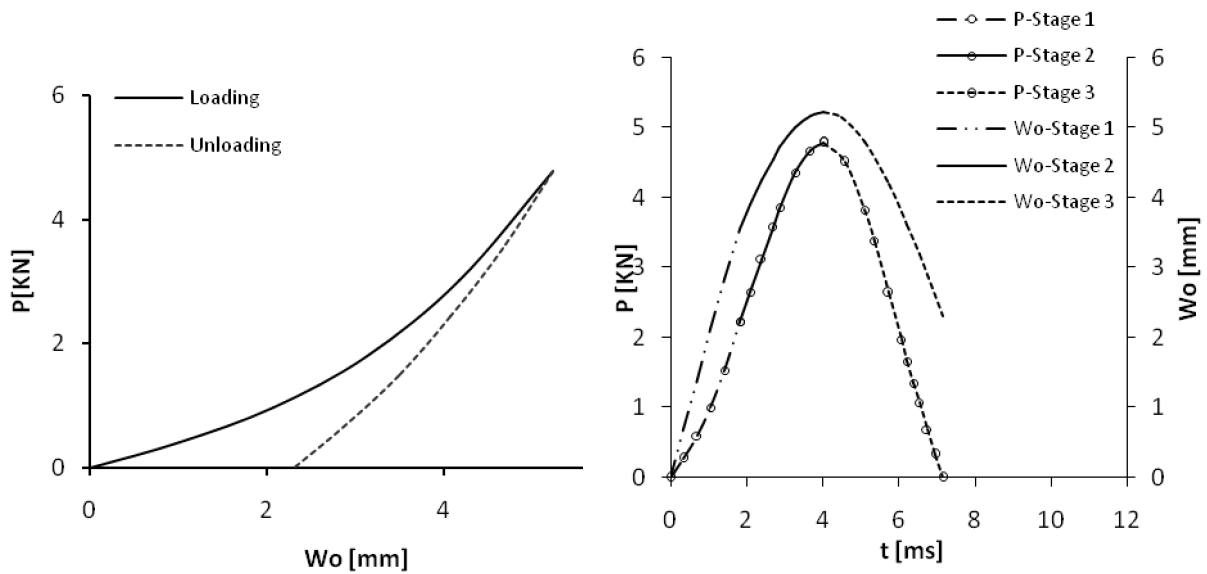
 : Στρώση Aluminum (πάχος : 0.233mm)

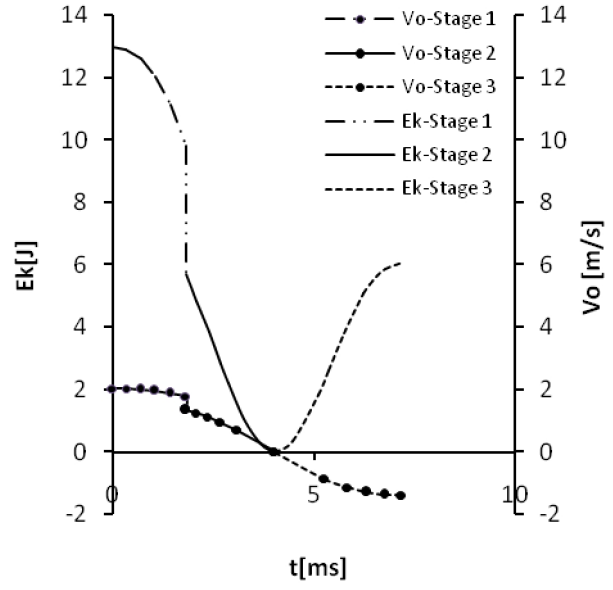
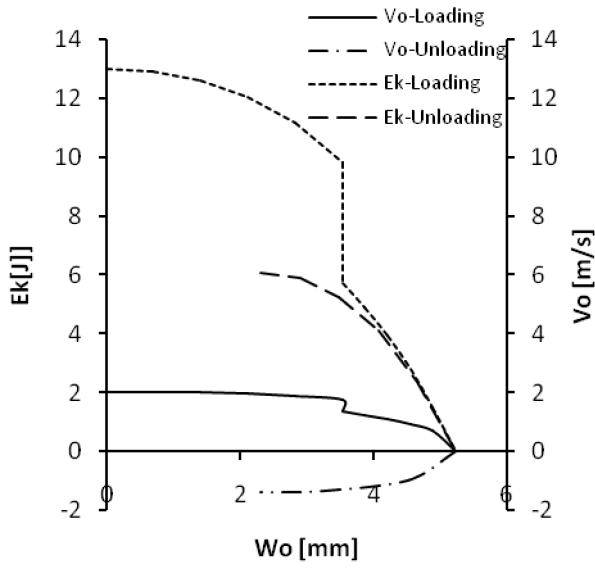
 : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 0° (πάχος : 0.125mm)

 : Στρώση UD FM94/S2 prepeg 90° (πάχος : 0.125mm)

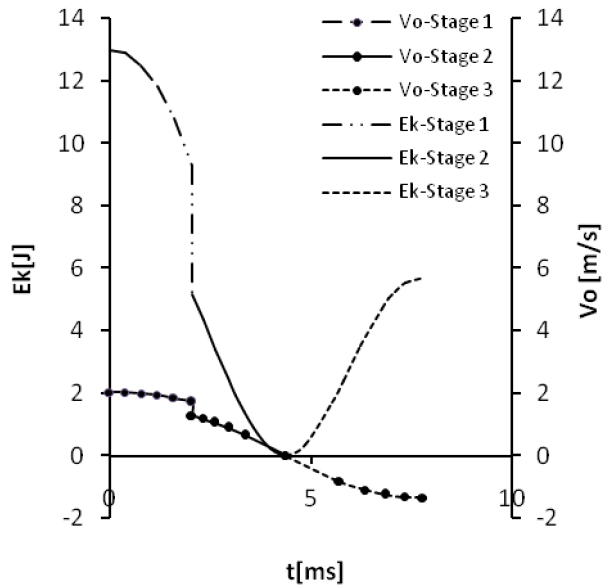
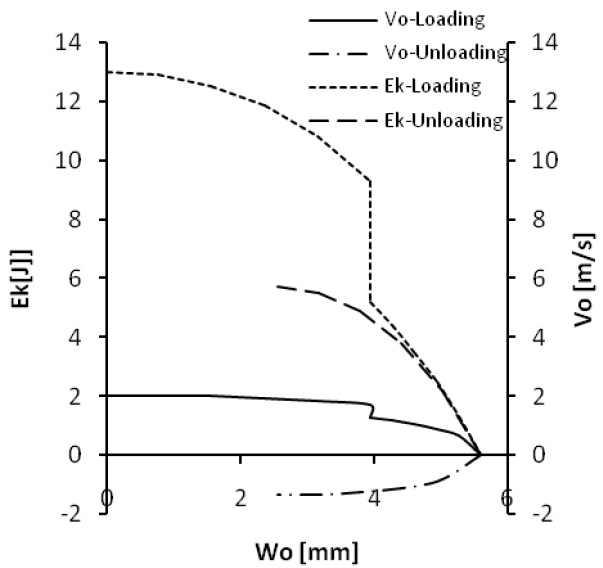
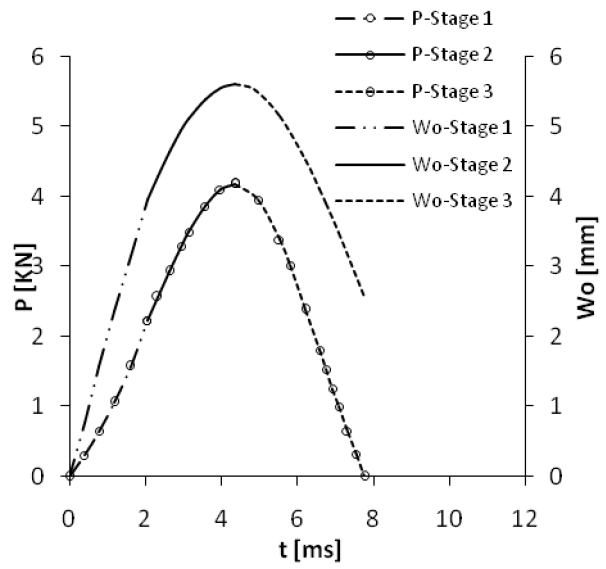
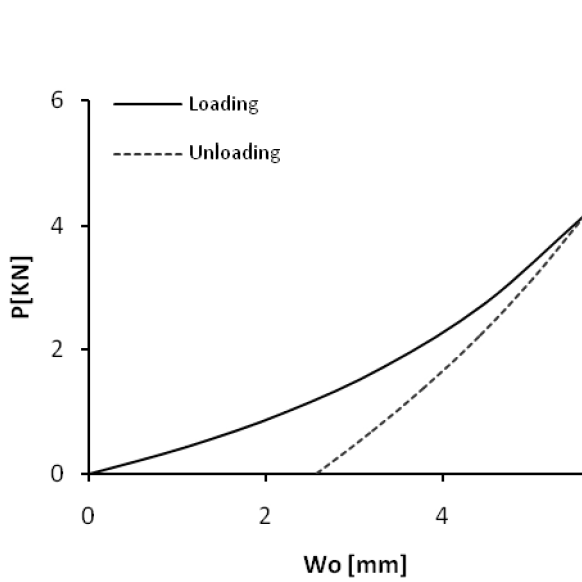
Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αναλυτικές σχέσεις του κεφαλαίου 2, ανάλογα με την ακτίνα, για τον συγκεκριμένο τύπο Glare, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

- radius 50mm

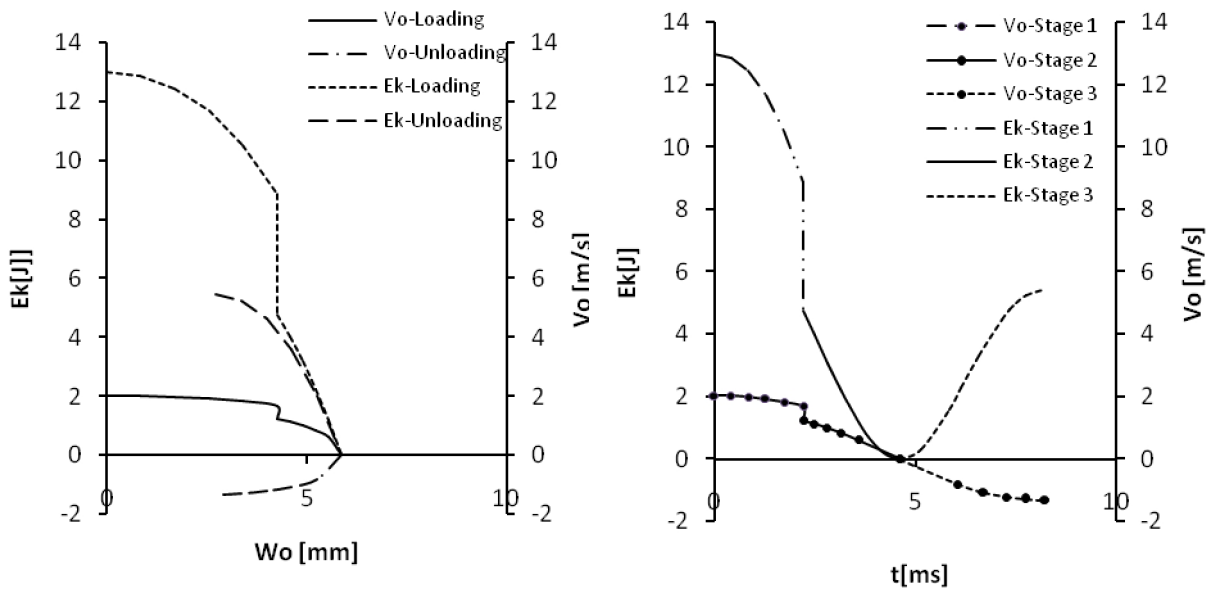
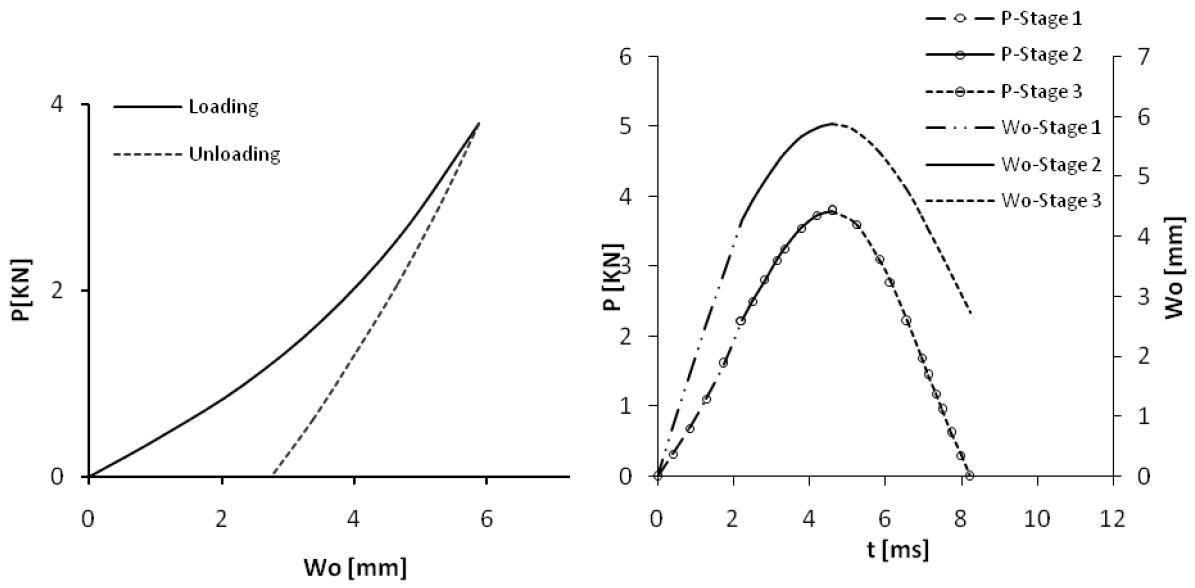




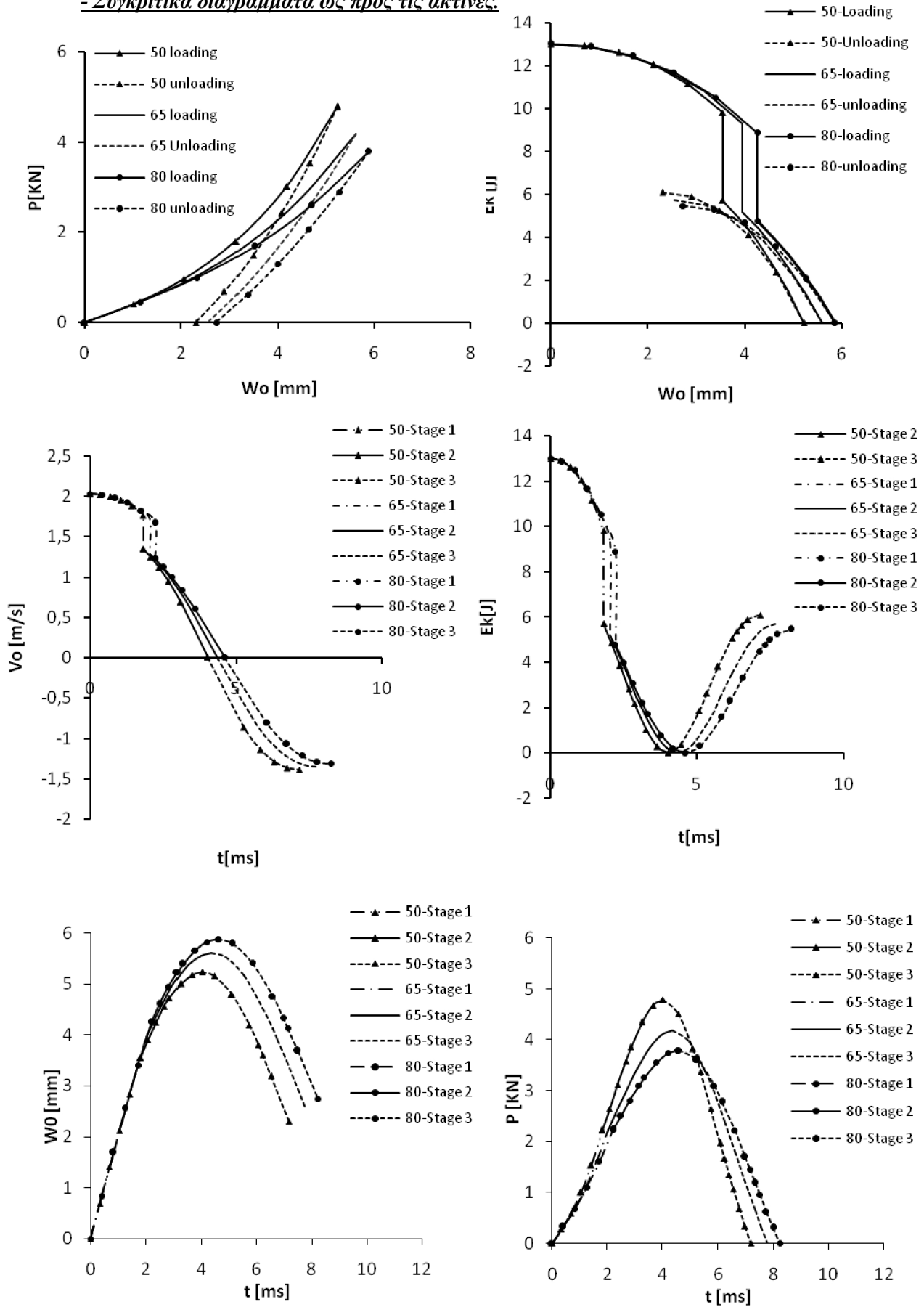
- radius 65mm



- radius 80mm



- Συγκριτικά διαγράμματα ως προς τις ακτίνες.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Ανάλυση αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

1. Σύγκριση δοκιμίων ίδιου βάρους

Στη σύγκριση ιδιοτήτων πλακών Glare που διαθέτουν ίδιο βάρος ως κοινό πεδίο σύγκρισης (μέγιστη διακύμανση βάρους $\pm 0,06\%$), επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν οι ακόλουθοι τύποι Glare :

- Glare2A-4/3-0,256
- Glare2A-3/2-0,4
- Glare3-3/2-0,4
- Glare4-3/2-0,342
- Glare5-3/2-0,283

Τα ανωτέρω υλικά για λόγους απλοποίησης και συντομίας των παραπομπών τους στο κείμενο κωδικοποιούνται ως ακολούθως :

- Το Glare2A-4/3-0,256 ως B1
- Το Glare2A-3/2-0,4 ως B2
- Το Glare3-3/2-0,4 ως B3
- Το Glare4-3/2-0,342 ως B4
- Το Glare5-3/2-0,283 ως B5.

Έκαστο από τα ανωτέρω δοκίμια είναι κυκλικής γεωμετρίας και μελετήθηκε η απόκρισή του σε τρεις διαφορετικές ακτίνες α :

- $\alpha=50\text{mm}$
- $\alpha=65\text{mm}$
- $\alpha=80\text{mm}$,

Έτσι για την σύγκριση πλακών Glare ίδιου βάρους μελετήθηκαν συνολικά 15 διαφορετικές περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων ως προς τα διάφορα κριτήρια - σχεδιαστικές παράμετροι, φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα, και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

WEIGHT-50mm	2A-4/3-0,256 (B1)	2A-3/2-0,4 (B2)	3-3/2-0,4 (B3)	4-3/2-0,342 (B4)	5-3/2-0,283 (B5)
MFV(%)	57,7	70,6	70,6	57,8	45,9
kp	564,76	661,83	661,83	565,86	468,24
kel	14,50	9,67	9,67	14,50	19,34
Pareal	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31
Pav	2428,52	2535,18	2535,18	2428,92	2330,65
me	0,002757790	0,002758817	0,002758817	0,002761348	0,002758542
Pdelamination	2552,90	2513,80	2513,80	2557,70	2586,50
Pmax	5062,24	4965,89	4966,17	4771,87	4539,25
Wodelamination	3,46	3,28	3,28	3,46	3,60
Womax	5,25	5,31	5,31	5,08	4,88
Wopermanent	2,44	2,54	2,54	2,37	2,22
tdelamination	1,79	1,70	1,70	1,80	1,86
tPmax	4,00	4,07	4,07	3,94	3,81
ttotal	6,96	7,02	7,02	6,94	6,88
U prin delamination	1,70	1,71	1,71	1,70	1,71
U meta delamination	1,45	1,54	1,54	1,36	1,19
U permanent	-1,44	-1,44	-1,44	-1,37	-1,31
Ek prin delamination	9,11	9,16	9,16	9,10	9,16
Ek meta delamination	6,64	7,42	7,42	5,80	4,49
απορροφηση del	2,47	1,74	1,74	3,30	4,67
Ek permanent	6,49	6,48	6,48	5,92	5,40
Eabsorbed	6,51	6,52	6,52	7,08	7,60
WEIGHT-65mm					
kp	564,76	661,83	661,83	565,86	468,24
kel	8,58	5,72	5,72	8,58	11,44
Pareal	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31
Pav	2428,52	2535,18	2535,18	2428,92	2330,65
me	0,00466067	0,00466240	0,00466240	0,00466668	0,00466194
Pdelamination	2552,90	2513,80	2513,80	2557,70	2586,50
Pmax	4543,54	4579,17	4579,37	4297,26	4014,67
Wodelamination	3,73	3,44	3,44	3,73	3,98
Womax	5,51	5,49	5,49	5,32	5,18
Wopermanent	2,62	2,66	2,66	2,53	2,42
tdelamination	1,95	1,80	1,80	1,95	2,08

tPmax	4,25	4,25	4,25	4,17	4,07
ttotal	7,41	7,35	7,35	7,36	7,37
U prin delamination	1,66	1,68	1,68	1,66	1,65
U meta delamination	1,40	1,51	1,51	1,30	1,11
U permanent	-1,40	-1,40	-1,40	-1,34	-1,27
Ek prin delamination	8,66	8,87	8,87	8,65	8,57
Ek meta delamination	6,19	7,14	7,14	5,35	3,90
απορροφηση del	2,47	1,74	1,74	3,30	4,67
Ek permanent	6,14	6,20	6,20	5,61	5,08
Eabsorbed	6,86	6,80	6,80	7,39	7,92
WEIGHT-80mm					
kp	564,76	661,83	661,83	565,86	468,24
kel	5,66	3,78	3,78	5,67	7,55
Pareal	4308,20	4309,80	4309,80	4313,75	4309,37
Pav	2428,52	2535,18	2535,18	2428,92	2330,65
me	0,0070599	0,0070626	0,0070626	0,0070691	0,0070619
Pdelamination	2552,90	2513,80	2513,80	2557,70	2586,50
Pmax	4235,00	4362,15	4362,30	4017,18	3690,69
Wodelamination	3,92	3,54	3,54	3,92	4,27
Womax	5,67	5,59	5,59	5,47	5,38
Wopermanent	2,73	2,74	2,74	2,64	2,55
tdelamination	2,06	1,86	1,86	2,06	2,25
tPmax	4,41	4,36	4,36	4,32	4,23
ttotal	7,70	7,54	7,54	7,63	7,70
U prin delamination	1,63	1,66	1,66	1,63	1,61
U meta delamination	1,37	1,49	1,49	1,26	1,05
U permanent	-1,37	-1,39	-1,39	-1,31	-1,24
Ek prin delamination	8,34	8,70	8,70	8,33	8,11
Ek meta delamination	5,87	6,96	6,96	5,03	3,45
απορροφηση del	2,47	1,74	1,74	3,30	4,67
Ek permanent	5,91	6,04	6,04	5,41	4,87
Eabsorbed	7,09	6,96	6,96	7,59	8,13

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών Glare ίδιου βάρους.

Φορτίο αποκόλλησης (Pdelamination)

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 1, τη μέγιστη τιμή του φορτίου αποκόλλησης ανεξαρτήτως ακτίνας δοκιμίου έχει το B5, ενώ την ελάχιστη έχουν από κοινού τα B2 και B3. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι σύμφωνα με την αναλυτική λύση το φορτίο αποκόλλησης είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του πάχους του υλικού υψωμένο στον κύβο. Ανάμεσα στα πέντε δοκίμια, το B5 έχει το μεγαλύτερο πάχος (1,849mm), ενώ τα B2 και B3 έχουν το μικρότερο (1,7mm).

Βύθιση αποκόλλησης (Wodelamination)

Σε πλήρη αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση παρατηρούμε ότι τη μέγιστη τιμή της βύθισης στην οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αποκόλλησης των στρώσεων, έχει το B5, ενώ την ελάχιστη έχουν από κοινού τα B2 και B3 .

Μέγιστο κρουστικό φορτίο (Pmax), μέγιστο σημείο βύθισης (Womax) και μόνιμη βύθιση (Wopermanent)

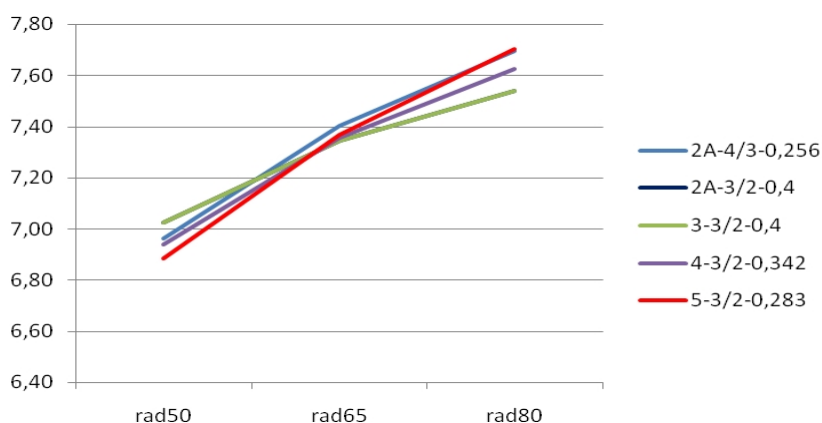
Ακριβώς τα αντίστροφα συμπεράσματα προκύπτουν για τις παραμέτρους Pmax, Womax, Wopermanent. Πιο συγκεκριμένα, ανεξαρτήτως ακτίνας, τα B2 και B3 διαθέτουν (με ελάχιστη διαφοροποίηση) τη μέγιστη τιμή τόσο του μέγιστου κρουστικού φορτίου, όσο και του μέγιστου σημείου βύθισης και της τελικής μόνιμης βύθισης ανάμεσα στους πέντε τύπους Glare, ενώ το B5 έχει την ελάχιστη τιμή στις αντίστοιχες παραμέτρους.

Σύγκριση ως προς τη διαφορετική διαστρωμάτωση

Ενδιαφέρον αποτελεί η σύγκριση των B2 και B3 τα οποία παρουσιάζουν στο σύνολο των παραμέτρων, τιμές που σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους. Η μοναδική διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στα δύο αυτά υλικά είναι κατασκευαστική, και εντοπίζεται στη διαφορετική διαστρωμάτωσή τους. Ειδικότερα το B2 έχει lay-up : [Al/0/0/Al/0/0/Al], ενώ το B3 έχει lay-up : [Al/0/90/Al/90/0/Al]. Επομένως προκύπτει ότι όσον αφορά τα συγκεκριμένα αυτά υλικά, η μεταβολή του προσανατολισμού των δύο στρώσεων συνθέτου υλικού κατά 90° δεν επιφέρει καμία ουσιαστική επίδραση στις παραμέτρους που εξετάζουμε. Αντίστοιχα ευρήματα αναφέρονται από τους Yaghoubi & Liaw [55], οι οποίοι μελέτησαν πειραματικά και αριθμητικά κρούσεις πάνω σε δοκίμια Glare5-3/2 με διαφορετικού προσανατολισμού στρώσεις συνθέτου (μονοκατευθυντήριες, κάθετες, διασταυρούμενες, και σχεδόν ισότροπες). Επιπλέον το υλικό της μελέτης τους αποτελούσαν από τα ίδια υλικά των δοκιμών της παρούσης εργασίας, δηλ. στρώσεις 2024-T3 και S2-glass epoxy. Η έρευνά τους κατέληξε ότι τα δοκίμια με μονοκατευθυντήριες, κάθετες και διασταυρούμενες στρώσεις συνθέτου διαθέτουν σχεδόν την ίδια αντίσταση διάτρησης στο βλήμα.

Ολική διάρκεια κρούσης (t_{total})

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παράμετρος της ολικής διάρκειας του φαινομένου της κρούσης, η οποία όπως προκύπτει και από το σχέδιο 1. παρουσιάζει εξάρτηση τόσο από τον τύπο Glare, όσο και από την ακτίνα του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα για ακτίνα 50mm, το δοκίμιο με τον μικρότερο χρόνο κρούσης είναι το B5, ενώ για ακτίνα 80mm το δοκίμιο με τον μεγαλύτερο χρόνο κρούσης είναι επίσης το B5. Επιπλέον για ακτίνα 50mm, τα δοκίμια με τον μεγαλύτερο χρόνο κρούσης είναι τα B2 και B3, ενώ για ακτίνα 80mm τα δοκίμια με τον μικρότερο χρόνο κρούσης είναι πάλι τα B2 και B3. Παρόλα αυτά οι χρονικές διαφορές όπως φαίνεται και στον πίνακα 1, είναι ορισμένων 10^{-4} sec, οπότε η συγκεκριμένη διαφοροποίηση έχει περιορισμένη πρακτική σημασία.



Σχέδιο 1. Σύγκριση ολικής διάρκειας κρούσης

Ενέργεια αποκόλλησης (Edel)

Την μικρότερη απορρόφηση ενέργειας λόγω αποκόλλησης την έχουν ανεξαρτήτως ακτίνας, τα δοκίμια B2 και B3, ενώ την μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας λόγω αποκόλλησης την έχει το δοκίμιο B5, επίσης ασχέτως ακτίνας. Η απορρόφηση ενέργειας του B5 είναι σχεδόν τριπλάσια (ουσιαστικά 268%) της αντίστοιχης των B2 και B3, φαινόμενο που εξηγείται από το γεγονός ότι λόγω κατασκευής ο τύπος B5 εμπεριέχει έξι διεπιφάνειες συνθέτου υλικού, (οι οποίες συμμετέχουν στο φαινόμενο της αποκόλλησης), ενώ τα B2 και B3 έχουν μόνο δύο, δηλαδή υποτριπλάσιο αριθμό.

Ολική Ενέργεια Απορρόφησης (Eabsorbed)

Η ολική ενέργεια που απορροφάει το Glare σε σχέση με την ολική αρχική ενέργεια του βλήματος ($E_{kin}=13j$) προκύπτει ως η διαφορά της αρχικής κινητικής ενέργειας του βλήματος, με την κινητική ενέργεια που αυτό έχει μετά το τέλος του φαινομένου της κρούσης. Η συγκεκριμένη ενέργεια καταναλώνεται από το Glare κυρίως μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα, αλλά και μέσω

των αποκολλήσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του. Όπως συμβαίνει και στην παράμετρο ενέργειας αποκόλλησης (Edel), τα δοκίμια B2 και B3, ανεξαρτήτως ακτίνας έχουν την μικρότερη ολική απορρόφηση ενέργειας, ενώ την μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας έχει το δοκίμιο B5. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση της ενέργειας αποκόλλησης (Edel) υπάρχουν οι ακόλουθες δύο σημαντικές διαφορές :

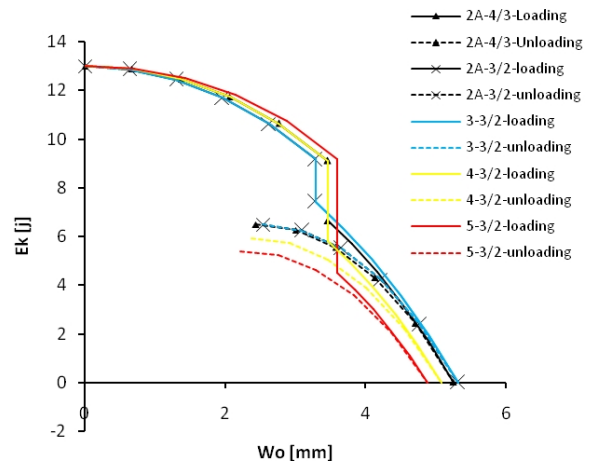
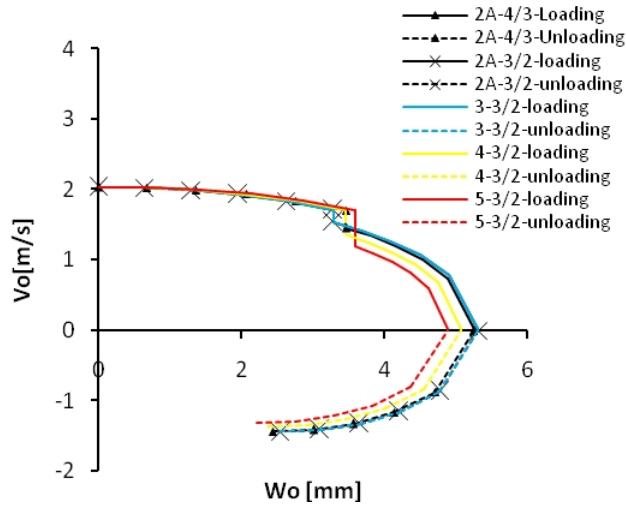
α. Στην περίπτωση της ενέργειας αποκόλλησης το ποσοστό της διαφοράς μέγιστης τιμής ενέργειας (του B5) μείον ελάχιστης (των B2 και B3) ως προς την ελάχιστη τιμή ενέργειας (των B2 και B3), διαφέρει σχεδόν σταθερά και για τις τρεις ακτίνες κατά 168%, ενώ στην περίπτωση της ολικής απορρόφησης το αντίστοιχο ποσοστό είναι μόλις 17%.

β. Οι ενέργειες αποκόλλησης είναι σταθερές και δεν επηρεάζονται από την μεταβολή των ακτίνων (αφού η τιμή τους καθορίζεται από κατασκευαστικούς παράγοντες και συγκεκριμένα από το πλήθος διεπιφανειών των συνθέτων υλικών εντός του Glare). Αντίθετα η ολική απορροφούμενη ενέργεια μεταβάλλεται με την αύξηση της ακτίνας (συγκεκριμένα αυξάνεται) δεδομένου ότι η ταχύτητα (κατ' επέκταση η κινητική ενέργεια) επηρεάζεται από το συντελεστή Kel, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της ακτίνας.

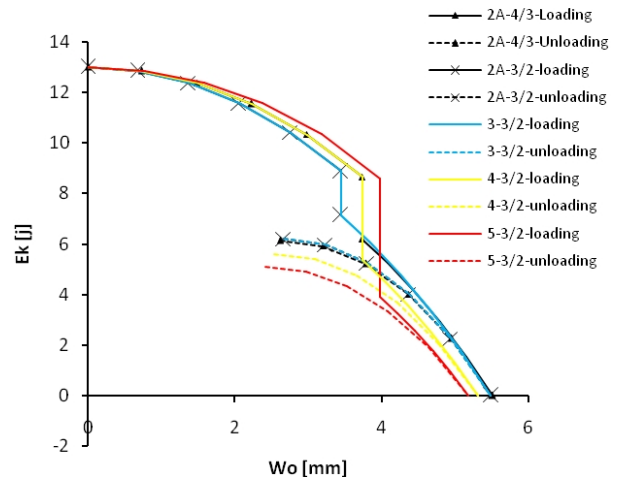
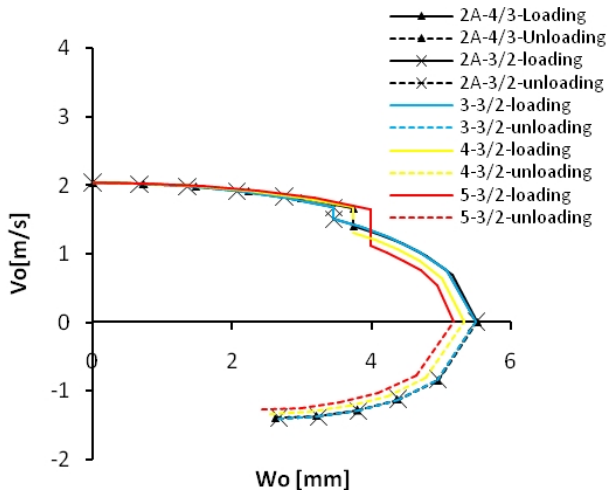
Ταχύτητα ως προς μετατόπιση

Όπως προκύπτει από τα παρακάτω διαγράμματα, τα δοκίμια B5 παρουσιάζουν σε όλες τις ακτίνες την μεγαλύτερη πτώση ταχύτητας λόγω αποκολλήσεων (άρα και κινητικής ενέργειας), τη μικρότερη μέγιστη παραμόρφωση (δηλ. παραμόρφωση μηδενικής ταχύτητα, άρα και Ekin) καθώς και την μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση στο τέλος της κρούσης (δηλ. παραμόρφωση τελικής ταχύτητας, άρα και τελικής Ekin).

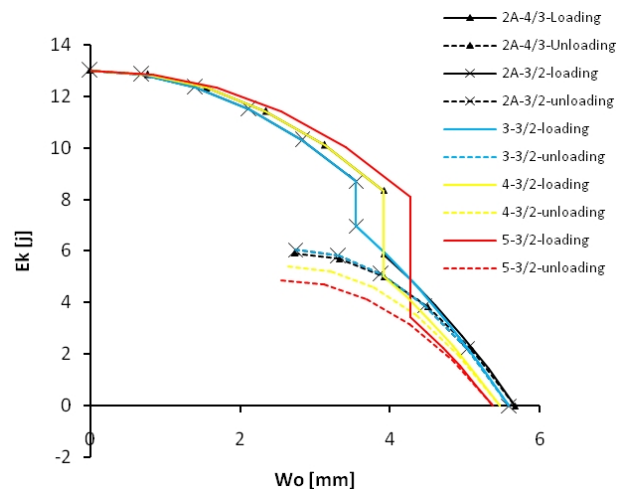
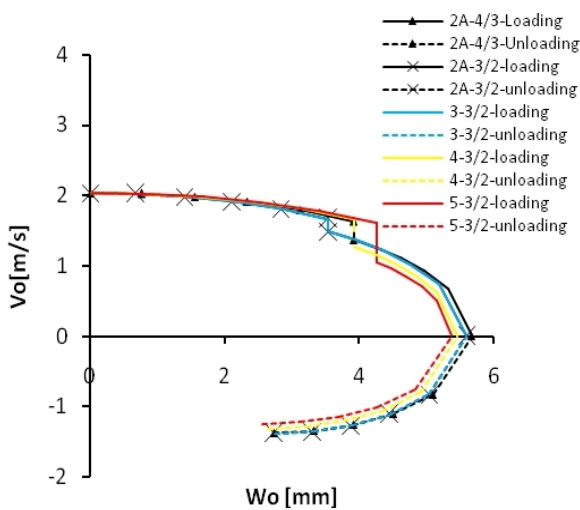
Τα αντίστροφα συμπεράσματα εξάγονται για τους τύπους B2 και B3. Έτσι, όπως προκύπτει από το διάγραμμα και οι δύο συγκεκριμένοι τύποι, έχουν σε όλες τις ακτίνες την μικρότερη πτώση ταχύτητας λόγω αποκολλήσεων, τη μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση καθώς και την μεγαλύτερη παραμένουσα μόνιμη παραμόρφωση.



Διαγράμματα των Vo-Wo και Ek-Wo για ακτίνα 50mm.



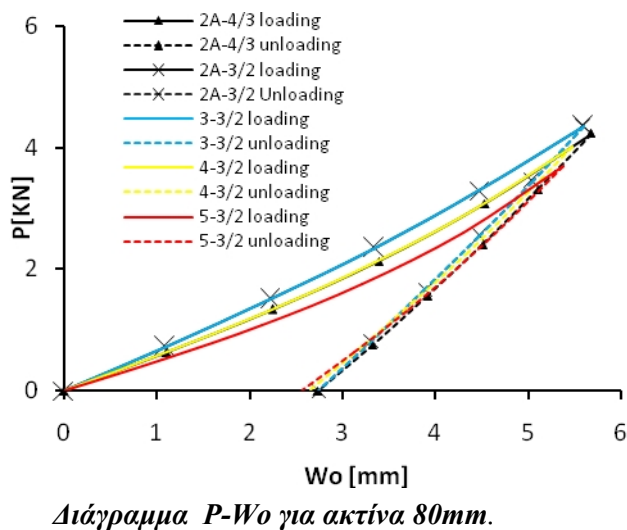
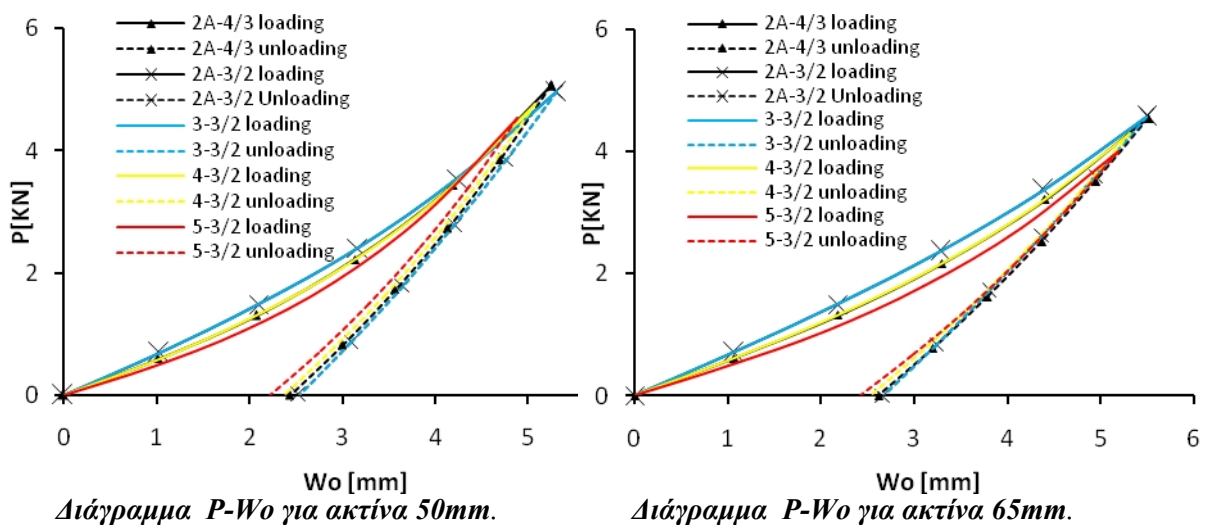
Διαγράμματα των Vo-Wo και Ek-Wo για ακτίνα 65mm.



Διαγράμματα των Vo-Wo και Ek-Wo για ακτίνα 80mm.

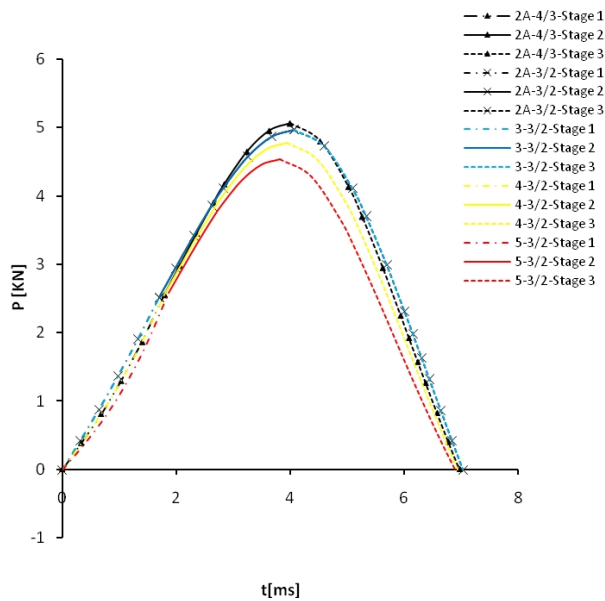
Φορτίο ως προς μετατόπιση

Το κρουστικό φορτίο που αναπτύσσεται στο B5 είναι το χαμηλότερο σε όλο το πεδίο των μετατοπίσεων φόρτισης. Επίσης στον ίδιο τύπο δοκιμίου, παρουσιάζεται η χαμηλότερη maximum τιμή κρουστικού φορτίου εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα δοκίμια ενώ επιπλέον αυτή λαμβάνει χώρα στη μικρότερη μετατόπιση. Τέλος, το σημείο μηδενικής φόρτισης συμβαίνει επίσης στην μικρότερη μετατόπιση, σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

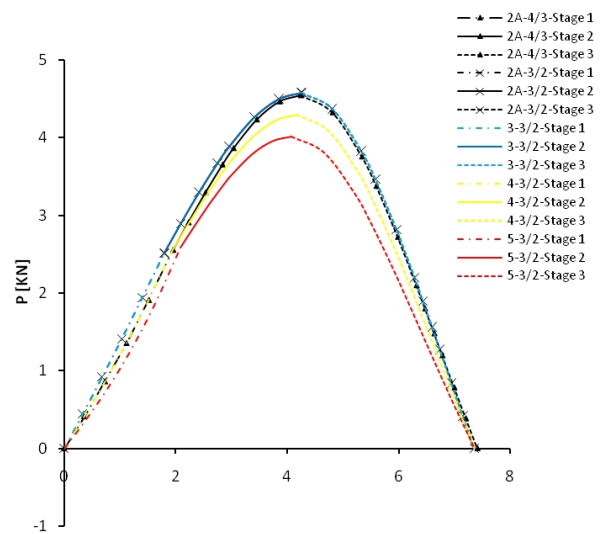


Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα, το B5 παρουσιάζει σε όλο το εύρος του χρόνου, συνεχώς τις χαμηλότερες τιμές φορτίου σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Επίσης το μέγιστο κρουστικό φορτίο (που είναι όπως προαναφέρθηκε και το ελάχιστο όλων) το εμφανίζει συντομότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ η ολοκλήρωση του φαινομένου της κρούσης πραγματοποιείται επίσης στον μικρότερο χρόνο.

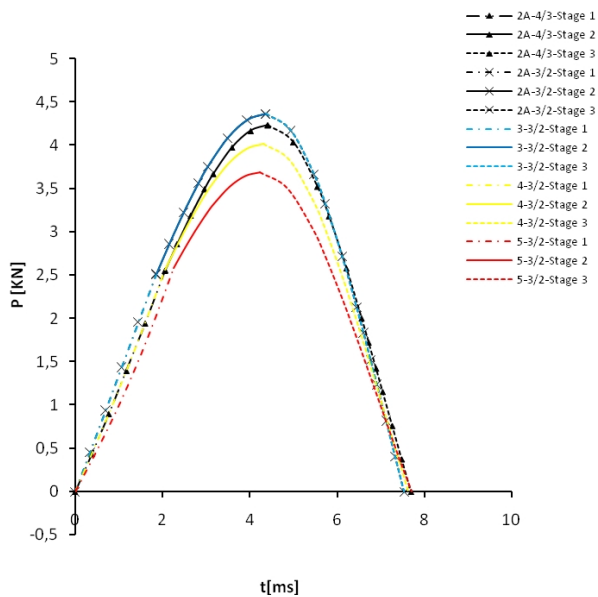
Αντίθετα, τα δοκίμια B2 και B3 έχουν τις υψηλότερες τιμές φόρτισης σχεδόν σε όλο το πεδίο του χρόνου, ανεξαρτήτως ακτίνας.



Διάγραμμα P-t για ακτίνα 50mm.



Διάγραμμα P-t για ακτίνα 65mm.



Διάγραμμα P-t για ακτίνα 80mm.

Κινητική ενέργεια και ταχύτητα ως προς το χρόνο.

Όπως προκύπτει από τα ακόλουθα διαγράμματα, το B5 στην πρώτη φάση κρούσης (μέχρι την αποκόλληση) :

- εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας (άρα και ενέργειας) σε κάθε χρονική στιγμή,

- η απώλεια ενέργειας (άρα και ταχύτητας) που υπόκειται λόγω αποκόλλησης είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τα άλλα δοκίμια,

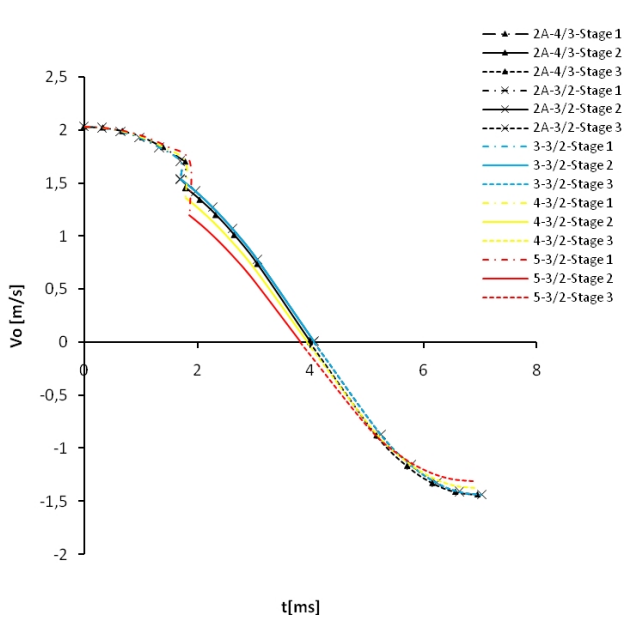
Στη δεύτερη φάση κρούσης (από την αποκόλληση μέχρι τη μέγιστη μετατόπιση) η ταχύτητά του (άρα και η ενέργειά του) μετατρέπεται χαρακτηριστικά στην μικρότερη σε σχέση με τα άλλα δοκίμια, ενώ στην τρίτη φάση κρούσης (από τη μέγιστη μετατόπιση μέχρι την ολοκλήρωση της κρούσης) διαθέτει συνεχώς τη χαμηλότερη κινητική ενέργεια.

Και σε αυτήν την περίπτωση στον αντίποδα των αποδόσεων όσον αφορά τις minimum τιμές, είναι τα δοκίμια B2 και B3. Αναλυτικότερα τα υπόψη δοκίμια :

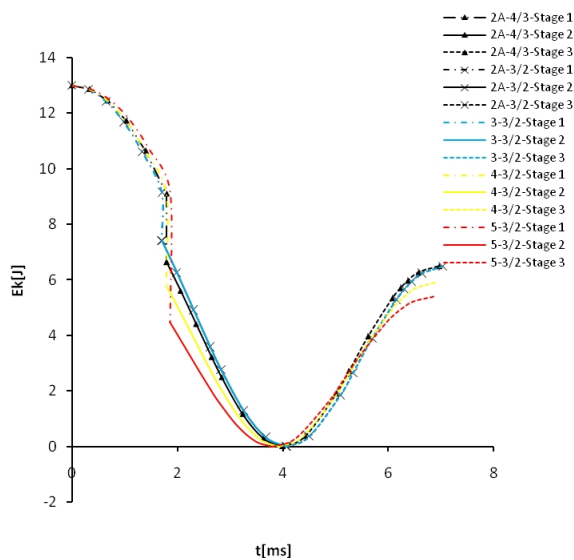
- εμφανίζουν τις μικρότερες ενέργειες μέχρι τη στιγμή της αποκόλλησης,

- η απώλεια ενέργειας λόγω αποκόλλησης είναι η μικρότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια,

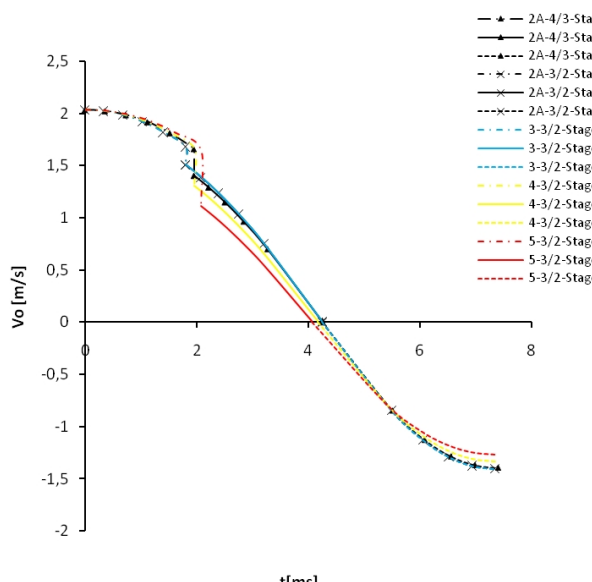
- μέχρι το σημείο μηδενικής ταχύτητας η ενέργειά τους είναι διαρκώς η μεγαλύτερη, ενώ μέχρι την ολοκλήρωση της κρούσης (η οποία διαρκεί τον μεγαλύτερο χρόνο) διαθέτουν συνεχώς τις υψηλότερες κινητικές ενέργειες.



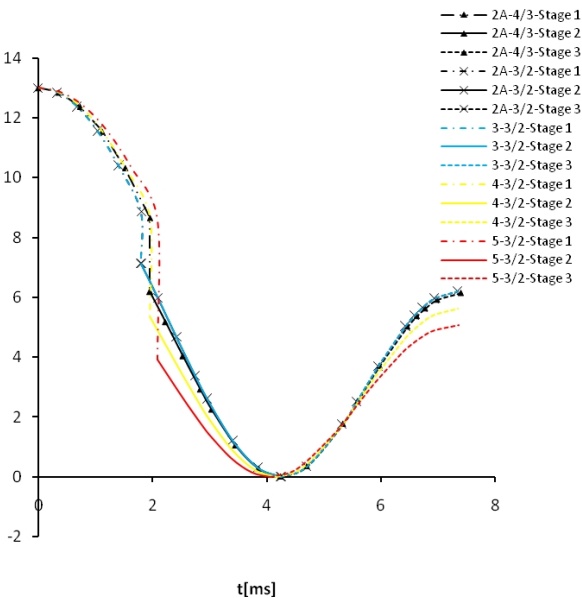
Διάγραμμα V_o-t για ακτίνα 50mm.



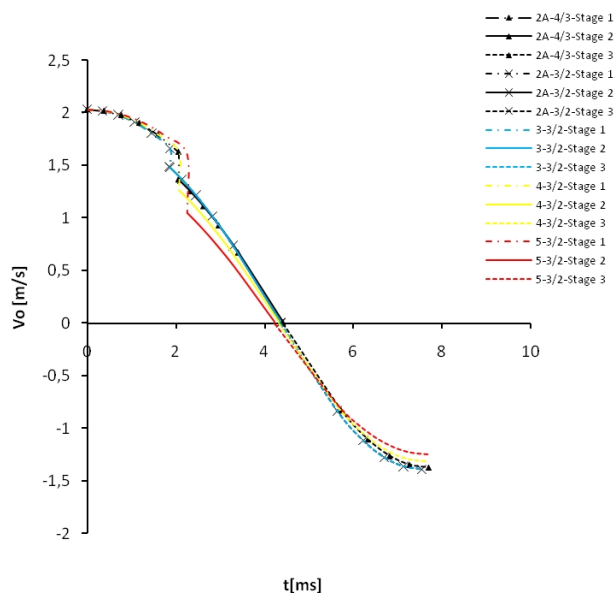
Διάγραμμα E_k-t για ακτίνα 50mm.



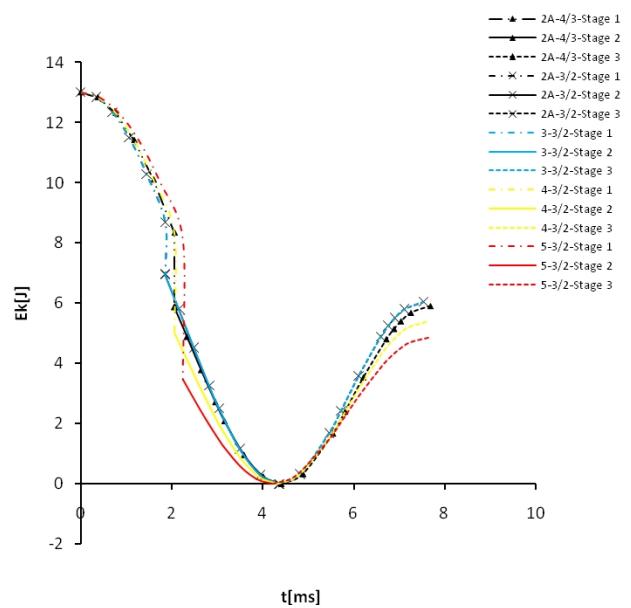
Διάγραμμα V_o-t για ακτίνα 65mm.



Διάγραμμα E_k-t για ακτίνα 65mm.



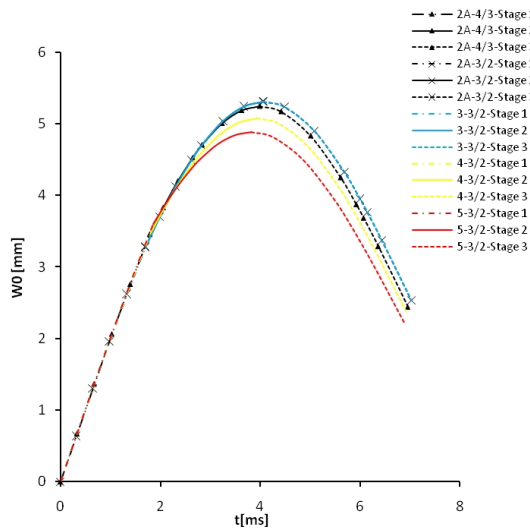
Διάγραμμα V_o-t για ακτίνα 80mm.



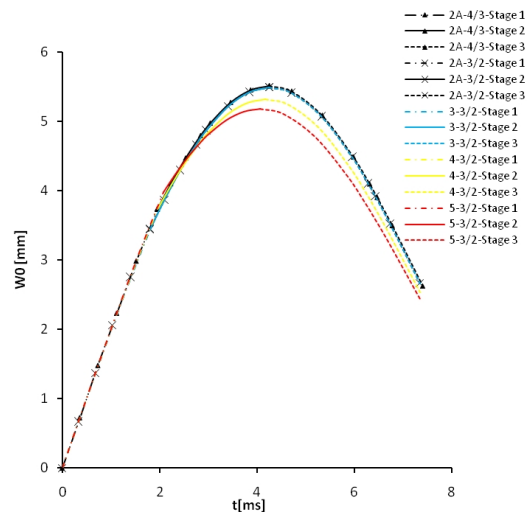
Διάγραμμα $Ek-t$ για ακτίνα 80mm.

Μετατόπιση ως προς χρόνο

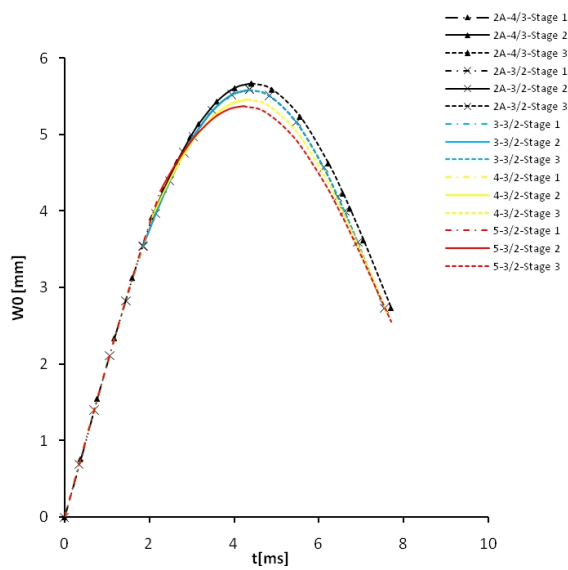
Από τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης της κρούσης οι καμπύλες μετατόπισης ως προς το χρόνο, όλων των τύπων Glare για όλες τις ακτίνες, σχεδόν ταυτίζονται. Με την εκκίνηση της δεύτερης φάσης κρούσης οι καμπύλες διαφοροποιούνται και παρατηρείται το ακόλουθο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό: Τα δοκίμια B5 διαθέτουν πάντα τις χαμηλότερες τιμές ανάμεσα στους πέντε τύπους, σε όλο το πεδίο του χρόνου όσον αφορά τις minimum μετατοπίσεις, ενώ όσον αφορά την περίπτωση των maximum μετατοπίσεων, παρατηρείται ισχυρή εξάρτηση με την παράμετρο της ακτίνας. Έτσι, ενώ αρχικώς για ακτίνα 50mm τις maximum μετατοπίσεις έχουν τα δοκίμια των B2 και B3, στη συνέχεια για 65mm έχουν (με καμπύλες που σχεδόν ταυτίζονται) τα δοκίμια B2, B3 αλλά και B1, ενώ για 80mm τη maximum μετατόπιση έχει πλέον το δοκίμιο B1.



Διάγραμμα W_o-t για ακτίνα 50mm.



Διάγραμμα W_o-t για ακτίνα 65mm.



Διάγραμμα W_o-t για ακτίνα 80mm.

2. Σύγκριση δοκιμών με ίδια διάσταση πάχους.

Στη σύγκριση ιδιοτήτων πλακών Glare που διαθέτουν ίδιο πάχος ως κοινό πεδίο σύγκρισης (μέγιστη διακύμανση πάχους $\pm 0,08\%$), επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν οι ακόλουθοι τύποι Glare:

- Glare2A-4/3-0,238
- Glare2A-3/2-0,4
- Glare3-3/2-0,4
- Glare4-3/2-0,317
- Glare5-3/2-0,233

Τα ανωτέρω υλικά για λόγους απλοποίησης και συντομίας των αναφορών τους στις επόμενες παραγράφους, στο εξής κωδικοποιούνται ως ακολούθως :

- Το Glare2A-4/3-0,238 ως Π1
- Το Glare2A-3/2-0,4 ως Π2
- Το Glare3-3/2-0,4 ως Π3
- Το Glare4-3/2-0,317 ως Π4
- Το Glare5-3/2-0,233 ως Π5,

Ως προς την γεωμετρία, όλα τα δοκίμια είναι κυκλικά, και μελετήθηκε, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση των δοκιμών ίδιου βάρους, η απόκρισή τους σε τρεις διαφορετικές ακτίνες α :

- $\alpha=50\text{mm}$
- $\alpha=65\text{mm}$
- $\alpha=80\text{mm}$

Έτσι, για την σύγκριση πλακών Glare ίδιας διάστασης πάχους, μελετήθηκαν επίσης 15 περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων ως προς τα διάφορα κριτήρια - σχεδιαστικές παράμετροι, φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα, και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

TYPE-50mm	2A-4/3-0,238 (II1)	2A-3/2-0,4 (II2)	3-3/2-0,4 (II3)	4-3/2-0,317 (II4)	5-3/2-0,233 (II5)
MFV(%)	55,90	70,60	70,60	55,90	41,10
kp	525,05	661,83	661,83	524,50	385,51
kel	14,50	9,67	9,67	14,50	19,34
Pareal	4,11	4,31	4,31	4,11	3,89
Pav	2413,69	2535,18	2535,18	2413,48	2291,07
me	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pdelamination	2382,05	2513,80	2513,80	2379,69	2230,24
Pmax	5094,06	4965,89	4966,17	4819,45	4783,43
Wodelamination	3,43	3,28	3,28	3,43	3,55
Womax	5,39	5,31	5,31	5,23	5,23
Wopermanent	2,48	2,54	2,54	2,42	2,31
tdelamination	1,77	1,70	1,70	1,77	1,82
tPmax	4,08	4,07	4,07	4,04	4,03
ttotal	7,09	7,02	7,02	7,08	7,18
U prin delamination	1,73	1,71	1,71	1,73	1,77
U meta delamination	1,50	1,54	1,54	1,42	1,35
U permanent	-1,46	-1,44	-1,44	-1,40	-1,39
Ek prin delamination	9,42	9,16	9,16	9,42	9,81
Ek meta delamination	7,08	7,42	7,42	6,31	5,70
Ek permanent	6,70	6,48	6,48	6,16	6,08
TYPE-65mm					
kp	525,05	661,83	661,83	524,50	385,51
kel	8,58	9,67	5,72	8,58	11,44
Pareal	4,11	4,31	4,31	4,11	3,89
Pav	2413,69	2535,18	2535,18	2413,48	2291,07
me	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pdelamination	2382,05	2513,80	2513,80	2379,69	2230,24
Pmax	4545,40	4965,89	4579,37	4311,90	4181,29
Wodelamination	3,71	3,28	3,44	3,70	3,95
Womax	5,67	5,31	5,49	5,50	5,61
Wopermanent	2,68	2,54	2,66	2,61	2,56
tdelamination	1,93	1,70	1,80	1,93	2,04
tPmax	4,35	4,07	4,25	4,30	4,36
ttotal	7,58	7,02	7,35	7,55	7,78
U prin delamination	1,69	1,71	1,68	1,69	1,72
U meta delamination	1,45	1,54	1,51	1,37	1,28
U permanent	-1,42	-1,44	-1,40	-1,36	-1,35

Ek prin delamination	8,99	9,16	8,87	9,00	9,29
Ek meta delamination	6,66	7,42	7,14	5,89	5,18
Ek permanent	6,32	6,48	6,20	5,81	5,71
TYPE-80mm					
kp	525,05	661,83	661,83	524,50	385,51
kel	5,66	3,78	3,78	5,67	7,55
Pareal	4,11	4,31	4,31	4,11	3,89
Pav	2413,69	2535,18	2535,18	2413,48	2291,07
me	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Pdelamination	2382,05	2513,80	2513,80	2379,69	2230,24
Pmax	4214,33	4362,15	4362,30	4007,68	3795,61
Wodelamination	3,90	3,54	3,54	3,90	4,26
Womax	5,86	5,59	5,59	5,67	5,87
Wopermanent	2,81	2,74	2,74	2,73	2,74
tdelamination	2,04	1,86	1,86	2,04	2,22
tPmax	4,54	4,36	4,36	4,47	4,60
ttotal	7,90	7,54	7,54	7,86	8,24
U prin delamination	1,66	1,66	1,66	1,66	1,68
U meta delamination	1,42	1,49	1,49	1,33	1,23
U permanent	-1,39	-1,39	-1,39	-1,33	-1,32
Ek prin delamination	8,69	8,70	8,70	8,69	8,87
Ek meta delamination	6,35	6,96	6,96	5,58	4,76
Ek permanent	6,07	6,04	6,04	5,59	5,45

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών Glare ίδιου πάχους.

Φορτίο αποκόλλησης (Pdelamination)

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 2, τη μέγιστη τιμή του φορτίου αποκόλλησης ανεξαρτήτως ακτίνας, διαθέτουν τα δοκίμια Π2 και Π3, ενώ την ελάχιστη το δοκίμιο Π5. Η συγκεκριμένη παρατήρηση θεωρείται αναμενόμενη δεδομένου ότι από τον τύπο της αναλυτικής λύσης προκύπτει (εφόσον τα υλικά διαθέτουν όλα το ίδιο πάχος), το φορτίο αποκόλλησης είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του σταθμισμένου μέτρου ελαστικότητας E_{av} . Ως εκ τούτου τα Π1 και Π2 που έχουν τα υψηλότερα E_{av} έχουν αντίστοιχα και τα υψηλότερα φορτία αποκόλλησης.

Βύθιση αποκόλλησης (Wodelamination)

Αντίστροφα με την προηγούμενη περίπτωση, παρατηρούμε από τον πίνακα 2, ότι τη μέγιστη τιμή βύθισης την έχει το δοκίμιο Π5, ενώ την ελάχιστη την έχουν από κοινού τα δοκίμια Π3 και Π3.

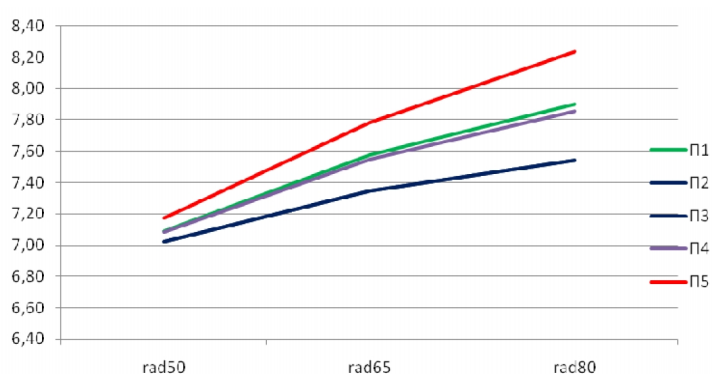
Μέγιστο κρουστικό φορτίο (Pmax), μέγιστο σημείο βύθισης (Womax) και μόνιμη βύθιση (Wopermanent)

Παρατηρούμε ότι ως προς την παράμετρο της μέγιστης βύθισης (Womax), την maximum τιμή έχει το δοκίμιο Π1 και την minimum τα Π4 και Π5. Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα όσον αφορά την παράμετρο του μέγιστου κρουστικού φορτίου (Pmax), δεδομένου ότι από την αναλυτική λύση, το Pmax είναι μία πολυωνυμική συνάρτηση των K_p , K_{el} και Womax. Διαφοροποίηση υπάρχει στην παράμετρο της μόνιμης βύθισης (Wopermanent), καθώς τη μέγιστη μόνιμη παραμόρφωση παρουσιάζουν τα δοκίμια Π2 και Π3, ενώ την ελάχιστη, τα Π4 και Π5 από κοινού.

Ενδιαφέρον αποτελεί η παρατήρηση ότι παρόλο που το δοκίμιο Π5 έχει την ελάχιστη μόνιμη βύθιση (που λόγω πλαστικότητας συνεπάγεται και τη χαμηλότερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας), παρουσιάζει αντίθετα τη μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται επειδή στην ολική απορρόφηση ενέργειας συντελούν τόσο οι μόνιμες παραμορφώσεις όσο και οι ενέργειες αποκόλλησης, που συγκεκριμένα για το Π5 είναι και οι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Ολική διάρκεια κρούσης (ttotal)

Η ολική διάρκεια της κρούσης προκύπτει, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, ότι είναι η μεγαλύτερη για τα δοκίμια Π5, ανεξαρτήτως ακτίνας, και η συντομότερη για τα δοκίμια Π2 και Π3 επίσης ανεξαρτήτως ακτίνας. Το συμπέρασμα αυτό διαφοροποιείται με το αντίστοιχο εξαγόμενο συμπέρασμα της σύγκρισης δοκιμίων ίδιου βάρους, σύμφωνα με το οποίο υπήρχε ισχυρή εξάρτηση ως προς την ακτίνα του δοκιμίου.



Διάγραμμα σύγκρισης ολικής διάρκειας κρούσης

Ενέργεια αποκόλλησης (Edel)

Την μικρότερη απορρόφηση ενέργειας λόγω αποκόλλησης την έχουν ανεξαρτήτως ακτίνας, τα δοκίμια Π2 και Π3, ενώ την μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας λόγω αποκόλλησης την έχει το δοκίμιο Π5. Η απορρόφηση ενέργειας του

Π5 είναι υπερδιπλάσια (συγκεκριμένα 236%) της αντίστοιχης των Π2 και Π3, το οποίο εξηγείται από το γεγονός ότι λόγω κατασκευής ο τύπος Π5 περιέχει έξι διεπιφάνειες συνθέτου υλικού, οι οποίες και συμμετέχουν στο φαινόμενο της αποκόλλησης, ενώ τα Π2 και Π3 έχουν δύο, δηλαδή υποτριπλάσιο αριθμό. Ως εκ τούτου εξηγείται το γεγονός ότι η ενέργεια αποκόλλησης παραμένει αμετάβλητη και δεν παρουσιάζει καμία εξάρτηση ως προς την ακτίνα των δοκιμίων.

Ολική Ενέργεια Απορρόφησης (Eabsorbed)

Όπως έχει αναφερθεί και στην περίπτωση της σύγκρισης δοκιμίων ίδιου βάρους, η ολική ενέργεια που απορροφάει το Glare σε σχέση με την ολική αρχική ενέργεια του βλήματος (E_{κιν}=13j) προκύπτει ως η διαφορά της αρχικής κινητικής ενέργειας του βλήματος, με την κινητική ενέργεια που αυτό έχει μετά το τέλος του φαινομένου της κρούσης. Η συγκεκριμένη ενέργεια καταναλώνεται από το Glare κυρίως μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα, αλλά και μέσω των αποκολλήσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του. Όπως συμβαίνει και στην παράμετρο ενέργειας αποκόλλησης (E_{del}), τα δοκίμια Π2 και Π3, ανεξαρτήτως ακτίνας έχουν την μικρότερη ολική απορρόφηση ενέργειας, ενώ την μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας έχει το δοκίμιο Π5. Οι σημαντικές διαφορές που εντοπίζονται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση της ενέργειας αποκόλλησης (E_{del}) είναι οι ακόλουθες δύο :

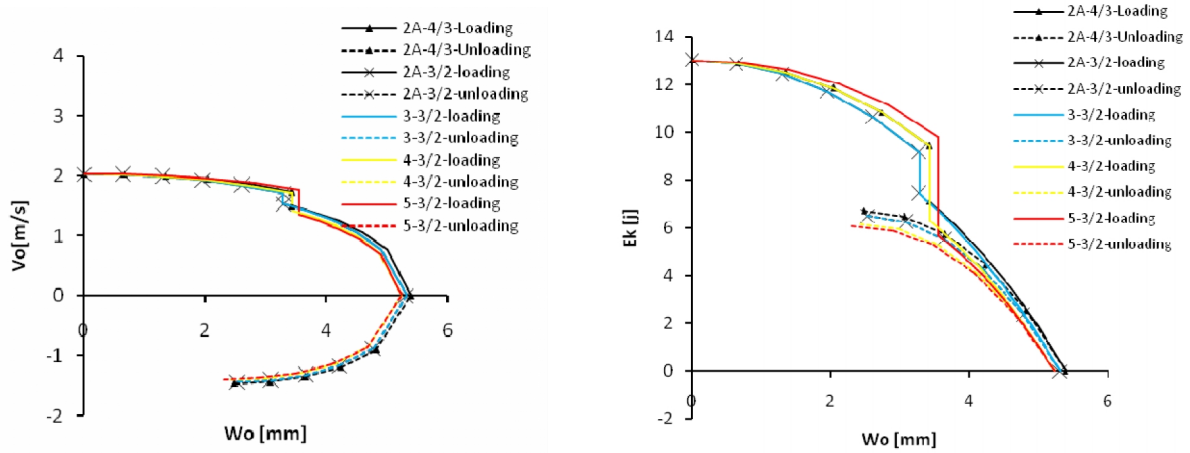
α. Στην περίπτωση της ενέργειας αποκόλλησης το ποσοστό της διαφοράς μέγιστης τιμής ενέργειας (του Π5) μείον ελάχιστης (των Π2 και Π3) ως προς την ελάχιστη τιμή ενέργειας (των Π2 και Π3), διαφέρει σχεδόν σταθερά και για τις τρεις ακτίνες κατά 136%, ενώ στην περίπτωση της ολικής απορρόφησης το αντίστοιχο ποσοστό είναι μόλις 36%.

β. Οι ενέργειες αποκόλλησης είναι σταθερές και δεν επηρεάζονται από την μεταβολή των ακτίνων (αφού η τιμή τους καθορίζεται από κατασκευαστικούς παράγοντες και συγκεκριμένα από το πλήθος διεπιφανειών των συνθέτων υλικών εντός του Glare). Αντίθετα η ολική απορροφούμενη ενέργεια μεταβάλλεται με την αύξηση της ακτίνας (συγκεκριμένα αυξάνεται) δεδομένου ότι η ταχύτητα (κατ' επέκταση η κινητική ενέργεια) επηρεάζεται από το συντελεστή K_{el}, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της ακτίνας.

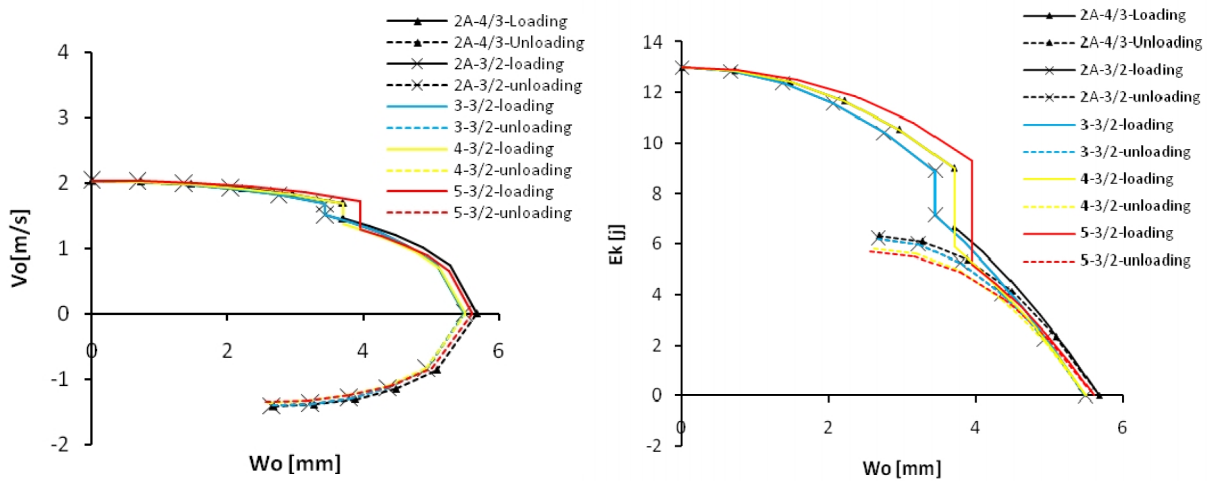
Ταχύτητα ως προς μετατόπιση

Όπως προκύπτει από τα παρακάτω διαγράμματα, τα δοκίμια Π5 παρουσιάζουν σε όλες τις ακτίνες την μεγαλύτερη πτώση ταχύτητας (άρα και πτώση κινητικής ενέργειας) λόγω αποκολλήσεων, όπως επίσης και την μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση στο τέλος της κρούσης (δηλ. παραμόρφωση τελικής ταχύτητας, άρα και τελικής E_{κιν}). Επίσης, το Π5 έχει σε κάθε μετατόπιση μέχρι το σημείο που συμβαίνει αποκόλληση, την μεγαλύτερη ταχύτητα (και κινητική ενέργεια) σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια, ενώ τα Π2 και Π3 έχουν τις μικρότερες ταχύτητες (και κινητικές ενέργειες). Η υπόψη παρατήρηση ισχύει για όλες τις ακτίνες. Παρόλα αυτά,

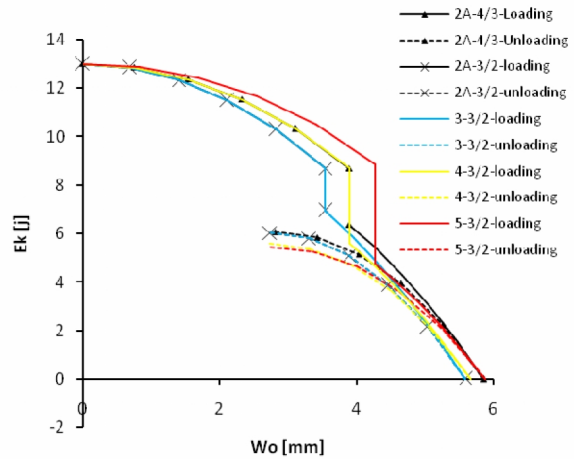
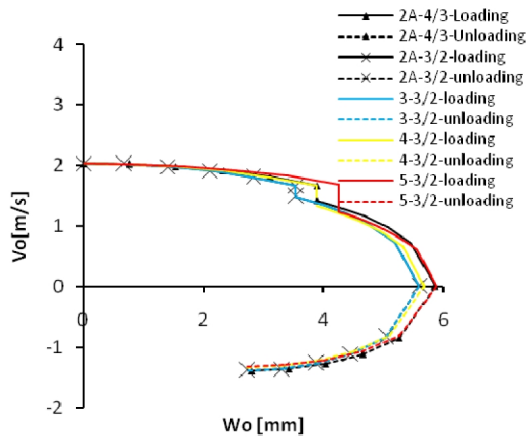
για τις φάσεις κρούσεις μετά το σημείο αποκόλλησης, δηλαδή για την δεύτερη και την τρίτη φάση, η απόκριση των δοκιμών διαφοροποιείται ριζικά παρουσιάζοντας πλέον ισχυρή εξάρτηση ως προς την ακτίνα του δοκιμίου.



Διαγράμματα των V_o - W_o και E_k - W_o για ακτίνα 50mm.



Διαγράμματα των V_o - W_o και E_k - W_o για ακτίνα 65mm.

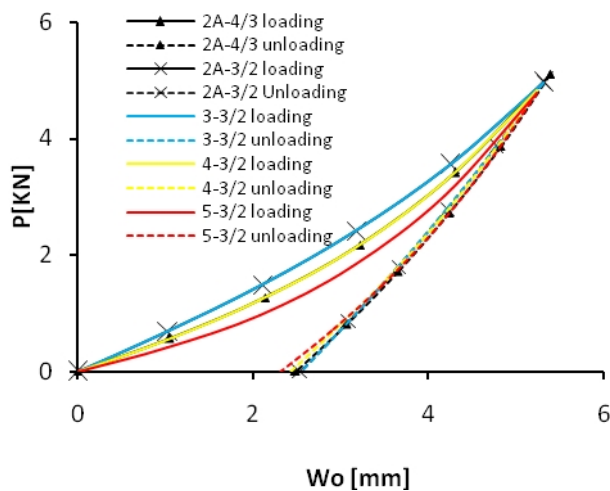


Διαγράμματα των Vo-Wo και Ek-Wo για ακτίνα 80mm.

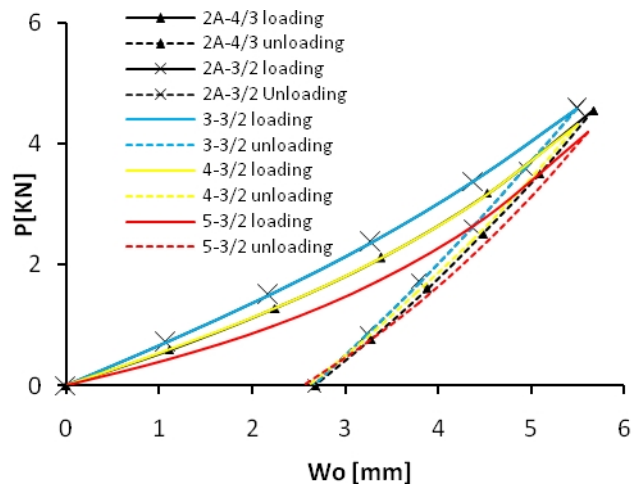
Φορτίο ως προς μετατόπιση

Το κρουστικό φορτίο που αναπτύσσεται στο Π5 είναι το χαμηλότερο σε όλο το πεδίο των μετατοπίσεων φόρτισης. Επίσης ο ίδιος τύπος δοκιμίου, παρουσιάζει την χαμηλότερη maximum τιμή κρουστικού φορτίου εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα δοκίμια, ενώ στο σημείο μηδενικής φόρτισης το δοκίμιο Π5 έχει την μικρότερη μόνιμη (πλαστική) μετατόπιση, σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

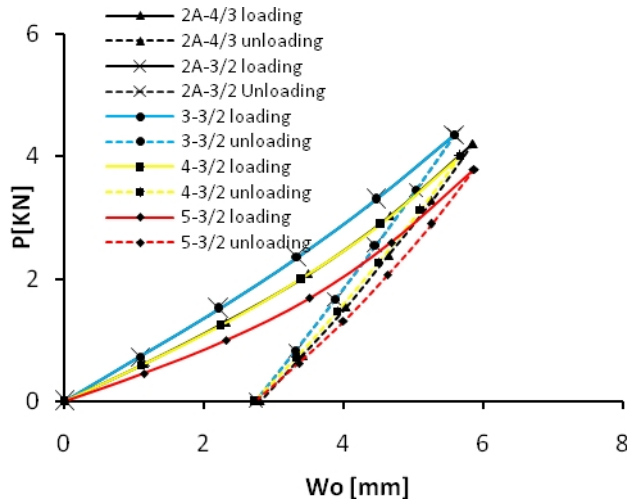
Αντίθετα τα δοκίμια Π2 και Π3 σε όλο το φάσμα της κρούσης, έχουν για κάθε μετατόπιση το υψηλότερο φορτίο κρούσης. Επισημαίνεται ότι οι ανωτέρω διακυμάνσεις και διαφοροποιήσεις αμβλύνονται όσο αυξάνεται η ακτίνα των δοκιμίων.



Διάγραμμα P-Wo για ακτίνα 50mm.



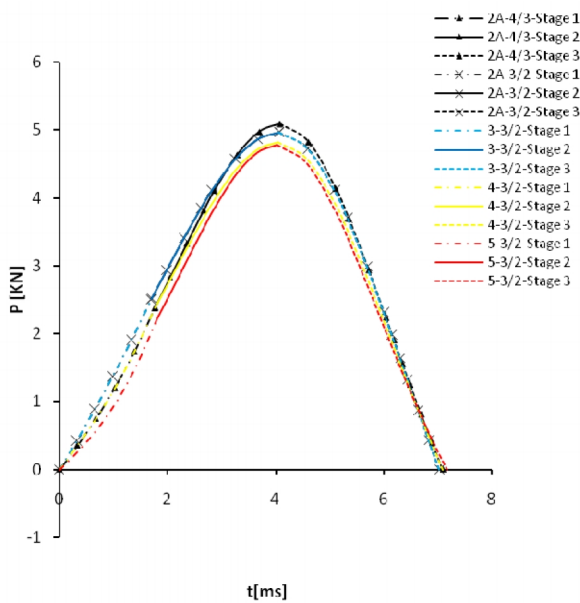
Διάγραμμα P-Wo για ακτίνα 65mm.



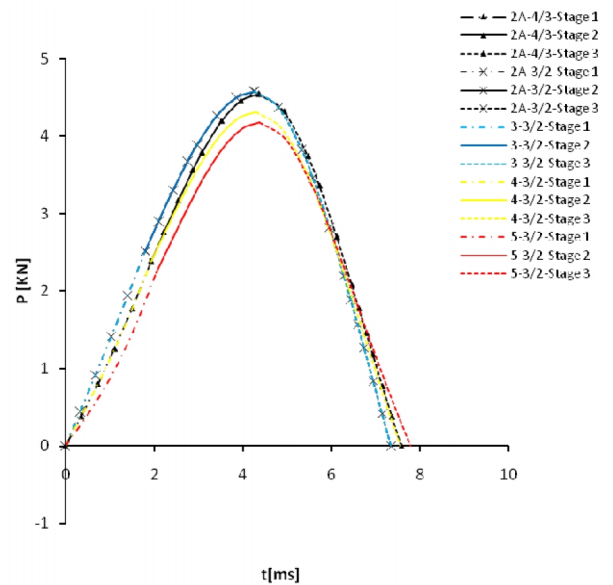
Διάγραμμα P-Wo για ακτίνα 80mm.

Φορτίο ως προς χρόνο.

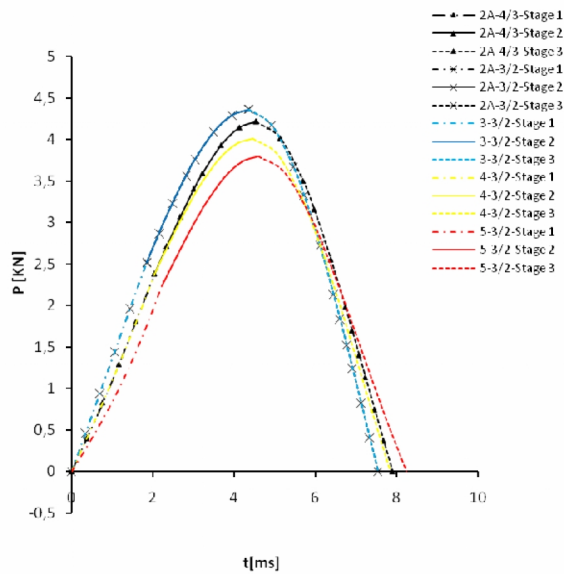
Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα το κρουστικό φορτίο που αναπτύσσεται στο δοκίμιο Π5 σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια, έχει συνεχώς τη minimum τιμή κατά το χρονικό πεδίο της φόρτισης, ενώ στα μέσα της τρίτης φάσης της κρούσης αποκτά τις maximum τιμές, ώστε να περατώσει το φαινόμενο της κρούσης στη μεγαλύτερη διάρκεια. Στα υπόλοιπα δοκίμια υπάρχει εναλλαγή των μέγιστων και ελάχιστων τιμών λόγω εξάρτησης από την ακτίνα τους.



Διάγραμμα P-t για ακτίνα 50mm.



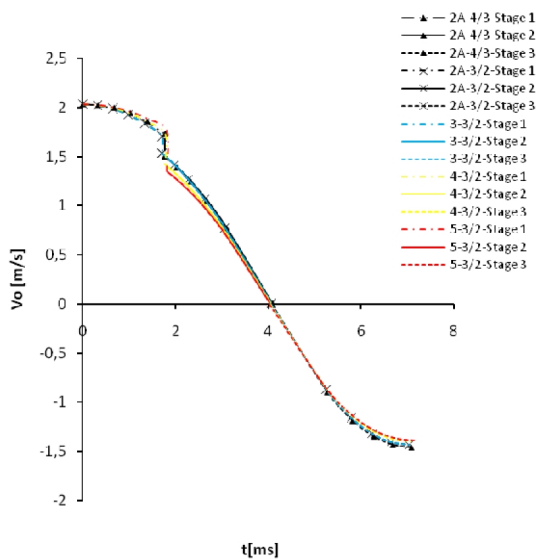
Διάγραμμα P-t για ακτίνα 65mm.



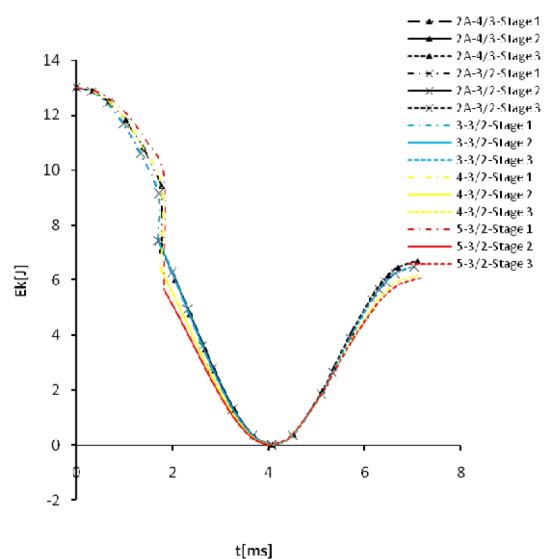
Διάγραμμα P-t για ακτίνα 80mm.

Κινητική ενέργεια και ταχύτητα ως προς το χρόνο.

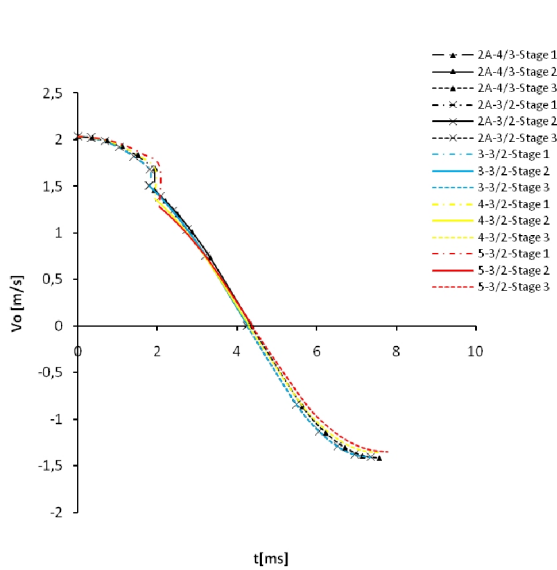
Όπως προκύπτει από τα ακόλουθα διαγράμματα το δοκίμιο Π5 έχει τη μεγαλύτερη κινητική ενέργεια κατά τη φάση της φόρτισης, ενώ στην περάτωση της κρούσης διαθέτει την ελάχιστη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εξαιτίας της μεγάλης ενέργειας που απαιτείται για την αποκόλληση των στρώσεων του Π5. Αντίθετα τα Π2 και Π3 εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές ταχύτητας κατά τη φάση της φόρτισης και τις μεγαλύτερες κατά τη φάση της αποφόρτισης. Και σε αυτήν την περίπτωση οι καμπύλες των δοκιμίων στην ακτίνα των 50mm, σχεδόν ταυτίζονται ενώ με την αύξηση της ακτίνας διαφοροποιούνται έντονα.



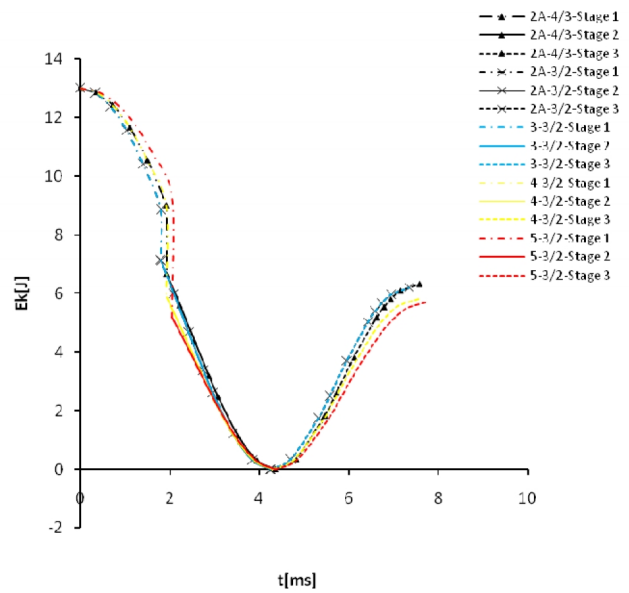
Διάγραμμα Vo-t για ακτίνα 50mm.



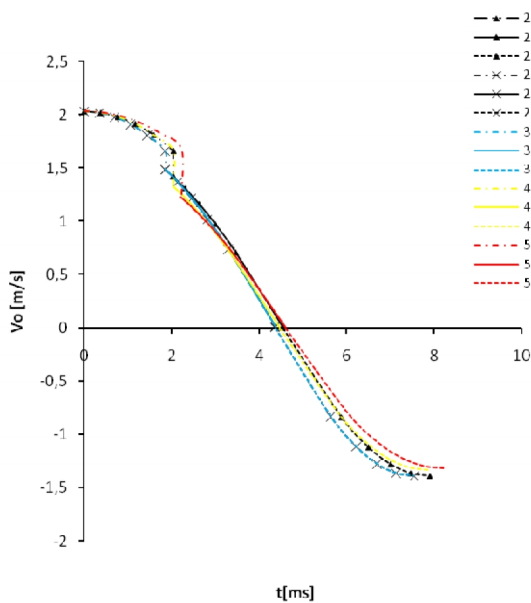
Διάγραμμα Ek-t για ακτίνα 50mm.



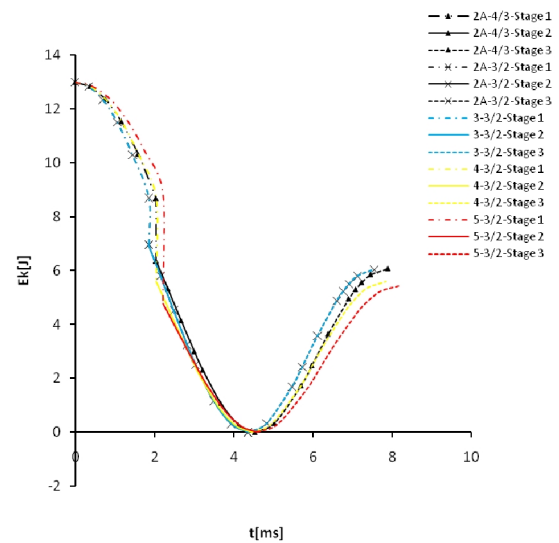
Διάγραμμα V_o-t για ακτίνα 65mm.



Διάγραμμα E_k-t για ακτίνα 65mm.



Διάγραμμα V_o-t για ακτίνα 80mm.

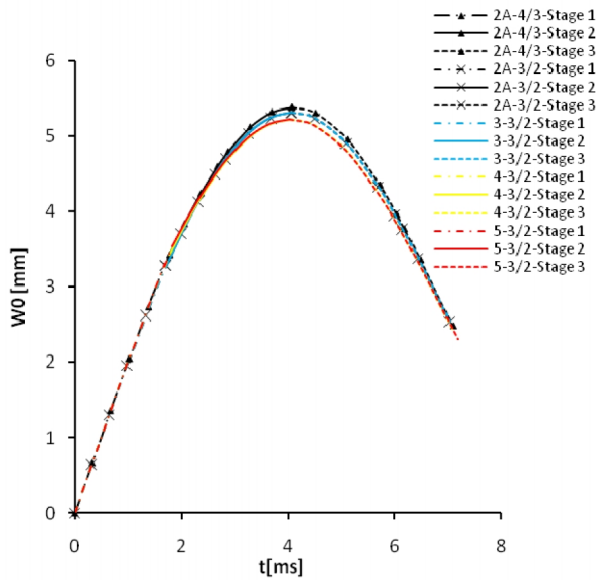


Διάγραμμα E_k-t για ακτίνα 80mm.

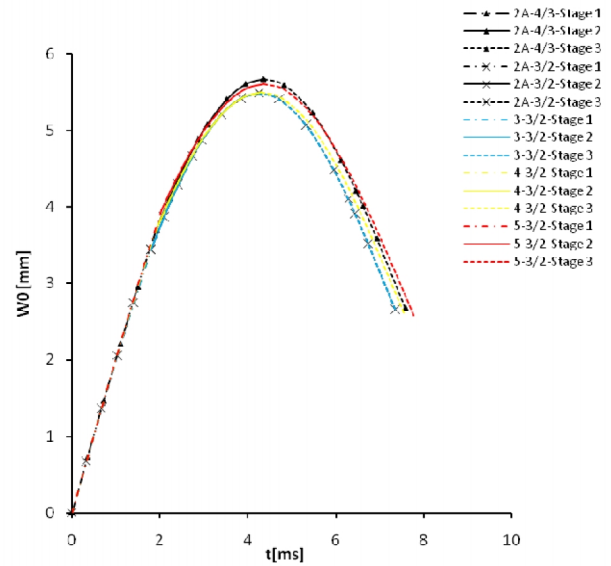
Μετατόπιση ως προς χρόνο.

Η παράμετρος της μετατόπισης ως προς το χρόνο, είναι άλλη μία χαρακτηριστική μεταβλητή που εξαρτάται και αλλάζει ριζικά ως προς την ακτίνα των δοκιμίων. Χαρακτηριστικά, το δοκίμιο Π5 στην ακτίνα των 50mm, έχει την

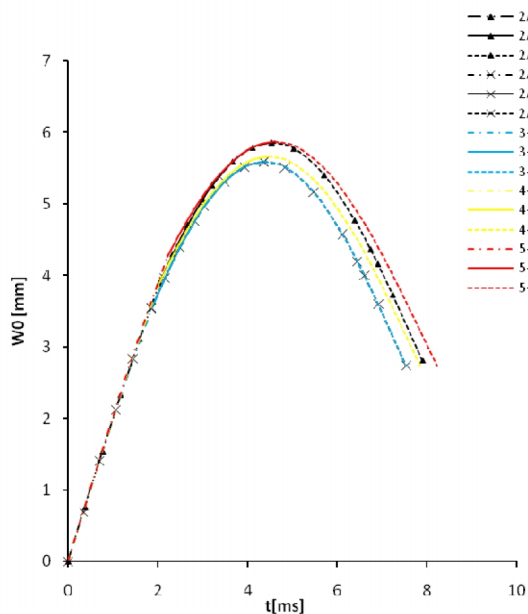
μικρότερη μετατόπιση καθ' όλη τη διάρκεια της κρούσης, ενώ το Π1 έχει αντίστοιχα την μεγαλύτερη. Στην ακτίνα των 65mm οι καμπύλες αρχίζουν να διαφοροποιούνται, ενώ αντιστρέφεται το αποτέλεσμα στην ακτίνα των 80mm όπου πλέον, το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη μετατόπιση σε όλη τη διάρκεια της κρούσης είναι το Π5.



Διάγραμμα W_o-t για ακτίνα 50mm.



Διάγραμμα W_o-t για ακτίνα 65mm.



Διάγραμμα W_o-t για ακτίνα 80mm.

Η επίδραση της παραμέτρου MVF (Metal Volume Fraction)

Η ποσοστιαία αναλογία του πάχους μετάλλου ως προς το συνολικό πάχος του υβριδικού πολυστρωματικού υλικού (παράμετρος γνωστή ως MVF) είναι βασικής σημασίας που καθορίζει γενικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού [30]. Όσον αφορά το υλικό Glare και σύμφωνα με δημοσιευμένη μελέτη [109], ισχύει ότι πλάκες Glare με σχεδόν ίδιο MVF και παρόμοιου πάχους, ή παρόμοιου βάρους, παρουσιάζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά σε κάθετη στατική διεύθυνση βλήματος.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που προκύπτει από την ίδια μελέτη, είναι ότι όσο η παράμετρος MVF μειώνεται, οι πλάκες Glare παρουσιάζουν αύξηση στην ακαμψία τους όταν οι παραμορφώσεις φτάνουν μέχρι την παραμόρφωση πρώτης αστοχίας. Στην περίπτωση κρούσης χαμηλής ταχύτητας, η ανωτέρω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και επεκτείνεται ότι ισχύει μέχρι το σημείο μέγιστης παραμόρφωσης, και μπορεί να εξηγηθεί με το ακόλουθο σκεπτικό. Το κρουστικό φορτίο μέχρι τη μέγιστη παραμόρφωση δίδεται από τη σχέση $P_L(w_o) = K_p w_o + K_{el} w_o^3$.

Οι συντελεστές K_p και K_{el} εξαρτώνται από τις συνεπίπεδες δυνάμεις N_{xy} και από τις εφελκυστικές ακαμψίες A_{ij} , τα οποία έχουν γραμμική εξάρτηση από το πάχος του σύνθετου και από το πάχος του αλουμινίου, αντίστοιχα. Μείωση του MVF συνεπάγεται μείωση του πάχους αλουμινίου, και ταυτόχρονα αύξηση του πάχους συνθέτου. Έτσι το K_p μειώνεται ενώ το K_{el} αυξάνεται, κι επειδή ο πρώτος όρος του φορτίου P_L εξαρτάται ως προς τη μετατόπιση γραμμικά, αλλά ο δεύτερος με τη μετατόπιση στον κύβο, το άθροισμα των όρων αυξάνει όσο αυξάνονται και οι μετατοπίσεις. Συνεπώς με μειωμένο MVF, για να εξασφαλιστεί ίδια μετατόπιση, θα πρέπει να εφαρμοστεί μεγαλύτερο φορτίο, ως εκ τούτου η ακαμψία αυτομάτως αυξάνεται.

3. Σύγκριση μεγεθών ως προς τις ακτίνες

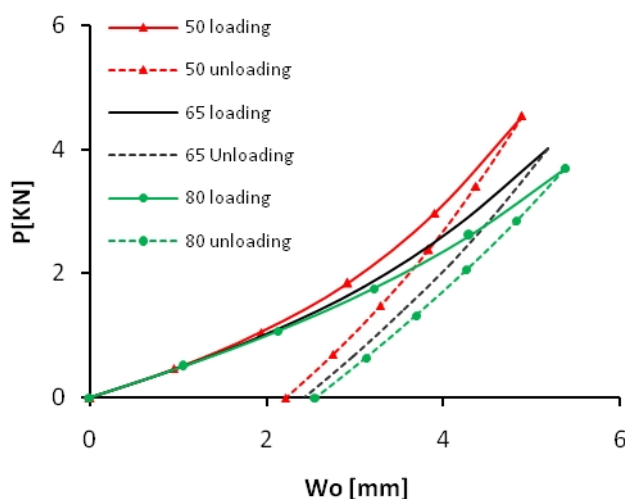
Παρατηρούμε ότι και στους πέντε διαφορετικούς τύπους Glare, αυξανόμενης της ακτίνας παρατηρείται αύξηση ή μείωση στα υπόλοιπα μεγέθη, με το ενδιαφέρον στοιχείο, ότι σε όλες τις περιπτώσεις το ποσοστό της μεταβολής των μεγεθών έχει σχεδόν σταθερή τιμή. Πιο συγκεκριμένα, και όσον αφορά τους πέντε διαφορετικούς τύπους Glare του ίδιου πάχους (τα αντίστοιχα ισχύουν και για τους πέντε τύπους Glare του ίδιου βάρους) το μέγιστο φορτίο κρούσης (P_{max}) με την αύξηση της ακτίνας μειώνεται περίπου 10% από $\alpha=50\text{mm}$ σε $\alpha=65\text{mm}$, ενώ μειώνεται κατά 8% από $\alpha=65\text{mm}$ σε $\alpha=80\text{mm}$ και στους πέντε διαφορετικούς τύπους.

Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει με την συνολική χρονική διάρκεια του φαινομένου, η οποία αμβλύνεται με την αύξηση της ακτίνας, και συγκεκριμένα αυξάνεται κατά περίπου 6% από $\alpha=50\text{mm}$ σε $\alpha=65\text{mm}$, ενώ κατά 4% από $\alpha=65\text{mm}$ σε $\alpha=80\text{mm}$, για όλους πάλι τους τύπους. Το γεγονός της αύξησης της συνολικής χρονικής διάρκειας του φαινομένου εξηγείται από τις αναλυτικές σχέσεις, δεδομένου

ότι το ολοκλήρωμα του χρόνου είναι συνάρτηση του Kel , το οποίο έχει εξάρτηση ως προς το α^2 , ενώ τα όρια των τριών ολοκληρωμάτων (των τριών φάσεων της κρούσης), εξαρτώνται επίσης από το Kel , (μέσω των μεγεθών Wod , $Womax$, και Wof). Αντίστοιχα η ολική απορροφούμενη ενέργεια αυξάνεται κατά περίπου 5% από $\alpha=50mm$ σε $\alpha=65mm$, ενώ κατά 3% από $\alpha=65mm$ σε $\alpha=80mm$, σε όλα πάλι τα διαφορετικά δοκίμια.

Αντίστοιχα, η μόνιμη τελική παραμόρφωση αυξάνεται κατά περίπου 7% από $\alpha=50mm$ σε $\alpha=65mm$, ενώ κατά 4% από $\alpha=65mm$ σε $\alpha=80mm$. Η αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας εξηγείται από το γεγονός ότι με την αύξηση της ακτίνας η τελική ταχύτητα του βλήματος μειώνεται, οπότε μειώνεται και η κινητική του ενέργεια, που συνεπάγεται αύξηση της διαφοράς ως προς την αρχική κινητική ενέργειά του. Η μείωση της τελικής ταχύτητας του βλήματος εξηγείται επειδή οι ταχύτητες των τριών φάσεων της κρούσης παρουσιάζουν (όπως προκύπτει από την αναλυτική λύση) αναλογία με την τετραγωνική ρίζα του Kel , το οποίο όμως Kel μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της ακτίνας, γεγονός που συνεπάγεται ότι αύξηση ακτίνας σε κάθε τύπο Glare, οδηγεί σε μείωση της τελικής ταχύτητας του βλήματος. Ομοίως, εξαιτίας της εξάρτησης του $Womax$ από το Kel , εξηγείται και η αύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης που ακολουθεί, χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα του τύπου B5 των δοκιμίων Glare. Τα εξαγόμενα όμως συμπεράσματα ποιοτικώς είναι τα ίδια και ισχύουν για όλους τους τύπους Glare που μελετήθηκαν, τα διαγράμματα των οποίων παρατίθενται στο κεφάλαιο 2.

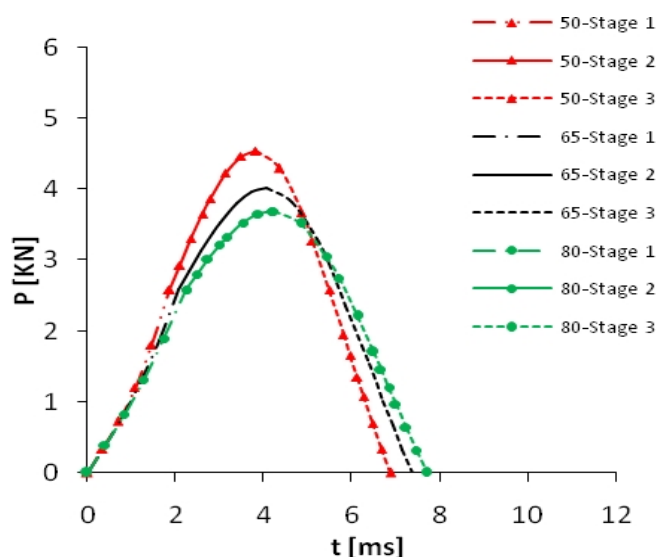


Διάγραμμα $P-w_o$ του Glare5-3/2-0,283 ως προς α (50mm-65mm-80mm)

Από το ανωτέρω διάγραμμα (P, w_o -ως προς τις τρεις ακτίνες) παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει πιο εύκαμπτη συμπεριφορά καθώς η ακτίνα του

αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, αφού τα δοκίμια είναι πακτωμένα κατά μήκος της περιφέρειάς τους, οπότε αυξάνοντας την ακτίνα του δοκιμίου ουσιαστικά αυξάνεται η ελεύθερη επιφάνεια της πλάκας, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη ευκαμψία του δοκιμίου. Η συγκεκριμένη ευκαμψία συνεπάγεται και αύξηση της μέγιστης μετατόπισης του δοκιμίου, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε αύξηση των μόνιμων παραμορφώσεων.

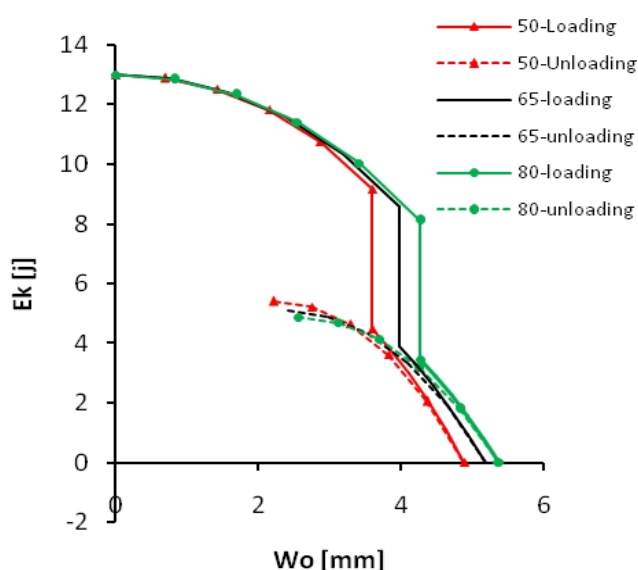
Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το μεγαλύτερο ποσοστό της αρχικής κινητικής ενέργειας του βλήματος καταναλώνεται για την παραμόρφωση της πλάκας Glare, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό απορροφάται από την αποκόλληση των στρώσεων του συνθέτου. Δεδομένου ότι η ενέργεια αποκόλλησης δεν εμφανίζει εξάρτηση ως προς την ακτίνα (όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο), και ότι η αρχική κινητική ενέργεια του βλήματος είναι επίσης σταθερή και ανεξάρτητη με την μεταβολή της ακτίνας, τότε και η παραμορφωσιακή ενέργεια των δοκιμίων Glare θα πρέπει να παραμένει αμετάβλητη και χωρίς εξάρτηση ως προς την ακτίνα. Η παραμορφωσιακή ενέργεια ισούται με την επιφάνεια που υπάρχει κάτωθεν της καμπύλης στο διάγραμμα (P,wo). Από το διάγραμμα (P,wo-ως προς τις τρεις ακτίνες) παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της ακτίνας, αφενός αυξάνεται η μέγιστη μετατόπιση (λόγω περισσότερης ευκαμψίας (όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο), αφετέρου δε, μειώνεται η μέγιστη κρουστική δύναμη με τέτοιο συσχετισμό μεταξύ τους ώστε η παραμορφωσιακή ενέργεια (δηλ. το εμβαδό κάτωθεν της καμπύλης) να παραμένει σταθερό, επιβεβαιώνοντας την αρχική πρόβλεψη.



Διάγραμμα P-t του Glare5-3/2-0,283 ως προς α (50mm-65mm-80mm)

Στο ανωτέρω διάγραμμα φαίνονται οι τρεις καμπύλες (P,t) του B5 τύπου Glare για τις αντίστοιχες ακτίνες (50mm,65mm,80mm). Διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της ακτίνας, η μέγιστη κρουστική δύναμη μειώνεται, ενώ αντίθετα η διάρκεια εφαρμογής της δύναμης αυξάνεται. Η αύξηση της διάρκειας εφαρμογής της

δύναμης όπως και η καθυστέρηση στην εκκίνηση του τρίτου σταδίου κρούσης που παρατηρείται, εξηγείται λόγω της αύξησης της ευκαμψίας του δοκιμίου που συνεπάγεται η αύξηση της ακτίνας του. Η συγκεκριμένη διακύμανση της ευκαμψίας έχει ως αποτέλεσμα να μετατρέπει την πλάκα του Glare περισσότερο άκαμπτη όσο η ακτίνα της πλάκας μειώνεται, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για το μηδενισμό της ορμής, στην εκκίνηση του τρίτου σταδίου κρούσης, ή για την ανάκτηση της μέγιστης ορμής, με αντίθετο πρόσημο, στο τέλος του κρουστικού φαινομένου.



Διάγραμμα P-w_o του Glare5-3/2-0,283 ως προς α (50mm-65mm-80mm)

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται οι τρεις καμπύλες ($E_{k,t}$) του B5 τύπου Glare για τις αντίστοιχες ακτίνες (50mm,65mm,80mm). Από το διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί ότι με την αύξηση της ακτίνας του δοκιμίου η τελική κινητική ενέργεια του βλήματος μειώνεται (όταν το φαινόμενο της κρούσης ολοκληρώνεται), ενώ αντίθετα ο χρόνος που συμβαίνει αποκόλληση (στο διάγραμμα φαίνεται από την κάθετη απότομη πτώση της κινητικής ενέργειας) αυξάνεται. Σύμφωνα με την ανάλυση του 2^{ου} κεφαλαίου, αποκόλληση στο δοκίμιο θα παρουσιαστεί μόλις το κρουστικό φορτίο λάβει μία οριακή τιμή, η οποία δεν εξαρτάται από την ακτίνα του δοκιμίου [10], [11],[15]. Συνεπώς, δεδομένου ότι οι καμπύλες (P, w_o) γίνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης περισσότερο εύκαμπτες με την αύξηση της ακτίνας, το δοκίμιο με την μικρότερη ακτίνα θα φτάσει πρώτο στο κατώφλι της οριακής τιμής αποκόλλησης, το δοκίμιο με την ενδιάμεση ακτίνα θα φτάσει δεύτερο στην αντίστοιχη οριακή τιμή, ενώ αυτό με τη μεγαλύτερη ακτίνα θα αποκτήσει την οριακή τιμή αποκόλλησης τελευταίο. Αυτός είναι και ο λόγος που η χρονική στιγμή της αποκόλλησης συμβαίνει σε μεταγενέστερο χρόνο, όσο αυξάνεται η ακτίνα.

Η μείωση της τελικής κινητικής ενέργειας του βλήματος που παρατηρείται με την αύξηση της ακτίνας, ως φυσική έννοια σημαίνει ότι η πλάκα Glare απορροφάει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας όσο η ακτίνα της αυξάνει. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί όσον αφορά την μη αντιστρεπτή απορρόφηση ενέργειας στα δοκίμια Glare [19], [29] :

- α. Αποκολλήσεις ανάμεσα στις στρώσεις του συνθέτου (glass-epoxy layers delamination)
- β. Πλαστικές παραμορφώσεις των στρώσεων αλουμινίου, και
- γ. Μόνιμες ελαστικές παραμορφώσεις των στρώσεων του συνθέτου.

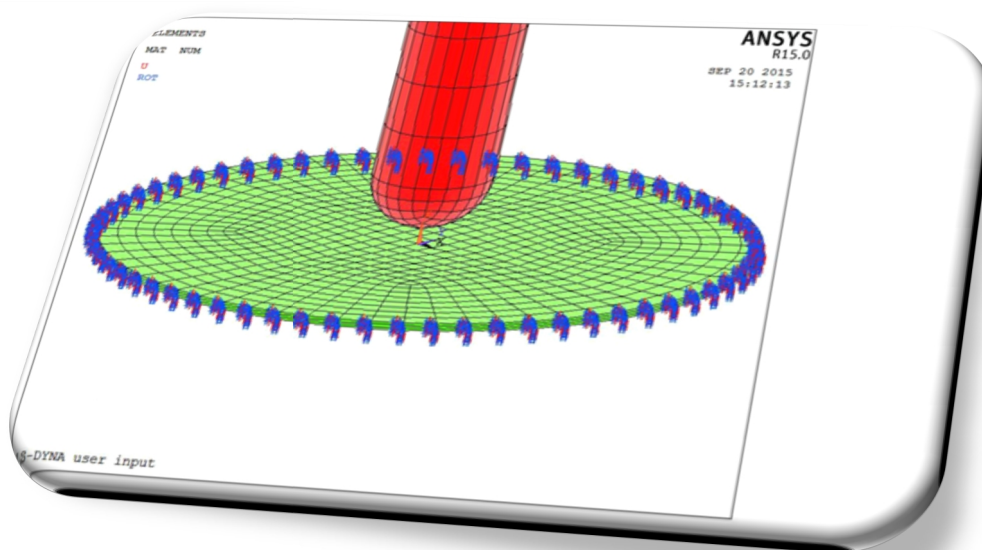
Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο, η ενέργεια αποκόλλησης δεν εμφανίζει εξάρτηση ως προς την ακτίνα του δοκιμίου. Συνεπώς η αύξηση της απορροφούμενης κρουστικής ενέργειας που παρατηρείται είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των δύο υπόλοιπων μηχανισμών και συγκεκριμένα των πλαστικών παραμορφώσεων των στρώσεων αλουμινίου που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια των σταδίων φόρτισης και αποφόρτισης, καθώς και των μόνιμων ελαστικών παραμορφώσεων των στρώσεων του συνθέτου όταν το φαινόμενο της κρούσης έχει ολοκληρωθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

1. Επίλυση μέσω LS-Dyna/ANSYS FE code.

Με σκοπό την ανάπτυξη μιας πρακτικής μεθοδολογίας για την μοντελοποίηση των επιπτώσεων των κρούσεων χαμηλής ταχύτητας πάνω σε δοκίμια Glare, χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna, όπως αυτός έχει ενσωματωθεί στο πρόγραμμα ANSYS. Ο συγκεκριμένος εμπορικός κώδικας [107] είναι εστιασμένος στην επίλυση κρουστικών μη γραμμικών προβλημάτων, και αποτελεί ένα explicit πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, που έχει τη δυνατότητα επίλυσης 2D και 3D προβλήματα μεγάλων παραμορφώσεων.

Ο κώδικας LS-Dyna αναπτύχθηκε αρχικά από τη Livermore National Laboratory για τη προσομοίωση εκρηκτικών και κρουστικών προβλημάτων. Η χρήση του έκτοτε επεκτάθηκε στην επίλυση προβλημάτων κρούσεων χαμηλών ταχυτήτων, μορφοποίησης μετάλλων καθώς και πλήθους άλλων εφαρμογών.



Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των κεντρικών διαφορών [103] για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης ως προς τον χρόνο, και χρησιμοποιεί χρονικά βήματα (time steps) αντί για βήματα φορτίου (load steps). Έκαστο χρονικό βήμα θα πρέπει να έχει τιμή μικρότερη από μία κρίσιμη, ώστε να διασφαλιστεί σύγκλιση και κατ' επέκταση σταθερότητα στην λύση. Η κρίσιμη τιμή του χρονικού βήματος προκύπτει ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών διαστάσεων των στοιχείων (το μήκος της μικρότερης πλευράς τους), και της ταχύτητας του ήχου εντός του υλικού. Η ταχύτητα του ήχου δεν θα πρέπει να διαπερνά το στοιχείο μέσα σε ένα χρονικό βήμα. Το μικρότερο χρονικό

βήμα που έχει υπολογιστεί από όλα τα στοιχεία, χρησιμοποιείται ως το κρίσιμο βήμα στην ολοκλήρωση, και επαναπροσδιορίζεται σε κάθε επόμενη επίλυση των εξισώσεων.

Σε όλες τις μοντελοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε δομημένο πλέγμα, ποικίλης πυκνότητας, με στοιχεία solid elements (164), τα οποία είναι εξαεδρικά στοιχεία οκτώ κόμβων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, χρησιμοποιήθηκε μειωμένη (1-point) ολοκλήρωση η οποία εξοικονομεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο [103], και προσφέρει πολύ καλή σύγκλιση σε προβλήματα μεγάλων μετατοπίσεων. Η χρήση τους σε λεπτά πάνελ απαιτεί προφυλάξεις, με βασικότερη την ανάγκη σχεδίασης πλέγματος, με τέτοια πυκνότητα, ώστε να διατηρείται ο λόγος των μηκών των στοιχείων μικρότερος από 10:1. Το μειονέκτημα της μειωμένης ολοκλήρωσης είναι ότι απαιτείται hourglass control. Οι μορφές hourglass είναι οι μηδενικής ενέργειας παραμορφώσεις που έχουν περίοδο πολύ μικρότερη από την περίοδο απόκρισης της κατασκευής. Αυτές οι μετατοπίσεις hourglass είναι κάθετες στους υπολογισμούς των μετατοπίσεων των στοιχείων, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν εσωτερικές δυνάμεις ώστε να αντισταθούν στις εν λόγω μετατοπίσεις (Flanagan και Belytschko 1981).

Στο πρόγραμμα LS-Dyna υπάρχουν δύο τρόποι για την αποφυγή δημιουργίας μορφών Hourglass (LS-Dyna theory manual) [107]. Η πρώτη αναφέρεται γενικά ως η μέθοδος της ακαμψίας (stiffness method), και εισάγει μία μικρή ελαστική ακαμψία που ανθίσταται στην ανάπτυξη των ανώμαλων μορφών. Η συγκεκριμένη μέθοδος καθυστερεί, σταματά και εκμηδενίζει τις μορφές Hourglass. Σε προβλήματα όμως μεγάλων μετατοπίσεων μπορεί να αυξήσει την δυσκαμψία του μοντέλου. Η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται ως η μέθοδος του ιξώδους (viscosity method), αποτελεί την προεπιλεγμένη μέθοδο του κώδικα, και καθυστερεί, σταματά αλλά δεν εκμηδενίζει τις μορφές Hourglass. Παρόλα αυτά συνίσταται σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο σε προβλήματα που εμπλέκονται μεγάλες ταχύτητες και μεγάλες παραμορφώσεις.

Παρόλα τα προβλήματα με μορφές Hourglass που απορρέουν από την μέθοδο ολοκλήρωσης ενός σημείου, αυτή προτιμάται καθώς μειώνει δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο [103]. Για παράδειγμα, η μειωμένη ολοκλήρωση σε σχέση με την κανονική ολοκλήρωση οδηγεί σε μείωση του υπολογιστικού κόστους κατά ένα συντελεστή 16 όσον αφορά τους υπολογισμούς παραμορφώσεων και κομβικών δυνάμεων, ενώ κατά ένα συντελεστή 8, όσον αφορά τον υπολογισμό των τάσεων (Hallquist 1998).

Ο κώδικας LS-Dyna εμπεριέχει τρεις διακριτές μεθόδους μοντελοποίησης της επαφής μεταξύ δύο επιφανειών [107]. Η πρώτη αναφέρεται ως κινηματικού περιορισμού μέθοδος (kinematic constraint method) και αξιοποιείται στην παρούσα εργασία ανάμεσα στις διεπιφάνειες που είναι άρρηκτα δεμένες μεταξύ τους (tied-interfaces), και συγκεκριμένα στις διεπιφάνειες ανάμεσα στις στρώσεις αλουμινίου και στις στρώσεις συνθέτου του Glare, αλλά και στις διεπιφάνειες που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους μέχρι να επέλθει κάποιο κριτήριο αστοχίας (tiebreak surfaces), όπως αυτές ανάμεσα στις προεμποτισμένες στρώσεις του συνθέτου. Σε αυτήν την μέθοδο οι

μετακινήσεις των κόμβων που χαρακτηρίζονται ως “slaves” ενώνονται με τους κόμβους “masters” μέσω ενός γενικού συστήματος μετατροπών των κομβικών μετατοπίσεων.

Η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται ως η μέθοδος των ποινών (penalty method). Στην προκειμένη περίπτωση, η διείσδυση της μιας επιφάνειας στην άλλη, αποφεύγεται με την εισαγωγή ελατηρίων μεταξύ των επιφανειών. Τα ελατήρια αποτρέπουν την διείσδυση και εξαναγκάζουν τις επιφάνειες να είναι σε απόσταση. Η συγκεκριμένη μέθοδος επαφής χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία σε επαφές επιφανειών στις οποίες υπήρχε τριβή, και ειδικότερα ανάμεσα στον διεισδυτή και στα δοκίμια. Ο τελευταίος αλγόριθμος (distributed parameter method) αξιοποιείται σε πολύ περιορισμένες κι εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως π.χ. στη μοντελοποίηση ολίσθησης ρευστού πάνω σε δομική κατασκευή, και σε προβλήματα αλληλεπίδρασης αερίου με δομική κατασκευή.

Στον κώδικα LS-Dyna είναι δυνατή η μοντελοποίηση της αστοχίας και της διάδοσης των αστοχιών στις διεπιφάνειες των στρώσεων χρησιμοποιώντας επαφές τύπου tiebreak που στηρίζονται στη μέθοδο κινηματικών περιορισμών [103]. Οι αστοχίες των διεπιφανειών (αποκόλλήσεις των στρώσεων) προβλέπονται βάσει της ακόλουθης σχέσης που αναπτύχθηκε από τους Chang και Springer (1986) :

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{s_n}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{s_s}\right)^2 \geq d^2$$

Όπου : σ_n , σ_s : ορθή τάση και διατμητική τάση που ασκείται στην επιφάνεια,
 s_n , s_s : ορθή και διατμητική αντοχή διεπιφάνειας (ILSS / ILNS),
και $d < 1$ τότε δεν υπάρχει αποκόλληση,
 $d > 1$ τότε έχει παρουσιαστεί αποκόλληση.

Από τη στιγμή που λαμβάνει χώρα αστοχία διεπιφάνειας (αποκόλληση), οι κόμβοι που ήταν «δεσμευμένοι» απελευθερώνονται και η επαφή μεταξύ των νέων επιφανειών που δημιουργούνται αντιμετωπίζονται πλέον από τον κώδικα, ως προς την επαφή τους, με τη μέθοδο των ποινών (penalty method). Οι επαφές tiebreak έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία κατά το παρελθόν, για τη μοντελοποίηση των αστοχιών διεπιφανειών ανάμεσα στις στρώσεις σύνθετων υλικών (π.χ. van hoof 1999, Hung 1995, A. Seyed Yaghoubi, B. Liaw 2012).

Οι στρώσεις του σύνθετου υλικού (S2-glass/epoxy prepreg layers), μοντελοποιήθηκαν ως ελαστικό ορθότροπο υλικό (LS-Dyna Mat#2 model) με τις παραμέτρους που φαίνονται στον πίνακα 1. Οι στρώσεις του αλουμινίου (2024-T3 κράμα αλουμινίου) μοντελοποιήθηκαν ως μη γραμμικό ανελαστικό διγραμμικό υλικό με παραμόρφωση αστοχίας (LS-Dyna Mat#3, nonlinear, inelastic, plastic kinematic) με τις παραμέτρους που φαίνονται στον πίνακα 2, ενώ το βλήμα ως rigid material, (LS-Dyna Mat#20 model), με μέτρο όμως ελαστικότητας και λόγο Poisson που αντιστοιχεί σε ανοξείδωτο χάλυβα, για την ορθή προσομοίωση της επαφής κατά τη διάρκεια της κρούσης, με την εξωτερική στρώση του κράματος αλουμινίου.

2. Κατηγοριοποίηση των FE models.

Οι μοντελοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες :

α. Στα μοντέλα που αφορούν κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων σε δοκίμια **κράματος αλουμινίου 2024-T3**, προσομοιάζοντας τα δημοσιευμένα πειράματα του Vlot [36] και του Morinière [21], για τα οποία είναι γνωστές οι συνθήκες εκτέλεσης και τα αποτελέσματά τους. Ο σκοπός των υπόψη μοντέλων είναι η επικύρωσή τους μέσω της σύγκρισης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων του κώδικα σε σχέση με τα πραγματικά αποτελέσματα των πειραμάτων.

β. Στα μοντέλα που αφορούν κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων σε δοκίμια **Glare**, προσομοιάζοντας τα δημοσιευμένα πειράματα των Wu & Yang [72] για τα οποία είναι γνωστές οι συνθήκες εκτέλεσης και τα αποτελέσματά τους. Ο σκοπός των υπόψη μοντέλων είναι η επικύρωσή τους μέσω της σύγκρισης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων του κώδικα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια Glare.

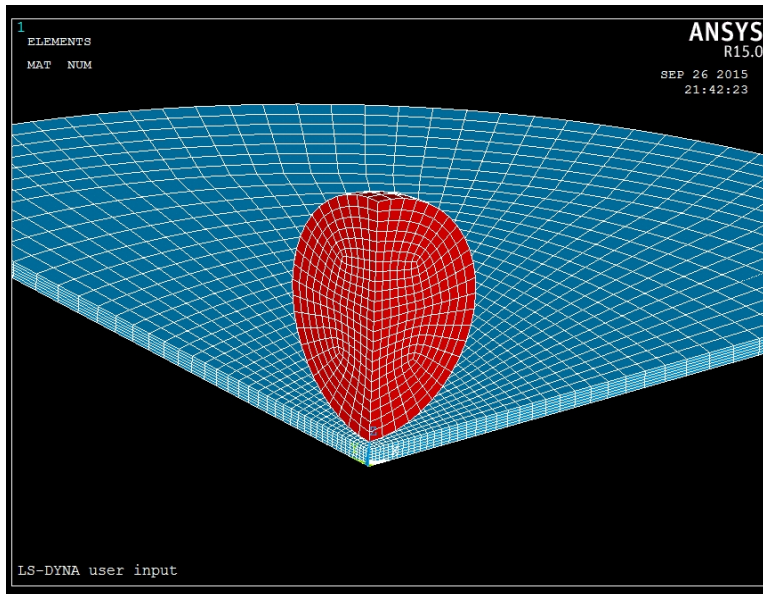
γ. Στα μοντέλα που αφορούν κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων σε δοκίμια **Glare**, προσομοιάζοντας δοκίμια που έχουν μελετηθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Ο σκοπός των υπόψη μοντέλων είναι η σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων του κώδικα σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αναλυτική μέθοδο του δευτέρου κεφαλαίου της εργασίας.

3. Μοντελοποίηση κρούσης σε κράματα αλουμινίου 2024-T3.

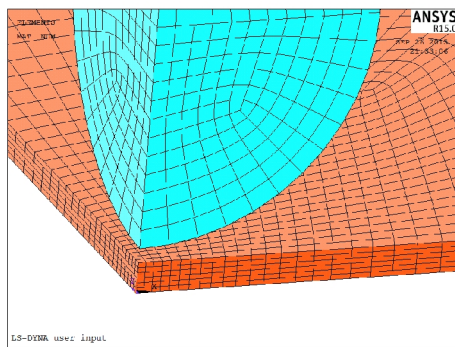
α. Στην προσομοίωση του πειράματος του Vlot [36], τα κύρια χαρακτηριστικά και οι βασικές παράμετροι μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Αλουμίνιο 2024-T3 material_model	Nonlinear_Inelastic_plastic kinematic
Βλήμα Material model	rigid
Element_type	Solid_164
Contact_type	Surface_to_surface
Μοντελοποίηση σε :	1 ^ο Τεταρτημόριο (symm.boundaries)
Failure strain Al [%]	20 [104]
Density Al [kg/m ³]	2780 [38]
Young's modulus Al [GPa]	72.4 [102]
Poisson's ratio Al [-]	0.33 [103]
Static yield limit Al [MPa]	350 [36]
Tangent modulus Al [MPa]	1300 [38]
Static/dynamic friction coefficients	0.8/0.5 [103]
Elements	10608
Nodes	12919

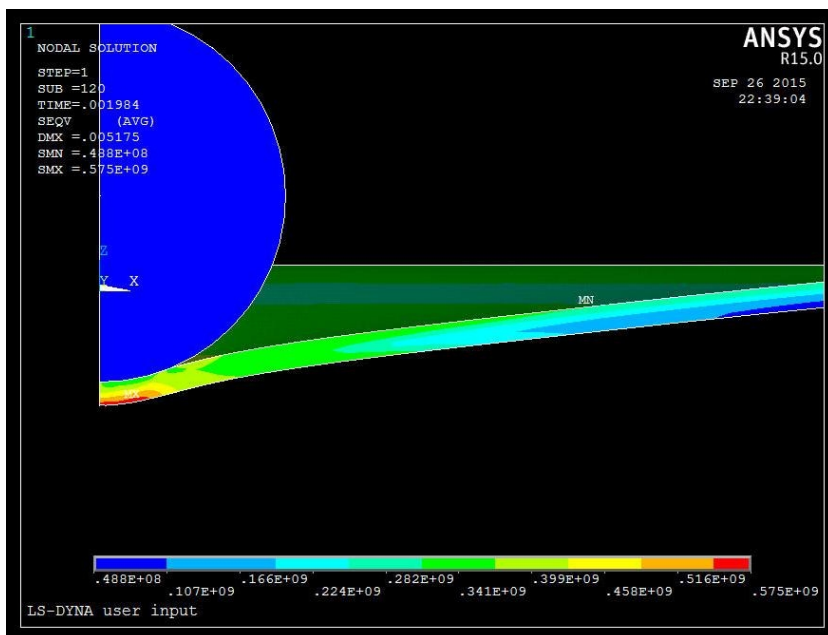
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά-παράμετροι μοντελοποίησης LS-Dyna.



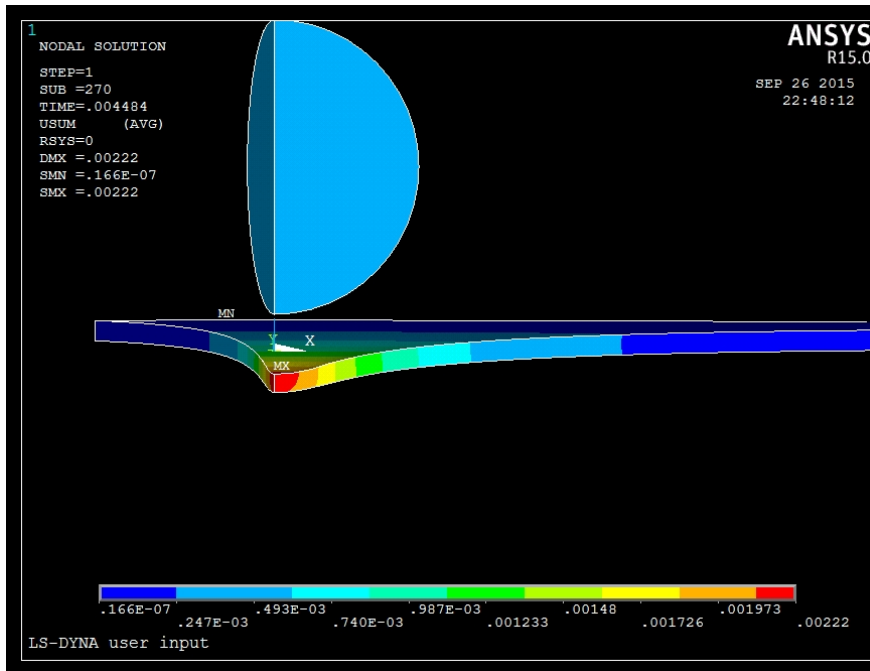
Μοντέλο 2024-T3 πριν την κρούση.



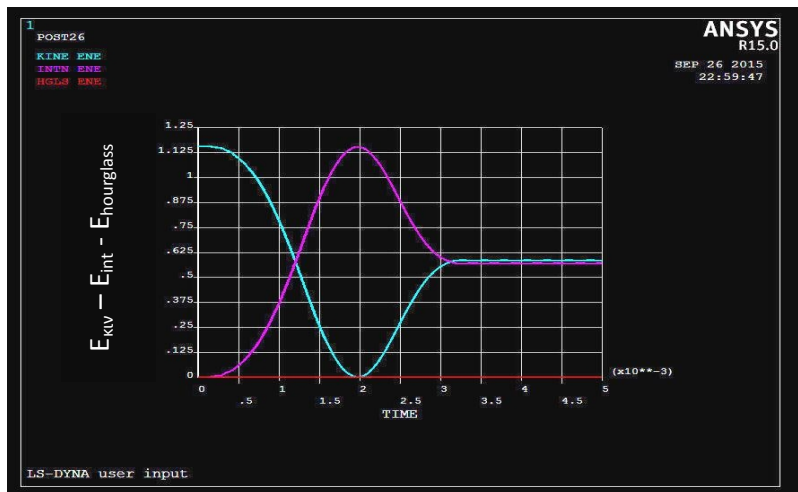
Λεπτομέρεια μοντέλου προ της κρούσης.



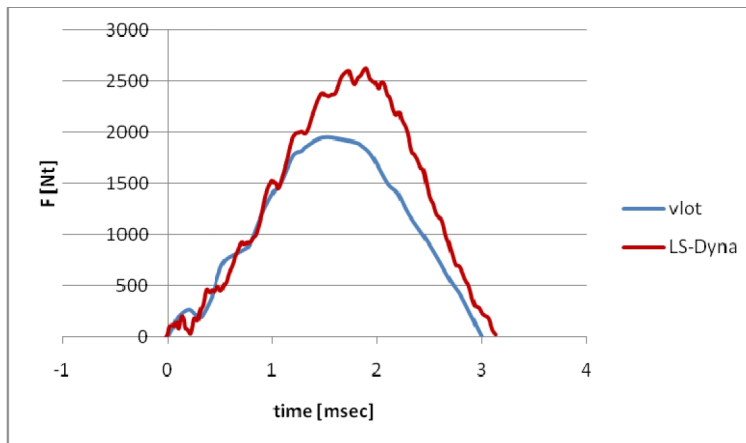
Von-mises τάσεις τη χρονική στιγμή των μέγιστων παραμορφώσεων [Pa].



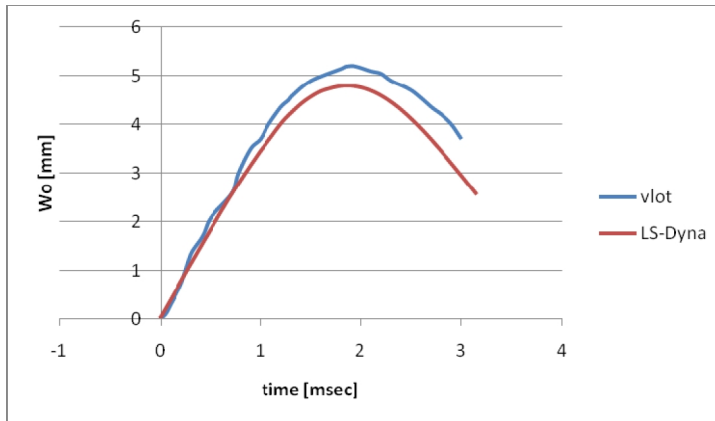
Παραμορφωσιακή κατάσταση (displacements [m]) μετά το πέρας της κρούσης



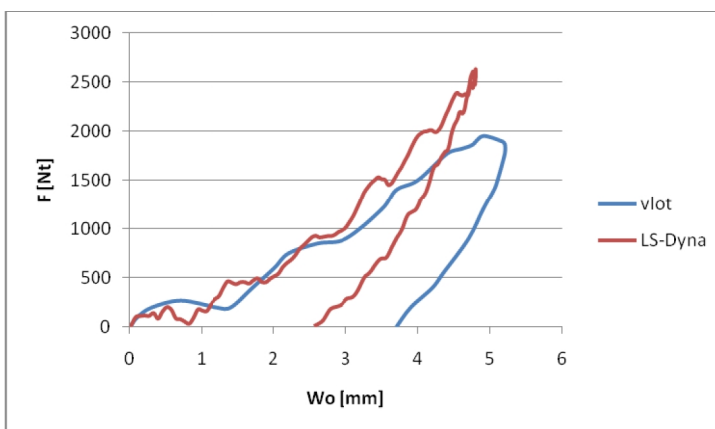
Διάγραμμα σύγκρισης Κινητικής ενέργειας (γαλάζιο), Εσωτερικής ενέργειας (μωβ), και Hourglass ενέργειας (κόκκινο) [joules], ως προς χρόνο [sec].



Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-χρόνου.

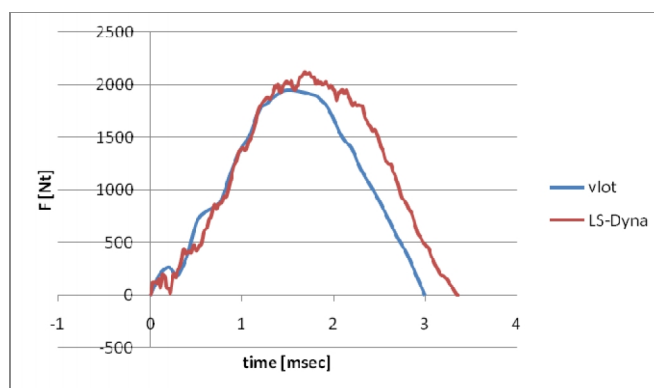


Συγκριτικά διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου.

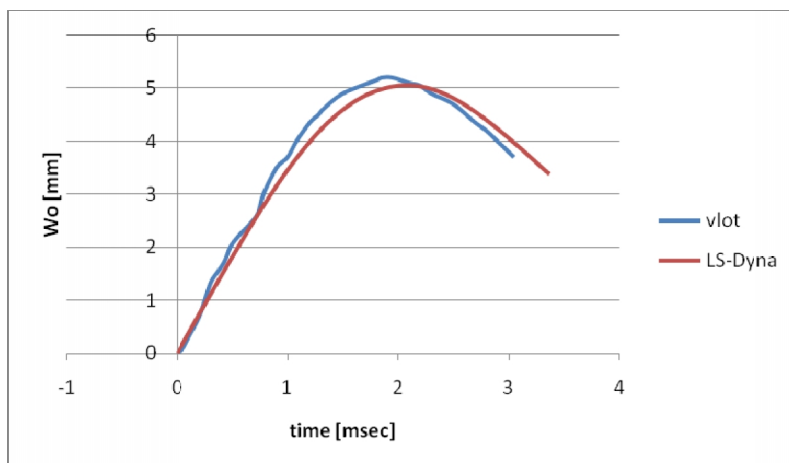


Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-μετατόπισης.

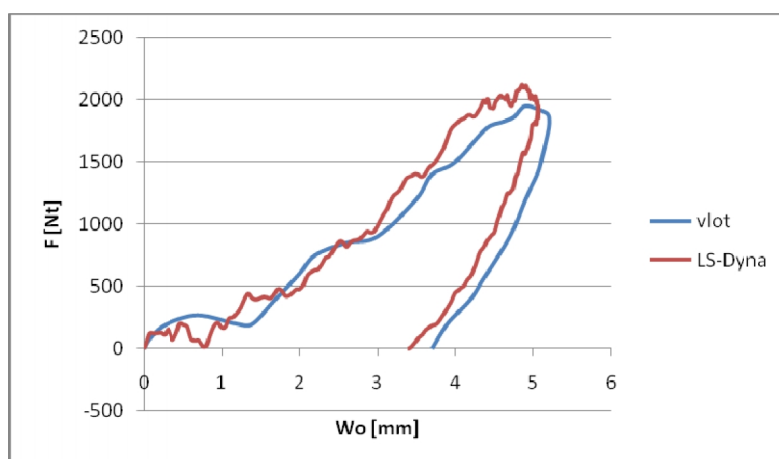
Σημειώνεται ότι για την περίπτωση που η τάση διαρροής του 2024-T3 τεθεί 289MPa (όπως καθορίζεται από το ανάλογο datasheet του κατασκευαστή 2024-T3, Alcoa) [103], το εφαπτομενικό μέτρο αναλογίας της πλαστικής περιοχής τεθεί 684MPa [104], και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους αμετάβλητες, τότε τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν, εμφανίζουν βελτιωμένη σύγκλιση με τα αντίστοιχα πειραματικά, όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-χρόνου.



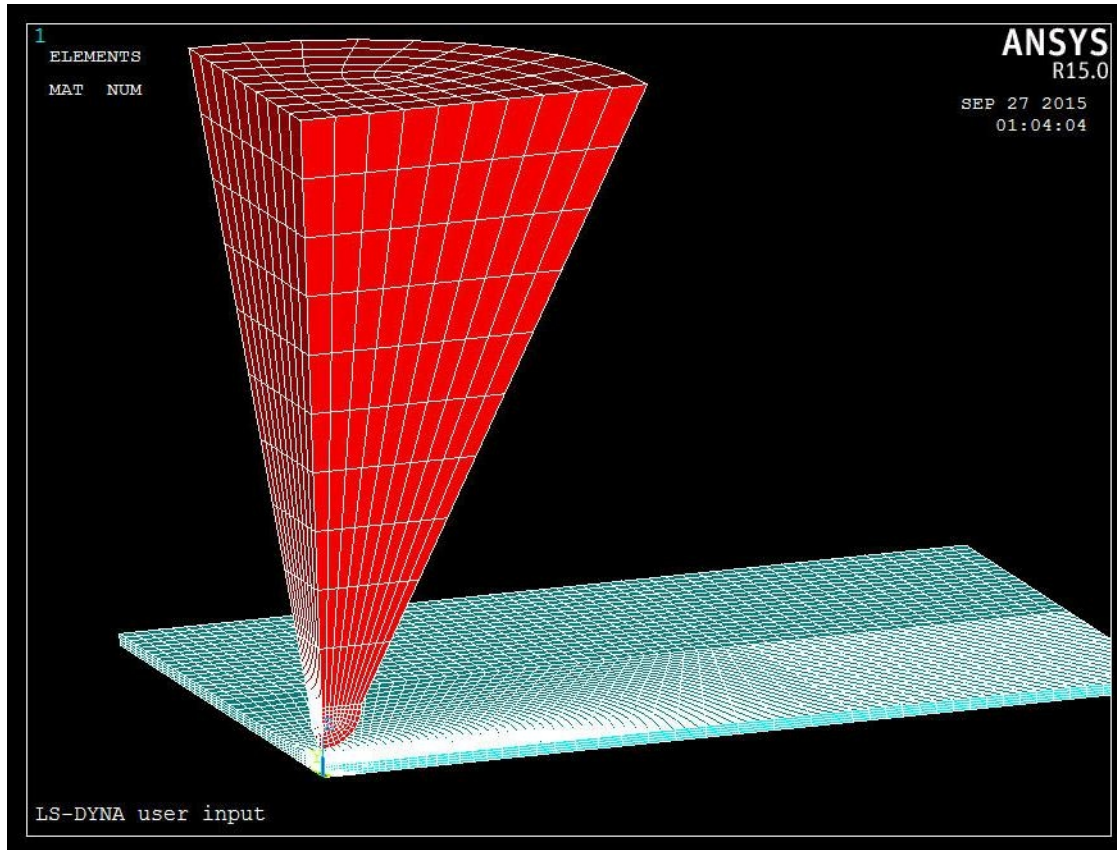
Συγκριτικά διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου.



Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-μετατόπισης.

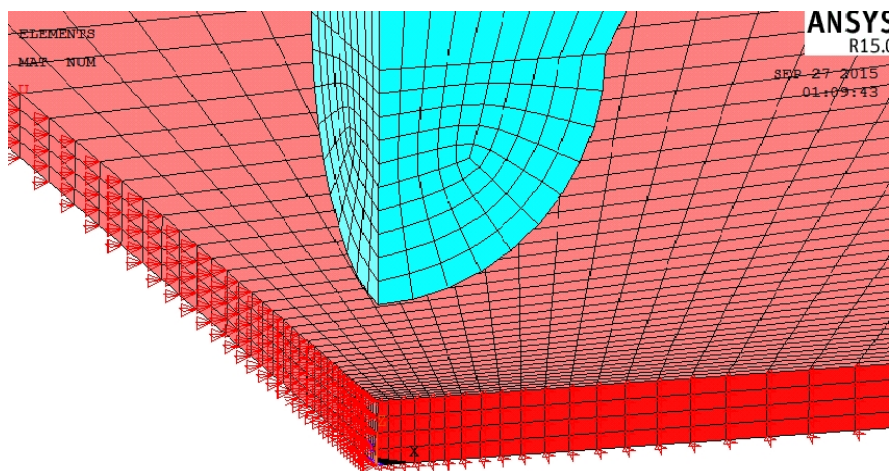
β. Στην προσομοίωση του πειράματος του Morinière [21], οι βασικές παράμετροι μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, είναι όμοιες με τις αντίστοιχες του πίνακα 1, με μόνη διαφοροποίηση τον αριθμό των στοιχείων και των κόμβων του μοντέλου, που για την προκειμένη περίπτωση είναι:

Μοντελοποίηση πειράματος Morinière [21]	
Elements	15174
Nodes	19581

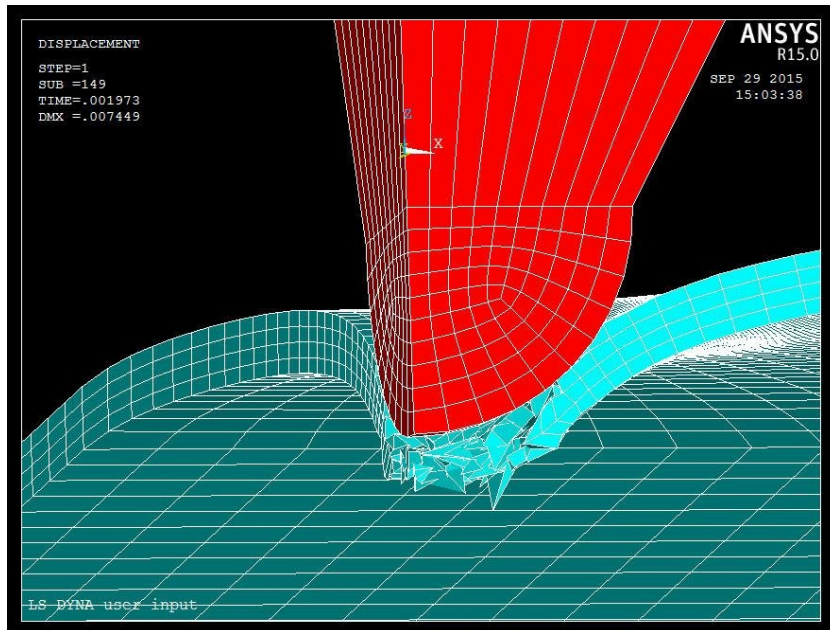


Μοντέλο 2024-T3 πριν την κρούση.

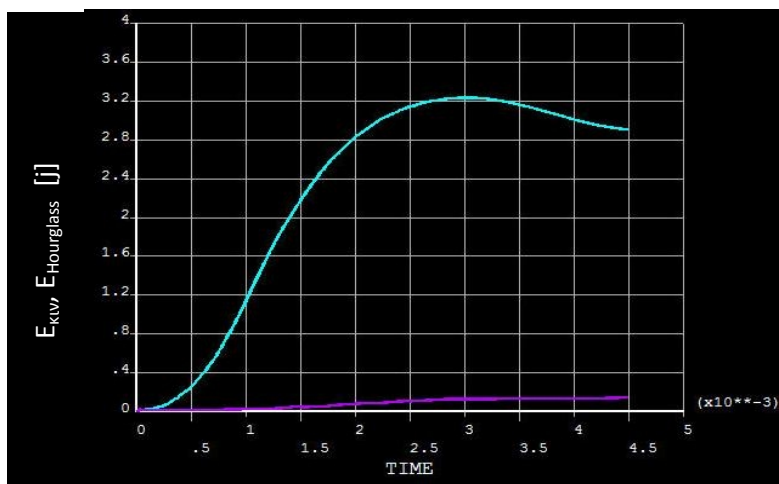
Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση η πυκνότητα του βλήματος είναι αυτή του χάλυβα, οπότε η διάσταση του βλήματος στο μοντέλο, είναι 1:1 με αυτή του πειράματος.



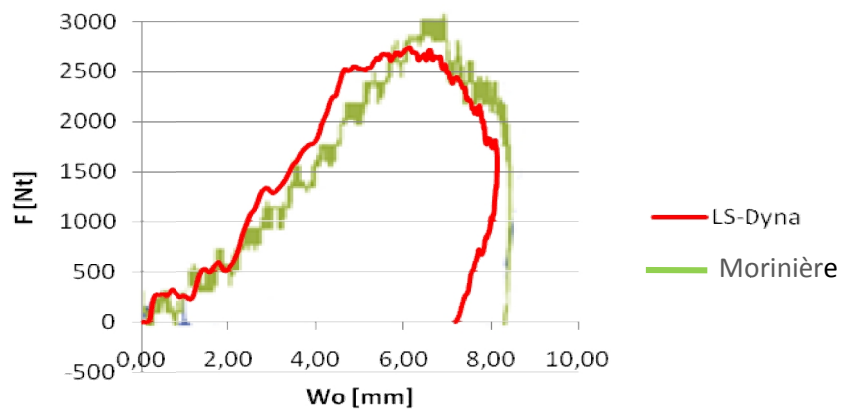
Λεπτομέρεια αρχικού μοντέλου που φαίνονται τα symmetry boundary conditions.



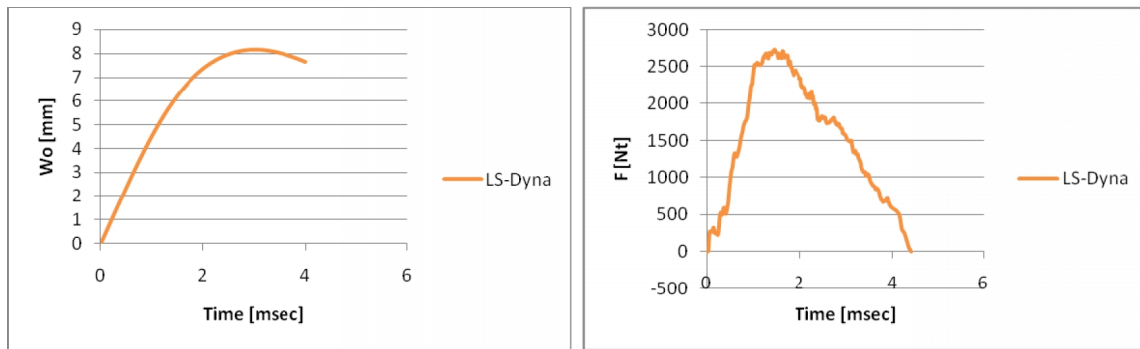
Λεπτομέρεια κατά το τελικό στάδιο της κρούσης, που φαίνεται η ρωγμάτωση του δοκιμίου λόγω ικανοποίησης κριτηρίου «element failure strain».



Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικής ενέργειας (γαλάζιο) – ενέργειας Hourglass [joules], ως προς τον χρόνο [sec].



Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-μετατόπισης.



Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου και δύναμης-χρόνου.

Κατόπιν των ανωτέρω, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου, ως προς τα αντίστοιχα του πειράματος, συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα :

	Morinière [21]	LS-Dyna model	Απόκλιση %
Μέγιστη δύναμη F_{max} [kN]	2,9±0,1	2,743	5,4% ± 3%
Μέγιστη Παραμόρφωση Δ_{max} [mm]	9,9±1,5	8,16	17,5% ± 10%

4. Μοντελοποίηση κρούσης σε δοκίμια Glare.

Στην προσομοίωση των πειραμάτων των Wu & Yang [72] πάνω σε υλικά GLARE_5-2/1 και GLARE_4-3/2, τα κύρια χαρακτηριστικά και οι βασικές παράμετροι μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

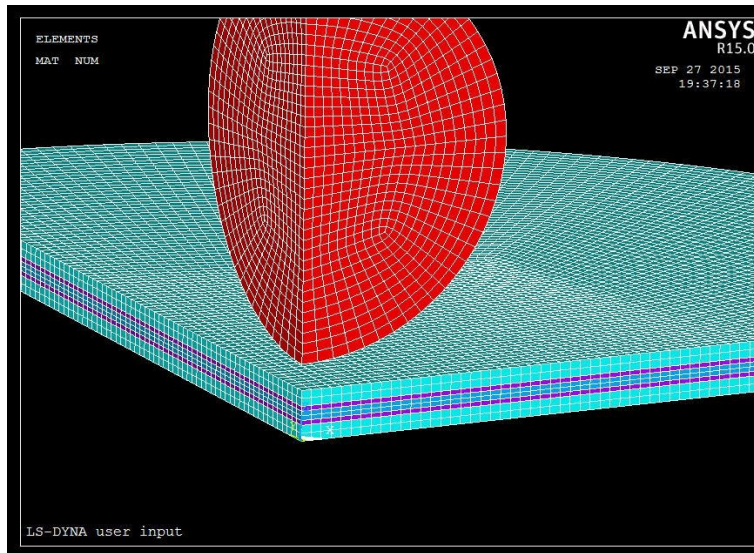
Αλουμίνιο 2024-T3	
Material_model	Nonlinear_Inelastic_plastic kinematic
Element_type	Solid_164
Static yield limit Al [MPa]	350 [36]
Tangent modulus Al [MPa]	1300 [38]
Failure strain Al [%]	20 [104]
Density Al [kg/m ³]	2780 [38]
Young's modulus Al [GPa]	72.4 [102]
Poisson's ratio Al [-]	0.33 [103]
S2-glass/epoxy prepreg	
Material_model	Linear_Orthotropic
Density [kg/m ³]	2000 [96]
Poisson ratio (ν_{12}) [-]	0.089852 [96]
Poisson ratio (ν_{31}) [-]	0.089852 [96]
Poisson ratio (ν_{32}) [-]	0.32 [96]
Young's modulus E_1 [GPa]	47.3 [96]
Young's modulus E_2 [GPa]	17 [96]
Young's modulus E_3 [GPa]	17 [96]

Shear moduli G_{12} [GPa]	7 [96]
Shear moduli G_{23} [GPa]	7 [96]
Shear moduli G_{13} [GPa]	7 [96]
Models	
Μοντελοποίηση στο 1 ^ο Τεταρτημόριο (με symmetric boundaries)	
Material model Βλήματος	rigid
Static/dynamic friction coefficients	0.8/0.5 [103]
Contact_type	Surface_to_surface (impactor-Glare)
Contact_type	Tiebreak_surfaces (among S2-glass layers)
Tiebreak shear failure strain [MPa]	40 [105]

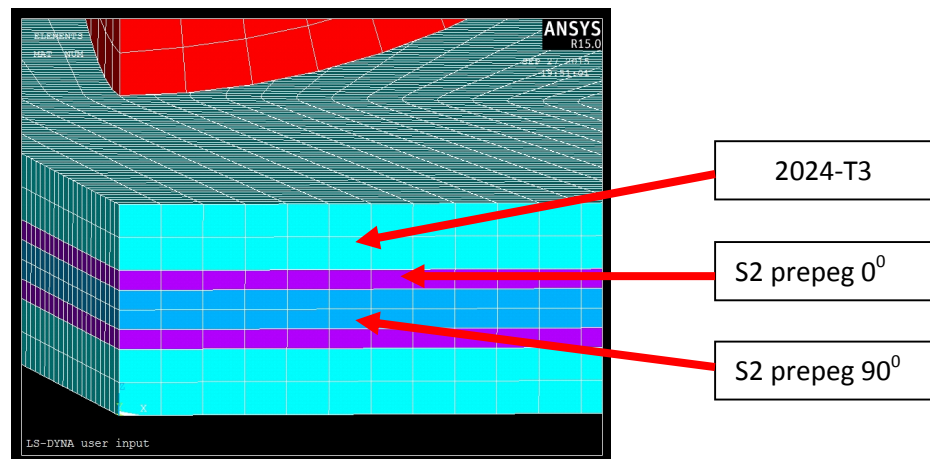
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά-παράμετροι μοντελοποίησης Glare στο LS-Dyna.

α. Περίπτωση GLARE 5-2/1

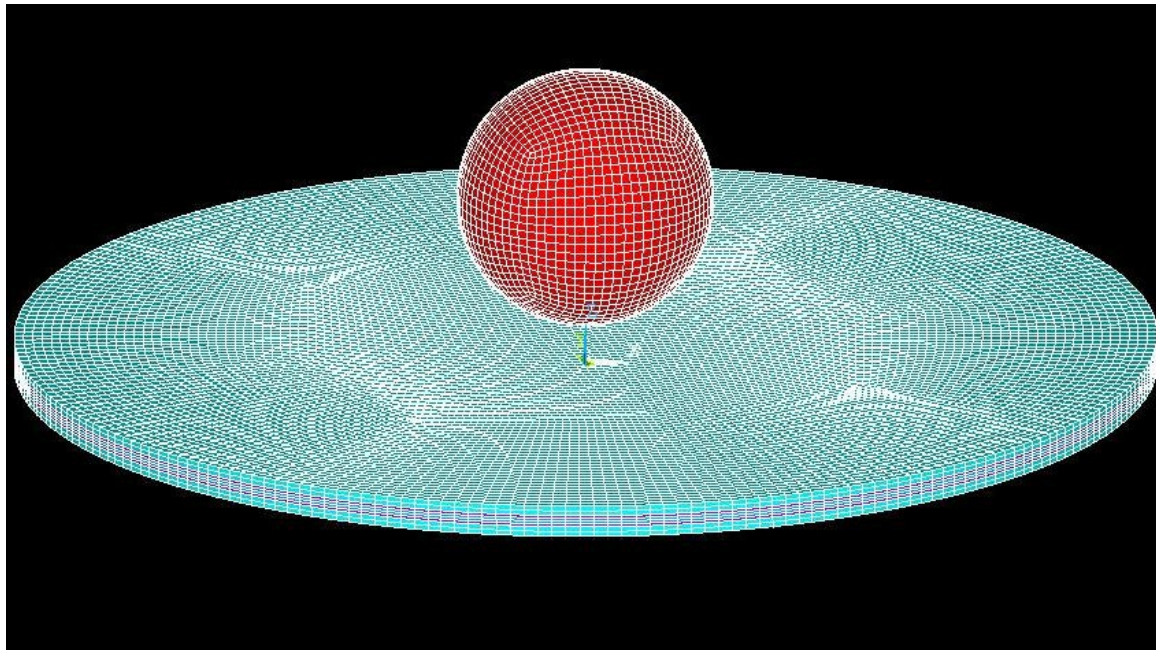
GLARE 5-2/1	
Elements	32576
Nodes	50148



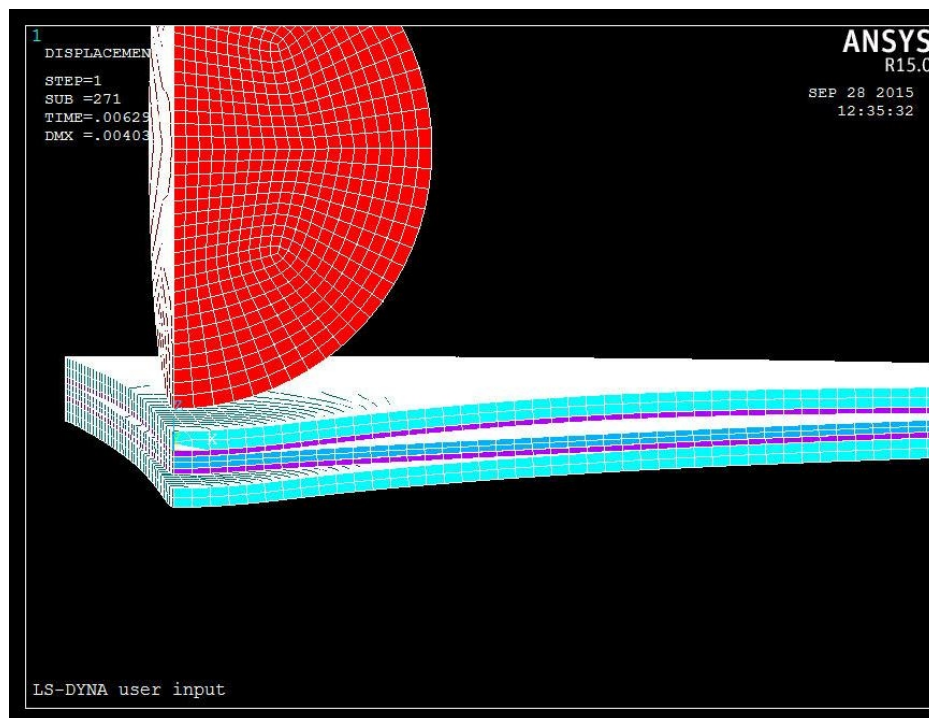
Αρχικό μοντέλο GLARE 5-2/1.



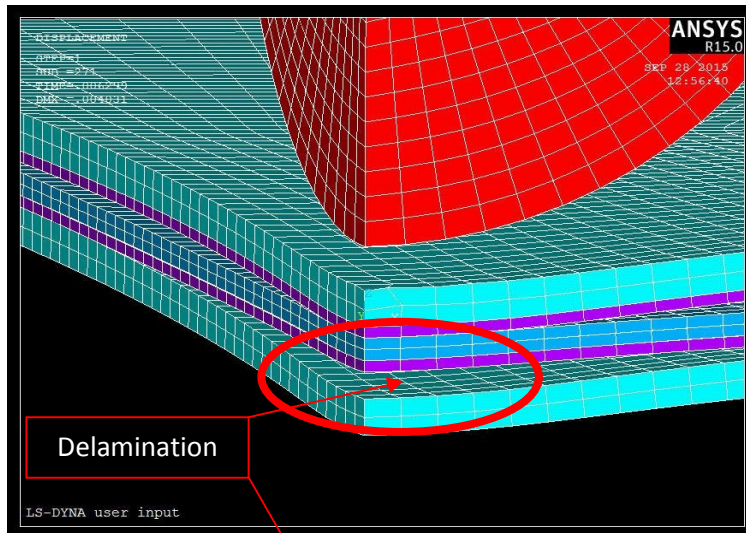
Λεπτομέρεια διαστρωμάτωσης του υπολογιστικού μοντέλου.



Αρχικό μοντέλο GLARE 5-2/1 με επιλογή symmetry expansion.



Μοντέλο GLARE 5-2/1, μετά την ολοκλήρωση της κρούσης.

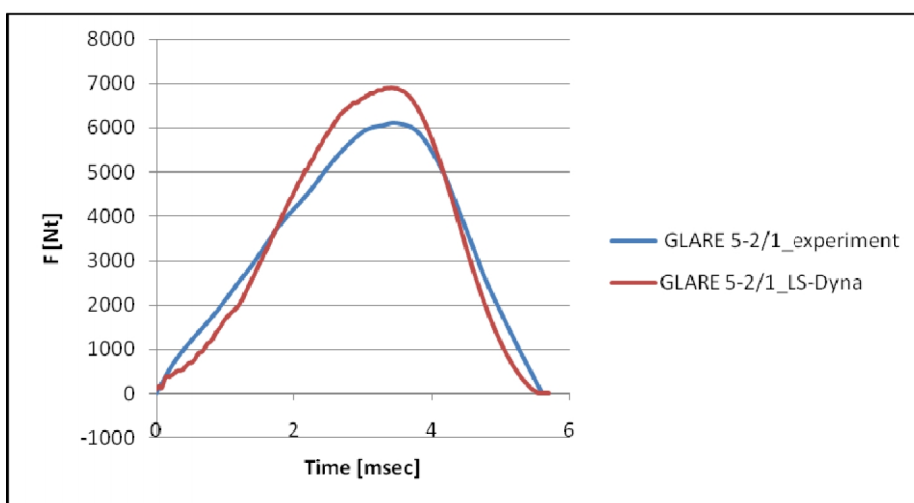


Λεπτομέρεια αποκολλήσεων δοκιμίου GLARE 5-2/1.

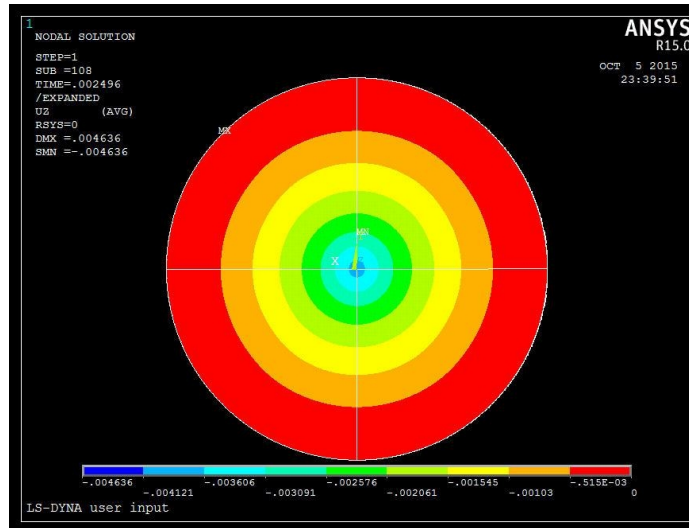
Στο ανωτέρω μοντέλο είναι εμφανείς οι περιοχές αποκόλλησης, οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες ομοιότητες σε σχέση με τις πραγματικές αποκολλήσεις του αντίστοιχου πειράματος [72], (ιδιαίτερα οι αποκολλήσεις περίξ του κέντρου του δοκιμίου), όπως φαίνονται στην εικόνα 1.



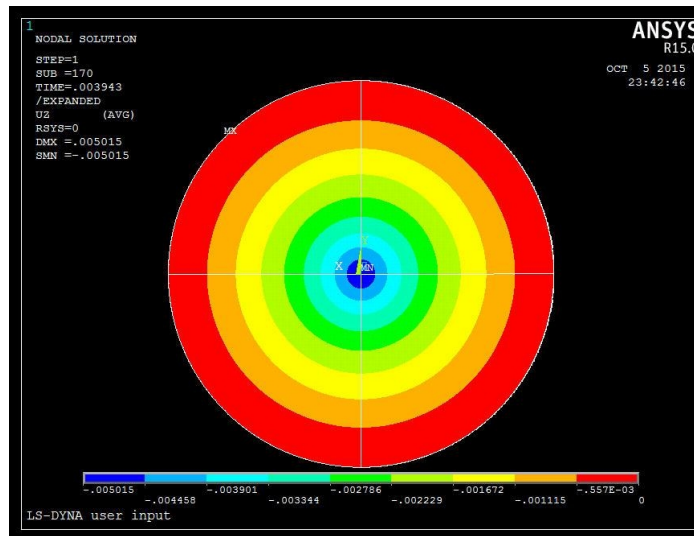
Εικόνα 1. Εσωτερικές βλάβες δοκιμίου GLARE 5-2/1 μετά της κρούσης [72].



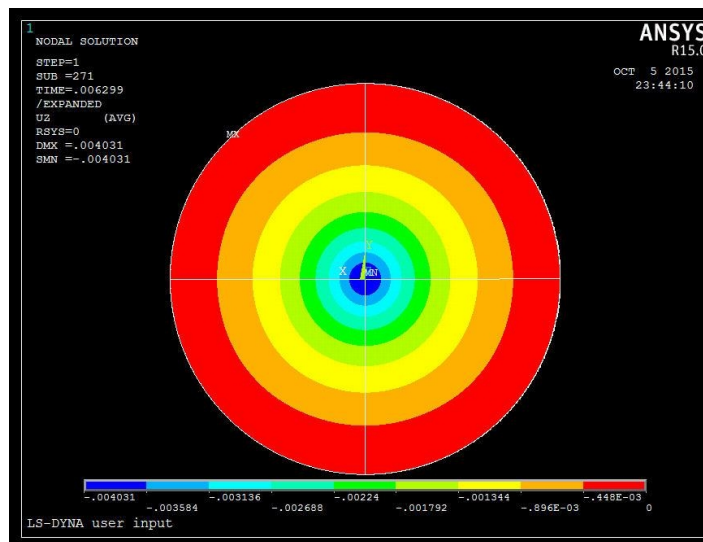
Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-χρόνου.



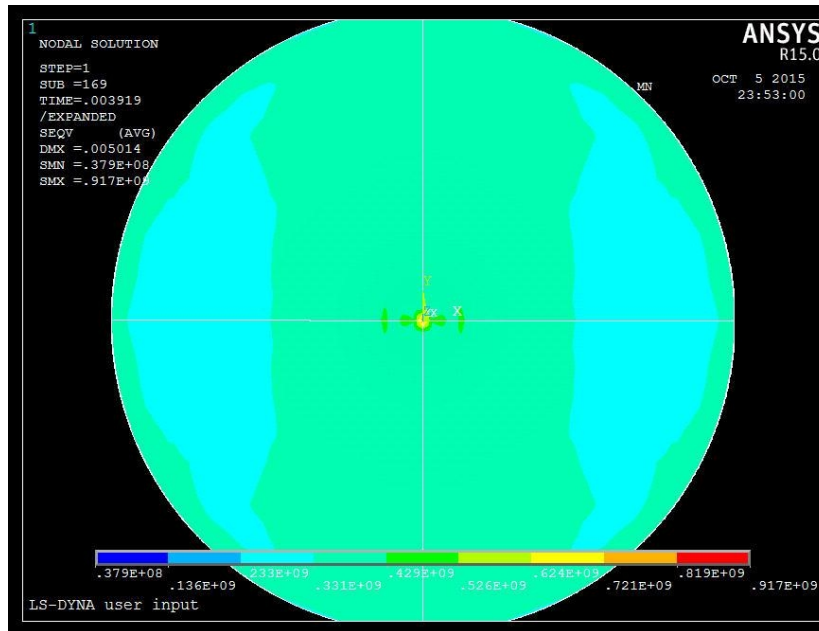
Vertical displacements plot σε κάτοψη, στο μέσο της πρώτης φάσης της κρούσης [m]



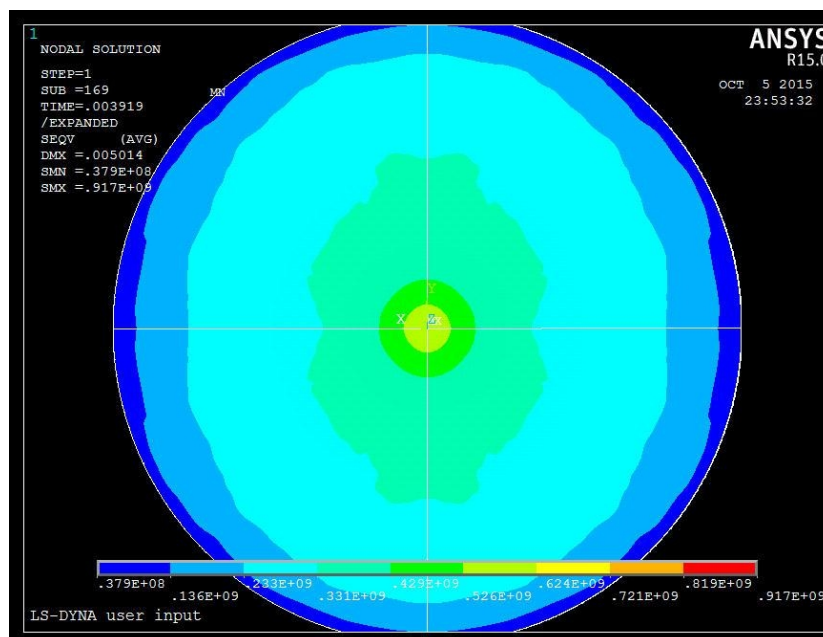
Vertical displacements (μετατοπίσεις) σε κάτοψη, στη μέγιστη μετατόπιση [m].



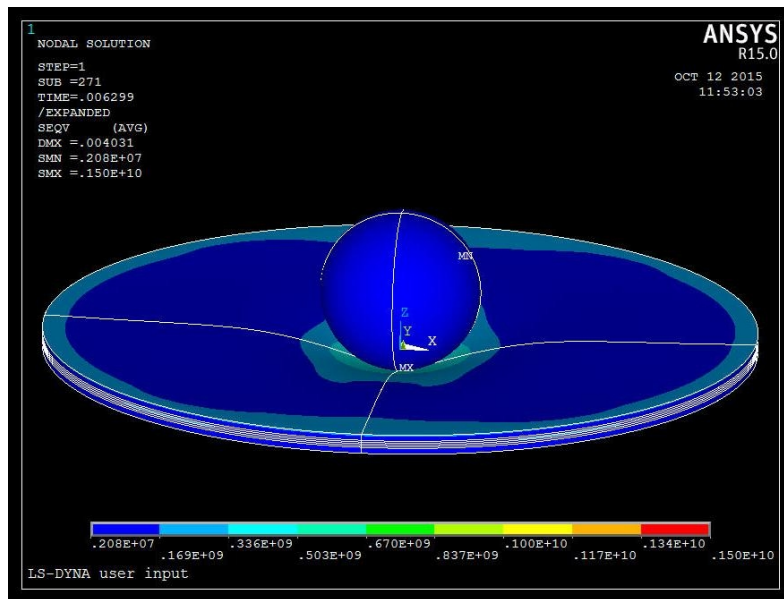
Vertical displacements (μετατοπίσεις) σε κάτοψη, στη μόνιμη παραμόρφωση [m].



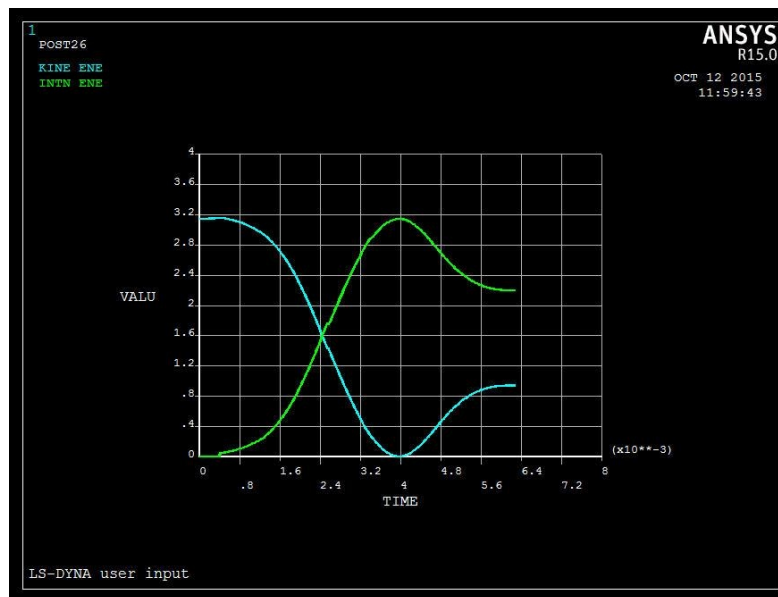
Von-Mises τάσεις στην στρώση αλουμινίου που δέχεται την κρούση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης [Pa].



Von-Mises τάσεις στην τελευταία στρώση αλουμινίου (απέναντι της κρούσης), τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης [Pa].



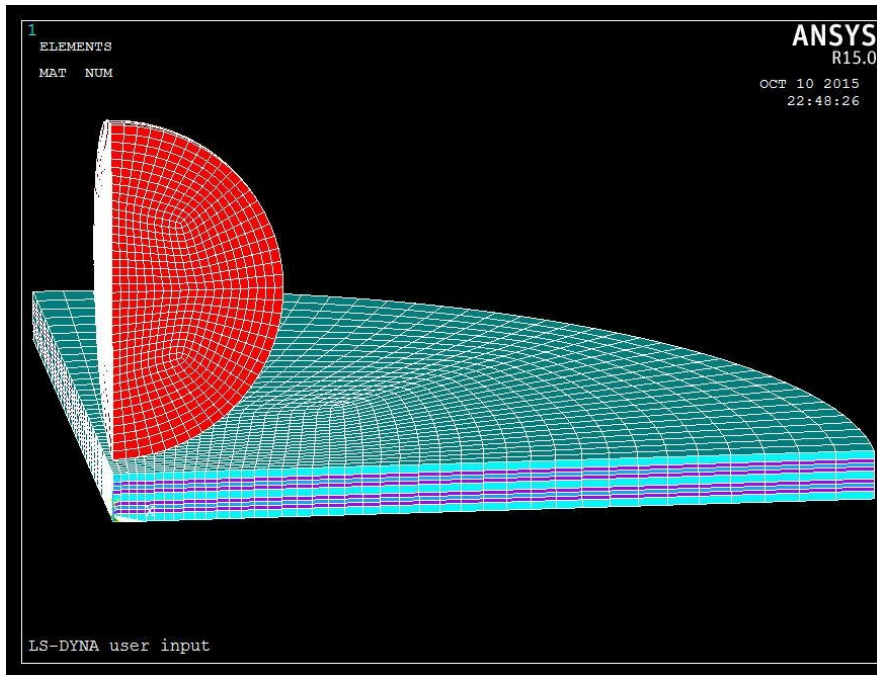
Γενική εικόνα του δοκιμίου με Von-Mises τάσεις, αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κρούσης (nodal solution).



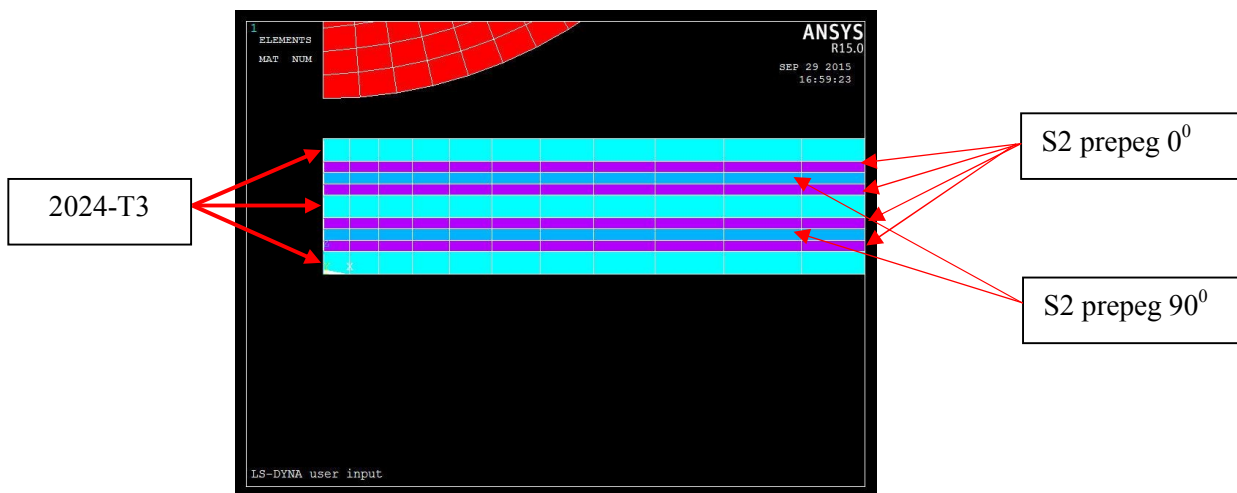
Διάγραμμα σύγκρισης Κινητικής ενέργειας (γαλάζιο) και Εσωτερικής ενέργειας (κίτρινο),) [joules], ως προς χρόνο [sec].

β. Περίπτωση GLARE 4-3/2

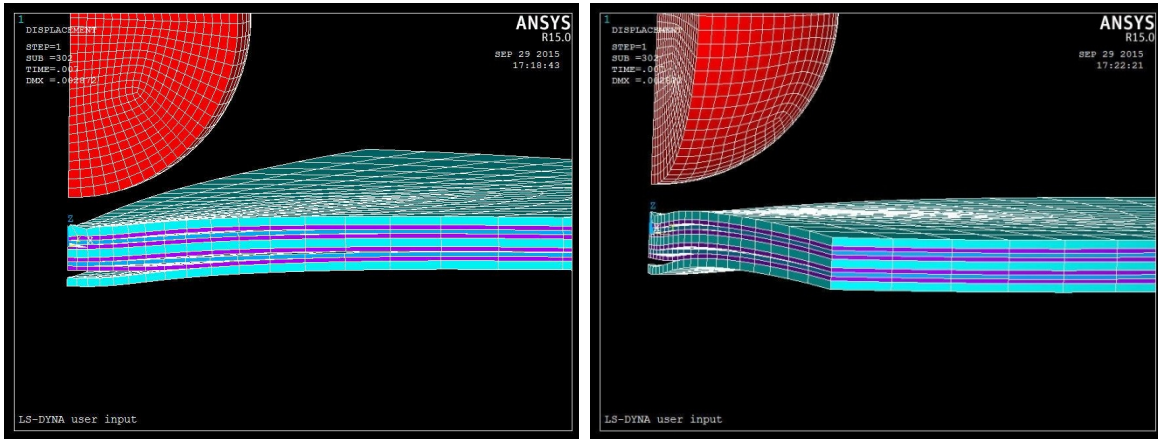
GLARE 4-3/2	
Elements	18800
Nodes	27866



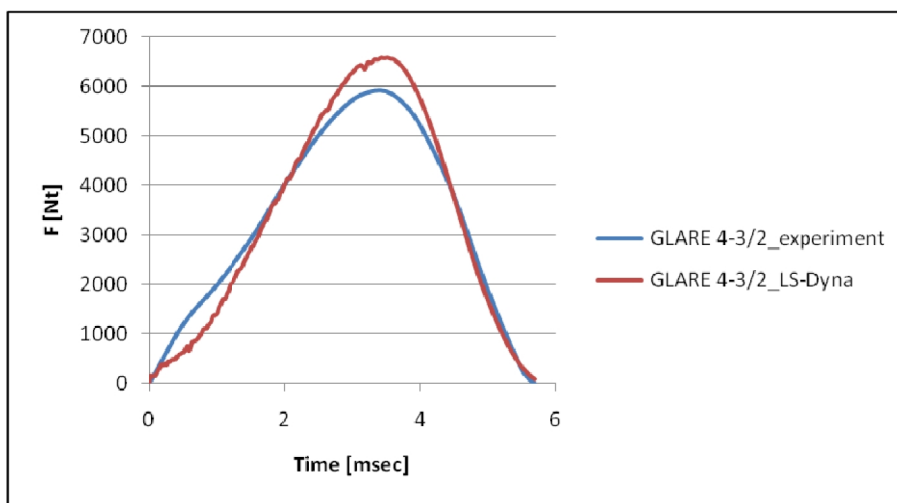
Αρχικό μοντέλο GLARE 4-3/2.



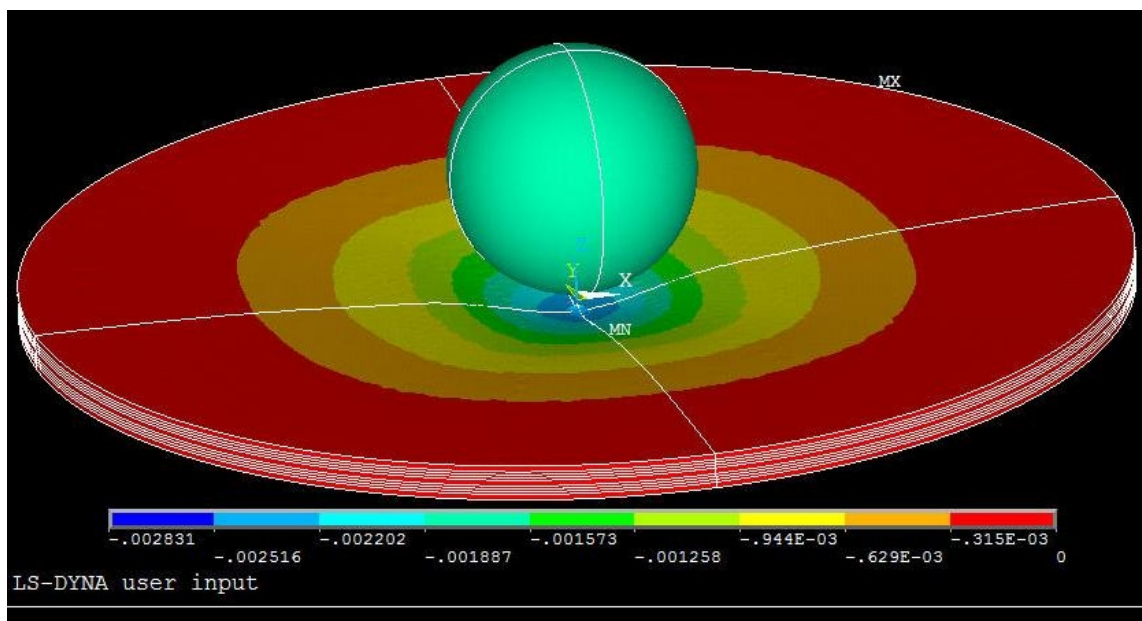
Λεπτομέρεια διαστρωμάτωσης του υπολογιστικού μοντέλου.



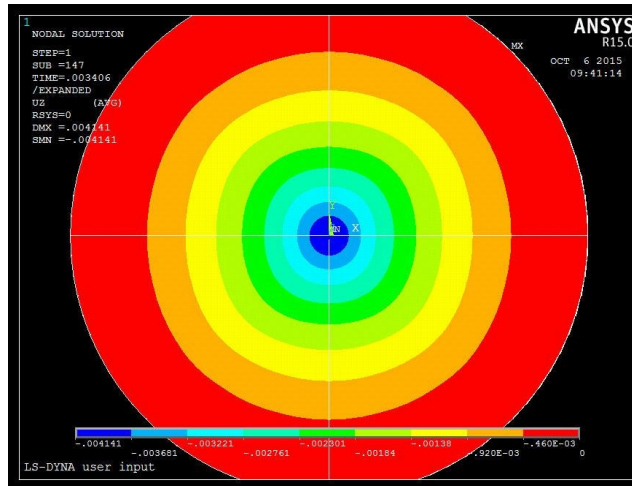
Λεπτομέρειες μοντέλου μετά την κρούση που διακρίνονται οι μόνιμες παραμορφώσεις και οι αποκολλήσεις των στρώσεων.



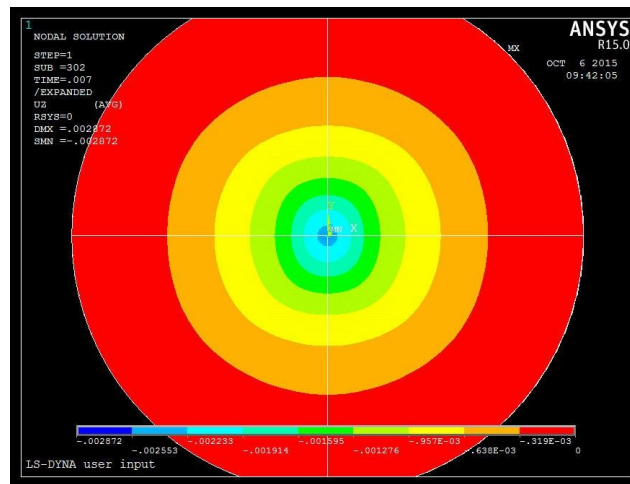
Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-χρόνου.



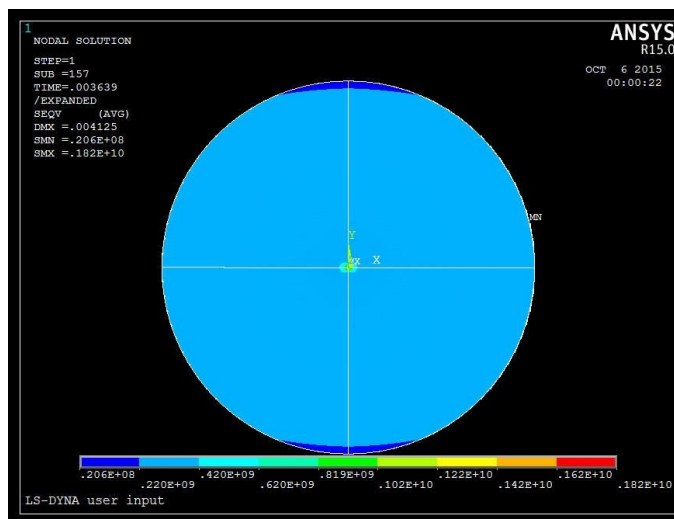
Γενική όψη των vertical displacements (μετατοπίσεις), μετά το πέρας της κρούσης [m].



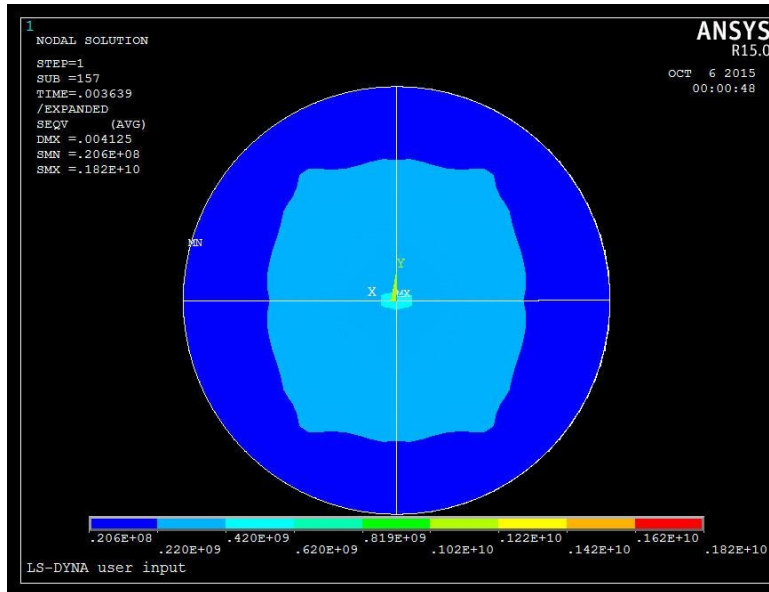
Vertical displacements (μετατοπίσεις) σε κάτοψη, στη μέγιστη μετατόπιση [m].



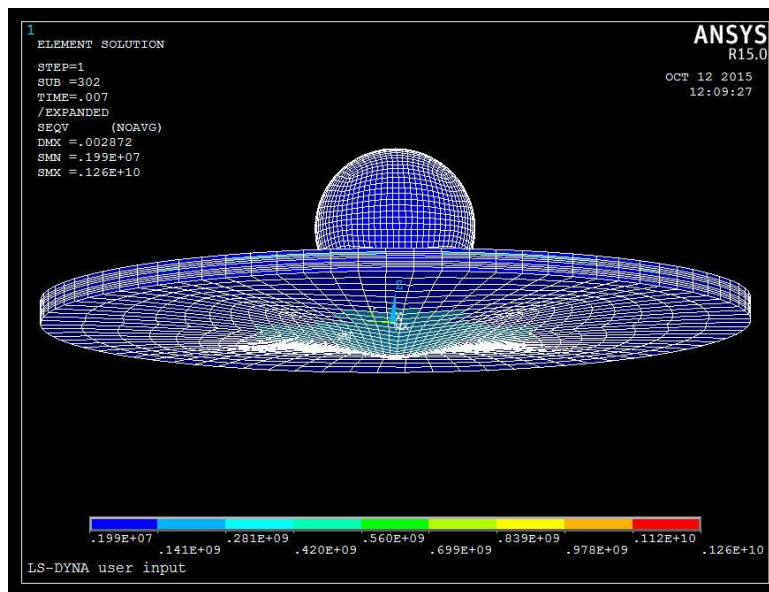
Vertical displacements (μετατοπίσεις) σε κάτοψη, στη μόνιμη παραμόρφωση [m].



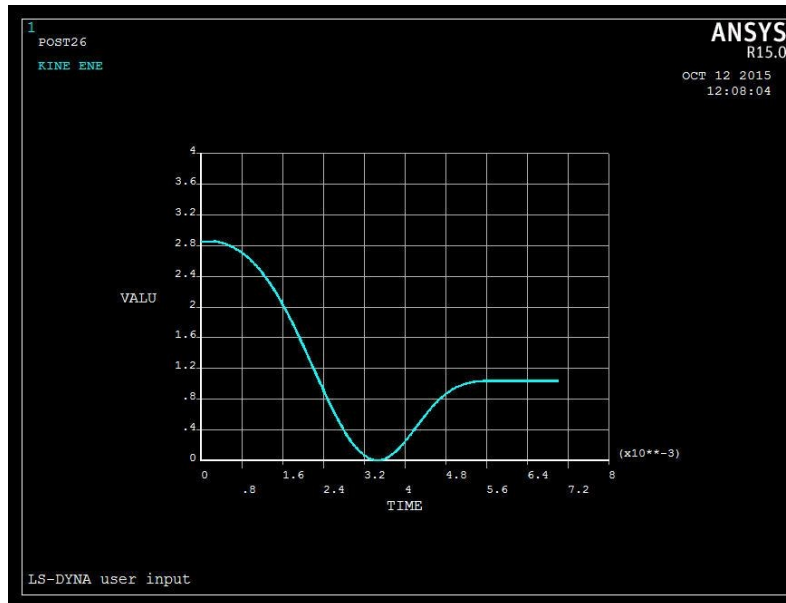
Von-Mises τάσεις στην στρώση αλουμινίου που δέχεται την κρούση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης [Pa].



Von-Mises τάσεις στην τελευταία στρώση αλουμινίου (απέναντι της κρούσης), τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης [Pa].

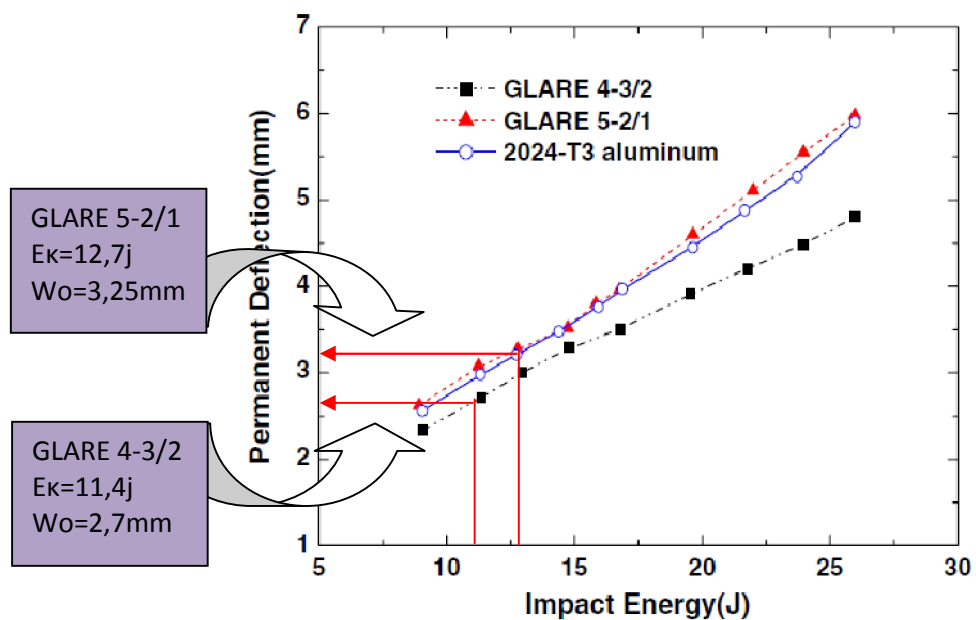


Γενική εικόνα του δοκιμίου με Von-Mises τάσεις, αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κρούσης (element solution).

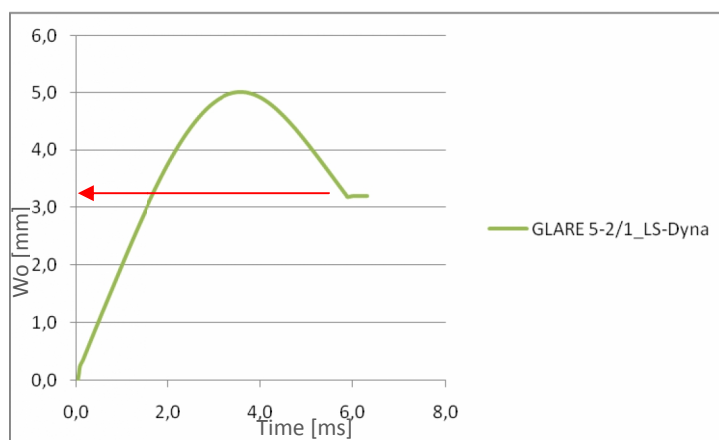
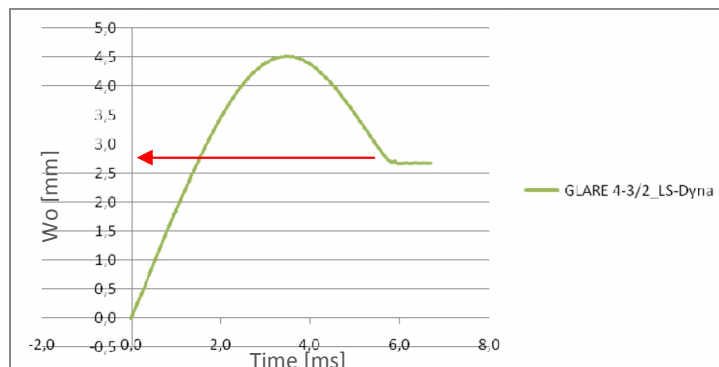


Διάγραμμα μεταβολής της Κινητικής ενέργειας (γαλάζιο) του βλήματος [joules], ως προς χρόνο [sec].

γ. Σύγκριση μόνιμων παραμορφώσεων μοντέλων με πείραμα [72].



Διάγραμμα μόνιμης παραμόρφωσης ως προς ενέργεια κρούσης σύμφωνα με το πείραμα [72]



Διαγράμματα παραμόρφωσης χρόνου μοντέλων LS-Dyna.

Τα αποτελέσματα από τα ανωτέρω διαγράμματα φαίνονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα :

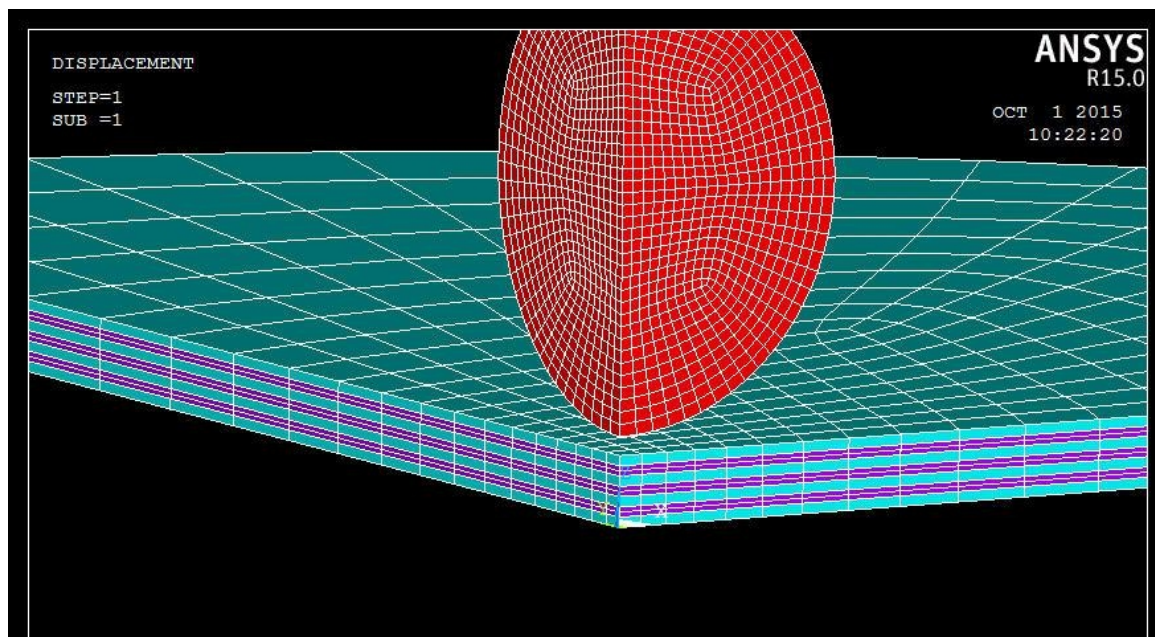
	Experiment [72]	LS-Dyna model	Απόκλιση %
Μόνιμη Παραμόρφωση <i>GLARE 4-3/2</i>	2.7mm	2.67mm	1%
Μόνιμη Παραμόρφωση <i>GLARE 5-2/1</i>	3.2mm	3.185mm	0.4%

5. Μοντελοποίηση κρούσης σε δοκίμια Glare του 3^{ου} κεφαλαίου.

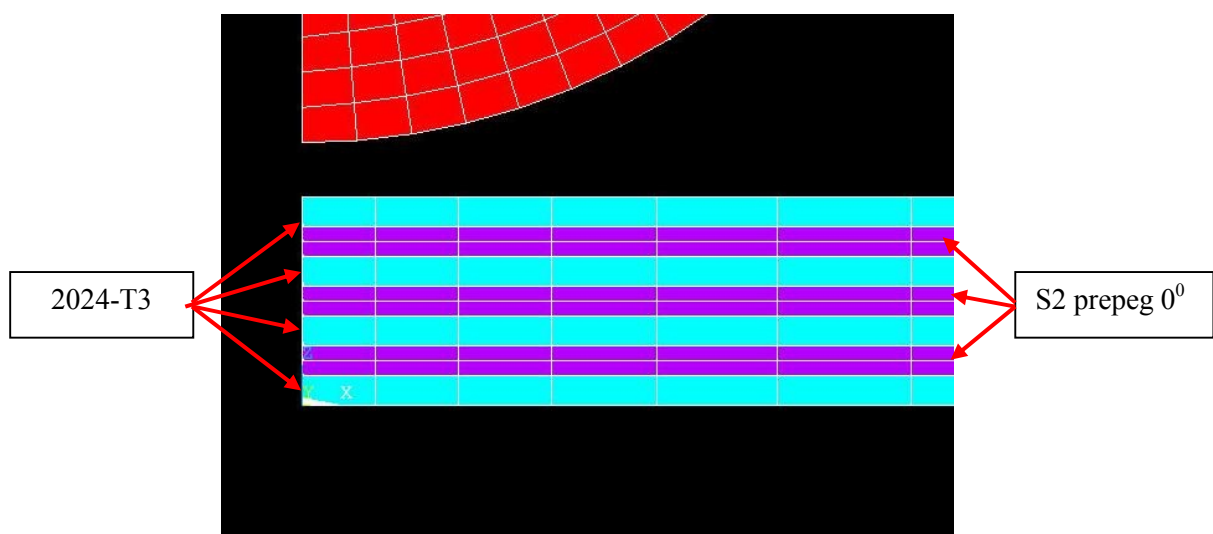
Με σκοπό την προσομοίωση των δοκιμών Glare που έχουν μελετηθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τα κύρια χαρακτηριστικά και οι βασικές παράμετροι του πίνακα 2, ενώ η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας (ILSS) ελήφθη 20MPa [38],[96]. Από τις 24 διαφορετικές περιπτώσεις που αναλύθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο, επιλέχθηκαν και μοντελοποιήθηκαν 5 αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις δοκιμών, τα διαγράμματα σύγκλισης των οποίων, με τα αντίστοιχα αναλυτικά αποτελέσματα, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

α. Glare_2A-4/3-0.256 ($\alpha=50\text{mm}$)

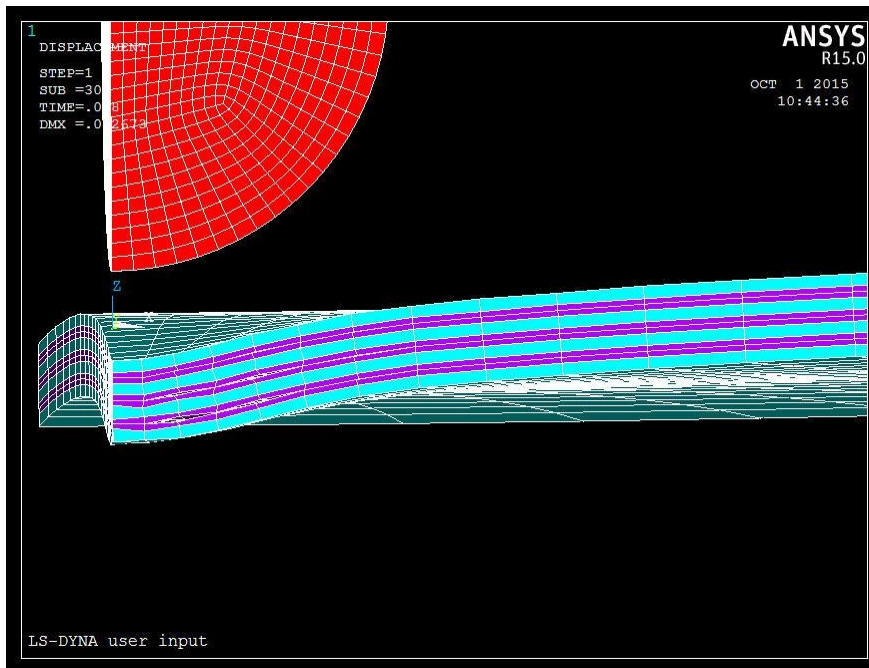
GLARE 4-3/2-0.256 ($\alpha=50\text{mm}$)	
Elements	11000
Nodes	13585



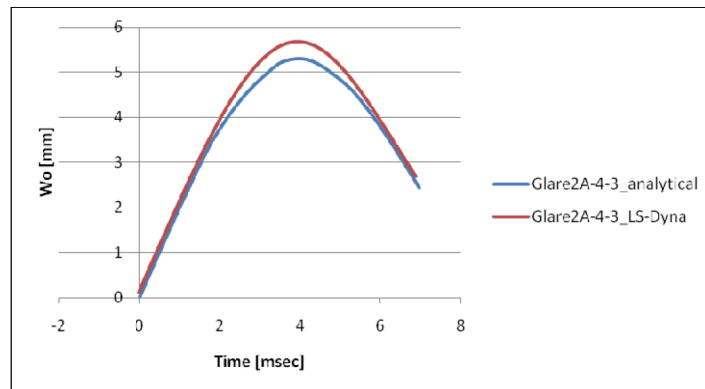
Αρχικό μοντέλο Glare_2A-4/3-0.256 με ακτίνα 50mm.



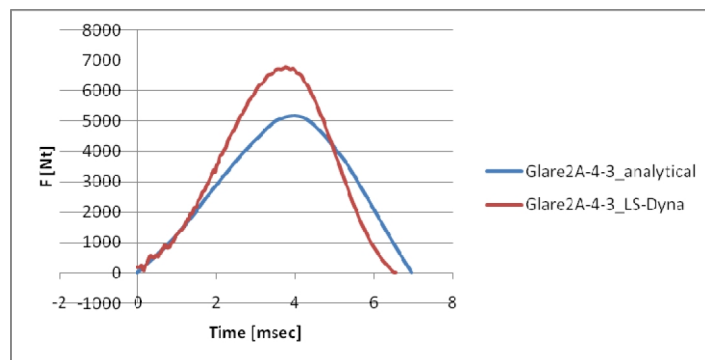
Λεπτομέρεια διαστρωμάτωσης του υπολογιστικού μοντέλου.



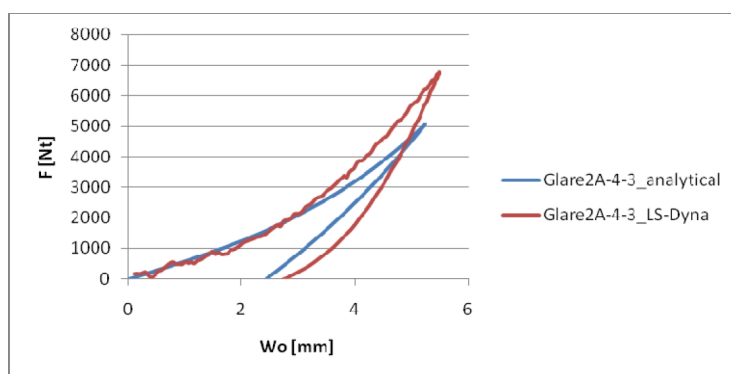
Λεπτομέρειες μοντέλου μετά την κρούση που διακρίνονται οι μόνιμες παραμορφώσεις αλλά και τα delaminations των στρώσεων συνθέτου S2 prepreg θ^0 .



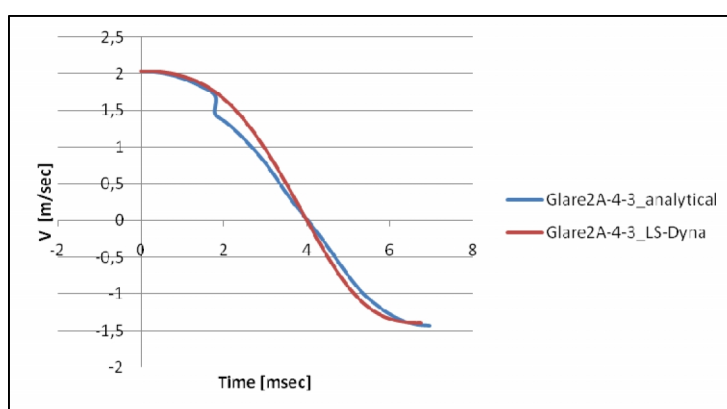
Συγκριτικά διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου.



Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης - χρόνου.



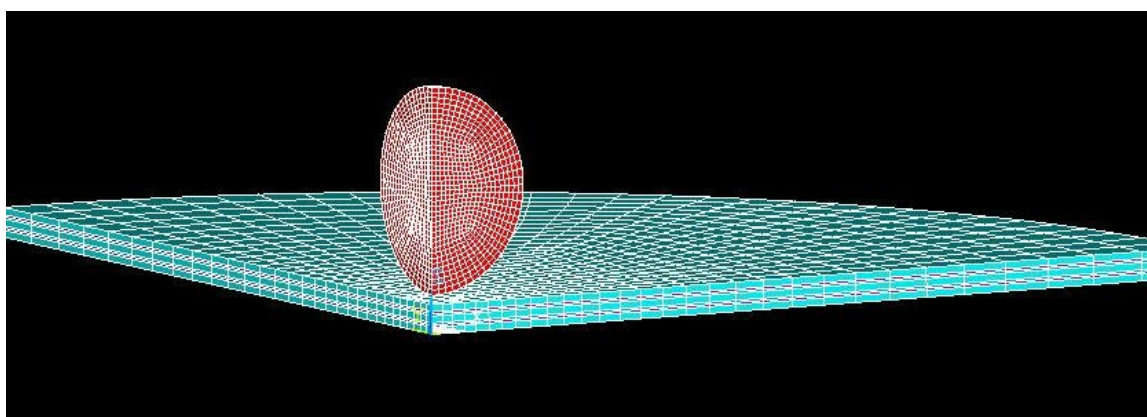
Συγκριτικά διαγράμματα κροστικής δύναμης - μετατόπισης.



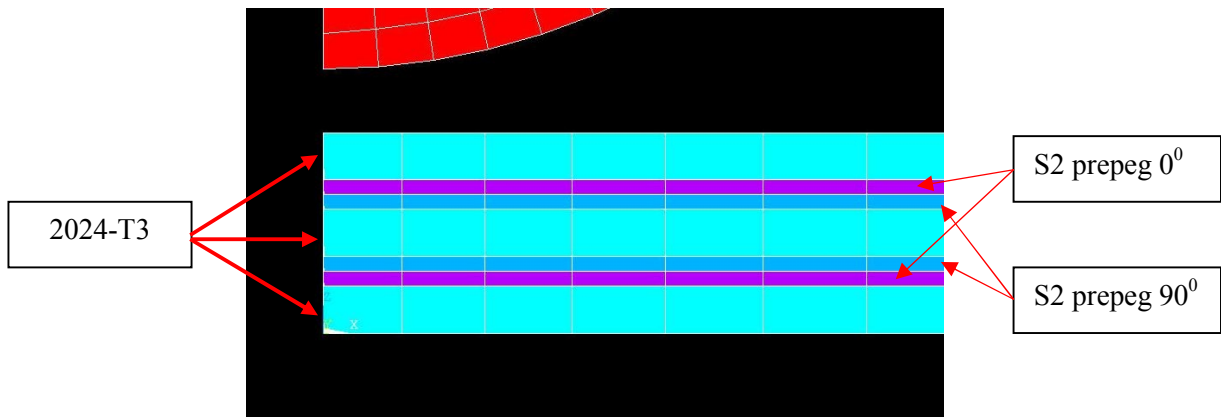
Συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας βλήματος - χρόνου.

β. Glare_3-3/2-0.4 ($\alpha=50\text{mm}$)

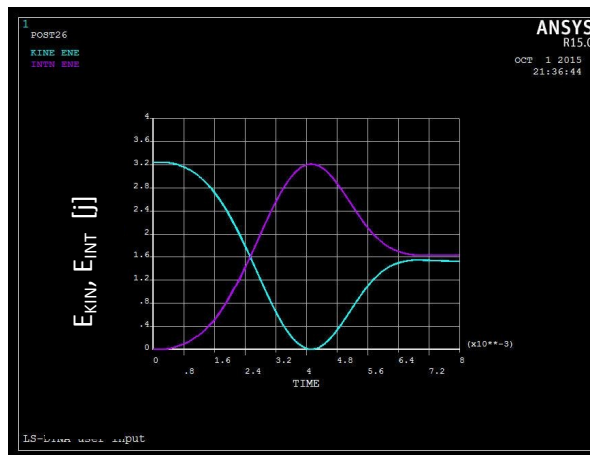
GLARE 3-3/2-0.4 ($\alpha=50\text{mm}$)	
Elements	12725
Nodes	16161



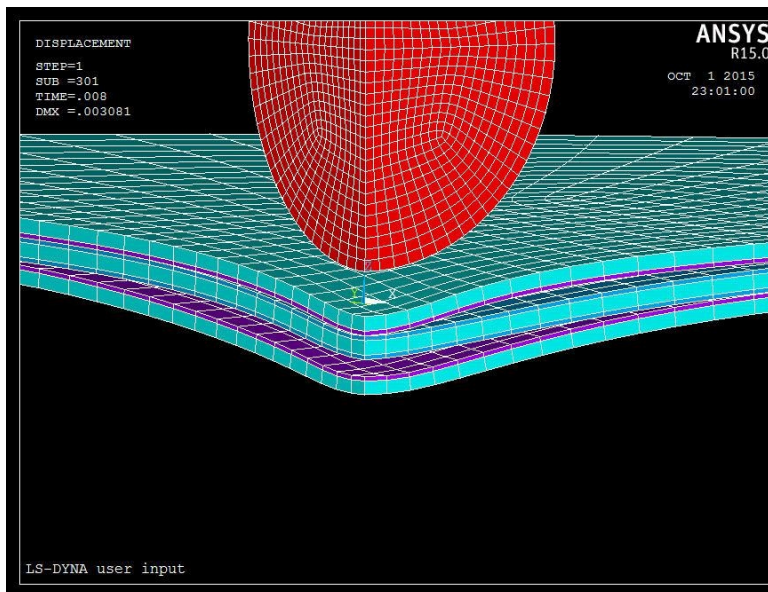
Αρχικό μοντέλο Glare_3-3/2-0.4 με ακτίνα 50mm.



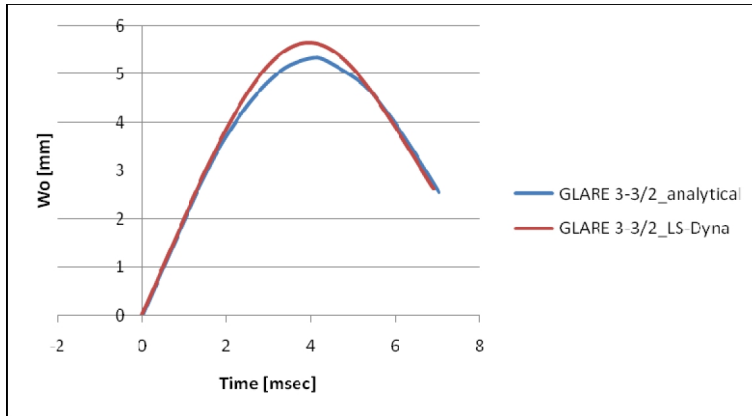
Λεπτομέρεια διαστρωμάτωσης του υπολογιστικού μοντέλου.



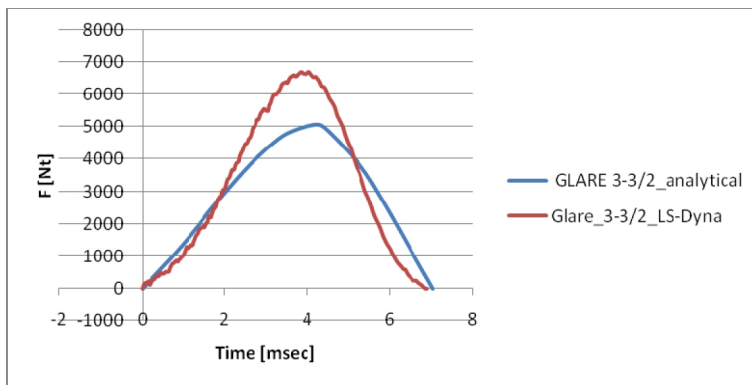
Διάγραμμα σύγκρισης Κινητικής ενέργειας (γαλάζιο) και Εσωτερικής ενέργειας (μωβ) [joules], ως προς τον χρόνο [sec].



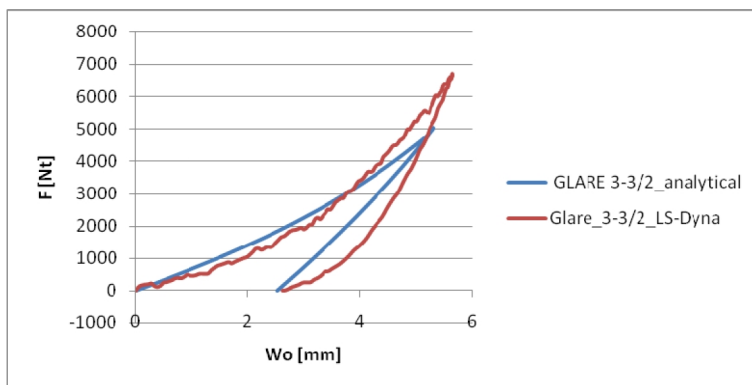
Μοντέλο μετά το πέρας της κρούσης. Διακρίνονται οι αποκολλήσεις των συνθέτων, οι οποίες παρουσιάζουν μη συμμετρικότητα εξ' αιτίας των ορθότροπων κάθετων στρώσεων S2-glass epoxy.



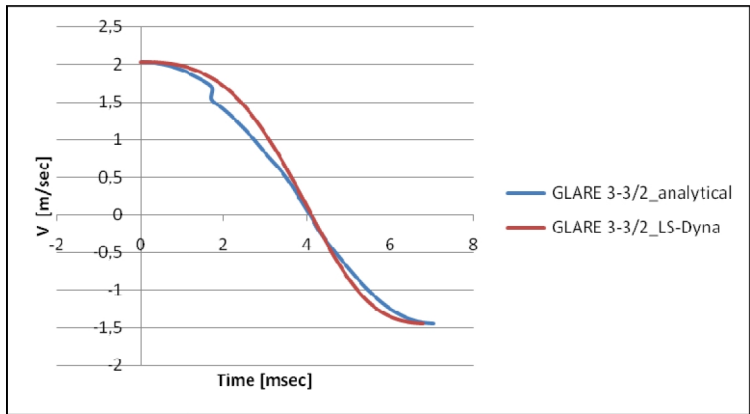
Συγκριτικά διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου.



Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-χρόνου.



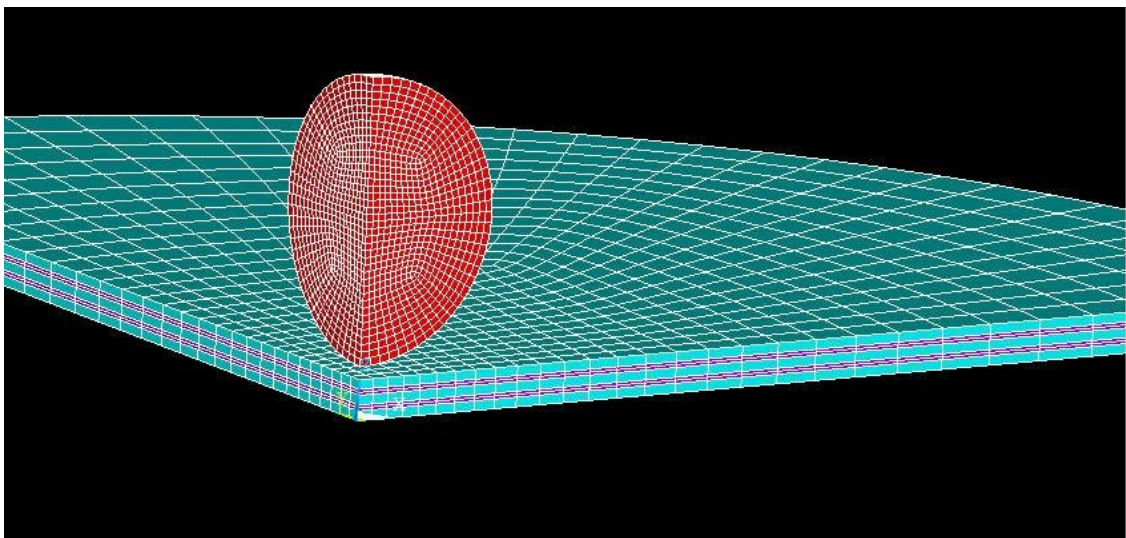
Συγκριτικά διαγράμματα κρουστικής δύναμης-μετατόπισης



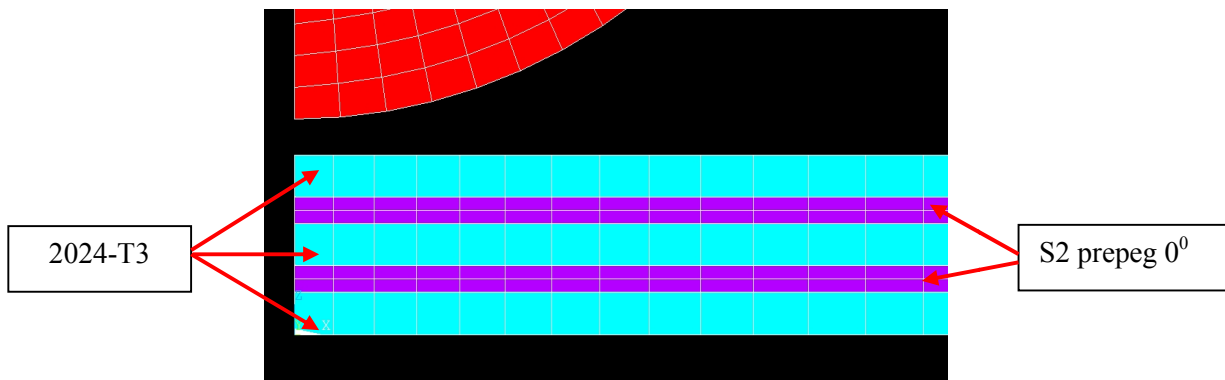
Συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας - χρόνου.

γ. Glare_2A-3/2-0.4 ($\alpha=50\text{mm}$)

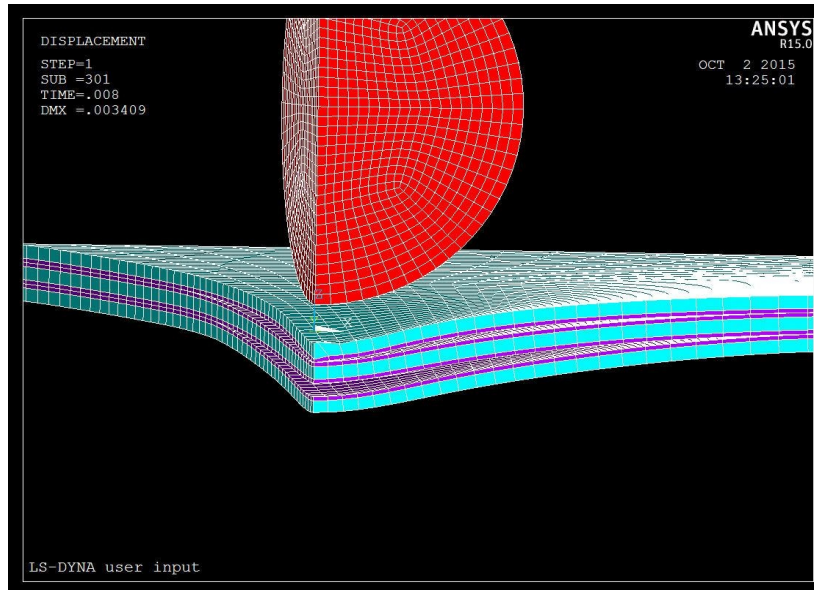
GLARE 2A-3/2-0.4 ($\alpha=50\text{mm}$)	
Elements	12725
Nodes	16161



Αρχικό μοντέλο Glare_3-3/2-0.4 αραίου πλέγματος, με ακτίνα 50mm.

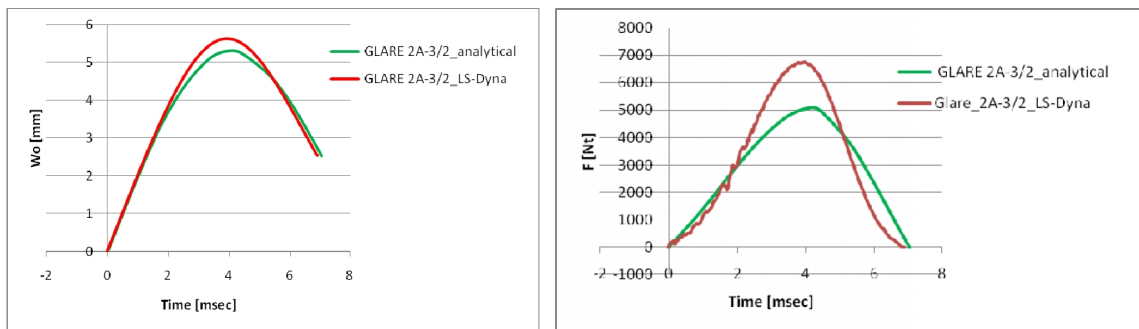


Λεπτομέρεια διαστρωμάτωσης του υπολογιστικού μοντέλου.

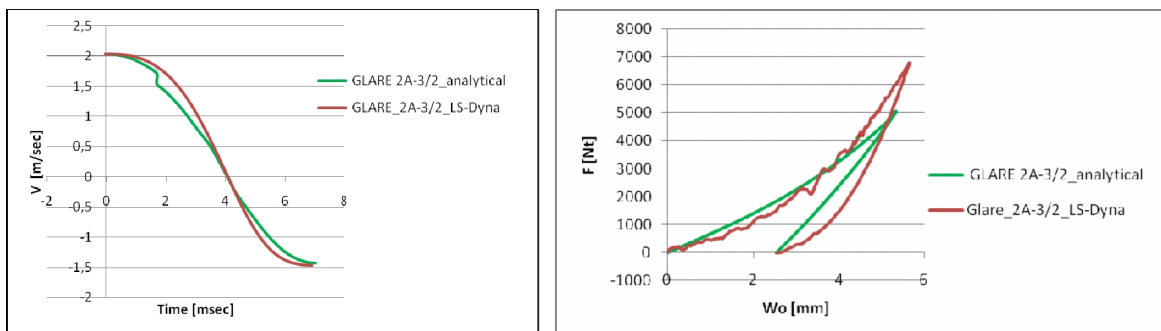


Μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κρούσης, με εμφανείς τις αποκολλήσεις.

Μοντελοποιώντας το GLARE_2A-3/2-0.4 στην ίδια πυκνότητα πλέγματος με το GLARE_3-3/2-0.4 προκύπτουν όμοια αποτελέσματα ως προς τα διάφορα μεγέθη ενδιαφέροντος. Το αντίστοιχο συμπέρασμα προέκυψε από την αναλυτική επίλυση, όπως έχει αναλυθεί στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσης μελέτης. Σημειώνεται δε, ότι οι αποκλίσεις των μεγεθών που εντοπίζονται ανάμεσα στα δύο συγκεκριμένα μοντέλα, είναι της τάξης του 0.2%, όσον αφορά τη μέγιστη και την μόνιμη μετατόπιση, ενώ όσον αφορά την ταχύτητα και την κρουστική δύναμη είναι της τάξης του 0.02%.



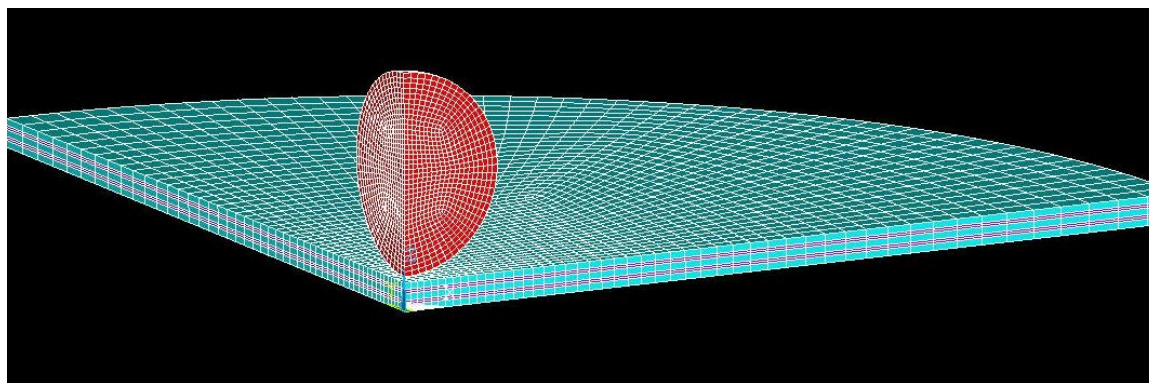
Διαγράμματα μετατόπισης και κρουστικής δύναμης ως προς τον χρόνο.



Διαγράμματα ταχύτητας ως προς το χρόνο και κρουστικής δύναμης ως προς τη μετατόπιση.

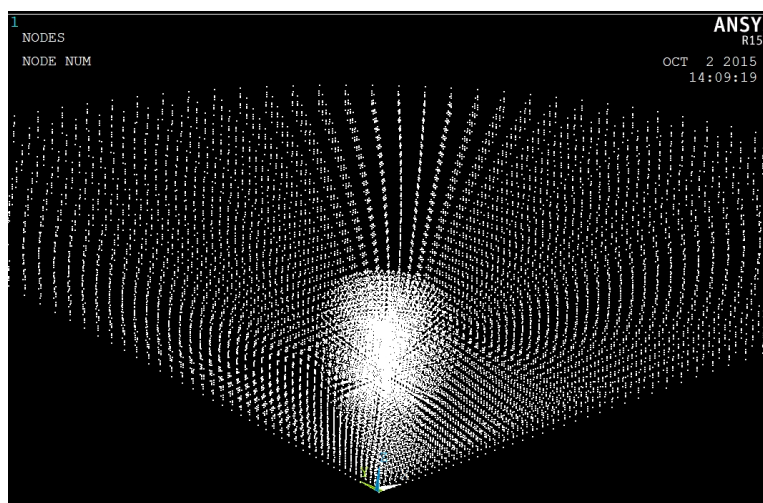
δ. Glare_2A-3/2-0.4 ($\alpha=50\text{mm}$) με πυκνό πλέγμα.

GLARE 2A-3/2-0.4 ($\alpha=50\text{mm}$)	
Elements	21125
Nodes	28461



Πάνω : Αρχικό μοντέλο, Glare_3-3/2-0.4, με ακτίνα 50mm, πυκνού πλέγματος.

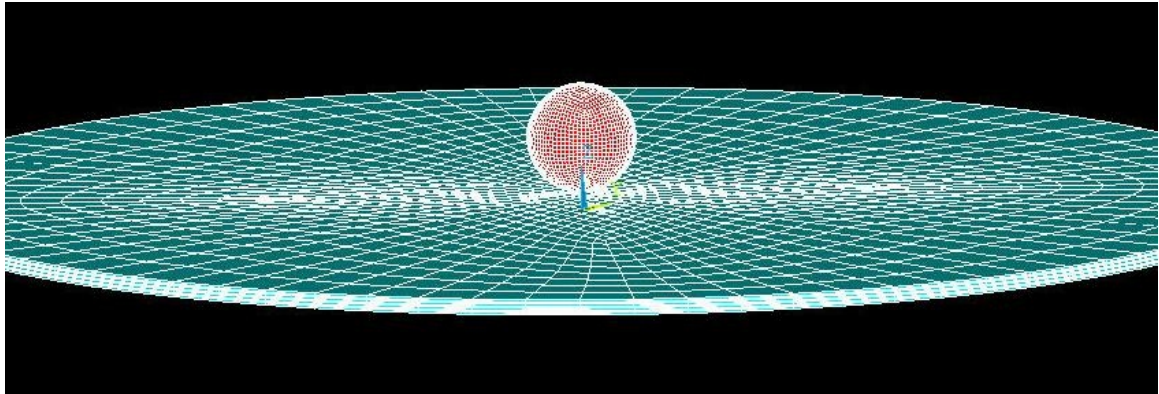
Δεξιά : Ο κάρναβος των κόμβων του υπόψη μοντέλου.



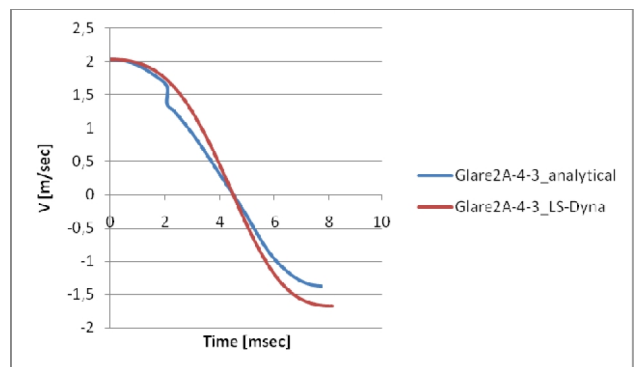
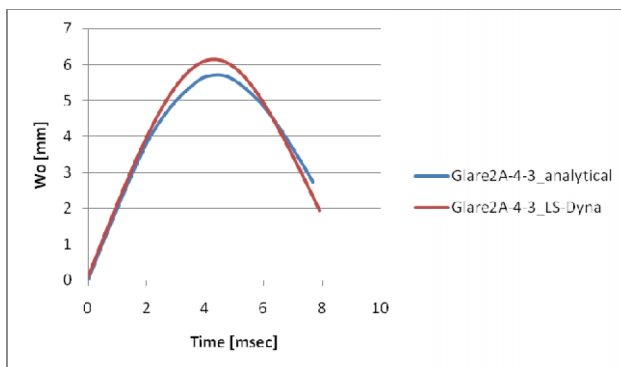
Στην περίπτωση (δ) που η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με πυκνό πλέγμα, τα αποτελέσματα διαφοροποιήθηκαν σε ένα πολύ μικρό βαθμό. Πιο συγκεκριμένα η κρουστική δύναμη αυξήθηκε κατά 0.1%, η τελική ταχύτητα του βλήματος μειώθηκε κατά 1%, ενώ η μέγιστη και η μόνιμη παραμόρφωση αυξήθηκε κατά 3%, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του προηγούμενου μοντέλου της περίπτωσης (γ), με την αραιότερη πύκνωση του πλέγματος. Ως εκ τούτου προκύπτει ότι τα εξαγόμενα μεγέθη συγκλίνουν σε συγκεκριμένες τιμές, χωρίς να έχει ουσιαστική επίδραση σε αυτά η πυκνότητα του πλέγματος.

ε. Glare_2A-4/3-0.256 ($\alpha=80\text{mm}$)

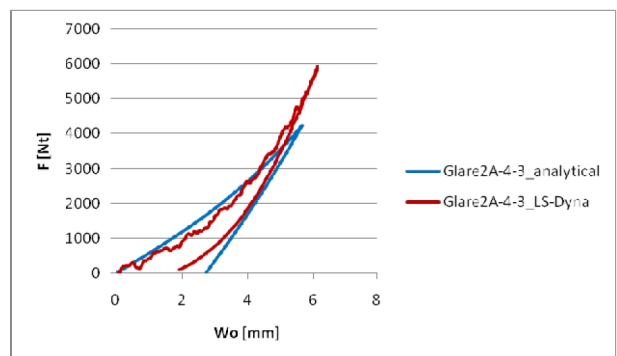
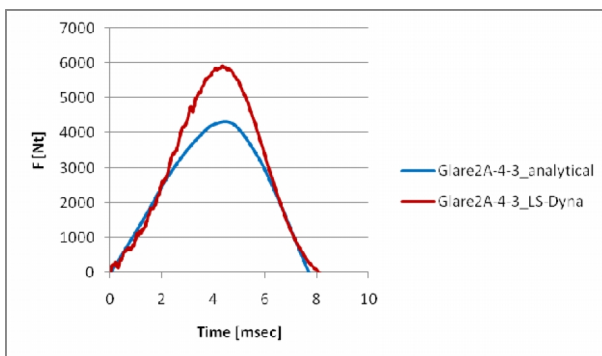
GLARE 4-3/2-0.256 ($\alpha=80\text{mm}$)	
Elements	11000
Nodes	13585



Αρχικό μοντέλο Glare_2A-4/3-0.256 με επιλογή symmetry expansion.



Διαγράμματα μετατόπισης και ταχύτητας ως προς τον χρόνο.



Διαγράμματα κρουστικής δύναμης ως προς τον χρόνο, και ως προς την μετατόπιση.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Σ. Μπικάκης, διδακτορική διατριβή, Συμβολή στην μελέτη της αντοχής μηχανολογικών κατασκευών από σύγχρονα πολύστρωτα υλικά. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010
- [2] Γ. Τσαμασφύρος, Γ. Καντεράκης, Ειδικά Κεφάλαια Συνθέτων Υλικών, 2004
- [3] William D. Callister, JR. Material Science and Engineering, An Introduction. ed 2008.
- [4] Tamer Sinmazelik, Egemen, Onur Hoban. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods
- [5] Villanueva GR, Cantwell WJ. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Compos Sci Technol* 2004;64:35–54.
- [6] Asundi A, Choi Alta YN. Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. *J Mater Process Technol* 1997;63:384–94.
- [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. *Mater Res* 2006;9(3):247–56.
- [8] Schut J, 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. p. 1–7.
- [9] Chang PY, Yeh PC, Yang JM. Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates. *Mater Sci Eng* 2008;A 496:273–80.
- [10] Alderliesten RC, Benedictus R. Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures. In: 48th Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc structures, structural dynamics, and materials conference 15th; April 23–26, 2007; Honolulu, Hawaii; 2007. p. 1–12.
- [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 customer 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 $D5c$, of unidirectional fibre–metal laminates. *Thin-Walled Struct* 2003;4:1089–101
- [14] Voegesang LB, Vlot A. Development of fibre metal laminates for advanced. *J Mater Process Technol* 2000;103:1–5.
- [15] Voegesang B, Gunnink JW, Roebroeks GHJJ, Muθ 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. *Compos Sci Technol* 2006;66:2306–16.
- [17] Cortes P, Cantwell WJ. Fracture properties of a fiber–metal laminates based on magnesium alloy. *J Mater Sci* 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. *Fatigue* 1994;16(1):33–42.

- [20] Yehia A, Bahei-El-Din A, Amany G, Botrous B. Analysis of progressive fiber debonding in elastic laminates. *Int J Solids Struct* 2003;40:7035–53.
- [21] F.D. Moriniere , R.C. Alderliesten, R. Benedictus. Low-velocity impact energy partition in GLARE. *Mechanics of Materials* 66 (2013) 59–68.
- [22] Guocai Wu and J.-M. Yang. The Mechanical Behavior of GLARE Laminates for Aircraft Structures. *Failure in Structural Materials*,2005
- [23] C.A.J.R. Vermeeren et al., “Glare Design Aspects and Philosophies,” *Appl. Comp. Mater.*, 10 (2003), pp.257–276.
- [24] C.A.J.R. Vermeeren, Residual Strength Predictions for Fiber Metal Laminates: The R-curve Approach, Report LR-717
- [25] J. Macheret and R.J. Bucci, “A Crack Growth Resistance Curve Approach to Fiber/Metal Laminate Fracture Toughness Evaluation,” *Eng. Fract. Mech.*, 45 (6) (1993), pp. 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 Eng. Mater. Struct.*, 20 (11) (1997), pp. 1573
- [27] M. Papakyriacou et al., “Fatigue Crack Growth in GLARE, Role of Glass Fibers,” *Proc. of 10th Europ. Conf. Fract.*, Vol. 2 (West Midlands, UK: Warley, 1994), pp. 1193–1199.
- [28] J.R. Yeh, “Fracture Crack Growth in Fiber-Metal Laminates,” *Int. J. Solids Structures*, 32 (14) (1995), pp. 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”, DUP Science, Delft, The Netherlands, 2001.
- [31] J.J. Homan, “Fatigue initiation in fibre metal laminates”, *International Journal of Fatigue*, 28 (4), 366-374, 2006.
- [32] R.C. Alderliesten, J.J. Homan, “Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures”, *International Journal of Fatigue*, 28 (10), 1116-1123, 2006.
- [33] T. Beumler et al., “Environmental Influence on GLARE Riveted Joints,” *Proceedings of the 46th International SAMPE Symposium*,
- [34] M.F.H.C. Boertien, “Strength of GLARE after Exposure to Moisture” (Thesis report, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology
- [35] B. Borgonje and M.S. Ypma, “Long Term Behavior of GLARE,” *Appl. Comp. Mater.*, 10 (2003),
- [36] Vlot A. Impact properties of fiber-metal laminates. *Composite Eng* 1993;3:911e7.
- [37] Vlot A. Low velocity impact loading on fiber reinforced aluminium laminates (Arall and Glare) and other aircraft sheet materials. Rept. LR-718. Delft.
- [38] Hoo Fatt MS, Lin C, Revilock Jr DM, Hopkins DA. Ballistic impact of Glare fiber metal laminates. *Compos Struct* 2003;61:73e88.
- [39] Compston P, Cantwell WJ, Jones C, Jones N. Impact perforation resistance and fracture mechanisms of a thermoplastic based fiber-metal laminate.
- [40] Johnson WS. Impact and residual fatigue behaviour of Arall and AS6/5245 composite materials, NASA Technical Memorandum 89013
- [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, *Appl. Compos. Mater.* 10 (2003) 223–242.

- [42] Caprino G, Spataro G, Del Luongo S. Low-velocity impact behaviour of fibre glass-aluminium laminates. *Compos Appl Sci Manuf* 2004;35:605e16.
- [43] Vlot A. Fatigue and residual strength characteristics of fiber metal laminates subjected to incidental damage, USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference; San Antonio, Texas, USA;
- [44] Liu Y, Liaw B. Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates. *Appl Comp Mater* 2010;
- [45] Johnson WS, Li E, Miller JL. High temperature hybrid titanium composite laminates: an early analytical assessment. *Appl Composite Mater*
- [46] Johnson WS, Hammond MW. Crack growth of internal titanium plies of a fibermetal laminates. *Composites Part A* 2008
- [47] Tarpani JR, Maluf O, Gatti CA. Charpy impact toughness of conventional and advanced composite laminates for aircraft construction. *Mater Res* 2009.
- [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. *J Composite Mater* 2007.
- [50] Reyes G, Kang H. Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fibermetal laminates. *J Mater Processing Technol* 2007.
- [51] Abdullah MR, Cantwell WJ. The impact resistance of propylene-based fibermetal laminates. *Composites Sci Technol* 2006;
- [52] Reyes Villanueva G, Cantwell WJ. The high velocity impact response of composites and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Sci Technol* 2004.
- [53] Abrate S. Impact on composite structures. UK: 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, Portland, Oregon;
- [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. *J Thermoplastic Composite Mater* 2012.
- [56] Vlot A, Krull M. Impact damage resistance of various fiber-metal laminates. *J Phys IV France* 1997.
- [57] Vlot A. Impact tests on aluminium 2024 - T3, Aramid and glass reinforced laminates and thermoplastic composites. Delft, The Netherlands: Delft Univ. of Technology; 1987.
- [58] Wu G, Yang JM. The mechanical behaviour of Glare laminates for aircraft structures. *J Metals*; 2005.
- [59] Seyed Yaghoubi A, Liu Y, Liaw B. Low-velocity impact on Glare 5 fiber-metal laminates: influences of specimen thickness and impactor mass. *J Aerospace Eng*; 2012.
- [60] Fan J, Cantwell WJ, Guan ZW. The low-velocity impact response of fiber-metal laminates. *J Reinf Plast Comp*; 2010.
- [61] Laliberte JF, Straznicky PV, Poon C. Impact damage in fiber-metal laminates, part 1: experiment. *AIAA J* 2005.
- [62] McKown S, Cantwell WJ, Jones N. Investigation of scaling effects in fiber-metal laminates. *J Composite Mater* 2008.
- [63] Liu YX, Liaw BM. Drop-weight impact on fiber-metal laminates using various indenters.2004.

- [64] Langdon GS, Nurick GN, Karagiozova D, Cantwell WJ. Fiber-metal laminate panels subjected to blast loading.2010.
- [65] Langdon GS, Nurick GN, .Haupt P. Response of Glare panels to blast loading. Eng Structures 2009.
- [66] Vlot A. Impact tests on fiber-metal laminates under a tensile load, Report LR- 714. Delft University of Technology; 1993.
- [67] Tsamasphyros GJ, Bikakis GS. Response of circular Glare fiber-metal laminates under lateral indentation. In: Topping BHV, Papadrakakis M, editors.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. J Serbian Soc Computational Mechanics 2009.
- [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 2007.
- [70] Abatan A, Hu H. Effect of cross section material distribution on impact response of hybrid composites. J Thermoplastic Composite Mater 2002.
- [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 94,2012.
- [72] Wu G, Yang JM, Hahn HT. The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates. J Mater Sci 2007.
- [73] Laliberte JF, Poon C, Strazincky PV, Fahr A. Post-impact fatigue damage growth in fiber-metal laminates. Int J Fatigue 2002.
- [74] Bagnoli F, Bernabei M, Gordan DF, Irving PE. The response of aluminium/Glare hybrid materials to impact and to in-plane fatigue. Mater Sci Eng A 2009.
- [75] Vlot A, Kroon E, La Rocca G. Impact response of fiber-metal laminates. Key Eng Mater 1998.
- [76] Carrillo JG, Cantwell WJ. Scaling effects in the low velocity impact response of fiber-metal laminates. J Reinf Plast Comp 2008.
- [77] Vlot A. Impact tests on fiber-metal laminates under a tensile load, Report LR- 714. Delft University of Technology; 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 Sci Technol 2005.
- [79] Langdon GS, Nurick GN, Cantwell WJ. Localized blast loading of fiber-metal laminates with a polyamide matrix. Composites Part B 2007.
- [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. Compos Sci Technol 2007.
- [81] Sun CT, Dicken A, Wu HF. Characterization of impact damage in Arall laminates. Composites Sci Technol 1993.
- [82] Hagenbeek M. Impact properties. In: Fiber-metal laminates e an introduction. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher; 2001.
- [83] T.A. Anderson, An investigation of SDOF models for large mass impact on sandwich composites, Compos., Part B, Eng. 36 (2005) 135–142.

- [84] G. Belingardi, R. Vadori, Low velocity impact tests of laminate glass–fiber– epoxy matrix composite material plates, *Int. J. Impact Eng.* 27 (2002) 213–229.
- [85] R.B. Bucinell, R.J. Nuismer, J.L. Koury, Response of composite plates to quasistatic impact events, *Compos. Mater. Fatigue Fract.* 3 (1991) 528–549.
- [86] G.A.O. Davies, X. Zhang, Impact damage prediction in carbon composite structures, *Int. J. Impact Eng.* 16 (1) (1995) 149–170.
- [87] J.W. Gunnink, A. Vlot, T.J. De Vries, W. Van Der Hoeven, Glare Technology Development 1997–2000, *Appl. Compos. Mater.* 9 (2002) 201–219.
- [88] C. Lin, M.S. Hoo Fat, Perforation of composite plates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading, *J. Compos. Mater.* 40 (20) (2006) 1801– 1840.
- [89] D.J. Logan, *Applied Mathematics*, second ed., John Wiley & Sons, USA, 1997.
- [90] R. Olsson, Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact, *Compos. Struct.* 59 (2003) 341–349.
- [91] R.L. Sierakowski, G.M. Newaz, *Damage Tolerance in Advanced Composites*, Technomic Publishing Co., USA, 1995.
- [92] W.J. Stronge, *Impact Mechanics*, Cambridge University Press, UK, 2000.
- [93] S.R. Swanson, Limits of quasi-static solutions in impact of composite structures, *Compos. Eng.* 2 (4) (1992) 261–267.
- [94] T.M. Tan, C.T. Sun, Use of statical indentation laws in the impact analysis of laminated composite plates, *J. Appl. Mech.* 52 (1985) 6–12.
- [95] V. Tita, J. Carvalho, D. Vandepitte, Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches, *Compos. Struct.* 83 (2008) 413–428.
- [96] G.J. Tsamasphyros, G.S. Bikakis, Dynamic response of circular GLARE fiber–metal laminates subjected to low velocity impact, *J. Reinf. Plast. Compos.* 30 (11) (2011) 978–987.
- [97] G.J. Tsamasphyros, G.S. Bikakis, Analytical and finite element modeling of circular GLARE plates under indentation loading and unloading, *Adv. Compos. Lett.* 20 (4) (2011) 101–108.
- [98] George J. Tsamasphyros, George S. Bikakis, Analytical modeling to predict the low velocity impact response of circular GLARE fiber–metal laminates, *Aerospace Science and Technology* 29 (2013) 28–36
- [99] A. Vlot, L.B. Vogelesang, T.J. De Vries, Towards application of fibre metal laminates in large aircraft, *Aircr. Eng. Aerosp. Tech.* 71 (6) (1999) 558–570.
- [100] H.J.M. Woerden, J. Sinke, P.A. Hooijmeijer, Maintenance of Glare structures and Glare as riveted or bonded repair material, *Appl. Compos. Mater.* 10 (2003) 307–329.
- [101] D. Zheng, W.K. Binienda, Effect of permanent indentation on the delaminating threshold for small mass impact on plates, *Int. J. Solids Struct.* 44 (2007) 8143– 8158.
- [102] MIL-HDBK-5H, METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES, 1 December 1998.
- [103] Investigation of low velocity impact damage in Fiber-Metal-Laminates, Doctor of Philosophy thesis, Jeremy. F. Laliberte, Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and aerospace Engineering, 26 Apr 2002.
- [104] A. Seyed Yaghoubi, B. Liaw, Effect of lay-up orientation on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML beams, *International Journal of Impact Engineering* 54 (2013).

- [105] Edson Cocchieri Botelho, Rogério Almeida Silva. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Mat. Res.* vol.9 no.3 July/Sept. 2006
- [106] Ε. Σικουτρή. Διδακτορική διατριβή. «Ανάλυση της απόκρισης σύνθετων πολυμερών υλικών υπό συνθήκες φωτιάς. Εφαρμογή σε αεροπορικές κατασκευές». Πανεπιστήμιο Πάτρας 2012. (2012).
- [107] LS-DYNA, Theory Manual, 03/12/15 (r:6267), Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
- [108] T. Takamatsu et al., “Fatigue Crack Growth Properties of a GLARE3-5/4 Fiber/Metal Laminate,” *Eng. Fract. Mech.*, 63 (1999), pp. 253–272.
- [109] George J. Tsamasphyros and George S. Bikakis, Static Indentation Response of Fiber-Metal Laminated Plates Consisting of Different Standard GLARE Grades, *Journal of Materials Science and Engineering A* 2 (11).