

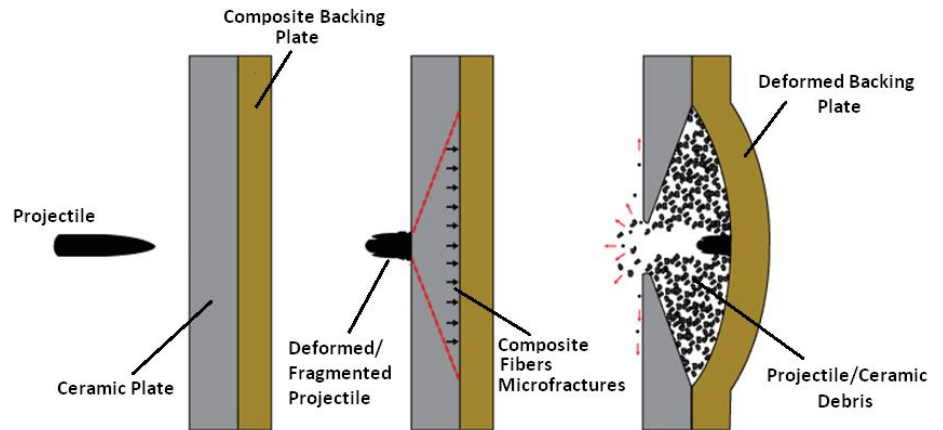
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ
U.H.M.W.ΡΕ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
(ΑΝΤΙ)ΒΑΛΛΙΣΤΙΚΗΣ ΤΟΥΣ
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ
ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ-
ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΙΝΩΝ U.H.M.W.ΡΕ.

Τομέας : Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Επιβλέπων : Δρ. Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023





EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF THE MECHANICAL PROPERTIES
OF U.H.M.W.PE AND A STUDY ON
THEIR (ANTI)BALLISTIC
PERFORMANCE IN HYBRID
CERAMIC-U.H.M.W.PE FIBER
COMPOSITES.

Sector : Manufacturing Technology

Supervisor : Dr. Dimitrios Manolakos, NTUA Professor

Athens, July 2023



Ευχαριστίες

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας και ουσιαστικά με την ολοκλήρωση των σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές και το διδακτικό προσωπικό της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, το οποίο μου δίδαξε τις απαραίτητες γνώσεις που οφείλει να κατέχει ένας μηχανολόγος, τον ζήλο και την αγάπη του για το αντικείμενο.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Δημήτριο Μανωλάκο και τον υποψήφιο διδάκτορα Οδυσσέα Βενετσάνο, οι οποίοι διαμόρφωσαν καθοριστικά την τελική πορεία των σπουδών μου, τον τρόπο σκέψης μου ως μηχανολόγος μηχανικός και μου έδωσαν τις κατάλληλες κατευθύνσεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη της οικογένειάς μου, για την υποστήριξη που μου παρείχαν και μέχρι την είσοδό μου στο πανεπιστήμιο αλλά και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ελπίζω μια μέρα να μπορέσω να τους ανταποδώσω όσα μου πρόσφεραν και εκείνοι.

Ελπίζω ο Θεός να μου δώσει σοφία, ώστε τα εφόδια που μου πρόσφεραν όλοι οι άνθρωποι μέχρι αυτό το σημείο της ζωής μου να τ' αξιοποιήσω για να προσφέρω καλό στην κοινωνία και στο κοντικό μου περιβάλλον. Ελπίζω κάποτε να καταφέρω να γίνω μια καταξιωμένη μηχανικός, παραμένοντας πρώτα απ' όλα άνθρωπος, που θα λύνει τα προβλήματα γύρω της και που δεν θα δημιουργεί καινούρια.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Βαρβάρα Γεωργίου

Περιεχόμενα

Σύνοψη – Περίληψη.....	8
Abstract	9
1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Πλαίσιο	10
1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι.....	10
1.3 Οριοθέτηση.....	11
2. Σύνθετα Υλικά: Ορισμός, κατηγοριοποίηση, ιδιότητες και διάφορες εφαρμογές.....	12
2.1 Εισαγωγή – Ορισμός.....	12
2.2 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών	16
2.2.1 Με βάση τις οικογένειες των συστατικών τους.	17
2.2.2 Με βάση την κλίμακα των περιοχών του συνθέτου.	19
2.2.3 Με βάση τα γεωμετρικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά του συνθέτου.....	21
2.2.4 Με βάση τη σύσταση των φάσεων.....	23
2.2.5 Με βάση το υλικό της μήτρας.....	24
2.3 Νανοσύνθετα με πολυμερική μήτρα (Polymer Nanocomposites-PNCs).....	29
2.3.1 Ενισχυτικά με βάση τον άνθρακα.	30
2.3.2 Διαστρωματωμένοι νανο-άργυλοι.....	32
2.3.3 Πορώδη και κοίλα νανοσωματίδια.....	33
2.3.4 Νανοσωματίδια κυτταρίνης.....	35
2.3.5 Νανοσωματίδια κραμάτων μετάλλου	37
2.3.6 Συμβατότητα στα πολυμερή νανοσύνθετα	38
3. Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση	41
3.1 Γενικά	41
3.1.1 Αρχή λειτουργίας της θωράκισης.	41
3.1.2 Η ανάγκη των σύνθετων υλικών στη θωράκιση.....	46
3.1.3 (Αντι)βαλλιστική συμπεριφορά σύνθετων υλικών.....	47
3.1.4 Αλεξίσφαιρη θωράκιση σύμφωνα με το Ινστιτούτο Δικαιοσύνης των Η.Π.Α.....	50
3.1.5 Αποδοτικότητα της αλεξίσφαιρης θωράκισης (BFS – Back Face Signature).	54
3.2 Κεραμικά ενθέματα/πάνελ.....	59
3.3 UHMWPE	66
3.3.1 Ιστορία, φυσικές ιδιότητες και εφαρμογές.	66
3.3.2 Δομή και μηχανικές ιδιότητες.....	67
3.3.3 Μήτρες συνθέτων UHMWPE.	68
3.3.4 Βαλλιστικό όριο V_{50} κατά Cunniff και μηχανισμοί θράυσης κατά Karthekeyan.	68
3.3.5 Παραγωγή συνθέτων UHMWPE.	75
3.3.6 Πυκνότητα συνθέτων UHMWPE.....	81
3.3.7 Θραυστομηχανική ανάλυση και βάθος διείσδυσης (DOP-Depth of Penetration).....	82
3.4 Βαλλιστικοί αφροί.....	95
3.5 Σχηματισμός τελικής θωράκισης SAPI.....	99
4. Πρότυπα μηχανικών δοκιμών	106

4.1	Αντοχή σε εφελκυσμό (Όριο θραύσης)	106
4.2	Αντοχή σε αποφλοίωση (T-Peel)	113
4.3	Αντοχή σε διάτμηση-Διάτμηση βραχείας δοκού-Κάμψη τριών σημείων (Short beam shear test)	117
5.	Πειραματικό μέρος	123
5.1	Θραυστομηχανική συμπεριφορά των κεραμικών πλακών και των των σύνθετων πάνελ UHMWPE.	123
5.1.1	Δοκίμιο 1 :	125
5.1.2	Δοκίμια 2.A και 2.B :	127
5.1.3	Δοκίμια 3.A και 3.B :	134
5.1.4	Δοκίμιο 4 :	141
5.1.5	Θραυστομηχανική ανάλυση κεραμικών πάνελ :	145
5.1.6	Σύγκριση της επίδοσης θωρακίσεων διαφορετικών υλικών σύνθετων πάνελ για δεδομένη απειλή (βλήμα) :	147
5.1.7	Απόκριση θωράκισης δεδομένου υλικού πάνελ σε διαφορετικές απειλές (βλήματα) :	151
5.1.8	Συμπεράσματα βαλλιστικών δοκιμών των σύνθετων πάνελ :	155
5.2	Μηχανικές Δοκιμές	157
5.2.1	Αντοχή σε εφελκυσμό-Tensile Strength :	157
5.2.2	Αντοχή σε αποφλοίωση-T-Peel Strength :	172
5.2.3	Αντοχή σε διάτμηση-Bending Stress :	181
5.3	Συμπεράσματα μηχανικών δοκιμών	190
6.	Γενικά Συμπεράσματα	191
7.	Προτάσεις για βελτίωση κα μελλοντική μελέτη.....	194
8.	Κατάλογοι Πινάκων και Εικόνων	196
8.1	Κατάλογος Πινάκων	196
8.2	Κατάλογος Εικόνων.....	197
9.	Κατάλογος Αναφορών	205

Σύνοψη – Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πειραματική διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του UHMWPE (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene) και μελετά την βαλλιστική απόδοση σύνθετων υλικών με αντίστοιχες ίνες σε υβριδικές σύνθετες (αντι)βαλλιστικές διατάξεις (θωρακίσεις) κεραμικού-σύνθετου πάνελ. Σκοπός της εργασίας είναι πρώτον η θραυστομηχανική μελέτη (αντι)βαλλιστικών δοκιμών, κατόπιν του βαλλιστικού τους ελέγχου, δεύτερον η πειραματική (μηχανικά) εξαγωγή συμπερασμάτων επί των τριών εξεταζόμενων υλικών και τρίτον η συσχέτιση ως προς την απόκλιση ή τη σύγκλιση τους. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής ανάλυση (Θεωρητικό Μέρος) των ιδιοτήτων του UHMWPE και των λόγων κυριαρχίας του στον χώρο των βαλλιστικών θωρακίσεων ενώ κατόπιν εκτελέστηκαν βαλλιστικές και μηχανικές δοκιμές, βασισμένες σε εγκεκριμένα πρότυπα (Πειραματικό Μέρος).

Κατά τη διάρκεια της έρευνας, συμπεραίνουμε πως μια βαλλιστική δοκιμή είναι ένα πολυπαραγοντικό δυναμικό φαινόμενο καθώς εξαρτάται κυρίως από τη συμπεριφορά των βασικών συντελεστών μίας αλεξίσφαιρης θωράκιση (συγκεκριμένου επιπέδου απειλής), από τον κατάλληλο και επαρκή συνδυασμό τους κατά την μορφοποίηση του τελικού προϊόντος αλλά και από τις συνθήκες της βαλλιστικής δοκιμής τους. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαίωσαν την υπεροχή ενός εκ των τριών εξεταζόμενων υλικών τόσο σε πειραματικό όσο και σε βαλλιστικό επίπεδο.

Τα συμπεράσματα της μελέτης αναδεικνύουν την σημαντικότητα ύπαρξης των σύνθετων υλικών στον χώρο της βαλλιστικής και της υβριδοποίησης τους με έτερα υλικά που επιτελούν διαφορετικούς ρόλους στην συνολική θωράκιση. Επιπλέον, προτείνεται περαιτέρω έρευνα και πειραματισμός επάνω στην «ποσοτικοποίηση» της συνεισφοράς των μηχανικών ιδιοτήτων, κυρίως των σύνθετων πάνελ ινών UHMWPE, στο τελικό (αντι)βαλλιστικό αποτέλεσμα.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία αναδεικνύει την αξία της σύγκλισης και της σωστής ερμηνείας των πειραματικών δεδομένων (μηχανικών και βαλλιστικών δοκιμών) ενώ παρέχει ταυτόχρονα πολύτιμες (γενικές) πληροφορίες γύρω από την επιστήμη της βλητικής και εισηγήσεις για μελλοντική μελέτη.

Abstract

This thesis deals with an experimental investigation on the mechanical properties of UHMWPE (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene) and studies the ballistic performance of composite materials, with corresponding fibres, in hybrid (anti)ballistic ceramic-composite panel assemblies. The aim of the work is to study, at first, the fracture mechanics of (anti)ballistic armor upon their ballistic testing, secondly to draw conclusions by mechanically experimenting on the the three materials under consideration and to finally correlate whether the two outcomes diverge or converge. To achieve this purpose, a detailed analysis (Theoretical Part) of the properties of UHMPWE and its dominance in the field of ballistic armoring was carried out. Then ballistic and mechanical tests based on approved standards were performed (Experimental Part).

During this research we conclude that a ballistic test is a multifunctional dynamic phenomenon as it depends mainly on the behaviour of the key components of a bulletproof armour (of specific threat level), on their appropriate and sufficient combination during the forming of the final product and on the conditions of their ballistic testing. The numerical results obtained confirm the superiority of one of the three tested materials, both experimentally and ballistically.

The conclusions of the study highlight the importance of the existence of composites in the field of ballistics and their hybridization with other materials that perform different roles in the overall armoring. Furthermore, additional research and experimentation on the “quantification” of the contribution of each mechanical property, especially of UHMWPE fiber composites, to the final (anti)ballistic effect is proposed.

In summary, this paper highlights the value of convergence and correct interpretation of experimental data (mechanical and ballistic tests) while providing valuable (general) information on ballistical science and suggestions for further study.

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε πολυάριθμες εφαρμογές, τόσο της καθημερινότητας όσο και σε πιο εξειδικευμένες. Η εφαρμογή η οποία απασχολεί τη συγκεκριμένη εργασία είναι αυτή της κατασκευής αντιβαλλιστικών θωρακίσεων, ατομικής χρήσης. Το αντικείμενο εξέτασης είναι σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούν αποκλειστικά προϊόντα συγκεκριμένων εταιρειών, μία συνθήκη η οποία καλύπτει με ένα «πέπλο μυστηρίου» τόσο την ακριβή δομή των υλικών αυτών, όσο και τις ιδιότητες τους και μάλιστα τις τελικές πραγματικές τους ιδιότητες μιας και εφαρμόζεται μια σειρά επεξεργασιών πριν τα προϊόντα φτάσουν στην τελική μορφή τους. Οι ίδιες εταιρείες παρέχουν τόσο «υφάσματα», με πάχος μερικών στρώσεων (π.χ. [0/90]₂), των συγκεκριμένων υλικών, όσο και έτοιμα προϊόντα αντιβαλλιστικής προστασίας, κάτι το οποίο δίνει την ευκαιρία μελέτης των αρχικών προϊόντων (των υφασμάτων) και της επιβολής τους σε συγκεκριμένες διεργασίες, με σκοπό να εξεταστεί το πως αυτές επηρεάζουν τις τελικές τους ιδιότητες.

Φυσικά, σε κάθε περίπτωση μπορεί να γίνει απευθείας βαλλιστικός έλεγχος στα τελικά προϊόντα, από τη μία του εμπορίου και από την άλλη κατασκευασμένων από τους ερευνητές, με σκοπό τη σύγκριση των επιμέρους διεργασιών παραγωγής τους και την εύρεση των βέλτιστων. Ωστόσο τέτοιοι έλεγχοι είναι κοστοβόροι, τόσο σε χρήμα όσο και σε χρόνο. Αντ'αυτού, επιλέγεται πιο συχνά η εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών και διεξάγεται μια προσπάθεια συσχέτισης τους με τις βαλλιστικές τους ιδιότητες. Πάνω στο πλαίσιο αυτό έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες μελέτες, πολλές από τις οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο κυρίως κείμενο της εργασίας.

1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διεξαγωγή ελέγχου των μηχανικών ιδιοτήτων, κάποιων συχνά χρησιμοποιούμενων υλικών στην κατασκευή αλεξίσφαιρων, μέσω δοκιμών εφελκυσμού (tension test), αποκόλλησης (t-peel test) και κάμψης 3 σημείων (bending test). Κατ'επέκταση σκοπό αποτελεί και η συσχέτιση των μηχανικών αυτών ιδιοτήτων με τη (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά τους με βάσει ελέγχους που έχουν προηγηθεί των πειραμάτων.

Τα σύνθετα υλικά τα οποία εξετάζονται θα ονομάζονται στο εξής, για λόγους υγιούς ανταγωνισμού και αποκλεισμού ευαίσθητων εταιρικών πληροφοριών (propriety information) ως Α, Β και C.

Στα δοκίμια που κατασκευάζονται από φύλλα των συγκεκριμένων συνθέτων, κάτω από διαφορετικούς κύκλους χρόνου-πίεσης-θερμοκρασίας, διεξάγονται οι παραπάνω δοκιμές, με αρχικό σκοπό την δημιουργία του «δακτυλικού αποτυπώματος» των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αυτό ενδιαφέρει, διότι έχει αποδειχθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες των

σύνθετων υλικών κατασκευής αλεξίσφαιρων θωρακίσεων συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τη (αντι)βαλλιστική τους συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην «ποσοτικοποίηση» της συνεισφοράς της εκάστοτε μηχανικής ιδιότητας στο τελικό βαλλιστικό αποτέλεσμα.

Τελικός σκοπός είναι η θραυστομηχανική μελέτη δοκιμών, κατόπιν του βαλλιστικού τους ελέγχου, η αναγνώριση των τρόπων κατάρρευσης αυτής της κατηγορίας υλικών και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η μελέτη βαίνει στο δρόμο που έχει χαραχθεί, από άλλες παρόμοιες, πάνω σε όμοια υλικά. Προκειμένου να υπάρχει συνέπεια των αποτελεσμάτων μεταξύ των εξεταζόμενων υλικών αλλά και με αποτελέσματα άλλων μελετών, τόσο τα πειράματα των μηχανικών ιδιοτήτων όσο και οι βαλλιστικοί έλεγχοι, διεξάγονται πάνω σε συγκεκριμένα εγκεκριμένα πρότυπα.

1.3 Οριοθέτηση

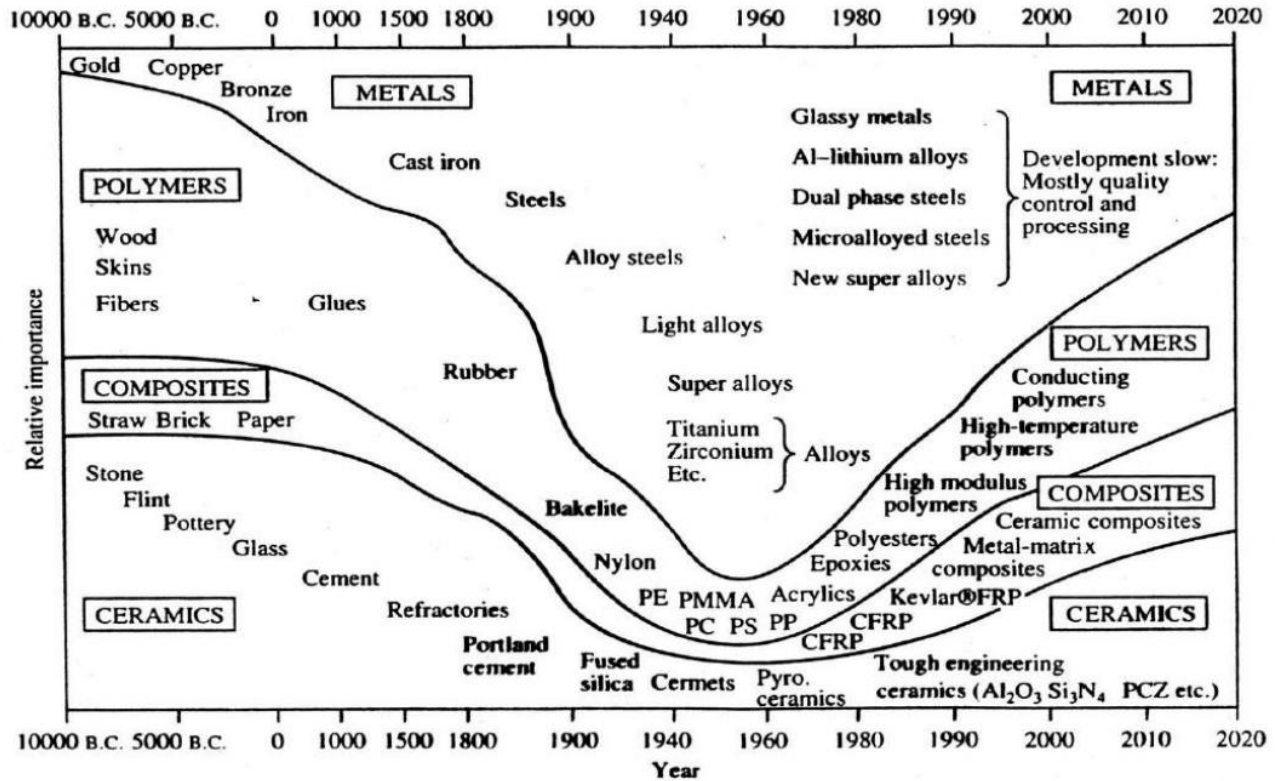
Η παρούσα εργασία εξετάζει, στο Πειραματικό Μέρος, μόνο τα προαναφερόμενα σύνθετα υλικά και δεν επεκτείνεται σε άλλα, πέραν κάποιων αναφορών οι οποίες πραγματοποιούνται στο Θεωρητικό Μέρος της.

Το πρώτο μέρος (Θεωρητικό) έχει ως σκοπό να θέσει σε γενικές γραμμές τη θεωρία πίσω από τα σύνθετα υλικά, να παρουσιάσει τις κατηγορίες τους, να αναλύσει συγκεκριμένα την εφαρμογή σύνθετων υλικών στη θωράκιση, να παρουσιάσει την ισχυρή συσχέτιση των μηχανικών και βαλλιστικών ιδιοτήτων τους, συμπεριλαμβάνοντας αναλυτικά τα πρότυπα μηχανικών δοκιμών και βαλλιστικών ελέγχων που εφαρμόζονται στο δεύτερο μέρος (Πειραματικό).

Τέλος, εξετάζει τις (αντι)βαλλιστικές ιδιότητες δύο εκ των προαναφερθέντων σύνθετων υλικών A και B και τείνει να ερμηνεύσει το κατά πόσο αυτές συγκλίνουν ή αποκλείουν από τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται πρώτον, με την δοκιμή μίας δεδομένης θωράκισης (δεδομένου σύνθετου υλικού A) και την αλληλεπίδρασή της με 3 διαφορετικούς τύπους βλημάτων και δεύτερον με τη σύγκριση των βαλλιστικών (συμπεριλαμβανομένων και των μηχανικών) αποτελεσμάτων (BFS και DOP όπως αναλυτικά προσδιορίζονται στη συνέχεια) των υλικών A και B για δεδομένη δομή (κεραμικής πλάκας και βαλλιστικού αφρού) της υπόλοιπης θωράκισης κατόπιν αλληλεπίδραση τους με δεδομένο βλήμα.

2. Σύνθετα Υλικά: Ορισμός, κατηγοριοποίηση, ιδιότητες και διάφορες εφαρμογές

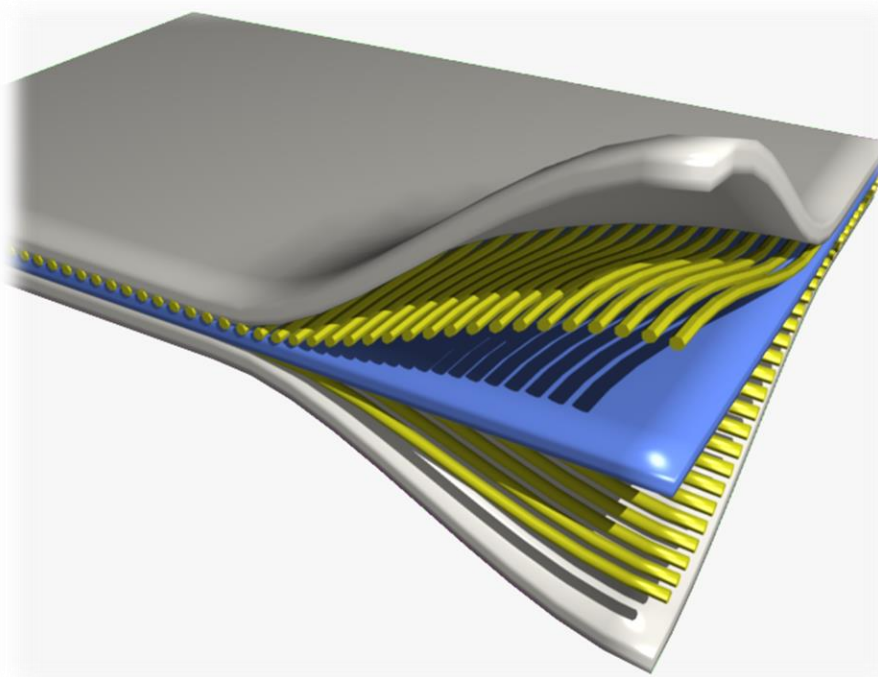
2.1 Εισαγωγή – Ορισμός



Εικόνα 1 : Ιστορία των Υλικών [47].

Ως **σύνθετα υλικά** ορίζονται δομικά υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά συνδυασμένα σε **μακροσκοπικό επίπεδο** και όχι σε μορφή μείγματος (όπως για παράδειγμα τα κράματα).

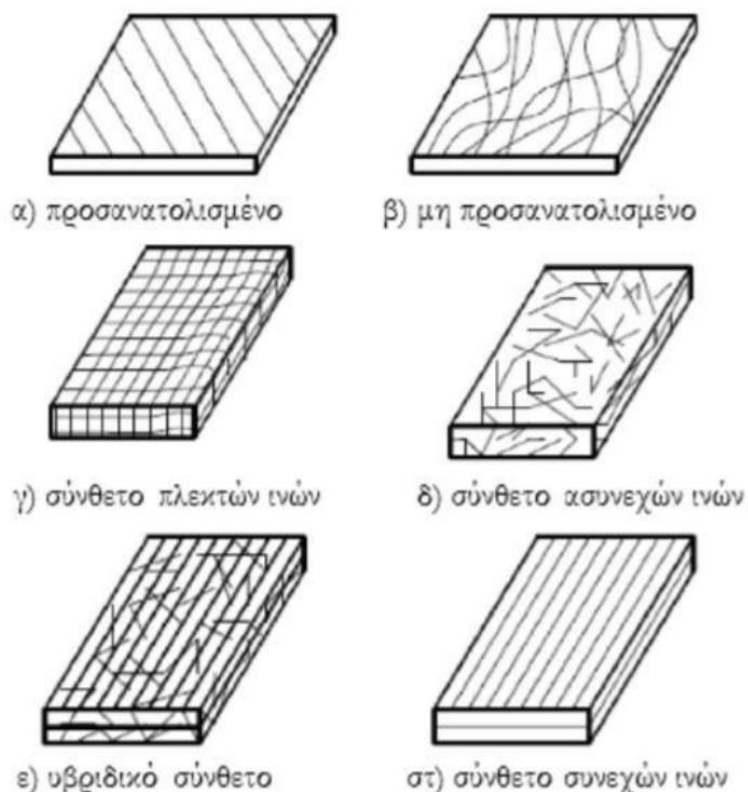
Επίσης, σημαντικό σημείο του ορισμού των σύνθετων υλικών αποτελεί το γεγονός ότι τα επιμέρους συστατικά έχουν **σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, αλλά και από το τελικώς προκύπτον υλικό** [1].



Εικόνα 2 : Τριδιάστατη απεικόνιση διαστρωματωμένου σύνθετου υλικού [44].

Το ένα συστατικό, το οποίο καλείται και **ενισχυτική (ή δεύτερη) φάση** (reinforcing phase), είναι ενσωματωμένο (σε «διάσπαρτη» μορφή) στο δεύτερο συστατικό, που ονομάζεται **μήτρα** (matrix) ή και **συνεχής φάση** (continuous phase). Η ενισχυτική φάση μπορεί να βρίσκεται στη μορφή σωματιδίων (μικρών σφαιρών κλπ.), φύλλων, ινών (κυλινδρικής συνήθως διατομής), ενώ το υλικό της μήτρας είναι πάντοτε συνεχές. Συνολική εξαίρεση, όσον αφορά την τριδιάστατη συνέχεια των δύο φάσεων, αποτελούν τα **διαστρωματωμένα σύνθετα υλικά** (βλ. **Εικόνα 2**) [2].

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παραδοσιακού σύνθετου υλικού, όπου τη συνεχή φάση (μήτρα) αποτελεί το μίγμα του τσιμέντου, της άμμου και του νερού ενώ την ενισχυτική φάση (σε μορφή «ινών») αποτελούν οι χαλύβδινες ράβδοι. Τέλος ως ενισχυτικό κόκκου, στη μήτρα, μπορεί να θεωρηθεί το χαλίκι-γαρμπίλι.



Εικόνα 3 : Σχηματική αναπαράσταση συνθέτου υλικού (με διάφορους προσανατολισμούς ινών) [61].

Ορισμένες από τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών **υπακούουν** με αρκετή ακρίβεια στον **κανόνα των μειγμάτων** (γραμμικότητα ιδιοτήτων), όπως για παράδειγμα η πυκνότητα, κατά τον τύπο:

$$\rho_c = \rho_m v_m + \rho_f (1 - v_m) \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (1)$$

όπου :

- ρ_c : η πυκνότητα του συνθέτου [kg/m^3]
- ρ_m : η πυκνότητα της μήτρας [kg/m^3]
- v_m : το κλάσμα όγκου της μήτρας στο σύνθετο και
- ρ_f : η πυκνότητα της των ινών [kg/m^3]

Άλλες ιδιότητες υπακούουν στον κανόνα υπό προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα οι διάφορες μηχανικές ιδιότητες. Ένα κατατοπιστικό παράδειγμα αυτού είναι το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου, όπου ο κανόνας των μειγμάτων ισχύει για τη διεύθυνση κατά την οποία οι ίνες είναι παράλληλες, ενώ δεν ισχύει κατά την κάθετη σε αυτή. Τέλος,

υπάρχουν κάποιες ιδιότητες για τις οποίες ο κανόνας των μειγμάτων δεν ισχύει, όπως για παράδειγμα οι διάφορες θερμικές ιδιότητες, η ηλεκτρική αγωγιμότητα κλπ [1].

Ανάλογα με τους διάφορους παράγοντες (υλικά, δομή συνθέτου) επιτυγχάνονται και διαφορετικές τελικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, όταν **το υλικό της μήτρας** είναι **κεραμικό**, σπανίως επιτυγχάνεται (ή στοχεύεται) κάποια έντονη αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας, αλλά επιτυγχάνεται κυρίως αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού. Στην περίπτωση που η μήτρα είναι κάποιο **μεταλλικό υλικό**, ο στόχος συνήθως περιλαμβάνει την αύξηση της αντίστασης στη φθορά και μια μικρή ίσως αύξηση του μέτρου ελαστικότητας ή του ορίου θραύσης.

Αναφορικά με τις μήτρες από **πολυμερή** υλικά διακρίνονται αρκετές υποκατηγορίες. Στις ημικρυσταλλικές μήτρες, όπου το μέτρο ελαστικότητας δεν υπερβαίνει συνήθως τα 10 GPa, βασικός στόχος είναι η επέκταση του άνω θερμοκρασιακού ορίου αντοχής στην παραμόρφωση υπό μέτριο φορτίο. Στις άμορφες μήτρες ενδέχεται να επιδιώκεται και η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, κάτι που επιτυγχάνεται συνήθως με την ενσωμάτωση σφαιρών ελαστομερούς, ενώ στις ελαστομερείς μήτρες εφαρμόζονται διάφορες ενισχύσεις, όπως για παράδειγμα προσθήκη ινών άνθρακα ή πυριτίας (silica), με σκοπό τη σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, αλλά και την ελάττωση της μέγιστης παραμόρφωσης του υλικού.

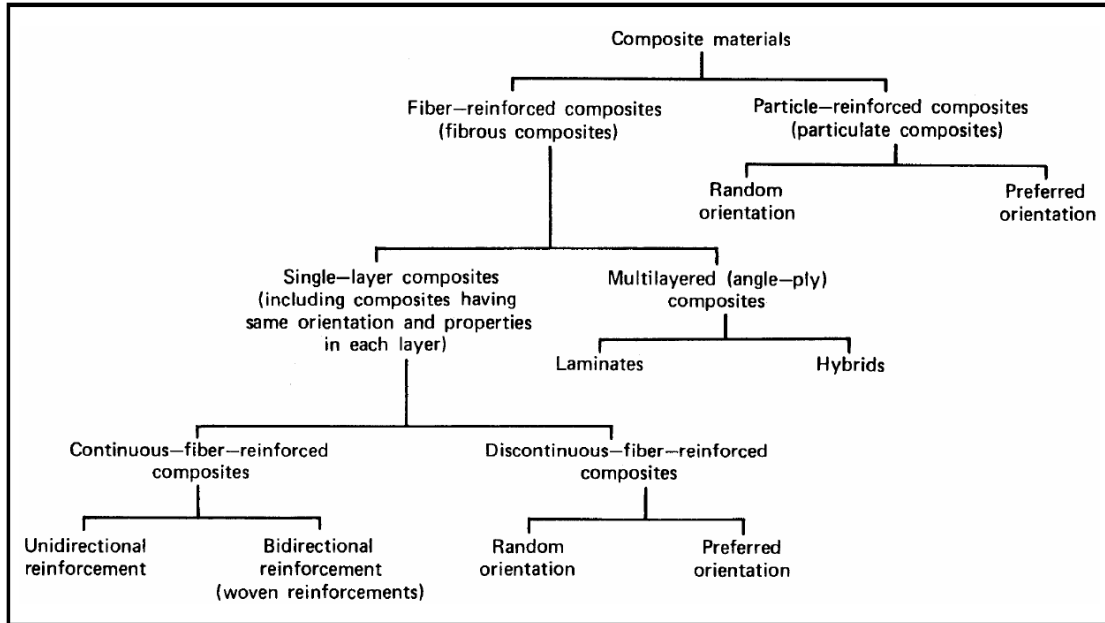
Στην περίπτωση που το υλικό των ινών έχει από μέτριο έως πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας, το (συνήθως) πολυμερές (μήτρα) διαδραματίζει απλώς το ρόλο του «συγκολλητικού» υλικού (adhesive), με μοναδικό σκοπό να διατηρεί τις ίνες στο σωστό και επιθυμητό προσανατολισμό. Σε αυτού του είδους τα σύνθετα υλικά έχει προηγηθεί συνήθως αυτό που αποκαλούμε προδιαπότιση των ινών με το υλικό της μήτρας (pre-impregnated fibers).

Τα σύνθετα υλικά αποσκοπούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της σύγχρονης τεχνολογίας, όπου τα μέταλλα και τα κράματά τους αδυνατούν. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ακραίες θερμοκρασιακές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στο διαστημικό χώρο, με ταυτόχρονη απαίτηση της ακριβούς διατήρησης των διαστάσεων των διαφόρων εξαρτημάτων των δορυφόρων. Τα μέταλλα, ως γνωστόν, χαρακτηρίζονται από μεγάλους συντελεστές θερμικής διαστολής, οπότε χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά (π.χ ίνες γραφίτη με μήτρα εποξειδικής ρητίνης), σε κατάλληλους συνδυασμούς, για την κατασκευή των σύγχρονων δορυφόρων.

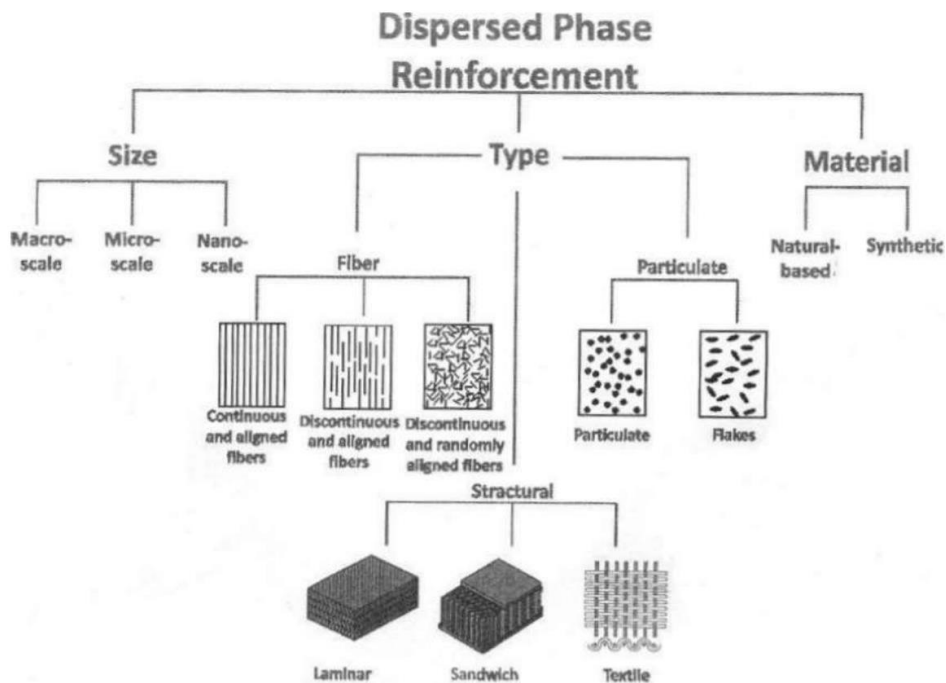
Σε πολλές περιπτώσεις, οι οικονομικοί παράγοντες είναι αυτοί που ωθούν στην ολοένα αυξανόμενη χρήση σύνθετων υλικών. Για παράδειγμα, η απαίτηση για συνεχή μείωση της συνολικής μάζας αεροσκαφών ή και αυτοκινήτων, χωρίς όμως να ελαττωθεί η αντοχή των δομικών μερών τους, ωθεί στην αντικατάσταση των μέχρι προσφάτως χρησιμοποιούμενων μετάλλων και κραμάτων τους (αλουμίνιο, χάλυβας κ.τ.λ) με σύνθετα υλικά. Αν και το κόστος κατασκευής αυτών των υλικών μπορεί να είναι υψηλότερο, η ελάττωση της μάζας που προσφέρουν οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου. Εάν

αυτή η εξοικονόμηση είναι αισθητή και ληφθεί υπόψιν και ο κύκλος ζωής του τελικού προϊόντος, τότε σαφώς προτιμώνται έναντι των μετάλλων.

2.2 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών



Εικόνα 4 : Γενική ταξινόμηση σύνθετων υλικών [48].



Εικόνα 5 : Ταξινόμηση αποκλειστικά με βάση την ενισχυτική (μη συνεχής) φάση (κάτω) [49].

Ακολουθεί μία ενδεδειγμένη κατηγοριοποίηση των συνθέτων με βάση τα 5 βασικότερα κριτήρια που αφορούν τότε την μήτρα, τότε την ενίσχυση και άλλοτε και τις δύο φάσεις.

2.2.1 Με βάση τις οικογένειες των συστατικών τους.

Ομοσύνθετα (ΟΣ) : Είναι τα υλικά τα οποία αποτελούνται από ένα μόνο συστατικό, αλλά σε δύο ή περισσότερες μορφές (π.χ σε δύο τύπους φάσεων ή κόκκων). Από αυτά, τα ημικρυσταλλικά πολυμερή έχουν την εγγενή τάση να εμφανίζουν ένα κρυσταλλικό και ένα άμορφο μέρος, ενώ σε άλλα υλικά ο ομοσύνθετος χαρακτήρας είναι προϊόν ειδικής κατεργασίας.

Ετεροσύνθετα (ΕΣ) : Είναι τα σύνθετα που συνίστανται από φάσεις διαφορετικής σύστασης.

Αυτοσύνθετα (ΑΣ) : Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν ορίζονται επαρκώς τα αυτοσύνθετα υλικά. Ειδικότερα, είναι προτιμότερο ο όρος αυτός να καλύπτει τα υλικά που αυθόρμητα στερεοποιούνται σε δύο φάσεις ίδιας σύστασης αλλά διαφορετικής δομής. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για ημικρυσταλλικά πολυμερή, αλλά το αποτέλεσμα της θερμοσυμπίεσης δύο κόκκων ίδιας σύστασης και διαφορετικής ασυμμετρίας αποκαλείται **αυτοενισχυμένο υλικό**, χωρίς όμως να πρόκειται για περίπτωση αυθόρμητου σχηματισμού δύο ειδών δομικών στοιχείων ίδιας σύστασης.

Αφροί : Είναι κυψελόμορφα υλικά και πορώδεις μεμβράνες. Πρόκειται για υλικά των οποίων η μία φάση είναι στερεά και συνεχής ενώ η δεύτερη φάση είναι το κενό/αέρας (η κάποιο αέριο), και είναι είτε συνεχής είτε διάσπαστη.

Πίνακας 1 : Κατηγοριοποίηση συνθέτων με βάση τα συστατικά τους.

Συνεχής Μήτρα→ Ενισχυτική Φάση↓	Μέταλλο	Κεραμικό	Πολυμερές	Άνθρακας
Μέταλλο	ΟΣ: Θεωρητικά εφικτό. ΕΣ: Ναι (π.χ. Ni ₃ Al-Mo Αλουμινίδιο του Νικελίου- Μολυβδένιο.)	ΕΣ: Ναι (π.χ. Οπλισμένο με χαλύβδινα σύρματα σκυρόδεμα.)	ΕΣ: Ναι (π.χ. Πολυμερή/Μεταλλικά σύρματα.)	ΕΣ: Θεωρητικά εφικτό.
Κεραμικό	ΕΣ: Ναι (π.χ. Ti/SiC Τιτάνιο/Καρβίδιο του πυριτίου, Mg/Al ₂ O ₃ Μαγνήσιο/Οξείδιο του αργιλίου.)	ΟΣ: Σπάνια (π.χ. Al ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃ Οξείδιο του αργιλίου- Οξείδιο του αργιλίου.) ΕΣ: Ναι (π.χ. SiC/ Al ₂ O ₃ Καρβίδιο του πυριτίου /Οξείδιο του αργιλίου.)	ΕΣ: Ναι Ελαιοχρώματα (π.χ Glass Reinforced Polyester i.e GRP, Glass Reinforced Epoxy i.e GRE), νανοσύνθετα (π.χ Nylon/πηλοί) και σύνθεση σιλικόνης/κόκκων SiO ₂ .)	ΕΣ: Ναι (π.χ Άνθρακας- Άνθρακας με γυαλί)
Πολυμερές	ΕΣ: Σπάνια	ΕΣ: Σπάνια	ΑΣ: Ναι ΟΣ: Ναι (π.χ Isostatic Polypropylene i.e i-PP μήτρα/ίνες.) ΕΣ: Ναι (π.χ εποξειδικά/Kevlar®)	ΕΣ: Σπάνια
Άνθρακας	ΕΣ: Ναι (π.χ. Αργίλιο-ΐνες Άνθρακα, Χαλκός- ΐνες Άνθρακα.)	ΕΣ: Ναι (π.χ. Κεραμικό-ΐνες Άνθρακα.)	ΕΣ: Ναι (π.χ. Ρητίνη-ΐνες Άνθρακα.)	ΟΣ: Ναι ΑΣ: Ναι
- (δηλαδή το κενό/αέριο ως δεύτερη φάση)	«Αφροί» (π.χ Στερεά με μεγάλους πόρους.)	Πορώδεις μεμβράνες (Vyco [®]) και κόκκοι (π.χ silica gel), «αφροί» (π.χ κίσηρις/ελαφρόπετρα.)	Πορώδεις μεμβράνες, «αφροί» (π.χ φελιζόλ).	Πορώδεις μεμβράνες και κόκκοι, «αφροί» (π.χ CFOAM [®]).

Σημειώνεται πως ο άνωθεν πίνακας δεν καλύπτει διαστρωματωμένα υλικά ή αμφισυνεχή υλικά (βλ. §2.2.3).



Εικόνα 6 : Κατηγοριοποίηση συνθέτων με βάση τα συστατικά τους [42].

2.2.2 Με βάση την κλίμακα των περιοχών του συνθέτου.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών βασίζεται στην κλίμακα μεγεθών των επιμέρους συστατικών (συνήθως μιλώντας για την «μικρή» διάσταση των περιοχών της **ενισχυτικής φάσης**). Έτσι, διακρίνουμε :

Μακροσύνθετα : όπου η «μικρή» διάσταση της δεύτερης φάσης $\geq 1-10 \mu\text{m}$.

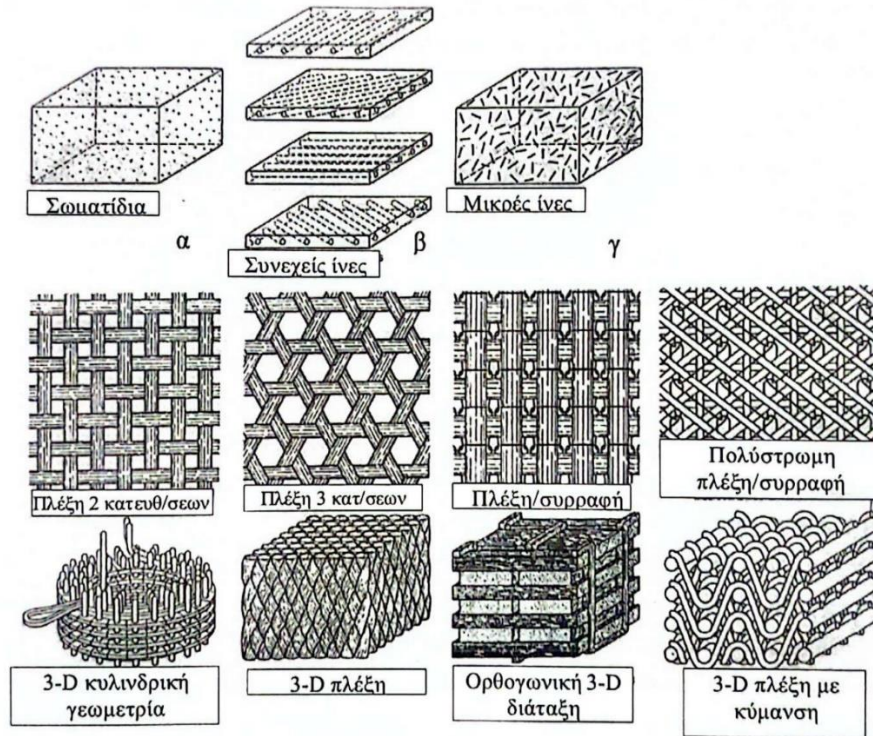
Μικροσύνθετα : όπου η «μικρή» διάσταση της δεύτερης φάσης = 10 nm έως 1 μm ή και 500 nm.

Νανοσύνθετα : όπου η διάσταση «μικρή» της δεύτερης φάσης $\leq 1 \text{ nm}$ έως 100 nm ή και 100 nm.

Η σημασία της μικρής διάστασης για τις εγγενείς ιδιότητες της φάσης είναι γενικότερα μεγάλη έως περίπου τα 10 nm, μικρή έως τα 100 nm και αμελητέα, πρακτικά, για μεγαλύτερα μεγέθη. Όσον αφορά το ερώτημα αν και οι δύο φάσεις είναι στη νανοκλίμακα, όταν η μία μόνο από τις δύο είναι, η απάντηση προκύπτει διαφορετικά, ανάλογα με τις συνθήκες. Για καλύτερη κατανόηση, δίνεται το παρακάτω **παράδειγμα**:

Έστω τα σωματίδια σφαιρικού σχήματος της ενισχυτικής φάσης διαστάσεων 50 nm είναι διασκορπισμένα σε άμορφη (συνεχή) μήτρα. Αν το κλάσμα όγκου τους είναι 1%, τότε η μέση διάσταση των περιοχών της μήτρας μεταξύ των σφαιριδίων είναι 5000 nm ή 5 μm , οπότε η μήτρα δεν εμφανίζει υποπεριοχές στη νανοκλίμακα. Αντίθετα, αν το κλάσμα είναι

50%, τότε η διάσταση των περιοχών της μήτρας μεταξύ των σφαιριδίων είναι 50 nm , οπότε η μήτρα εμφανίζει υποπεριοχές στη νανοκλίμακα. Βέβαια, η παραπάνω θεώρηση ισχύει για συνεχή μήτρα, ενώ στην περίπτωση που αυτή ήταν κρυσταλλική, μπορεί να εμφανίζει υποπεριοχές στη νανοκλίμακα και σε μικρά κλάσματα όγκου.



Εικόνα 7 : Διάφορες γεωμετρίες μακροσύνθετων με ίνες και κονιόμορμα σωματίδια [1].

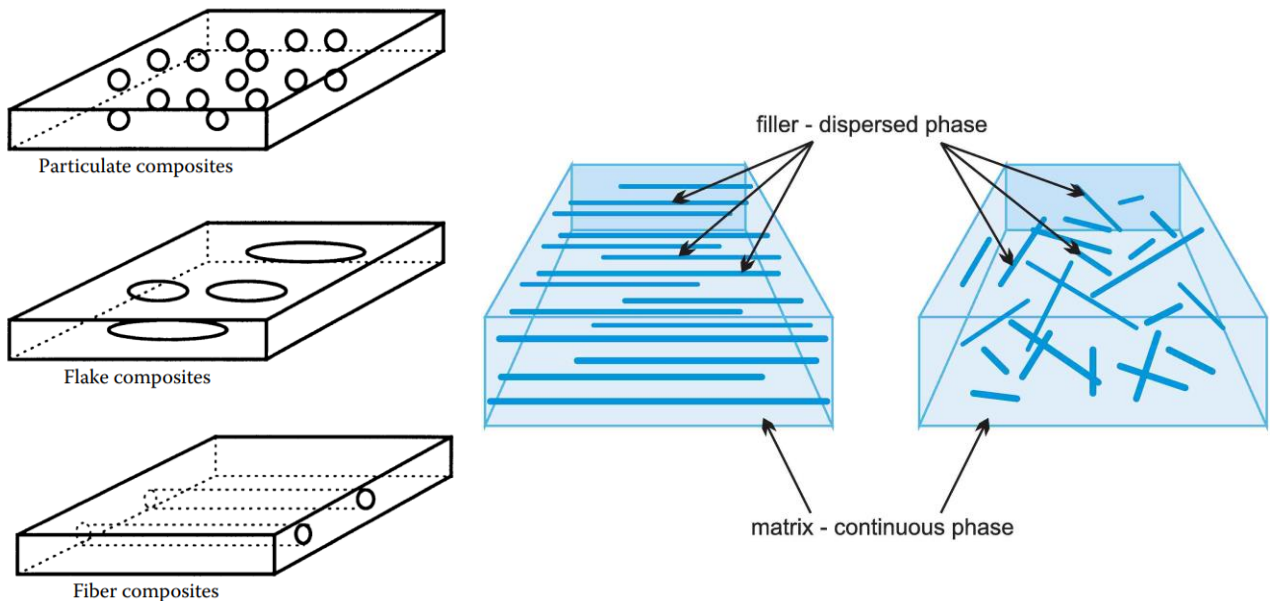
Είναι σημαντικό να τονιστεί πως οι ιδιότητες του συνθέτου είναι δυνατόν να επηρεάζονται εντονότερα από την κλίμακα, ιδίως για τις ιδιότητες που επηρεάζονται από την «επικοινωνία» μεταξύ των μικρών περιοχών. Για παράδειγμα, η αγωγιμότητα του σύνθετου με μήτρα μονωτή και αγωγίμη ενισχυτική φάση επηρεάζεται αισθητά.

2.2.3 Με βάση τα γεωμετρικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά του συνθέτου.

Στην κατηγοριοποίηση αυτή διακρίνουμε δύο μεγάλες ομάδες, με διάφορες υποκατηγορίες.

Τριδιάστατα Σύνθετα (3-D Composites) :

1. **Σύνθετα τύπου «μήτρα-διασπορά»** . Η «διασπορά»/ενισχυτική φάση ενδεχομένως να αποτελείται από :
 - **Σωματίδια** μικρού λόγου ασυμμετρίας (**κόκκοι**) σε τυχαία η όχι διάταξη (particulate composites).
 - **Φυλλίδια** (flakes) με μέτριο η μεγάλο λόγο ασυμμετρίας και σε τυχαίο (random orientation) ή μη προσανατολισμό (aligned orientation)
 - **Ίνες** (fibers) μικρού ή μεγάλου μήκους σε μονοκατευθυντική (unidirectional) ή πολυκατευθυντική διάταξη (multi-directional).



Εικόνα 8 : Σύνθετα τύπου «μήτρα-διασπορά» [2, 45].

2. Αμφισυνεχή σύνθετα, τα οποία μπορεί να είναι :

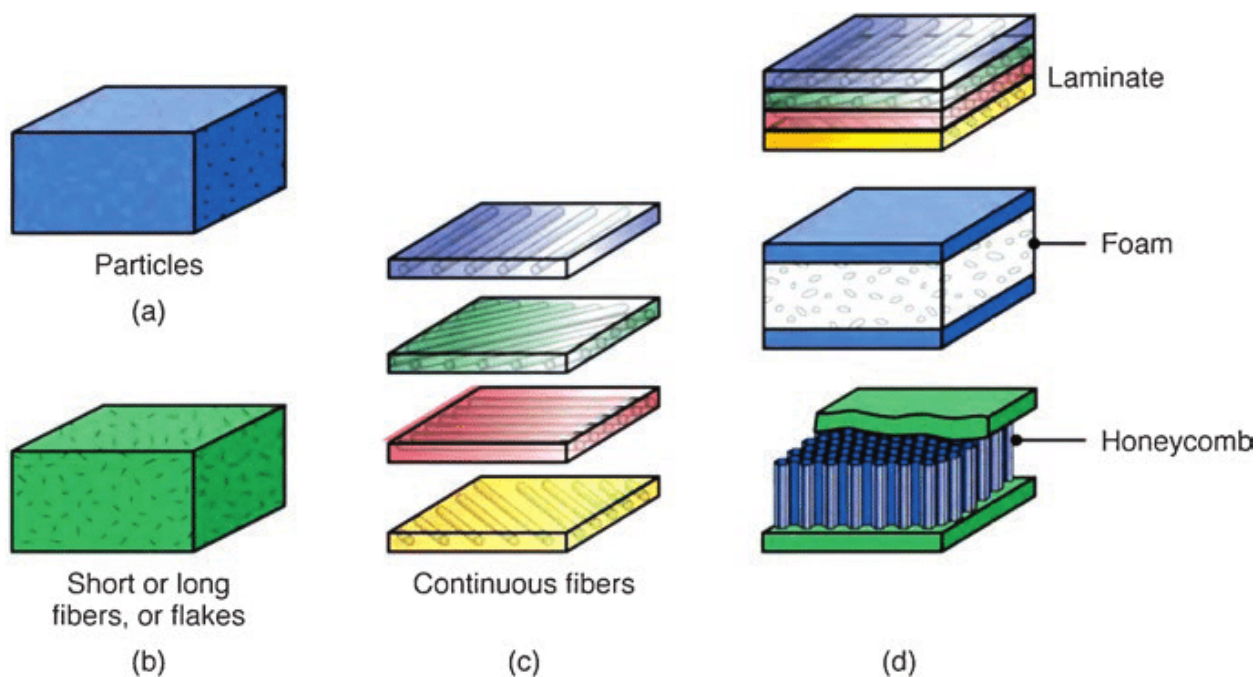
- **«Γνήσια»**, δηλαδή και οι δύο φάσεις (συνεχής ενίσχυση και συνεχής μήτρα) να χαρακτηρίζονται από μηχανικά στιβαρό δίκτυο (που μπορεί να υπάρξει αυτόνομο χωρίς την ύπαρξη της άλλης φάσης).
- **Τύπου «μήτρα-διασπορά»**, με την ενισχυτική φάση να υπερβαίνει, σε κάποια κλίμακα μεγέθους, το όριο συνέχειας (χωρίς όμως να σχηματίζει στιβαρό σκελετό ελλείψει της μήτρας).

Όταν υφίσταται συνδυασμός έστω δύο διαφορεικών τύπων ενισχυτικής φάσης συνυπάρχοντες σε κοινή μήτρα ή όταν αναφερόμαστε σε διαστρωματωμένα σύνθετα, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, τότε μεταβαίνουμε σε **υβριδικά σύνθετα (hybrid composites, βλ. Εικόνα 3.ε)**.

Διαστρωματωμένα Σύνθετα (Layered Composites) :

Πρόκειται για υλικά αποτελούμενα από αλληπάλγηλα φύλλα διαφορετικών ιδιοτήτων, συγκολλημένα σε ενιαίο σύνθετο υλικό. Στην πιο απλή περίπτωση το καθένα από τα φύλλα είναι συμπαγές και μονοφασικό (μη σύνθετο). Μερικές άλλες σημαντικές περιπτώσεις είναι:

- **Σάντουιτς** δύο συμπαγών φύλλων με παρεμβαλλόμενο αφρώδες υλικό ή κυψελοειδή (honeycomb) πυρήνα (sandwich structured composite).
- **Ένωση** διαφόρων **μονοδιάστατων (1-D) συνθέτων φύλλων**, με ίνες διαφορετικού προσανατολισμού το καθένα (Laminated Composites).
- **Ένωση διαφόρων φύλλων**, που το καθένα (ή κάποια) από αυτά έχουν περαιτέρω σύνθετη δομή (π.χ δέρμα ή ARALL-Aramid Aluminium Laminate).



Εικόνα 9 : Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων ενίσχυσης μήτρας : (α) με σωματίδια, (β) φυλλίδια ή ίνες μικρού ή μεγάλου μήκους, (c) συνεχείς ίνες και (d) ως διαστρωματωμένα σύνθετα με ένωση μονοδιάστατων φύλλων, με αφρό και με κυψελοειδή πυρήνα [43].

2.2.4 Με βάση τη σύσταση των φάσεων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα ετεροσύνθετα (ΕΣ) υλικά έχουν δύο ή περισσότερες φάσεις διαφορετικής σύστασης, ενώ τα ομοσύνθετα (ΟΣ) περιλαμβάνουν ένα μόνο συστατικό σε δύο ή περισσότερες φάσεις (ή και μόνο μορφολογίες).

Ημικρυσταλλικά πολυμερή :

Τα ημικρυσταλλικά πολυμερή αποτελούνται από μια κρυσταλλική και μια άμορφη φάση. Ο βαθμός κρυσταλλικότητας και το είδος της άμορφης φάσης καθορίζουν τη μηχανική και άλλες συμπεριφορές τους. Στα ημικρυσταλλικά πολυμερή (στις κοινές εκδοχές τους) το όμορφο μέρος συνιστά τη μήτρα, ανεξαρτήτως βαθμού κρυσταλλικότητας, ενώ το κρυσταλλικό τμήμα είναι κατά βάση διεσπαρμένο, αν και συνήθως με αρκετές κοινές συνδετικές αλυσίδες, χαρακτηριστικό που οδηγεί σε ένα ιδιότυπο, σχετικώς χαλαρό, δίκτυο.

Το δίκτυο των κρυσταλλιτών (κρυσταλλικών περιοχών) είναι συνήθως ισχυρότερο σε περιπτώσεις μέσου ή υψηλού βαθμού κρυσταλλικότητας, οπότε και οι κρυσταλλίτες είναι γενικά φυλλόμορφοι και χαλαρότερο σε περιπτώσεις χαμηλού ή πολύ χαμηλού βαθμού κρυσταλλικότητας, οπότε και οι κρυσταλλίτες δεν είναι απαραίτητως φυλλόμορφοι. Στα ημικρυσταλλικά πολυμερή τα χαρακτηριστικά των ευρύτερων διεπιφανειών κρυσταλλικών και άμορφων περιοχών και ιδίως ο τρόπος κατανομής αλυσίδων μεταξύ των δύο τύπων περιοχών συνήθως παραβλέπονται. Παρ'όλα αυτά επηρεάζουν έντονα τις μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς. Για παράδειγμα, τα πολυμερικά προϊόντα κρυσταλλώσεως υπό πολύ υψηλή πίεση είναι ιδιαίτερως ψαθυρά, διότι οι κοινές και αλληλεμπλεκόμενες αλυσίδες των κρυστάλλων είναι ελάχιστες.

Σύνθετα υλικά άνθρακα/άνθρακα (C/C composites) :

Τα σύνθετα υλικά άνθρακα/άνθρακα προέρχονται από σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και κυρίως από πίσσα ή φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν υψηλή απόδοση σε άνθρακα κατά την ανθρακοποίησή τους.

Γενικά ο άνθρακας δεν μορφοποιείται άμεσα ως τήγμα, γεγονός που καθιστά πρακτικά αδύνατη την παρασκευή συμπαγών προϊόντων από άνθρακα σε ένα βήμα. Η μορφοποίηση κατάλληλων οργανικών πρόδρομων σε τήγμα ή πολύ πυκνό διάλυμα είναι δυνατόν να δώσει τριδιάστατα προϊόντα, τα οποία στη συνέχεια εξανθρακώνονται, δηλαδή διασπώνται χημικά με στόχο τη διατήρηση του μεγαλύτερου μέρους του αρχικού άνθρακα σε ατελή κρυσταλλική γραφική ή υαλώδη φάση, χωρίς την ανάπτυξη ρωγμών.

Συχνά η επιτυχής εξανθράκωση συνοδεύεται από το σχηματισμό ενός δικτύου πόρων, οπότε ακολουθεί εμποτισμός με πρόδρομο, νέα εξανθράκωση και ούτω καθεξής, μέχρι να περιοριστεί σημαντικά το πορώδες. Περαιτέρω, τα παραγόμενα με τον ανωτέρω τρόπο τριδιάστατα και σχεδόν συμπαγή προϊόντα δεν έχουν τις επιθυμητές υψηλές μηχανικές ιδιότητες, οπότε υιοθετείται παραλλαγή, όπου στο πρώτο βήμα ο ρευστός πρόδρομος

εμποτίζει ένα σύστημα (για παράδειγμα ένα πλέγμα) από ίνες άνθρακα. Οι ίνες άνθρακα, επίσης, παράγονται από κατάλληλους πολυμερικούς ή ασφαλτικούς πρόδρομους, αλλά ο μονοδιάστατος χαρακτήρας τους επιτρέπει τον καλό έλεγχο του προσανατολισμού, με αποτέλεσμα ιδιαίτερως υψηλές μηχανικές ιδιότητες στην ισχυρή διεύθυνση.

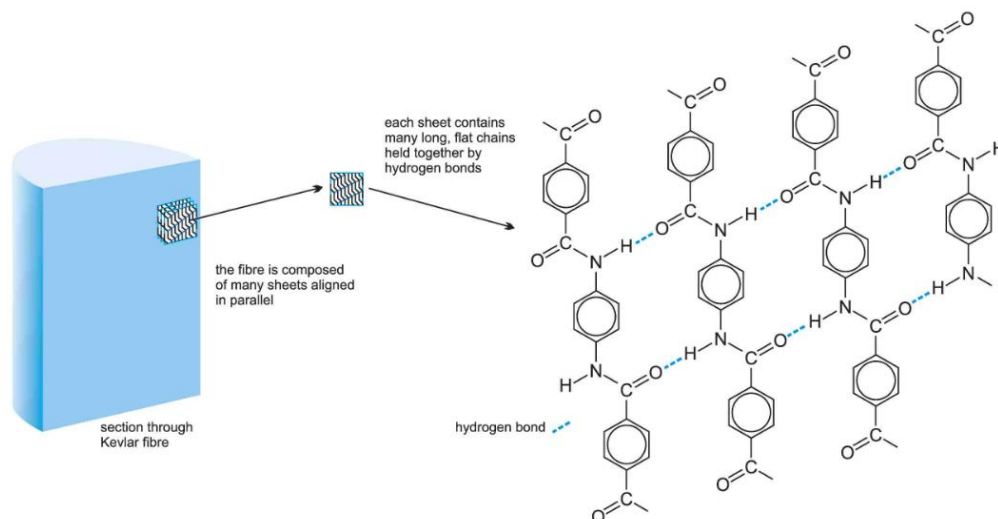
Κεραμικά ομοσύνθετα :

Τα κεραμικά ομοσύνθετα δεν εμπίπτουν στον αρχικό ορισμό των δύο φάσεων, καθώς εμπλέκουν δύο ομάδες κόκκων της ίδιας φάσης με μόνη διαφορά το μέγεθος ή το σχήμα των κόκκων.

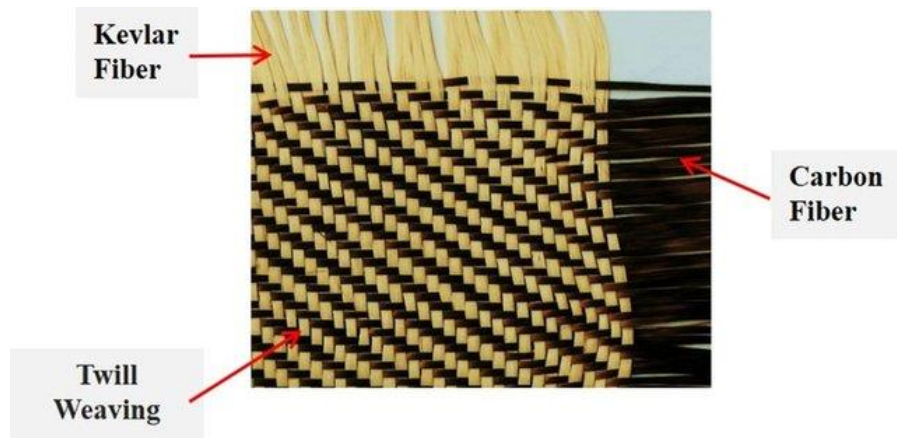
2.2.5 Με βάση το υλικό της μήτρας.

Διακρίνονται τα σύνθετα **μεταλλικής μήτρας (MMC i.e Metal Matrix Composites)**, τα σύνθετα **κεραμικής μήτρας** (συμπεριλαμβάνονται και αυτά **ανθρακούχου μήτρας – CMC i.e Ceramic Matrix Composites**) και τα σύνθετα **πολυμερικής μήτρας (PMC i.e Polymer Matrix Composites)**.

Με βάση την ομαδοποίηση αυτή τα προκύπτοντα σύνθετα υλικά θεωρείται ότι ανήκουν στην οικογένεια της μήτρας, αλλά με βελτιωμένες ιδιότητες. Το παραπάνω βασίζεται στη λογική ότι η ενισχυτική φάση απλώς βελτιώνει κάποιες από τις ιδιότητες της μήτρας. Ωστόσο, σε περιπτώσεις πολλών κοινώς χρησιμοποιούμενων μακροσύνθετων υψηλής ποιότητας (για παράδειγμα αυτών με πολυμερική μήτρα και ίνες υψηλής αντοχής – βλ. **Εικόνα 11**), η κατάταξη βάσει του υλικού της μήτρας τείνει να είναι παραπλανητική, καθώς η μήτρα έχει κατά βάση δευτερεύοντα ρόλο: αυτόν του συγκολλητικού υλικού (μέθοδος “pre-peg”) και κυρίως ενδιαφέρουν οι ιδιότητες της ενισχυτικής φάσης. Στην περίπτωση αυτή, ακόμα και η έννοια της «ενίσχυσης με ίνες» χάνει στην πραγματικότητα την ουσία του, αφού στόχος δεν είναι η ενίσχυση της μήτρας, αλλά η ανάδειξη των ινών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων ινών αποτελούν οι **ίνες αραμιδίου Kevlar®**.



Εικόνα 10 : Η δομή του Kevlar® [45].



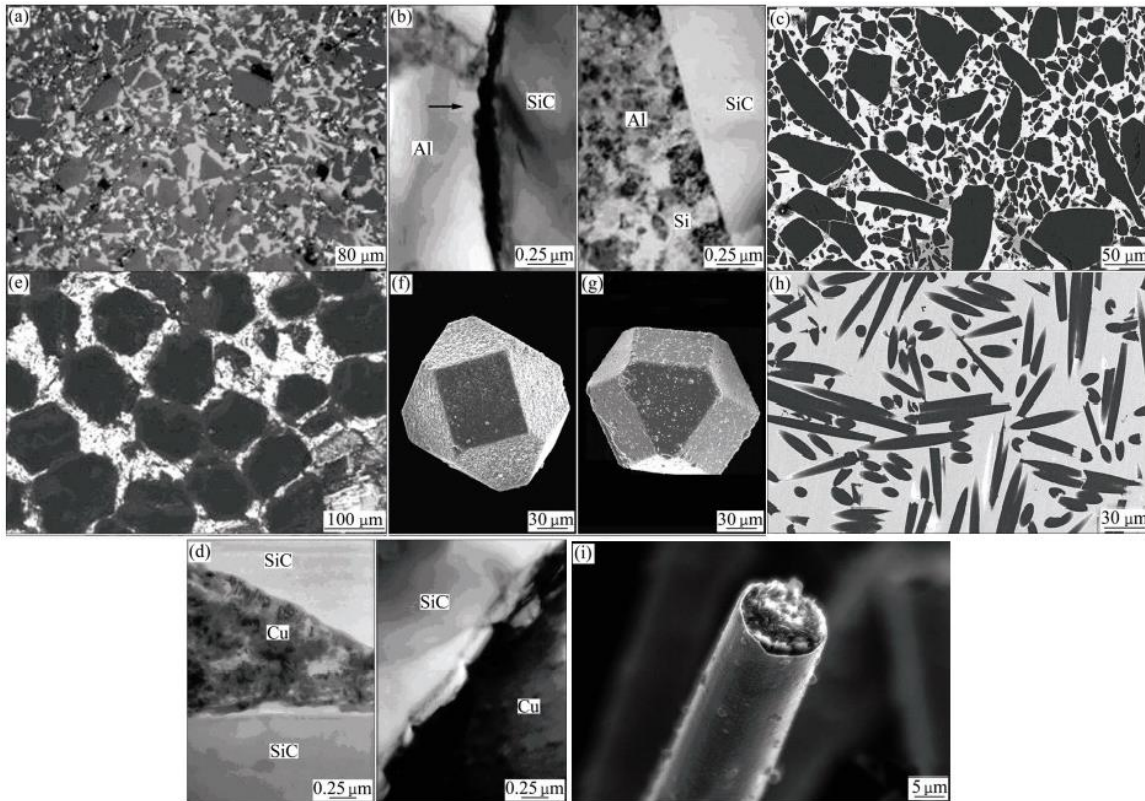
Εικόνα 11 : Υβριδικό σύνθετο ύφασμα με ίνες Kevlar® και ίνες άνθρακα (Carbon Fibers) σε «πλέξη διαγωνιάλ» (twill weave) [46].

Μεταλλικής μήτρας (MMC) :

Τα σύνθετα αυτά ενισχύονται με κεραμικά σωματίδια, κεραμικές, ανθρακούχες και μεταλλικές ίνες και συναφή ινίδια. Συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα μονοφασικά μέταλλα χαρακτηρίζονται από διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως : υψηλότερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας E/ρ ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$) και ειδικό όριο θραύσεως $\sigma_{\theta\rho}/\rho$ ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$), βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλότεροι μακροσκοπικοί συντελεστές θερμικής διαστολής και υψηλότερη αντοχή στη φθορά, ωστόσο, αυξημένο κόστος και τάση για μειωμένη δυσθραυστότητα.

Βρίσκουν μεγάλη αεροναυπηγική και αεροδιαστημική εφαρμογή όπου συναντώνται μέταλλα ενισχυμένα με συνεχείς ανθρακούχες ή κεραμικές ίνες, οι οποίες είναι ιδιαίτερας αποτελεσματικές σε σχέση με τα σωματίδια, αλλά αυξάνουν κατά πολύ το κόστος του υλικού. Στην περίπτωση μηχανών αυτοκινήτων ορισμένα μεταλλικά εξαρτήματα είναι από κατάλληλο κράμα αργιλίου, ενισχυμένο με μικρές ίνες. Τέλος, άλλα μεταλλικά εξαρτήματα αυτοκινήτων και σκελετοί ορισμένων ποδηλατών επίσης βασίζονται σε ελαφριές μεταλλικές μήτρες, αλλά με κοκκόμορφη κεραμική ενίσχυση.

Στην περίπτωση της ενίσχυσης με ίνες άνθρακα παρουσιάζονται ορισμένοι τύποι προβλημάτων, όπως ο σχηματισμός γαλβανικών στοιχείων και ο σχηματισμός καρβιδίων. Τα τελευταία ενδέχεται να αναλώσουν τις ίνες, αλλά και τη μήτρα, ιδιαίτερα στην περίπτωση που αυτή είναι αλουμίνιο (υδρολίσιμο καρβίδιο). Πολλές φορές, σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμόζεται επιφανειακή επικάλυψη των ινών (π.χ mechanical-dry particle coating), γεγονός που συνεπάγεται φυσικά μεγαλύτερο κόστος.



Εικόνα 12 : Μικροδομές τεσσάρων τύπων συνθέτων MMC : (a, b) SiCp/Al, (c, d) SiCp/Cu, (e) Diamond/Cu, (f) Ti-coated diamond, (g) Ni-coated diamond, (h) Cf/Cu composites; (i) Mo-coated carbon fiber σε ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) [52].

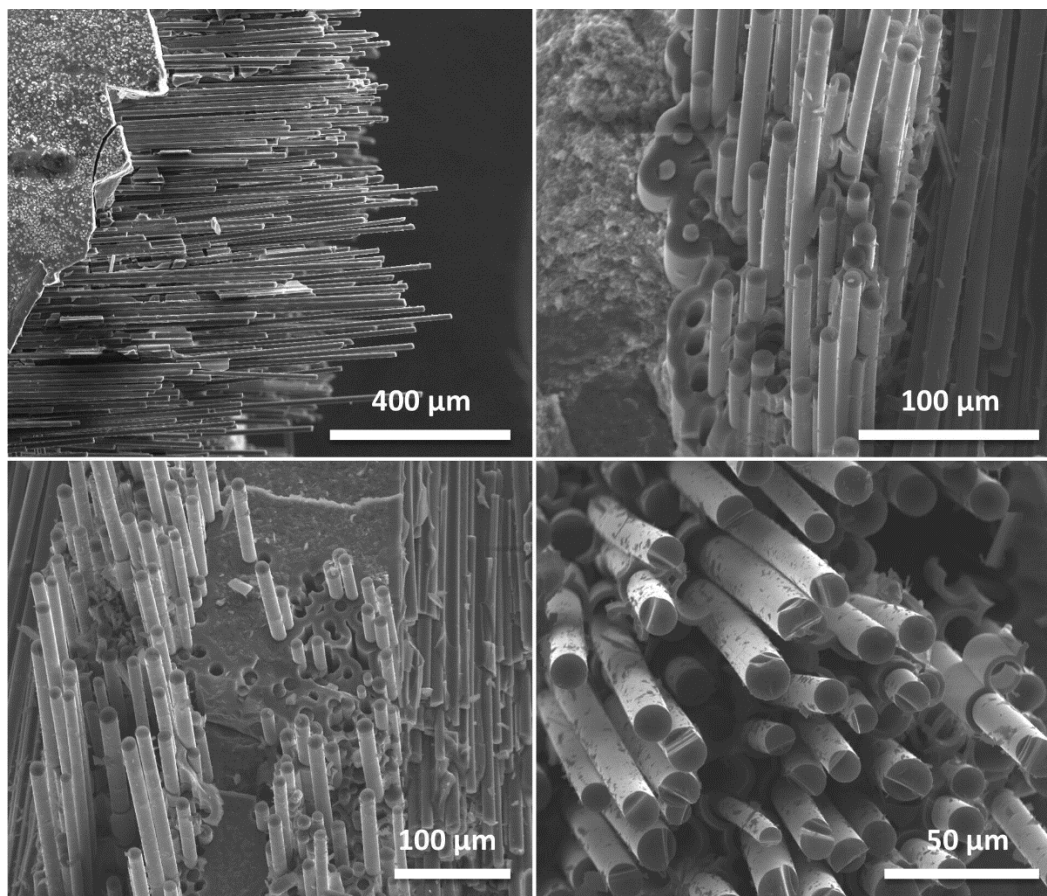
Κεραμικής μήτρας (CMC) :

Η επιδίωξη της έρευνας πάνω στις κεραμικές μήτρες είναι η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους πλην του μέτρου ελαστικότητας, το οποίο είναι συνήθως πολύ υψηλό. Οι κυριότερες από τις κοινώς χρησιμοποιούμενες κεραμικές μήτρες είναι το καρβίδιο του πυριτίου, η αργιλία, η ζirkονία, ανόργανοι ύαλοι, υαλοκεραμικά και ο άνθρακας.

Λόγω του γεγονότος ότι τα σύνθετα κεραμικής μήτρας διαμορφώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες, οι προς ενσωμάτωση ίνες πρέπει να φέρουν υψηλές χαρακτηριστικές θερμοκρασίες, οπότε αποκλείονται οι πολυμερικές ίνες και επιλέγονται κεραμικές ή μεταλλικές. Εξάιρεση στο παραπάνω αποτελεί το σκυρόδεμα, η μορφοποίηση του οποίου λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και επιτρέπει έτσι τη χρησιμοποίηση και πολυμερικών ινών.

Οι κεραμικές μήτρες δε δύναται γενικότερα να υποστούν πλαστική παραμόρφωση, σε αντίθεση με τις μεταλλικές μήτρες. Αυτό σημαίνει ότι, με εξαίρεση την ειδική περίπτωση

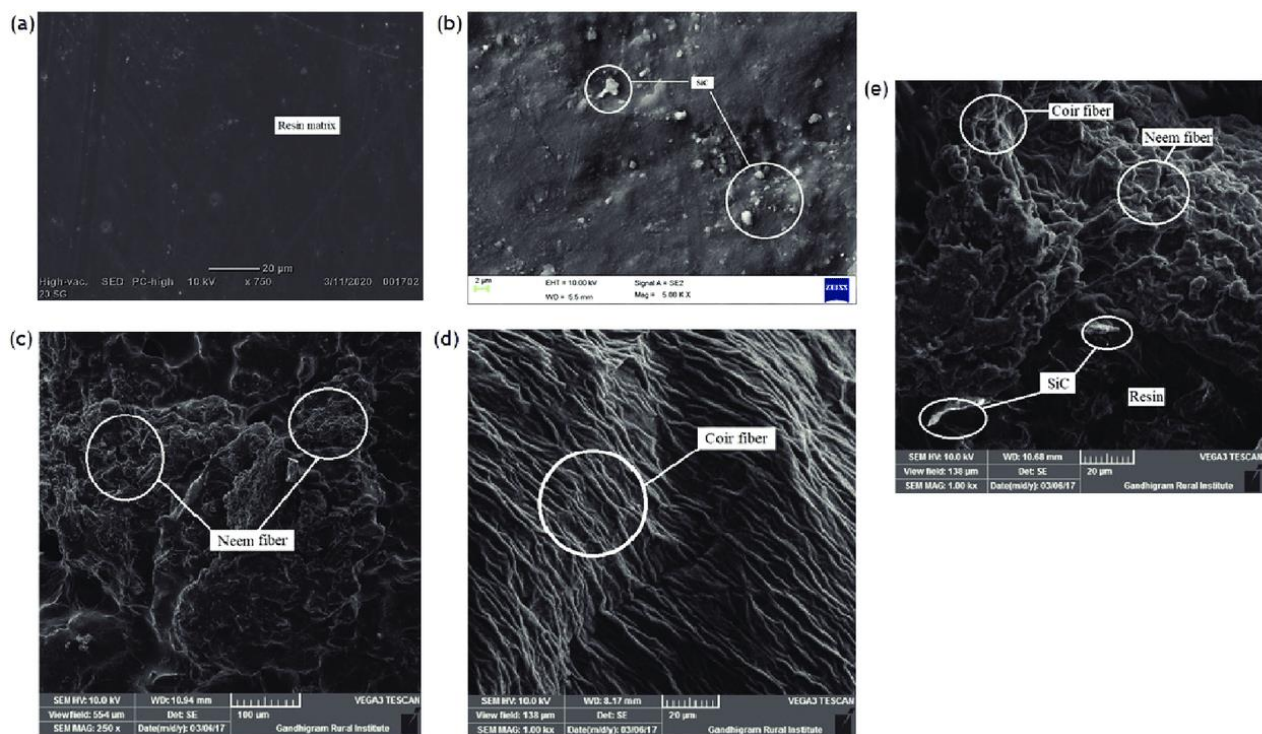
συγκρίσιμων συντελεστών θερμικής διαστολής, μπορεί να αναπτυχθούν έντονες θερμικές τάσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε θραύση της μήτρας.



Εικόνα 13 : Επιφάνεια θραύσης συνθέτου ινών και μήτρας SiC (CMC) σε ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) [51].

Πολυμερικής μήτρας (PMC) :

Πολυμερικές μήτρες με ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται για δεξαμενές, δοχεία πίεσης, σωληνώσεις και διάφορα σκάφη με μήκος έως περίπου 40 m. Πολυμερικές μήτρες με ίνες αραμιδίου χρησιμοποιούνται σε διάφορα σκάφη, στρατιωτικά κράνη, εξωτερικά μέρη ελικοπτέρων κ.α. Πολυμερικές μήτρες με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για τμήματα ελικοπτέρων και αεροσκαφών, για δοχεία υψηλής πίεσης και για εξαρτήματα όπου ο στατικός ηλεκτρισμός είναι ανεπιθύμητος.



Εικόνα 14 : Μικροδομές τεσσάρων τύπων συνθέτων PMC : (a) resin matrix, (b) R/SiC composite, (c) neem fiber composite, (d) coir fiber composite, and (e) hybrid SiC/neem/coir fiber composite σε ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) [53].

2.3 Νανοσύνθετα με πολυμερική μήτρα (Polymer Nanocomposites-PNCs).

Όπως αναφέραμε και στην §2.3, όταν τουλάχιστον μία από τις **διαστάσεις** των **ενισχυτικών φάσεων** (υβριδικά σύνθετα) είναι **κάτω** των **100 nm**, το σύνθετο υλικό ονομάζεται νανοσύνθετο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σύνθετα υλικά που εξετάζονται πειραματικά στην παρούσα εργασία.

Η μήτρα των νανοσυνθέτων είναι συνήθως πολυμερική ενώ οι ενισχυτικές φάσεις μπορεί να είναι σε μορφή φυλλιδίων, ράβδων (ή σωλήνων), σφαιροειδών ή και σωματίδια ακανόνιστου σχήματος με υλικά κατασκευής τους τον άνθρακα ή άλλα ανόργανα νανοϋλικά [41].

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί διάφορα νανοσύνθετα υλικά για χρήση στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. οι πρώτες ύλες, ωστόσο, είναι δαπανηρές και η διαδικασία κατασκευής απαιτεί μεγάλους χρόνους. Οι δύο αυτές συνθήκες έχουν καταστήσει τα νανοσύνθετα υλικά μη προσιτά στις αυτοκινητοβιομηχανίες, όπου τα εξαρτήματα πρέπει να παράγονται μαζικά και με πολύ χαμηλότερο κόστος. Αν και τα σύνθετα υλικά μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην αυτοκινητοβιομηχανία, η διαδικασία κατασκευής τους δεν είναι ακόμη ανταγωνιστική με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας, όπως η παραγωγή μεταλλικών ελασμάτων («στράτζα»).

Τα νανοσύνθετα με πολυμερική μήτρα ωστόσο φιλοξενούν συνήθως ένα μικρό κλάσμα κατ'όγκο ενισχυτικών φάσεων, αρκετό για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης, αλλά ταυτόχρονα ικανό ώστε να διατηρείται το κόστος και το βάρος του τελικού προϊόντος σε χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, τα νανοσύνθετα αυτά μπορούν να υποστούν ταχεία επεξεργασία, με μεθόδους όπως η χύτευση.

Εάν σε ένα νανοσύνθετο η πρόσφυση ενισχυτικής φάσης – μήτρας είναι κακή, τα τμήματα της ενισχυτικής φάσης τείνουν να συσσωματώνονται σε συστάδες (φαινόμενο συσσωμάτωσης - agglomeration), δημιουργώντας σημεία ελαττωμάτων, ακόμη και αν η ανάμειξη πραγματοποιείται σε υψηλές ταχύτητες. Διάφορες χημικές συνθήκες ή φυσικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών είναι απαραίτητες για την επίτευξη των επιθυμητών μορφολογιών.

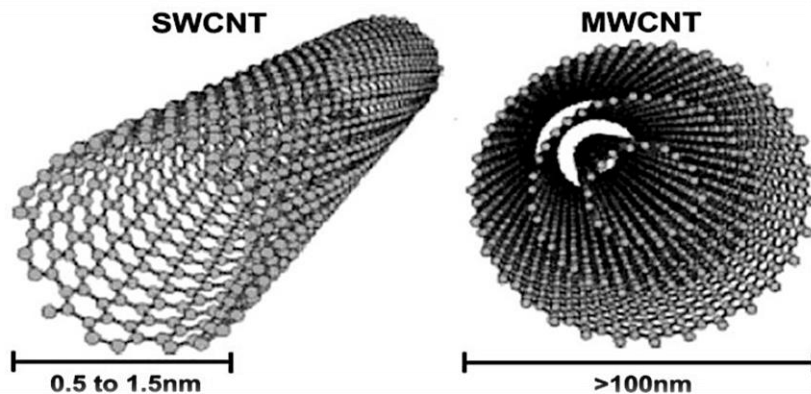
Για παράδειγμα, ένα ημι-κρυσταλλικό πολυμερές ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα (βλ. §2.3.1) σχηματίζει μια μοναδική υβριδική μορφολογία, στην οποία οι νανοσωλήνες λειτουργούν ως «κρυσταλλικοί πυρήνες», ενώ τα μέρη του πολυμερούς προσκολλώνται περιφερειακά τους, μέσω μίας φυσικής «απορρόφησης». Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το νανοσύνθετο υλικό παρουσιάζει μία βελτίωση στο μέτρο ελαστικότητας της τάξης του 800%, με ποσοστό περιεκτικότητας νανοσωλήνων της τάξης του 0.2% κατά βάρος. Ένας υψηλός βαθμός διασποράς και βελτιωμένη διεπιφανειακή πρόσφυση συχνά ενισχύει το μέτρο ελαστικότητας, καθιστώντας ένα υλικό κατάλληλο για πολλές ημι-δομικές εφαρμογές. Ωστόσο, αυτός ο τύπος δομής δεν μεταφράζεται απαραίτητα σε μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση [55].

Η θεωρητική μελέτη αποκαλύπτει ότι ο σχεδιασμός νανοσύνθετων υλικών με ιεραρχικά διατεταγμένες δομές προσφέρει δυνητικά μεγάλη απόδοση. Ο συνδυασμός γραφενίου και νανοσωλήνων άνθρακα ως ενισχυτικών φάσεων σε εποξειδικές θερμοσκληρυνόμενες μήτρες αυξάνει τη μηχανική αντοχή και τη σκληρότητα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που επιφέρουν όταν χρησιμοποιούνται μεμονωμένα. Ωστόσο, είναι γενικότερα δύσκολο να εισαχθεί ιεραρχική τάξη στα νανοσύνθετα. Σημειώνεται τέλος πως το σχήμα των νανοσωματιδίων φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τόσο τις μηχανικές ιδιότητες όσο και τις μεθόδους επεξεργασίας των νανοσύνθετων πολυμερών, παρόλο που η ακριβής προέλευση αυτού του φαινομένου είναι ακόμα ασαφής.

2.3.1 Ενισχυτικά με βάση τον άνθρακα.

Νανοσωλήνες άνθρακα :

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (**Carbon Nanotubes – CNTs**) είναι εξαιρετικά λεπτές ίνες άνθρακα με διάμετρο τάξης νανομέτρων και μήκος τάξης μικρομέτρων. Οι CNTs ανακαλύφθηκαν το 1991 από τον Sumio Iijima και από τότε έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Η δομή του CNT αποτελείται από ένα «περιτυλιγμένο» φύλλο γραφίτη, το οποίο είναι μια επίπεδη-εξαγωνική διάταξη ατόμων άνθρακα κατανομημένα σε ένα πλέγμα κηρήθρας [32, 33]. Οι νανοσωλήνες μπορούν να ταξινομηθούν είτε σε «πολυτοιχωματικούς» (Multi Walled Carbon Nanotubes – MWCNT) είτε σε «μονοτοιχωματικούς» (Single Walled Carbon Nanotubes – SWCNT), ανάλογα με τη μέθοδο παρασκευής τους, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 15**.



Εικόνα 15 : Είδη νανοσωλήνων άνθρακα.

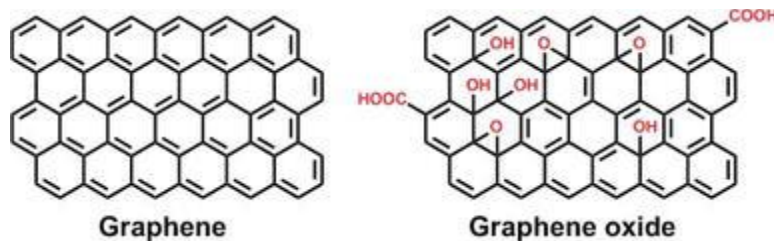
Οι MWCNTs αποτελούνται από δύο ή περισσότερα ομόκεντρα κυλινδρικά κελύφη γραφενίου ομοαξονικά διατεταγμένα γύρω από έναν κοίλο κεντρικό πυρήνα. Από την άλλη πλευρά, οι SWCNTs αποτελούνται από ένα ενιαίο στρώμα γραφενίου τυλιγμένο σε έναν κύλινδρο χωρίς ραφή. Εκτός από τις εξαιρετικές ηλεκτρικές και αγώγιμες ιδιότητές τους, οι CNTs παρουσιάζουν και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, με συντελεστή

ελαστικότητας της τάξης του 1 TPa και μέγιστη αντοχή σε θραύση της τάξης των 300 GPa, ιδιότητες οι οποίες σχετίζονται με τις ισχυρές συνδέσεις μεταξύ των μορίων άνθρακα [41].

Στους νανοσωλήνες άνθρακα παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της συσσώρευσης (agglomeration) διότι διασκορπίζονται με δυσκολία στις πολυμερικές μήτρες με αποτέλεσμα να προκύπτουν προβλήματα λόγω της μικρής αλληλεπίδρασης πολυμερούς/CNT.

Γραφένιο :

Το γραφένιο ανακαλύφθηκε το 2004 από τον Andre. K. Geim και τον Konstantin S. Novoselov και έφερε επανάσταση στη νανοεπιστήμη και τη φυσική της συμπεκνωμένης ύλης λόγω των εξαιρετικών ηλεκτρικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του. Το γραφένιο έχει προκαλέσει τεράστιο ενδιαφέρον σε πολλές ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο και αυτό είχε ως αποτέλεσμα μία μεγάλη αύξηση των δημοσιεύσεων γύρω από αυτό. Αυτό το υλικό αποτελείται από ένα ατομικό παχύ φύλλο ομοιοπολικά συνδεδεμένων ατόμων άνθρακα σε εξαγωνική διάταξη όπως φαίνεται στην **Εικόνα 16**.



Εικόνα 16 : Κυψελοειδές πλέγμα γραφενίου [41].

Η επιτυχής χρήση του γραφενίου εξαρτάται από την απολέπιση του συμπαγή/ορυκτού γραφίτη σε μεμονωμένα φύλλα. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές χημικές και μηχανικές διαδικασίες για την παραγωγή μεμονωμένων απολεπισμένων φύλλων γραφενίου, όπως για παράδειγμα μηχανική απολέπιση, χημική απολέπιση και εναπόθεση χημικών ατμών. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που σχετίζονται με την καθαρότητα και την παρουσία ελαττωμάτων. Η πιο κοινή οδός για την παραγωγή γραφενίου περιλαμβάνει την παραγωγή οξειδίου του γραφίτη (GO) με διαδικασία οξείδωσης που ακολουθείται από αναγωγή και μηχανική απολέπιση [34]. Το GO είναι μη αγωγίμο, υδρόφιλο και μπορεί εύκολα να διογκωθεί και να διασκορπιστεί στο νερό. Πρόσφατα, αναφέρθηκαν αρκετές νέες μέθοδοι λειτουργικότητας του γραφενίου. Τα λειτουργικά φύλλα γραφενίου (Functionalized graphene sheets – FGS) επιδεικνύουν βελτιωμένη ικανότητα διασποράς σε οργανικούς διαλύτες και πολυμερή.

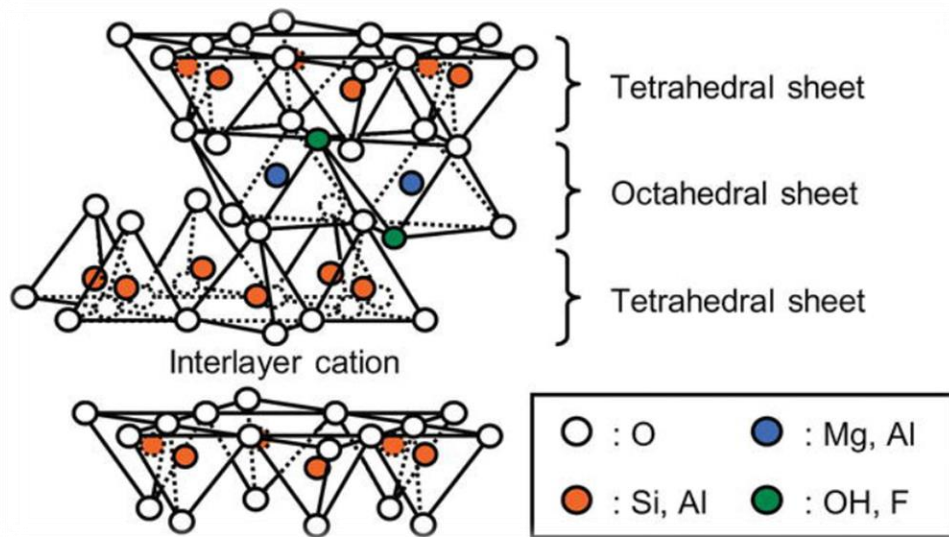
2.3.2 Διαστρωματωμένοι νανο-άργιλοι.

Οι νανοάργιλοι ανήκουν σε μια κατηγορία υλικών που γενικά κατασκευάζονται από στρωματοποιημένα πυριτικά άλατα ή ορυκτά αργίλου με ίχνη οξειδίων μετάλλων και οργανικής ύλης. Τα αργιλικά ορυκτά είναι ένυδρα φυλλοπυριτικά άλατα αργιλίου, μερικές φορές με μεταβλητές ποσότητες σιδήρου, μαγνησίου, αλκαλικών μετάλλων, αλκαλικών γαιών και άλλων κατιόντων.

Τις τελευταίες δεκαετίες, αρκετές δημοσιεύσεις έχουν δείξει ότι η διασπορά αποφλοιωμένων αργίλων σε πολυμερές οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση της ακαμψίας και της επιβράδυνσης στην ανάφλεξη, ξεκινώντας από ένα πολύ χαμηλό κλάσμα όγκου νανοσωματιδίων. Έχει βρεθεί ότι οι άργιλοι είναι αποτελεσματικά πληρωτικά ενίσχυσης πολυμερών λόγω της ελασματοειδούς δομής και της υψηλής ειδικής επιφάνειας τους (750 m²/g).

Οι άργιλοι σηκτική είναι απαραίτητη επιλογή για την παρασκευή πολυμερών νανოსύνθετων υλικών λόγω του χαμηλού κόστους, των ιδιοτήτων διόγκωσης και της υψηλής ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων.

Μερικά παραδείγματα αυτών των αργίλων είναι ο μοντμοριλλονίτης, ο σαπωνίτης, ο λαπωνίτης, ο εκτορίτης, ο σεπιόλιθος και ο βερμικουλίτης. Μεταξύ αυτών των αργίλων, ο μοντμοριλλονίτης (μπετονίτης) είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος άργιλος σε πολυμερή νανοςύνθετα υλικά λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητάς του, του υψηλού λόγου εμβαδού επιφάνειας προς τον όγκο των νανοςωματιδίων και της αντιδραστικότητάς του. Αποτελείται από δύο τετραεδρικά φύλλα διοξειδίου του πυριτίου με ένα οκταεδρικό φύλλο αλουμίνας στη μέση (στρωματική δομή 2:1) και τα ενυδατωμένα ανταλλάξιμα κατιόντα καταλαμβάνουν τους χώρους μεταξύ των δικτυωμάτων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 17**.

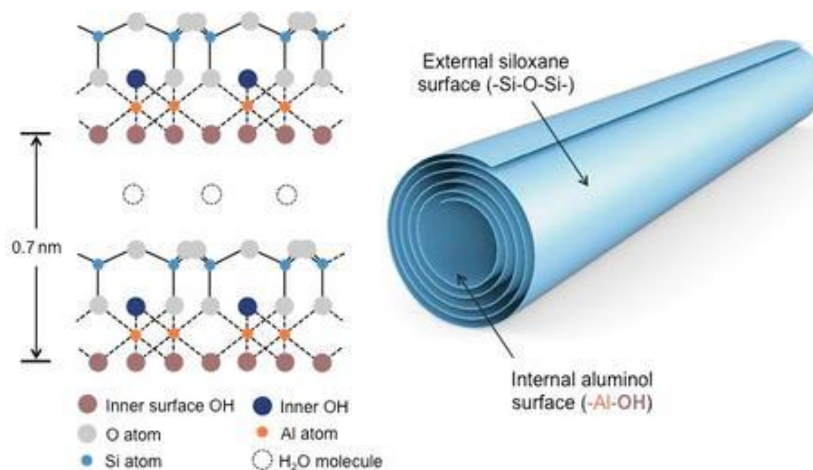


Εικόνα 17 : Δομή μοντμοριλλονίτη (2:1) [41].

2.3.3 Πορώδη και κοίλα νανοσωματίδια.

Αλλοϋσίτης (Halloysite) :

Ο νανοσωλήνας αλλοϋσίτη (Halloysite nanotube – HNT) είναι ένα αργιλοπυριτικό άλας με κοίλη μικρο- και νανο-σωληνοειδή δομή. Ο HNT είναι δομικά κοντά με τον καολινίτη και μπορεί να περιλαμβάνει μια μονοστιβάδα μορίων νερού, η οποία συγκρατείται ασθενώς. Αποτελείται από φύλλα τετράεδρων SiO_4 με φύλλα οκταεδρικού AlO_6 . Συνεπώς, η χημική σύσταση του HNT είναι παρόμοια με τους νανοαργίλους, ενώ η νανοσωληνοειδής γεωμετρία είναι παρόμοια με τα CNTs. Η μοναδικότητα των HNTs οφείλεται στη σωληνοειδή μορφή του με μήκος έως λίγα μικρόμετρα και διάμετρο σε εύρος νανομέτρων.



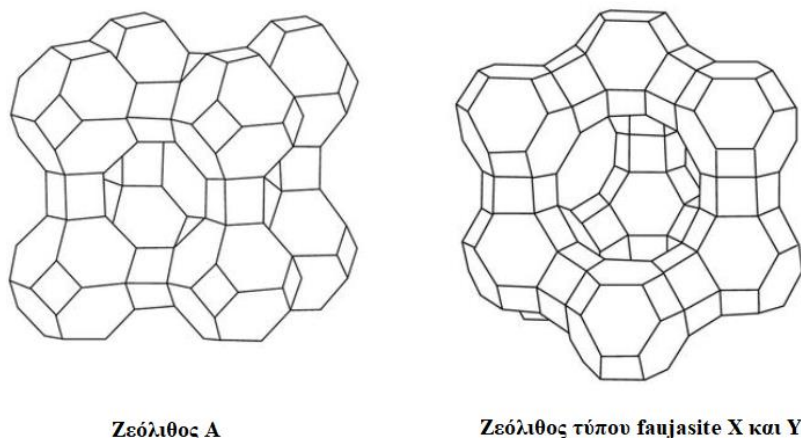
Εικόνα 18 : Δομή νανοσωλήνα αλλοϋσίτη [41].

Ο HNT προσφέρει καινοτόμες δυνατότητες στην παρασκευή των νανοσύνθετων. Η βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του πολυμερούς με την προσθήκη πληρωτικού/ενίσχυσης χαμηλής περιεκτικότητας αποτελεί το επίκεντρο της βιομηχανικής και της ακαδημαϊκής έρευνας. Ο HNT ως νανοενισχυτικό (nanofiller) σε πολυμερή υλικά έχει βρεθεί ότι αυξάνει σημαντικά τις μηχανικές, θερμικές, ανεύφλεκτες και άλλες φυσικές ιδιότητες του νανοσύνθετου [35].

Ζεόλιθοι :

Οι ζεόλιθοι είναι στερεά με σχετικά ανοιχτή, τρισδιάστατη κρυσταλλική δομή, που αποτελούνται από αλουμίνιο, οξυγόνο και πυρίτιο, μέταλλα αλκαλικά ή αλκαλικών γαιών καθώς και μόρια νερού παγιδευμένα στα κενά μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως καταλύτες ή υποστηρίξεις καταλυτών σε μια ποικιλία εφαρμογών στις βιομηχανίες διύλισης.

Το 1953, ο ζεόλιθος τύπου Α έγινε ο πρώτος συνθετικός ζεόλιθος που εισήλθε στο εμπόριο ως προσροφητικό μέσο για την αφαίρεση οξυγόνου από το αργό στις εγκαταστάσεις της Union Carbide. Ακολούθησε μία σειρά καινούργιων συνθετικών ζεόλιθων που χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά ως προσροφητικά μέσα και καταλύτες στις μετατροπές υδρογονανθράκων. Η μορφολογία των ζεόλιθων, που επιτρέπει την εισαγωγή μικρών μορίων μέσα στους πόρους ενώ αποκλείει την είσοδο μεγαλύτερων, τους καθιστά χρήσιμους ως μοριακά κόσκινα. Τα μοριακά κόσκινα χρησιμεύουν στον καθαρισμό πετρελαίου, στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανικές διαδικασίες ως εκλεκτικοί καταλύτες, προσροφητικά και ιονικοί εναλλάκτες. Πολλοί συνθετικοί ζεόλιθοι εμφανίζουν κρυσταλλικές δομές που μέχρι σήμερα δεν έχουν βρεθεί μεταξύ φυσικών ζεόλιθων. Ο ζεόλιθος τύπου Χ έχει μικρότερο λόγο πυριτίου-αλουμίνιας και μικρότερη θερμική και υδροθερμική σταθερότητα από τον τύπο Υ [37, 38]. Ειδικότερα, ο φυσικός ζεόλιθος φωγιασίτης (faujasite) έχει παρόμοια δομή με τον συνθετικό ζεόλιθο τύπου Υ, αλλά απαντάται σπάνια στη φύση. Αποτελεί ένα αργιλοπυριτικό άλας με κοιλότητες διαμέτρου 1.3 nm και πορώδες μεγέθους 0.74 nm.



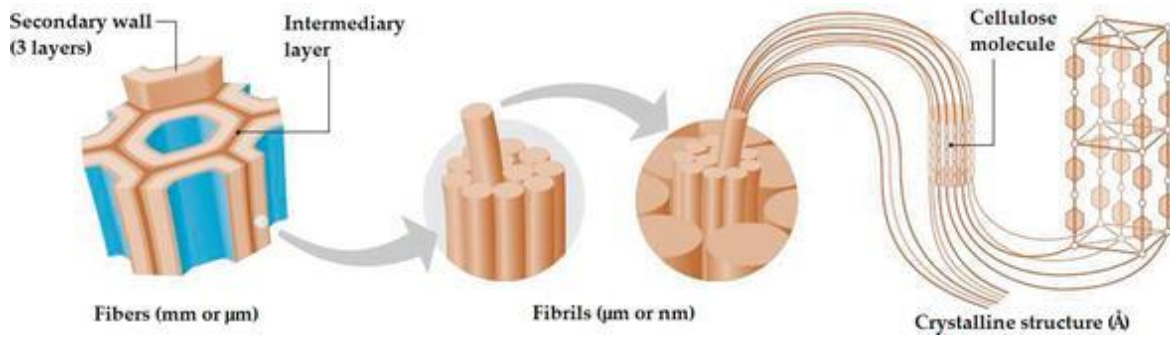
Εικόνα 19 : Σχηματική αναπαράσταση συνθετικών ζεολίθων [41].

Η κυψέλη αυτών των αργιλοπυριτικών περιέχει περίπου 192 τετράεδρα $(\text{Si,Al})\text{O}_4$. Η ανάπτυξη μεθόδων σύνθεσης ζεόλιθου για τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων χαίρει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, καθώς οι ζεόλιθοι μεγέθους μικρομέτρων έχουν αμελητέα εξωτερική επιφάνεια σε σύγκριση με τη μεγάλη επιφάνεια στο εσωτερικό πορώδες. Η αποτελεσματικότητα των φυσικών ζεόλιθων στην απομάκρυνση ραδιενεργών αποβλήτων από το περιβάλλον (ραδιονουκλίδια Cs και Sr) βρέθηκε να είναι χαμηλότερη από αυτή των συνθετικών ζεόλιθων. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι παρουσιάζουν επίσης πολύ υψηλότερη ικανότητα προσρόφησης ιόντων βαρέων μετάλλων λόγω μεγαλύτερου πορώδους.

Τα νανοσωματίδια ζεόλιθου οδηγούν σε ουσιαστικές αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, αυξάνοντας τον διακρυσταλλικό χώρο, την εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια. Επομένως, η εφαρμογή νανοζεολίθων σε ορισμένες καταλυτικές αντιδράσεις μπορεί να μειώσει τα μήκη των οδών διάχυσης και να αυξήσει την καταλυτική δραστηριότητα.

2.3.4 Νανοσωματίδια κυτταρίνης.

Υπάρχει ενδιαφέρον γύρω τη χρήση της βιομάζας ως πηγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υλικών και μάλιστα μία πολλά υποσχόμενη πηγή βιομάζας είναι η κυτταρίνη. Με κατάλληλες χημικές και μηχανικές επεξεργασίες, είναι δυνατή η παραγωγή ινωδών νανοσυνθέτων με μία ή δύο διαστάσεις στην περιοχή των νανομέτρων, από οποιοσδήποτε φυσικές πηγές κυτταρίνης [36]. Ο όρος «νανοκυτταρίνη» χρησιμοποιείται για να καλύψει το φάσμα των υλικών που προέρχονται από κυτταρίνη με τουλάχιστον μία διάσταση στην περιοχή των νανομέτρων. Η απομόνωση κρυσταλλικών κυτταρινικών περιοχών, με τη μορφή μονοκρυστάλλων, γίνεται με μια διαδικασία όξινης υδρόλυσης. Η πρώτη έρευνα για τη μηχανική αποδομή των ινών κυτταρίνης δημοσιεύτηκε το 1983. Τα υλικά με βάση τη νανοκυτταρίνη έχουν χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα και είναι βιώσιμα, ανανεώσιμα, ανακυκλώσιμα και μη τοξικά. Έχουν έτσι τη δυνατότητα να είναι πραγματικά «πράσινα» νανοϋλικά με πολλές χρήσιμες και απροσδόκητες ιδιότητες.



Εικόνα 20 : Η κρυσταλλική δομή της κυτταρίνης [41].

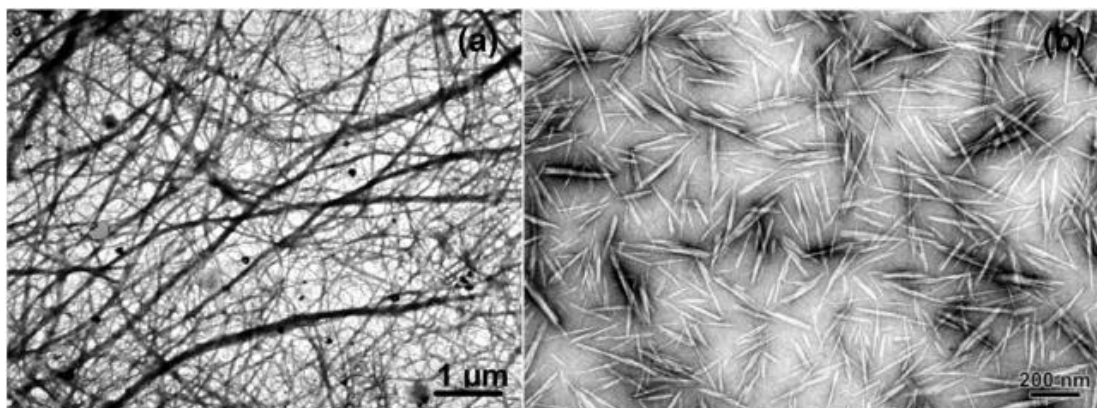
Νανοϊνίδια κυτταρίνης :

Η μηχανικά επαγόμενη αποδόμηση συνίσταται από εφαρμογή πολλαπλών μηχανικών διατμήσεων κυτταρινικών ινών, για την απελευθέρωση περισσότερο ή λιγότερο απομονωμένων μικροϊνιδίων. Χρησιμοποιούνται γενικά διαφορετικοί τύποι εξοπλισμού διάτμησης, όπως ομογενοποιητές, μικρορευστοποιητές ή εξαιρετικά λεπτοί μύλοι τριβής. Αυτό το υλικό ονομάζεται συνήθως νανοϊνιδοποιημένη κυτταρίνη (NanoFibrillated Cellulose – NFC) ή νανοϊνίδια κυτταρίνης (Cellulose NanoFibrils – CNF) και λαμβάνεται ως υδατικό εναιώρημα. Το πλάτος τους είναι 3-100 nm, ανάλογα με την πηγή της κυτταρίνης, τη διαδικασία παραγωγής και την προεπεξεργασία ενώ το μήκος είναι συνήθως μεγαλύτερο από 1 μm [36,41].

Νανοκρύσταλλοι κυτταρίνης :

Η χημικά επαγόμενη αποδόμηση συνίσταται στην εφαρμογή μιας ελεγχόμενης επεξεργασίας υδρόλυσης με χρήση ισχυρού οξέος σε κυτταρινικές ίνες, επιτρέποντας τη διάλυση των άμορφων περιοχών και επομένως τη διαμήκη κοπή των μικροϊνιδίων. Τα νανοσωματίδια που προκύπτουν ονομάζονται νανοκρύσταλλοι κυτταρίνης (Cellulose NanoCrystals – CNCs) και λαμβάνονται ως υδατικό εναιώρημα. Αυτά τα νανοσωματίδια έχουν νανοκρυστάλλους που μοιάζουν με ράβδους υψηλής αναλογίας διαστάσεων.

Οι γεωμετρικές τους διαστάσεις εξαρτώνται από την προέλευση της κυτταρίνης και των συνθηκών υδρόλυσης. Όταν χρησιμοποιείταιθειικό οξύ για την παρασκευή CNC, προκαλείται σχηματισμός αρνητικά φορτισμένωνθειικών ομάδων στην επιφάνεια. Το μέσο μήκος είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων νανομέτρων και το πλάτος της τάξης των μερικών νανομέτρων. Ο λόγος των διαστάσεων είναι μία σημαντική παράμετρος για τα CNCs και ορίζεται ως ο λόγος του μήκους προς το πλάτος.

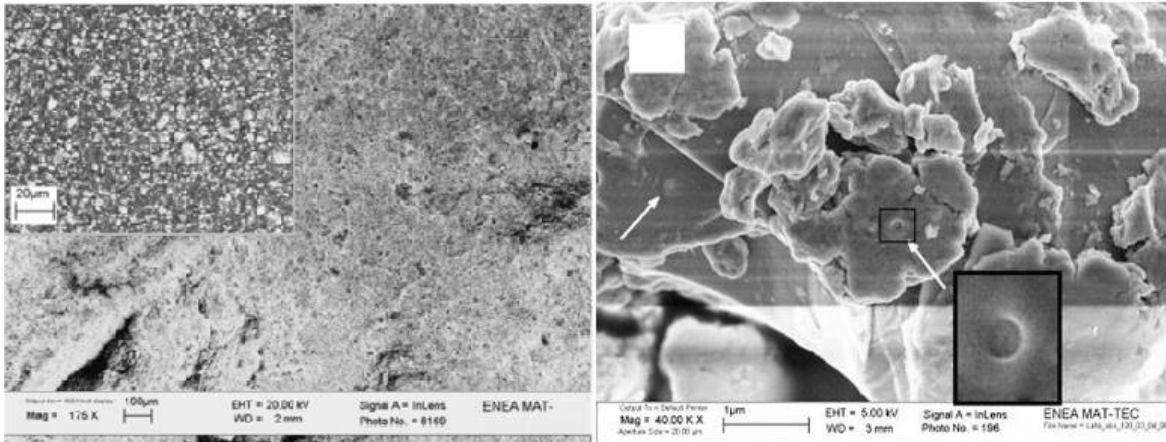


Εικόνα 21 : Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) αραιών εναιωρημάτων (α) νανοκρυστάλλων κωπταρίνης κατασκευασμένων από ινδική συκή και (β) νανοκρυστάλλων κωπταρίνης εξαγόμενων από ίνες ραμί [36].

2.3.5 Νανοςωματίδια κραμάτων μετάλλου

Η δυνατότητα χρήσης κραμάτων μετάλλου-υδριδίων (ανιόντων υδρογόνου) (Metal Hydrides – MH) στην τεχνολογία του υδρογόνου έχει ελκύσει έντονα το ενδιαφέρον. Αυτοί οι τύποι υλικών αντιδρούν με το υδρογόνο αναστρέψιμα, και έτσι χρησιμοποιούνται με επιτυχία στην αποθήκευση του υδρογόνου σε στερεά φάση. Ωστόσο, υπό επαναλαμβανόμενους κύκλους ένωσης/απόσπασης από το υδρογόνο, τα κράματα MH υποφέρουν από ένα φαινόμενο κωπιοποίησης. Κατά συνέπεια, τέτοιοι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι παράγουν ελεύθερα σωματίδια μεταλλικής σκόνης σε μέγεθος νανοκλίμακας. Ο κατακερματισμός των σωματιδίων οδηγεί σε σημαντική αύξηση του εμβαδού της μεταλλικής επιφάνειας, με επακόλουθη αύξηση ορισμένων ιδιοτήτων. Μεταξύ αυτών, η κινητικότητα των υδριδίων αναμένεται να βελτιωθεί, ακόμη και αν η παράλληλη αύξηση των ανεπιθύμητων φαινομένων αποικοδόμησης (π.χ οξείδωση) οδηγήσει σε υποβάθμιση/βλάβη της συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας του υλικού.

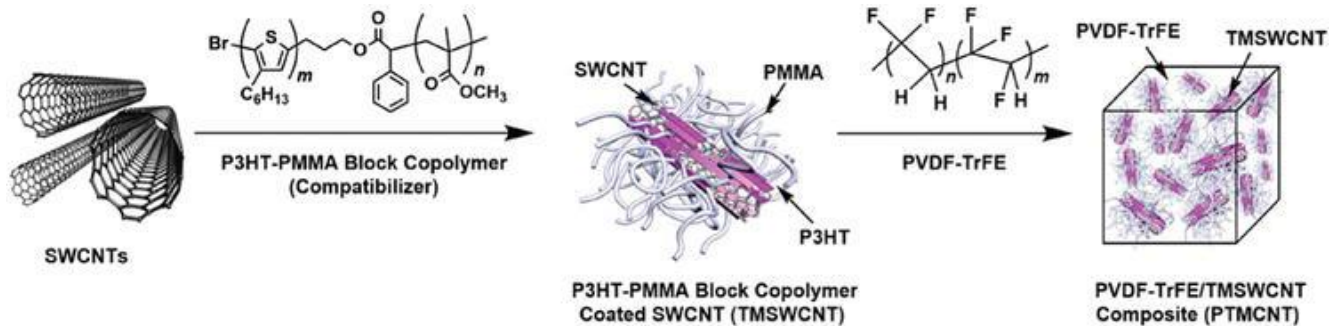
Παρ' όλα αυτά, η αποθήκευση υδρογόνου σε “κλίμες” MH ως χημική ένωση φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη, οικονομικά αποδοτική και ασφαλής μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου στο εγγύς μέλλον [36, 41, 42]. Ένα παράδειγμα νανοςύνθετου πολυμερούς με κράμα MH φαίνεται στην **Εικόνα 22**. Η μικροσκοπική αυτή ανάλυση δείχνει τις πορώδεις επιφάνειες των συνθέτων, με μεταλλικά νανοςωματίδια ομοιόμορφα ενσωματωμένα στη μήτρα.



Εικόνα 22 : Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) νανοσύνθετου πολυμερούς $\text{LaNi}_5\text{-SiO}_2|_{300}$ (αριστερά) με οπισθοσκέδαση (πάνω αριστερά) και $\text{LaNi}_5\text{-ABS}$ (δεξιά) κατόπιν ξηρής επίστρωσης με σωματίδια σε μύλο ανάδευσης (tumbling mill) [41,54].

2.3.6 Συμβατότητα στα πολυμερή νανοσύνθετα

Προκειμένου να παραχθεί ένα μείγμα πολυμερών ή ένα νανοσύνθετο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες, η συμβατότητα είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Στην πραγματικότητα, οι διαφορές στη χημική φύση μεταξύ των πολυμερών ή της πολυμερούς μήτρας και των νανოსωματιδίων δημιουργούν συστήματα με κακές ιδιότητες.



Εικόνα 23 : Αναπαράσταση της διαδικασίας παραγωγής συμβατοποιημένων νανოსωματιδίων PVDF/SWCNT [41].

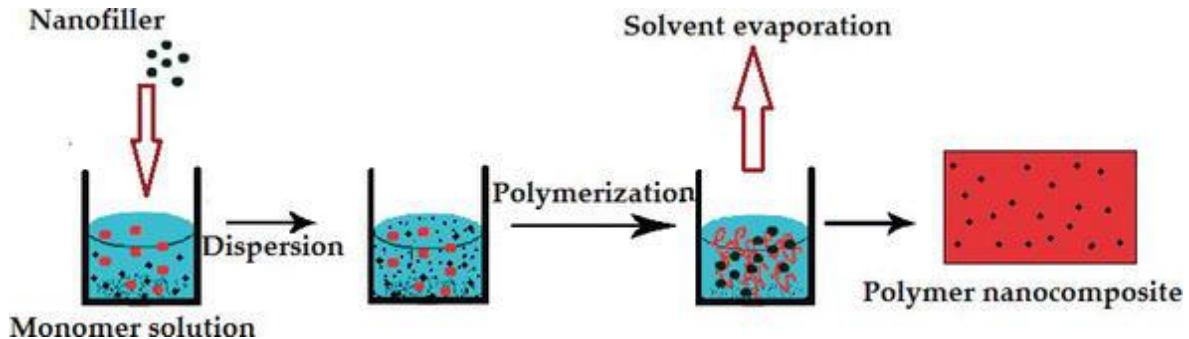
Τα νανοσύνθετα πολυμερών μπορούν να παραχθούν με τρεις μεθόδους :

- επί τόπου πολυμερισμό (in situ polymerization).
- ανάμειξη διαλύματος (solution blending) και
- ανάμειξη τήγματος (melt blending)

Η κατάλληλη μέθοδος επιλέγεται ανάλογα με τον τύπο της πολυμερικής μήτρας, το νανοενισχυτικό και τις επιθυμητές ιδιότητες για τα τελικά προϊόντα.

Επί τόπου πολυμερισμός (in situ polymerization) :

Κατά τη διάρκεια του επί τόπου πολυμερισμού, το νανοενισχυτικό πρέπει να διασκορπιστεί σωστά στο διάλυμα του μονομερούς πριν ξεκινήσει η διαδικασία πολυμερισμού, διασφαλίζοντας ότι το πολυμερές θα σχηματιστεί μεταξύ των νανοσωματιδίων.

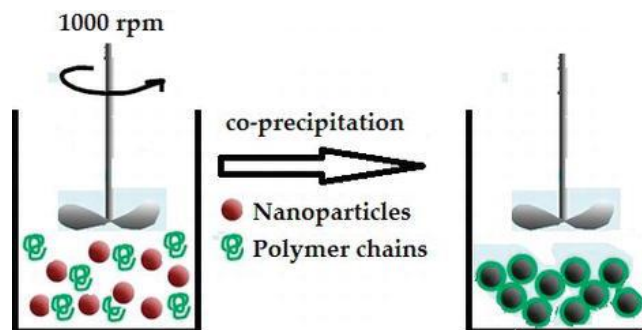


Εικόνα 24 : Σχηματική αναπαράσταση επί τόπου πολυμερισμού [41].

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οργανικοί τροποποιητές για να βοηθήσουν στη διασπορά των νανοσωματιδίων και να συμμετάσχουν στον πολυμερισμό. Αυτός μπορεί να είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για την παραγωγή νανოსύνθετων υλικών, όταν χρησιμοποιούνται πολυμερή που είναι μη διαλυτά ή θερμικά ασταθή. Είναι τέλος μια τεχνική που μπορεί να οδηγήσει σε προϊόντα υψηλότερης απόδοσης.

Ανάμειξη διαλύματος (solution blending) :

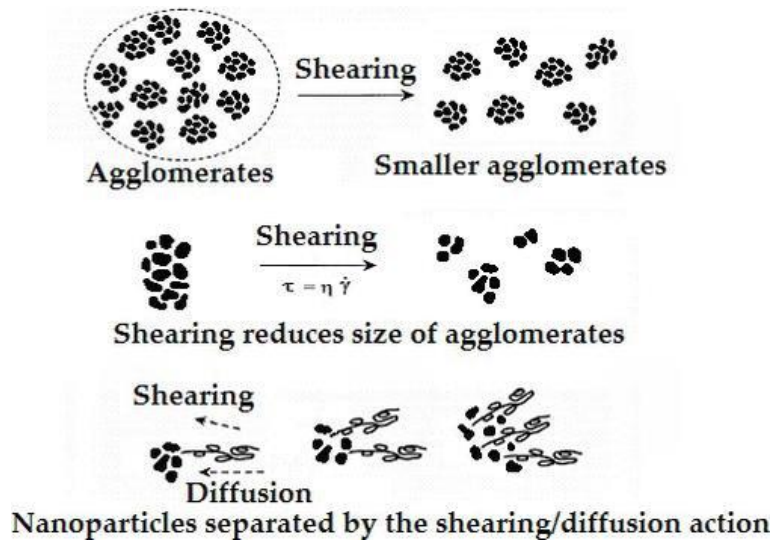
Στην ανάμειξη διαλυμάτων το πολυμερές και το νανοενισχυτικό διασπείρονται εύκολα σε έναν κατάλληλο διαλύτη και ακολουθεί ακτινοβολή με υπερήχους, μαγνητική ανάδευση ή ακόμη και ανάμειξη με διάτμηση, προκειμένου να επιτευχθεί διασπορά του νανοενισχυτικού μέσα στο πολυμερές. Σε αυτή τη μέθοδο, όταν ο διαλύτης εξατμίζεται, τα νανοσωματίδια παραμένουν διεσπαρμένα στις πολυμερικές αλυσίδες.



Εικόνα 25 : Σχηματική αναπαράσταση ανάμειξης διαλύματος [41].

Ανάμειξη τήγματος (melt blending) :

Στην μέθοδο ανάμειξης τήγματος νανοενισχυτικό διαχύνεται (diffusion) απευθείας στο τήγμα του πολυμερούς. Κατά την ανάμειξη, και όσο το μείγμα είναι ακόμα τήγμα, η καταπονηση που ασκεί το πολυμερές στα σωματίδια εξαρτάται από το μοριακό του βάρος και την κατανομή του βάρους. Από την άλλη η υψηλή διατμητική τάση που ελαττώνει το μέγεθος των συσσωματώσεων (agglomerates). Ο μηχανισμός της σταδιακής διανομής της διατμητικής τάσης κατά τον διασκορπισμό των νανοσωματιδίων στην πολυμερική μήτρα οδηγεί εν τέλει σε απομονωμένα σωματίδια και φαίνεται στην **Εικόνα 26**.



Εικόνα 26 : Σχηματική αναπαράσταση ανάμειξης τήγματος [41].

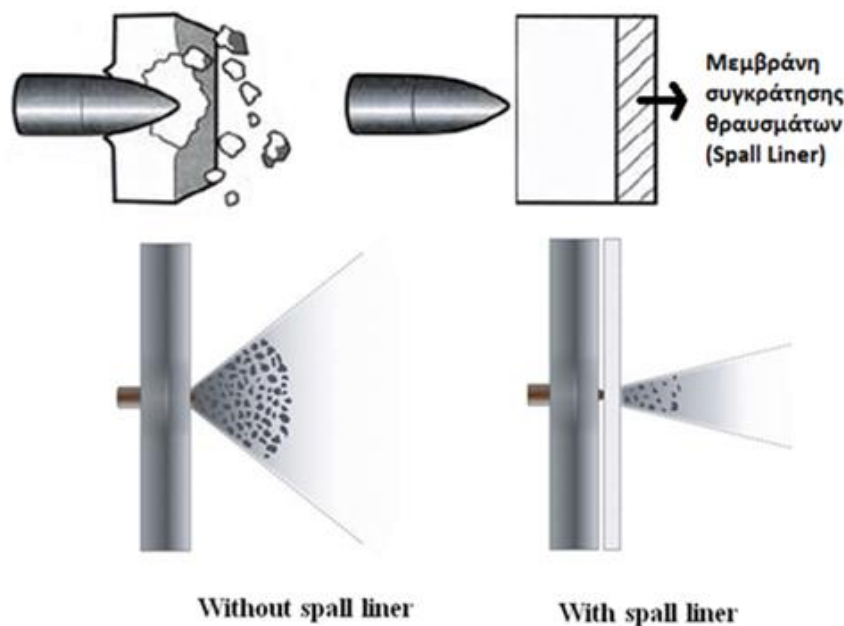
Οι δύο μέθοδοι ανάμειξης χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή πολυμερών νανოსύνθετων υλικών, λόγω της απλότητάς τους. Ωστόσο, η επίτευξη σωστής διασποράς του νανοενισχυτικού στην πολυμερική μήτρα, μπορεί να είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους [41].

3. Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση

3.1 Γενικά

3.1.1 Αρχή λειτουργίας της θωράκισης.

Ο ρόλος της θωράκισης είναι να προστατεύει άτομα ή συσκευές με την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας ενός βλήματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με πλαστική παραμόρφωση του υλικού της θωράκισης είτε με θραύση του. Στην δεύτερη περίπτωση θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα θραύσματα του υλικού της θωράκισης ή/και του βλήματος, δεν προκαλούν βλάβες στο χρήστη. Για συγκεκριμένα υλικά η περίπτωση αυτή είναι αρκετά πιθανή, οπότε σε τέτοιες περιπτώσεις τοποθετείται ένα πρόσθετο (εσωτερικό) επίπεδο θωράκισης που αποκαλείται εσωτερική αντιθραυσματική (antifragment) επένδυση (spall liner) και παρέχει προστασία από τα θραύσματα (βλ. **Εικόνα 27**).

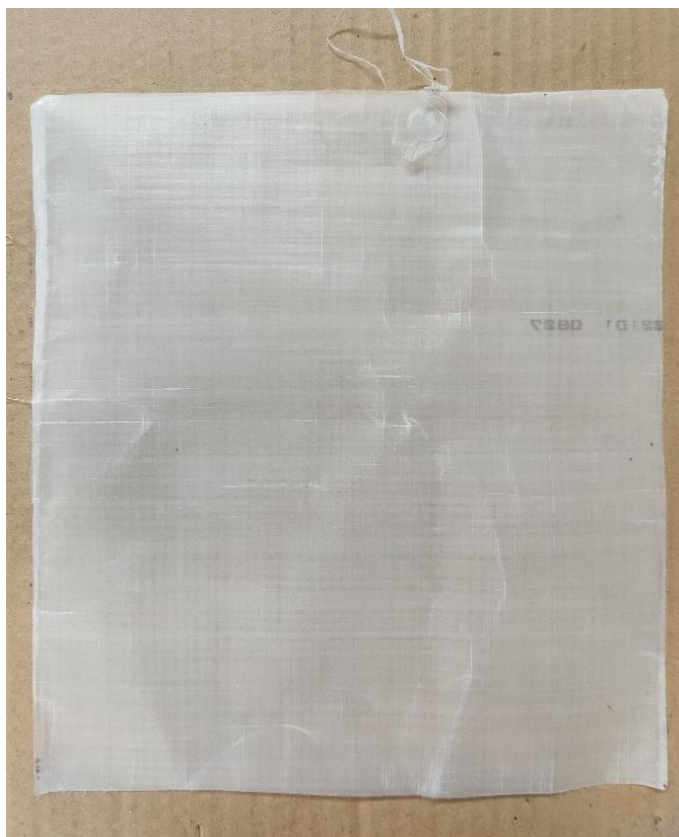


Εικόνα 27 : Συγκράτηση θραυσμάτων χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) την τοποθέτηση εσωτερικής μεμβράνης [3,56].

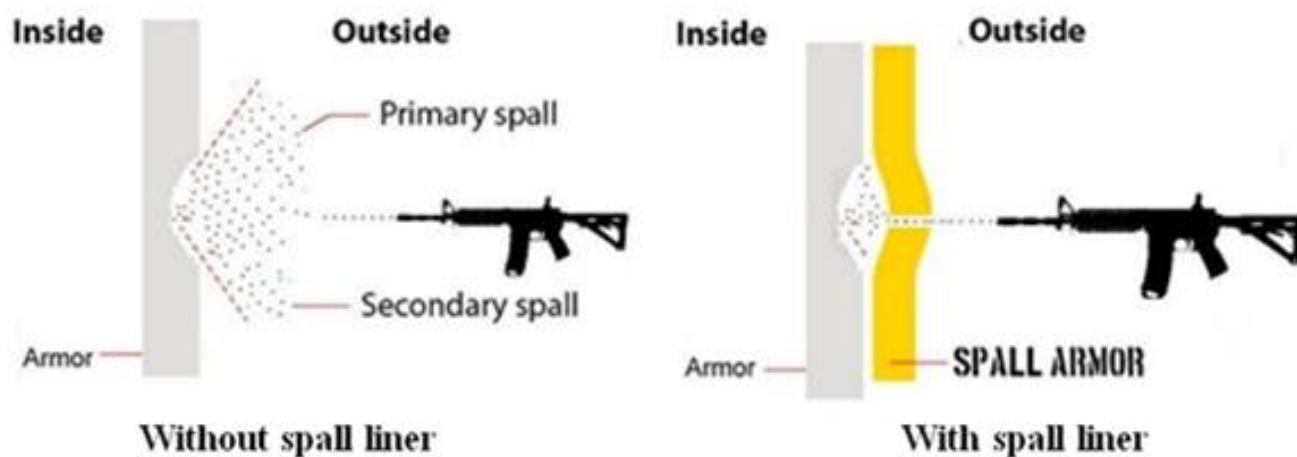
Η αντιθραυσματική μεμβράνη αποτελεί επίστρωση και τοποθετείται, όπως θα δούμε στη συνέχεια, κυρίως μπροστά από το «συμπαγές» συσσωμάτωμα της θωράκισης καθώς, με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μικρότερη σκέδαση των διαφόρων θραυσμάτων (κεραμικού και βλήματος).

Τις περισσότερες φορές (όπως και στα δοκίμια θωρακίσεων της παρούσας εργασίας στο Πειραματικό Μέρος) οι αντιθραυσματικές μεμβράνες δεν είναι παρά μονά φύλλα (βλ. **Εικόνα 28**) των εξεταζόμενων σύνθετων υλικών (Α και Β) τα οποία συγκολλούνται, μέσω

της παραγωγικής διαδικασίας που αναπτύσσεται στη συνέχεια, στην εμπρόσθια επιφάνεια της τελικής θωράκισης.



Εικόνα 28 : Δείγμα αντιθραυσματικής μεμβράνης-Spall Liner.



Εικόνα 29 : Συγκράτηση θραυσμάτων χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) αντιθραυσματική επίστρωση, εξωτερικά της θωράκισης.

Οι δύο βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν μία καλή θωράκιση είναι η παροχή προστασίας, από τη μία, και η **ελαχιστοποίηση** του **πάχους** και του **βάρους** της διάταξης, για δεδομένη (αντι)βαλλιστική απόδοση (αλλά και η ανάγκη **βελτιστοποίησης του σχήματος και της ευκαμψίας**), από την άλλη, η οποία και επάγεται τη διατήρηση της δομής της.

Υπάρχουν, βεβαίως, πολλοί διαφορετικοί τύποι βλημάτων που μπορεί να πλήξουν μία θωράκιση. Σε κάποιες περιπτώσεις επαρκεί η εκτενής παραμόρφωση της θωράκισης, ώστε να επιβραδύνει και να σταματήσει το βλήμα, μέσω της απορρόφησης της κινητικής του ενέργειας. Σε άλλες περιπτώσεις αυτό δεν είναι εφικτό λόγω χωρικών περιορισμών. Αναλόγως λοιπόν των απαιτήσεων, είναι συχνά επιθυμητό οι θωρακίσεις να εμπεριέχουν σύνθετα υλικά καταναμημένα σε πολλαπλά επίπεδα, με συγκεκριμένη ταξινόμηση, ώστε το καθένα από αυτά να προσφέρει μία συγκεκριμένη λειτουργία [3]. Οι αλεξίσφαιρες (αντι)βαλλιστικές διατάξεις αποτελούν επομένως **σύνθετα υβριδικά διαστρωματωμένα υλικά** καθώς συνίστανται από διαφορετικές στρώσεις που επιτελούν διαφορετικούς ρόλους προστασίας.

Γίνεται άμεσα αντιληπτό πως η βαλλιστική χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της θωράκισης ή αλλιώς τον «όγκο»/δυσκαμψία της [59] :

1. Η **«μαλακή» θωράκιση (soft/lightweight armor)** καθιστά τον φορέα της πιο ευκίνητο και χρησιμοποιείται για να εμποδίσει βλήματα μικρού διαμετρήματος από φορητά όπλα μικρού βεληνεκού (small arms bullets - frangible bullets) και όχι διατρητικά βλήματα υψηλότερου διαμετρήματος (high caliber bullets/armor piercing rounds). Στην «μαλακή» θωράκιση χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο πιο ελαφρές και εύκαμπτες συνθέσεις θωράκισης όπως είναι οι υφασμάτινες συνθέσεις με ίνες **Kevlar®**. Συχνά συναντάται και ο συνδυασμός (in conjunction with- ICW) των ανωτέρω μαλακών συνθέσεων με κεραμικές πλάκες και με λεπτές/εύκαμπτες μεταλλικές ή άκαμπτες σύνθετες πλάκες (ως backing plates), δηλαδή μία σύνθετη υβριδική διαστρωμάτωση με την ακόλουθη «σκληρή θωράκιση», για βέλτιστη προστασία.
2. Η **«σκληρή» θωράκιση (hard body armor)** συντίθεται είτε από πλάκες χάλυβα ή συνθέτου συνθέτου, για αντοχή σε μη διατρητικά βλήματα (non piercing bullets) από μαλακά μέταλλα (Light Steel Core bullets-LPS) είτε από συνδυασμό κεραμικής με μεταλλική ή σύνθετη πλάκα, για διατρητικές σφαίρες με συμπαγή ατσάλινο πυρήνα (FMJ or AP/armor piercing bullets with hard metal core). Η δεύτερη περίπτωση διαστρωμάτωσης επαυξάνει την ανθεκτικότητα της σκληρής θωράκισης.

Η συνιθέστερη διαστρωμάτωση σκληρής θωράκισης, για αντοχή κατά διατρητικών βλημάτων (βλ. **Πίνακα 2**) ή και μη διατρητικών (βλ. **Πίνακα 4**), αποτελείται από μία αντιθραυσματική μεμβράνη (sprall liner), μία κεραμική πλάκα, μία σύνθετη πλάκα και τέλος ίσως κάποιο ενισχυτικό αφρώδες υλικό (πίσω από την πλάκα του συνθέτου). Ανά τις διεπιφάνειες των στρώσεων επιστρατεύονται διαφορετικοί συγκολλητικοί παράγοντας (adhesive), που θα δούμε στη συνέχεια.

Η παραπάνω διάταξη περιβάλλεται εν τέλη από ένα εύκαμπτο υφασμάτινο κάλυμα αραμιδίου ή ινών πολυαιθυλενίου, το αμπαλάζ, σχηματίζοντας μια τυπική «σκληρή θωράκιση». Η τοποθέτηση της στην «θήκη» ενός υφασμάτινου γιλέκου αποτελεί ένα **σύστημα σκληρής θωράκισης** (βλ. **Εικόνα 29**).

Όπως είναι φυσικό η σκληρή θωράκιση καθιστά τον φορέα της λιγότερο ευκίνητο καθώς είναι άκαμπτη και βαρύτερη. Όπως προαναφέραμε συνήθως συνδυάζεται με κάποια «μαλακή» θωράκιση για μέγιστη προστασία του φορέα (hard armor in conjunction with- ICW soft armor). Στις Ένοπλες Δυνάμεις των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Armed Forces) τα **συστήματα σκληρής θωράκισης** συναντώνται ως σπλισμοί/ενθέματα **SAPI (Small Arms Protective Inserts)**.



Εικόνα 30 : Kevlar Soft Armor (αριστερά) και Hard Body Armor (δεξιά) [59].

Ammunition	7.62x51 FFV Bofors AB	7.62x51 Hirtenberger Patronfabrik	7.62x51 AP Fabrique National	30-06 AP M2 US Government Arsenal
Total weight (g)	8.21	9.45	9.75	10.69
Core weight (g)	5.93	4.32	3.8	5.17
Core diameter (mm)	5.59	5.59	6.08	6.22
Core nose angle (deg)	58	flat - 2.27mm	45	54
Core hardness (Hv)	1450	750	870	785
Core material	Tungsten carbide	Steel	Steel	Steel
Complete projectiles and disassembled cores				

Πίνακας 2 : Συλλογή διατρητικών βλημάτων διαφορετικού διαμετρήματος [58].

Ο κυρίαρχος ρόλος της κεραμικής πλάκας (μετωπική πλάκα-faceplate) είναι να αμβλύνει το βλήμα ώστε το φορτίο της πρόσκρουσης να διαχυθεί στην ευρύτερη δυνατή περιοχή της (αλλοίωση της γεωμετρίας της κεφαλής). Παρόλο που το κεραμικό στρώμα θραύεται κατά την πρόσκρουση, η έκταση του σπασίματος/συντριβής, όσο αυτό μεγιστοποιείται, θα πρέπει να περιορίζεται. Η κεραμική πλάκα παρέχει ουσιαστικά ταχεία φθορά προς την «κατεύθυνση καταστροφής» του βλήματος.

Η σύνθετη πλάκα υποστήριξης (backing plate) θα παραμορφωθεί από το βλήμα (ιδανικά θα παραμείνει αναπόσπαστη) καθώς αυτό επιβραδύνεται. Εάν το βλήμα καταφέρει να διαπεράσει το κεραμικό στρώμα τότε θα πρέπει να επιβραδυνθεί σημαντικά και η σύνθετη οπισθόπλάκα θα «πιάσει» το βλήμα και κομμάτια του κεραμικού (εάν πρόκειται για διατρητικό βλήμα ατσάλινου πυρήνα) ή τα θραύσματα του βλήματος (εάν πρόκειται για μη διατρητικό βλήμα) έως το σημείο που οι εξωτερικές της στρώσεις (αυτές από τη μεριά του χρήστη) δεν υπερβαίνουν τις τάσεις εφελκυσμού τους (και επομένως δεν αστοχούν).

Οι πανοπλίες μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα επίπεδα απειλής. Τα επίπεδα απειλής καθορίζονται από ένα συνδυασμό μάζας, ταχύτητας και υλικού του βλήματος (είτε από μαλακά μέταλλα-μη διατρητικά βλήματα είτε με ατσάλινους πυρήνες-διατρητικά βλήματα). Είναι σημαντικό σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η απειλή είναι πυρά, από φορητά όπλα έως βαριά πολυβόλα, η θωράκιση να παρέχει την ικανότητα πολλαπλών χτυπημάτων αλλά και αντίσταση σε μία μόνο βολή. Το γεγονός αυτό εισάγει την ανάγκη περιορισμού της «ζημίας», που προκύπτει από κάθε βαλλιστική πρόσκρουση να περιορίζεται, εντός μίας ελάχιστης δυνατής περιοχής [3].

3.1.2 Η ανάγκη των σύνθετων υλικών στη θωράκιση.

Γίνεται αντιληπτό πως η χρήση σύνθετων υλικών κυρίως στην «σκληρή» θωράκιση υπαγορεύεται πλέον από τις απαιτήσεις όλο και μικρότερου βάρους, για την επίτευξη άμεσης μεταφοράς σε περιοχές συγκρούσεων και ευκινησίας στο πεδίο της μάχης (οχημάτων αλλά και ανθρώπων).



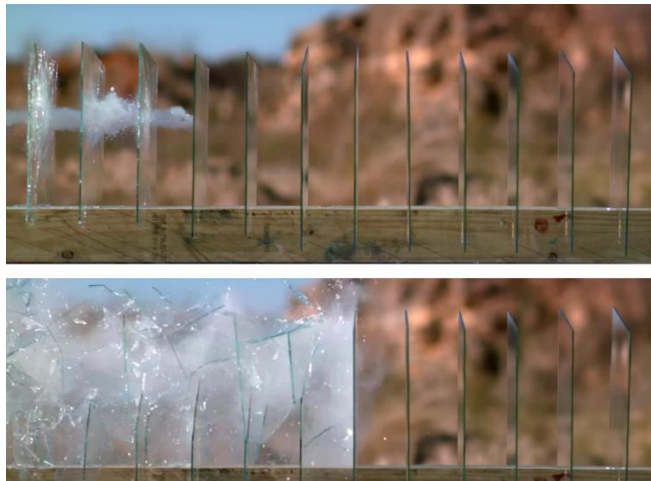
Εικόνα 31 : «Σκληρή» θωράκιση (hard armor-αριστερά) σε συνδυασμό με (ICW) «μαλακή» θωράκιση (μέση) και «σκληρή» θωράκισης (δεξιά) με διαστρωμάτωση κεραμικής πλάκας(facerplate), κυψελοειδούς πυρήνα, μεταλλικής πλάκας (rear/backing plate) σε διάταξη sandwich [57, 60].

Τα σύνθετα υλικά έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα του σημαντικά μικρότερου βάρους σε σχέση με τα μέταλλα. Στην περίπτωση που το πεδίο της σύγκρουσης είναι σε σχετικά κοντινή απόσταση, ένα στρατιωτικό όχημα μπορεί να μεταβεί εκεί αυτοκινούμενο, οπότε δεν είναι ζωτικής σημασίας το ελάχιστο δυνατό βάρος του, ωστόσο όταν οι μάχες λαμβάνουν χώρα σε απομακρυσμένες περιοχές και απαιτείται η μεταφορά των οχημάτων με πλοία ή αεροπλάνα είναι επιτακτική η επίτευξη όσο το δυνατόν ελαφρύτερου εξοπλισμού (θωράκισης) [3].

Η ευκινησία ανθρώπων και οχημάτων στο πεδίο της μάχης είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την επιβίωση τους, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από τα οχήματα για την αποφυγή ανίχνευσης από τον εχθρό. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, τα σύνθετα υλικά με βαλλιστικές εφαρμογές προσφέρουν μείωση του βάρους του οχήματος και του προστατευτικού εξοπλισμού του φορέα (κράνος, γιλέκο), χωρίς όμως να γίνεται έκπτωση της αντοχής τους σε εχθρικά πυρά.

3.1.3 (Αντι)βαλλιστική συμπεριφορά σύνθετων υλικών.

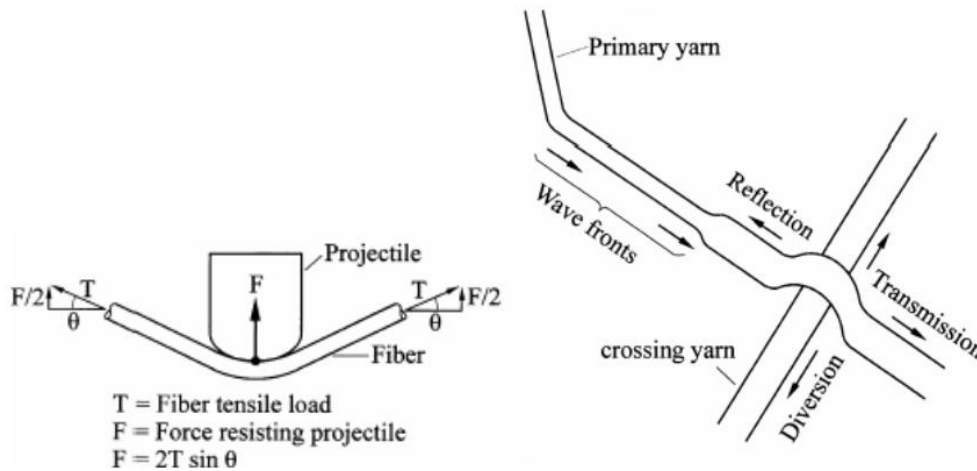
Η σκληρότητα ενός υλικού και η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχθεί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ικανότητά του για «επιτυχή» σύγκρουση με ένα βλήμα. Από τη μία, η υψηλή τιμή σκληρότητας οδηγεί στην άμβλυση του βλήματος, καθιστώντας το λιγότερο επιβλαβές και από την άλλη, η ικανότητα του υλικού να απορροφά σημαντική ποσότητα (κινητικής) ενέργειας, μέσω παραμόρφωσης του, οδηγεί στην επιτυχή επιβράδυνση του βλήματος. Η **παραμόρφωση** αυτή εκφράζεται ως **πλαστική παραμόρφωση στα μέταλλα** και ως **θραύση στα κεραμικά και τα σύνθετα υλικά**.



Εικόνα 32 : Διαδοχικές θραύσεις (απλών) υαλοπινάκων μέσω βλήματος (σταδιακή απώλεια ενέργειας του βλήματος, μέσω της θραύσης τους) [62].

Η (αντι)βαλλιστική ικανότητα των σύνθετων υλικών βασίζεται κυρίως στις διαδοχικές μικροθραύσεις (microfractures) που λαμβάνουν χώρα κατά την πρόσκρουση και διείσδυση του βλήματος στο υλικό. Οι μικροθραύσεις αυτές αφορούν τις ίνες και έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια της κινητικής ενέργειας του βλήματος. Η τελική απορρόφηση ενέργειας, και άρα η αποτελεσματικότητα της ύπαρξης της σύνθετης πλάκας στη θωράκιση, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μέγιστη καταπόνηση, έως θραύσεως, που μπορούν να υποβληθούν οι ίνες του συνθέτου.

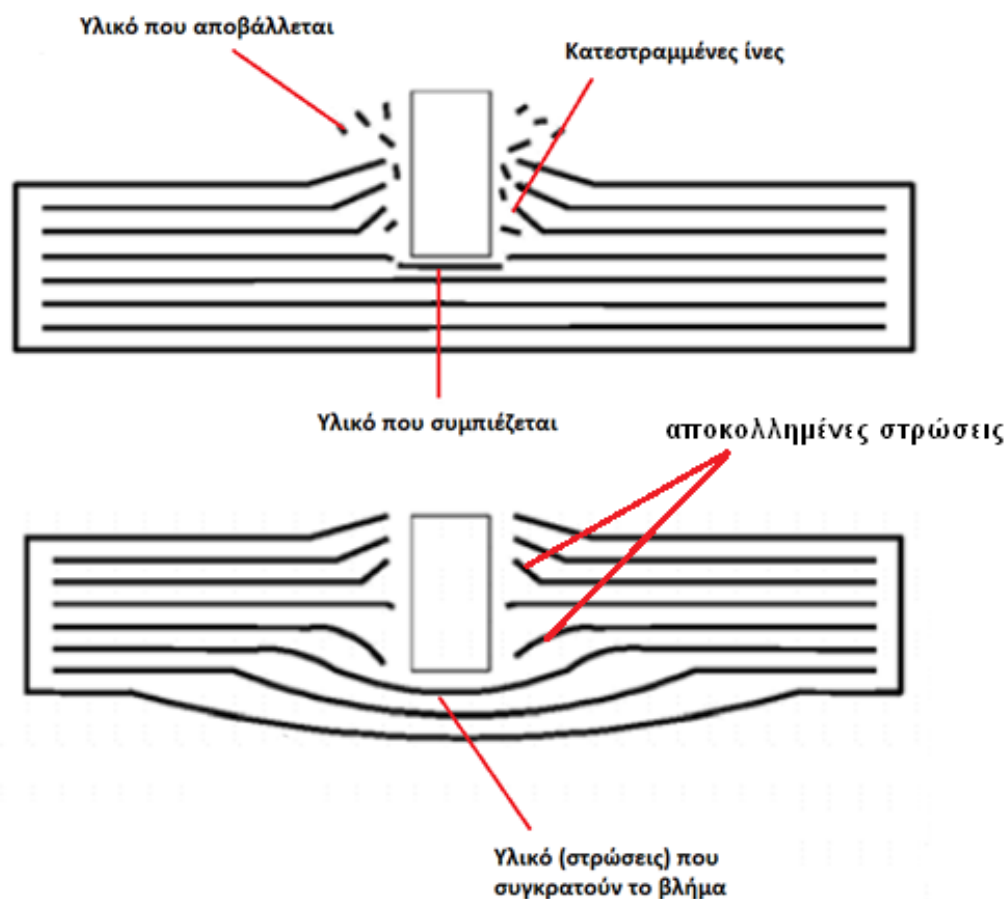
Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστικές ίνες υψηλής αντοχής και μεγάλης επιμήκυνσης (έως αστοχίας) αναμένεται να απορροφήσουν ενέργεια μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού των ινών. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι αρκετά αποτελεσματικός σε σύνθετα μη προ-εμποτισμένων (un-impregnated) ινών, ξηρής κατάστασης (dry fibers), σε μορφή πλέξης (σύνθετα πλεκτών ινών-textile composites). Ωστόσο η παραμορφωτική ικανότητα των ινών αυτών ινών σημαντικά και η απορρόφηση ενέργειας είναι συχνά απογοητευτική.



Εικόνα 33 : Συνθήκες φόρτισης των ινών σε ορθγωνικά-πλεκτό σύνθετο κατά τη διείσδυση του βλήματος [3].

Στα σύνθετα υλικά όπου οι ίνες (δεύτερη φάση) είναι «δεσμευμένες» με την μήτρα, έχει δηλαδή προηγηθεί προδιαπότιση των ινών με το υλικό της μήτρας (pre-impregnated fibers), η εξέλιξη του δυναμικού φαινομένου μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε δύο φάσεις και επομένως «καθυστερείται».

Στην **πρώτη φάση (φάση εισόδου- αστοχία του συνθέτου)** το βλήμα (ή θραύσματά του) λόγω της υψηλής του ταχύτητας (και άρα υψηλής κινητικής του ενέργειας) καταφέρνει να διεισδύσει στο υλικό και να καταστρέψει τις ίνες των πρώτων στρώσεων συνδυάζοντας θλίψη και διατμητική αστοχία. Η διαδικασία αυτή του αφαιρεί, ωστόσο, κινητική ενέργεια έτσι κατά την **δεύτερη φάση (φάση παραμόρφωσης-ακινητοποίησης του βλήματος)** δεν δύναται παρά μόνο να παραμορφώσει την σύνθετη πλάκα κάμπτοντας-συμπιέζοντας-επιμηκύνοντας τις υπολειπόμενες ίνες/στρώσεις, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μερική αποκόλληση των στρώσεων (delamination) (βλ. **Εικόνα 32**).



Εικόνα 34 : Οι δύο φάσεις μιας βαλλιστικής κρούσης σε σύνθετη πλάκα : Φάση εισόδου-αστοχία της θωράκισης (επάνω) και φάση παραμόρφωσης του συνθέτου-ακινητοποίησης του βλήματος (κάτω).

Από τα παραπάνω εύκολα συμπεραίνεται ότι τόσο η αντοχή των ινών όσο και οι μεγάλες τριβές μεταξύ ινών και μήτρας διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά ενός συνθέτου υλικού. Γι' αυτό και στην παρούσα εργασία μας απασχολούν σύνθετα **προδιαποτισμένων ινών με μήτρα**, των οποίων η αντοχή είναι σαφώς μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο κατασκευαστικό συνδυασμό ινών-μήτρας.

3.1.4 Αλεξισφαιρη θωράκιση σύμφωνα με το Ινστιτούτο Δικαιοσύνης των Η.Π.Α.

Σύμφωνα με το **NIJ Standard-0101.06**, ισχύον πρότυπο του Ινστιτούτου Δικαιοσύνης (National Institute of Justice) των Η.Π.Α., υπάρχει συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση προβλεπόμενων απειλών για το εκάστοτε επίπεδο προστασίας, μιλώντας κυρίως για «σκληρή θωράκιση» ή αλλιώς για οπλισμούς SAPI (επίπεδα III, IV και Special του Πίνακα 3) [66].

Στον **Πίνακα 3** που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι κατευθυντήριες γραμμές του παραπάνω προτύπου όσον αφορά τον συνδυασμό των επιπέδων της σκληρής θωράκισης, των διαμετρημάτων των βλημάτων και του αριθμού βολών, ανά πλήθος δοκιμών.

Πίνακας 3 : NIJ Standard-0101.06 P-BFS performance test summary.

Armor Type	TEST VARIABLES					PERFORMANCE REQUIREMENTS			SHOT REQUIREMENTS				Total Shots Required	
	Test Round	Test Bullet	Bullet Mass	Conditioned Armor Test Velocity*	New Armor Test Velocity*	Hits Per Panel at 0° Angle	Maximum BFS Depth	Hits Per Panel at 30° or 45° Angle [†]	Shots Per Panel	Panel Size	Panel Condition	Panels Required		Shots Required
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	355 m/s (1165 ft/s)	373 m/s (1225 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.40 S&W FMJ	11.7 g (180 gr)	325 m/s (1065 ft/s)	352 m/s (1155 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	379 m/s (1245 ft/s)	398 m/s (1305 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.357 Magnum JSP	10.2 g (158 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8.1 g (125 gr)	430 m/s (1410 ft/s)	448 m/s (1470 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.44 Magnum SJHP	15.6 g (240 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g (147 gr)	847 m/s (2780 ft/s)	-	6	44 mm (1.73 in)	0	6	All	Conditioned	4	24	24
IV	1	.30 Caliber M2 AP	10.8 g (166 gr)	878 m/s (2880 ft/s)	-	1 to 6	44 mm (1.73 in)	0	1 to 6	All	Conditioned	4 to 24	24	24
Special	-	Each test threat to be specified by armor manufacturer or procuring organization.				Armor performance and shot requirements shall depend on armor type.								

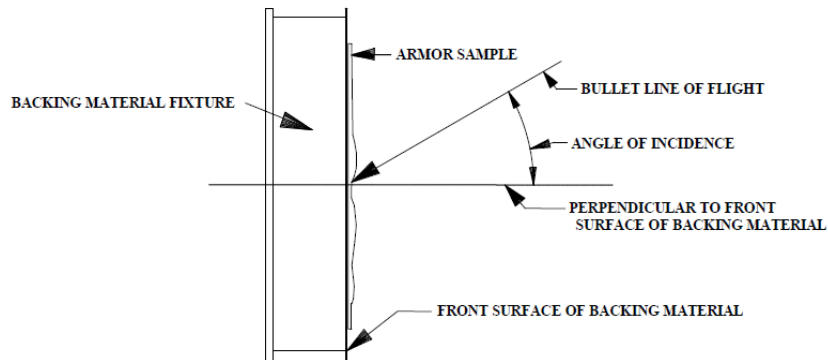
*Target measurement velocity. Fair hit measurement velocities must be within ± 9.1 m/s (± 30 ft/s) of this value, as defined in Section 7.6.

[†]Each armor that is to be shot at angles other than 0° shall be shot once at a 30° angle and once at a 45° angle.

Panel = Front or back component of typical armor sample.

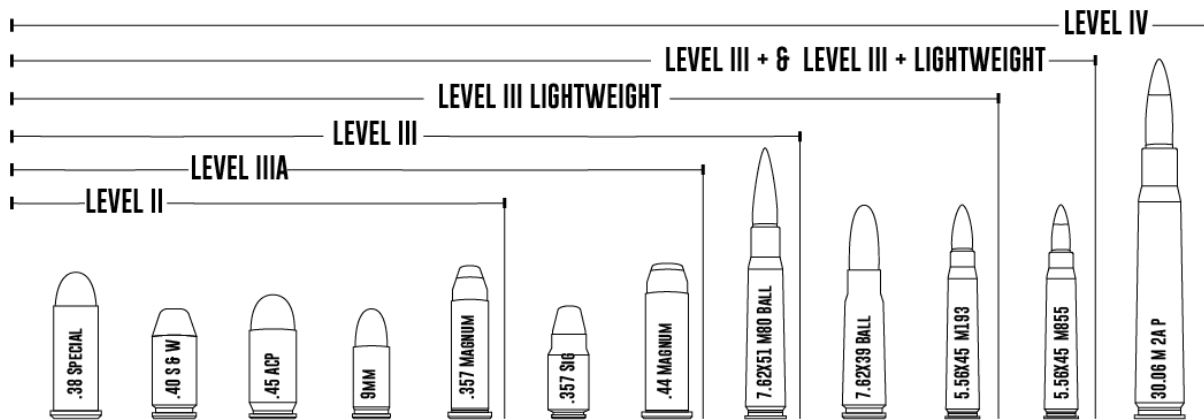
Sample = Full armor garment, including all component panels (F & B).

Threat = Test ammunition round by caliber.



Εικόνα 35 : Γωνία προσβολής κατά NIJ Standard-0101.06.

Μια γενική αντιστοίχιση βλημάτων διαφόρων διαμετρημάτων και των επιπέδων θωράκισης του Πίνακα 3 γίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 36.



Εικόνα 36 : Αντιστοιχία επιπέδων θωράκισης κατά NIJ 0101.06 και χαρακτηριστικών τους βλημάτων [70].

Η προκείμενη εργασία επικεντρώνεται γύρω από την μελέτη σύνθετων υβριδικών θωρακίσεων επιπέδου/τύπου III+++ (Special Threat) Stand Alone (SA). Στόχος δεν είναι τόσο η ελαχιστοποίηση του πάχους και του βάρους των θωρακίσεων, όσο ο ιδανικός συνδυασμός των συστατικών τους υλικών.


Ακολουθούν κάποιοι βασικοί ορισμοί, βάσει του παραπάνω προτύπου, ώστε να γίνουν περαιτέρω αντιληπτά τα επίπεδα θωράκισης :

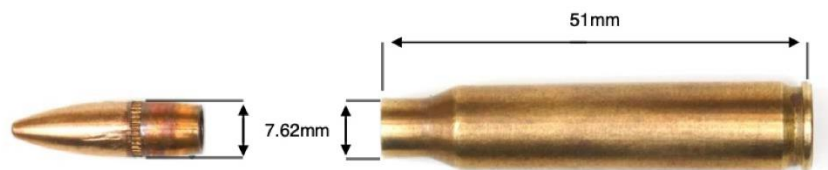
- Οι αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III είναι αυτές που βρίσκονται σε θέση να δεχτούν έξι βολές, εντός των αποδεχτών ορίων (αντι)βαλλιστικής αντοχής, από βλήματα, για παράδειγμα, τύπου 7.62x51 M80 Full Metal Jacketed (FMJ) και ταχύτητας 847 m/s \pm 9.1 m/s (βλ. Πίνακα 4).

- **Stand-Alone (SA)** είναι οι αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III ή IV οι οποίες δοκιμάζονται βαλλιστικά αυτούσιες.
- **In conjunction with (ICW)** είναι οι αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III ή IV οι οποίες δοκιμάζονται βαλλιστικά, συνδυαζόμενες με δεδομένου επιπέδου (I, IIA, II, IIIA) «μαλακό» αλεξίσφαιρο («μαλακής» θωράκισης).
- **Πλάκες επιπέδου III +++** είναι οι αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III (είτε SA είτε ICW) οι οποίες έχουν λάβει πιστοποίηση (αντι)βαλλιστικής αντοχής και για επιπρόσθετες απειλές (Special Threat) σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή. Μια πλάκα **επιπέδου III +++** είναι σε θέση να αντιμετωπίσει :
 - 6 βολές (όπως προσδιορίζονται και στον **Πίνακα 3**) από τον εκάστοτε ίδιο τύπο βλήματος που αναγράφονται στον **Πίνακα 4**.
 - 6 συνδυαστικές βολές (2 βολές από τον εκάστοτε τύπο βλήματος) όπως αναγράφονται στον **Πίνακα 4** (κάθε διαφορετικός τύπος βλήματος στον οποίο μπορεί να ανταπεξέλθει η σύνθετη υβριδική αλεξίσφαιρη θωράκιση προσθέτει ένα + στο εκάστοτε επίπεδο προστασίας της).

Πίνακας 4 : Χαρακτηριστικά απειλητικών βλημάτων για αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III +++ [67].

Μάζα/Είδος βλήματος	Ταχύτητα εξόδου (από το εκάστοτε τουφέκι)	Ενέργεια εξόδου [J]	Διαστάσεις Βλήματος (mm)	Βλήμα	Ενδεικτικός τύπος τουφεκιού
9.6 g (147 gr)/ M80 FMJ (Full Metal Jacket) μη διατρητικό (LPS)	847 m/s (2,780 ft/s)	3,470 J (2,559 ft·lbf)	7.62x51 (NATO)		G-3
7.9 g (121.9 gr)/ MSC (Mild Steel Core) διατρητικό (APM2)	718 m/s (2,356 ft/s)	2,036 J (1,502 ft·lbf)	7.62x39		AK-47

4 g (62 gr)/SS109 FMJBT (Full Metal Jacket Boat Tail) μη διατρητικό (LPS)	948 m/s (3,110 ft/s)	1,797 J (1,325 ft·lbf)	5.56x45		M-16
---------------------------------------------------------------------------	-------------------------	---------------------------	---------	-------------------------------------------------------------------------------------	------



Εικόνα 37 : Παράδειγμα βασικής διαστασιολόγησης βλήματος.

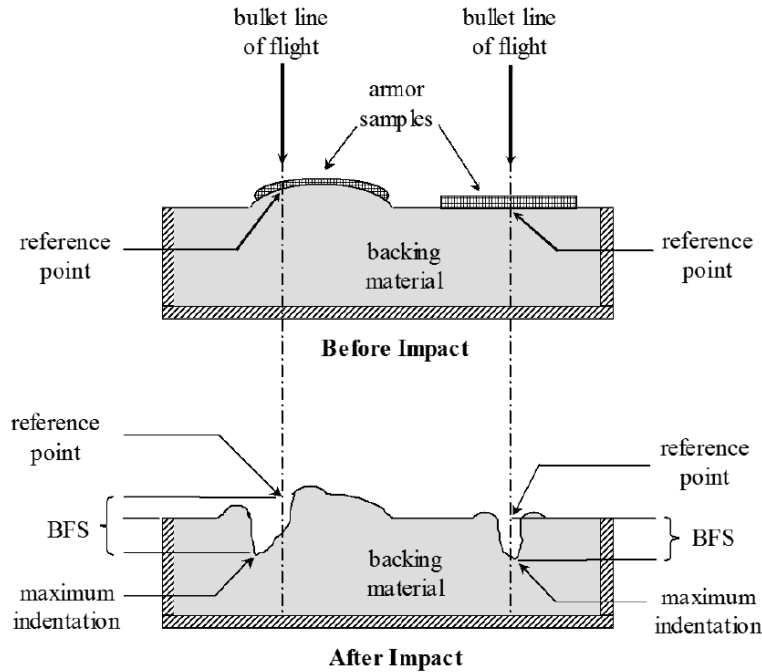
Όπως ήδη αναλύσαμε στην §3.1.1 η κατασκευή μίας σκληρής θωράκισης και συγκεκριμένα αλεξίσφαιρων επιπέδου III+++ (**Special Threat**) **Stand Alone (SA)** απαιτεί την συσσωμάτωση/συγκόλληση :

- Μιας αντιθραυσματικής επίστρωσης (spall liner).
- Ενός κεραμικού ενθέματος.
- Μιας σύνθετης πλάκας θερμοσυμπιεσμένων επάλληλων φύλλων με προεμποτισμένες ίνες UHMWPE (Ultra High Density Polyethylene).
- Κάποιου βαλλιστικού αφρού.

Γενική επιδίωξη της παρούσας εργασίας είναι η αναγνώριση των εξειδικευμένων λειτουργιών που επιτελεί κάθε από τα παραπάνω «συστατικά», η εύρεση μεθόδων βελτιστοποίησης της κατασκευής/χρήσης του, ο έλεγχος της απόδοσής τους μεμονωμένα αλλά και στην τελική σύνθεση της (αντι)βαλλιστικής διάταξης.

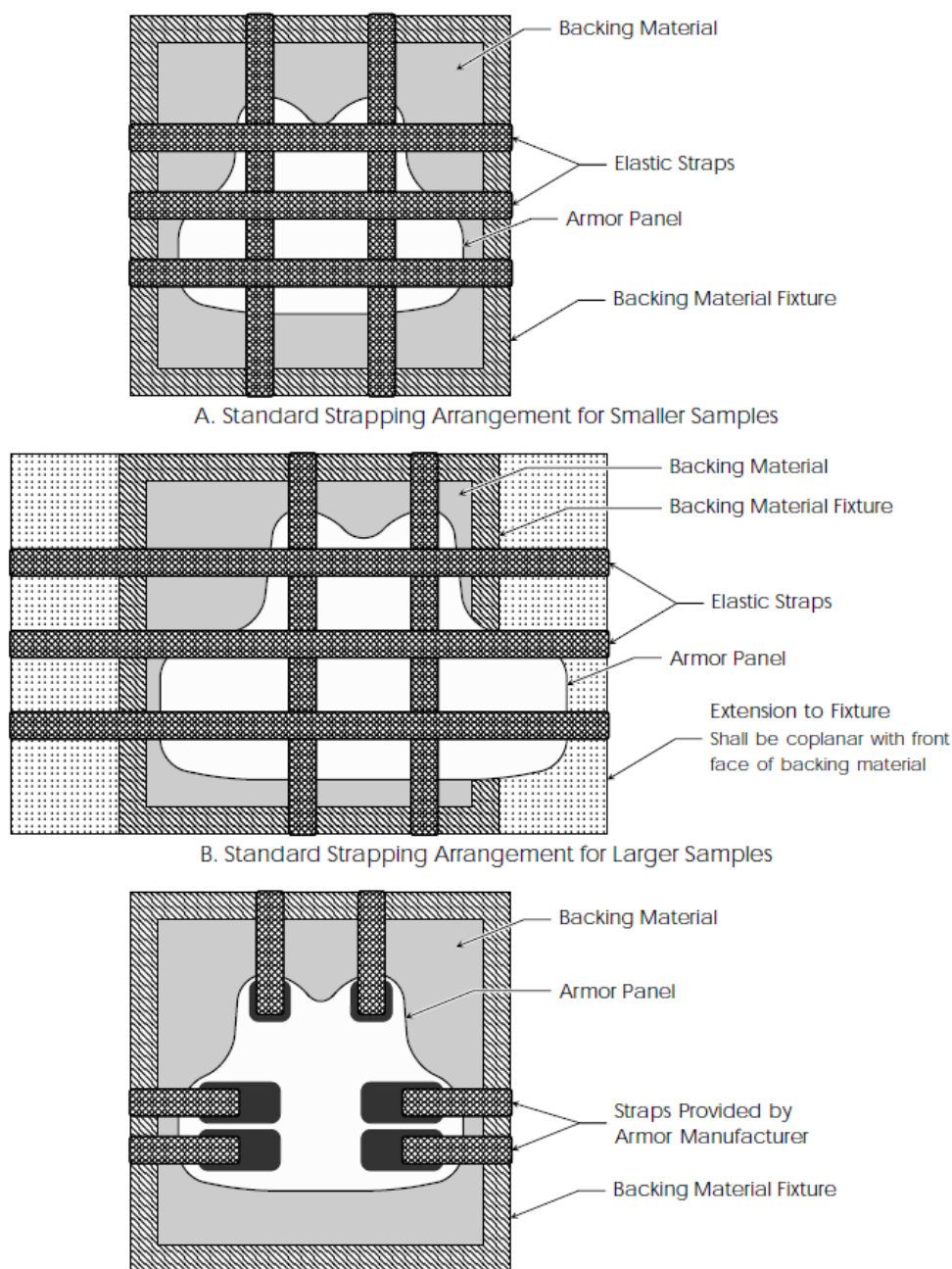
3.1.5 Αποδοτικότητα της αλεξίσφαιρης θωράκισης (BFS – Back Face Signature).

Η συνολική «αποτελεσματικότητα» μίας υβριδικής αλεξίσφαιρης διάταξης εξαρτάται από τον τελικό βαλλιστικό της έλεγχο. Ο έλεγχος αυτός των (αντι)βαλλιστικών διατάξεων επιτελείται, μέσω της πρόσδεσής τους επί πηλού/πλαστελίνης (π.χ Roma Plastilina ballistic clay) καθώς μετράται το **τελικό αποτύπωμα BFS (P-BFS – Perforation and Backface Signature Test)** [66].



Εικόνα 38 : Τρόπος μέτρησης αποτυπωμάτων BFS κατά NIJ Standard-0101.06.

Οι αποδεκτοί τρόποι πρόσδεσης των γιλέκων προς δοκιμή στο εκάστοτε εργαστήριο φαίνονται στην ακόλουθη **Εικόνα 39**.

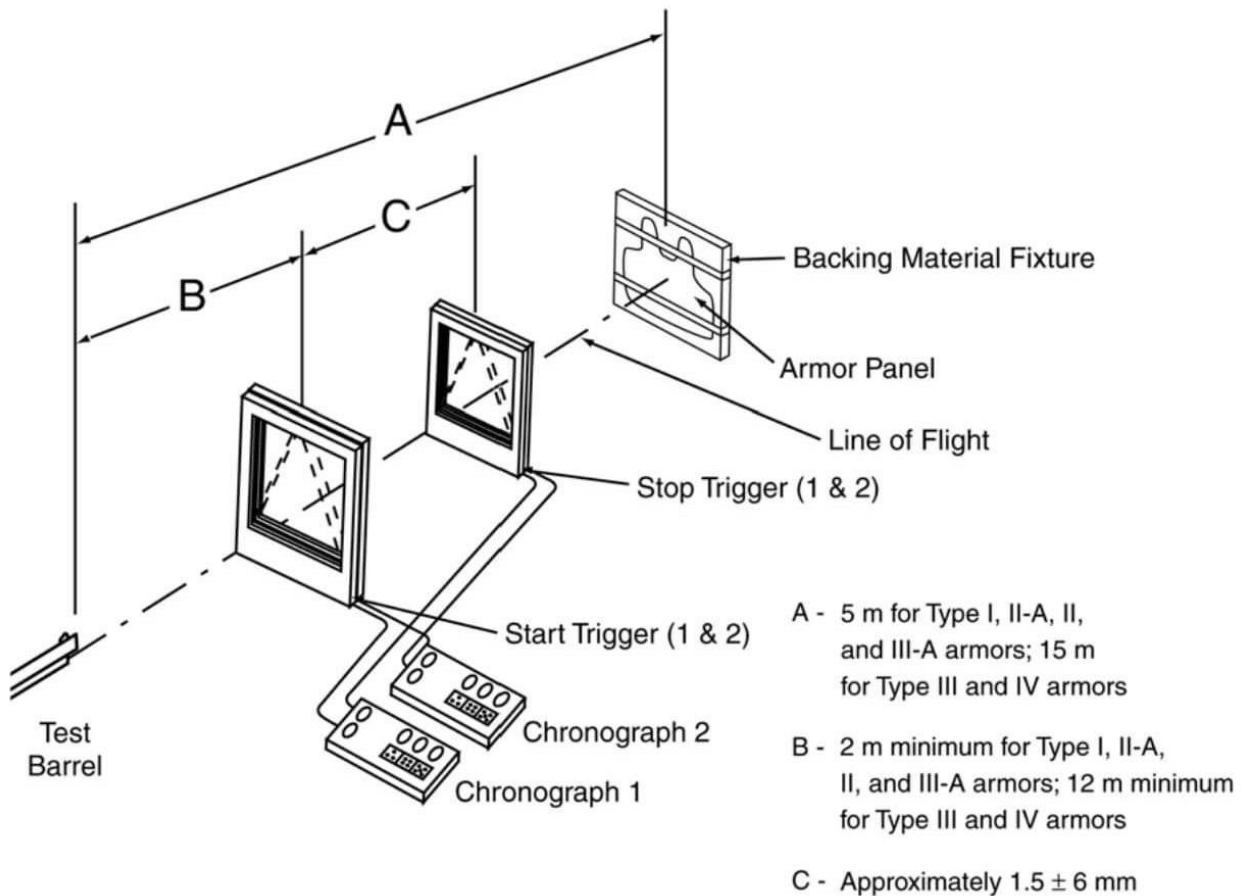


Εικόνα 39 : Αποδεκτοί τρόποι πρόσδεσης βαλλιστικών δοκιμών κατά NIJ Standard-0101.06.

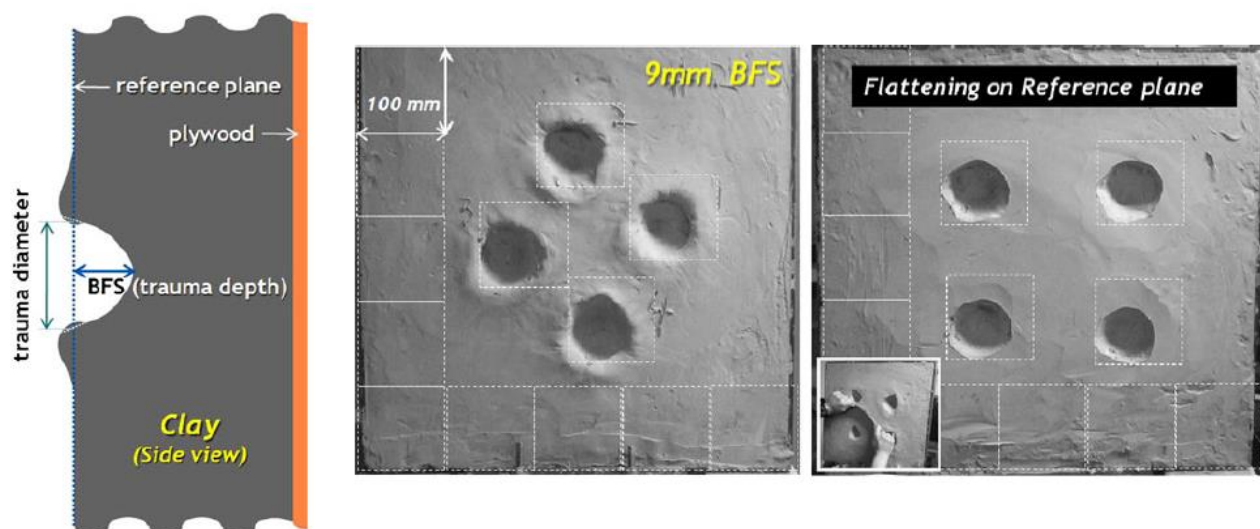
Όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 3** ο ονομαστικός αριθμός των βολών κατά NIJ 0101.06 είναι 6 ενώ η απόσταση βολής για θωράκιση **επιπέδου III +++ (SA)** είναι τα 15 m (βλ. **Εικόνα 40**). Μετά από κάθε βολή, η κρουστική καταπόνηση που μεταφέρεται από το δοκίμιο/θωράκιση στον «χρήστη», μετράται με τη σχετική παραμόρφωση της πλαστελίνης. Το **BFS** μετράται ως το αποτύπωμα της **μέγιστης απόκλισης του πίσω**

προσώπου της θωράκισης από το αρχικό της επίπεδο δηλαδή του **BFD (Back Face Deformation)**. Το BFS **δεν πρέπει να υπερβαίνει σε βάθος τα 44 mm (1.73 in)** ώστε να θεωρηθεί επιτυχής ο έλεγχος του αλεξίσφαιρου γιλέκου και να κατασταθούν βιώσιμοι οι τραυματισμοί των χρηστών [66].

Στην πραγματικότητα το BFD προξενεί τραυματισμούς, ανεξαρτήτως του τελικού του βάθους, όπως είναι οι μώλωπες ακόμα και σπασίματα στον χρήστη. Είναι λοιπόν υψίστης σημασίας το τελικό βάθος να υπακούει στο επιτρεπτό μέγιστο βάθος των 44 mm.

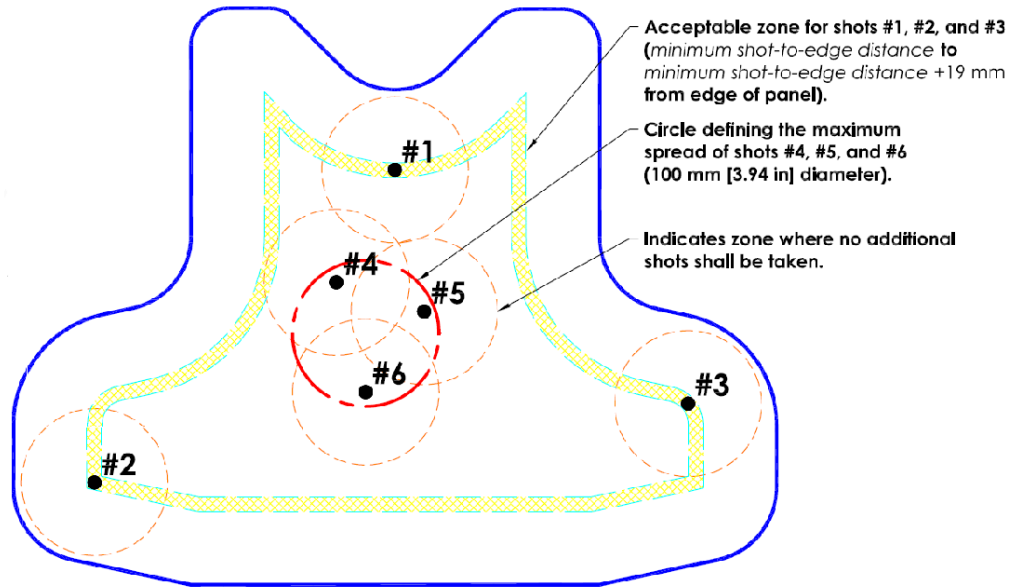


Εικόνα 40 : Τυπική διάταξη βαλλιστικών δοκιμών κατά το πρότυπο NIJ Standard-0101.04 [75].



Εικόνα 41 : Σχηματική απεικόνιση πλάγιας όψης της τελικής εσοχής στον πηλό (αριστερά), παράδειγμα αποτυπώματος πραγματικής εσοχής κατόπιν βολής με βλήμα διαμετρήματος 9 mm (κέντρο) και εξομάλυνση της επιφάνειας του πηλού για μέτρηση του πραγματικού βάθους BFS [74] (δεξιά) .

Οι θέσεις βολής (και επομένως η διαδοχή των βολών) επί του υβριδικού συνθέτου/θωράκισης δεν τοποθετούνται με συγκεκριμένο μοτίβο αρίθμησης αλλά ακολουθούν δύο γενικότερους κανόνες (shot-to-edge and shot-to-shot spacing requirements). Πρώτον η κυκλική ζώνη επιρροής (δηλαδή η απόσταση προς όλες τις κατευθύνσεις) μεταξύ δύο διαδοχικών βολών δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 76 mm (3.0 in) και δεύτερον η απόσταση κάθε βολής από την ακμή της οριοθέτησης του γιλέκου να μην είναι μικρότερη από 19 mm. Οι δύο κανόνες οπτικοποιούνται στην ακόλουθη **Εικόνα 42**.



Εικόνα 42 : Κανόνες αρίθμησης της τοποθεσίας διαδοχικών βολών κατά NIJ Standard-0101.06.

Όπως θα δούμε και στη συνέχεια ο εναλλασσόμενος τρόπος/σειρά αρίθμησης των σημείων βολής 1-6 σχετίζεται με την σταδιακή υποβάθμιση της θωράκισης καθώς το φαινόμενο της αποκόλλησης (delamination) των στρώσεων του συνθέτου UHMWPE εξελίσσεται και διαμοιράζεται, ανά τις περιβάλλουσες περιοχές των βολών, με διαφορετικό τρόπο για κάθε μοτίβο. Αυτό συμβαίνει γιατί το γιλέκο σταδιακά αποκτά «μνήμη» από τις προηγούμενες βολές (γεινίαση).

Η διάταξη των θέσεων των βολών επηρεάζει λοιπόν την μεταφορά του φαινομένου αποκόλλησης και άρα πανομοιότυπα δείγματα με διαφορετική αρίθμηση θέσεων βολών δεν είναι εντελώς συγκρίσιμα.

3.2 Κεραμικά ενθέματα/πάνελ

Όπως ήδη αναφέραμε και στην §3.1.1, το κεραμικό είναι το πρώτο συμπαγές υλικό (πέραν της εύκαμπτης αντιθραυσματικής επίστρωσης) της διαστρωματωμένης θωράκισης που θραύεται κατά την κρούση από κάποιο βλήμα. Το κεραμικό αλλοιώνει την γεωμετρία της κεφαλής του βλήματος και στην συνέχεια διαπερνάται πλήρως από αυτό.

Τα κυρίαρχα κεραμικά που χρησιμοποιούνται στις βαλλιστικές εφαρμογές σύνθετων πλακών τύπου III+ SA είναι τα τρία σκληρότερα υλικά μετά το διαμάντι, συγκεκριμένα :

- το καρβίδιο του βορίου (Boron Carbide)
- το καρβίδιο του πυριτίου (Silicon Carbide) και
- το οξείδιο του αργιλίου (Alumina/Aluminium Oxide)

Τα τυπικά πάχη τους σε μία διάταξη ατομικής προστασίας εκτείνονται από 4 έως 10 mm ανάλογα με το είδος της προς αντιμετώπιση απειλής (διαμέτρημα) και την ποιότητα του κεραμικού.

Στους ακόλουθους πίνακες συγκεντρώνονται οι βασικές ιδιότητες των παραπάνω κεραμικών [69].

Πίνακας 5 : Ιδιότητες του Boron Carbide.

Parameter	Unit	Hot pressed	Reaction bonded
Density	kg/m ³	2450–2520	2480–2540
Flexural strength	GPa	0.200–0.500	0.235–0.321
Elastic modulus	GPa	440–460	330–420
Hardness	GPa	29–35	13.4–18
Stress intensity factor K_{IC}	MPa \sqrt{m}	2–4.7	4.1–4.4

Πίνακας 6 : Ιδιότητες του Silicon Carbide υπό διαφορετικές κατασκευαστικές μεθόδους.

Parameter	Unit	Pressure-less sintered	Hot pressed	Reaction bonded
Density	kg/m ³	3100–3200	3250–3280	3020
Flexural strength	GPa	0.300–0.340	0.500–0.730	0.260
Elastic modulus	GPa	400–420	440–450	359
Hardness	GPa	22–23	20	17.23
Stress intensity factor K_{IC}	MPa \sqrt{m}	3–4	5–5.5	4

Πίνακας 7 : Ιδιότητες του Aluminium Oxide σε περιεκτικότητες 99.5%, 96% και 85%.

Parameter	Unit	99.50% Al ₂ O ₃	96% Al ₂ O ₃	94% Al ₂ O ₃	85% Al ₂ O ₃
Density	kg/m ³	3890	3720	3690	3420
Flexural strength	GPa	0.379	0.345	0.330	0.296
Elastic modulus	GPa	375	300	300	221
Shear modulus	GPa	152	124	124	91
Bulk modulus	GPa	228	172	165	131
Compressive strength	GPa	2.600	2.100	2.100	1.930
Hardness	GPa	14	11	11.75	9.60
Stress intensity factor K_{IC}	MPa√m	4	3.5	3.5	3–4

Στον ακόλουθο Πίνακα 8 παρατίθενται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονετήματα των τριών κεραμικών υλικών.

Πίνακας 8 : Σύγκριση βασικών κεραμικών υλικών πάνελ.

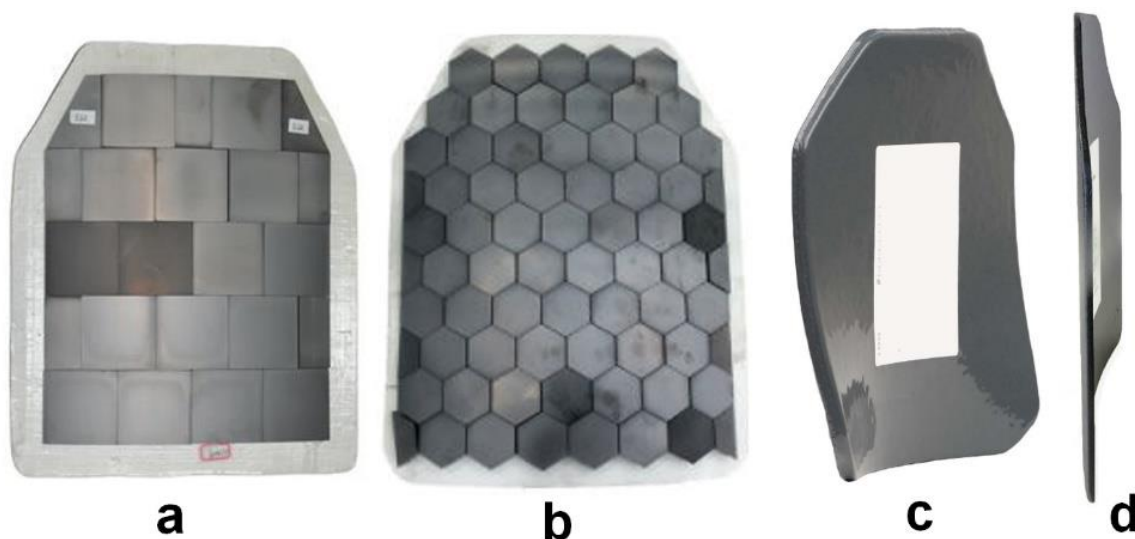
Κεραμικό	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Boron Carbide (B₄C)	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή ελαστικότητα Υψηλή σκληρότητα Υψηλό σημείο τήξης 	<ul style="list-style-type: none"> Οξειδωση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>500 οC)
Silicon Carbide (SiC)	<ul style="list-style-type: none"> Καλή απορροφητικότητα ενέργειας και θερμότητας. Αντοχή στην φθορά και την οξειδωση. Πολύ υψηλός λόγος αντοχής προς πυκνότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> Δυσκολία πυροσυσσωμάτωσης λόγω χημικής αδράνειας.
Alumina (Al₂O₃)	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό κόστος Εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες και απόδοση. Πλήθος μεθόδων παραγωγής (χύτευση με έγχυση ή με ολίσθηση, συμπίεση κ.α) 	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλή αντοχή σε κάμψη Χαμηλός συντελεστής κόπωσης (stress intensity factor)

Πυκνότητα	Μικροδομή	Σκληρότητα	Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)	Αντοχή σε θράυση	Καμπτική Αντοχή
Βάρος θωράκισης	Πορώδες και μέγεθος κόκκων	Τραυματισμός του βλήματος	Ένταση των ελαστικών κυμάτων (stress waves intensity)	Αντοχή στη διάδοση ρωγμών	Αντοχή σε πολλαπλές βολές

Εικόνα 43 : Ιδιότητες των κεραμικών και η βαρύτητα τους όσον αφορά τις βαλλιστικές εφαρμογές τους [69].

Οι βασικότερες δομές στις οποίες συναντώνται οι κεραμικές πλάκες είναι οι εξής :

- Σε τετράγωνες φολίδες σε καμπύλη η μη μορφή (flat/curved square foils).
- Σε εξαγωνικές φολίδες σε καμπύλη η μη μορφή (flat/curved hexagonal foils).
- Μονοκεραμική πολυκάμπυλη πλάκα (monoceramic multi-curved plate).
- Μονοκεραμική καμπύλη πλάκα (monoceramic sigle-curved plate).



Εικόνα 44 : Βασικές δομές κεραμικών ενθεμάτων : a. με τετράγωνες φολίδες, b. Με εξαγωνικές φολίδες, c. μονοκεραμική πολυκάμπυλη πλάκα, d. μονοκεραμική καμπύλη πλάκα [68].

Ακολουθεί μία γρήγορη επισκόπηση (βλ. **Πίνακα 9**) των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων όσον αφορά τις δύο βασικές δομές (πλάκα με φολίδες ή μονοκεραμική πλάκα) των κεραμικών ενθεμάτων :

Πίνακας 9 : Σύγκριση βασικών δομών κεραμικών ενθεμάτων.

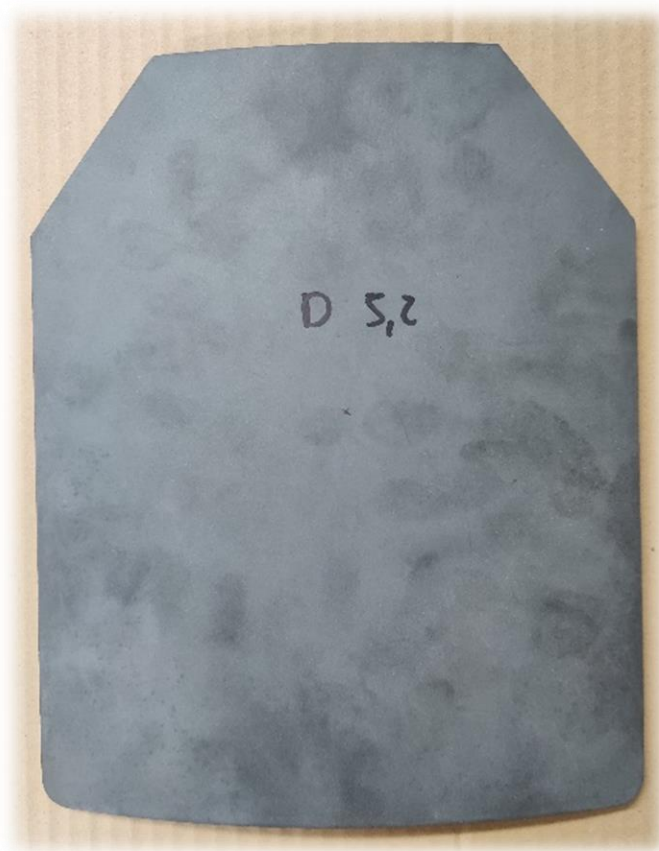
Δομή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Με φωλίδες	<ul style="list-style-type: none"> Συγκόληση επί της σύνθετης πλάκας UHMWPE χωρίς επαναθέρμανση του συσσωματώματος. Χαμηλό κόστος κατασκευής. 	<ul style="list-style-type: none"> Βαλλιστική ανισοτροπία λόγω παρουσίας αρμών. Μεγάλη γεωμετρική αναντιστοιχία μεταξύ κεραμικού και σύνθετης πλάκας UHMWPE. Αντοχή σε λίγες εξακολουθητικές βολές λόγω της μη συνέχειας του υλικού.
Μονοκεραμική πλάκα	<ul style="list-style-type: none"> Ομοιογενής συμπεριφορά και άρα υψηλή αντοχή κατά την πρόσκρουση των βολών. Άριστη συναρμογή κεραμικού-συνθέτου UHMWPE. 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις αντίστοιχες φωλίδες.

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα μονοκεραμικά, λόγω της συναρμογής, του κόστους, των ιδιοτήτων και της προσιτής παραγωγής τους χωρίς τη χρήση ακριβού εξοπλισμού (κλιβάνοι με ειδικά ελεγχόμενη ατμόσφαιρα κ.α), είναι αυτά από αλουμίνα (οξείδιο του αργιλίου) [83].

Για λόγους πληρότητας παρατίθενται οι ιδιότητες του θερμοδουμπιεσμένου (hot-pressed) **μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm**, των δοκιμών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 10 : Ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου κεραμικού ένθετου SiC πάχους 5.2 mm.

Παράμετρος-Μονάδα	Τιμή
SiC %	84-89
Silicon %	10-13
Πυκνότητα [kg/m ³]	3050-3100
Αντοχή σε κάμψη [Gra]	0.31-0.37
Σκληρότητα κατά Vickers HV0.5	2100-2400
Σκληρότητα [Gra]	20.6-23.5



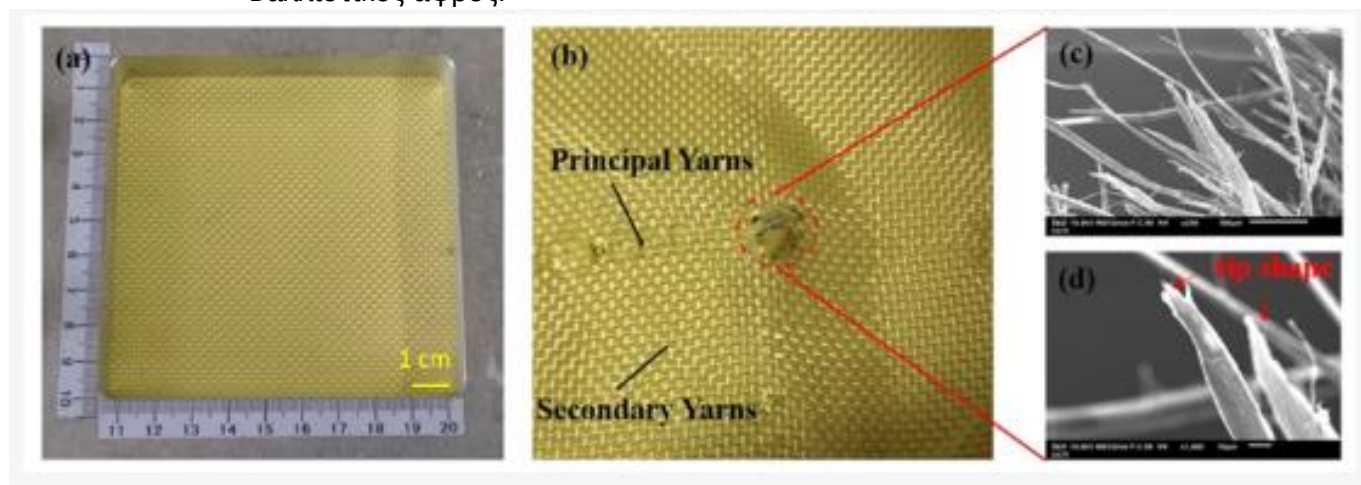
Εικόνα 45 : Μονοκεραμική πλάκα SiC πάχους 5.2 mm.

Η πρακτική εμπειρία μας δείχνει πως η μείωση, της τάξης των 0.5-1 mm, στο πάχος ενός μονοκεραμικού πάχους 5-7 mm, μερικές φορές χρήζει την προσθήκη ενίσχυσης αραμιδίου (aramid backing- π.χ από προεμποτισμένες ίνες Kevlar® σε εποξειδική μήτρα) μεταξύ του κεραμικού και του συνθέτου UHMWPE (βλ. **Εικόνα 46**). Εκτός από ενισχυτικό του συνόλου της θωράκισης το αραμίδιο αποτελεί και παράγοντα συγκράτησης των θραυσμάτων του κεραμικού που, σκεδαζόμενα, διεισδύουν στο σύνθετο πάνελ UHMWPE. Συμβάλει λοιπόν στην καλή συγκόλληση της ολισθηρής επιφάνειας του σύνθετου πάνελ UHMWPE με το κεραμικό, στη διατήρηση της «υγείας» του μονοκεραμικού κατά την πρόοδο των βολών αλλά και στο να χωριστεί η διεπιφάνεια κεραμικού-αραμιδίου και σύνθετου πάνελ χωρίς να δασκορπιστεί πλήρως το πρώτο.

Επομένως η διαστρωμάτωση θωρακίσεων επιπέδου **III+++ Stand Alone (SA)** της **§3.1.4** μπορεί να διαμορφωθεί και ως :

- Αντιθραυσματική επίστρωση (spall liner).
- Κεραμικό ένθετο.
- Υφασμα αραμιδίου.
- Σύνθετη πλάκας UHMWPE.

- Βαλλιστικός αφρός.



Εικόνα 46 : Υφασμάτινες ενισχύσεις Kevlar® (a) πριν την βαλλιστική δοκιμή (αριστερά), (b) κατόπιν βαλλιστικής δοκιμής, (c,d) ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) των ινών κατόπιν αστοχίας τους [85].

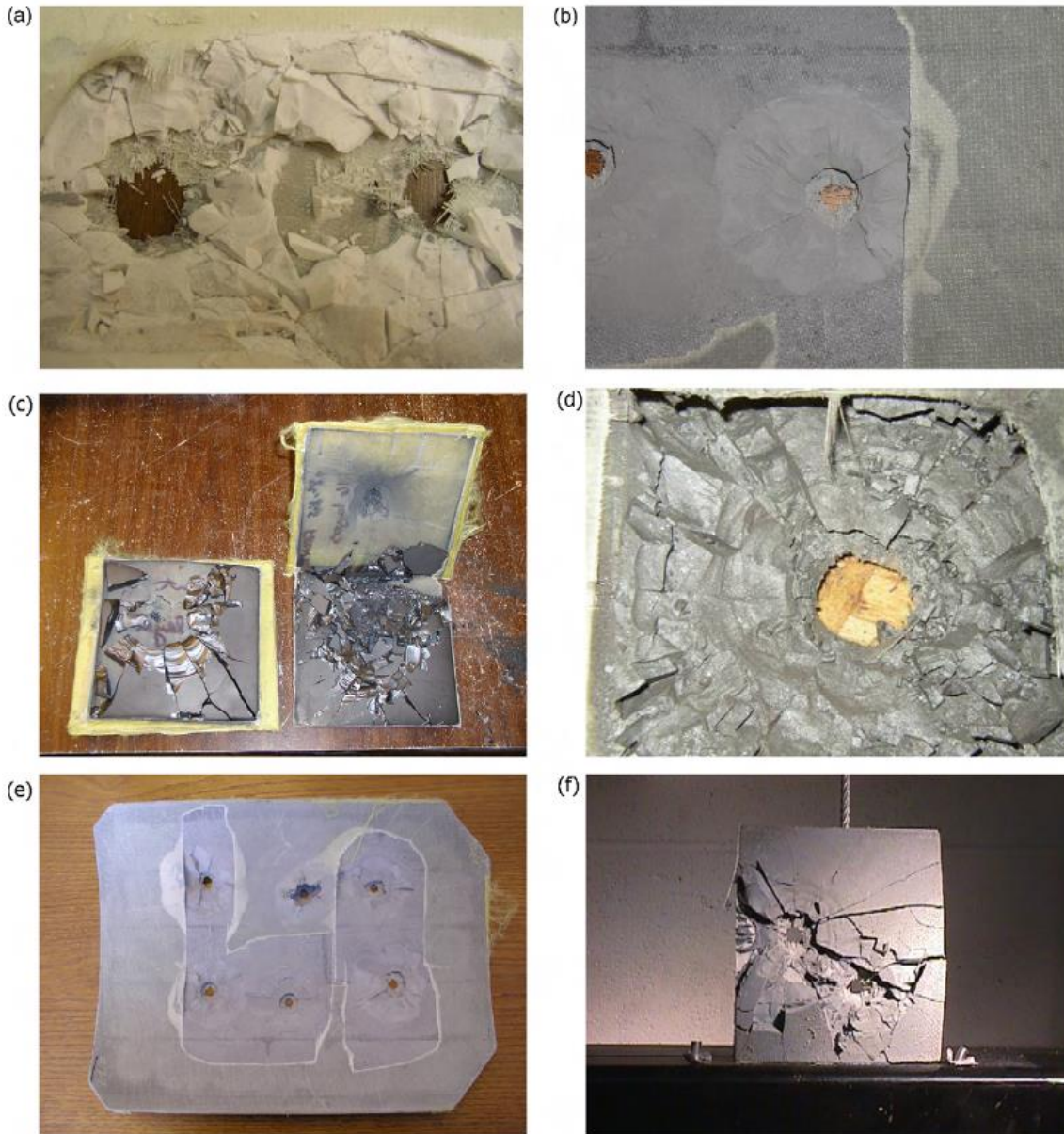
Έχει αποδειχθεί ότι, εκτός από συμπαγή ομοιογενή κεραμικά, κάποια προηγμένα ετερογενή υλικά με βελτιστοποιημένες συνθέσεις και δομές έχουν αξιοσημείωτες (αντι)βαλλιστικές επιδόσεις. Τέτοια υλικά είναι για παράδειγμα ένα σύστημα καρβιδίου του πυριτίου-αλουμίνας (AS ή $\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$) ή ένα σύστημα καρβιδίου του πυριτίου-νιτριδίων πυριτίου-αλουμίνας (ASN ή $\text{SiC}-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Al}_2\text{O}_3$) [84].

Συγκεκριμένα, μία από τις κατευθύνσεις τροποποίησης των κεραμικών αλουμίνας, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του, είναι η δημιουργία μιας δευτερογενούς κρυσταλλικής φάσης. Κεραμικά υλικά με δύο κρυσταλλικές φάσεις κατέχουν αυξημένη αντοχή θραύσης (fracture toughness) και άρα βελτιωμένη αντοχή στη συνολική τους φθορά. Εξίσου επιθυμητή είναι και η μείωση του βάρους των κεραμικών πράγμα που μπορεί να επιτευχθεί με την παρουσία κρυσταλλικών συστατικών, μικρότερου ειδικού βάρους, στην σύνθεση της αλουμίνας. Ένα τέτοιο υλικό αποτελεί και ο μουλίτης (moullite- $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) με ειδικό βάρος περί τα 3.2 g/cm^3 σε σύγκριση με τα 3.95 g/cm^3 της αλουμίνας.

Κεραμικά αλουμίνας-μουλίτη (π.χ συνθέσεις AM2 και AM5) με μικρή περιεκτικότητα υαλώδους φάσης πιθανότατα να έχουν μεγάλη προοπτική σε (αντι)βαλλιστικές εφαρμογές. Η παρουσία του μουλίτη σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 2% κατά βάρος στην αλουμίνα προσδίδει σημαντικές μηχανικές ιδιότητες στο κεραμικό. Συγκεκριμένα, κεραμικά αλουμίνας-μουλίτη με χαμηλή περιεκτικότητα αλουμίνας, της τάξης του 72-76% κατά βάρος, δύνανται να φτάσουν και τα **350 MPa** σε αντοχή κάμψης [83].

Συχνή είναι και η παρουσία της ζιρκονίας (ή κόκκων ζιργκόν) στα κεραμικά αλουμίνας-μουλίτη (π.χ συνθέσεις ZAS2, ZAS3 και ZAS4), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μεν την αύξηση της πυκνότητας (και άρα του τελικού βάρους) και δε την αύξηση θερμικής αντίστασης του

κεραμικού. Η ζirkονία (ZAS ceramics), εκτός από την αύξηση του βάρους, ελαττώνει και την αντίσταση σε φθορά του κεραμικού καθώς τείνει εμφανίζεται εντατικότερη διάδοση ρωγμών, κατόπιν θραύσης, από τα αντίστοιχα κεραμικά αλουμίνας-μουλίτη (AM ceramics).



Εικόνα 47 : Θραύση κεραμικών μετά από βαλλιστική κρούση. (α) κεραμικό αλουμίνας-μουλίτη (σύνθεσης AM2), βλήμα 7.62x63 mm (APM2) (αφαιρέθηκαν ορισμένα θραύσματα κεραμικού); (b) κεραμικό RBSC (Reaction-bonded silicon carbide), βλήμα 7.62x54R LPS; (c) συμπαγές κεραμικό SiC, βλήμα 7.62x51 mm FMJ (NATO). (d) βιομορφικό RBSC, βλήμα 7.62x63 mm (APM2); (e) κεραμικό ASN, βλήμα 7.62x51 mm

FMJ (NATO). (f) κεραμικό AS,2 βλήματα 7.62x51 mm FMJ (NATO) σε 1 πλακίδιο (διαστάσεων 110x110 mm) [82].

3.3 UHMWPE

3.3.1 Ιστορία, φυσικές ιδιότητες και εφαρμογές.

Το πολυαιθυλένιο εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE-Ultra High Molecular Weight Polyethylene) είναι ένας τύπος θερμοπλαστικού πολυαιθυλενίου. Είναι επίσης γνωστό και ως πολυαιθυλένιο υψηλής αντοχής (HMPE-High Modulus Polyethylene). Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι οι εξαιρετικά μακριές αλυσίδες, με μοριακή μάζα συνήθως μεταξύ 3.5 και 7.5 εκατομμυρίων amu (μονάδα μέτρησης μάζας, 1 amu = 1.661 x 10⁻²⁷ kg) [4]. Οι μακριές μοριακές αλυσίδες ευνοούν τη μεταφορά φορτίων σε μεγάλο μήκος (και όταν πρόκειται για σύνθετο υλικό σε μεγάλες επιφάνειες), διαμοιράζοντας έτσι ομοιόμορφα της τάσεις, με αποτέλεσμα την ιδιαίτερα αυξημένη μηχανική αντοχή, υψηλή σκληρότητα και υψηλότερη αντοχή σε κρούση από οποιοδήποτε θερμοπλαστικό που κατασκευάζεται σήμερα [5].

Το UHMWPE είναι άοσμο, άγευστο, μη τοξικό [6] και φέρει όλα τα χαρακτηριστικά του HDPE (High Density Polyethylene) (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας) με αυξημένη ανθεκτικότητα σε συμπυκνωμένα οξέα, αλκάλια, πολλούς οργανικούς διαλύτες και διαβρωτικά χημικά, εκτός από οξειδωτικά μέσα. Επίσης, απορροφά εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά υγρασίας και χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής (ακόμα χαμηλότερο και από αυτόν του πολυτετραφθοροαιθυλενίου, PTFE - Τεφλόν), με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στις εκδορές.

Το UHMWPE κυκλοφόρησε στο εμπόριο για πρώτη φορά περί το 1950 [4]. Σήμερα παράγωγα UHMWPE σε μορφή σκόνης, η οποία μπορεί να μορφοποιηθεί απευθείας προς τελικά προϊόντα, διατίθενται από διάφορες εταιρείες όπως οι Ticona, Braskem, DSM, Mitsui κ.α. Επεξεργασμένο UHMWPE διατίθεται είτε σε μορφή ινών είτε σε φύλλα ή ράβδους. Λόγω της αντοχής του στη φθορά και την πρόσκρουση, το UHMWPE έχει συνεχώς αυξανόμενες βιομηχανικές εφαρμογές σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η εμφιάλωση. Τέλος από την δεκαετία του 60' και ύστερα αποτελεί ένα από τα προτιμότερα υλικά για ολική αρθροπλαστική στην ορθοπεδική και στα σπονδυλικά εμφυτεύματα.

Ίνες UHMWPE, πάχους περί τα 18.22 ± 1.15 μm, που διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 με την επωνυμία Dyneema® Fiber από την Ολλανδική εταιρεία χημικών DSM και με την επωνυμία Spectra® Fiber από την Αμερικανική Honeywell χρησιμοποιούνται ευρέως στη βαλλιστική, σε αμυντικές εφαρμογές (αμυντικό εξοπλισμό), σε ιατρικές συσκευές, την ιστιοπλοΐα, σε εξοπλισμό πεζοπορίας-αναρρίχησης κ.α. Αυτό που κάνει τις ίνες UHMWPE να ξεχωρίζουν είναι οι σημαντικές μηχανικές ιδιότητές του που ενίοτε τις καθιστούν 15 φορές ισχυρότερες από το ατσάλι (ανθρακούχους χάλυβες) και 40% ισχυρότερες από τις ίνες αραμιδίου, για τα ίδια (κατ'όγκο) βάρη αντίστοιχα.

3.3.2 Δομή και μηχανικές ιδιότητες.

Το UHMWPE, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι ένας τύπος πολυολεφίνης και αποτελείται από εξαιρετικά μακριές μοριακές αλυσίδες πολυαιθυλενίου, οι οποίες έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Η ισχυρή δυναμική του UHMWPE αντλείται από το μήκος της κάθε μοριακής αλυσίδας.

Οι δυνάμεις Van der Waals μεταξύ των μοριακών αλυσίδων είναι ασθενείς για κάθε ζεύγος επικαλυπτόμενων ατόμων των συμμετεχόντων μορίων. Παρά το γεγονός ότι είναι οι πιο ασθενείς από τις χημικές δυνάμεις, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μακροσκοπικές ιδιότητες ενός υλικού, όταν ο αριθμός των αλυσίδων είναι μεγάλος καθώς και οι επικαλύψεις θα είναι περισσότερες. Στο UHMWPE οι δυνάμεις αυτές, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι μοριακές αλυσίδες είναι πολύ μεγάλες, οδηγούν αθροιστικά στην ανάπτυξη ισχυρών διαμοριακών (συνισταμένων) δυνάμεων. Έτσι, κάθε αλυσίδα (μόριο) έλκει και έλκεται από τις υπόλοιπες με τόσο πολλές δυνάμεις van der Waals, έτσι η συνολική διαμοριακή αντοχή είναι υψηλή. Σε αντίθεση, για παράδειγμα, το Kevlar® οφείλει την αντοχή του σε ισχυρούς δεσμούς μεταξύ σχετικά βραχέων μορίων [76].

Στις ίνες UHMWPE οι πολυμερικές αλυσίδες μπορούν να αποκτήσουν παράλληλο (αξονικό) προσανατολισμό σε ποσοστό μεγαλύτερο από 95% και επίπεδο κρυσταλλικότητας από 39% έως 75%.

Ωστόσο, λόγω των ασθενών δεσμών μεταξύ των μορίων επιτρέπεται στις τοπικές θερμικές διεγέρσεις να διαταράξουν την κρυσταλλική δομή της αλυσίδας, με αποτέλεσμα αυτή να έχει μικρότερη θερμική αντίσταση από άλλες ίνες υψηλής αντοχής. Το σημείο τήξεως των ινών UHMWPE είναι περίπου 130°C έως 136°C [7] και, σύμφωνα με την DSM, δεν συνιστάται η έκθεσή τους σε θερμοκρασίες άνω των 80°C - 100°C για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τέλος, το UHMWPE γίνεται ιδιαίτερα εύθραυστο σε θερμοκρασίες κάτω των -150°C [8].

Από την άλλη, η απλή δομή των μοριακών αλυσίδων UHMWPE προσφέρει επιφανειακές και χημικές ιδιότητες που είναι σπάνιες σε πολυμερή υψηλής απόδοσης. Για παράδειγμα δεν απορροφά εύκολα νερό, ούτε βρέχεται εύκολα, λόγω έλειψης πολικών ομάδων (πυκνής συγκέντρωσης ηλεκτρονίων γύρω από διακριτά άτομα). Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη τη συγκόλλησή του με άλλα πολυμερή. Για τον ίδιο λόγο, το δέρμα μας δεν αλληλεπιδρά έντονα με αυτό, δίνοντας μία «ολισθηρή» αίσθηση της επιφάνεια των ινών κατόπιν επαφής. Δεδομένου ότι το UHMWPE δεν περιέχει χημικές ομάδες (π.χ εστέρες, αμίδια ή υδροξυλικές ομάδες) οι οποίες είναι επιρρεπείς σε ισχυρούς καταλυτικούς παράγοντες, είναι πολύ ανθεκτικό στο νερό, την υγρασία, τις περισσότερες χημικές ουσίες, την υπεριώδη ακτινοβολία και τους μικροοργανισμούς.

3.3.3 Μήτρες συνθέτων UHMWPE.

Οι μήτρες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα φύλλα τόσο από την Dyneema® όσο και από την Spectra Shield® είναι συνήθως μήτρες ρητίνης είτε από πολυουρεθάνη (PU - Polyurethane) ή από συμπολυμερούς τριών συστάδων στυρενίου-ισοπρενίου-στυρενίου (SIS – Styrene – Isoprene – Styrene triblock copolymer) και συνήθως σε ποσοστά μικρότερα από 20% κατ'όγκο. Ο σκοπός του υλικού της μήτρας είναι η προστασία των ινών UHMWPE από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, η διατήρηση της ευθυγράμμισής τους κατά τη διάρκεια του κύκλου θερμοσυμπίεσης των φύλλων αλλά και η μεταφορά (διάχυση) της ενέργειας του βλήματος στις ίνες κατά την πρόσκρουση.

Οι μήτρες από PU έχουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, προσφέρουν καλύτερη υποστήριξη στην κεραμική πλάκα και υφίστανται μικρότερου βαθμού αποκόλληση (delamination) σε σχέση με τις μήτρες από SIS, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές (π.χ κρίνη προστασίας) όπου οι μεγάλες παραμορφώσεις είναι ανεπιθύμητες. Οι μήτρες από SIS από την άλλη είναι περισσότερο ελαστικές επιτρέποντας έτσι στις ίνες να επιμηκύνονται, γεγονός που τις καθιστά ανθεκτικότερες σε θραύσματα. Εφόσον παραμορφώνονται περισσότερο κατά την κρούση, αυξάνουν και το **αποτύπωμα BFD (Back Face Deformation)**. Ο **μηχανισμός** αυτός της **αστοχίας** δρα πολύ αποτελεσματικά προς την απορρόφηση της ενέργειας κρούσης του βλήματος.

Οι μήτρες προσαρμόζονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή με σκοπό τη βελτιστοποίηση του ιξώδους τους (ώστε να επιτευχθεί μέγιστη κάλυψη του χώρου μεταξύ των ινών), της περιεκτικότητας κατ'όγκο τους μέσα στο σύνθετο, του μέτρου ελαστικότητας τους, της θερμοδιαμόρφωσης τους και άλλων ιδιοτήτων τους [63].

3.3.4 Βαλλιστικό όριο V_{50} κατά Cunniff και μηχανισμοί θράυσης κατά Karthekeyan.

Στο χώρο της (αντι)βαλλιστικής ο κρίσιμος παράγοντας για την «ταξινόμηση» και το χαρακτηρισμό ενός υλικού είναι το **βαλλιστικό** του **όριο** (ή οριακή ταχύτητα – V_{50}). Ως βαλλιστικό όριο ορίζεται η **ταχύτητα** που απαιτείται **σε ένα συγκεκριμένο βλήμα** ώστε να διαπεράσει με αξιοπιστία (τουλάχιστον στο 50% των δοκιμών) ένα συγκεκριμένο πάχος υλικού. Από αυτό συνεπάγεται ότι ένα δεδομένο βλήμα δε θα διαπεράσει έναν δεδομένο στόχο όταν η ταχύτητα του βλήματος είναι χαμηλότερη από το βαλλιστικό όριο [13, 63].

Η τιμή του βαλλιστικού ορίου υπολογίζεται για το εκάστοτε σύστημα θωράκισης-βλήματος ως ο μέσος όρος, ίσου αριθμού, μέγιστων ταχυτήτων μερικής διείσδυσης βλήματος και ελάχιστων ταχυτήτων διάτρησης (ολικής διείσδυσης) βλήματος. Ως μερική διείσδυση (partial penetration-PP) εννοούμε την πρόσκρουση από ένα βλήμα το οποίο δεν διαπερνά την τελευταία στρώση του στόχου του. Αντίθετα διάτρηση (complete penetration-CP) έχουμε όταν το βλήμα είναι διαμπερές [63].

Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του βαλλιστικού ορίου, με σκοπό να συσχετισθούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών με τη (αντι)βαλλιστική τους συμπεριφορά [20].

Για σύνθετα διαστρωματωμένα υλικά το βαλλιστικό όριο δίνεται, κατά Reid και Wen [14, 80], από :

$$V_{50} = \frac{\pi\Gamma\sqrt{\rho_t\sigma_e D^2 T}}{4m} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{8m}{\pi\Gamma^2\rho_t D^2 T}} \right] [m/s] \quad (2)$$

όπου:

- V_{50} : το βαλλιστικό όριο [m/s].
- Γ : σταθερά του βλήματος (προσδιορίζεται πειραματικά).
- ρ_t : η πυκνότητα του συνθέτου [kg/m³].
- σ_e : το όριο της ελαστικής περιοχής του συνθέτου [GPa].
- D : η διάμετρος του βλήματος [m].
- T : το πάχος του συνθέτου [m].
- m : η μάζα του βλήματος [kg].

Όπως αναφέραμε στις §2.2.5 και §3.3.3 στα σύνθετα ινών UHMWPE η μήτρα, περιεχόμενη σε ποσοστά μικρότερα από 20% κατ'όγκο του συνθέτου, έχει τον ρόλο του συγκολλητικού υλικού, που συγκρατεί τις ίνες. Επομένως μας ενδιαφέρουν κυρίως οι ιδιότητες των προεμποτισμένων ινών (pre-impregnated fibers), οι οποίες δεν αποτελούν απλά «ενισχυτική φάση» αλλά αναλαμβάνουν πλέον τον πρωταρχικό ρόλο στην αντοχή του συνθέτου λόγω της τάξης μεγέθους του απόλυτου ορίου αντοχής τους (ultimate tensile strength-UTS).

Σύμφωνα με την μικρομηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών μπορούμε, βασιζόμενοι στον κανόνα των μειγμάτων της σχέσης (1) της §2.1, να υπολογίσουμε την αντοχή θραύσης ενός συνθέτου ως [81] :

$$\sigma_{c_{max}} = \sigma_{f_{max}} v_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{f_{max}}} (1 - v_f) [Pa] \quad (3)$$

Όπου :

- $\sigma_{c_{max}}$: η μέγιστη εφελκυστική τάση (προ θραύσης) του συνθέτου (κατά τη διεύθυνση του εφελκυσμού) [Pa].
- $\sigma_{f_{max}}$: η μέγιστη εφελκυστική τάση των ινών [Pa].
- $(\sigma_m)_{\varepsilon_{f_{max}}}$: η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την θράυση των ινών [Pa].
- v_f : το κλάσμα όγκο των ινών στο σύνθετο.

Αγνοώντας την συμβολή της μήτρας, εφόσον η εφελκυστική της τάση είναι σαφώς μικρότερη των ινών, η τάση θραύσης του συνθέτου μπορεί να υπολογιστεί πλέον ως :

$$\sigma_{c_{max}} = \sigma_{f_{max}} \nu_f \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

Αντίστοιχα το βαλλιστικό όριο, αγνοώντας την συμβολή της μήτρας στην αντοχή του συνθέτου, δίνεται **κατά Cunniff**, το 1999, ως [15,63]:

$$V_{50} = \left[\frac{\sigma_f \varepsilon_f}{2\rho_f} \sqrt{\frac{E_f}{\rho_f}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

όπου:

- σ_f : το απόλυτο όριο (UTS) των ινών του συνθέτου [GPa].
- ρ_f : η πυκνότητα των ινών του συνθέτου [kg/m^3].
- ε_f : η (εκατοστιαία) παραμόρφωση πριν τη θραύση.
 E_f : το μέτρο ελαστικότητας των ινών (θεωρώντας πως αυτές συμπεριφέρονται γραμμικά στην ελαστική περιοχή) [GPa].

ή, εξαλείφοντας το μέτρο ελαστικότητας των ινών (E_f), από την σχέση :

$$V_{50} = \sqrt{\frac{\sigma_f}{\rho_f}} \left(\frac{\varepsilon_f}{4} \right)^{1/6} \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

Από τις εξισώσεις (5) και (6) εύκολα συμπεραίνουμε, για τη σχέση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου (ή πιο συγκεκριμένα των ινών του) και της (αντι)βαλλιστικής του συμπεριφοράς, πως υψηλότερο UTS συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή των ινών (προτού θραύσης), ενώ μεγαλύτερη παραμόρφωση συμβάλλει στην επιτυχημένη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του βλήματος (και των θραυσμάτων του) σε δυναμική (επί των ινών).

Ακολουθεί ένας ενδεικτικός **Πίνακας 12** διαφόρων βασικών μηχανικών ιδιοτήτων και βαλλιστικών ορίων (δεξιά στήλη) προς σύγκριση διαφόρων ινών.

Fiber	ρ (Mg m ⁻³)	E (GPa)	E/ρ (kJ g ⁻¹)	σ_f (GPa)	σ_f/ρ (kJ g ⁻¹)	ε_f (%)	c^* (m s ⁻¹)
Alumina							
Nextel 312 [1]	2.7	150	56	1.7	0.6	1.1	298
Nextel 440 [1]	3.05	190	62	2.0	0.7	1.1	301
Nextel 610 [1]	3.90	380	97	3.1	0.8	0.8	317
Nextel 720 [1]	3.4	260	76	2.1	0.6	0.8	279
Aramid							
Kevlar 29 [2,3]	1.44	70 - 91	49 - 63	2.9 - 3.0	2.0 - 2.1	3.0 - 4.2	621 - 671
Kevlar 49 [2,3]	1.44	113 - 120	78 - 83	3.0	2.1	1.2 - 2.6	487 - 619
Kevlar 129 [2,3]	1.44	96 - 99	67 - 69	2.9 - 3.4	2.0 - 2.4	3.3 - 3.5	648 - 695
Kevlar 149 [4]	1.47	185	126	3.4	2.3	2.0	638
Kevlar KM2 [2,3,5]	1.44	70 - 85	49 - 59	3.3 - 3.9	2.3 - 2.7	3.8 - 4.5	681 - 776
Basalt [6]	2.56 - 2.66	53 - 62	20 - 24	1.6 - 2.0	0.6 - 0.8	2.7 - 3.6	336-400
Boron Carbide							
4-mil [7]	2.54	400	157	3.6	1.4	0.9	431
5.6-mil [7]	2.38	400	168	4.0	1.7	1.0	478
Carbon							
Hexcel AS4 [8]	1.79	231	129	4.4	2.5	1.8	643
Hexcel IM7 [9]	1.78	276	155	5.6	3.1	1.8	733
Hexcel IM9 [10]	1.80	304	169	6.1	3.4	1.9	765
Toray M35J [11]	1.75	343	196	4.7	2.7	1.4	636
Toray M45J [12]	1.84	436	237	4.2	2.3	1.0	554
Toray M60J [13]	1.93	588	305	3.9	2.0	0.7	491
Toray T300 [14]	1.76	230	131	3.5	2.0	1.5	560
Toray T700S [15]	1.80	230	128	4.9	2.7	2.1	689
Toray T800S [16]	1.80	294	163	5.9	3.3	2.0	747
Toray T1000G [17]	1.80	294	163	6.4	3.5	2.2	788
Glass							
E [3,18,19]	2.54 - 2.58	69 - 74	27 - 29	3.4 - 3.8	1.3 - 1.5	4 - 4.8	525 - 570
S2[18]	2.49	87	35	4.8	1.9	5.7	689
LPC polyester							
Vectran HS [20]	1.4	80	57	2.5	1.8	2.7	570
Vectran HT [21]	1.4	75	54	3.2	2.1	4.3	686
Vectran M [20]	1.4	79	56	1.2	0.8	1.7	374
Vectran NT [21]	1.4	52	37	1.1	0.7	2.1	357
Vectran UM [21]	1.4	103	74	3.0	1.8	2.9	604
PBO							
Zylon AS [3,4]	1.54	180	117	5.8	3.5	3.5	893
Zylon HM [3,4]	1.56	270	173	5.8	2.5	2.5	849
PIPD							
M5 [2,4]	1.70	300 - 330	176 - 194	3.5 - 8.5	2.1 - 5.0	2.5 - 4.5	864 - 940
Polyamide							
Nylon [2,22]	1.14	10	8	0.9	0.8	9.5 - 28	480 - 690
Polypropylene							
Tegris [source]	0.78	14	17	0.5	0.6	6	431
Silicon Carbide							
Nicalon NL-200 [23]	2.55	220	86	3.0	1.2	1.4	421
SCS-6 [24]	3.08	380	123	3.9	1.3	1.0	416
SCS-9A [24]	2.8	307	110	3.6	1.3	1.2	429
SCS-Ultra [24]	3.08	415	135	5.9	1.9	1.4	541
UHMWPE							
Dyneema® SK60 [4]	0.97	89	92	2.7	2.8	3.5	776
Dyneema® SK65 [4]	0.97	95	98	3.0	3.1	3.6	820
Dyneema® SK75 [4]	0.97	107	110	3.4	3.5	3.8	888
Dyneema® SK76 [4]	0.97	116	120	3.6	3.7	3.8	917
Spectra 900 [3,25]	0.97	73 - 79	75 - 81	2.3 - 2.6	2.4 - 2.7	2.8 - 3.9	670 - 758
Spectra 1000 [2,3,26]	0.97	97 - 120	100 - 124	2.6 - 3.3	2.7 - 3.4	2.8 - 3.5	749 - 807
Spectra 2000 [3,27]	0.97	116 - 124	120 - 128	3.2 - 3.3	3.3 - 3.4	2.9 - 3.0	810 - 836
Spectra 3000 [28]	0.97	115 - 122	118 - 126	3.2 - 3.4	3.4 - 3.5	3.3	844 - 867

Πίνακας 11 : Μηχανικές Ιδιότητες και βαλλιστικό όριο V_{50} διαφόρων τύπων ινών [19].

Μέσω μίας απλής σύγκρισης των μηχανικών ιδιοτήτων και των βαλλιστικών ορίων, μεταξύ των ινών του **Πίνακα 12**, αντιλαμβανόμαστε, για ακόμη μία φορά, τους λόγους πρωτοκαθεδρίας των ινών UHMWPE στις σύγχρονες αλεξίσφαιρες θωρακίσεις.

Όπως αναφέραμε οι σχέσεις **(5)** και **(6)** δεν λαμβάνουν υπ' όψη τις ιδιότητες της μήτρας, την πυκνότητα των ινών εντός του συνθέτου ή την επιρροή του ορίου θραύσης των ινών στο συνολικό σύνθετο και βασίζονται στην υπόθεση ότι τα βλήματα παραμένουν απαραμόρφωτα.

Από μία μελέτη που του B. L. LEE (2000), αποδεικνύεται ότι ακόμη και πολύ χαμηλά ποσοστά όγκου μήτρας επηρεάζουν τη (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά του τελικού συνθέτου και δεν αρκεί επομένως η αντοχή του να συσχετισθεί μόνο με τις ιδιότητες των ινών [16].

Σε πιο πρόσφατες μελέτες, όπως του Karthekeyan, διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο οι ιδιότητες των συνθέτων συμβάλλουν στην αστοχία προϊόντων υλικών σε υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης δυναμικών φαινομένων, όπως είναι μία βαλλιστική κρούση [10, 17]. Προσδιορίζονται έτσι **τρεις βασικοί μηχανισμοί θραύσης/παραμόρφωσης των πολυστρωματικών σύνθετων υλικών :**

- I. **Θραύση ινών :** Οι ίνες στην κατεύθυνση των 90° συγκρατούνται στις θέσεις τους από τις ίνες στην κατεύθυνση 0° , οδηγώντας σε συσσώρευση θλιπτικής τάσης στην κατεύθυνση των 90° και εφελκυστικής στην κατεύθυνση των 0° , έως θραύσης των εφελκόμενων ινών. Έλλειψη ευθυγράμμισης ή ύπαρξη πεπλεγμένων ινών λόγω χαλάρωσης τους, κατά την παρασκευή των σύνθετων φύλλων, ενδέχεται να οδηγήσει σε ανομοιόμορφες φορτίσεις και έτσι να προκληθεί πρόωρη αστοχία ορισμένων ινών, γεγονός που υποβαθμίζει τη συνολική αντοχή του συνθέτου.
- II. **Απώλεια ενέργειας λόγω τριβής :** Η απώλεια ενέργειας λόγω «έλξης» των ινών (fiber pull-in), προς το εσωτερικό της θωράκισης, κατά μήκος του επιπέδου αποκόλλησης (delamination) των στρώσεων και μεταξύ του βλήματος και του συνθέτου.
- III. **Διάτμηση της μήτρας/διαστρωματική αποκόλληση:** Η διαστρωματική/διαφυλλική διάτμηση (interlaminar shear-delamination) εμφανίζεται μεταξύ των διαφορετικών στρώσεων του εκάστοτε συνθέτου ενώ η ενδοστρωματική/ενδοφυλλική διάτμηση (intralaminar shear) εμφανίζεται μεταξύ των ινών εντός της ίδιας στρώσης του συνθέτου.

Κατά την κρούση ενός σύνθετου υλικού από ένα βλήμα ή θραυσμάτων του βλήματος (φάση εισόδου-αστοχίας του συνθέτου βλ. **Εικόνα 34**), δημιουργείται μια κυματική διαταραχή η οποία αποκτά **ταχύτητα διάδοσης c_L** και η οποία **ταξιδεύει μπροστά από το βλήμα**, όπως αυτό διεισδύει στο σύνθετο, αλλά **και κατά μήκος των ινών** που πρώτα έρχονται σε επαφή με το βλήμα. Αυτή η εκτροπή των πρώτων ινών μεταφέρει το θλιπτικό φορτίο κατά την εγκάρσια διεύθυνση των δεύτερων ινών (αυτών δηλαδή που δεν έχουν

ακόμα έρθει σε επαφή με το βλήμα. **Μέχρι** λοιπόν και τη **φάση εισόδου του βλήματος** ο μηχανισμός παραμόρφωσης που επικρατεί είναι η **θράυση των πρώτων ινών (I)**, ενώ δεν παρατηρείται ακόμα αποκόλληση (delamination) των στρώσεων του συνθέτου (III). Για τις στρώσεις που έπονται **στη δεύτερη φάση** (φάση παραμόρφωσης-ακινητοποίησης του βλήματος – βλ. **Εικόνα 34**), ωστόσο, παρατηρείται **διαφυλλική αποκόλληση (III) ταυτόχρονα με τους μηχανισμούς θραύσης/παραμόρφωσης I & II**.

Σημειώνεται πως οι παραπάνω μηχανισμοί θραύσης/παραμόρφωσης δεν λαμβάνουν χώρα καθ'όλο το πάχος του συνθέτου αλλά, στη διάρκεια της δεύτερης φάσης, ο μηχανισμός II μεταβάλλεται σε «εξώθηση» των ινών (fiber pull-out) με ταυτόχρονη αποκόλληση (delamination-μηχανισμός III) **και συμπίεση των εναπομείναντων στρώσεων**. Η αλλαγή αυτή του μηχανισμού κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης τονίζει την επιρροή της πρόσφυσης, μεταξύ των ινών και της μήτρας του συνθέτου, στη (αντι)βαλλιστική απόδοση μίας θωράκισης.

Σε γενικές γραμμές, το μέγεθος των τασικών διαταραχών που προκαλούνται από μία βαλλιστική κρούση είναι μεγαλύτερο του ορίου ελαστικότητας (yield strength) του σύνθετου υλικού της θωράκισης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός τασικού κύματος που αποτελείται από πλαστικά και ελαστικά μέρη.

Η ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού μέρους του κύματος καταπόνησης (strain wave velocity) u_{ew} καθορίζεται από το μέτρο ελαστικότητας E_c (Young's Modulus) και την πυκνότητα ρ_c του σύνθετου υλικού (όχι μόνο των ινών) [12, 18]:

$$u_{ew} \propto \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c}} \quad (7)$$

Κατά τη διάρκεια ενός δυναμικού φαινομένου, όπως είναι μία βαλλιστική κρούση, η **μετάβαση ενός υλικού από μία κατάσταση α σε μία κατάσταση β** μπορεί να περιγραφεί από τις **εξισώσεις Rankine – Hugoniot** ως:

Διατήρηση της μάζας:

$$\rho_\beta u_{P\beta} = \rho_\alpha u_{P\alpha} (\equiv m) \quad (8)$$

Διατήρηση της ορμής:

$$P_\beta + \rho_\beta u_{P\beta} = P_\alpha + \rho_\alpha u_{P\alpha} \quad (9)$$

Διατήρηση της ενέργειας:

$$e_\beta + \frac{P_\beta}{\rho_\beta} + \frac{u_\beta^2}{2} = e_\alpha + \frac{P_\alpha}{\rho_\alpha} + \frac{u_\alpha^2}{2} \quad (10)$$

όπου:

- ρ : η πυκνότητα του συνθέτου (Kg/m^3)
- u_p : η ταχύτητα διασκορπισμού των θραυσμάτων
- e : η εσωτερική ενέργεια του συστήματος βλήμα-σύνθετο.
- P : η πίεση σε κάθε μία από τις καταστάσεις α και β .

Η πίεση ενοποίησης του κεραμικού και του συνθέτου, κατά την διαδικασία επαναθέρμανσης που θα δούμε στη συνέχεια, επηρεάζει έντονα τη συμπεριφορά των κρουστικών κυμάτων και άρα τη βαλλιστική αντίσταση των δοκιμίων. Για ταχύτητες σωματιδίων u_p μεγαλύτερες των 1100 m/s η ταχύτητα του τασικού κύματος u_{ew} και το βαλλιστικό όριο V_{50} μεγαλώνουν με την αύξηση της πίεσης ενοποίησης [12].

Όταν το τασικό κύμα φτάσει σε μία άλλη διεπιφάνεια, όπως αυτή που συναντάται πρώτη, δηλαδή του κεραμικού με το σύνθετο, ένα τμήμα του ανακλάται προς τα πίσω (προς το κεραμικό υλικό). Το μέγεθος του κύματος αυτού καθορίζεται από την αντίσταση του καθενός από τα δύο υλικά, γεγονός που καθιστά τη γνώση των ιδιοτήτων της τελικής συμπαγούς θωράκισης ζωτικής σημασίας.

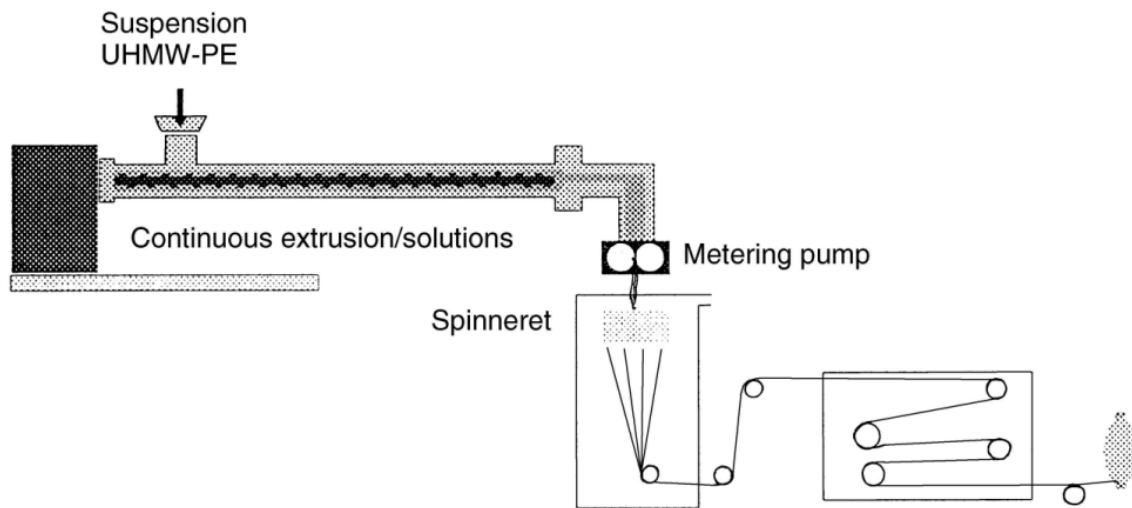
Παρ' όλο λοιπόν που η κυρίαρχη γνώση για να προβλεφθεί η (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά μιας θωράκισης είναι αυτή των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών, δεν παραβλέπουμε την συμβολή της μήτρας στους μηχανισμούς θραύσης αλλά και των υπολοίπων συντελεστών της, μιας και αυτό που καθιστά μία θωράκιση ικανή είναι ένα σύνθετο και πολυπαραγωγντικό φαινόμενο [63].

3.3.5 Παραγωγή συνθέτων UHMWPE.

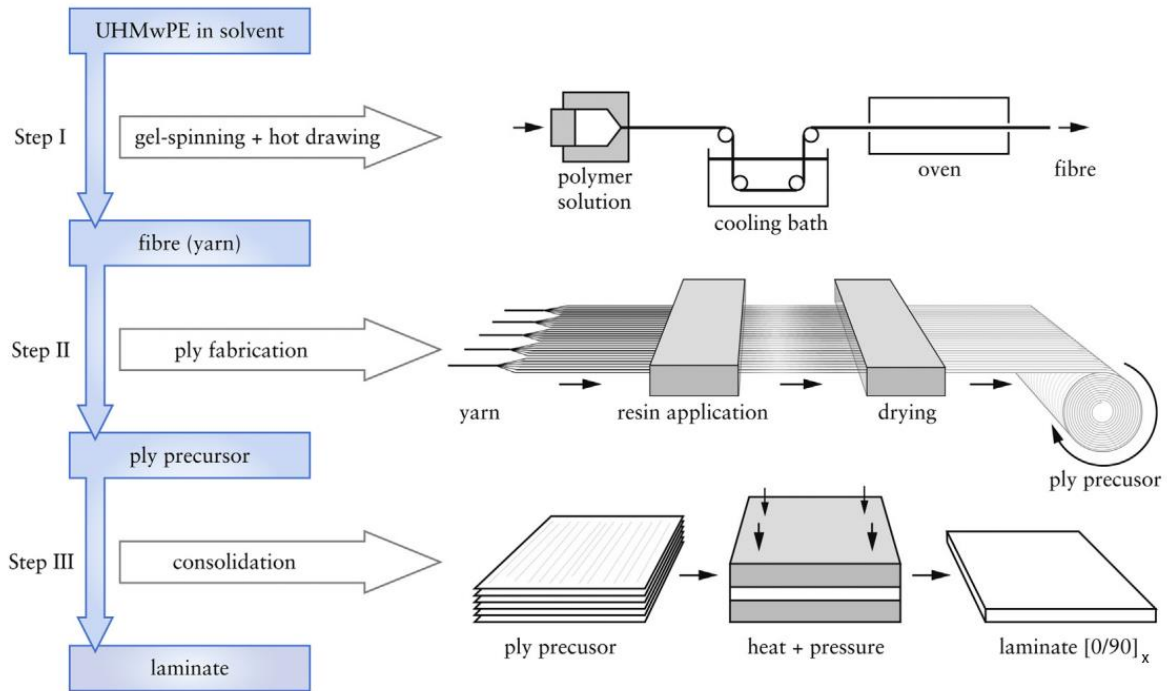
Τα **πολύστρωτα σύνθετα UHMWPE** αποτελούνται κατά κύριο λόγο από **μη πεπλεγμένες ίνες UHMWPE** σε διάταξη $0^\circ/90^\circ$ μέσα σε μήτρες που, όπως αναφέραμε, είναι ρητίνες από PU ή SIS. Τα φύλλα UHMWPE (με την αντίστοιχη μήτρα) προέρχονται με τη σειρά τους από **προκατασκευασμένα ρολά** με, συνήθως, **προεμποτισμένες (pre-impregnated) ίνες** σε προσανατολισμό $[0^\circ/90^\circ]$ (συνήθης διάταξη του ενός φύλλου 4 στρώσεων είναι η $[0^\circ/90^\circ]_2$). Αυτά συνενώνονται, με έναν **αρχικό κύκλο θερμοσυμπίεσης** (περί τους 120-140°C, τα 25 MPa-250 bar και για 15-30 λεπτά), μέσα σε ένα **καλούπι πλακών θέρμανσης-ψύξης** (βλ. **Εικόνες 50,51**) και ταυτόχρονα **υδραυλική πρέσα μορφοποίησης (composite molding hydraulic platen press)**.

Οι προεμποτισμένες ίνες παρασκευάζονται με την **μέθοδο πήγματος (gel-spinning)** ακολουθούμενη από θερμή διέλαση (**hot drawing**) όπως φαίνεται στην **Εικόνα 48**.

Η συνολική διαδικασία από την παραγωγή των ινών UHMWPE έως και το τελικό σύνθετο x στρώσεων ινών $[0^\circ/90^\circ]$, αποτυπώνεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 49**.

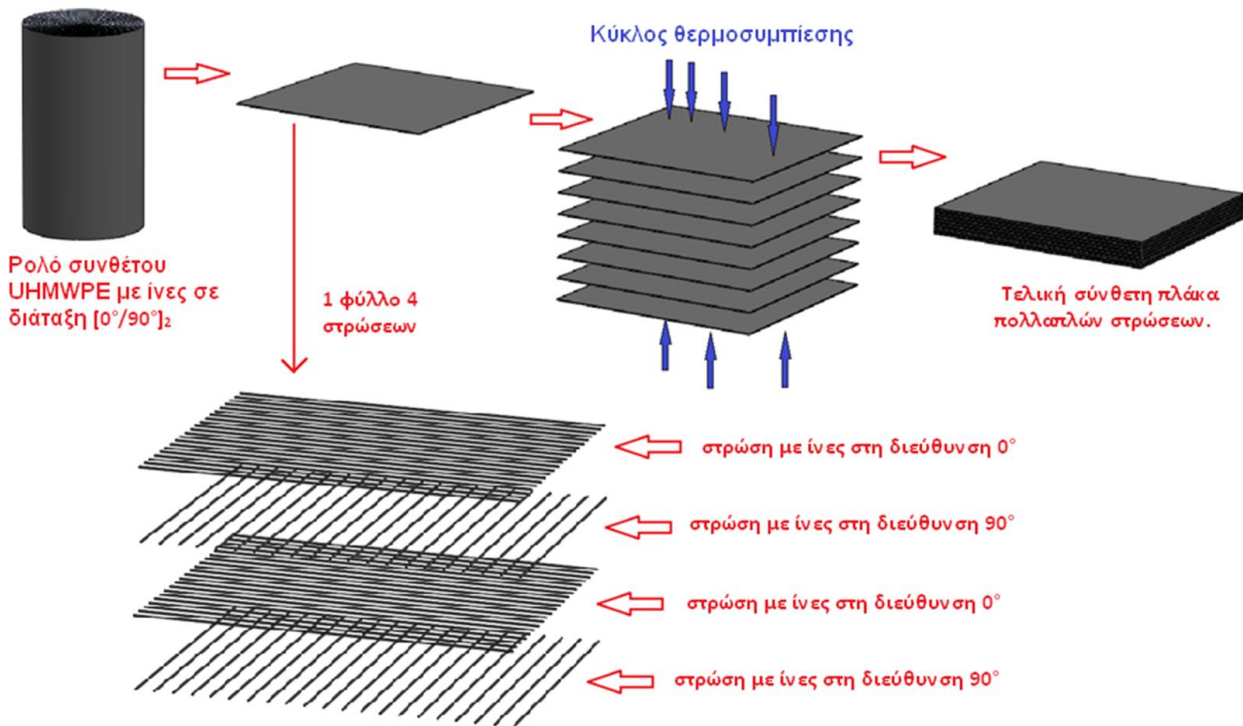


Εικόνα 48 : Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ινών UHMWPE με τη μέθοδο πήγματος (gel-spinning process) [106].

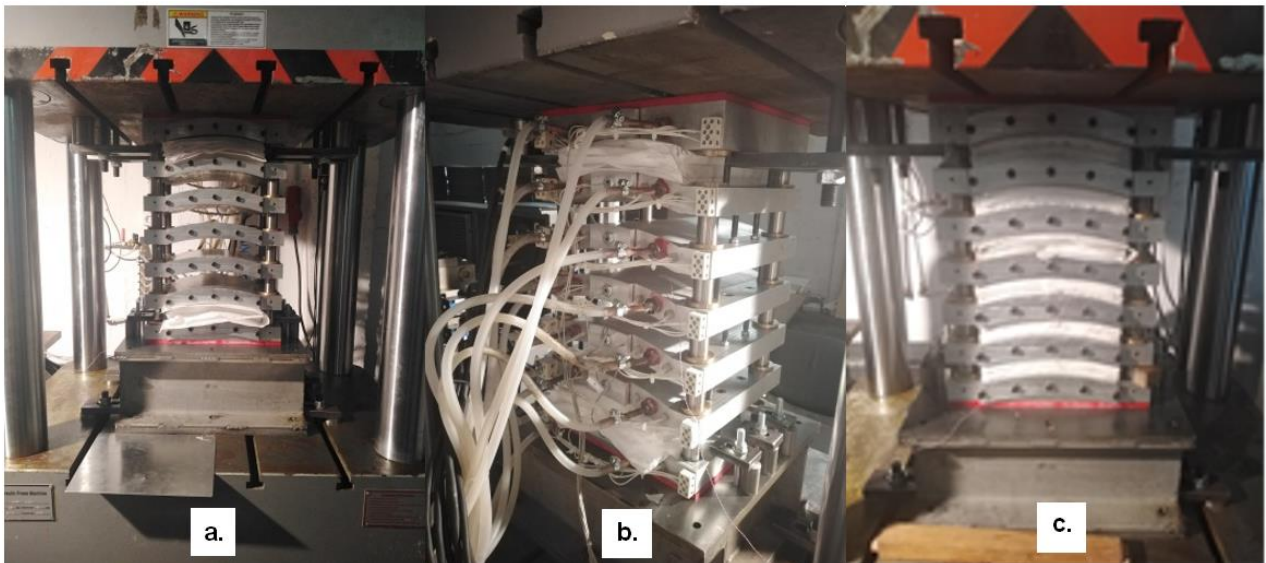


Εικόνα 49 : Σχηματική αναπαράσταση τυπικής παραγωγής πολύστρωτου συνθέτου ιών UHMWPE [104].

Οι ίνες UHMWPE όντας χημικά αδρανείς, μη πολικές και με πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής, καθιστούν την ενοποίησή τους με τη μήτρα μία δύσκολη διαδικασία. Για το λόγο αυτό, οι κατάλληλες θερμοκρασίες και η υψηλή πίεση είναι απαραίτητες, ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος βαθμός σύνδεσης των ιών (ενισχυτική φάση) με τη ρητίνη (μήτρα). Αυτό είναι σημαντικό, διότι μόνο έτσι συνεπάγεται η συνένωση σε ένα επίπεδο ή καμπύλο «σχήμα SAPI» και κατά συνέπεια η ανάπτυξη δυνάμεων van der Waals μεταξύ των επιμέρους υλικών που συντίθενται για την δημιουργία του συνθέτου. Μέσω της αυτής της διαδικασίας, λόγω της ανόπτησης (annealing) και της θερμικής οξειδωτικής αποικοδόμησης των ιών UHMWPE, προκύπτει συχνά υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.



Εικόνα 50 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας κατασκευής πολύστρωτων συνθέτων με ίνες UHMWPE.



Εικόνα 51 : (a) Καλούπι θέρμανσης/ψήξης και μορφοποίησης φύλλων με προεμποτισμένες ίνες UHMWPE (έξι θέσεων), (b) Δίκτυο ψύξης / θέρμανσης του καλουπιού, (c) Καλούπι υπό πίεση και θερμοκρασία, πληρωμένο με μορφοποιούμενα φύλλα UHMWPE [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].

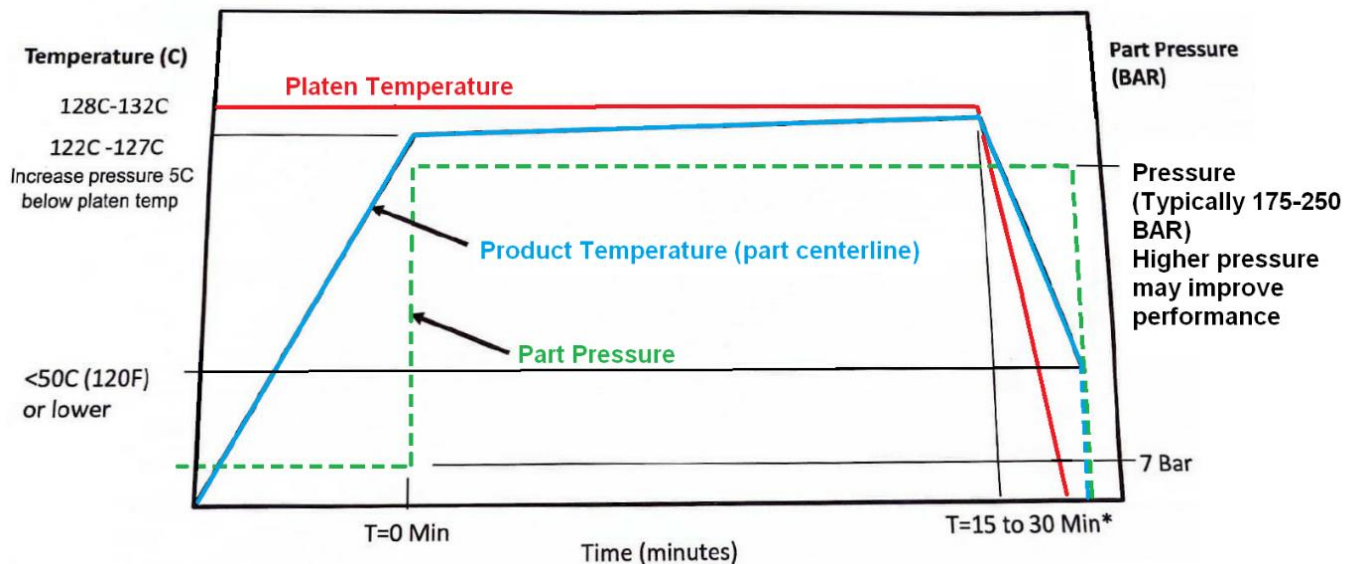
Ενδεικτικοί θερμοσυμπιεστικοί κύκλοι για την παραγωγή σύνθετων πλακών UHMWPE υλικού A, B και C, που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, φαίνονται στις **Εικόνες 52, 53 και 54** αντίστοιχα. Επισημαίνεται πως τα παρακάτω διαγράμματα μόνο θέτουν τα όρια των θερμοσυμπιεστικών κύκλων. Η ρύθμιση των παραμέτρων «πίεση-θερμοκρασία-χρόνος» είναι αποκλειστικά στην ευχέρια του χρήστη (κατόπιν μακροχρόνιας μελέτης) με σκοπό την βελτίωση των ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων και την χρονική ελαχιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

Οι γενικές συνθήκες θερμοσυμπιεστικών κύκλων (μέγιστα μεγέθη) για κάθε ένα από τα σύνθετα υλικά ινών UHMWPE A, B και C είναι :

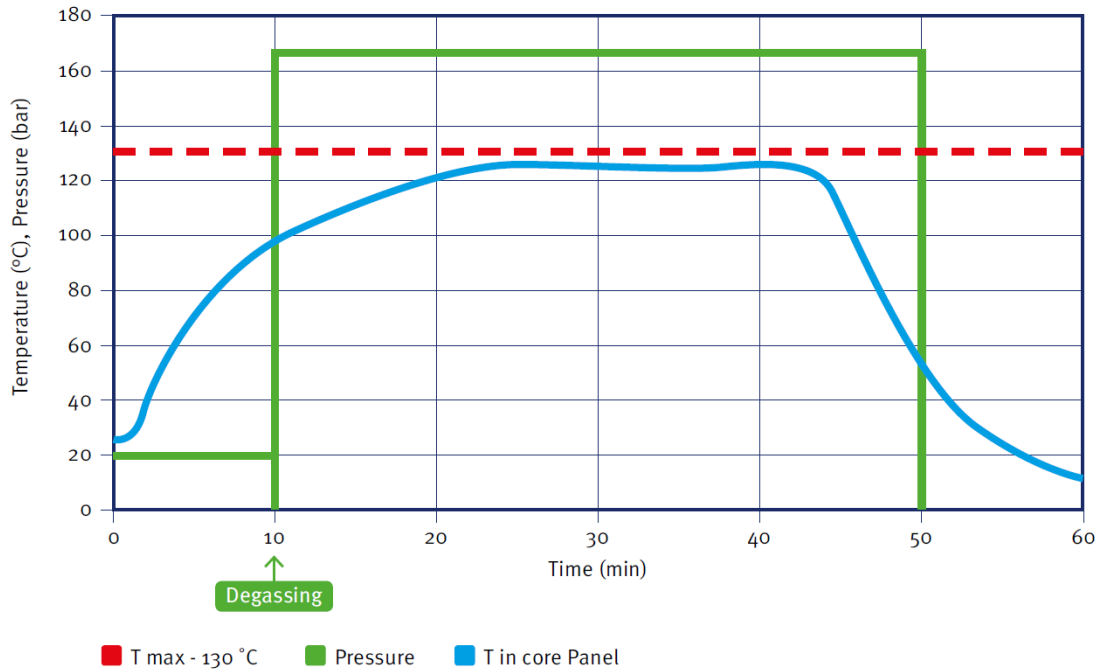
- Σύνθετο υλικού A : 130 °C, 175 bar, 15 min.
- Σύνθετο υλικού B : 135 °C, 175 bar, 30 min.
- Σύνθετο υλικού C : 125 °C, 175 bar, 15 min.

Σημειώνονται τα εξής :

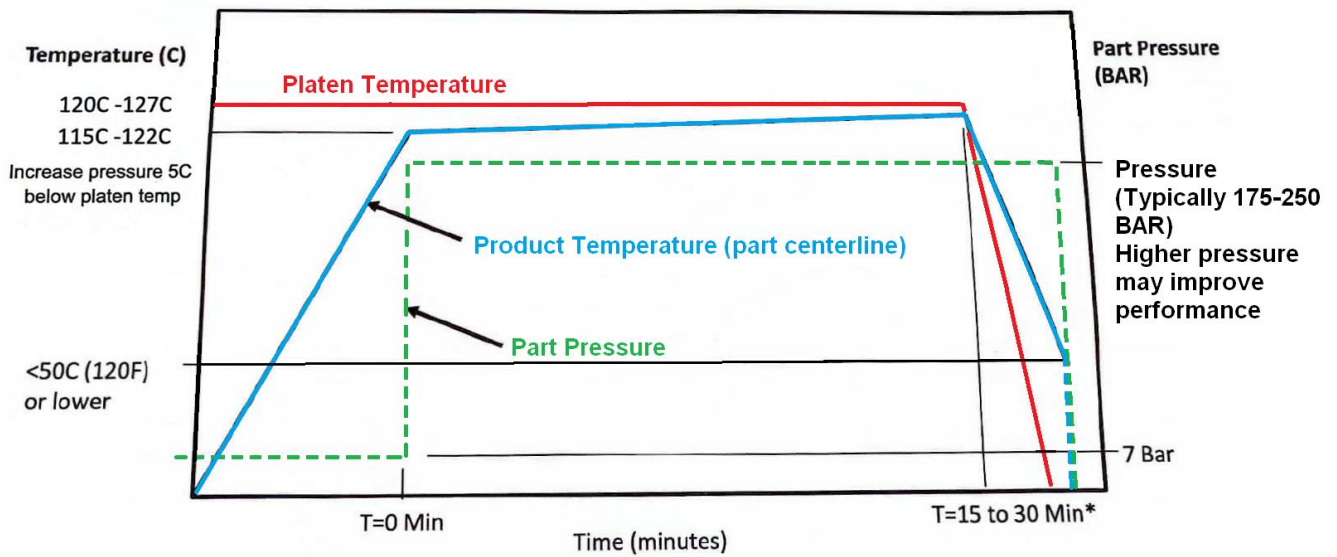
- Με **κόκκινο** οριοθετούνται οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες που δύναται να δεχτούν τα σύνθετα υλικά (Product Temperature/Core Temperature) από τις αντιστάσεις των καλουπιών της πρέσσας (platen temperature) πριν καταλυθούν οι ιδιότητες τους (κυρίως των ινών).
- Με **πράσινο** διαγράφεται η εξέλιξη της πίεσης του καλουπιού (σε bar) σε συνάρτηση με το χρόνο (min).
- Με **μπλε** διαγράφεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας (σε °C) του πυρήνα του υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο (min). Η θερμοκρασία παρακολουθείται από ένα θερμοζεύγος στο μέσον του πάχους των θερμοσυμπιεζόμενων φύλλων.



Εικόνα 52 : Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού Α.



Εικόνα 53 : Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού Β.



Εικόνα 54 : Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού C.



Εικόνα 55 : Μορφοποιημένα φύλλα UHMWPE σε πάνελ κατόπιν εξόδου από το καλούπι (πίσω) και μετά το πέρας της μορφοποίησης σε σχήμα SAPI (εμπρός) .

Σύμφωνα με κάποιους κατασκευαστές πίεση ενοποίησης μεγαλύτερη των 170 bar ίσως να βελτιώνει την βαλλιστική απόδοση του σύνθετου πάνελ και σίγουρα δεν την ελαττώνει.

Κατόπιν της ψύξης του στην πρέσα μορφοποίησης, το προκύπτον σύνθετο υλικό/πλάκα αποκτά στιβαρές ιδιότητες. Ωστόσο ένα σημαντικό ποσοστό της εφελκυστικής αντοχής των ινών (περί το 20%) του χάνεται μέσω της έκθεσης τους στον θερμοσυμπιεστικό κύκλο. Παρατηρείται λοιπόν υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών UHMWPE. Στην περίπτωση, μάλιστα, που η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη, ενδέχεται οι ίνες να αλλοιωθούν σημαντικά (θραύση μοριακών αλυσίδων). Εάν, από την άλλη, η θερμοκρασία είναι πιο χαμηλή από την απαιτούμενη, δεν πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις στο υλικό της μήτρας, με αποτέλεσμα την κακή πρόσφυση μεταξύ των ινών και της μήτρας. Η έλλειψη της απαραίτητης αυτής πρόσφυσης οδηγεί σε κακή μεταφορά ενέργειας (βαλλιστικά) κατά μήκος των ινών [9, 10, 11].

Η άνωθεν υποβάθμιση δεν αποτρέπει τα σύνθετα ινών UHMWPE από το να βρίσκονται σε κυρίαρχη θέση, στις (αντ)βαλλιστικές εφαρμογές, σε σύγκριση με άλλα σύνθετα (π.χ αραμιδίου ή fiberglass). Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό βάρος τους, την υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας (specific energy absorption) και την υψηλή ελαστική κυματική τους ταχύτητα u_{ew} (elastic wave velocity).

Το προκύπτον σύνθετο είναι επίσης εξαιρετικά ανισότροπο (οι ιδιότητες του ποικίλλουν δηλαδή κατά μήκος των κατευθύνσεων του υλικού). Το μέτρο ελαστικότητας του κατά την επίπεδη έννοια είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση του πάχους. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια της κρούσης θα διαμοιραστεί και

άρα απορροφηθεί ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του υλικού παρά κατά το πάχος του [63].

3.3.6 Πυκνότητα συνθέτων UHMWPE.

Διάφορες εργαστηριακές δοκιμές εφαρμόζονται με σκοπό τη συσχέτιση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων με τη (αντι)βαλλιστική τους συμπεριφορά. Βέβαια, οι τελικές δοκιμές και αυτές μέσω των οποίων κρίνεται τελικά η αποτελεσματικότητα του υλικού είναι οι βαλλιστικές δοκιμές.

Εκτός από τις παραπάνω βιβλιογραφικές αναφορές, για την εξαγωγή συμπερασμάτων (σύνδεση μηχανικών και βαλλιστικών ιδιοτήτων), πολλές έρευνες έχουν εστιάσει και στη συσχέτιση των συνθηκών επεξεργασίας, κατά την παρασκευή των συνθέτων, με την τελική (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά του υλικού. Το κοινό συμπέρασμα είναι ότι τα σύνθετα UHMWPE έχουν μεγάλη ευαισθησία στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας γι' αυτό και αλλαγές στον εκάστοτε θερμοσυμπιεστικό κύκλο του κάθε συνθέτου μπορεί να του προσδώσει διαφορετικές ιδιότητες. Η πειραματική εύρεση ωστόσο του ιδανικού κύκλου ξεφεύγει από το μελετητικό φάσμα της παρούσας εργασίας [20, 21, 22, 23, 24, 25].

Ο σχηματισμός διακενών (πορώδους του συνθέτου) ή η ανεπιθύμητη αλλαγής της κρυσταλλικότητας μέσα στο σύνθετο μπορούν να εξαχθούν από τη μέτρηση της **πυκνότητας του συνθέτου** η οποία θα συγκριθεί με μία γνωστή «βέλτιστη» τιμή.

Μικρότερη πυκνότητα συνεπάγεται κακή ροή της μήτρας, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την **αποδυνάμωση του συνθέτου**, λόγω συγκέντρωσης τοπικών τάσεων και την «μη βέλτιστη» διάχυση της ενέργειας κρούσης. Από την άλλη **υψηλότερες τιμές** της πυκνότητας **αυξάνουν την ταχύτητα** του κρουστικού κύματος c_L και άρα του οπισθοανακλώμενου κύματος στο κεραμικό, αυξάνοντας έτσι και την έκταση της ζημιάς σε αυτό. Ένα ήδη θραυσμένο κεραμικό δεν μπορεί να παρέχει τη μέγιστη προστασία σε ένα δεύτερο βλήμα, περίπτωση κατά την οποία τα θραύσματα μεταφέρονται ευκολότερα στο σύνθετο, παραμορφώνοντας το εκτενέστερα [26].

Σε γενικές γραμμές αύξηση της θερμοκρασίας, το πολύ περί τους 150°C, στο θερμοσυμπιεστικό κύκλο παρασκευής του συνθέτου UHMWPE αυξάνει την πυκνότητα.. Υψηλότερες θερμοκρασίες, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας λόγω εκτενούς τήξης της κρυσταλλικής φάσης του συνθέτου, η οποία ύστερα ψύχεται και σχηματίζει μία λιγότερο πυκνή και άμορφη φάση. Εκτός από τις υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχει πιθανότητα κρυστάλλωσης της μήτρας λόγω της υψηλής πίεσης κατά την οποία οι ίνες αναγκάζονται να προσανατολιστούν σχηματίζοντας με τη σειρά τους κρυσταλλική δομή [17].

Η **πυκνότητα μετράται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Αρχιμήδη**, σύμφωνα με το **ASTM D792-13**. Για, κατ'ελάχιστο, 5 δείγματα του κάθε συνθέτου υλικού, μετρώνται σταδιακά:

- η μάζα (**A**) του δείγματος στον ατμοσφαιρικό αέρα

- η μάζα ενός μεταλλικού βυθιστή και του ίδιου του δείγματος (**B**) κατόπιν βύθισης τους σε νερό και
- η μάζα του βυθιστή στο νερό ξεχωριστά (**Γ**) κατόπιν απομάκρυνσης του δείγματος.

Το ειδικό βάρος (**specific gravity-sp gr**) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση :

$$sp\ gr \frac{23}{23} oC = \frac{A}{A+\Gamma-B} \quad (11)$$

3.3.7 Θραυστομηχανική ανάλυση και βάθος διείσδυσης (DOP-Depth of Penetration).

Όπως αναλύσαμε και ανωτέρω, το βλήμα, κατά την πρόσκρουσή του στην βαλλιστική διάταξη, έρχεται αρχικά σε επαφή με το κεραμικό το οποίο αλλοιώνει την γεωμετρία της κεφαλής του και στην συνέχεια διαπερνάται πλήρως.

Σημειώνεται πως σε αυτό το σημείο της ανάλυσης, δεν λαμβάνεται υπόψιν η αθροιστική υποβάθμιση του κεραμικού κατά την πρόοδο των έξι βολών αλλά η συμπεριφορά του θεωρείται ιδανική.

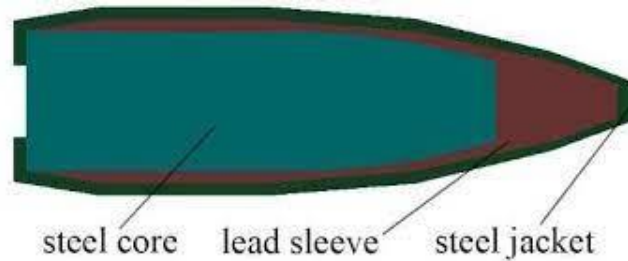
Ακολούθως, η σφαίρα αλληλεπιδρά με το σύνθετο πάνελ των θερμοσυμπιεσμένων φύλλων UHMWPE. Κατόπιν εντοπίζονται οι τρεις τρόποι θραύσης της §3.3.4 οι οποίοι εξελίσσονται, ανά τις 2 φάσεις της §3.1.3, από την πλευρά της πρόσκρουσης προς την πλευρά του χρήστη.

Τα πρώτα φύλλα (από την πλευρά του κεραμικού) εξαϋλώνονται στο σημείο της πρόσκρουσης (φάση εισόδου-μηχανισμός αστοχίας I). Στα επόμενα φύλλα (φάση παραμόρφωσης- μηχανισμοί αστοχίας I, II & III) παρατηρείται πλήρης διάτρηση κάποιων φύλλων έως να αφομειωθεί ικανά η ενέργειά της σφαίρας με αποτέλεσμα αυτή να σταματήσει να χάσει τη διατηρητική της ικανότητα και να σταματήσει. Έχουμε επομένως περεταίρω αλλοίωση γεωμετρίας κεφαλής σφαίρας – αύξηση επιφάνειας σφαίρας ή και θραυσματοποίηση της.

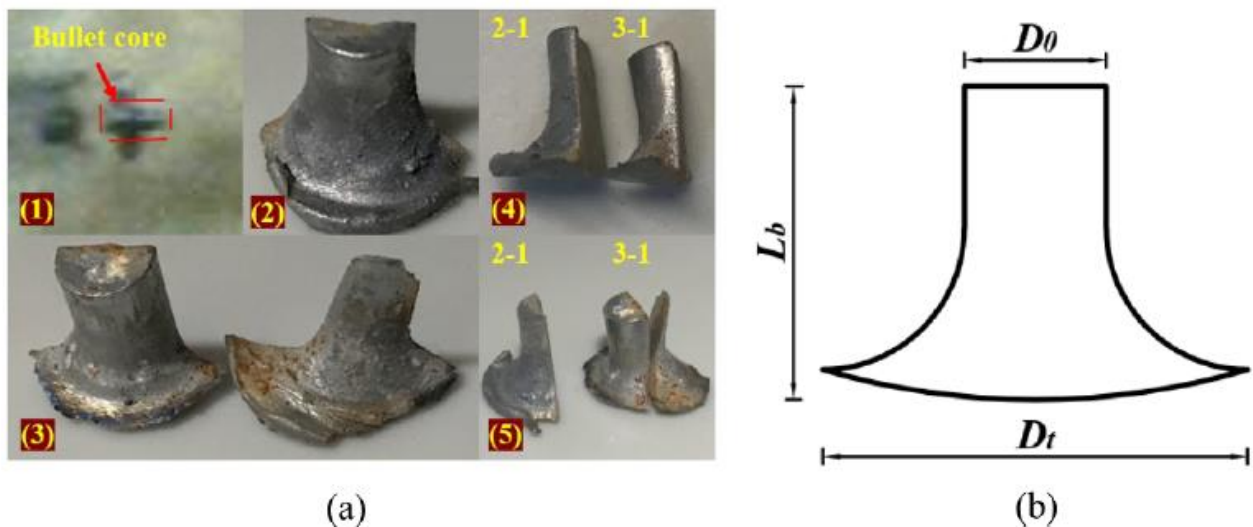
Συχνό φαινόμενο που παρατηρείται, στα τελευταία πλήρως διατρηθέντα φύλλα, είναι ο συνδυασμός της διάτρησης με αποκόλληση των στρώσεων (μηχανισμοί αστοχίας II & III). Στο φύλλο που το βλήμα πλέον ακινητοποιείται οριστικά, παρατηρείται έντονη διαστρωματική αποκόλληση (delamination- μηχανισμός III) ενώ το μη διατρηθέν, υπολοιπόμενο, πάνελ παραμορφώνεται μόνιμα σχηματίζοντας καμπύλες διαμορφώσεις στο πίσω μέρος (BFD). Αυτές οι διαμορφώσεις αποτυπώνονται με τη σειρά τους στην πλαστελίνη της διάταξη της §3.1.5 από όπου και λαμβάνεται το τελικό αποτύπωμα βάθους BFS.

Η σχηματική αναπαράσταση ενός παραμορφωμένου διατηρητικού βλήματος, με σκληρό μεταλλικό πυρήνα, έχοντας «απορροφηθεί ατόφιος» από την αλεξίσφαιρη διάταξη

φαίνεται στην **Εικόνα 57**. Είναι προφανές πως ο ατσάλινος πυρήνας (steel bullet core) είναι το μόνο μέρος του βλήματος που εντοπίζεται καθώς έχει διαχωριστεί από το περίβλημα/φυσσίγγιο (warhead steel jacket) και την μολύβδινη θήκη (lead sleeve) (βλ. **Εικόνα 56**). Συγκεκριμένα το περίβλημα και η μολύβδινη θήκη θραυσματοποιούνται ή εξαϋλώνονται κατά την κρούση.



Εικόνα 56 : Σχηματική αναπαράσταση βασικών μερών ενός διατρητικού βλήματος [87].



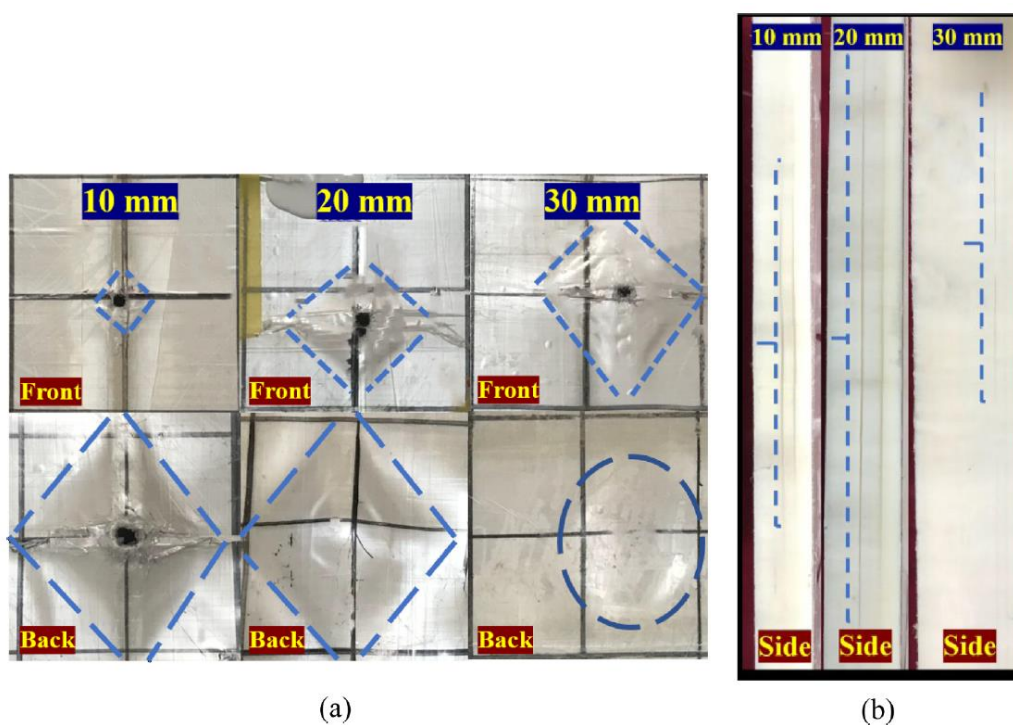
Εικόνα 57 : (a) Φωτογραφικό υλικό διαφόρων τομών, με χρήση υδροκοπής-waterjet, παραμορφωμένων διατρητικών βλημάτων (του ατσάλινου πυρήνα του) 7.62x39 mm MSC και (b) σχηματική αναπαράσταση παραμορφωμένου βλήματος-πυρήνα σε σχήμα «μανιταριού» με βασικές διαστάσεις [86].

Φέρνοντας ως παράδειγμα την σύγκριση, τριών διαφορετικών παχών 10, 20 και 30 mm σύνθετου υλικού UHMWPE, κατόπιν (αντι)βαλλιστικού τους ελέγχου από **3 διατρητικά βλήματα τύπου MSC (Mild Steel Core) 7.62x39 mm** έκαστο, απουσίας κεραμικού, βαλλιστικού αφρού και άλλων συντελεστών της τελικής θωράκισης, επιδιώκουμε μια **ανάλυση της εξέλιξης των φάσεων διεξόδου του βλήματος** (φάσης εισόδου και φάσης παραμόρφωσης) και των **μηχανισμών αστοχίας** του συνθέτου (της §3.3.4), που

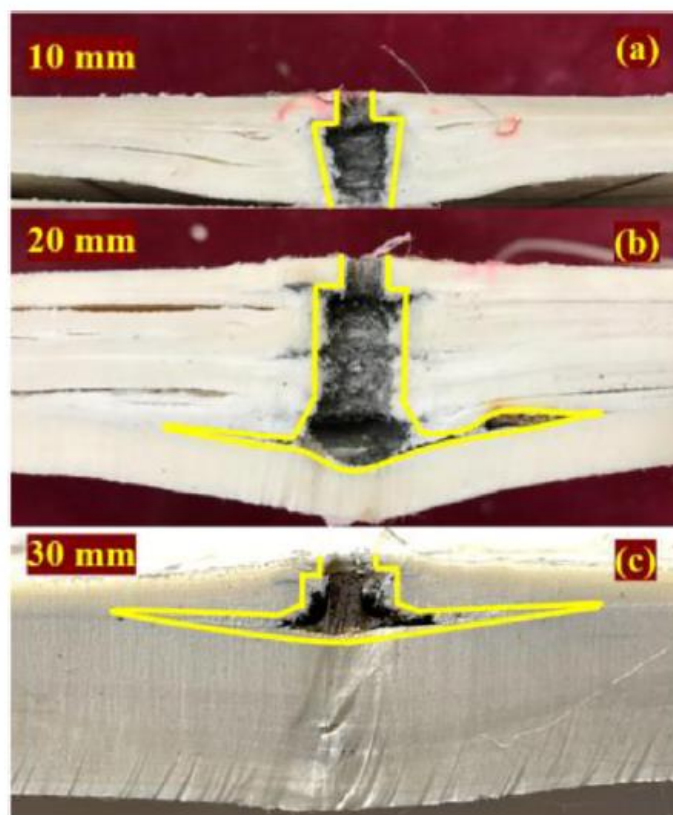
λαμβάνουν χώρα σε μία βαλλιστική κρούση, από την σκοπιά του βλήματος (βλ. Εικόνα 59).

Για λόγους πληρότητας ορίζονται :

- D_0 : η αρχική διάμετρος του ατσάλινου πυρήνα. Για τον συγκεκριμένο τύπο βλήματος $D_0 \approx 5.7 \text{ mm}$.
- D_t : η μέγιστη διάμετρος της κεφαλής του πυρήνα κατόπιν παραμόρφωσης.
- L_b : το εναπομείναν μήκος του πυρήνα κατόπιν παραμόρφωσης.



Εικόνα 58 : (a) Εμπρόσθια, πίσω και (b) πλάγια όψη των επιφανειών των πυροβολημένων πάνελ UHMWPE [86].



Εικόνα 59 : Τομές στα σημεία πρόσκρουσης των βλημάτων επί σύνθετων πλακών UHMWPE με πάχη (a) 10 mm (διαμπερής οπή), (b) 20 mm και (c) 30 mm αντίστοιχα [86].

Παρατηρήσεις :

- Κατά τη διείσδυση του συνθέτου πάχους 10 mm δεν εντοπίζεται έντονη παραμόρφωση του πυρήνα του βλήματος και η αρχική του διάμετρος παραμένει πρακτικά αναλλοίωτη, καθώς η οπή είναι διαμπερής (βλ. **Εικόνα 57a-1**).
- Κατά την διείσδυση των συνθέτων παχών 20 και 30 mm ωστόσο ο πυρήνας παραμορφώνεται λαμβάνοντας σχήμα μανιταροκεφαλής (βλ. **Εικόνα 57a-2** και **Εικόνα 57a-3**). Πιο συγκεκριμένα κατά την διείσδυση του πάνελ πάχους 20 mm οι ακμές του παραμορφωμένου βλήματος φαίνεται να κολουριάζονται προς το σώμα του πυρήνα λόγω του οπισθοανακλώμενου κρουστικού κύματος. Για την διείσδυση του πάνελ πάχους 30 mm οι ακμές, σε κάποια σημεία της μανιταροκεφαλής, φαίνεται να έχουν απομακρυνθεί ολοκληρωτικά λόγω ανάπτυξης υψηλής τοπικής θερμοκρασίας. Έτσι, σε αυτά τα σημεία, η μέγιστη διάμετρος της D_t θα πρέπει να είναι τυπικά μικρότερη από την αντίστοιχη του βλήματος στο πάνελ των 20 mm.

Συμπερασματικά, η μεγάλη παραμόρφωσή των βλημάτων με πυρήνες από μαλακό χάλυβα (MSC-Mild Steel Core), αντανάκλα την υψηλή απόδοση των σύνθετων πάνελ UHMWPE.

Παρατηρώντας τις **Εικόνες 57a-4** και **57a-5** φαίνεται πως ο πυρήνας (**3-1**) της πρόσκρουσης στο πάνελ πάχους 30 mm παραμορφώθηκε εκτενέστερα από τον αντίστοιχο πυρήνα (**2-1**) της πρόσκρουσης με το πάνελ πάχους 20 mm. Ακόμα, ο πυρήνας είναι κοντίτερος (L_b) στην περίπτωση του πάνελ πάχους 30 mm σε σύγκριση με αυτόν του πάνελ πάχους 20 mm. Συμπερασματικά, εντός συγκεκριμένου εύρους παχών των σύνθετων πάνελ, η έκταση της παραμόρφωσης του βλήματος εξαρτάται από το πάχος του εκάστοτε πάνελ UHMWPE. Ωστόσο, επειδή οι ταχύτητες των βλημάτων είναι οι ίδιες (περί τα 720 m/s), τα βλήματα που διεισδύθηκαν στα πάνελ παχών 20 mm και 30 mm παρουσιάζουν παρόμοιο τελικό σχήμα στην **Εικόνα 59**.

Ο ακόλουθος **Πίνακας 12** συγκεντρώνει τις διαστάσεις των βλημάτων των πάνελ, πάχους 20 mm και 30 mm, κατόπιν παραμόρφωσης τους.

Πίνακας 12 : Διαστάσεις των παραμορφωμένων βλημάτων πρόσκρουσης στα πάνελ της Εικόνας 59.b και 59.c [86].

Laminate thickness (mm)	No.	L_b (mm)	D_t (mm)	\bar{L}_b (mm)	\bar{D}_t (mm)
20	1	10.8	13.5	10.9	13.2
	2	10.9	12.5		
	3	10.9	13.7		
30	1	9.6	14.9	10.4	13.8
	2	10.7	13.2		
	3	10.9	13.2		

Με μία γρήγορη ματιά φαίνεται πως η απόκλιση μεταξύ των διαστάσεων D_t και L_b , για τους παραμορφωμένους πυρήνες των 3 βλημάτων των πάνελ πάχους 20 mm, είναι μικρότερη του 10%. Αυτό επικαιροποιεί, σε κάποιο βαθμό, τον (αντι)βαλλιστικό έλεγχο. Το ίδιο ισχύει και για τις διαστάσεις των πυρήνων των 3 βλημάτων των πάνελ 30 mm. Ο μέσος όρος του εναπομείναντος μήκους των βλημάτων \bar{L}_b του πάνελ πάχους 20 mm είναι κατά **4.8% μεγαλύτερος** των βλημάτων του αντίστοιχου πάνελ πάχους 30 mm, ενώ ο μέσος όρος της διαμέτρου \bar{D}_t των βλημάτων του πάνελ πάχους 20 mm είναι κατά **4.3% μικρότερος** των βλημάτων του αντίστοιχου πάνελ πάχους 30 mm.

Από τα άνωθεν αντιλαμβανόμαστε πως κάτω από τις ίδιες βαλλιστικές συνθήκες ένα παχύτερο σύνθετο πάνελ παραμορφώνει εκτενέστερα το βλήμα από ένα λεπτότερο πάνελ, ίδιου υλικού.

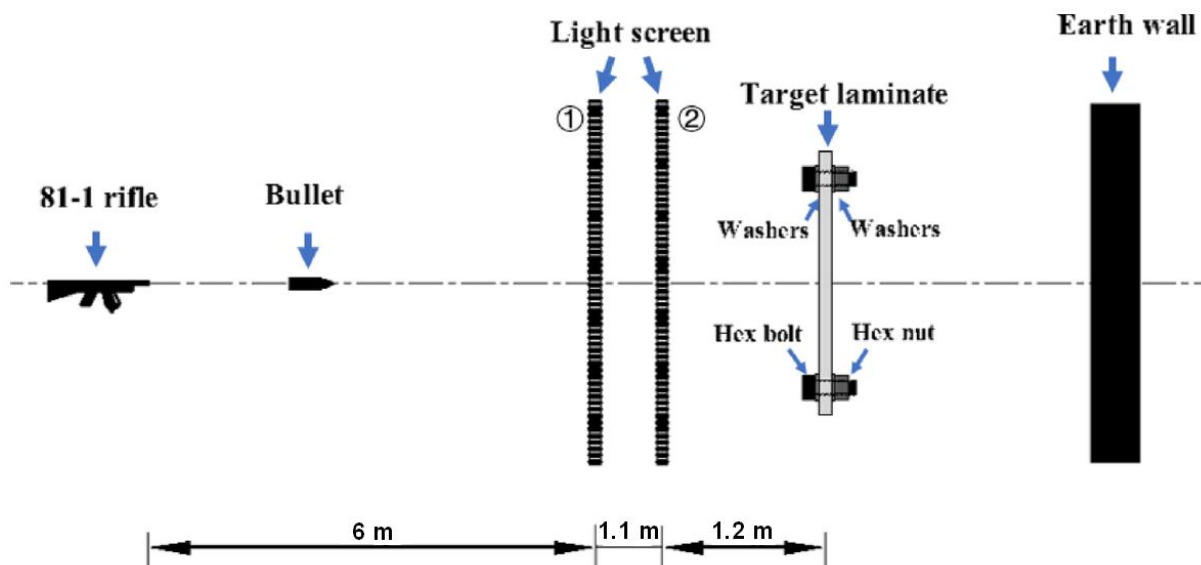
Γενικότερα κατόπιν της πρόσκρουσης με **διατρητικά βλήματα** τύπου MSC (Mild Steel Core) 7.62x39 mm (ταχύτητας εξόδου 720 m/s) οι κυρίαρχοι μηχανισμοί θραύσης στο σύστημα βλήμα-σύνθετο πάνελ-βαλλιστική διάταξη είναι :

- Η θραύση ινών (I) και το BFD, για το πάνελ πάχους 10 mm
- Η θραύση ινών (I), η απώλεια ενέργειας λόγω τριβής (I & II), το BFD, η διαφυλλική αποκόλληση (III) και η παραμόρφωση του πυρήνα των βλημάτων, για το πάνελ πάχους 20 mm.
- Η θραύση ινών (I), η απώλεια ενέργειας λόγω τριβής (I & II), το BFD, η διαφυλλική αποκόλληση (III) και η **εκτενής** παραμόρφωση του πυρήνα των βλημάτων, για το πάνελ πάχους 30 mm.

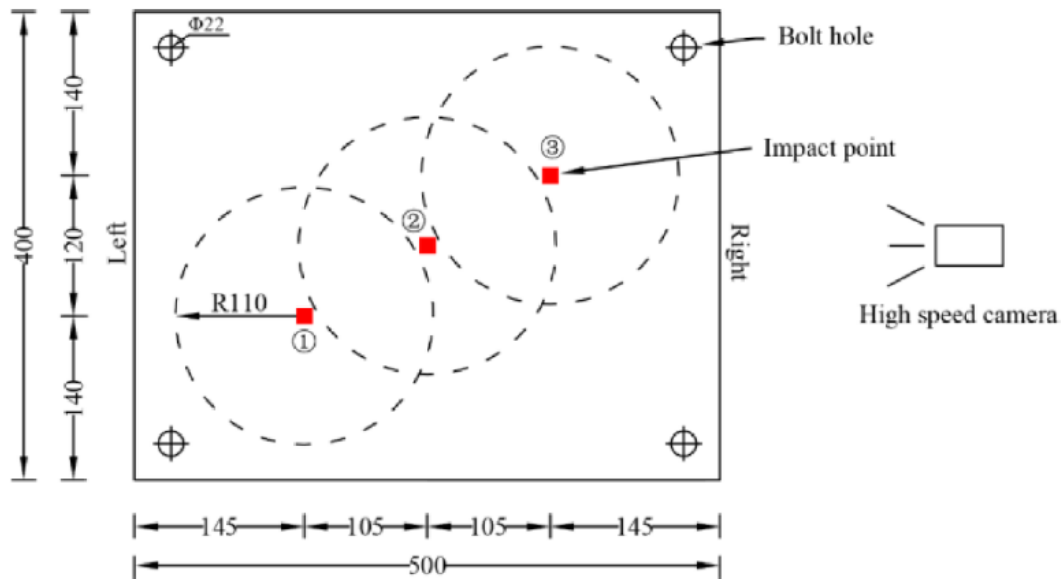
Επειδή το πάνελ πάχους 10 mm διατρήθηκε πλήρως από τα τρία βλήματα, το πάχος αυτό ταυτίζεται με το **βάθος διείσδυσης (Depth Of Penetration-DOP)**. Το DOP, εξ' ορισμού, αποτελεί τη **διαφορά του πάχους των μη διατρηθέντων φύλλων (Partially Penetrated Sheets) από το αρχικό πάχος των πάνελ (Total Composite Panel Thickness)** [88].

Επειδή το DOP επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με το βλήμα, όπως είναι η ταχύτητα εξόδου του, η γωνία προσβολής (βλ. **Εικόνα 35**) αλλά και η κατασκευή του (διατρητικό ή μη), θεωρούμε πως αυτό προσπίπτει **κάθετα στην επιφάνεια της θωράκισης** (γωνία προσβολής μηδέν) κατά την βαλλιστική δοκιμή. Με αυτόν τον τρόπο το βλήμα θα έχει τυπικά την μεγαλύτερη δυνατή **πένετρα (διατρητική ικανότητα)** και θα εξετάζεται έτσι η μέγιστη αντοχή της εκάστοτε θωράκισης [88].

Επανερχόμενοι στο παρόν παράδειγμα, η εναπλωμένη ταχύτητα του βλήματος μετρήθηκε (μέσω της μετρητικής διάταξη της **Εικόνας 61**) περί τα **577.7 m/s** γεγονός που υποδηλώνει πως μόλις το **35.6% της δυναμικής ενέργειας του βλήματος απορροφήθηκε από το πάνελ**. Αντίθετα τα πάνελ πάχους 20 mm και 30 mm φαίνεται να αφομοίωσαν την ενέργεια παντελώς καθώς τα τραύματα του δεν είναι διαμπερή.



Εικόνα 60 : Διάταξη (αντι)βαλλιστικού ελέγχου πάνελ πάχους 10, 20 και 30 mm κατά NIJ-0101.06 [86].



Εικόνα 61 : Σχηματική αναπαράσταση των σημείων πρόσκρουσης και της κάμερας μέτρησης υψηλής ταχύτητας (δεξιά) [86].

Η απόδοση των σύνθετων πάνελ σχετίζεται με τη σειρά της, εκτός των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους και της συνεργασίας της με τους άλλους συντελεστές της τελικής θωράκισης, με τον βαθμό παραμόρφωσης του εκάστοτε βλήματος. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 57** η παραμόρφωση του πυρήνα των βλημάτων του πάνελ πάχους 10 mm είναι μικρή σε σχέση με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις των βλημάτων των πάνελ πάχους 20 mm και 30 mm. Το πάχος πάνελ 10 mm είναι επομένως λιγότερο επαρκές, ανά μονάδα πάχους, από τα πάνελ με πάχη 20 mm και 30 mm, καθώς διατρήθηκε πλήρως (διαμετρής οπή) από τα βλήματα.

Από την τομή του πάνελ των 10 mm (**Εικόνα 58.a**), σε ένα από τα 3 σημεία πρόσκρουσης, διαφαίνονται **2 χαρακτηριστικά στάδια** του διαμερούς τραύματος. Το **πρώτο στάδιο (State 1)** αποτελεί η διάνοιξη μίας ομοιογενούς κυλινδρικής οπής (punching hole) μικρής διαμέτρου D_i , όπως φαίνεται και στη σχηματική αναπαράσταση της **Εικόνας 62.a**. Η διάμετρος αυτή είναι πολύ κοντά στην διάμετρο του πυρήνα του βλήματος $D_i = D_0 \approx 5.7$ mm, ενώ το **βάθος διείσδυσης (DOP)**, στο στάδιο αυτό, είναι κατά προσέγγιση $L_i \approx 3.2$ mm. Το **δεύτερο στάδιο (State 2)** αποτελείται από την διάνοιξη μίας κωνικής (μεταβλητής διαμέτρου) διαμερούς οπής. Σε αυτό το στάδιο η αρχική διάμετρος της οπής είναι $D_u \approx 10.8$ mm, ενώ η διάμετρος εξόδου είναι $D_p \approx 7.5$ mm, **30.6% μικρότερη** από την D_u . Το **βάθος διείσδυσης**, στο **δεύτερο στάδιο**, συμβολίζεται με L_p .

Η διάμετρος ελαττώνεται από D_u προς D_p καθώς η παραμόρφωση της οπισθόπλακας (BFD) προκαλεί τον εφελκυσμό των ινών (fiber pull-out) των τελευταίων στρώσεων του συνθέτου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ίνες, των επάλληλων φύλλων, να αστοχούν σε ολόενα και μικρότερα μήκη, για δεδομένη αρχική διάμετρο οπής D_i . Στο δεύτερο στάδιο οι ίνες υφίστανται λοιπόν αστοχία με ζεύξη εφελκυσμού και διάτμησης. Όταν το σύνθετο

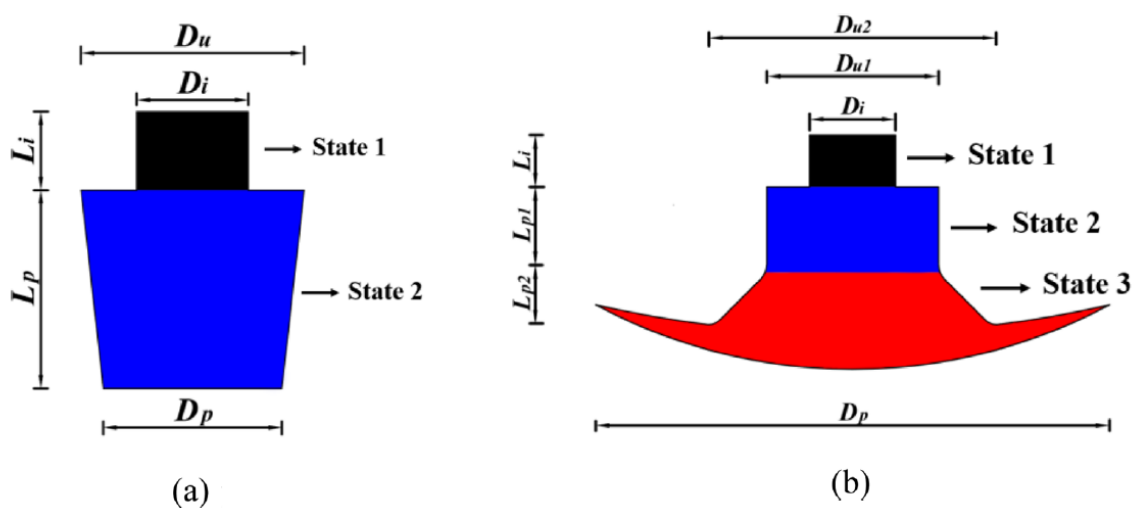
διατηρηθεί και φτάσει το μέγιστο βάθος αποτυπώματος BFS, ξεκινά να ανασύρεται και έτσι η διάμετρος της οπής μικραίνει κατά την έξοδο.

Στον Πίνακα 13 συγκεντρώνονται οι διαστάσεις των μεγεθών της Εικόνας 59.a.

Πίνακας 13 : Διαστάσεις οπών του πάνελ πάχους 10 mm για τα δύο στάδια διάνοιξης της διαμπερούς οπής [86].

Laminate	D_i (mm)	D_u (mm)	D_p (mm)	L_i (mm)	L_p (mm)
1-1	5.6	10.7	7.3	3.0	7.0
1-2	5.6	10.9	7.6	3.2	6.8
1-3	5.6	10.8	7.5	3.3	6.7

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις τομές των πάνελ παχών 20 mm και 30 mm, στις Εικόνες 59.b και 59.c αντίστοιχα, αυτά δεν διατρήθηκαν πλήρως από τα βλήματα. Παρατηρούνται στις δύο αυτές περιπτώσεις **3 χαρακτηριστικά στάδια** για κάθε τραύμα. Τα στάδια αυτά αποτυπώνονται στην Εικόνα 62.b.



Εικόνα 62 : Σχηματική αναπαράσταση της τομής των οπών των σύνθετων πάνελ UHMWPE για (a) πάχος 10 mm και (b) πάχη 20 mm και 30 mm (δεξιά) με τα αντίστοιχα στάδια διείσδυσης.

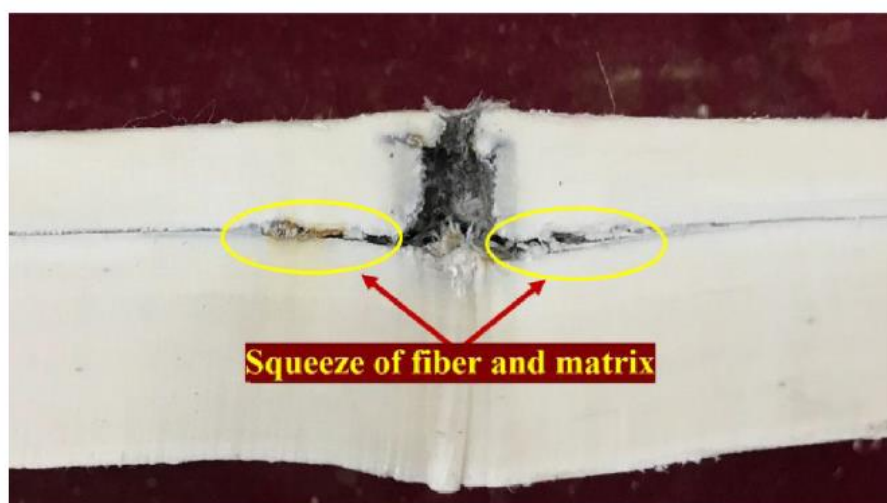
Το **πρώτο στάδιο** φαίνεται να ταυτίζεται με αυτό του πάνελ πάχους 10 mm. Πρόκειται δηλαδή για μία ομοιόμορφη οπή. Με την αύξηση ωστόσο του πάχους η διάμετρος D_i μειώθηκε, από 5.6 mm, σε 5.4 mm για το πάνελ πάχους 20 mm και σε 5.1 για το πάνελ πάχους 30 mm. Τα αντίστοιχα **βάθη διείσδυσης** L_i φαίνεται να ελαττώθηκαν λόγω της παραμόρφωσης της σφαίρας στα πρώτα 10 mm διείσδυσης, για τα δύο πάνελ πάχους 20 mm και 30 mm αντίστοιχα.

Στο **δεύτερο στάδιο** η διάμετρος της οπής αυξάνεται και διαμορφώνεται μία κυλινδρική διάνοιξη, λόγω της εκτενούς παραμόρφωσης του βλήματος. Σε αυτό το στάδιο η διάμετρος της οπής είναι D_{u1} ενώ το **βάθος διείσδυσης** είναι L_{p1} . Όπως αναφέραμε και πρωτύτερα η **παραμόρφωση του βλήματος εντονοποιείται με την αύξηση του πάχους ενός πάνελ**. Γι' αυτό το λόγο το πάνελ πάχους 30 mm φέρει τη μεγαλύτερη, συνολικά, διάμετρο αλλά και το μικρότερο βάθος τραύματος. Στον **Πίνακα 14** συγκεντρώνονται οι διαστάσεις των μεγεθών της **Εικόνας 62.b**.

Στο **τρίτο και τελικό στάδιο (State 3)** διάνοιξης της τυφλής οπής το βλήμα, έχοντας χάσει την αρχική του μορφή και την διατριτική του ικανότητα, αρχίζει να διαχέει την κινητική του ενέργεια, μέσω του μηχανισμού BFD και της (εδώ περιορισμένης) αποκόλλησης των διαστρωματωμένων φύλλων του σύνθετου πάνελ. Ο πυρήνας του βλήματος έχει πλέον παραμορφωθεί πλήρως με αποτέλεσμα η διάμετρος της τυφλής οπής να μεγιστοποιείται έως D_{u2} . Τέλος οι ίνες και η μήτρα συμπιέζονται περιφερειακά προς το εσωτερικό των τοιχωμάτων της οπής και μέσα στην διεπιφάνεια κύριας αποκόλλησης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 63**.

Πίνακας 14 : Διαστάσεις οπών των πάνελ πάχους 20 mm και 30 mm για τα τρία στάδια διάνοιξης της τυφλής οπής [86].

Laminate	D_i (mm)	D_{u1} (mm)	D_{u2} (mm)	D_p (mm)	L_i (mm)	L_{p1} (mm)	L_{p2} (mm)	L_m (mm)	\bar{L} (mm)
2-1	5.4	10.2	16.2	63.2	3.5	8.6	1.0	13.1	8.4
2-2	5.2	11.9	22.5	92.5	2.3	3.6	0.5		
2-3	5.4	11.8	22.9	104.9	2.3	3.5	0.3		
3-1	5.1	12.0	23.7	45.0	2.1	2.8	0.1	7.9	6.4
3-2	5.1	10.6	18.7	71.3	2.9	4.5	0.5		
3-3	5.0	12.8	26.5	102.5	2.6	3.1	0.6		



Εικόνα 63 : Συμπίεση των ινών και της μήτρας [86].

Η μέγιστη διάμετρος του εύρους της αποκόλλησης των φύλλων συμβολίζεται και εδώ με D_p . Λόγω του μικρού BFD του πάνελ πάχους 20 mm το εύρος αποκόλλησης του είναι

μικρότερο από το αντίστοιχο εύρος του πάνελ πάχους 30 mm. Το **βάθος διείσδυσης στο τρίτο στάδιο** είναι L_{p2} . Συγκρινόμενο με τα L_i και L_{p1} το βάθος L_{p2} είναι αμελητέο και μπορεί να αγνοηθεί. Ωστόσο κατά το τρίτο στάδιο οι μηχανισμοί θραύσης των ινών είναι πιο σύνθετοι (βλ. §3.3.4).

Ο πυρήνας της σφαίρας, μέχρι και το περας του τρίτου σταδίου, έχει δεχθεί τη μέγιστη δυνατή παραμόρφωση του και έτσι η επιφάνεια επαφής του βλήματος με το πάνελ έχει αυξηθεί σημαντικά, επομένως η επιφανειακή τάση κατά το πάχος του συνθέτου ελαττώνεται. Επιπλέον δεν υπάρχει κάποιο αιχμηρό θραύσμα ώστε να κόψει τις ίνες και επομένως είναι αρκετά απίθανο η αστοχία των ινών να οφείλεται σε έμμεσο εφελκυσμό. Με άλλα λόγια, όταν τα ορθογωνικά διαστρωματωμένα σύνθετα (διάταξη επάλληλων φύλλων με προσανατολισμό στρώσεων $[0^\circ/90^\circ]$) υπόκεινται σε κάποια εντοπισμένη επιφανειακή πίεση, τα γειτονικά φύλλα δέχονται εφελκυστική τάση λόγω της ασυντόνιστης παραμόρφωσης (Poison Deformation) στη ίδια κύρια διεύθυνση. Όταν η εφελκυστική αυτή τάση ξεπεράσει την τάση θραύσης των ινών, αυτές αστοχούν.

Όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 14** το **μέγιστο βάθος διείσδυσης** $L_m = L_i + L_{p1} + L_{p2}$, για το πάνελ πάχους 20 mm είναι **13.1 mm** και είναι κατά **65.8%** μεγαλύτερο από το αντίστοιχο βάθος του πάνελ πάχους 30 mm. Τα μέσα βάθη διείσδυσης \bar{L} των πάνελ πάχους 20 mm και 30 mm, για τις 3 βολές τους, είναι 8.4 mm και 6.4 mm αντίστοιχα. Γενικά το μέσο βάθος διείσδυσης του πάνελ πάχους 30 mm είναι κατά 23% μικρότερο από το αντίστοιχο μέσο βάθος διείσδυσης του πάνελ πάχους 20 mm [86].

Πίνακας 15 : Γενική κατηγοριοποίηση σύνθετων πάνελ UHMWPE κατά πάχος [86].

Class	Penetration depth	BFD depth	Classification standard		
			Delamination	Fiber failure	Staged failure
Thin	full	small	local	shear dominated	no more than two stages
Medium-thickness	more than half	large	overall	shear and tension	three stages
Thick	less than one third	negligible	local	shear dominated	three stages

Στην παρούσα εργασία, εφόσον η τελική μας θωράκιση περιλαμβάνει ένα κεραμικό πάνελ μπροστά από το σύνθετο πάνελ UHMWPE, επισημαίνουμε πως **το πρώτο στάδιο (State 1) της Εικόνας 62.b θα καλύπτεται** (απορροφάται) **από την θραύση του κεραμικού**. Επομένως κατά την θραυστομηχανική ανάλυση του Πειραματικού Μέρους που ακολουθεί αναμένουμε, κατά κύριο λόγο, την εμφάνιση των σταδίων 2 και 3 (States 2 & 3) στις τομές των (αντι)βαλλιστικών δοκιμών μας και ανά τα διάφορα σημεία πρόσκρουσης και διαφορετικούς τύπους βλημάτων.

Το **DOP (Depth Of Penetration)**, δηλαδή το **ποσοστό των φύλλων του πάνελ UHMWPE που έχουν διατρηθεί πλήρως** (complete penetration-CP) σε σχέση με αυτά που έχουν απλά «υποχωρήσει» (partial penetration - PP), αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό στη μελέτη των βαλλιστικών διατάξεων, σχετίζεται με το BFS, **τυπικά αυξάνεται με την πρόοδο των βολών επί της (αντι)βαλλιστικής διάταξης και συνδέεται με την σχετική τους θέση/μοτίβο αρίθμησης βολών (φαινόμενο γειτνίασης)** [86].

Όπως αναφέραμε και στο άνωθεν βιβλιογραφικό παράδειγμα, αυτό που πρακτικά δυνάμεθα να μετρήσουμε με ευκολία κατόπιν μίας βαλλιστικής δοκιμής, είναι το πάχος (σε mm) των εναπωμειάντων-μη διατρηθέντων φύλλων στην κύρια διεπιφάνεια αποκόλλησης (primary delamination plane), δηλαδή τη **μερική διείσδυση (partial penetration-PP)** εκεί όπου το βλήμα (ή τα θραύσματά του) ακινητοποιήθηκε (βλ. **Εικόνα 64**). Γνωρίζοντας όμως το αρχικό πάχος του συνθέτου UHMWPE υπολογίζουμε, ως διαφορά, και την **ολική διείσδυση (complete penetration-CP)**, δηλαδή το **πάχος των πλήρως διατρηθέντων φύλλων (DOP σε mm)**. Ο υπολογισμός αυτός ωστόσο δεν περιλαμβάνει (σαν μέγεθος) την μετατόπιση, λόγω αποκόλλησης των στρώσεων και των καμπύλων μορφών BFD που αποκτούν τα τραύματα, από το νοητό επίπεδο των σημείων πρόσκρουσης του συνθέτου. Πρόκειται λοιπόν για ένα βάθος διείσδυσης βασισμένο στο αρχικό πάχος του εκάστοτε συνθέτου (βλ. **Εικόνα 65**).

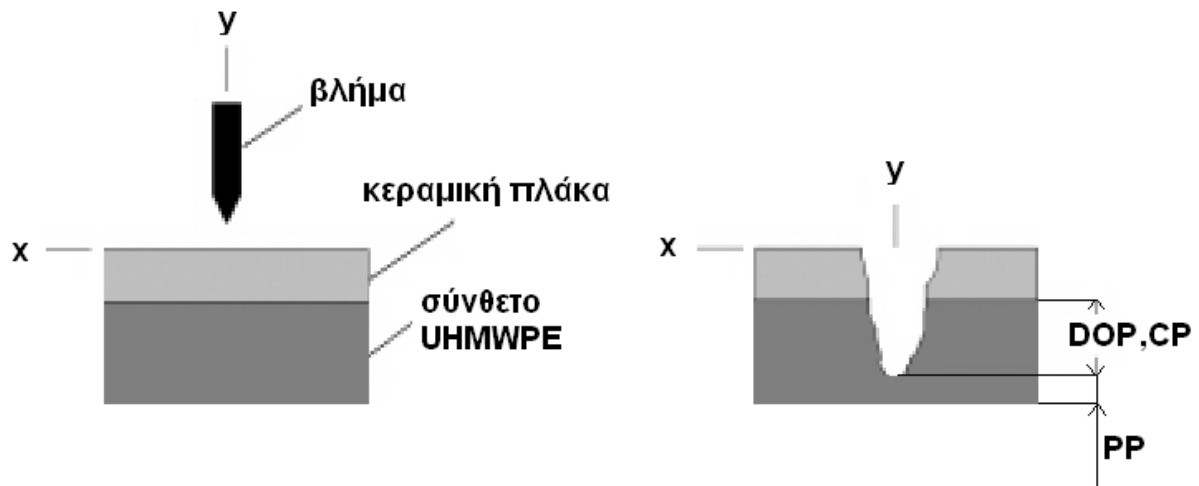
$$CP (DOP) = \text{composite total thickness} - PP [mm] \quad (12)$$

Διαιρώντας το πάχος των διατρηθέντων φύλλων CP με το, κατασκευαστικά γνωστό, πάχος του ενός φύλλου του συνθέτου μπορούμε να υπολογίσουμε, προσεγγιστικά, και τον **αριθμό των διατρηθέντων φύλλων**.

$$\text{Penetrated Layers} = \frac{CP [mm]}{\text{composite layer thickness} [mm]} \quad (13)$$

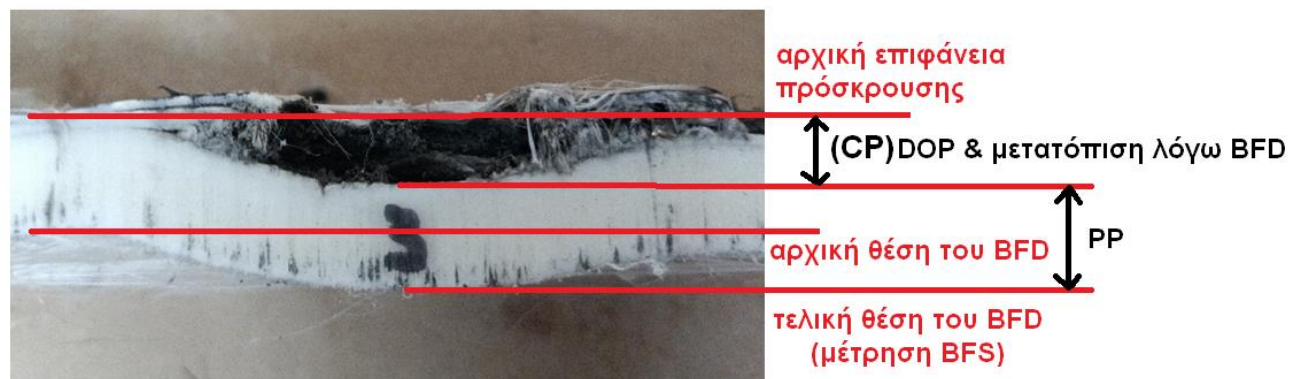
Το **DOP** μπορεί να εκφραστεί λοιπόν (εκτός ως της διαφοράς CP σε mm) και ως ποσοστό του πάχους CP των διατρηθέντων φύλλων προς το αρχικό πάχος του συνθέτου.

$$DOP = \frac{CP}{\text{composite total thickness}} \times 100 [\%] \quad (14)$$



Εικόνα 64 : Σχηματική απεικόνιση των μεγεθών DOP, CP και PP παρουσία κεραμικού.

Στον ακόλουθο **Πίνακα 16** αποτυπώνεται η σχέση του BFD (ποσοστιαία) με το DOP κατόπιν βαλλιστικών δοκιμών σε δύο αλεξίσφαιρες διατάξεις **επιπέδου III +++ (SA)** SA (Stand Alone). Η διαστρωμάτωση τους αποτελείται από αντιθραυσματική μεμβράνη - SiC κεραμικό (βλ. **Πίνακα 10**)- ενίσχυση αραμιδίου - σύνθετο UHMWPE - βαλλιστικό αφρό, ενώ τα **βλήματα είναι 6 μη διατρητικά M80 FMJ** (ανά δοκίμιο). Τα χρησιμοποιηθέντα συστατικά υλικά, εκτός των συνθέτων UHMWPE, είναι όμοια. Όμοια είναι επίσης και η επιφανειακή πυκνότητα (kg/m^2) των δύο πάνελ UHMWPE από υλικά Α και Β αντίστοιχα (περί τα 130 gr/m^2).



Εικόνα 65 : Παράδειγμα μέτρησης των μεγεθών CP, DOP και PP σε τομή σημείου βολής.

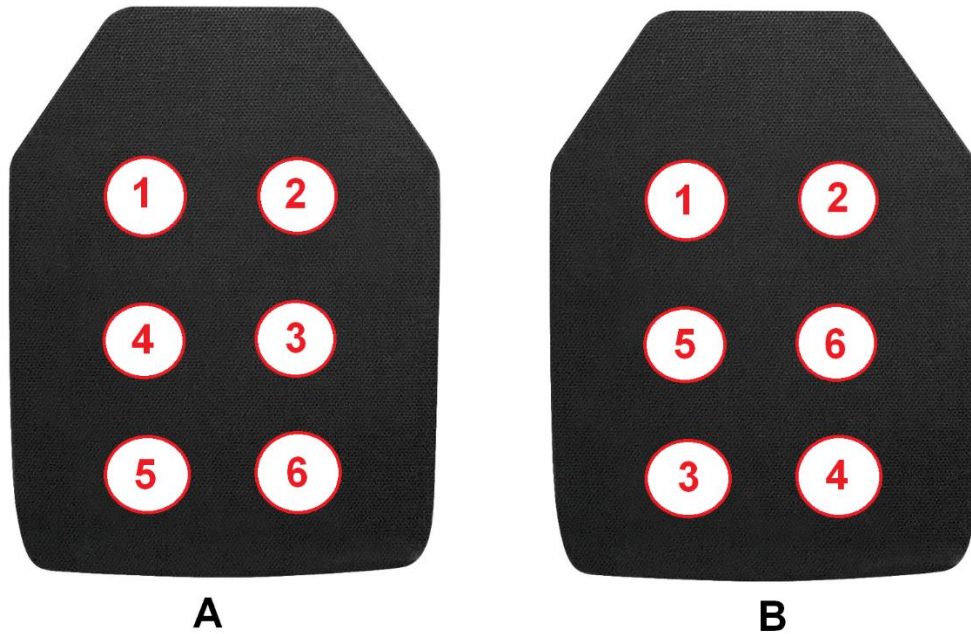
Πίνακας 16 : Σύγκριση BFS και DOP όμοιων (αντι)βαλλιστικών δοκιμών με διαφορετικά σύνθετα πάνελ UHMWPE από υλικά Α και Β.

A/A Βολής	1	2	3	4	5	6	M.O
BFS σύνθετου UHMWPE υλικού Α (mm)	46	50	50	54	50	48	49.7 > 44
DOP σύνθετου UHMWPE υλικού Α	19%	57%	50%	63%	31%	41%	43%
BFS σύνθετου UHMWPE υλικού Β (mm)	32	39	32	37	36	41	36.2 < 44
DOP σύνθετου UHMWPE υλικού Β	17%	37%	36%	5%	26%	42%	27%

Συγκρίνοντας του μέσους όρους των BFS (δεξιά στήλη) των υλικών A και B είναι προφανές ότι το B κατέχει μεγαλύτερη αντοχή από το A, καθώς το τελικό του βάθος εμπίπτει στα επιτρεπτά όρια (BFS B < 44 mm ενώ BFS A > 44 mm). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται μεν και από την μέση τιμή των DOP των 2 υλικών αλλά δεν επιβεβαιώνεται απόλυτα από τις τιμές του DOP κατά την πρόοδο των βολών 1 έως 6, καθώς η διάταξη των θέσεων των βολών επηρεάζει την μεταφορά του φαινομένου αποκόλλησης, περιμετρικά των σημείων πρόσκρουσης αλλά και κατά το πάχος του συνθέτου. Παρ' όλο λοιπόν που τα δοκίμια του **Πίνακα 15** είναι πανομοιότυπα, εξαιρουμένου του υλικού του συνθέτου UHMWPE, δεν είναι εντελώς συγκρίσιμα, λόγω της διαφορετικής αρίθμησης βολών.

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι υψηλής σημασίας και θα προκύψει στη συνέχεια (Πειραματικό Μέρος), συνδυάζοντας τα βαλλιστικά δεδομένα, τις μηχανικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων (3 point bending) και τον έλεγχο της συνεκτικότητας των φύλλων UHMWPE του εκάστοτε υλικού μέσω των επακόλουθων δοκιμών αποκόλλησης (T-Peel).

Το μοτίβο αρίθμησης των βολών για τα 2 σύνθετα υβριδικά δοκίμια UHMWPE υλικού A και B του **Πίνακα 16**, φαίνονται στην **Εικόνα 66**.



Εικόνα 66 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των δοκιμών υλικού A (αριστερά) και υλικού B (δεξιά) του Πίνακα 16.

3.4 Βαλλιστικοί αφροί

Στις πειραματικές διατάξεις αλεξίσφαιρων πλακών κατηγορίας Stand-Alone (SA) ως τελευταίο στρώμα υλικού (μεταξύ της σύνθετης πλάκας UHMWPE και του φορέα) χρησιμοποιούνται βαλλιστικοί αφροί με στόχο την αφομοίωση του BFS επί της πλαστελίνης και αντίστοιχα την προστασία του χρήστη από την παραμόρφωση της σύνθετης πλάκας UHMWPE.

Το στρώμα του αφρού στη βαλλιστική διάταξη αναλαμβάνει τον ρόλο του αποστάτη μεταξύ του χρήστη και της σχηματιζόμενης παραμόρφωσης της σύνθετης πλάκας UHMWPE (μηχανισμού BFD). Για τον λόγο αυτό οι χρησιμοποιούμενοι αφροί είναι ελαφριοί, με **πυκνότητα** της **τάξης των 70 kg/m^3** . Ο λόγος εντοπίζεται στο να μην επιβαρύνεται η κατασκευή με αχρειαστο βάρος. Ο βαλλιστικός αφρός απορροφά ταυτόχρονα τμήμα της εναπομείνουσας ωστικής ενέργειας.



Εικόνα 67 : Τυπικό παράδειγμα βαλλιστικού αφρού της εταιρείας ZOTEK® N – Zotefoams [73].

Κάποιες φορές ο βαλλιστικός αφρός συνδυάζεται με μία στρώση πολυκαρβονικού ενισχυτικού φύλλου (polycarbonate backing sheet) πάχους 1mm του οποίου ο ρόλος είναι να απορροφά τα τελευταία ποσά ενέργειας του βλήματος διαμοιράζοντας την ενέργεια αυτή σε μεγαλύτερο εμβαδό. Είναι προτιμότερο ένα ρηχό και ευρύ τραύμα παρά ένα συγκεντρωμένο και βαθύ, με σκοπό την αφομείωση του BFS και των εν δυνάμει τραυματισμών του χρήστη.



Εικόνα 68 : Πολυκαρβονικό φύλλο πάχους 1 mm [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].

Αν και η λειτουργικότητα των βαλλιστικών αφρών είναι δεδομένη, τα βέλτιστα μηχανικά χαρακτηριστικά και το πάχος τους χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Έπειτα από έρευνα στην παγκόσμια αγορά βαλλιστικών αφρών και πειραματισμών με διαφορετικούς αφρούς επιβεβαιώνεται παραδειγματικά η σημαντικότητα του πάχους του αφρού/αποστάτη, κυρίως μεταξύ των δειγμάτων 1,2 και 3 σύνθετου UHMWPE τύπου Α, στον ακόλουθο **Πίνακα 17**.

Πίνακας 17 : Συνολικό βάθος αποτυπώματος BFS για διαφορετικά πάχη και τύπους βαλλιστικών αφρών για δεδομένο πάχος διαστρωματωμένου συνθέτου UHMWPE υλικού A και δεδομένης κεραμικής πλάκας SiC.

A/A Δοκιμίου	Φύλλα (Layers) διαστρωματωμένου συνθέτου UHMWPE τύπου A	Πυκνότητα kg/m ²	Πάχος μονοκεραμικής πλάκας από SiC (mm)	Πάχος και τύπος αφρού	BFS ανά αριθμό βολής (mm)			Μέση Τιμή BFS βολών 1,2,3 (mm)	BFS ανά αριθμό βολής (mm)			Μέση Τιμή BFS βολών 4,5,6 (mm)	Ολική Μέση Τιμή BFS (mm)
					1	2	3		4	5	6		
1	79	10.59	5.2	6 mm πολυαμιδίου	46.5	45.8	41.2	44.5	54.2	46.2	38.3	46.2	45.4
2	79	10.59	5.2	9 mm πολυαμιδίου	39.0	43.7	43.6	42.1	44.6	46.8	47.2	46.2	44.2
3	79	10.59	5.2	12 mm πολυαμιδίου	25.6	40.1	38.0	34.6	43.0	44.1	56.8	48.0	41.3
4	79	10.59	5.2	9 mm nanofoam	26.4	35.6	40.2	34.1	43.7	43.1	51.8	46.2	40.1

Στην τελευταία στήλη του **Πίνακα 17** παρατηρούμε ένα αρκετά μικρότερο αποτύπωμα BFS στο δοκίμιο 4 όπου χρησιμοποιήθηκε νανο-αφρός πάχους 9 mm από το αντίστοιχο BFS του πολυαμιδικού αφρού, ίδιου πάχους, του δοκιμίου 2. Βλέπουμε λοιπόν πως διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, για δεδομένο πάχος αφρού, οδηγούν σε διαφορετική απορρόφηση ενέργειας η οποία και αποτυπώνεται στο BFS.

Από τα βαλλιστικά αποτελέσματα, κυρίως, των δειγμάτων 2,3 και 4 εγείρεται ένα σημαντικό ζήτημα, αυτό της διερεύνησης ως προς τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες των βαλλιστικών αφρών, της πυκνότητάς τους, αλλά και της υβριδοποίησης διαφορετικών αφρών με άλλα υλικά (π.χ πολυκαρβονικά φύλλα-polycarbonate sheets, μεμονομένα φύλλα ή ολιγόφυλλες δομές πάνελ από UHMWPE) [71, 72].

Περαιτέρω έρευνα, ωστόσο, γύρω από την συμβολή των βαλλιστικών αφρών στην συνολική επίδοση των (αντι)βαλλιστικών θωρακίσεων ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το μοτίβο αρίθμησης των βολών για τα 4 τελικά σύνθετα υβριδικά δοκίμια UHMWPE τύπου A του **Πίνακα 17**, φαίνεται στην **Εικόνα 69**.



Εικόνα 69 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των τεσσάρων δοκιμών υλικού Α του Πίνακα 17.

Όπως έχουμε αντιληφθεί, η τελική απόδοση μιας θωράκισης είναι πολυπαραγοντική καθώς εξαρτάται αρχικά από τη συμπεριφορά του καθενός συστατικού του υβριδικού συνθέτου (κεραμικό, σύνθετη πλάκα UHMWPE, βαλλιστικός αφρός), από τον κατάλληλο και επαρκή συνδυασμό τους κατά την μορφοποίηση του τελικού προϊόντος αλλά και από τον τρόπο δοκιμής τους, δηλαδή το μοτίβο αρίθμησης των βολών και φυσικά το είδος του βλήματος.

Για παράδειγμα με ίδιες συνθήκες πάχους των κεραμικών πλακών και του βαλλιστικού αφρού, για ένα άλλο σύνθετο UHMWPE ίδιου πάχους (π.χ υλικού Β η C) με το ίδιο μοτίβο αρίθμησης βολών και ίδιο τύπο βλημάτων, θα προκύψει μικρότερη η μεγαλύτερη τιμή τελικού βάθους BFS ανά βολή. Το ίδιο πιθανά θα συμβεί και αν αλλάξει μόνο το μοτίβο αρίθμησης ενώ ο τύπος της σύνθετης πλάκας παραμένει ο ίδιος.

Εδώ εμπίπτει και ο λόγος για τον οποίο συχνά υπολογίζεται ξεχωριστά ο μέσος όρος του βάθους BFS των τριών πρώτων βολών, ύστερα των τριών τελευταίων βολών και εν τέλη ο συνολικός μέσος όρος ανά βολή, όπως στον **Πίνακα 17**. Ενώ τα δοκίμια σταδιακά υποβαθμίζονται κυρίως λόγω του φαινομένου της αποκόλλησης των στρώσεων του συνθέτου και του μηχανισμού BFD είναι λογικό η συμβολή των πρώτων βολών να είναι υψηλής σημασίας, συμπεριλαμβάνοντας πάντα το μοτίβο αρίθμησης. Η αθροιστική ρηγμάτωση της κεραμικής πλάκας παίζει και αυτή εξίσου σημαντικό ρόλο στην αποδυνάμωση της διάταξης. Λαμβάνοντας τις ενδιάμεσες μέσες τιμές του βάθους BFS έχουμε μία καλύτερη εικόνα της εξέλιξης της καταστροφικής καταπόνησης της θωράκισης πριν εκφυλιστεί εντελώς η κεραμική πλάκα.

3.5 Σχηματισμός τελικής θωράκισης SAPI

Όπως αναφέραμε και στην §3.1.4 η συνιθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή προστατευτικών οπλισμών **SAPI** και συγκεκριμένα **θωρακίσεων επιπέδου III +++ (SA)** (για ελαφριά φορητά όπλα) είναι η συγκόλληση μίας αντιθραυσματικής επίστρωσης (sprall liner), μίας κεραμικής πλάκας (είτε επίπεδης είτε κυρτής με προαιρετική ενίσχυση αραμιδίου), ενός πολύστρωτου σύνθετου UHMWPE και μίας προστατευτικής στρώσης βαλλιστικού αφρού. Όλοι οι συντελεστές της θωράκισης, εκτός του βαλλιστικού αφρού, τοποθετούνται σε ειδικό **κλίβανο (autoclave)** όπου μέσω μιας διαδικασίας αναθέρμανσης υπό πίεση (autoclave curing) το σύνθετο «μαλακώνει» και ενσωματώνεται ομοιόμορφα επί του κεραμικού. Ο βαλλιστικός αφρός από την άλλη προσκολλάται στο προϊόν του κλιβάνου σε δεύτερο χρόνο.

Τα παραπάνω συστατικά υλικά, εκτός του βαλλιστικού αφρού, τοποθετούνται αρχικά, με την παραπάνω σειρά διαστρωμάτωσης, σε ειδικές σακούλες κενού (vacuum seal bags) όπου και αφαιρείται ο αέρας μέσω μία αντλίας κενού σε υποπίεση περί τα -1 bar.



Εικόνα 70 : Προσαρμογή κεραμικής πλάκας πάνω πολύστρωτο σύνθετο, πριν τον κλίβανο [63].

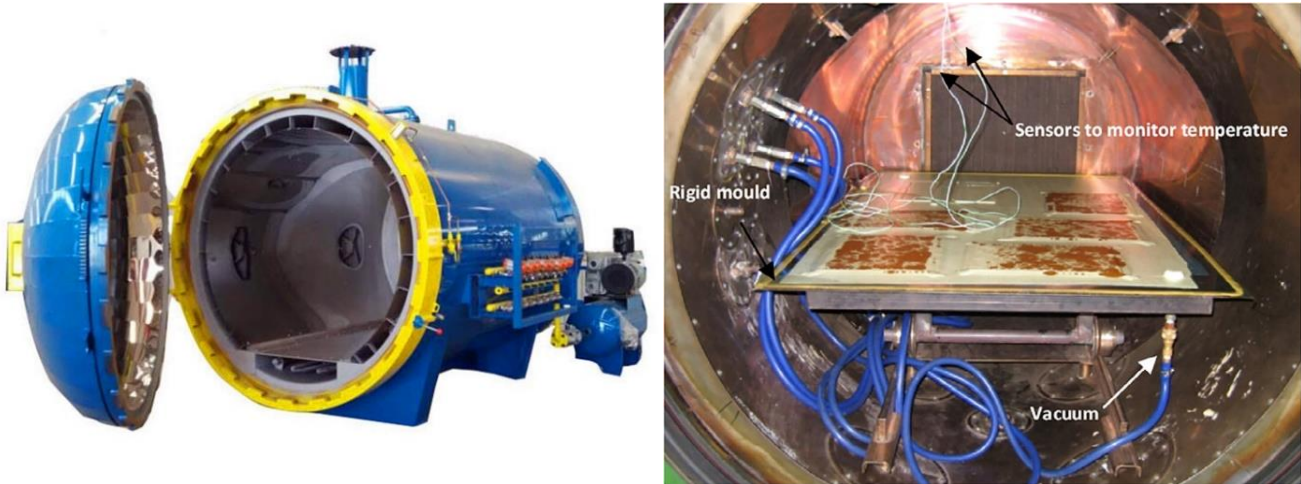
Όταν τα υλικά (το sprall liner, κεραμικό ή και το αραμίδιο και το σύνθετο εισέρχονται στον κλίβανο (βλ. **Εικόνα 71**) με σκοπό την συσσωμάτωση τους ξεκινά ένας **νέος δεύτερος θερμικός κύκλος για τις ίνες** του συνθέτου.

Εφαρμόζεται η ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία που απαιτείται ώστε να μπορέσει το σύνθετο UHMWPE να καμφθεί χωρίς να υποβαθμιστεί λόγω θερμικής κόπωσης. Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία που επιτρέπει την κάμψη του συνθέτου εφαρμόζεται το μέγιστο δυνατό φορτίο συνδυάζοντας τις συνθήκες κενού των σακούλων (στα -1 bar) και την θετική πίεση (6-9 bar) του κλειστού θαλάμου του κλιβάνου, προκειμένου να σχηματισθεί ένας ομοιόμορφος δεσμός μεταξύ των δύο σωμάτων και να επιτευχθεί γεωμετρική συνάφεια.

Παρ' όλο που το σύνθετο και η κεραμική πλάκα έχουν ένα καθορισμένο σχήμα, υπάρχει συχνά κάποιο εγγενές διάκενο μεταξύ των δύο υλικών κυρίως λόγω γεωμετρικής

αναντιστοιχίας του καλουπιού της πρέσας (του θερμοσυμπιεστικού κύκλου κατασκευής του πολύστρωτου συνθέτου) και του μονοκεραμικού του εκάστοτε κατασκευαστή.

Στην περίπτωση, φυσικά, που επιδιώκαμε να ενσωματώσουμε το σύνθετο επάνω στο κεραμικό χωρίς επαναθέρμανση του συσσωματώματος αλλά μόνο μέσω της υποπίεσης κενού και της πίεσης του κλιβάνου θα υπήρχε μεγάλος κίνδυνος θραύσης του κεραμικού, λόγω της ψαθυρής του φύσης.



Εικόνα 71 : Παράδειγμα αυτόματου κλιβάνου αναθέρμανσης-σκλήρυνσης (autoclave curing) σύνθετων υλικών (αριστερά) με ενδεικτική την εσωτερική του διάταξη (δεξιά) [64,65].

Είναι λογικό πως αυτή η αναθέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε, περαιτέρω, ανεπιθύμητη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών UHMWPE. Παρ'όλα αυτά υπάρχουν λίγα σχετικά δημοσιεύματα σχετικά με την έκταση της επίδρασής της αναθέρμανσης αυτής στη (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά του τελικού προϊόντος [63].

Επισημαίνεται πως η επαναθέρμανση εφαρμόζεται μονάχα σε περίπτωση μονοκεραμικής πλάκας. Σε περίπτωση που γίνεται χρήση κεραμικού σε μορφή φολίδων, οι ατέλειες της γεωμετρικής αντιστοιχίας μοιράζονται στην επιφάνεια του συνθέτου που περιγράφεται/καλύπτεται πλέον από μικρά κομμάτια κεραμικού. Σε αυτήν τη περίπτωση αρκεί επομένως η εφαρμογή του φορτίου μέσω υψηλής πίεσης του κλειστού θαλάμου του κλιβάνου.

Από την άλλη η αντιθραυσματική επίστρωση και το αραμίδιο, λόγω πάχους και φύσης των υλικών τους, προσαρμόζονται με ευκολία στο υπόλοιπο συσσωμάτωμα.

Για την κόλληση της αντιθραυσματικής επίστρωσης με το κεραμικό και είτε του κεραμικού με το σύνθετο πάνελ UHMWPE είτε του κεραμικού με την αραμιδική ενίσχυση και ύστερα με το σύνθετο πάνελ, επιστρατεύεται, για τις δύο ή τρεις αντίστοιχα αυτές διεπιφάνειες,

κάποιο **συγκολλητικό μέσο (adhesive)** ή συνδυασμός συγκολλητικών μέσων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων συγκολλητικών μέσων, με χρήση στη (αντι)βαλλιστική, είναι οι **ελαστομερείς κόλλες πολυουρεθάνης, ακρυλικού, θερμοπλαστικά φιλμ** (π.χ πολυαιθυλενίου), **εποξειδικές (epoxy) και πολυουρεθανικές ριτίνες**. Τα συγκολλητικά αυτά διακρίνονται από την **υψηλή τους συμβατότητα** με διαφορετικές επιφάνειες (κεραμικών και σύνθετων υλικών) και την **χαμηλή δυσκαμψία** κατόπιν σκλήρυνσης τους [78].

Η επίδραση των συγκολλητικών αυτών μέσων, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψην καθώς ο ρόλος του δεν περιορίζεται μόνο στην συγκράτηση των επιμέρους υλικών. Η χρήση της σωστής κόλλας μπορεί να προβεί ζωτικής σημασίας καθώς η βασικότερη λειτουργία της περιλαμβάνει τη μεταφορά των κρουστικών κυμάτων, από το κεραμικό στο σύνθετο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ζημιά που προκαλείται στο κεραμικό από τα ανακλώμενα κρουστικά κύματα.

Μία τυπική συγκολλητική διαδικασία είναι μια διαδικασία ένωσης υλικών κατά την οποία η κόλλα, που τοποθετείται μεταξύ των προς κόλληση επιφανειών, στερεοποιείται για να δημιουργήσει έναν κολλητικό δεσμό μεταξύ τους. Μια κόλλα μπορεί να έχει τις ανώτατες δυνατές μηχανικές ιδιότητες κατά τη θερμοσκλήρυνση της. Ωστόσο μια ισχυρά συγκολλημένη διεπιφάνεια μπορεί να προκύψει μόνο εάν οι προς συγκόλληση επιφάνειες προετοιμαστούν κατάλληλα. Επομένως, δύο κύριοι παράγοντες που παίζουν ρόλο στη συγκόλληση των επιφανειών είναι ο τύπος της κόλλας και η τεχνική προεπεξεργασίας των προς συγκόλληση επιφανειών.

Προκειμένου να επιτύχουμε μεγαλύτερη διεπιφανειακή αντοχή και άρα η μέγιστη δυνατή αντοχή του τελικού υβριδικού συνθέτου είναι απαραίτητο να «συντονιστούν» οι ιδιότητες των προς συγκόλληση υλικών (συνθέτου και κεραμικού) εξαρχής με τέτοιο τρόπο που η κόλλα να ενσωματωθεί εύκολα στη «χημεία» των διεπιφανειών. Η «χημεία» και η μορφολογία των συμμετεχόντων υλικών, ελέγχει εξ' ολοκλήρου την διαβρεξιμότητα και την (μηχανική) ικανότητα αγκύρωσης της κόλλας [77].

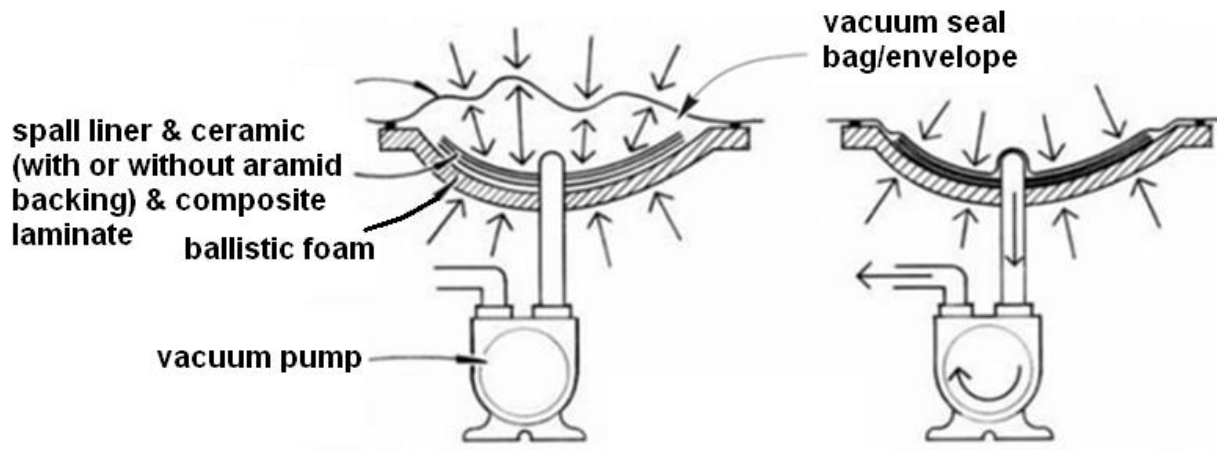
Λόγω της διαφορετικής φύσης λοιπόν των 2 υλικών, (spall liner/σύνθετου πάνελ και κεραμικού) το κεραμικό καθαρίζεται με κάποιο διαλυτικό υγρό (dissolver) ώστε να απομακρυνθεί η σκόνη από τις δύο όψεις του και να κολλήσει στην αντιδραυσματική μεμβράνη και στο σύνθετο πάνελ αποτελεσματικά.

Όσον αφορά τη διεπιφάνεια του σύνθετου πάνελ με τον βαλλιστικό αφρό, εκεί χρησιμοποιούνται συνήθως μη εξειδικευμένες κόλλες (π.χ βενζινόκολλα ή αυτοκόλλητη ταινία διπλής όψης).

Εν συνεχεία της παραγωγικής διαδικασίας της τελικής θωράκισης, ακολουθεί απόψυξη του συσσωματώματος στον κλίβανο, με αργό ρυθμό, υπό πίεση (περί τα 8 bar) και θερμοκρασία περιβάλλοντος, προκειμένου το κεραμικό μέρος να μη ραγίσει (λόγω της διαφοράς στο συντελεστή θερμικής διαστολής-CTE αυτού και του συνθέτου), να

αποφευχθεί η επαναφορά του συνθέτου και να διατηρηθεί η βέλτιστη γεωμετρική συνάφεια του με το κεραμικό.

Στην προκείμενη εργασία τα τελικά προϊόντα SAPI, τα οποία και υπόκεινται σε βαλλιστικές δοκιμές (στο Πειραματικό Μέρος) δεν υφίστανται την συγκόλληση μέσα σε κλίβανο (autoclave). Με σκοπό μια γρηγορότερη και οικονομικότερη παραγωγική διαδικασία, η αντιθραυσματική επίστρωση (spall liner), το κεραμικό (ή και η αραμιδική ενίσχυση), το πολύστρωτο σύνθετο (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος πλέον) αλλά και ο βαλλιστικός αφρός, αφού έχουν κολληθεί διαστρωματικά με τα κατάλληλα συγκολλητικά (adhesives), τοποθετούνται μέσα στις ειδικές σακούλες κενού (vacuum seal bags) όπου και πάλι αφαιρείται ο αέρας μέσω μία αντλίας κενού (vacuum pump) σε υποπίεση τώρα περί τα -0.4 bar (βλ. Εικόνες 72 και 73).



Εικόνα 72 : Παράδειγμα σχηματικής απεικόνισης μίας διάταξης συγκόλλησης του τελικού υβριδικού συνθέτου.



Εικόνα 73 : Συγκόλληση αντιθραυσματικής επίστρωσης, μονοκεραμικού ,πολύστρωτου συνθέτου UHMWPE και βαλλιστικού αφρού σε σακούλες κενού [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].

Κατόπιν το συναρμολόγημα τοποθετείται σε νερό (θερμοκρασίας περίπου 90°C) ενώ ταυτόχρονα η υποπίεση αυξάνεται στα -1 bar. Εάν η υποπίεση εφαρμοστεί κατευθείαν στα -1 bar υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ριγμάτωσης του κεραμικού.

Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται μορφοποίηση του συνθετου επάνω στο κεραμικο, καθώς το πρώτο «αγκαλιάζει» την γεωμετρία του δεύτερου, ενώ έπεται η συγκόλληση αυτών και των υπόλοιπων συντελεστών, λόγω τήξης των συγκολλητικών μέσων, σε περίπτωση χρήσης θερμοπλαστικών φιλμ ή λόγω σκλήρυνσης (curing), σε περίπτωση χρήσης εποξειδικών και πολυουρεθανικών ριτινών.

Ακολουθεί και σε αυτήν την παραγωγική μέθοδο ψύξη του τελικού προϊόντος σε νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος (< 50 °C).



Εικόνα 74 : Θωράκιση χωρίς αντιθραυσματική προστασία και προ συγκόλλησης (αριστερά) και με αντιθραυσματική προστασία (δεξιά) κατόπιν συγκόλλησης [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].

Σημειώνεται, σε αυτό το σημείο, πως εάν ο βαλλιστικός αφρός κατέχει σημαντικές θερμοκρασιακές ιδιότητες (π.χ υψηλή θερμοκρασία θερμοδιαμόρφωσης περί τους 100 °C) συμπεριλαμβάνεται στον κύκλο επαναθέρμανσης (μέσω της υποπίεσης σε σακούλες κενού). Ειδικά προσκολλάται στο υπόλοιπο συσσωμάτωμα, πίσω από το σύνθετο πάνελ UHMWPE, σε δεύτερο χρόνο (όπως στην συγκόλληση μέσω κλιβάνου) υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος και με τον κατάλληλο συγκολλητικό παράγοντα ώστε να μην επηρεαστούν οι μηχανικές του ιδιότητες αλλά κυρίως οι διαστάσεις του.

Η τελική μορφή μίας θωράκισης SAPI επιπέδου III+++ (SA) κατά NIJ Standard-0101.06 μετά από ντύσιμο με ειδικό κάλυμα/αμπαλάζ φαίνεται στην **Εικόνα 75**. Ακολουθούν δε βαλλιστικές δοκιμές σε αντίστοιχες θωρακίσεις στην **§5.1** του Πειραματικού Μέρους της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 75 : Παράδειγμα τελικής μορφής θωράκισης SAPI επιπέδου III+++ (SA) κατά NIJ Standard-0101.06 [79].

4. Πρότυπα μηχανικών δοκιμών

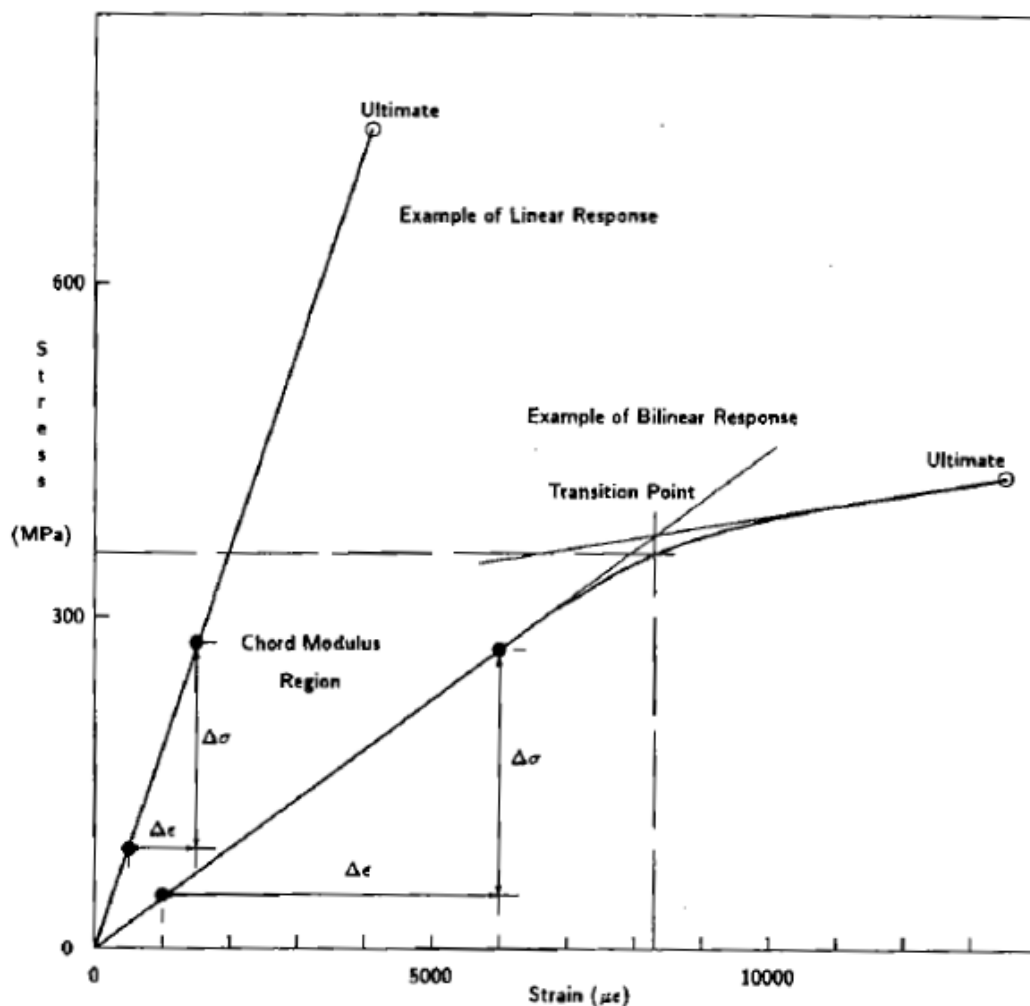
4.1 Αντοχή σε εφελκυσμό (Όριο θραύσης)

Το **όριο θραύσης των σύνθετων υλικών** A, B και C, όπως ήδη σημειώθηκε, μειώνεται εξαιτίας των θερμικών κύκλων στους οποίους υποβάλλεται το σύνθετο προκειμένου να φτάσει στην τελική επιθυμητή μορφή. Δοκιμές εφελκυσμού σε φύλλα $[0^\circ/90^\circ]_2$ συνθέτου UHMWPE ή και σε στρωματοποιημένα σύνθετα (ενοποίηση των φύλλων με θερμοσυμπίεση) καταλήγουν στο συμπέρασμα πως **το όριο θραύσης (UTS) του υλικού μειώνεται εξαιτίας της επεξεργασίας** [19].

Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ανόπτηση των ινών η οποία με τη σειρά της προκαλεί κυματισμό στην δομή τους λόγω της απώλειας της κρυσταλικότητας. Ο κυματισμός αυτός προκαλεί ανομοιόμορφη φόρτιση των ινών και οδηγεί στην αστοχία τους. Είναι επομένως σημαντικό να κατανοήσουμε πώς η επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζει τις ιδιότητες της ίνας ώστε να αποφύγουμε την περαιτέρω υποβάθμιση τους [63]. Όπως προαναφέραμε, σύμφωνα με τον Cunniff, η υψηλή αντοχή των ινών είναι κυριαρχεί στην καλή (αντι)βαλλιστική απόδοση μίας θωράκισης [15].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή εφελκυσμού κατά **ASTM D3039/D3039M** (American Society for Testing and Materials) για τη μέτρηση της δύναμης (ή της τάσης) που απαιτείται για τη θραύση ενός δοκιμίου και τη μέτρηση της εκατοστιαίας επιμήκυνσης πριν τη θραύση [89]. Οι δοκιμές εφελκυσμού παράγουν ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης/stress-strain (%) (βλ. **Εικόνα 76**) ή δύναμης-επιμήκυνσης/force-extension, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (Young's modulus).

Δεδομένου ότι οι φυσικές ιδιότητες πολλών υλικών μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μερικές φορές είναι σκόπιμο να δοκιμάζονται τα υλικά σε θερμοκρασίες που προσομοιώνουν το περιβάλλον πραγματικής τους χρήσης. Στην προκείμενη εργασία τα δοκίμια δοκιμάζονται σε **θερμοκρασία περιβάλλοντος 20-25 °C** ενώ για **δοκιμή υπό αυξημένη ή μειωμένη θερμοκρασία** σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος, απαιτείται η εγκατάσταση της μηχανής δοκιμής μέσα σε ένα ειδικά ελεγχόμενο θερμοθάλαμο.



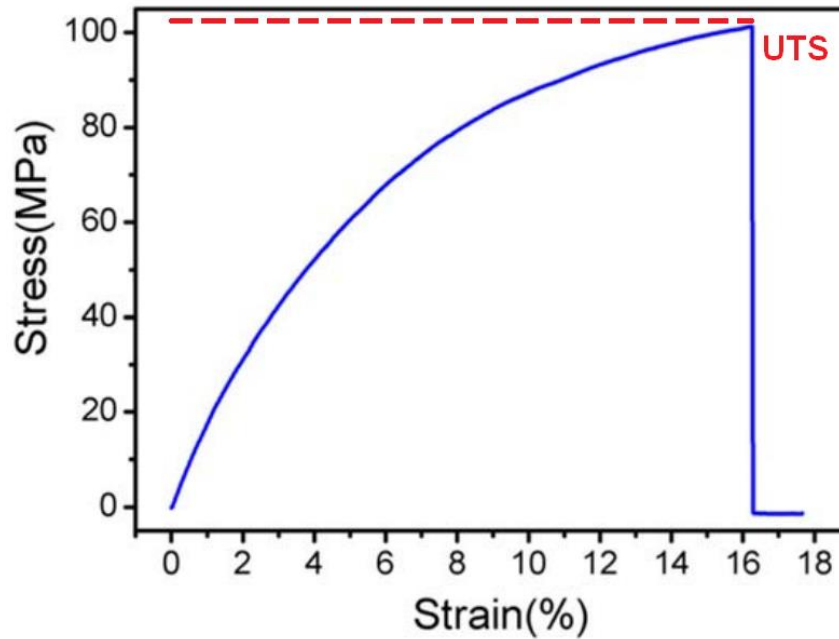
Εικόνα 76 : Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Stress-Strain curves) κατά ASTM D3039/D3039M [89] .

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η τυπική μορφή ενός διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης (stress-strain ή δύναμης επιμήκυνσης) ενός σύνθετου δοκιμίου ινών UHMWPE, υπό εφελκυσμό, λαμβάνει την μορφή της **Εικόνας 77**.

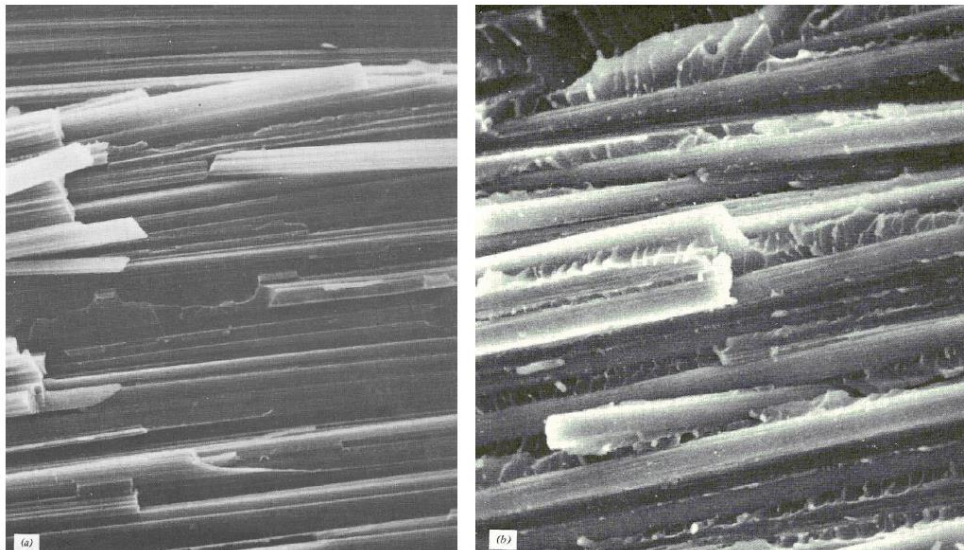
Παρατηρούμε πως οι ίνες αστοχούν απότομα στο όριο θραύσης (UTS). Η τάση εφελκυσμού ακολουθεί μία ανωδική καμπύλη πορεία μέχρι το σημείο εκείνο της επιμήκυνσης όπου συμβαίνει καταστροφή των ινών ενώ εσωτερικά του δοκιμίου λαμβάνουν σταδιακά χώρα πολλαπλές μικροθραύσεις (microfractures-βλ. **Εικόνα 78**).

Φαίνεται πως δεν εμφανίζεται όριο ελαστικότητας (yield strength) αλλά ούτε διακριτός διαχωρισμός της γραμμικής/ελαστικής από την πλαστική περιοχή, όπως θα αναμενόταν από την καμπύλη της **Εικόνας 76**. Αυτό συμβαίνει καθώς η μήτρα που συγκρατεί τις ίνες αστοχεί σταδιακά και καθ'όλη τη διάρκεια της επιμήκυνσης του δοκιμίου διότι, όπως προαναφέραμε, αυτή κατέχει μικρή περιεκτικότητα κατόγκο (<20%) αλλά και τον ρόλο

του «ενισχυτικού-συγκολλητικού» των ινών. Αυτός ο δευτερεύον ρόλος και το μικρό όριο θραύσης της ένταντι των ινών την καθιστούν «αμελητέα» στην μελέτη της εξέλιξης του φαινομένου και επομένως δεν είναι εμφανές το σημείο στο οποίο η μήτρα, έχοντας πλήρως αστοχήσει, «διαχωρίζεται» από τις ίνες.



Εικόνα 77 : Τυπική μορφή διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης (stress-strain) εφελκυσμού συνθέτου ινών UHMWPE [96].

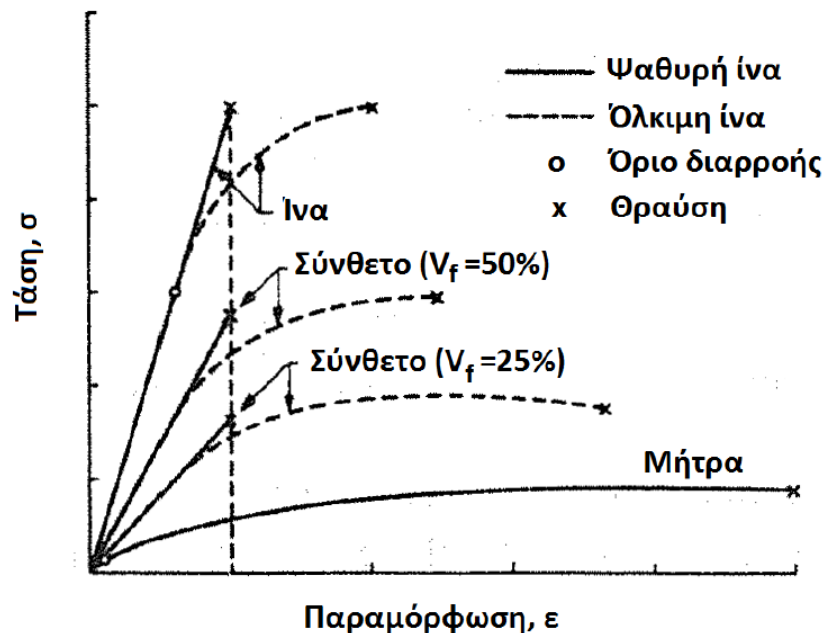


Εικόνα 78 : Μικρογραφήματα SEM επιφάνειας θραύσης ινών (a) υψηλού μέτρου ελαστικότητας, (b) υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό (πολυμερική μήτρα) [98].

Γενικά σύνθετα με ψαθυρές ίνες (όπως είναι οι ίνες γυαλιού-fiber glass) αστοχούν στην παραμόρφωση θραύσης των ψαθυρών ινών. Εάν όμως οι ίνες είναι σε θέση να παραμορφωθούν πλαστικά μέσα στη μήτρα, συχνά η παραμόρφωση θραύσης των ινών μέσα στο σύνθετο είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή όταν οι ίνες καταπονούνται αυτοτελώς (χωρίς την παρουσία της μήτρας). Στην τελευταία περίπτωση η παραμόρφωση θραύσης του συνθέτου υλικού μπορεί να είναι μεγαλύτερη αυτής των ινών (βλ. **Εικόνα 79**).

Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τιμών παραμόρφωσης θραύσης διευρύνεται όταν μειώνεται το κλάσμα όγκου των ινών v_f της **σχέσης (3)** ή όταν αυξάνεται ο λόγος αντοχή μήτρας/αντοχή ίνας.

Στην περίπτωση των δικών μας συνθέτων οι ίνες UHMWPE κυριαρχούν μέσα σε πολυμερικές (όλκιμες) μήτρες ρητίνης (PU ή SIS) πολύ μικρότερης αντοχής και παραμορφώνονται ,αρχικά ελαστικά και εν τέλη πλαστικά, επομένως η παραμόρφωση θραύσης τους μπορεί να «ταυτιστεί» με την παραμόρφωση θραύσης του συνθέτου.

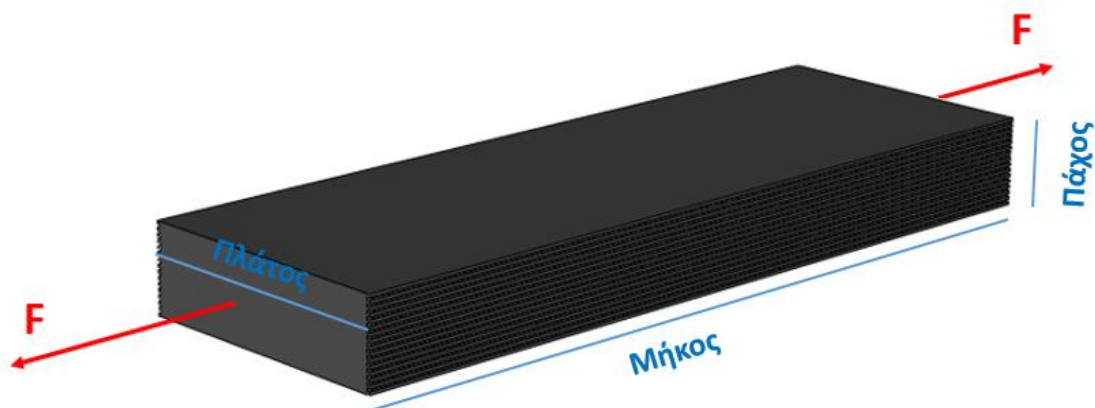


Εικόνα 79 : Καμπύλες υποθετικών συνθέτων με όλκιμες και ψαθυρές ίνες και όλκιμη μήτρα [97].

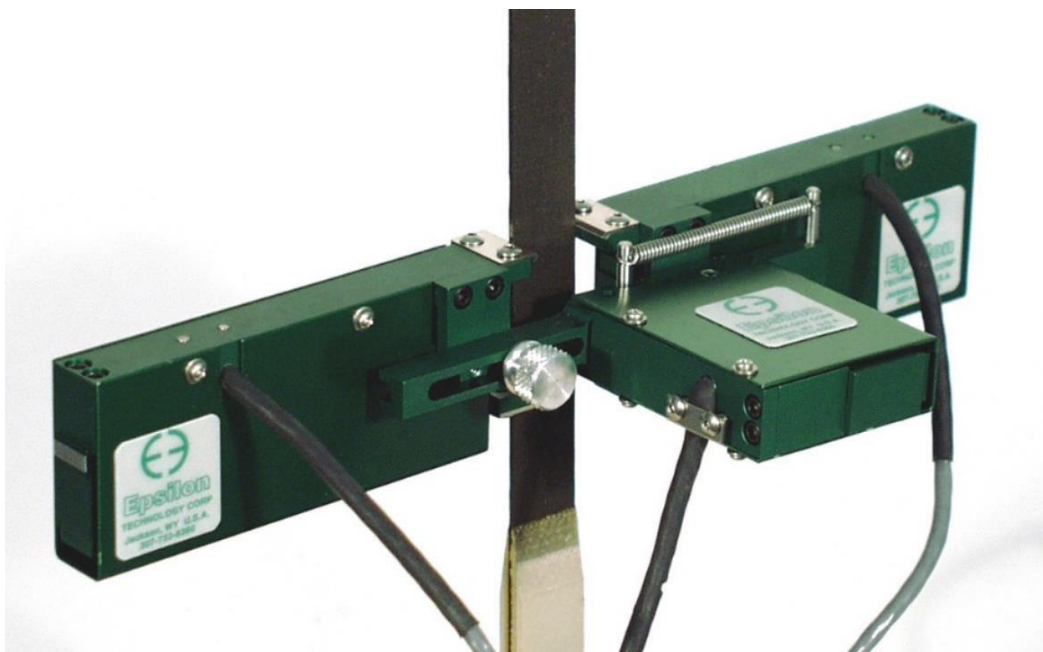
Για το ASTM D3039/D3039M η ταχύτητα δοκιμής μπορεί να προσδιοριστεί από τις προδιαγραφές του υλικού ή από το χρονικό διάστημα από την εκκίνηση της δοκιμής μέχρι την αστοχία του (1 έως 10 λεπτά). Μια **τυπική ταχύτητα δοκιμής** είναι τα **2 mm/min** (0.08 in/min).

Για τον προσδιορισμό της επιμήκυνσης και του μέτρου ελαστικότητας κατά την διεύθυνση φόρτισης χρησιμοποιείται συνήθως ένα επιμηκυσιόμετρο (extensiometer) ενώ για τον προσδιορισμό του λόγου Poisson είναι αναγκαίο και ένα εγκάρσιο επιμηκυσιόμετρο

(transverse extensometer). Ανάλογα με τον τύπο της μετρητικής διάταξη μπορεί να απαιτείται δοκιμή σε περισσότερους από έναν προσανατολισμούς. Ιδανικά λοιπόν χρησιμοποιείται ένα μόνο διαξονικό επιμηκυνσιόμετρο (biaxial extensometer-βλ. **Εικόνα 81**) το οποίο μετρά ταυτόχρονα την αξονική και την εγκάρσια καταπόνηση.



Εικόνα 80 : Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής εφελκυσμού.



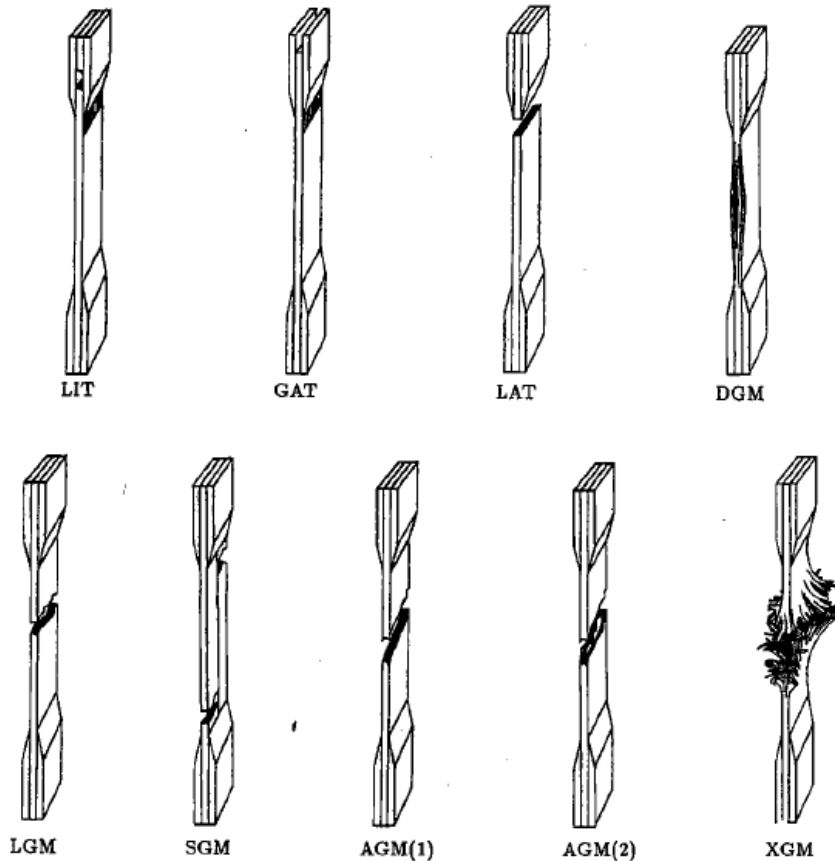
Εικόνα 81 : Ενδεικτικό διαξονικό επιμηκυνσιόμετρο [90].

Το **μέγεθος των δειγμάτων** σύμφωνα με το ASTM D3039/D3039M είναι μια ορθογωνική διατομή με διαστάσεις :

- **πλάτος :** 25.4 mm (1 in)

- μήκος : 254 mm (10 in)
- προτεινόμενο πάχος : 1-5 mm.
- μήκος λαβής συγκράτησης : ≥ 56 mm

Το προτεινόμενο πάχος εξυπηρετεί πρακτικούς σκοπούς: παχύτερα δοκίμια μπορεί να αστοχήσουν λόγω διάτμησης κοντά στην περιοχή της λαβής συγκράτησης/αρπάγης ή και εσωτερικά της λαβής (βλ. **Εικόνα 82**), πριν φτάουν στο πραγματικό όριο θραύσης, ενώ λεπτότερα δοκίμια μπορεί να επηρεαστούν εύκολα από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η επιφανειακή τάση (λόγω σύσφιξης) κατά μήκος των λαβών.



First Character	
Failure Type	Code
Angled	A
edge Delamination	D
Grip/tab	G
Lateral	L
Multi-mode	M(xyz)
long. Splitting	S
eXplosive	X
Other	O

Second Character	
Failure Area	Code
Inside grip/tab	I
At grip/tab	A
<1W from grip/tab	W
Gage	G
Multiple areas	M
Various	V
Unknown	U

Third Character	
Failure Location	Code
Bottom	B
Top	T
Left	L
Right	R
Middle	M
Various	V
Unknown	U

Εικόνα 82 : Κωδικοποίηση των τρόπων αστοχίας δοκιμών εφελκυσμού κατά D3039/D3039M [89].

Είναι λογικό πως δεν είναι όλοι οι τρόποι αστοχίας της **Εικόνας 82** «αποδεκτοί» καθώς μία πειραματική διαδικασία απαιτεί επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων εντός του ενεργού μήκους που εφελκύεται. Ως **ενεργό μήκος ορίζεται το ελεύθερο μήκος του εκάστοτε δοκιμίου, αυτό που βρίσκεται εκτός των λαβών συγκράτησης και είναι σαφώς μικρότερο του συνολικού μήκους 254 mm**. Για παράδειγμα τρόποι αστοχίας όπως είναι οι LIT, GAT και LAT πιθανότατα οφείλονται σε τραυματισμό του δοκιμίου λόγω εκτεταμένης φθοράς του από τις αρπάγεις ή και αποτελούν τυχαίο γεγονός λόγω κατασκευαστικού ελαττώματος του δοκιμίου στα σημεία αυτά.

Προαιρετικά, μπορούν να τοποθετηθούν στα άκρα του δοκιμίου προστατευτικά εξαρτήματα για να αποφευχθεί η ζημιά εξαιτίας της λαβής. Συνήθως όμως τοποθετούνται γλωττίδες (tabs), όπως είναι λωρίδες γυαλόχαρτου, για την αύξηση της δύναμης συγκράτησης των λαβών, ιδιαίτερα όταν το υλικό των δοκιμίων είναι «ολισθηρές» φύσης όπως είναι το UHMWPE. Γίνεται κατανοητό πως έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος τέτοια δοκίμια να αστοχούν στα όρια ή εκτός του ενεργού τους μήκους τους λόγω του τραυματισμού τους από τις εκάστοτε γλωττίδες.

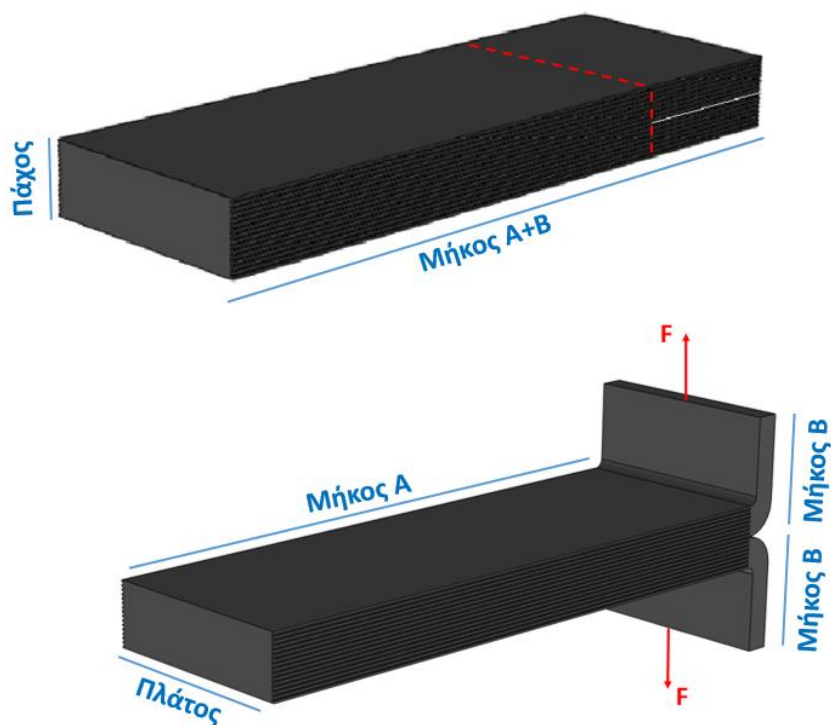
Τέλος το πρότυπο D3039/D3039M καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό εξεταζόμενων δοκιμίων ως 5, για κάθε διαφορετικό υλικό A, B και C.

4.2 Αντοχή σε αποφλοιώση (T-Peel)

Η **αντοχή αποφλοιώσης (T-peel)** είναι ένα εξειδικευμένο μέγεθος με εφαρμογή στα σύνθετα υλικά και χρησιμοποιείται ως **παράγοντας ένδειξης της ισχύος συγκόλλησης μεταξύ των φύλλων (διαφυλλικά) $[0^\circ/90^\circ]_2$ ή και των στρώσεων του (ενδοφυλλικά) διάταξης $[0^\circ/90^\circ]_2$** . Η καλή πρόσφυση μεταξύ των τεσσάρων στρώσεων του ενός φύλλου αλλά και των διαστρωματωμένων φύλλων στο σύνολο είναι απαραίτητη για τη μεταφορά τάσεων μεταξύ των ινών και της μήτρας και συμβάλλει στην πλευρική αντοχή.

Κατά τις δοκιμές για τον έλεγχο της αντοχής σε αποφλοιώση δύο φύλλα (σύνολο 8 στρώσεις) του εκάστοτε υλικού αποκολλούνται και μετράται η δύναμη συναρτήσεως της μετατόπισης (βλ. **Εικόνα 83**). Αναμένεται πως η αντοχή αποφλοιώσης θα είναι μεγαλύτερη σε σύνθετα, κατά την θερμοσυμπίεση των οποίων, υπήρξε εκτενής τήξη και επανακρυστάλλωση κατόπιν της ψύξης τους, λόγω καλής συγκόλλησης των φύλλων. Μεγαλύτερη αντοχή αποφλοιώσης οδηγεί σε μεγαλύτερη πλευρική αντοχή, αλλά έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διαμήκη αντοχή. Η συγκόλληση θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε να διαχέει αποτελεσματικά την ενέργεια του βλήματος κατά μήκος των ινών αλλά και τόση ώστε να μην εμποδίζει τον μηχανισμό της αποκόλλησης [17].

Η προσαρμογή της διεπιφανειακής πρόσφυσης σε σύνθετα ινών UHMWPE είναι δύσκολη λόγω της αδρανούς φύσης τους και της έλλειψης πλευρικών αλυσίδων στα μακροσκελή μόρια του UHMWPE. Για προεμποτισμένες ίνες με το υλικό της μήτρας (pre-impregnated fibers), όπως στα παρόντα υλικά A,B και C, η πρόσφυση των ινών και της μήτρας βελτιστοποιείται καθώς δεν χρειάζεται περαιτέρω υποβάθμιση τους μέσω κάποιας πρόσθετης θερμικής διαδικασίας σκλήρυνσης της μήτρας [91].



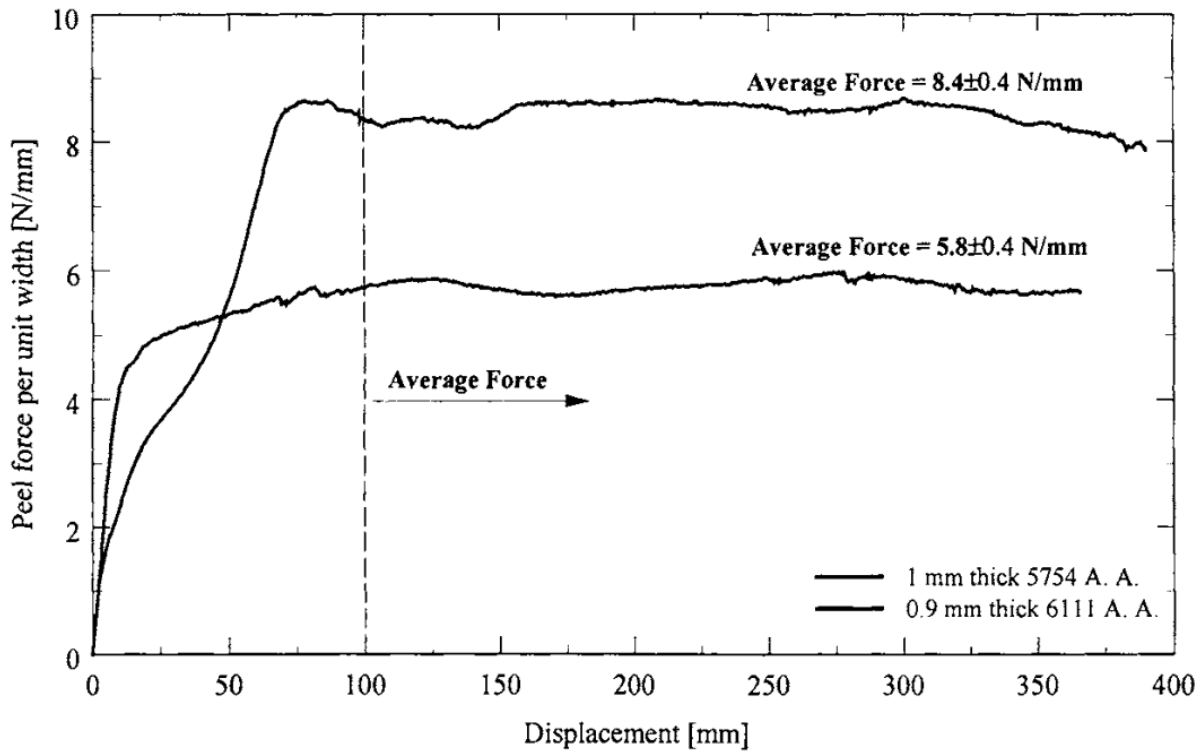
Εικόνα 83 : Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής σε αποφλοιώση.

Τα δοκίμια από το οποίο κόβονται τα επιμέρους δοκίμια προκύπτει, όπως αναφέραμε, από την ενοποίηση δύο όμοιων επιμέρους φύλλων από τα 3 εξεταζόμενα υλικά. Η διαδικασία συγκόλλησης δεν είναι παρά αυτή που περιγράφεται στην §3.3.5. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι, σε ένα τμήμα του συνολικού μήκους A+B, τα δύο φύλλα να παραμένουν ελεύθερα (B) ώστε να συγκρατηθούν από τις δαγκάνες της μετρητικής διάταξης. Οι **διαστάσεις των δοκιμίων που απεικονίζονται στην Εικόνα 83**, σύμφωνα με το **ASTM D1876** πρέπει να είναι [92]:

- **πλάτος** : 25.4 mm (1 in)
- **μήκος A+B** : 305 mm (12 in)
- **μήκος A** : 229 mm (9 in)
- **μήκος B** : 76 mm (3 in)

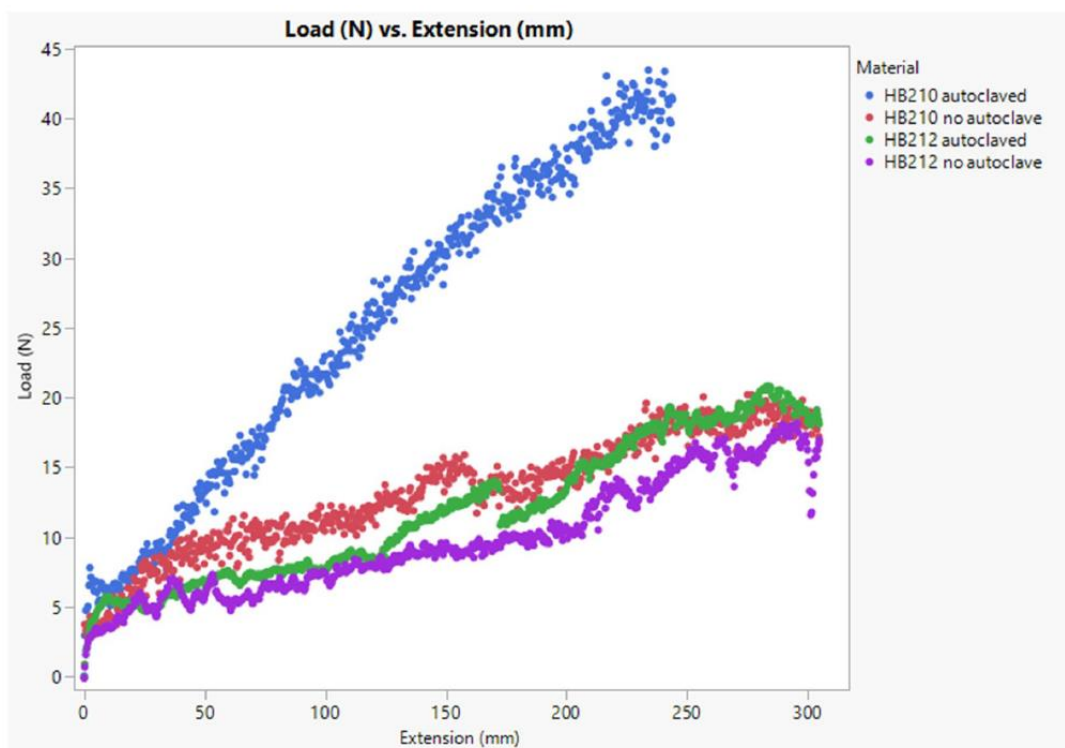
Η **ταχύτητα αποφλοιώσης** ορίζεται στα **254 mm/min** (10 in/min) ενώ η **πραγματική ταχύτητα διαχωρισμού** του δεσμού μεταξύ των 2 φύλλων (ή των επιμέρους στρώσεων) είναι **127 mm/min** (5 in/min).

Σύμφωνα με το πρότυπο υπολογίζεται είτε το μέσο φορτίο σε kg/mm πλάτους του δοκιμίου ή η μέση δύναμη (N/mm πλάτους) μόνο για τα πρώτα 127 mm της συγκολλημένης περιοχής μετά την εμφάνιση της πρώτης κορυφής στο εκάστοτε διάγραμμα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 84**.



Εικόνα 84 : Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, λεπτών φύλλων/δειγμάτων από κράματα αλουμινίου (5754 και 6111) συγκολλημένα με εποξειδική κόλλα XD4600, υπό διαστρωματική αποκόλληση (T-Peel) με ταχύτητα 5mm/min στους 23°C [99].

Μπορεί βέβαια να υπολογιστεί και η μέση δύναμη αποκόλλησης συναρτήσει της επιμήκυνσης του δοκιμίου μη ανηγμένη προς το πλάτος του όπως φαίνεται στην Εικόνα 85.



Εικόνα 85 : Αντιπροσωπευτικά δεδομένα διαστρωματικής αποκόλλησης (T-Peel) συνθέτων HB210 και HB212 της Dynneema® με και χωρίς σκλήρυνση του συγκολλητικού Sikaflex®-252 σε κλίβανο (ASC Process Systems autoclave) [63].

Τέλος το πρότυπο καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό εξεταζόμενων δοκιμών ως 10, για κάθε διαφορετικό υλικό A, B και C.

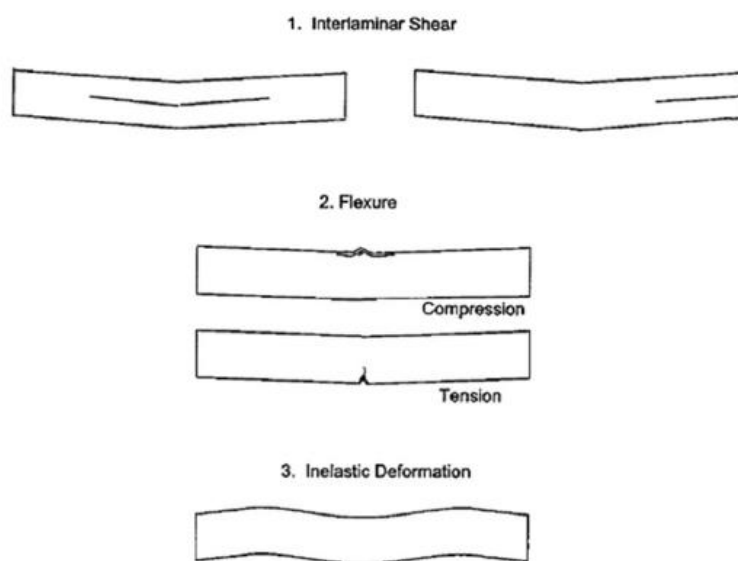
4.3 Αντοχή σε διάτμηση-Διάτμηση βραχείας δοκού-Κάμψη τριών σημείων (Short beam shear test)

Για τον υπολογισμό της **διατμητικής αντοχής** του συνθέτου χρησιμοποιούνται συνήθως οι μέθοδοι της κάμψης τριών και της κάμψης τεσσάρων σημείων. Η υψηλή αντοχή των ινών UHMWPE σε συνδυασμό με τη χαμηλή **διαστρωματική διάτμηση (interlaminar shear strength - ILSS)** είναι ευεργετική στις (αντι)βαλλιστικές εφαρμογές, καθώς η δεύτερη ανακουφίζει τη συσσώρευση των καμπτικών τάσεων κατά το πάχος του δοκιμίου ενώ η ελαστικότητα (yielding) της μήτρας προστατεύει τις ίνες από καμπτικές τάσεις [10, 12, 17, 19, 93]. Οι βαλλιστικές εφαρμογές, παρ' ότι δυναμικά φαινόμενα έναντι των απλών καμπτικών δοκιμών των §4.3.1 και §4.3.2 που αποτελούν «στατικά» φαινόμενα (οιονεί στατικές συνθήκες), φαίνεται να παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας. Κάνοντας μια ελεύθερη παραδοχή θα μπορούσαμε να πούμε πως μία βαλλιστική κρούση αποτελεί μία ταχέως εξελισσόμενη καμπτική καταπόνηση.

Σε μία βαλλιστική κρούση η διαστρωματική διάτμηση (interlaminar shear-delamination) επηρεάζει την αποκόλληση των επιμέρους φύλλων, ένας μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας που εξαρτάται από τις στιβαρές ιδιότητες του συνθέτου. Ενώ ένα χαμηλό καμπτικό φορτίο είναι επιθυμητό για την προστασία των ινών από συσσωρευμένες τάσεις, ένα πολύ χαμηλό φορτίο μπορεί να προκαλέσει την πρόωρη αποκόλληση ανώτερων στρώσεων. Αυτό εμποδίζει την υποστηρικτική ικανότητα του συνθέτου προς την κεραμική πλάκα και δύναται να οδηγήσει σε μειωμένες (αντι)βαλλιστικές επιδόσεις.

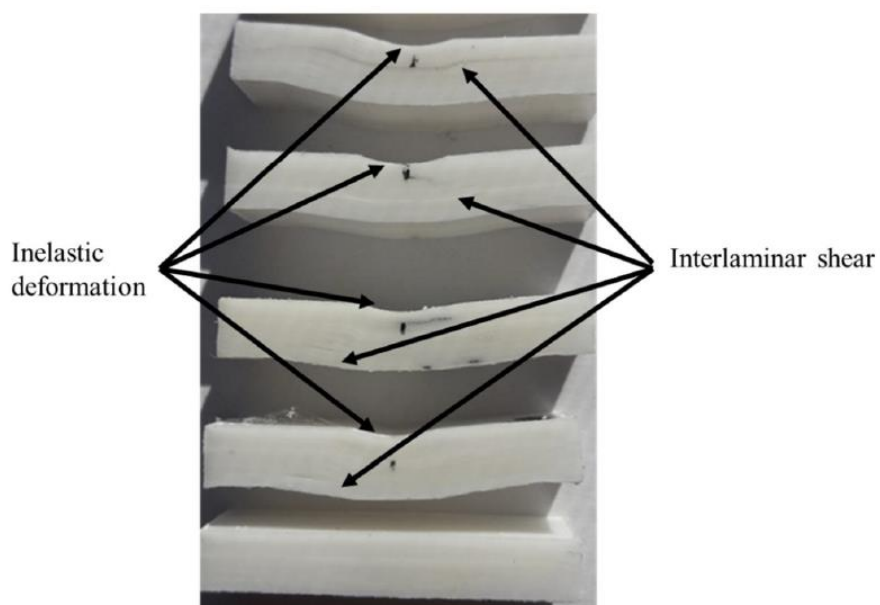
Όπως αναφέραμε και στην §3.3.4 το βαλλιστικό όριο V_{50} συσχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη διατμητική αντοχή. Σύμφωνα με τη **σχέση (7)** η τετραγωνική ρίζα του μέτρου ελαστικότητας (και άρα της εφελκυστικής τάσης) είναι ανάλογη της ταχύτητας διάδοσης του ελαστικού μέρους του κύματος καταπόνησης u_{ew} . Ένα υψηλό μέτρο ελαστικότητας είναι λοιπόν επιθυμητό ώστε η ενέργεια του βλήματος να διαμοιράζεται καθ'όλο το σύνθετο (διεπιφανειακά και διαφυλλικά) παρά κατά το πάχος του (ρηχό και ευρύ τραύμα παρά συγκεντρωμένο και βαθύ) με σκοπό την αφομείωση του BFS .

Οι πιθανοί **μηχανισμοί αστοχίας** δοκιμών που υπόκεινται είτε σε **καμπτικές δοκιμές** (χαμηλός ρυθμός παραμόρφωσης) ή σε **βαλλιστικές δοκιμές** (υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης) απεικονίζονται στην **Εικόνα 86**.



Εικόνα 86 : Μηχανισμοί αστοχίας λόγω καμπτικής καταπόνησης [94].

Τα σύνθετα υλικά και ειδικότερα τα σύνθετα ινών UHMWPE, υπό καμπτικό φορτίο, τείνουν να αστοχούν (παραμορφώνονται) είτε με διαχωρισμό/αποκόλληση των στρώσεων τους (διαστρωματική διάτμηση-interlaminar shear-delamination) είτε με την ανελαστική παραμόρφωση (inelastic deformation) τους, εξαιτίας της όλκιμης τους φύσης.



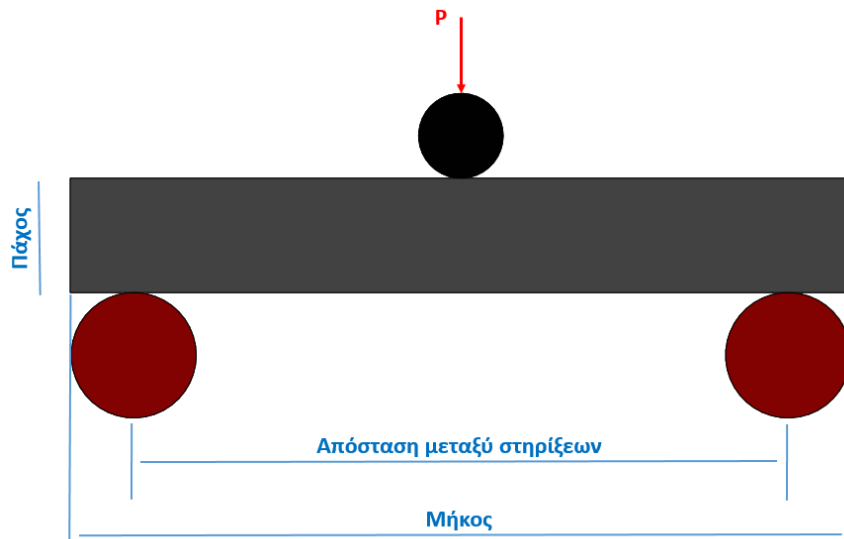
Εικόνα 87 : Σύνθετο HB210 της Dyneema® κατόπιν καμπτικής του καταπόνησης με εμφανείς τους μηχανισμούς αστοχίας της ανελαστικής παραμόρφωσης και της διαστρωματικής διάτμησης [63].

Μια σειρά μεθόδων δοκιμής, εκτός του άνωθεν, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής είναι :

- Διάτμηση βραχείας δοκού (short beam shear - ASTM D2344M).
- Τροποποιημένη διάτμηση βραχείας δοκού/Κάμψη 4 σημείων.
- Δοκιμή Iosipescu (ASTM D5379M).
- Δοκιμή θλίψης διπλής εγκοπής (double notch compression - ASTM D3846).
- Κεκλιμένη δοκιμή θλίψης διπλής εγκοπής (inclined double notch shear).
- Inclined waisted shear specimen.
- Δοκιμή με Arcan Jig.

Λόγω του εύρους τους επιλέγουμε να καλύψουμε, στην παρούσα εργασία, την πρώτη μέθοδο καθώς είναι και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος του Πειραματικού Μέρους [27, 28, 29, 30, 31].

Η δοκιμή της διάτμησης βραχείας δοκού είναι μια δοκιμή κάμψης τριών σημείων (βλ. **Εικόνα 88**), όπου οι κύλινδροι στήριξης και άσκησης φορτίου είναι μεγέθους αναλόγου του δοκιμίου ενώ η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων σε σχέση με το πάχος του δοκιμίου χαρακτηρίζονται από την **αναλογία 4:1 (ASTM D2344M)**, με στόχο την ελαχιστοποίηση της κάμψης και την μεγιστοποίηση της επαγόμενης διατμητικής τάσης [94].



Εικόνα 88 : Σχηματική αναπαράσταση διάτμησης βραχείας δοκού.

Σε αντίθεση με τη δοκιμή διάτμησης βραχείας δοκού, μια τυπική δοκιμή κάμψης, όπως αυτή του **ASTM D790**, δίνει έμφαση στις καμπτικές ιδιότητες και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται υψηλοί λόγοι μήκους προς πάχος. Συνιθέστεροι είναι λόγοι τουλάχιστον 16:1 αλλά στα ισχύοντα πρότυπα ASTM συχνά καθορίζονται και πολύ

υψηλότεροι, για παράδειγμα αναλογίες 32:1, 40:1 ακόμη και 60:1. Η δοκιμή κατά **ASTM D790** αποτελεί μία τροποποιημένη εκδοχή της δοκιμής κατά **ASTM D2344M**. Χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση ενισχυμένων ή μη πλαστικών, θερμοπλαστικών, θερμοσκληρυνόμενων, ηλεκτρικά μονωτικών υλικών [95]. Από την άλλη το **ASTM D2344M** χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διατμητικής τάσης σε βραχείες δοκούς από σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

Μία αποδεκτή αναλυτική σχέση έμμεσου υπολογισμού της αντοχής σε κάμψη κατά **ASTM D790** είναι :

$$(\text{Flexural stress}) \sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

όπου:

P: η εφαρμοζόμενη δύναμη [N]

b: το πλάτος του δοκιμίου [mm]

h: το πάχος του δοκιμίου [mm]

L: το μήκος του δοκιμίου [mm]

Η δοκιμή διάτμησης βραχείας δοκού **δίνει μόνο ένα ποιοτικό μέτρο της διαστρωματικής διατμητικής αντοχής** του συνθέτου, αλλά παραμένει δημοφιλής είτε για ποιοτικούς έλεγχους είτε για διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός σύνθετου υλικού (κυρίως της συμπεριφοράς της μήτρας και των διεπαφών της με τις ίνες).

Κατά την επιβολή του φορτίου υπάρχει μια σύνθετη εντατική κατάσταση στο δοκίμιο, που περιλαμβάνει διαστρωματικές διατμητικές τάσεις, τάσεις διεπαφών στα σημεία φόρτισης και καμπτικές τάσεις. Κατά συνέπεια, η αστοχία συχνά συμβαίνει με μη αποδεκτούς, πειραματικά, τρόπους όπως είναι η τοπική υποχώρηση του δοκιμίου στο σημείο φόρτισης ή η πλήρης αστοχία λόγω κάμψης, αντί για την αναμενόμενη διαστρωματική διάτμηση [28].

Μία αποδεκτή αναλυτική σχέση έμμεσου υπολογισμού του διατμητικού φορτίου είναι:

$$(\text{Shear stress}) \sigma_s = 0.75 \frac{P}{bh} \text{ [MPa]} \quad (16)$$

όπου:

- **P** : η εφαρμοζόμενη δύναμη [N]
- **b** : το πλάτος του δοκιμίου [mm]
- **h** : το πάχος του δοκιμίου [mm]

Η ταχύτητα κίνησης του κυλίνδρου πίεσης (loading nose) κυμαίνεται στην περιοχή των **1-3 mm/min** (0.04 in/min) ενώ οι **διαστάσεις** που απεικονίζονται στην **Εικόνα 88**, σύμφωνα με το πρότυπο πρέπει να είναι:

- **πάχος** : δεν ορίζεται
- **μήκος** : 6 x πάχος
- **απόσταση μεταξύ στηρίξεων** (span length) : 4 x πάχος
- **πλάτος** : 2 x πάχος

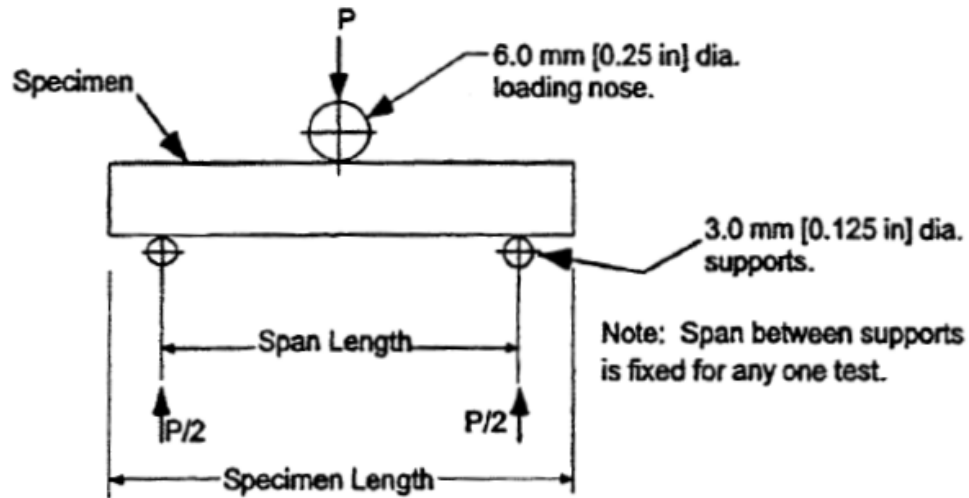


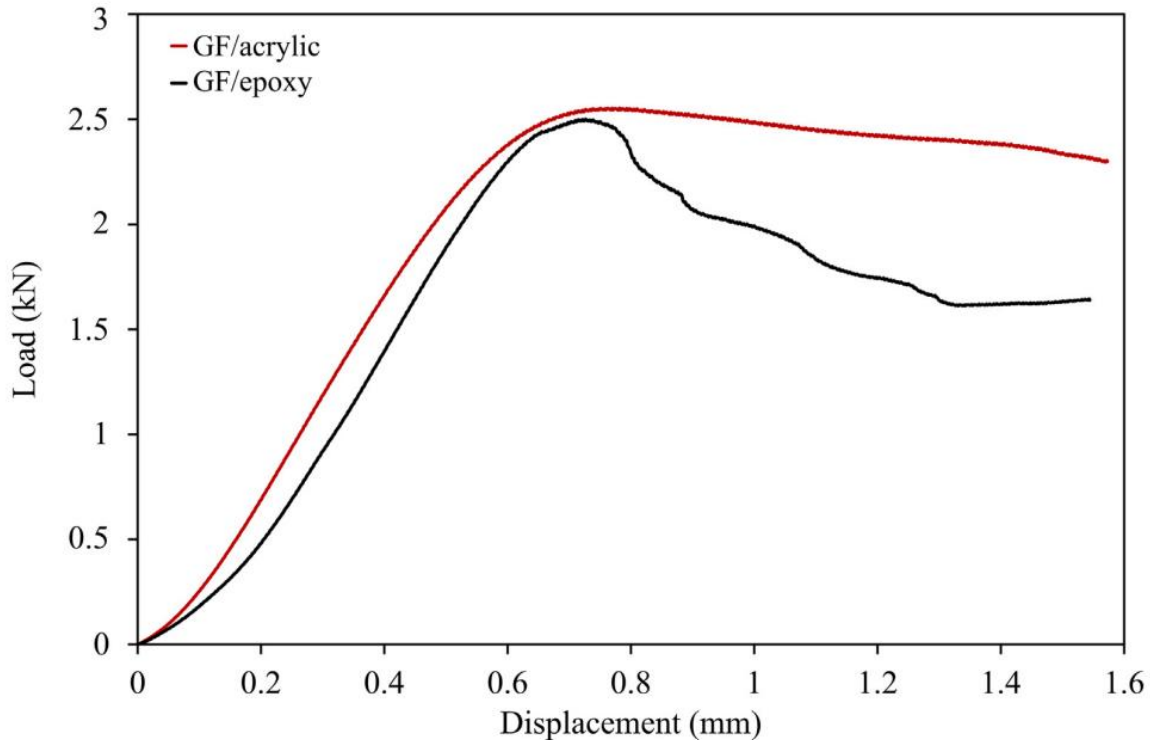
FIG. 6 Horizontal Shear Load Diagram (Flat Laminate)

Εικόνα 89 : Σχηματική αναπαράσταση διάτμησης επίπεδης βραχείας δοκού κατά D2344M [94].

Η ελάχιστη απόσταση των κάτω κυλινδρικών στηρίξεων (supports) από τις ακμές του εκάστοτε δοκιμίου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το πάχος του ενώ το φορτίο P εφαρμόζεται μέχρι να πληρείται έστω μία από τις ακόλουθες συνθήκες :

- Το φορτίο να εμφανίσει πτώση μεγαλύτερη ίση από το 30% του μέγιστου εμφανιζόμενου, δηλαδή της μέγιστης διατμητικής τάσης.
- Το δοκίμιο να διαιρεθεί σε δύο κομμάτια (πλήρης διαχωρισμός).
- Η απόσταση που διένυσε η κυλινδρική κεφαλή της φόρτισης να ξεπεράσει το πάχος του δοκιμίου.

Η μορφή των προκύπτων διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης (load-displacement) των δοκιμών του προτύπου D2344M αναμένεται να λαμβάνουν την μορφή της **Εικόνας 90**.



Εικόνα 90 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης διάτμησης βραχέων δοκών συνθέτων ινών γυαλιού (glass fiber) σε ακρυλική (acrylic) και εποξειδική (epoxy) μήτρα [100].

Σε αυτό το σημείο διευκρινίζουμε πως οι πειραματικές μας ανάγκες καλύπτονται από την χρήση του προτύπου **ASTM D2344M** έναντι του **ASTM D790** καθώς στα δοκίμια των συνθέτων που μελετώνται η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων σε σχέση με το πάχος τους δοκιμίου δεν ξεπερνά την αναλογία 4:1.

Τέλος το πρότυπο καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό εξεταζόμενων δοκιμών ως 5, για κάθε διαφορετικό υλικό A, B και C.

5. Πειραματικό μέρος

5.1 Θραυστομηχανική συμπεριφορά των κεραμικών πλακών και των των σύνθετων πάνελ UHMWPE.

Έχοντας υπ' όψη τις 2 φάσεις μιας βαλλιστικής κρούσης της §3.1.3, τους 3 μηχανισμούς αστοχίας των σύνθετων υλικών της §3.3.4 και τα 3 στάδια διείδυσης ενός (διατρητικού) βλήματος της §3.3.7 προχωράμε σε μία ταυτόχρονη θραυστομηχανική ανάλυση των κεραμικών ενθεμάτων (§5.1.5) και των σύνθετων πάνελ UHMWPE μεν για δεδομένη απειλή (βλήμα) σε διατάξεις διαφορετικών συνθέτων UHMWPE A και B (§5.1.6) και δε για δεδομένο πάνελ υλικού A υπό κρούση των τριών διαφορετικών τύπων απειλής (§5.1.7) του Πίνακα 4 (επίπεδο θωράκισης III +++).

Όπως αναφέραμε και στην §3.2 τα χρησιμοποιούμενα κεραμικά είναι θερμοσυμπιεσμένες (hot-pressed) μονοκεραμικές πλάκες SiC, πάχους 5.2 mm, της Εικόνας 45 με ιδιότητες του Πίνακα 10.

Τα χρησιμοποιούμενα πολύστρωτα σύνθετα UHMWPE υλικών A και B είναι διαστρωματώσεις πολλαπλών φύλλων 4 στρώσεων προεμποτισμένων (pre-impregnated) ινών με διάταξη $[0^{\circ}/90^{\circ}]_2$ μέσα σε μήτρες ρητίνης και κατασκευάζονται με τη μέθοδο που περιγράφεται στην §3.3.5. Το υλικό C, λόγω των ελειπών μηχανικών ιδιοτήτων του σε μικρά πάχη, όπως θα φανεί και στην §5.3, τείνει να μην χρησιμοποιείται σε (αντι)βαλλιστικές διατάξεις, όπου σκοπός του σχεδιασμού τους είναι η ελαχιστοποίηση του πάχους και του βάρους. Χρησιμοποιείται παρ' όλα αυτά σε αλεξισφαιρες πλάκες αυξημένου πάχους και βάρους.

Οι σύνθετες υβριδικές διατάξεις επιπέδου III +++ (SA) που, κατόπιν των βαλλιστικών δοκιμών τους, κατά το NIJ Standard-0101.06 της §3.1.4, εξετάζονται θραυστομηχανικά ακολουθούν την, γνωστή πλέον, διαστρωμάτωση :

- Αντιθραυσματική επίστρωση (spall liner).
- Κεραμικό ένθετο.
- Υφασμα αραμιδίου (για τα δοκίμια 1 και 4).
- Σύνθετη πλάκα UHMWPE.
- Βαλλιστικός αφρός.

Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια, με τους βασικούς συντελεστές τους (σύνθετο πάνελ και κεραμική πλάκα), τον αριθμό και τον τύπο των βλημάτων (του Πίνακα 4) που εξετάζονται είναι τα εξής :

- Θωράκιση από μονοκεραμικό SiC πάχους 5.2 mm με αραμιδική ενίσχυση και σύνθετο πάνελ υλικού A πάχους 9.6 mm (69 φύλλα πάχους 0.139 mm έκαστο) από μία βολή μη διατρητικού βλήματος M80 FMJ 7.62x51.

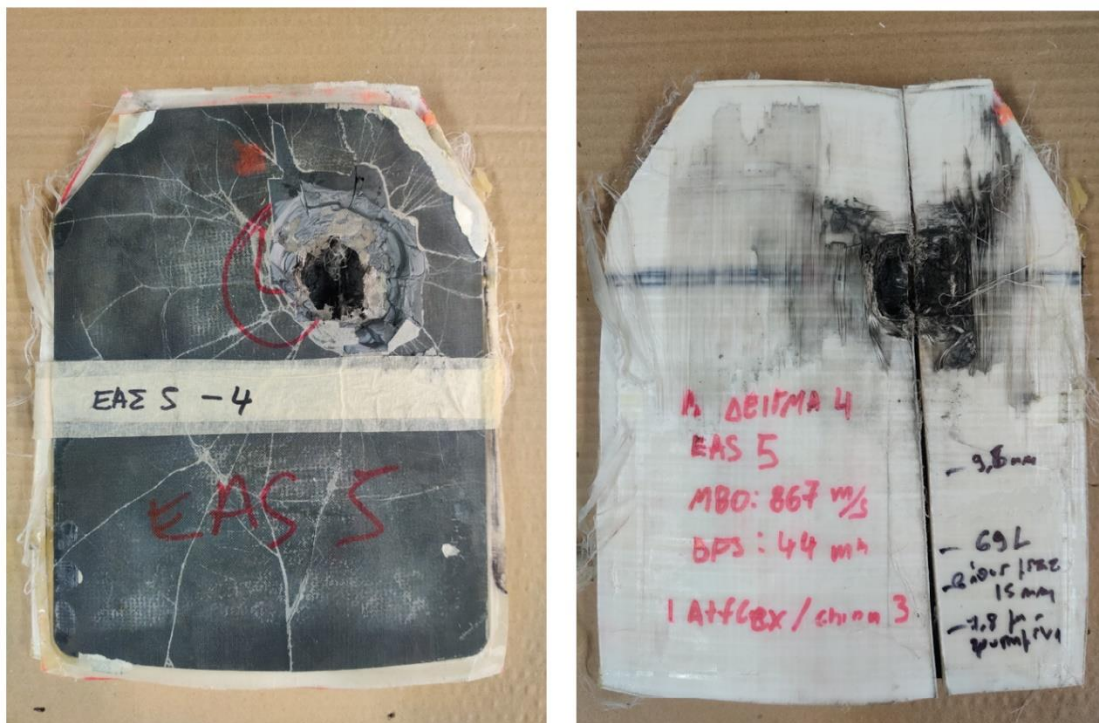
- 2 θωρακίσεις από μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm και σύνθετο πάνελ υλικού A πάχους 9.6 mm, μία με αραμιδική ενίσχυση και μία χωρίς (2.A και 2.B αντίστοιχα), από 6 βολές μη διατρητικών βλημάτων M80 FMJ 7.62x51.
- 2 θωρακίσεις από από μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm και σύνθετο πάνελ υλικού B πάχους 9.6 mm (74 φύλλα πάχους 0.130 mm έκαστο), μία με αραμιδική ενίσχυση και μία χωρίς (3.A και 3.B αντίστοιχα), από 6 βολές μη διατρητικών βλημάτων M80 FMJ 7.62x51.
- Θωράκιση από μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm με αραμιδική ενίσχυση και σύνθετο πάνελ υλικού A πάχους 9.6 mm, από 3 βολές μη διατρητικών βλημάτων SS109 FMJBT 5.56x45 και 3 βολές διατρητικών βλημάτων MSC 7.62x39.

Ακολουθεί η σταδιακή αποσύνθεση των δοκιμίων ανά τις διεπιφάνειες των συντελεστών τους, με εμφανή την αρίθμηση των βολών ενώ ταυτόχρονα μετράται η πρόοδος της ακτίνας επιρροής τους στο κεραμικό με κέντρο την εστία του βλήματος. Η ακτίνα επιρροής μετράται χονδρικά ως ο μέσος όρος των δύο διαμέτρων της ελλειψοειδούς θραυσμένης περιοχής γύρω από την οπή του βλήματος στη κεραμική πλάκα. Παρατίθενται ακόμα οι πινακοποιημένοι υπολογισμοί, των μεγεθών PP,CP και DOP (των εν τομή βολών) με βάση την **§3.3.7**, προς σχολιασμό.

Συγκεκριμένα στα δοκίμια 2.B και 3.B, κατόπιν διαχωρισμού της θωράκισης στις διεπιφάνειες της αντιθραυσματικής μεμβράνης, του κεραμικού και του συνθέτου, το δεύτερο παρουσιάζει εκτεταμένη φθορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αποσύνθεση των συγκεκριμένων θωράκισων, τα θραύσματα του κεραμικού δεν συγκρατήθηκαν στην θέση τους αλλά διασκορπίστηκαν, λόγω μεν απουσίας αραμιδικής ενίσχυσης αλλά κυρίως λόγω κακής ποιότητας της συγκόλλησης της αντιθραυσματικής μεμβράνης επί του κεραμικού και του κεραμικού επί του συνθέτου. Όπως προαναφέραμε η αραμιδική ενίσχυση και η αντιθραυσματική μεμβράνη συμβάλουν στην «ακεραιότητα» της θωράκισης κατά την πρόοδο των βολών. Για τον λόγο αυτό στα δοκίμια 2.B και 3.B και 3.B δεν έχει μετρηθεί επιτυχώς η διάμετρος επιρροής των βλημάτων επί των κεραμικών πλακών. Αντίθετα στα δοκίμια 2.A και 3.A το κεραμικό παραμένει αυτοτελές κατά τον διαχωρισμό της διεπιφάνειας κεραμικού-συνθέτου, επιδεικνύοντας καλή συγκόλληση/πρόσφυση.

Επισημαίνεται τέλος πως η αρίθμηση των βολών στην εκάστοτε διεπιφάνεια συνθέτου UHMWPE-κεραμικής πλάκας (με η χωρίς αραμιδική επίστρωση) είναι καθρέπτου της πραγματικής αρίθμησης. Το ίδιο συμβαίνει και για οποιαδήποτε πίσω όψη των συντελεστών της θωράκισης.

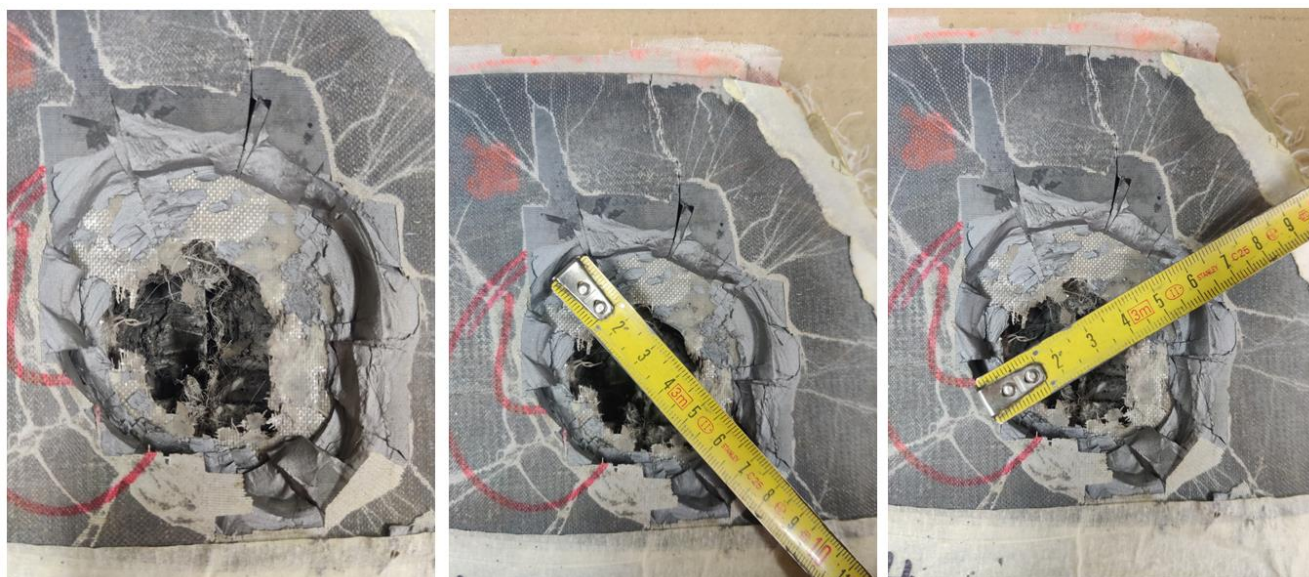
5.1.1 Δοκίμιο 1 :



Εικόνα 91 : (Αντι)βαλλιστικό δοκίμιο 1 με εμφανές το σημείο πρόσκρουσης επάνω στο κεραμικό (αριστερά) και η σύνθετη πλάκα UHMWPE υλικού Α κατόπιν διαχωρισμού της στη διεπιφάνεια αραμιδικής ενίσχυσης-συνθέτου.

Για το δοκίμιο 1 η μεγάλη διάμετρος της ελλειψοειδούς θραυσμένης περιοχής μετρήθηκε ως 7.5 mm ενώ η μικρή ως 7 mm (βλ. **Εικόνα 92**). Επομένως η **επιφάνεια επιρροής του βλήματος** στο κεραμικό καλύπτει μία αρκετά μεγάλη **διάμετρο περί τα 7.75 mm**.

Σε αυτό το δοκίμιο η αντιθραυσματική επίστρωση δεν είναι ένα μονόφυλλο συνθέτου UHMWPE αλλά πρόκειται για μια μεμβράνη ινών γυαλιού (fiberglass spall liner) χαμηλής αντοχής. Για αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και σε ακόλουθα δοκίμια, η διάμετρος επιρροής του βλήματος είναι αρκετά μεγαλύτερη, για τα δεδομένα μίας μόνο βολής επί της διάταξης, συγκριτικά με τις αντίστοιχες διαμέτρους επιρροής δοκιμίων με αντιθραυσματική επίστρωση συνθέτου UHMWPE. Η αντιθραυσματική επίστρωση από σύνθετο ινών UHMWPE επομένως αποτρέπει τα θραύσματα του κεραμικού από το να σκεδαστούν προς τα έξω αλλά και προφυλάσσει καλύτερα την δομή του κεραμικού από τις επόμενες βολές.



Εικόνα 92 : Μεγέθυνση του σημείου πρόσκρουσης (αριστερά) και μέτρηση των 2 διαμέτρων της ελλειψοειδούς θραυσμένης περιοχής (κέντρο και δεξιά).



Εικόνα 93 : Τομή του μοναδικού σημείου βολής του δοκιμίου 1 με βλήμα M80 FMJ.

Τα βασικά μας μεγέθη, κατόπιν μέτρησης τους πάχους των εναπωμείναντων φύλλων (PP) σε mm με παχύμετρο, υπολογίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 18 με χρήση των σχέσεων της §3.3.7 :

Πίνακας 18 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 1.

Βολή	Βλήμα	P.P (mm)	C.P (mm)	Διατρηθέντα φύλλα/69	Βάθος μετατόπισης λόγω BFD (mm)	D.O.P (%)	BFS (mm)
1	M80 FMJ	7.8	1.8	13	15	18.8	44

Φαίνεται πως το BFS είναι στο επιτρεπτό όριο βάθους των 44 mm ενώ το βάθος διείσδυσης είναι αρκετά περιορισμένο, μόλις στο 18% του αρχικού πάχους. Αυτό οφείλεται στον ικανό σχεδιασμό της συνολικής θωράκισης (πάχη κεραμικού, συνθέτου, βαλλιστικού αφρού). Όπως θα δούμε και στη συνέχεια το είδος του βλήματος (εδώ **M80 FMJ 7.62x51** μη διατρητικό) παίζει σημαντικό ρόλο στους μηχανισμούς αστοχίας του σύνθετου πάνελ.

5.1.2 Δοκίμια 2.A και 2.B :



Εικόνα 94 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των δοκιμών 2.A. και 2.B.



a



b

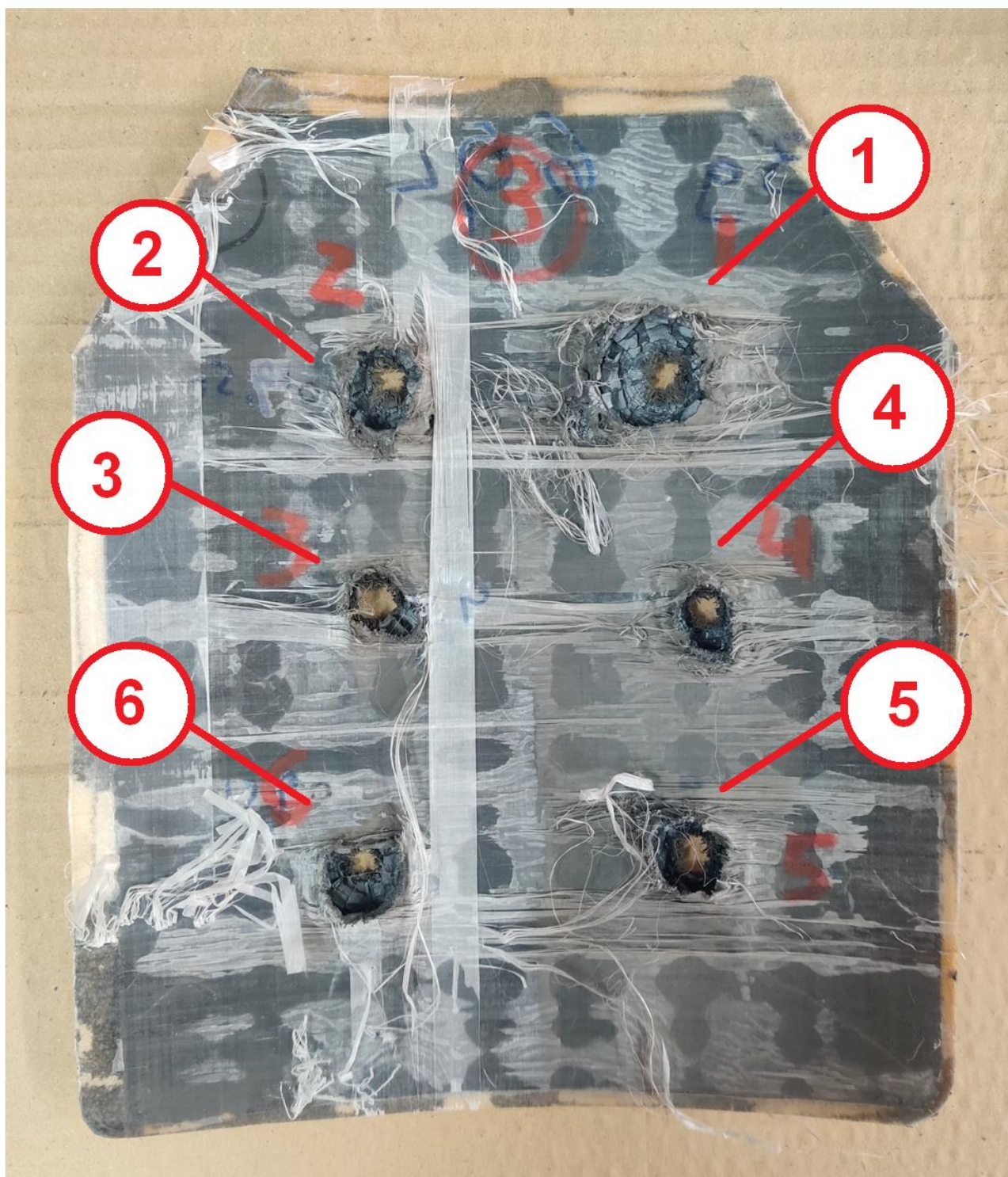


c

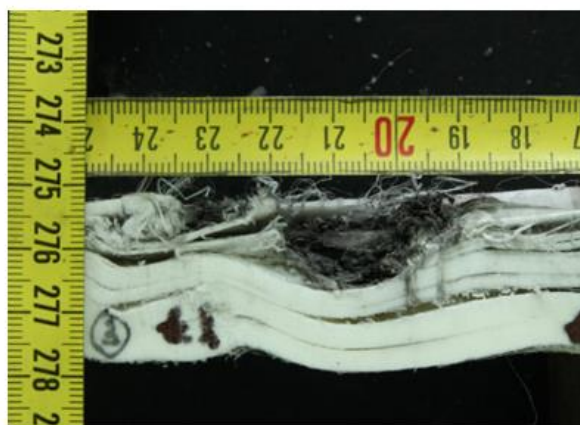


d

Εικόνα 95 : Δοκίμιο 2.A (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διαπιφάνεια συνθέτου (με τομές των σημείων βολής)-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση), (d) πίσω όψη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος με εμφανή τον βαλλιστικό αφρό.



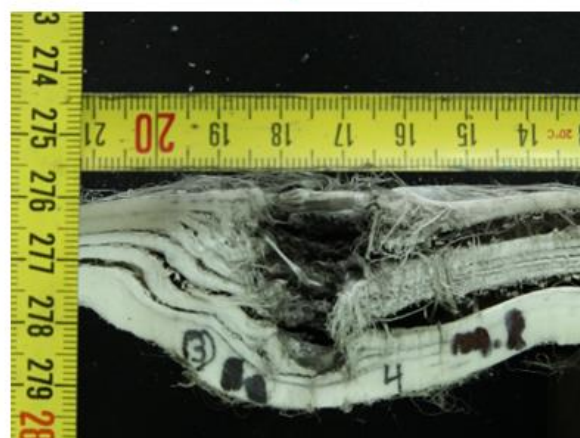
Εικόνα 96 : Αρίθμηση (καθρέπτης) των βολών του δοκιμίου 2.A στην διεπιφάνεια συνθέτου-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση).



1



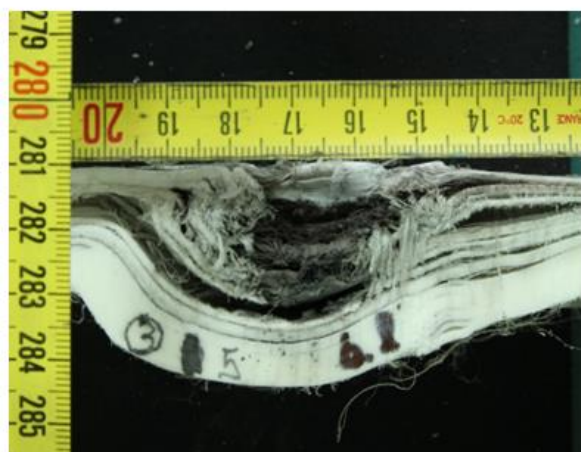
2



4



3



5



6

Εικόνα 97 : Σημεία βολών του δοκιμίου 2.Α σε τομή και υπό κλίμακα.

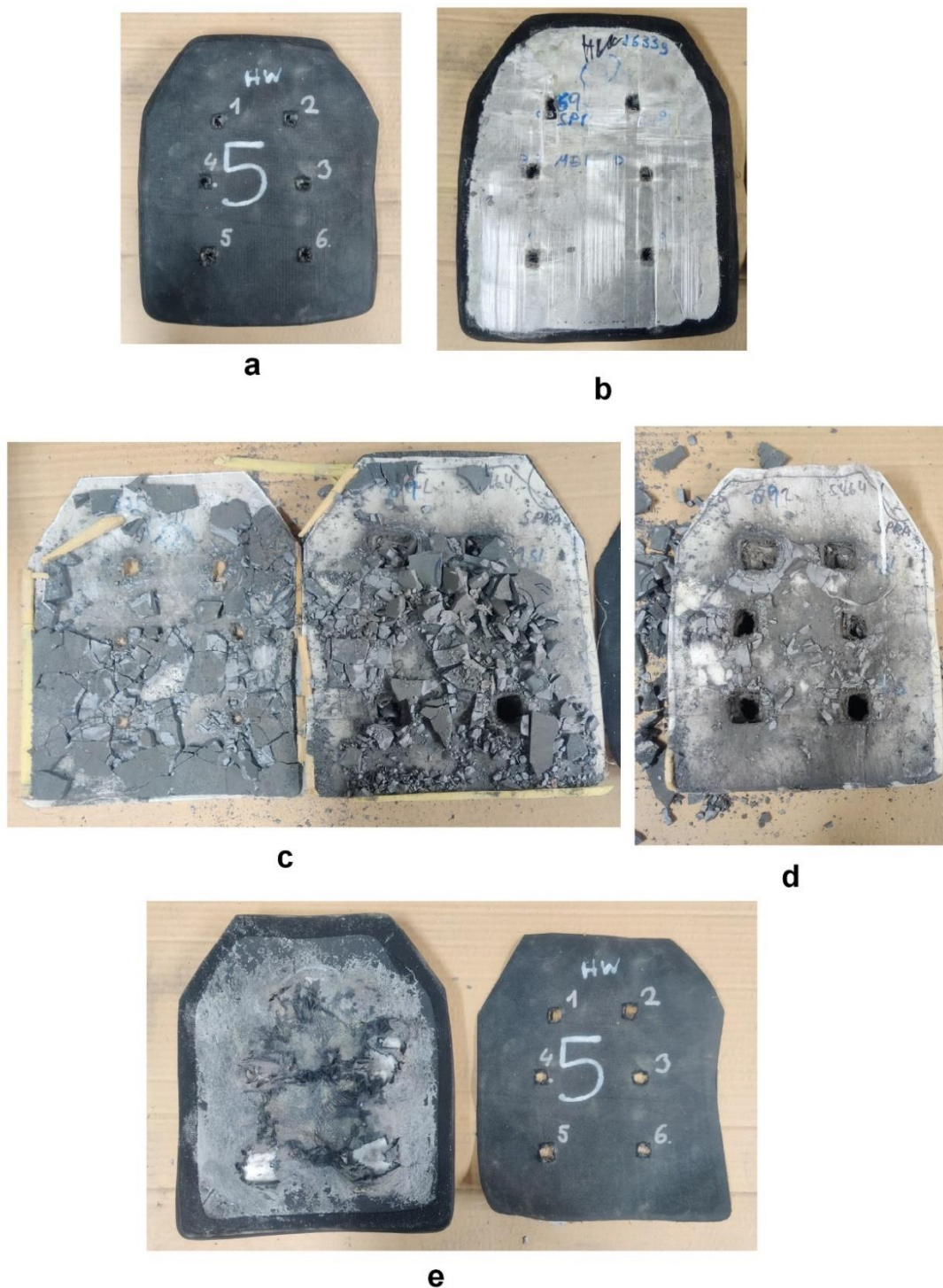
Τα βασικά υπολογιζόμενα μεγέθη, με αντίστοιχο τρόπο του δοκιμίου 1, και για τις 6 πλέον βολές του δοκιμίου 2.Α συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 19**.

Ορίζονται τα αρτικόλεξα των θέσεων των βολών του **Πίνακα 19** με βάση το μοτίβο αρίθμησης του εκάστοτε δοκιμίου (εδώ με βάση την **Εικόνα 94**) ως :

- **T.L** : TOP LEFT
- **T.R** : TOP RIGHT
- **M.L** : MIDDLE LEFT
- **M.R** : MIDDLE RIGHT
- **B.L** : BOTTOM LEFT
- **B.R** : BOTTOM RIGHT

Πίνακας 19 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 2.Α.

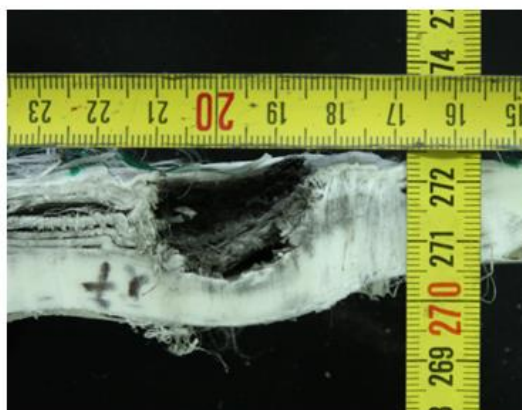
Βολή	Θέση	Βλήμα	Διάμετρος επιρροής του βλήματος επί του κεραμικού (mm)	P.P (mm)	C.P (mm)	Διατρηθέντα φύλλα/69	D.O.P (%)
1	T.L	M80 FMJ	30	7.8	1.8	13	19
2	T.R	M80 FMJ	25	4.1	5.5	40	57
3	M.R	M80 FMJ	20	4.8	4.8	35	50
4	M.L	M80 FMJ	20	3.6	6.0	43	63
5	B.L	M80 FMJ	25	6.6	3.0	22	31
6	B.R	M80 FMJ	25	5.7	3.9	28	41
M.O			24.2	5.4	4.2	30	43



Εικόνα 98 : Δοκίμιο 2.B (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διαπιφάνειες αντιθραυσματικής μεμβράνης-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση)-συνθέτου, (d) σύνθετη πλάκα κατόπιν αφαίρεσης του θραυσμένου κεραμικού, (e) πίσω όψη με κάλυμα.



1



2



4



3



5



6

Εικόνα 99 : Σημεία βολών του δοκιμίου 2.B σε τομή και υπό κλίμακα.

Τα βασικά υπολογιζόμενα μεγέθη του δοκιμίου 2.B συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 20**. Λόγω των παραπάνω απουσιάζει η αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 19 «Διάμετρος επιρροής του βλήματος επί του κεραμικού (mm)».

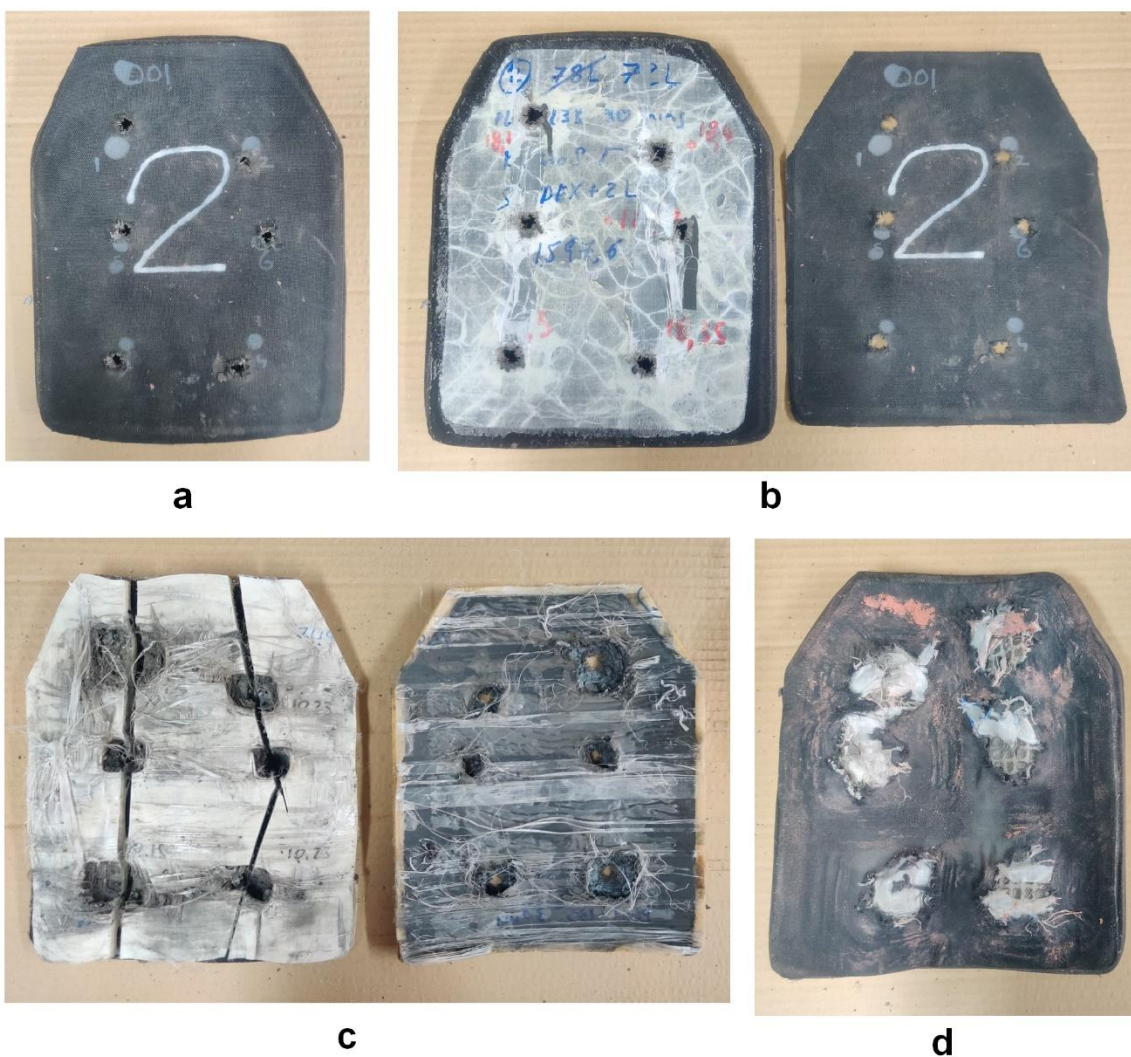
Πίνακας 20 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 2.B.

Βολή	Θέση	Βλήμα	P.P (mm)	C.P (mm)	Διατρηθέντα φύλλα/69	D.O.P (%)
1	T.L	M80 FMJ	9.2	0.4	3	4
2	T.R	M80 FMJ	7.3	2.3	17	24
3	M.R	M80 FMJ	6.9	2.7	19	28
4	M.L	M80 FMJ	4.7	4.9	35	51
5	B.L	M80 FMJ	7.7	1.9	14	20
6	B.R	M80 FMJ	5.2	4.4	32	46
M.O			6.8	2.8	20	29

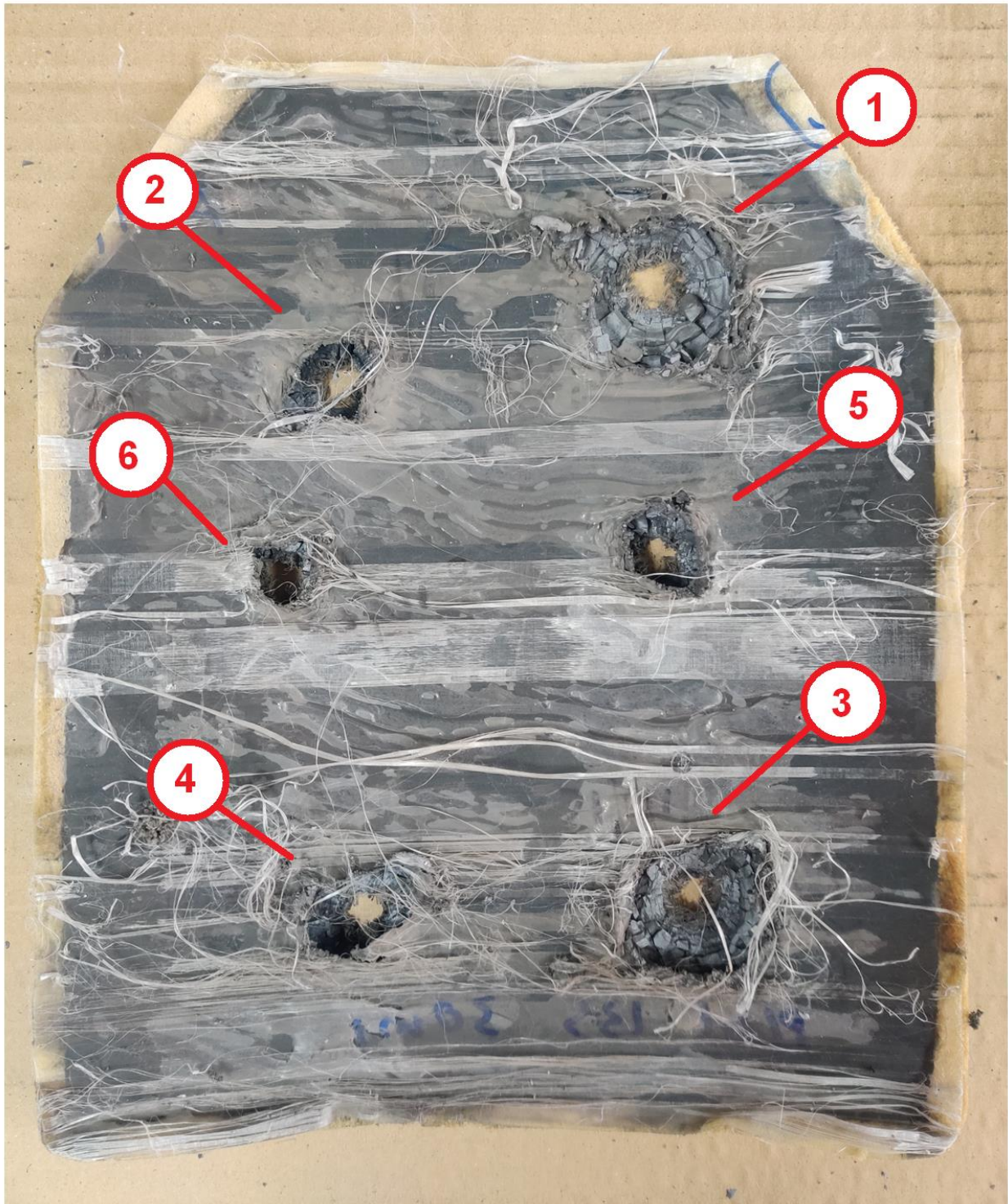
5.1.3 Δοκίμια 3.A και 3.B :



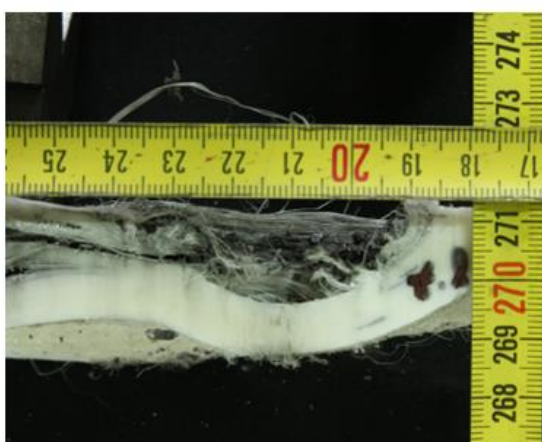
Εικόνα 100 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των δοκιμών 3.A. και 3.B.



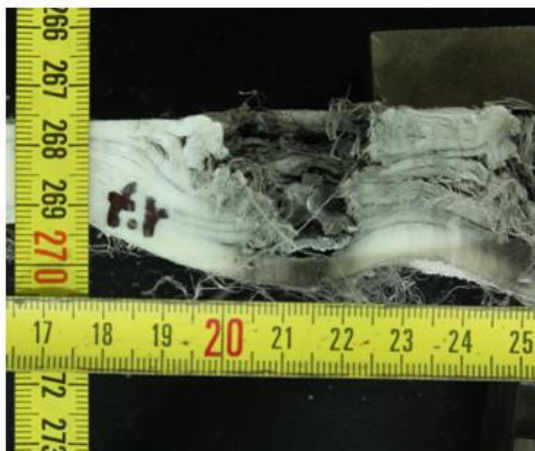
Εικόνα 101 : Δοκίμιο 3.A (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διαπιφάνεια συνθέτου (με τομές των σημείων βολής)-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση), (d) πίσω όψη με κάλυμα.



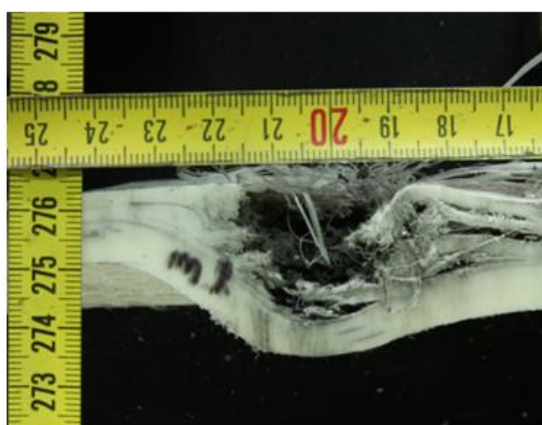
Εικόνα 102 : Αρίθμηση (καθρέπτης) των βολών του δοκιμίου 3.Α στην διεπιφάνεια συνθέτου-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση).



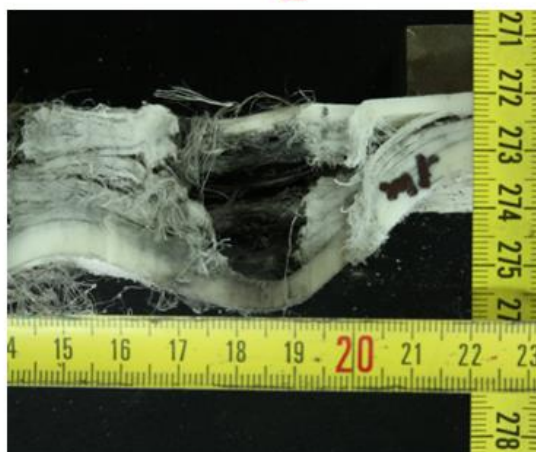
1



2



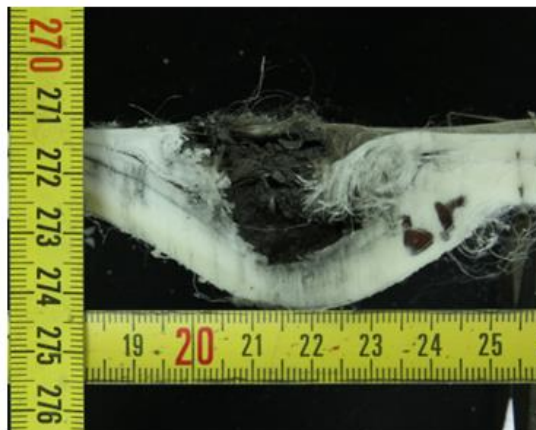
5



6



3



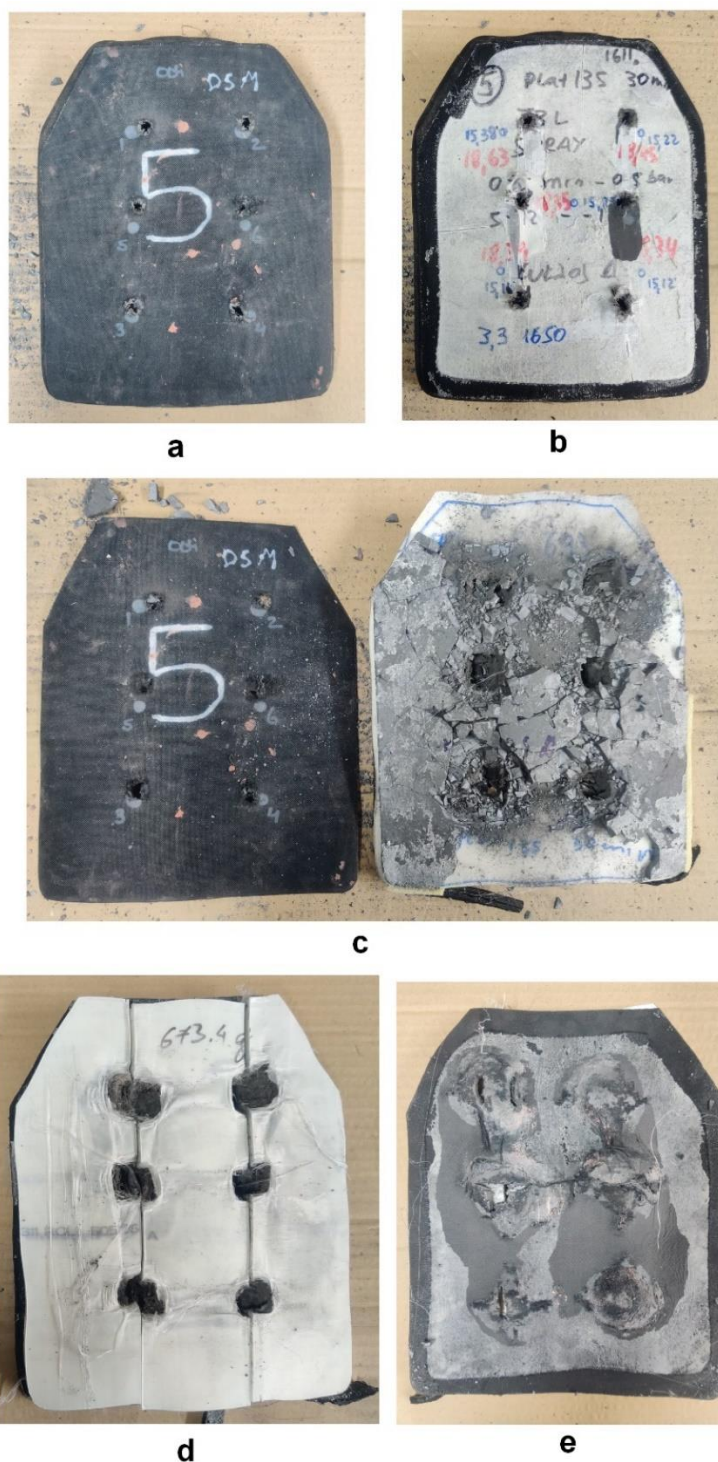
4

Εικόνα 103 : Σημεία βολών του δοκιμίου 3.A σε τομή και υπό κλίμακα.

Τα βασικά υπολογιζόμενα μεγέθη του δοκιμίου 3.A συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 21**. Υπενθυμίζεται πως το μοτίβο αρίθμησης των θέσεων αλλάζει σύμφωνα με την **Εικόνα 100**.

Πίνακας 21 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 3.A.

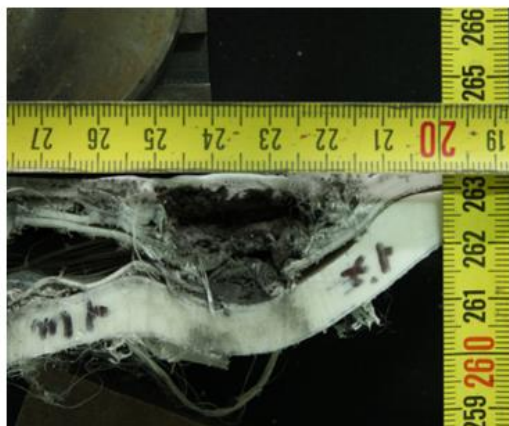
Βολή	Θέση	Βλήμα	Διάμετρος επιρροής του βλήματος επί του κεραμικού (mm)	P.P (mm)	C.P (mm)	Διατρηθέντα φύλλα/74	D.O.P (%)
1	T.L	M80 FMJ	40	8.4	1.2	9	13
2	T.R	M80 FMJ	25	4.8	4.8	37	50
3	B.L	M80 FMJ	42.5	7.6	2.0	15	21
4	B.R	M80 FMJ	25	6.3	3.3	25	34
5	M.L	M80 FMJ	22.5	5.7	3.9	30	41
6	M.R	M80 FMJ	15	4.4	5.2	40	54
M.O			24.2	6.2	3.4	26	35



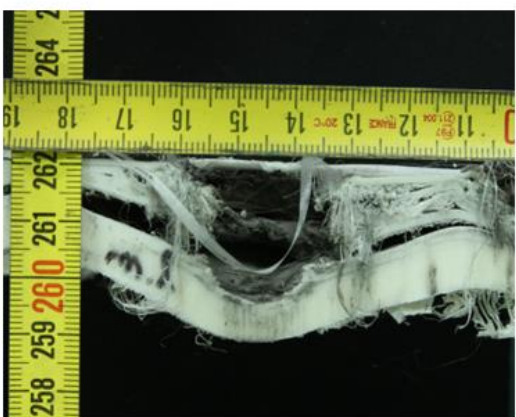
Εικόνα 104 : Δοκίμιο 3.Β (α) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (β) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (γ) διαπιφάνεια κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση)-συνθέτου, (δ) σύνθετο χωρίς θραύσματα κεραμικού με τομές βολών, (ε) πίσω όψη χωρίς κάλυμα.



1



2



5



6



3



4

Εικόνα 105 : Σημεία βολών του δοκιμίου 3.B σε τομή και υπό κλίμακα.

Τα βασικά υπολογιζόμενα μεγέθη του δοκιμίου 3.Β συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 22**.

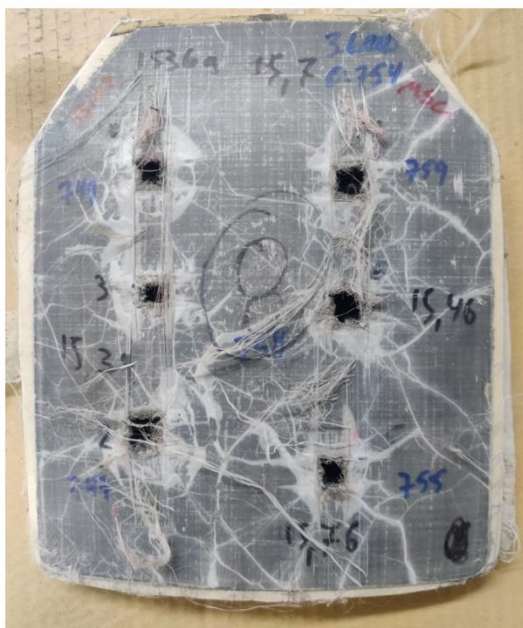
Πίνακας 22 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 3.Β.

Βολή	Θέση	Βλήμα	P.P (mm)	C.P (mm)	Διατρηθέντα φύλλα/74	D.O.P (%)
1	T.L	M80 FMJ	7.7	1.9	15	20
2	T.R	M80 FMJ	7.9	1.7	13	18
3	B.L	M80 FMJ	6.9	2.7	21	28
4	B.R	M80 FMJ	7.6	2.0	15	21
5	M.L	M80 FMJ	6.6	3.0	23	31
6	M.R	M80 FMJ	6.9	2.7	21	28
M.O			7.3	2.3	18	24

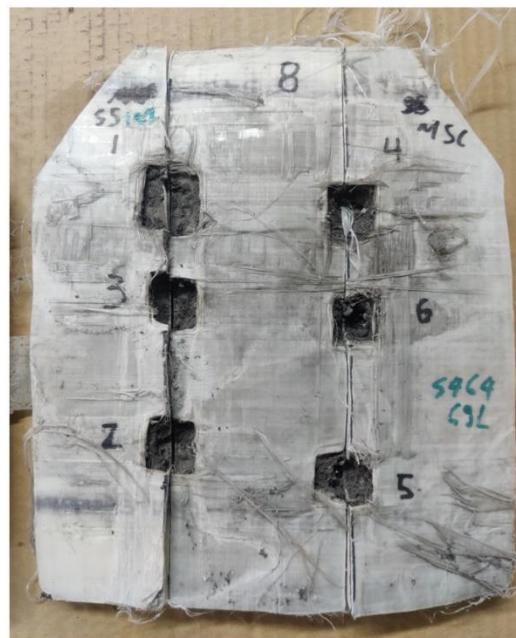
5.1.4 Δοκίμιο 4 :



Εικόνα 106 : Μοτίβο αρίθμησης βολών του δοκιμίου 4.



a



b

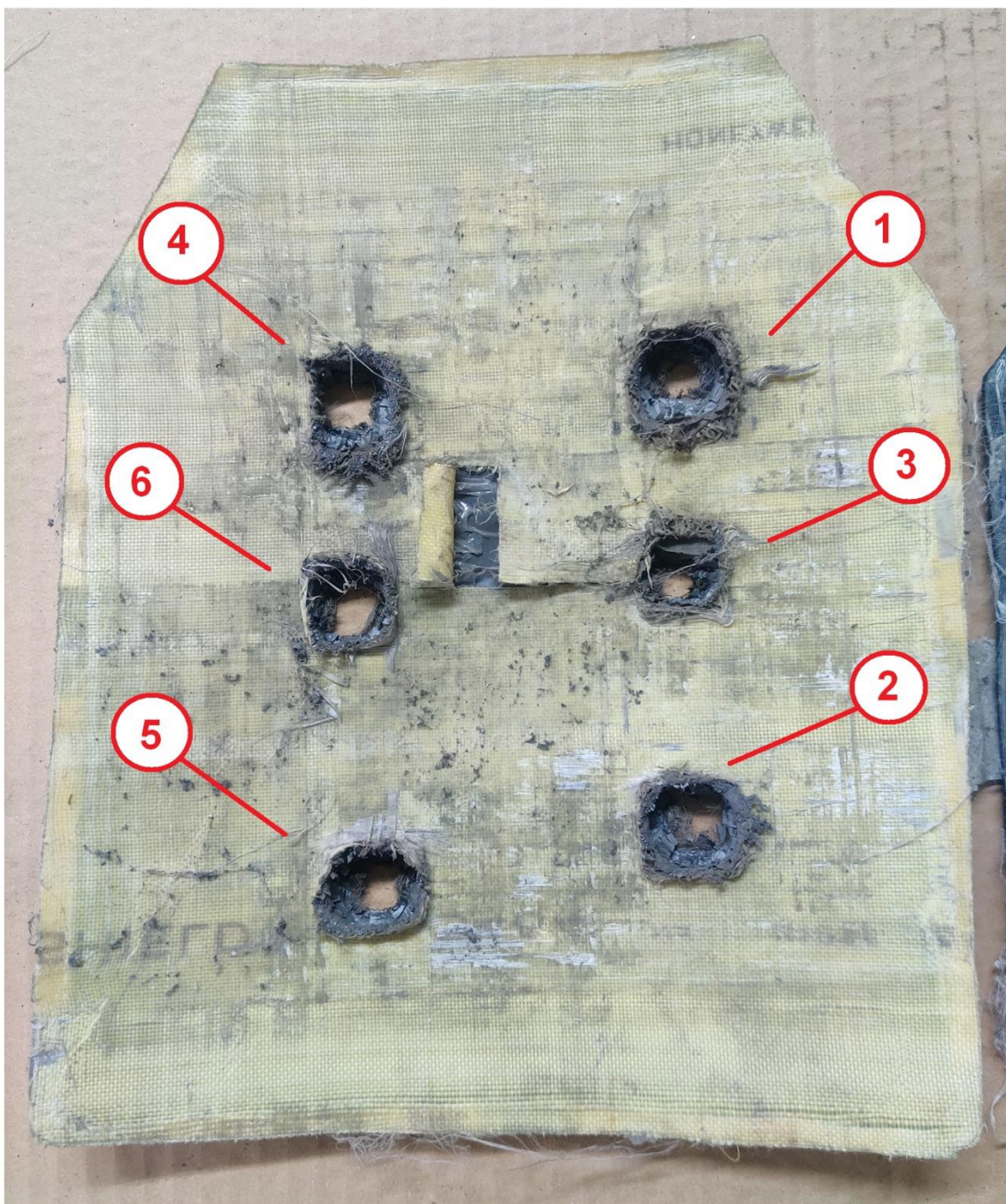


c

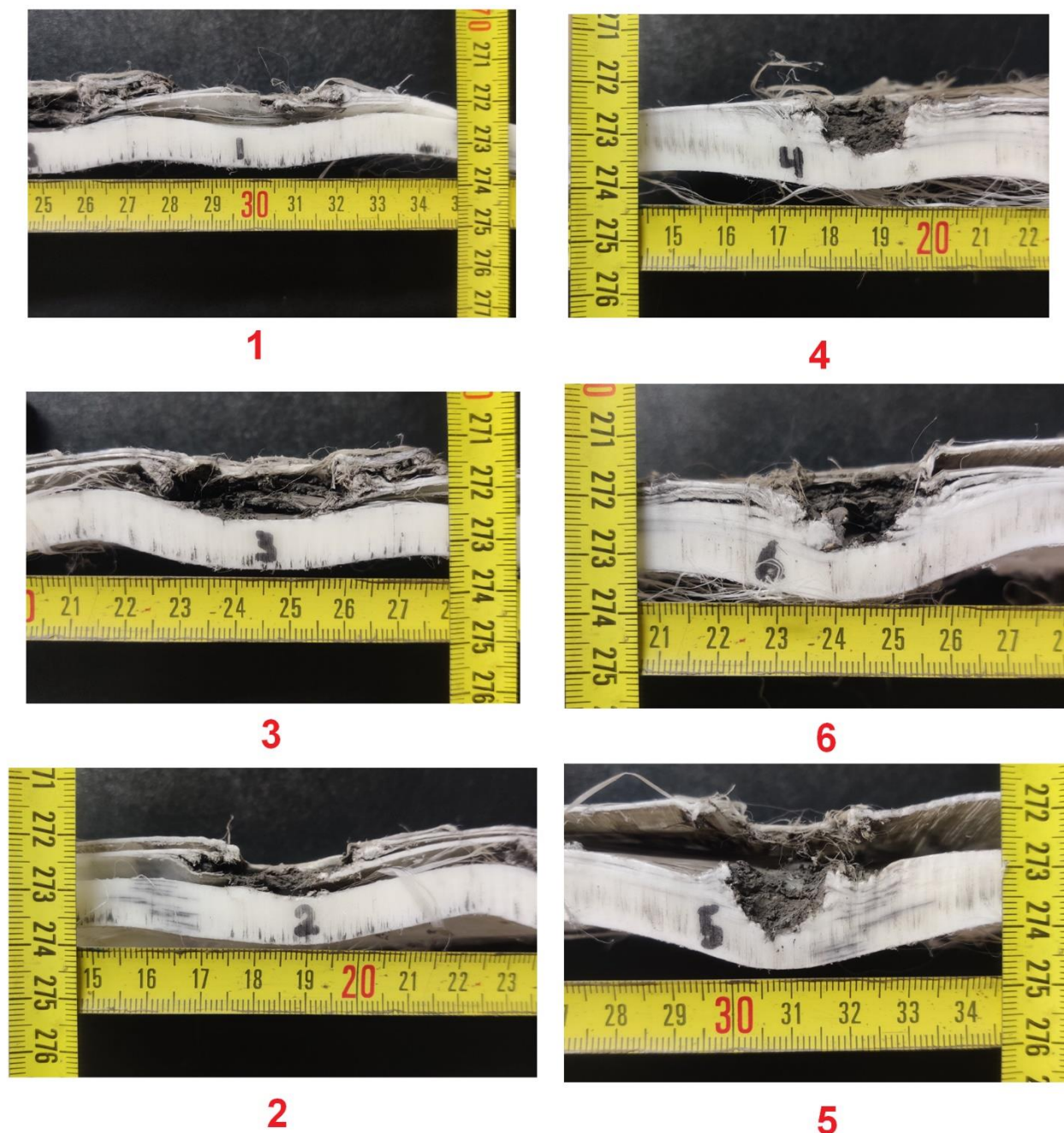


d

Εικόνα 107 : Δοκίμιο 4 (a) εμπρόσθια όψη αντιθραυσματικής επίστρωσης κατόπιν αφαίρεση του καλύματος, (b) σύνθετη πλάκα (με τομές βολών), (c) κεραμική πλάκα με αραμιδική ενίσχυση, (d) πίσω όψη με κάλυμα.



Εικόνα 108 : Αρίθμηση (καθρέπτης) των βολών του δοκιμίου 4 στην διεπιφάνεια συνθέτου-κεραμικής πλάκας με αραμιδική ενίσχυση.



Εικόνα 109 : Σημεία βολών του δοκιμίου 4 σε τομή και υπό κλίμακα.

Τα βασικά υπολογιζόμενα μεγέθη του δοκιμίου 4 συγκεντρώνονται στον Πίνακα 23. Υπενθυμίζεται πως το μοτίβο αρίθμησης των θέσεων αλλάζει σύμφωνα με την Εικόνα 106 και τα βλήματα δεν είναι 6 μη διατρητικά M80 FMJ 7.62x51 αλλά 3 μη διατρητικά SS109 FMJBT 5.56x45 και 3 διατρητικά MSC 7.62x39. Λόγω διαφορετικών τύπων βλημάτων επί

του ίδιου δοκιμίου υπολογίζεται ο μέσος όρος του βάθους διείδυσης DOP (%) των τριών πρώτων βολών, ύστερα των τριών τελευταίων βολών και εν τέλη ο συνολικός μέσος όρος.

Πίνακας 23 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 4.

Βολή	Θέση	Βλήμα	Διάμετρος επιρροής του βλήματος επί του κεραμικού (mm)	P.P (mm)	C.P (mm)	Διατρηθέντα φύλλα/69	D.O.P (%)
1	T.L	SS109 FMJBT	25	9.3	0.3	2	3
2	B.L	SS109 FMJBT	25	9.0	0.6	4	6
3	M.L	SS109 FMJBT	20	8.6	1.0	7	10
M.O SS109			23.3	9.0	0.6	5	7
4	T.R	MSC	27.5	6.4	3.2	23	33
5	B.R	MSC	27.5	5.1	4.5	32	47
6	M.R	MSC	25	8.1	1.5	11	16
M.O MSC			26.7	6.5	3.1	22	32
Συνολικός M.O			25	7.8	1.9	13	19

5.1.5 Θραυστομηχανική ανάλυση κεραμικών πάνελ :

Γενικότερα το κατά πόσο θραύεται μια κεραμική πλάκα (αντι)βαλλιστικής εφαρμογής εξαρτάται, πέραν της παρουσίας η μη αραμιδικής ενίσχυσης και κατά τον μεγαλύτερο βαθμό από την γεωμετρική αντιστοιχία/επαφή της με το σύνθετο κατά την συσσωμάτωση τους (autoclave ή απλά συνθήκες κενού), την ποιότητα της συγκόλλησης (ποιότητα συγκολλητικών μέσων) αλλά και την ποιότητα του κεραμικού.

Ανεξαρτήτως τύπου βλήματος (διατρητικό η μη) και μοτίβου αρίθμησης των βολών η μεγαλύτερη φθορά επέρχεται στο κεραμικό πάνελ από το πρώτο βλήμα. Αυτό συμβαίνει πρακτικά γιατί η πρόσφυση κεραμικού-συνθέτου, πριν το δοκίμιο δεχθεί τα πυρά, είναι κατασκευαστικά η βέλτιστη δυνατή.

Με την πρώτη βολή το κεραμικό απορροφά την ενέργεια του βλήματος με αποτέλεσμα να ρηγματώνεται σε μεγάλο βαθμό και ακτινικά γύρω από την οπή. Σε εκείνο το σημείο αποκολλάται για πρώτη φορά από το σύνθετο πάνελ λόγω του οπισθοανακλώμενου κρουστικού κύματος της εναπωμείνουσας ενέργειας του βλήματος (μη διαμπερές τραύμα) και της μόνιμης παραμόρφωσης του πάνελ (μηχανισμός αποκόλλησης-

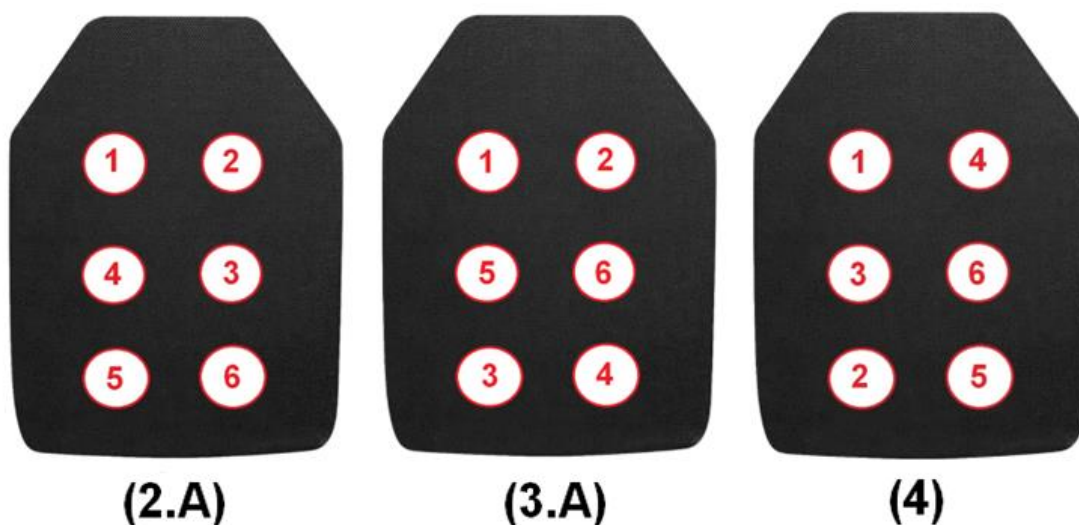
delamination). Στις βολές που ακολουθούν το κεραμικό προδευτικά συνεχίζει να διαχωρίζεται από το σύνθετο πάνελ χάνοντας την υποστήριξη του από αυτό, μέχρι και την τελευταία βολή όπου έχει αποκολληθεί πλήρως. Με την πρόοδο των βολών δημιουργείται σταδιακά ένα διάκενο μεταξύ των αυτών δύο συνιστωσών της θωράκισης και το εκάστοτε βλήμα παύει να «βλέπει» ένα «σύστημα συμπαγούς θωράκισης» αλλά δύο ξεχωριστά πλέον υλικά.

Γι' αυτό τον λόγο και οι διάμετροι επιρροής των βλημάτων επί του κεραμικού, στον συγκεντρωτικό **Πίνακα 24**, είναι σε γενικές γραμμές μικρότερες για τις επακόλουθες βολές σε σχέση με την πρώτη ενώ οι διαφορετικοί τύποι βλημάτων και η ύπαρξη αραμιδικής ενίσχυσης στο δοκίμιο 4 δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά.

Πίνακας 24 : Διάμετροι επιρροής βλημάτων για τα δοκίμια 2.A, 3.A και 4.

Βολή	Διάμετρος επιρροής του βλήματος επί του κεραμικού (mm)		
	Δοκίμιο 2.A (υλικό πάνελ A)	Δοκίμιο 3.A (υλικό πάνελ B)	Δοκίμιο 4 (υλικό πάνελ A)
1	30	40	25
2	25	25	25
3	20	42.5	20
4	20	25	27.5
5	25	22.5	27.5
6	25	15	25
M.O	24.2	24.2	25

Παρατηρούμε βέβαια πως οι διάμετροι δεν βαίνουν απαραίτητα μειούμενες κατά την πρόοδο των βολών. Αυτό συμβαίνει διότι το μοτίβο αρίθμησης παίζει ρόλο στην σταδιακή υποβάθμιση του μονοκεραμικού (βλ. **Εικόνα 110**). Είναι επόμενο η περιοχή ακτινικής θραύσης μεταξύ δύο βολών επηρεάζεται από την σχετική τους απόσταση. Αυτό επαληθεύεται από τις **Εικόνες 96, 102 και 108** συγκεκριμένα μεταξύ της πρώτης-πέμπτης βολής για το δοκίμιο 2.A, μεταξύ της πρώτης-τρίτης βολής για το δοκίμιο 3.A και μεταξύ της πρώτης-τέταρτης βολής για το δοκίμιο 4.



Εικόνα 110 : Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμών 2.A, 3.A και 4.

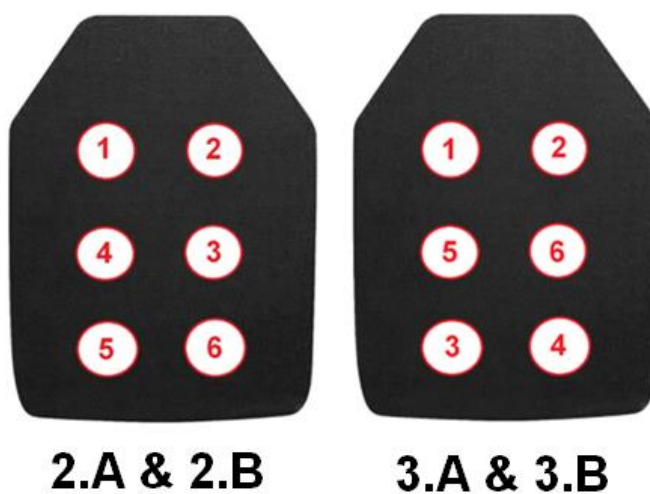
Φαίνεται πως η «ιδανική» βολή που καθιστά την μελέτη ενός συστήματος κεραμικού-συνθέτου πιο αξιόπιστη είναι η πρώτη, καθώς εκεί «παραβιάζεται» για πρώτη φορά η πρόσφυση μεταξύ των συντελεστών αυτών της θωράκισης. Τα φαινόμενα θραύσης που λαμβάνουν χώρα μετά την πρώτη βολή φαίνεται να είναι αναμεμειγμένα καθώς περιλαμβάνουν μεταβλητές όπως είναι η γωνία πρόσκρουσης, η σειρά αρίθμησης των βολών και η ποιότητα συγκόλλησης των επι μέρους συνιστωσών. Όσο περισσότερο θραυσμένο είναι το κεραμικό μετά την πρώτη βολή τόσο μεγαλύτερη, τυπικά, αλληλεπίδραση έχει υπάρξει με το βλήμα. Η καταστροφική καταπόνηση του μονοκεραμικού και κατ' επέκταση του σύνθετου πάνελ είναι επιθυμητή καθώς μειώνεται έτσι η επιρροή της βαλλιστικής κρούσης στον χρήστη (αφομείωση μηχανισμού BFD).

5.1.6 Σύγκριση της επίδοσης θωρακίσεων διαφορετικών υλικών σύνθετων πάνελ για δεδομένη απειλή (βλήμα) :

Λαμβάνοντας τα βάθη διείσδυσης DOP από τους Πίνακες 19, 20, 21 και 22 των δοκιμών 2.A, 2.B, 3.A και 3.B αντίστοιχα συγκεντρώνουμε την πληροφορία στον ακόλουθο Πίνακα 25. Τα δοκίμια είναι όμοια μεταξύ τους και έχουν δεχθεί 6 βολές από δεδομένα μη διατρητικά βλήματα M80 FMJ 7.62x51 με σειρά αρίθμησης βολών που φαίνεται στην Εικόνα 111. Η μόνη ουσιαστική διαφορά των τεσσάρων δοκιμών είναι το υλικό του σύνθετου πάνελ UHMWPE, με ίδιο τελικό πάχος 9.6 mm. Όπως αναφέραμε και στην αρχή της §5.1 τα πολύστρωτα σύνθετα των δοκιμών 2.A και 2.B κατασκευάζονται από υλικό A ενώ τα 3.A και 3.B από υλικό B αντίστοιχα.

Πίνακας 25 : Βάθη διείσδυσης DOP (%) για τα δοκίμια 2.A, 2.B, 3.A και 3.B.

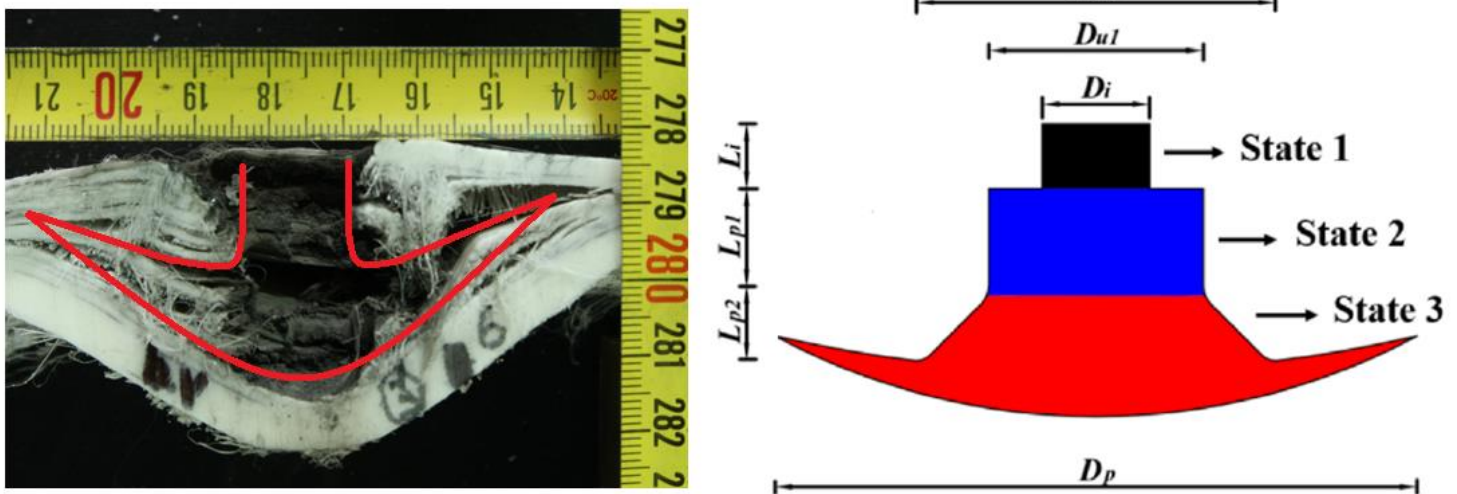
Βολή	Βάθος διείσδυσης DOP (%)			
	Υλικό πάνελ UHMWPE υλικού Α		Υλικό πάνελ UHMWPE Β	
	Δοκίμιο 2.A	Δοκίμιο 2.B	Δοκίμιο 3.A	Δοκίμιο 3.B
1	19	10	13	20
2	57	24	50	18
3	50	28	21	28
4	63	51	34	21
5	31	20	41	31
6	41	46	54	28
M.O	43	30	35	24



Εικόνα 111 : Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμών 2.A,2.B, 3.A και 3.B.

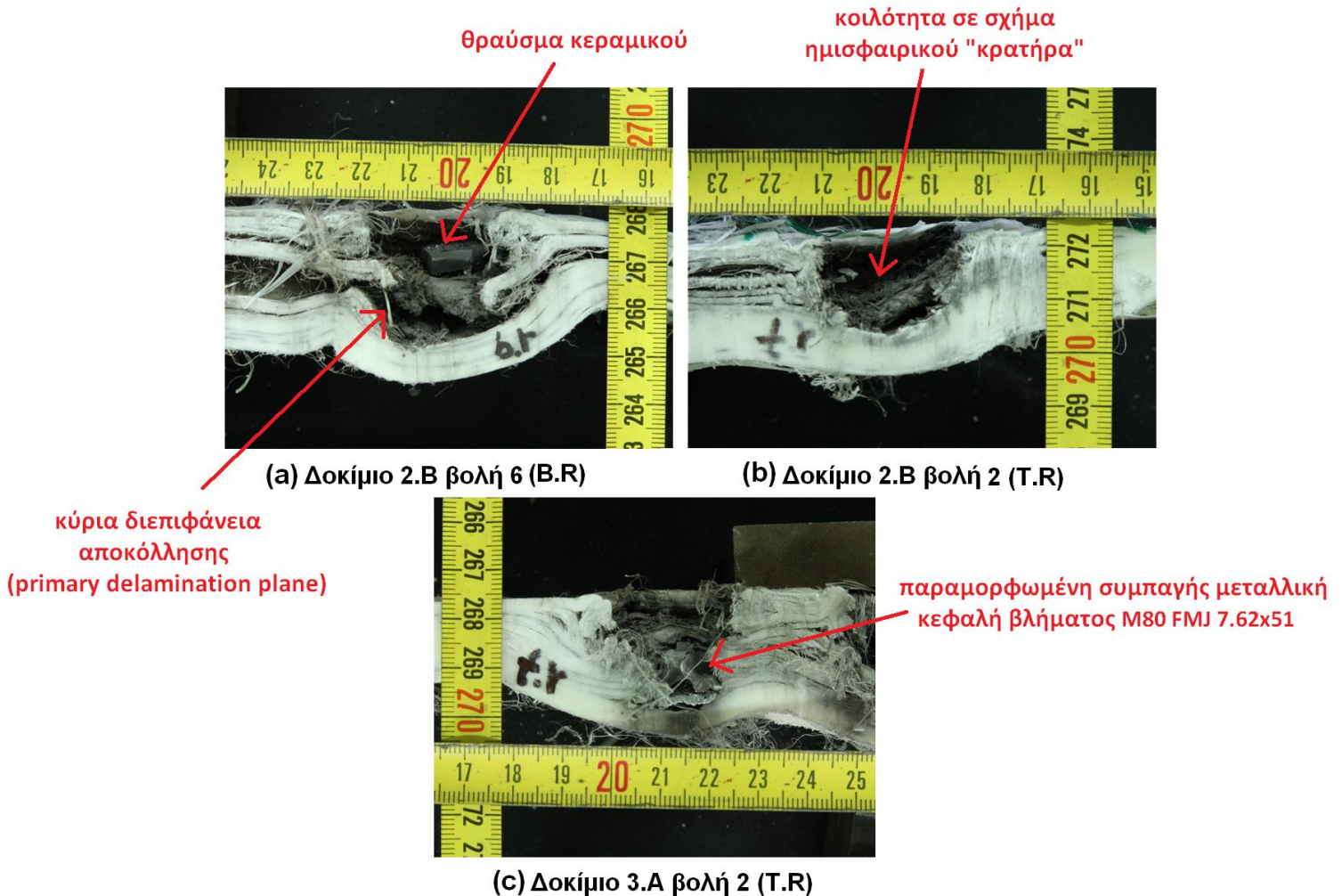
Τα βλήματα των δοκιμών 2.A, 2.B, 3.A και 3.B είναι μη διατρητικά (non-piercing). Τα φουσίγγια τους (jacket) και ο πυρήνας τους (core) αποτελούνται από μαλακά μέταλλα (Light Steel Core bullets-LPS) και όχι από συμπαγές μέταλλο. Σε αντίθεση με τα διατρητικά βλήματα (π.χ MSC 7.62x39) το κυρίως σώμα του βλήματος (jacket & core) τείνει να θραυσματοποιείται πλήρως ενώ η συμπαγής κεφαλή (steel warhead) είτε εξαϋλώνεται κατά την πρόσκρουση με το μονοκεραμικό είτε παραμορφώνεται εκτενώς (βλ. **Εικόνα 113.c**). Εφόσον ένα μεγάλο κομμάτι της κινητικής ενέργειας του βλήματος δεν απορροφάται από την εντατική παραμόρφωση ενός ατσάλινου πυρήνα, τείνει να διαχέεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια και κατά το πάχος του συνθέτου, με αποτέλεσμα την εντονότερη διαφυλλική αποκόλληση και ένα βαθύτερο αποτύπωμα BFS.

Για τον λόγο αυτό οι μορφές των τομών ανά τα σημεία βολών στις **Εικόνες 97, 99, 103 και 105** πλησιάζουν περισσότερο στο 2^ο (State 2) και το 3^ο στάδιο (State 3) διεξόδου της §3.3.7 όπου το βλήμα, έχοντας θραυσματοποιηθεί διαχέει την κινητική του ενέργεια, μέσω του μηχανισμού BFD και της έντονης αποκόλλησης των διαστρωματωμένων φύλλων του σύνθετου πάνελ (βλ. **Εικόνα 112**). Υπενθυμίζουμε ακόμα πως στην τελική μας θωράκιση τοποθετούμε ένα μονοκεραμικό πάνελ μπροστά από το σύνθετο πάνελ UHMWPE επομένως το πρώτο στάδιο (State 1) διεξόδου «απορροφάται» από την θραύση του κεραμικού. Οι τυφλές οπές των βολών αποκτούν άλλοτε ένα ημισφαιρικό σχήμα «κρατήρα» και άλλοτε ένα σχήμα μανιταροκεφαλής ενώ οι κύριες διεπιφάνειες αποκόλλησης (primary delamination plane) είναι αρκετά εμφανείς (βλ. **Εικόνα 113**).



Εικόνα 112 : Χαρακτηρισμός σταδίων διάνοιξης οπής 2 και 3 για μη διατρητικά βλήματα M80 FMJ επί τομής στο σημείο βολής 6 του δοκιμίου 2.A.

Οι τρεις μηχανισμοί αστοχίας των σύνθετων πάνελ λαμβάνουν χώρα (ανά τις 2 φάσεις μιας βαλλιστικής κρούσης της §3.1.3) με τη διαδοχή που περιγράφεται στην §3.3.4. Με λίγα λόγια, εφόσον το βλήμα έχει διαπεράσει το μονοκεραμικό, κατά την φάση εισόδου του στο σύνθετο πάνελ ο μηχανισμός παραμόρφωσης που επικρατεί είναι η θράυση των πρώτων ινών (I). Κατά την φάση θραυσματοποίησης του βλήματος το σύνθετο πάνελ υφίσταται διαφυλλική αποκόλληση (III) με ταυτόχρονη θραύση ινών (I) καθώς το βλήμα σταδιακά χάνει την διατρητική του ικανότητα λόγω τριβής με τις διεπιφάνειες αποκόλλησης (II).



Εικόνα 113 : (a) βολή 6 του δοκιμίου 2.B με παρουσία θραύσματος κεραμικού στην κοιλότητα, (b) βολή 2 του δοκιμίου 2.B με κοιλότητα σε σχήμα ημισφαιρικού κρατήρα, (c) βολή 2 του δοκιμίου 3.A με παρουσία παραμορφωμένης κεφαλής του βλήματος.

Παρατηρούμε αρχικά (βλ. Εικόνες 97, 99, 103 και 105) πως ο μηχανισμός BFD λόγω της διαφυλλικής αποκόλλησης εμφανίζεται εντονότερα στα σύνθετα πάνελ υλικού A (2.A & 2.B). Ταυτόχρονα με μία πρώτη ματιά στον Πίνακα 25 το δοκίμιο 2.A παρουσιάζει μεν προσδευτικά και δε συνολικά, μεγαλύτερο DOP (%) από το δοκίμιο 2.B. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην καλή πρόσφυση μονοκεραμικού και σύνθετου πάνελ στο δοκίμιο 2.B. Αντίθετα τα βάθη DOP των δοκιμίων 3.A και 3.B υλικού B ακολουθούν πιο ομοιόμορφη πορεία για τα αντίστοιχα σημεία βολής. Δεν παύει ωστόσο η επιρροή του μοτίβου αρίθμησης των βολών (βλ. Εικόνα 111) δηλαδή η σταδιακή κατάρρευση των γειτονικών περιοχών ενός σημείου πρόσκρουσης να παίζει σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα στην περίπτωση που τα σημεία βολής είναι «κοντά» και παρ' όλο που τηρούνται οι κανόνες αρίθμησης διαδοχής των βολών κατά NIJ Standard-0101.06 της Εικόνας 42.

Ωστόσο τα 2 πάνελ υλικού Α παρουσιάζουν, κατά μέσο όρο, **21% μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης DOP** από τα 2 πάνελ υλικού Β, γεγονός που συνάδει με τα παραπάνω. Η διαφορά είναι σημαντική και καθιστά την (αντι)βαλλιστική επίδοση του υλικού Β καλύτερη του υλικού Α.

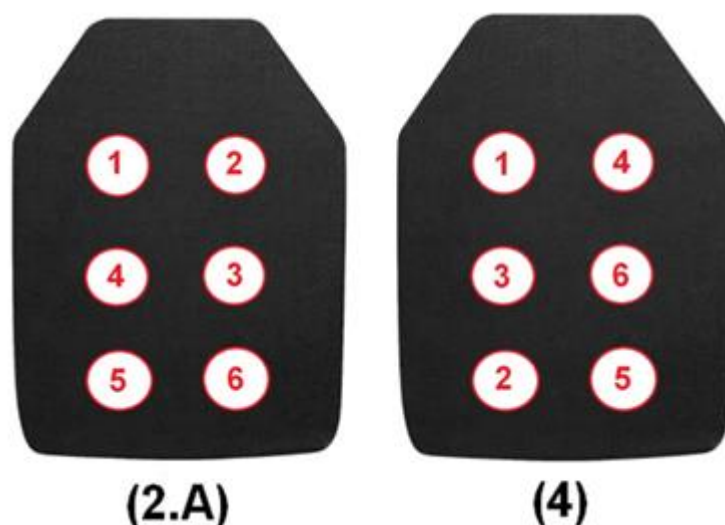
5.1.7 Απόκριση θωράκισης δεδομένου υλικού πάνελ σε διαφορετικές απειλές (βλήματα) :

Παραθέτουμε, για δεδομένο υλικό Α σύνθετου πάνελ UHMWPE και για όμοιες συνιστώσες της υπόλοιπης θωράκισης, τις μέσες τιμές των βαθών διείσδυσης DOP (%) των τριών διαφορετικών τύπων απειλών **M80 FMJ 7.62x51**, **SS109 FMJBT 5.56x45** και **MSC 7.62x39** συγκεκριμένα για τις 6 βολές του δοκιμίου 2.Α, τις τρεις πρώτες βολές και τις τρεις τελευταίες βολές του δοκιμίου 4 αντίστοιχα, στον ακόλουθο **Πίνακα 26**.

Λόγω περιορισμένων και κοστοβόρων πόρων δεν υπήρξε η δυνατότητα βαλλιστικής δοκιμής με 6 βολές βλημάτων **SS109** και 6 βολές βλημάτων **MSC** σε δύο διαφορετικά δοκίμια σύνθετου πάνελ υλικού Α. Γι' αυτό καλούμαστε να εκμαιεύσουμε την επίδοση της θωράκισης από τα αποτελέσματα των «μικτών» βολών το δοκιμίου 4. Ωστόσο τα βλήματα **SS109**, όντας μη διατρητικά, κατέχοντας μικρή ενέργεια εξόδου (1,797 J) και σχετικά μικρό διαμέτρημα δεν έχουν όση διεισδυτική ικανότητα (βάθος DOP) όση τα διατρητικά βλήματα **MSC**. Από την πρόοδο του μικρού βάθους DOP για τις τρεις πρώτες βολές του **Πίνακα 23** από βλήματα **SS109** θεωρούμε πως αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά τις τρεις ακόλουθες βολές των βλημάτων **MSC**. Ταυτόχρονα υφίσταται διαχωρισμός των δύο τύπων βλημάτων εκατέρωθεν της «νοητής» κατακόρυφης συμμετρίας της θωράκισης όπως φαίνεται στην **Εικόνα 114**, γεγονός που τυπικά «αποστασιοποιεί» την περιοχή επιρροής των διατρητικών βλημάτων από τα μη διατρητικά και αντίστροφα.

Πίνακας 26 : Βάθη διείσδυσης DOP (%) βολών από διαφορετικούς τύπους βλημάτων επί θωρακίσεων ίδιου σύνθετου πάνελ υλικού Α.

Δοκίμιο	Βολές	Βλήμα	Μ.Ο Βάθους διείσδυσης DOP (%)
2.Β	1-6	M80 FMJ 7.62x51	29
4	1-3	SS109 FMJBT 5.56x45	7
4	4-6	MSC 7.62x39	32



Εικόνα 114 : Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμών 2.A και 4.

Από την τελευταία στήλη του **Πίνακα 26** αντιλαμβανόμαστε άμεσα την υπεροχή της διατρητικής ικανότητας των βλημάτων τύπου MSC έναντι των μη διατρητικών βλημάτων τύπου M80 και SS109. Πιο συγκεκριμένα τα βλήματα **MSC** φαίνεται να **παρουσιάζουν**, κατά μέσο όρο και για τη δεδομένη σύσταση (αντι)βαλλιστικών δοκιμών, **384% βαθύτερο DOP των SS109** και **11% βαθύτερο DOP των M80**.

Όπως αναφέραμε και στην **§5.1.5** η πιο χαρακτηριστική βολή για την θραυστομηχανική μελέτη μίας θωράκισης είναι η πρώτη καθώς κατ' αυτήν την κρούση το σύστημα κεραμικού-συνθέτου έχει την βέλτιστη συγκόλληση και επομένως το σύνθετο πάνελ υποστηρίζει κατά το βέλτιστο τρόπο το μονοκεραμικό. Στην **Εικόνα 115** φαίνονται οι τομές των τριών βολών με βλήματα **M80 FMJ 7.62x51**, **SS109 FMJBT 5.56x45** και **MSC 7.62x39** επί των δοκιμών 2.B και 4, αντίστοιχα. Παρατηρούμε την έντονη παρουσία του μηχανισμού αποκόλλησης (interlaminar shear-delamination) κατά την πρόσκρουση από τα μη διατρητικά βλήματα M80 και SS109 με εμφανείς τις κύριες διεπιφάνειες αποκόλλησης και τη συγκριτικά μεγαλύτερη διατρητικότητα του βλήματος MSC. Η μορφή των οπών είναι ακανόνιστη και δεν παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά στάδια διεϊσόδουσης της **§3.3.7** αλλά αποκτούν ένα ημισφαιρικό σχήμα «κρατήρα».

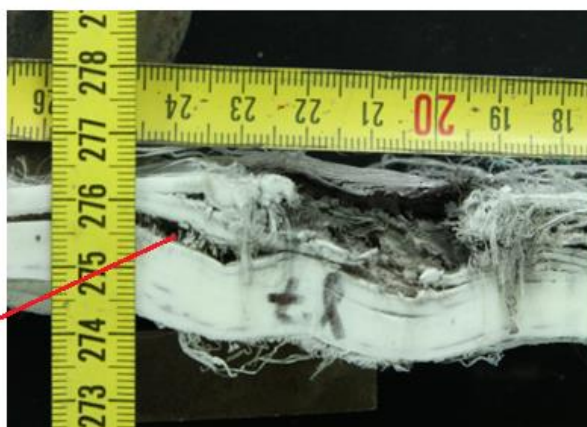
Στην **Εικόνα 116** φαίνεται η έντονη παραμόρφωση και η διαστασιολόγηση του συμπαγούς πυρήνα (steel core) των τριών διατρητικών βλημάτων MSC 7.62x39. Ο πυρήνας φαίνεται να έχει λάβει την χαρακτηριστική μορφή μανιταριού της **Εικόνας 57.b** ενώ εντοπίζουμε και θραύσματα του περιβλήματος (steel jacket) το οποίο έχει διαχωριστεί από τον πρώτο.

με τις τελικές διαστάσεις να προκύπτουν ως :

- **$D_0 \approx 5.8 \text{ mm}$** : η αρχική διάμετρος του ατσάλινου πυρήνα. Για τον συγκεκριμένο τύπο βλήματος.

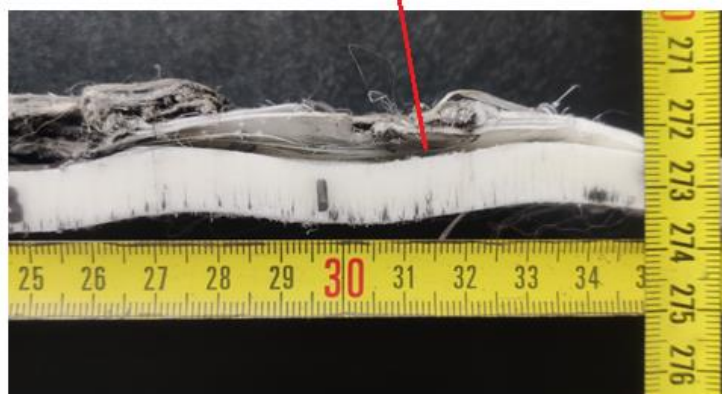
- $D_i \approx 14 \text{ mm}$: η μέγιστη διάμετρος της κεφαλής του πυρήνα κατόπιν παραμόρφωσης.
- $L_b \approx 15 \text{ mm}$: το εναπομείναν μήκος του πυρήνα κατόπιν παραμόρφωσης.

κύριες διεπιφάνειες
αποκόλλησης (primary
delamination planes)

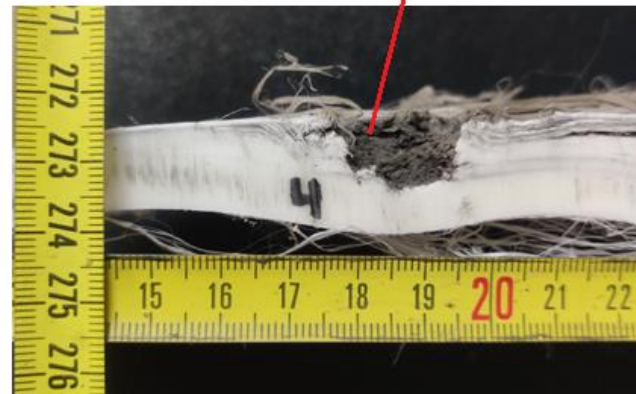


τυφλή οπή σε σχήμα
ημισφαιρικού
"κρατήρα"

Δοκίμιο 2.Β βολή 1 (βλήμα M80)

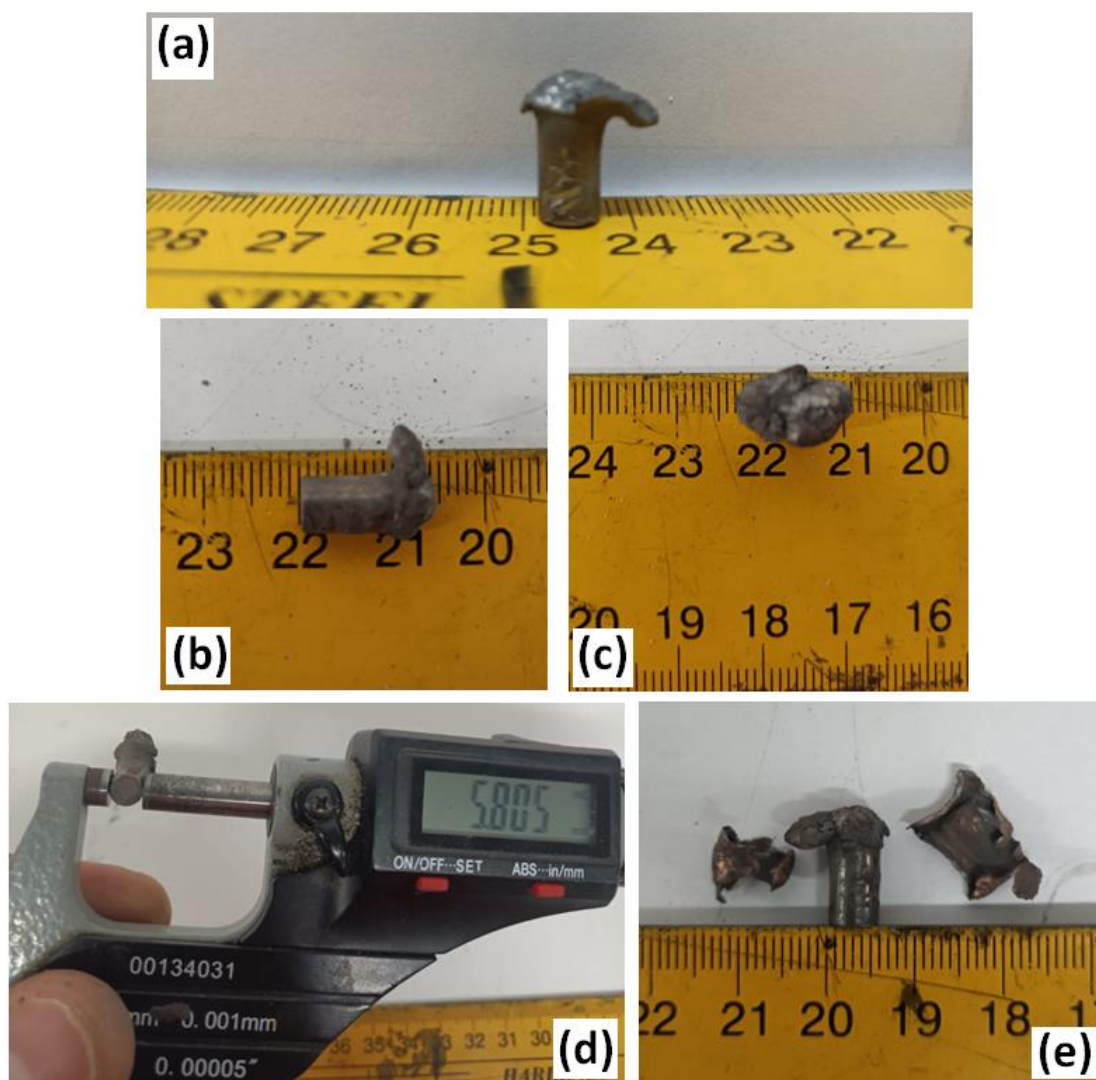


Δοκίμιο 4 βολή 1 (βλήμα SS109)



Δοκίμιο 4 βολή 4 (βλήμα MSC)

Εικόνα 115 : Τομές βολών επί δοκιμίων σύνθετου πάνελ υλικού Α με τρεις διαφορετικούς τύπους βλήματος M80, SS109 (μη διατρητικά) και MSC (διατρητικό).



Εικόνα 116 : (a-b-c) Διαστασιολόγηση παραμορφωμένου συμπαγούς πυρήνα βλήματος MSC 7.62x39 επί δοκιμίου 4, σύνθετου πάνελ UHMPE υλικού A, (d) Μικρομέτρηση τελικής διαμέτρου συμπαγούς πυρήνα, (e) Παραμορφωμένος πυρήνας (κέντρο) με θραύσματα του μεταλλικού περιβλήματος (steel jacket) εκατέρωθεν.

5.1.8 Συμπεράσματα βαλλιστικών δοκιμών των σύνθετων πάνελ :

Τα συμπεράσματα των άνωθεν βαλλιστικών δοκιμών για τα σύνθετα πάνελ υλικών υλικών Α και Β και τους τρεις διαφορετικούς τύπους βλημάτων Μ80, SS109 και MSC συνοψίζονται ως :

- Τα σύνθετα πάνελ υλικού Α παρουσιάζουν, για δεδομένο βλήμα (Μ80), **21% μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης DOP** από τα πάνελ υλικού Β και επομένως καθίστανται (αντι)βαλλιστικά υποδεέστερα.
- Τα μη διατρητικά βλήματα **Μ80 FMJ 7.62x51** έχοντας υψηλή ενέργεια εξόδου (3,470 J) και τυπικά μικρή διατρητικότητα (μικρή πένετρα), εμφανίζουν βαθύ αποτύπωμα BFS λόγω του μηχανισμού BFD και προκαλούν έντονη παραμόρφωση λόγω αποκόλλησης των φύλλων του πάνελ (interlaminar shear-delamination).
- Τα μη διατρητικά βλήματα **SS109 FMJBT 5.56x45** έχουν αρκετά χαμηλότερη ενέργεια εξόδου (1,797 J) των **Μ80**, μικρή διατρητικότητα, εμφανίζουν μικρό αποτύπωμα BFS. Παρ' όλα αυτά προξενούν αισθητή αποκόλληση των φύλλων των σύνθετων πάνελ.
- Τα διατρητικά βλήματα τύπου **MSC 7.62x39** έχουν μεν χαμηλότερη ενέργεια εξόδου (2,036 J) των **Μ80** ωστόσο μεγαλύτερη διατρητικότητα (μεγάλη πένετρα) λόγω του σκληρού μεταλλικού τους πυρήνα, γι' αυτό και τείνουν να εμφανίζουν πιο ρηχό και ευρύ αποτύπωμα BFS καθώς ο μηχανισμός της αποκόλλησης εξαπλώνεται του διεπιφανειακά των επάλληλων φύλλων, παρά κατά το πάχος του συνθέτου.
- Ο μηχανισμός BFD λόγω της διαφυλλικής αποκόλλησης εμφανίζεται εντονότερα στα σύνθετα πάνελ υλικού Α.
- Τα βλήματα MSC παρουσιάζουν για δεδομένη σύσταση (αντι)βαλλιστικών δοκιμών με σύνθετο πάνελ υλικού Α, 384% βαθύτερο DOP των SS109 και 11% βαθύτερο DOP των Μ80.

Ακολουθεί ο **Πίνακας 27** ο οποίος συγκεντρώνει, με βάση τα άνωθεν συμπεράσματα, τους χαρακτηριστικούς κινδύνους που περιτρέχουν μία θωράκιση και εν δυνάμει το χρήστη της από τους τρεις διαφορετικούς τύπους βλημάτων Μ80, SS109 και MSC και περιλαμβάνει προτάσεις «ενίσχυσης» τους.

Πίνακας 27 : Βασικοί κίνδυνοι των τριών τύπων βλημάτων και δυνατοί μέθοδοι αντιστάθμισης τους.

Τύπος βλήματος	Βασικά χαρακτηριστικά, μηχανισμοί αστοχίας για τη θωράκιση και επίπεδο κινδύνου τραυματισμού του χρήστη.	Δυνατοί τρόποι αντιστάθμισης
M80 FMJ 7.62x51	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ υψηλή ενέργεια εξόδου • Σχετικά μικρή διατρητικότητα (μικρό βάθος διείσδυσης DOP) • Έντονη παραμόρφωση λόγω του μηχανισμού αποκόλλησης (delamination) • Βαθύ και συγκεντρωμένο αποτύπωμα BFS λόγω του μηχανισμού παραμόρφωσης BFD του συνθέτου. 	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του πάχους του βαλλιστικού αφρού ή υβριδοποίηση του με άλλα κατάλληλα υλικά με σκοπό την αφομείωση του BFS. • Αύξηση του πάχους πάνελ ώστε να περιοριστεί το εύρος του BFD. • Ίσως να καθίσταται δυνατή η πλήρης αντικατάσταση του κεραμικού πάνελ με ικανοποιητικό πάχος σύνθετου πάνελ και άρα υπολειπόμενου μη διατρηθέντος υλικού.
SS109 FMJBT 5.56x45	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή ενέργεια εξόδου • Πολύ μικρή διατρητικότητα • Ρηχό αποτύπωμα BFS 	<ul style="list-style-type: none"> • Ένα μεγαλύτερο πάχος κεραμικού δύναται να αντισταθμίσει την ανάγκη ύπαρξης του σύνθετου πάνελ εξ' ολοκλήρου.
MSC 7.62x39	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ενέργεια εξόδου • Μεγάλη διατρητικότητα • Μικρή παραμόρφωση του πάνελ λόγω εκτενούς παραμόρφωσης του συμπαγούς πυρήνα. • Ρηχό και ευρύ αποτύπωμα BFS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του πάχους του κεραμικού. • Αύξηση του πάχους του σύνθετου πάνελ. • Συνδυασμός της σκληρής με μαλακή θωράκιση (hard armor in conjunction with soft armor- ICW).

5.2 Μηχανικές Δοκιμές

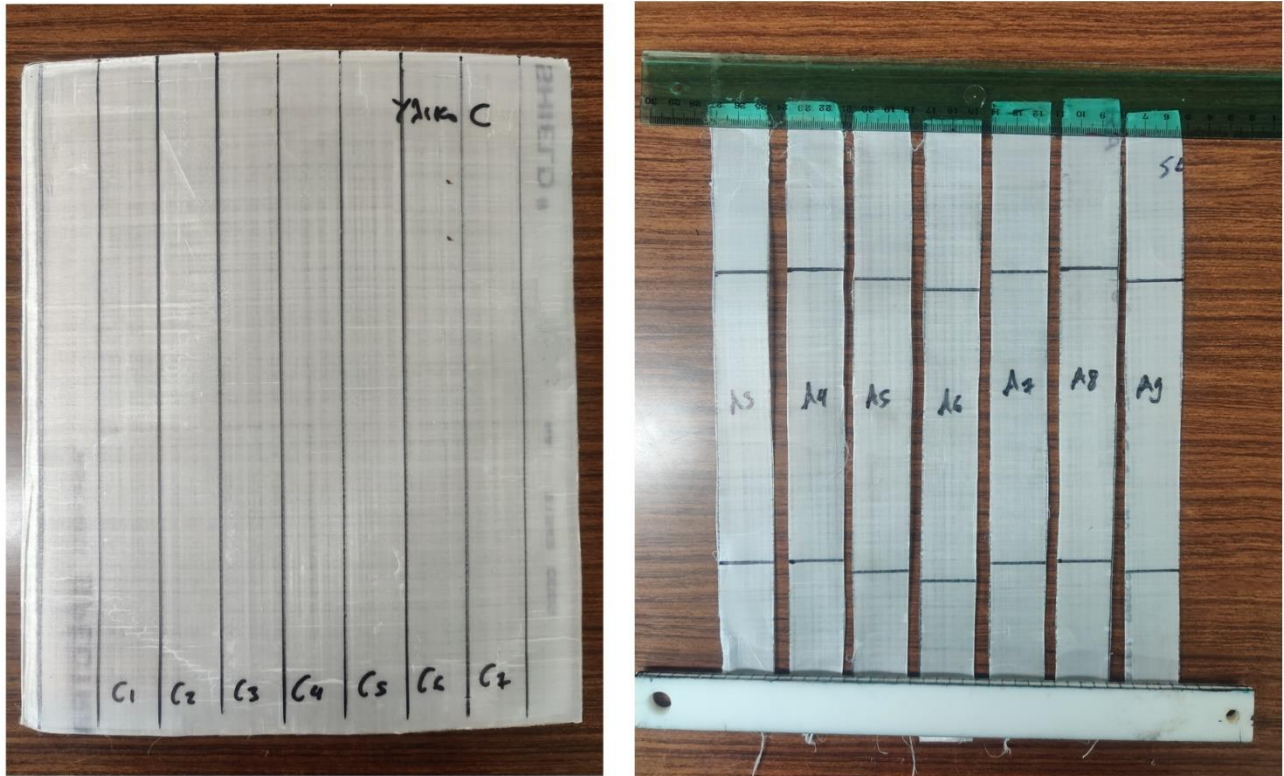
5.2.1 Αντοχή σε εφελκυσμό-Tensile Strength :

Ξεκινώντας τις μηχανικές μας δοκιμές με τον εφελκυσμό των δοκιμίων, σύμφωνα με το πρότυπο D3039/D3039M της §4.1, είναι επιθυμητό να αναφέρουμε πως τα **δοκίμια UHMWPE υλικών A, B και C** αποτελούν **λωρίδες μονών φύλλων προεμποτισμένων (pre-impregnated) ινών** με διάταξη $[0^\circ/90^\circ]_2$ (συνολικά 4 στρώσεις ινών) μέσα σε μήτρες ρητίνης και κατασκευάζονται με τη μέθοδο που περιγράφεται στην §3.3.5.

Για την διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων, χαράσσονται γραμμές πλάτους 25.4 mm επάνω σε ήδη κομμένα φύλλα συνθέτων A, B και C. Τα φύλλα αυτά προέρχονται, όπως προαναφέραμε από προκατασκευασμένα ρολά. Ύστερα σημειώνεται η περιοχή του ενεργού μήκους και του μήκους συγκράτησης, αφαιρώντας 56 mm από τις ακμές του συνολικού μήκους 254 mm των δοκιμίων και τέλος τα δοκίμια κόβονται (βλ. **Εικόνα 117**) με χρήση ειδικού ισχυρού ψαλιδιού (tough fiber/special application scissors).

Είναι λογικό πως λόγω διαφορετικών υλικών A, B και C, παρ'όλο που το πλάτος και το μήκος των λωρίδων παραμένουν ίδια, το κατασκευαστικό τους πάχος να διαφέρει ανά υλικό. Πιο συγκεκριμένα :

- **Υλικό A** : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.139 mm (πάχος).
- **Υλικό B** : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.130 mm (πάχος).
- **Υλικό C** : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.275 mm (πάχος).



Εικόνα 117 : Προετοιμασία δοκιμών εφελκυσμού.

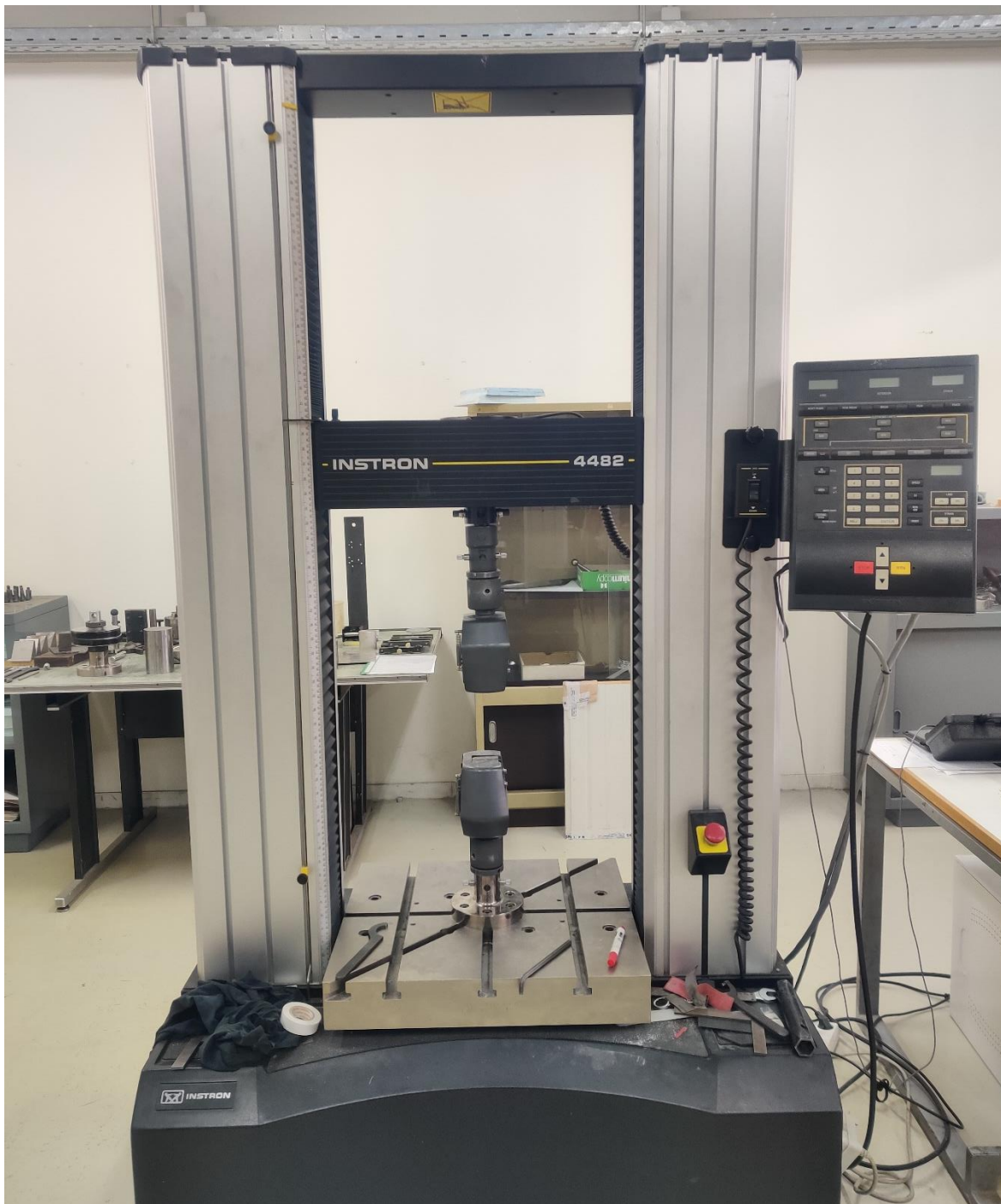
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για το παρόν πείραμα είναι η μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου **Instron® 4482** του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Το **μέγιστο** στατικό (και το δυναμικό) **φορτίο** της μηχανής είναι τα **100 kN** ενώ οι μετρήσεις λαμβάνονται μέσω η/υ, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την μηχανή, με το λειτουργικό πρόγραμμα **BLUEHILL 2**.

Η μετρητική διάταξη φέρει 2 όμοιες μηχανικές αρπάγεις που συγκρατούν το εκάστοτε δοκίμιο σταθερό κατά τον κατακόρυφο άξονα. Το εφελκυστικό φορτίο ασκείται από την επάνω αρπάγη ενώ η κάτω παραμένει σταθερή.

Αφού το δοκίμιο τοποθετηθεί στις εσωχές των δαγκανών, τις συσφίγγουμε χειροκίνητα. Παρ' όλο που οι αρπάγεις φέρουν τραχιά εσωτερική επιφάνεια, λόγω της ολισθηρής φύσης των υλικών μας χρησιμοποιούνται γλωττίδες (tabs) από γυαλόχαρτο για να αποφευχθεί η ολίσθηση των δοκιμών και άρα η ανακριβής καταγραφή του φορτίου. Για την παρακολούθηση της ολίσθησης, η μη, των δοκιμών στις αρπάγεις σημειώνονται με κόκκινο οι διαχωριστικές επιφάνειες εσωτερικά και εξωτερικά της συγκράτησης, κατόπιν σύσφιξης (βλ. **Εικόνα 119**).

Αφού η μηχανή βαθμονομηθεί (πριν από κάθε δοκιμή), η επάνω αρπάγη ξεκινά να εφελκύει το εκάστοτε δοκίμιο. Σκοπός του πειράματος είναι φυσικά ο καταστροφικός

έλεγχος των δοκιμών (πλήρης αστοχία), η βαθμονόμηση της ποιότητας κατά κύριο λόγο των ινών UHMWPE των υλικών Α,Β,Σ και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τη βαλλιστική τους απόδοση.



Εικόνα 118 : Μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου Instron® 4482 του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ.



Εικόνα 119 : Δοκίμιο εφελκυσμού στις μηχανικές αρπάγεις της Instron® 4482 προ της δοκιμής.

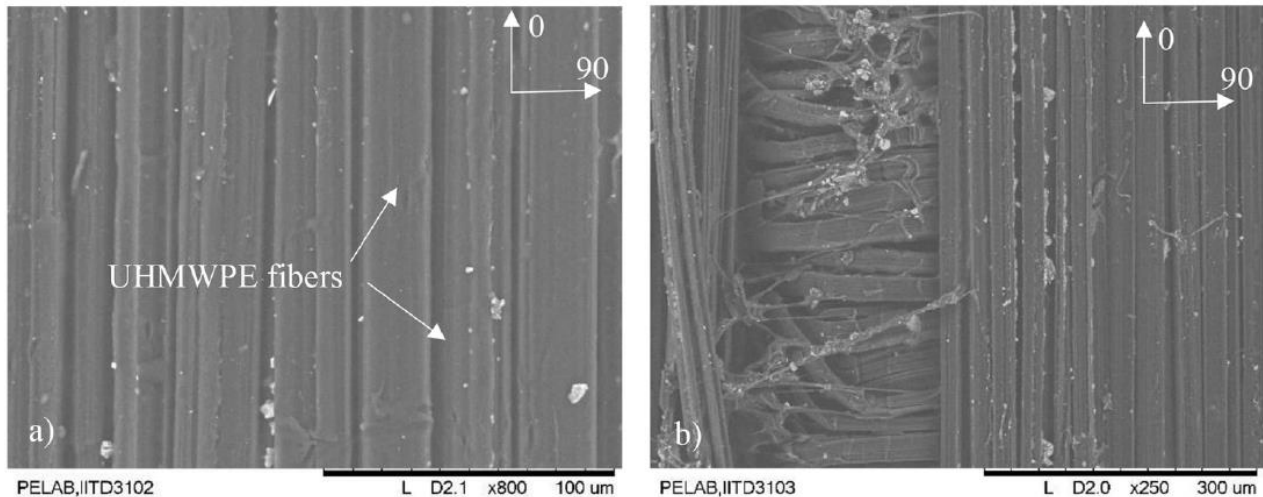
Σύμφωνα με το πρότυπο και όπως μόλις αναφέραμε το ονομαστικό μήκος συγκράτησης των δοκιμίων στις δαγκάνες είναι 56 mm. Αυτό τυπικά ανάγει το ενεργό μας μήκος σε (254 mm-2x56 mm) 138 mm. Ωστόσο οι εν λόγω αρπάγεις φέρουν λεία διαμόρφωση κατά τα 3 πρώτα χιλιοστά επομένως θεωρείται πως σε αυτό το μήκος δεν υφίσταται συγκράτηση. Επομένως το πραγματικό **ενεργό μήκος** θα είναι (138 mm + 6 mm) **144 mm**. Για να είμαστε τυπικοί και να υπακούμε στον κανόνα του ελάχιστου μήκους συγκράτησης των 56 mm μπορούμε να το επεκτείνουμε κατά 3 mm σε κάθε άκρο των δοκιμίων.

Λεία διαμόρφωση
πλάτους 3 mm των αρπαγών



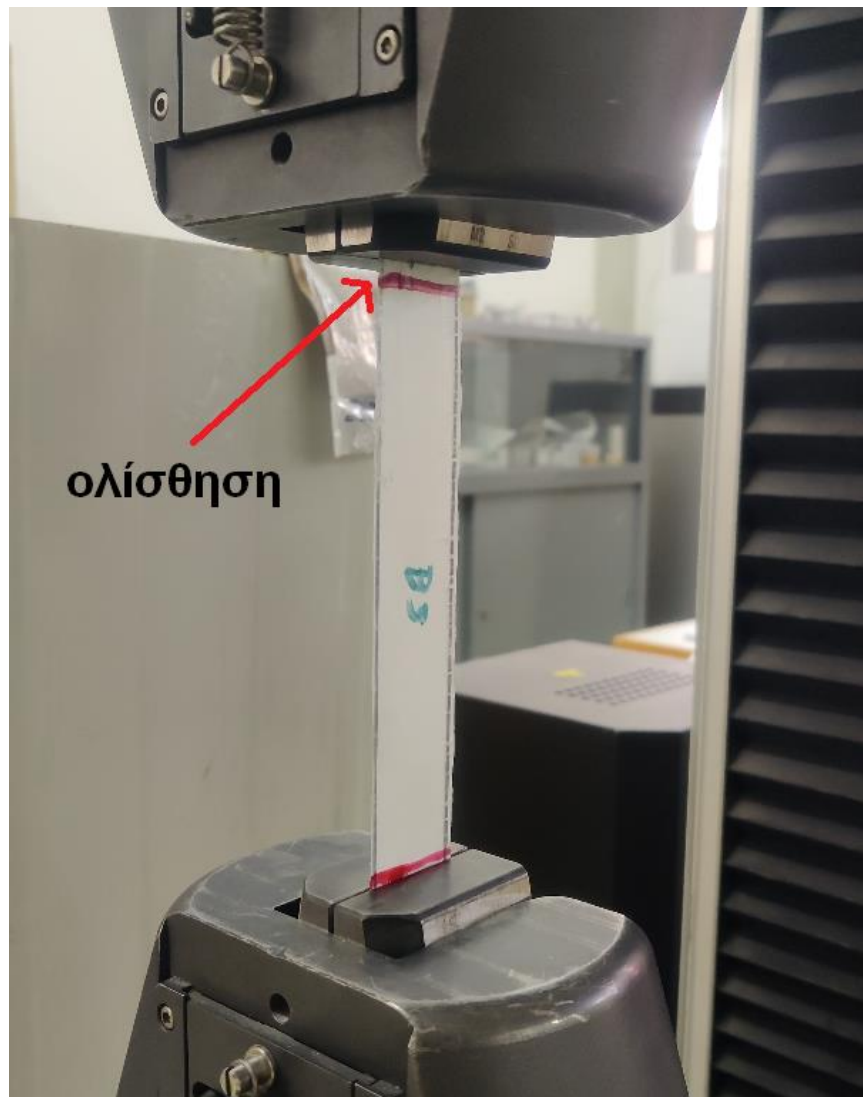
Εικόνα 120 : Λεία διαμόρφωση των αρπαγών της Instron® 4482.

Στην ακόλουθη ηλεκτρονική μικρογραφία φαίνεται η διάταξη των ινών UHMWPE προς την κατεύθυνση των 0° της φόρτισης αλλά και οι κάθετες ίνες στην κατεύθυνση των 90° .



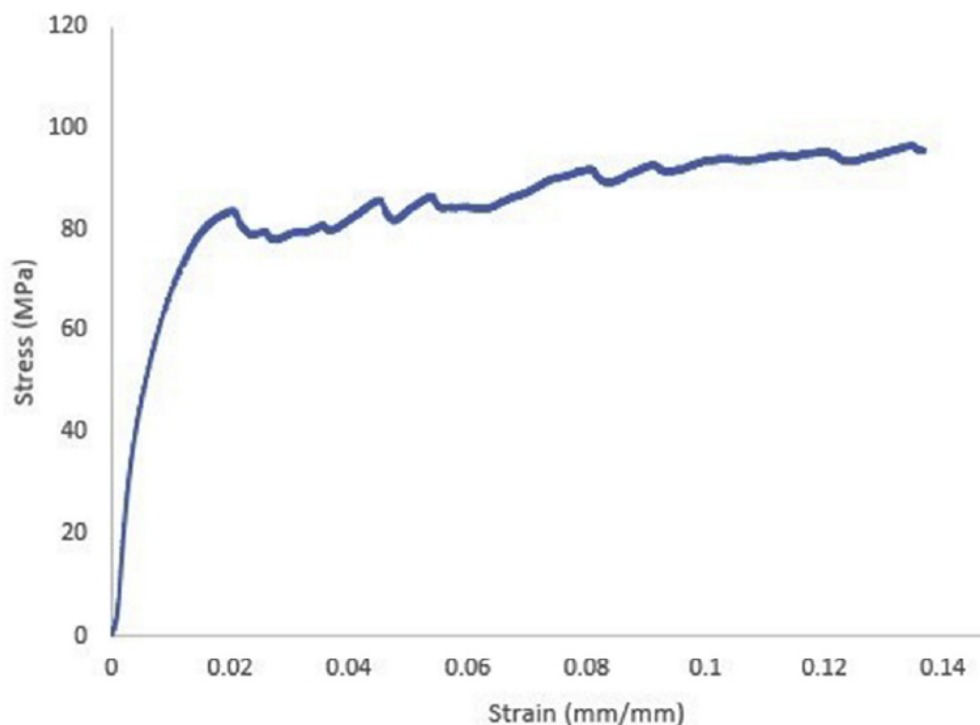
Εικόνα 121 : Ηλεκτρονική μικρογραφία της επιφάνειας των ινών UHMWPE σε σύνθετο πολυμερικής μήτρας (a) στην κατεύθυνση 0° , (b) ορατές ίνες στην κατεύθυνση των 90° , κάθετες στην διεύθυνση φόρτισης κατόπιν αφαίρεσης της πρώτης στρώσης ινών, προ εφελκυσμού [81].

Δυστυχώς ο τρόπος συγκράτησης των δοκιμών κρίθηκε ανεπαρκής. Λόγω της υψηλής αντοχής των υλικών, της ολισθηρής τους επιφάνειας και της χειροκίνητης σύσφιξης των αρπαγών παρατηρήθηκε επανειλημμένη ολίσθηση με την σταδιακή αύξηση του εφελκυστικού φορτίου κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 122 : Ολίσθηση των δοκιμίων στις μηχανικές αρπάξεις της Instron® 4482.

Η παραπάνω ολίσθηση οδηγεί το προκύπτον διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης/stress-strain (%) ή δύναμης-επιμήκυνσης/force-extension να λαμβάνει την μορφή της **Εικόνας 123**.



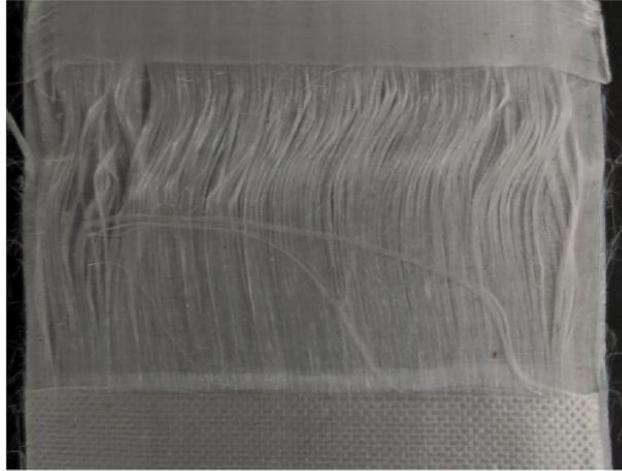
Εικόνα 123 : Αυξομείωση της εφελκυστικής τάσης λόγω ολίσθησης στις αρπάγεις, κατά τον εφελκυσμό μονόφυλλου δοκιμίου $[0^\circ/90^\circ]_2$ υλικού Spectra Shield® SR-1226 της Honeywell (προεμποτισμένες ίνες UHMWPE, μήτρα καουτσούκ) σε μηχανή Instron® 4482 5900R UTM, με υδραυλικές αρπάγεις [81].



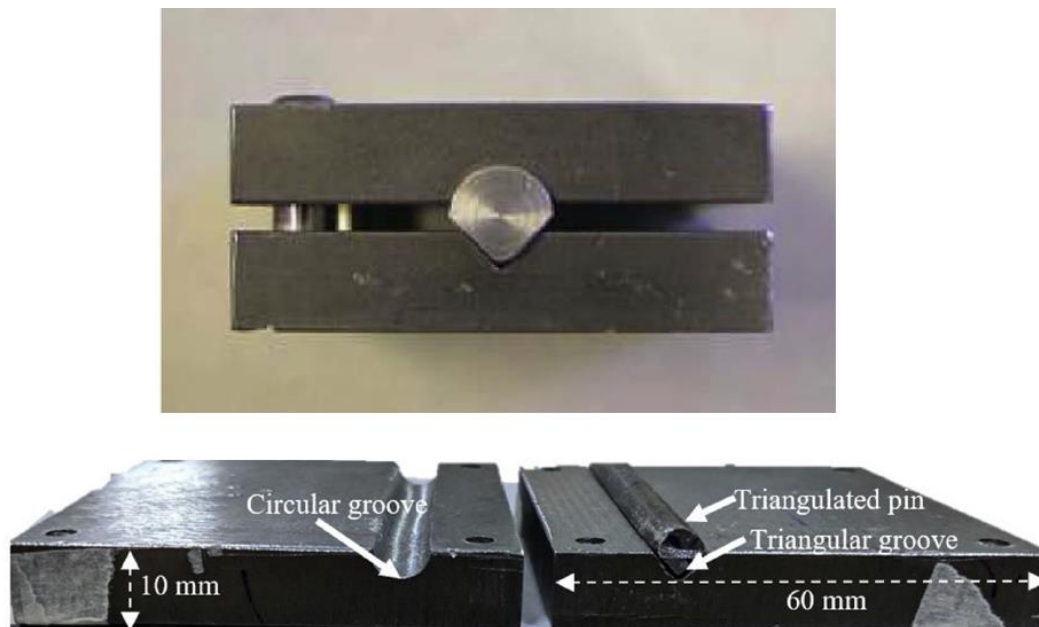
Εικόνα 124 : Υδραυλικές αρπάγεις της εταιρείας Instron® με δύναμη συγκράτησης έως και 600 kN για στατικά φορτία [102].

Η μορφή των θραυσμένων ινών με χρήση υδραυλικών αρπαγών του πειράματος της **Εικόνας 123** φαίνεται στην **Εικόνα 125**. Επισημαίνεται πως στο πείραμα εκείνο το δοκίμιο αστόχισε κοντά στα σημεία συγκράτησής των αρπαγών.

Για την καλύτερη συγκράτηση των δοκιμών απαιτούνται όπως φαίνεται, εκτός από υδραυλικές αρπάγεις (βλ. **Εικόνα 124**), που απ' ό,τι φαίνεται κρίνονται και αυτές ανεπαρκείς αν χρησιμοποιηθούν αυτούσιες, και ειδικές διαμορφώσεις σύσφιξης (gripping fixture) με δυνατότητα τοποθέτησης μέσα στις πρώτες. Τέτοιες διαμορφώσεις φαίνονται στην **Εικόνα 120**. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα διαιρετό πλακίδιο όπου το ένα φέρει μία τριγωνική και το άλλο μια σφαιρική κοίλη διαμόρφωση. Το εκάστοτε δοκίμιο ασφαρίζεται μεταξύ των εγκοπών με ειδικά διαμορφωμένο πύρο.

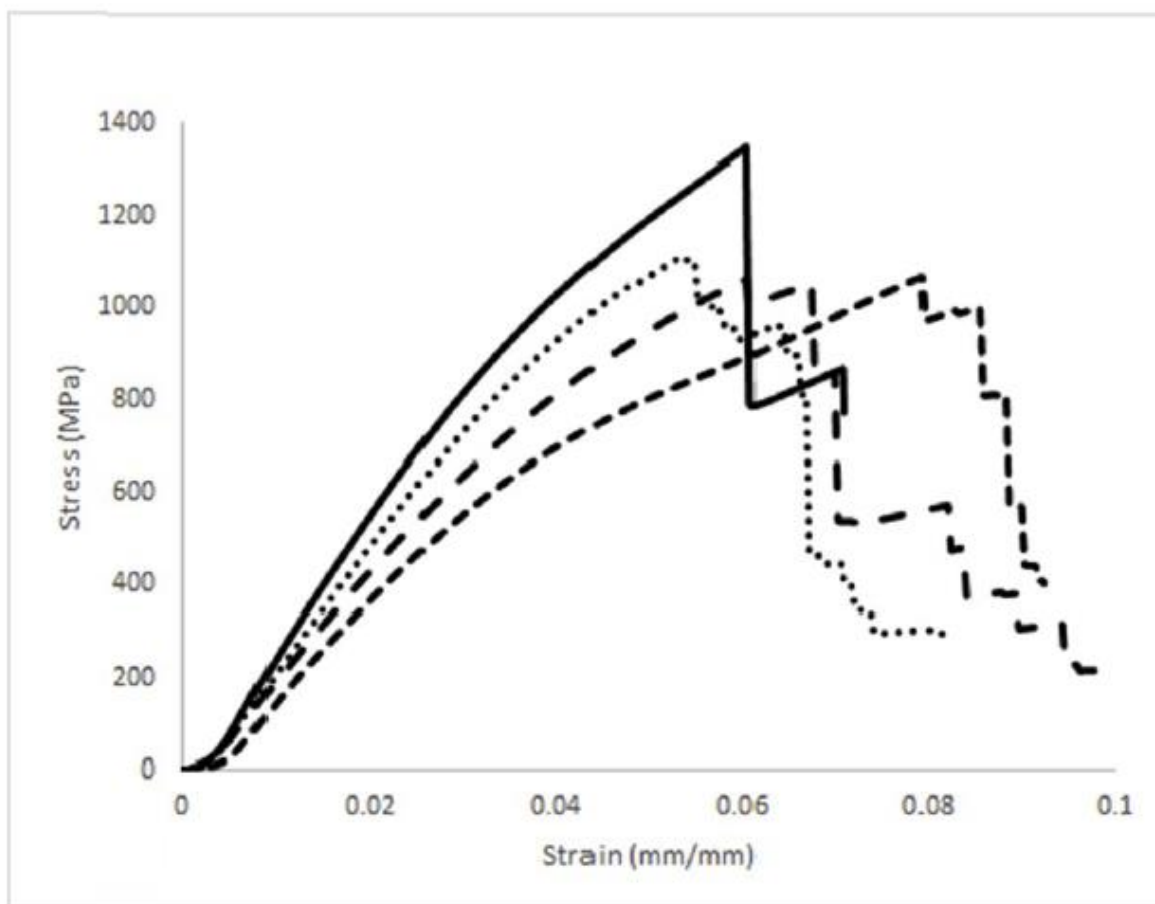


Εικόνα 125 : Αστοχία στις ακμές μονόφυλλου δοκιμίου από σύνθετο ινών UHMWPE σε υδραυλικές αρπάγεις χωρίς ειδική διαμόρφωση σύσφιξης.

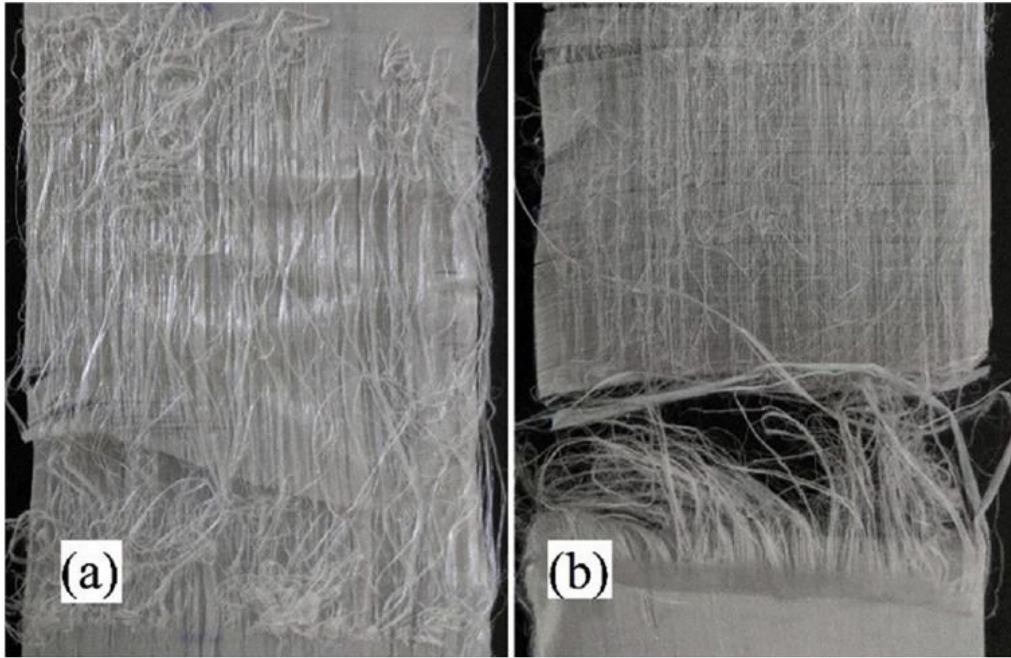


Εικόνα 126 : Παραδείγματα ειδικών διαμορφώσεων συγκράτησης για υδραυλικές αρπάγεις [81, 101].

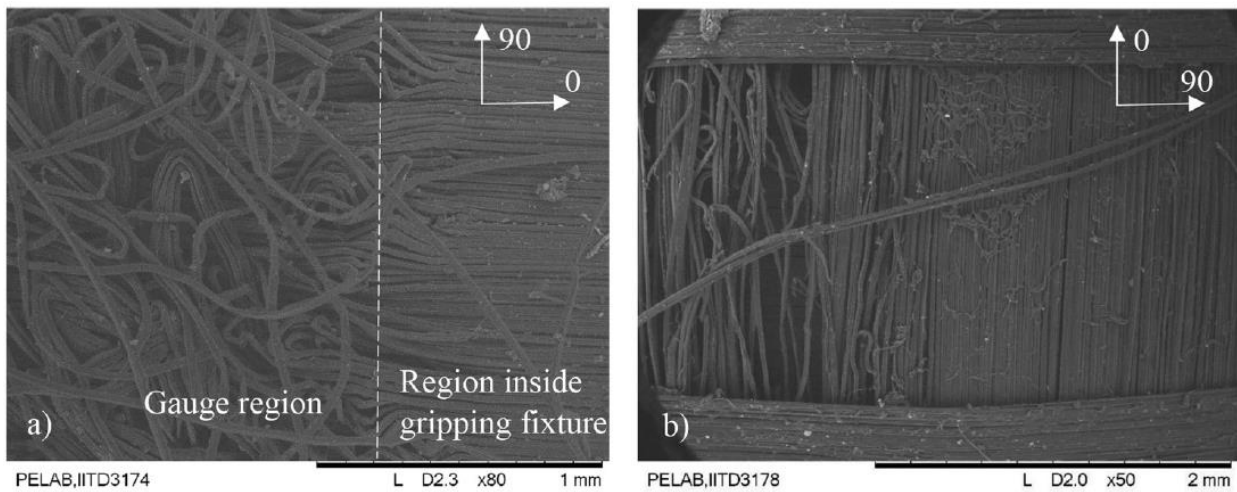
Στην περίπτωση που το εκάστοτε δοκίμιο δεν ολισθαίνει στις υδραυλικές αρπάγεις κατόπιν χρήσης ειδικών διαμορφώσεων το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (ή δύναμης-μετατόπισης) λαμβάνει την μορφή των καμπύλων της **Εικόνας 127**, ενώ οι τρόποι αστοχίας δοκιμίων συνθέτων ινών UHMWPE φαίνονται στις **Εικόνες 128** και **129**.



Εικόνα 127 : Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικά σύνθετα ινών UHMWPE (μονόφυλλα δοκίμια $[0^{\circ}/90^{\circ}]_2$).



Εικόνα 128 : Τρόπος θραύσης των ινών μονόφυλλου δοκιμίου από σύνθετο ινών UHMWPE με (a) μήτρα καουτσούκ, (b) μήτρα πολυουρεθάνης.

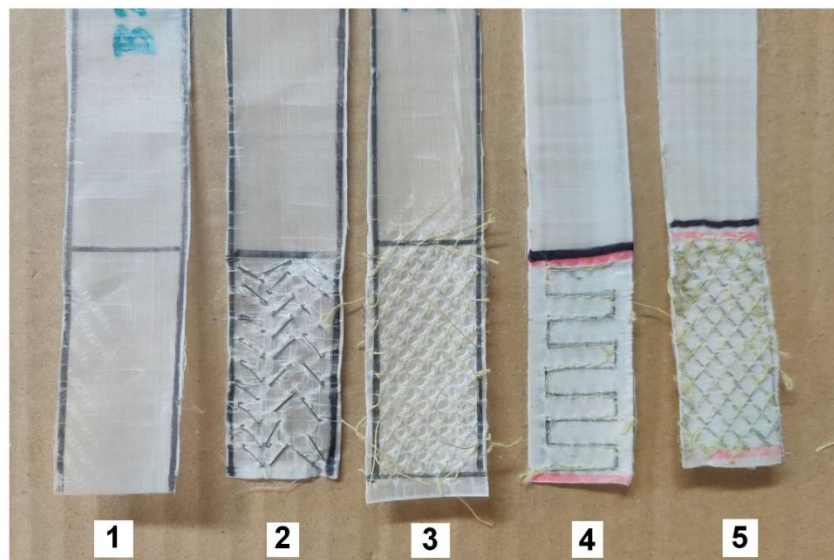


Εικόνα 129 : Ηλεκτρονική μικρογραφία των ινών UHMWPE σε σύνθετο πολυμερικής μήτρας (a) Εμπρόσθια επιφάνεια (κατεύθυνση 0°) με εμφανώς θραυσμένες και πεπλεγμένες ίνες, (b) Πίσω επιφάνεια, όπου φαίνεται ο διαχωρισμός των ινών στην κατεύθυνση των 90° , κατόπιν εφελκυσμού [81].

Λόγω της αδυναμίας της διάταξης του εργαστηρίου μας να συγκρατήσει τα δοκίμια των υλικών Α, Β και C επιχειρήθηκαν, για αύξηση της τριβής, διάφοροι μέθοδοι τροποποίησης των ακμών συγκράτησης ως γλωττίδες με μοτίβα ραφών ακόμα ακόμα και με καρφωτικά σύρματα (βλ. **Εικόνα 130**), ενίοτε με παράλληλη χρήση γυαλόχαρτου.



a

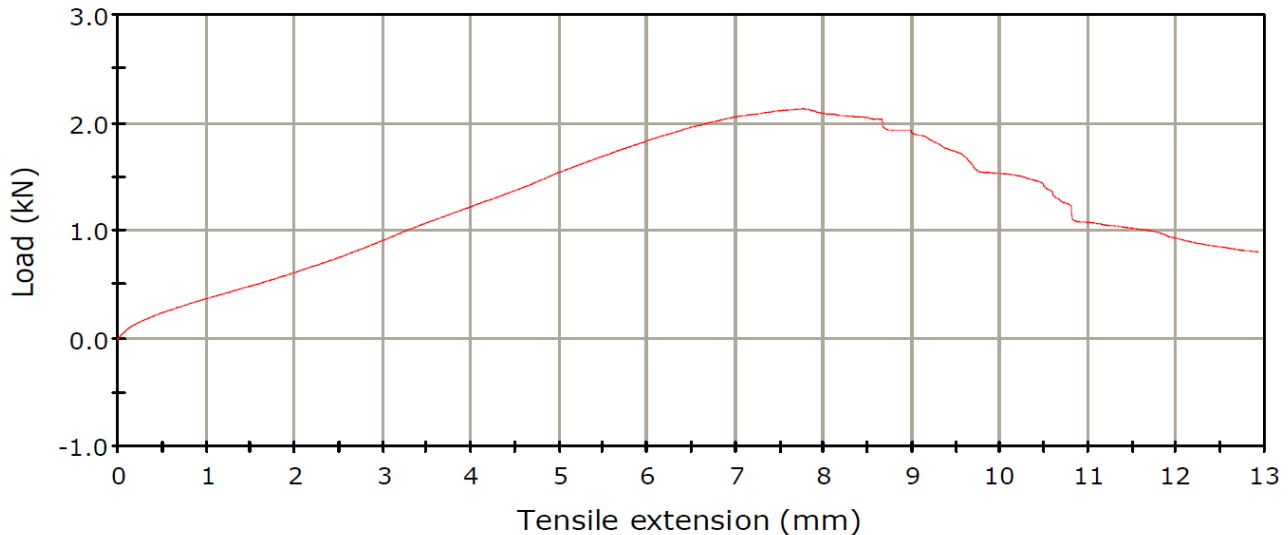


b

Εικόνα 130 : (α) Δοκίμια εφελκυσμού με διαφοροποιήσεις στις ακμές συγκράτησης και (β) Μεγέθυνση των ακμών (1) χωρίς διαμόρφωση, (2) με καρφωτικά σύρματα, (3,5) με σταυροειδή ραφή, (4) με ορθογωνικό μοτίβο.

Ωστόσο το πρόβλημα της ολίσθησης, λόγω ανεπαρκούς σύσφιξης, παρέμεινε. Έτσι στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που λάβαμε παρατηρήθηκε έντονη αυξομείωση του φορτίου.

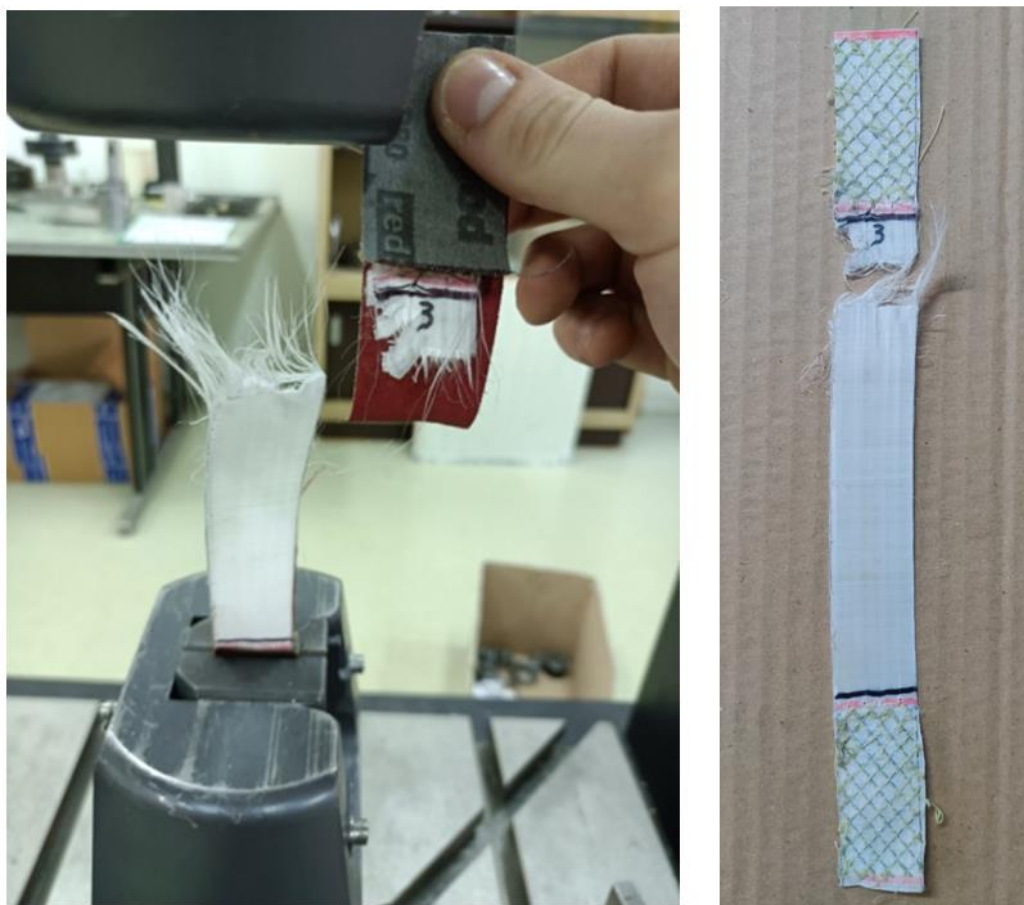
Load - Extension



Εικόνα 131 : Αυξομείωση της εφελκυστικής τάσης λόγω ολίσθησης στις αρπάγεις, κατά τον εφελκυσμό μονόφυλλου δοκιμίου $[0^\circ/90^\circ]_2$ υλικού Β σε μηχανή Instron® 4482, με μηχανικές αρπάγεις.

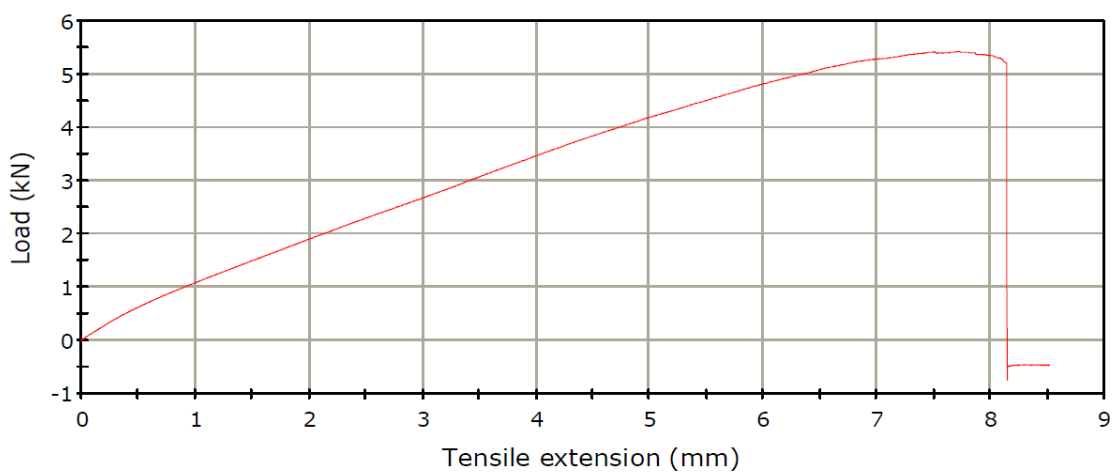
Παρόλο που το φορτίο φαινόταν να αυξάνεται σταδιακά υπήρξε έντονος διαχωρισμός των ινών στην κατεύθυνση των 90° οι οποίες ουσιαστικά ολισθούσαν επάνω στις ίνες με κατεύθυνση 0° (κατεύθυνση εφελκυσμού) λόγω της εναλλαγής σύσφιξης/χαλάρωσης της των ακμών μέσα στις αρπάγεις. Παρ' όλη την υψηλή αντοχή των δοκιμίων, αυτά τραυματίστηκαν εκτενώς από την επεξεργασία των άκρων τους και την «ανομοιόμορφη» συγκράτησή τους στις μηχανικές αρπάγεις του εργαστηρίου. Έτσι καθώς καθώς οι ακμές των δοκιμίων ολισθούσαν εσωτερικά των λαβών, όντας τραυματισμένες οδήγησαν στη συγκέντρωση/«χτένισμα» των 2 στρώσεων των κάθετων ινών 90° στα άκρα των 2 εφελκυσμένων στρώσεων ινών 0° (διάταξη $[0^\circ/90^\circ]_2$) όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 129.b**.

Αξίζει να σημειωθεί πως μόνο ένα δοκίμιο κατάφερε να αστοιχίσει «επιτυχώς» στο όριο του ενεργού μήκους και εξωτερικά από τις λαβές συγκράτησης σύμφωνα με τον τρόπο **LAT** της **Εικόνας 82**, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 132**. Πρόκειται για ένα δοκίμιο από 2 φύλλα υλικού Α, διαστάσεων : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.278 (2x0.139) mm (πάχος). Το δοκίμιο έφερε διαμορφώσεις σταυροειδούς ραφής στις ακμές του (με ταυτόχρονη χρήση γυαλόχαρτου) ενώ τα διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης και τάσης παραμόρφωσης που λάβαμε από την μετρητική διάταξη φαίνονται στις **Εικόνες 133** και **134** αντίστοιχα.



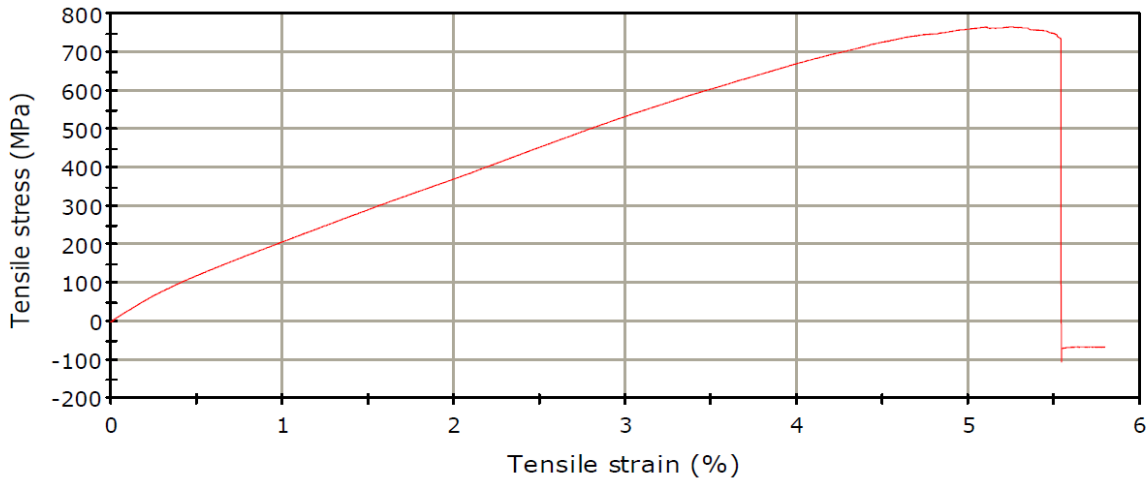
Εικόνα 132 : Δοκίμο 2 φύλλων σύνθετου υλικού Α κατόπιν εφελκυστικής δοκιμής.

Load - Extension



Εικόνα 133 : Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το δοκίμο της Εικόνας 132.

Stress - Strain



Εικόνα 134 : Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο της Εικόνας 132.

Χρησιμοποιώντας τη βασική σχέση (μηχανικής αντοχής υλικών) της τάσης από ασκούμενη δύναμη P (kN) και γνωρίζοντας τη διατομή του δοκιμίου $A = 7.06 \text{ mm}^2$ ($25.4 \times 0.278 \text{ mm}$) μπορούμε να υπολογίζουμε (θεωρώντας πως η διατομή δεν μεταβάλλεται αισθητά έως αστοχίας) την τάση (όριο) θραύσης (UTS) του σύνθετου δοκιμίου για $P \approx 5.4 \text{ kN}$ (από το διάγραμμα της **Εικόνας 133**), ως :

$$\sigma_{UTS_{\text{composite } A}} = \frac{P}{A} = \frac{5.42 \cdot 10^3 \text{ N}}{7.06 \text{ mm}^2} \approx 0.767 \text{ GPa} \quad (17)$$

Αλλιώς σημειώνουμε πάλι το όριο θραύσης 0.767 GPa απευθείας από το διάγραμμα της **Εικόνας 134**. Από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (stress-strain) παρατηρούμε ακόμα πως η θραύση συνέβη σε μεγάλη επιμήκυνση 5.51 % του δοκιμίου.

Από τη βιβλιογραφία που συγκεντρώνεται γύρω από τα υλικά A, B και C αλλά και γενικότερα γύρω από τα **σύνθετα ινών UHMWPE** σε μήτρες ρητίνης αντιλαμβανόμαστε πως το όριο θραύσης (UTS) και το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) τους κινούνται στις τάξεις των 0.9-1.5 GPa και 90-120 GPa αντίστοιχα.

Είναι λογικό πως λόγω οι αυτούσιες ίνες UHMWPE, των υλικών A, B και C, κατέχουν μεγαλύτερα μέτρα ελαστικότητας (E) περί τα 172 GPa, 155 GPa και 117 GPa, όρια θραύσης (UTS) περί τα 3.0 GPa, 4.1 GPa και 2.6 GPa σε επιμηκύνσεις (elongation at break) 3.3%, 3.5% και 3.9%, αντίστοιχα και για γραμμικές πυκνότητες περί τα 1000 dtex. Οι μηχανικές τους ιδιότητες όμως υποβαθμίζονται ωστόσο στο τελικό σύνθετο «ύφασμα» όπως προαναφέραμε, λόγω της θερμικής κατεργασίας που υποβάλλονται [104,105,106].

Το όριο θραύσης των 0.78 GPa που μόλις υπολογίστηκε ως αποτέλεσμα απλής εφαρμογής της **σχέσης (17)** δεν απέχει πολύ από την αναμενόμενη τάξη μεγέθους. Ωστόσο παραμένουν αμφιβολίες για την αξιοπιστία του πειράματος λόγω μη επαναληψιμότητας του αποτελέσματος, της περιοχής αστοχίας του δοκιμίου, του τραυματισμού του από τις γλωττίδες/ραφές συγκράτησης, του πιθανού τραυματισμού του κατά την κοπή του αλλά και λόγω ενδεχόμενου ελαττώματος/ ασυνέχειας του υλικού στο σημείο αστοχίας.

Όσον αφορά τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας ως η εφαπτόμενη της καμπύλης τάσης-επιμήκυνσης της **Εικόνας 134** στην «γραμμική περιοχή» της ίσως να είναι παραπλανητικός καθώς, υποψιαζόμενοι ολίσθησης, αλλάζει το εύρος της παραμόρφωσης στον οριζόντιο άξονα [103].

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν βρισκόμαστε σε θέση να αποφανθούμε για την κυριαρχία μεταξύ των σύνθετων υλικών A, B και C με πειραματικό εφελκυσμό αλλά βασιζόμενοι σε βιβλιογραφικές αναφορές που αφορούν τις ενισχυτικές τους φάσεις (ίνες) μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή πως, σε συνδυασμό με μήτρα ρητίνης, το υλικό B θα κατέχει στιβαρότερες μηχανικές ιδιότητες από τα A και C.

Αυτό που δυνάμεθα βέβαια να υπολογίσουμε, σύμφωνα με τον απλοποιημένο κανόνα των μιγμάτων της σχέσης (3) της **§3.3.4**, αγνοώντας δηλαδή την συμβολή της μήτρας, είναι η τάση θραύσης $\sigma_{c_{max}}$ του συνθέτου σύμφωνα με το κλάσμα όγκου v_f και τις γνωστές τάση θραύσης των ινών $\sigma_{f_{max}}$, 3.0 GPa, 4.1 GPa και 2.6 GPa για τα υλικά A, B και C αντίστοιχα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το κλάσμα όγκου v_f που προτείνεται για υλικά με ίνες γραμμικής πυκνότητας της τάξης των 1000 dtex είναι περί το 83%. Υπολογίζουμε έτσι την αντοχή θραύσης της των τριών μονόφυλλων υλικών με ίνες σε διάταξη $[0^\circ/90^\circ]_2$ ως :

- $\sigma_{c_{max,A}} = \sigma_{f_{max,A}} v_f = 0.83 \cdot 3 \text{ GPa} \approx 2.5 \text{ GPa}$
- $\sigma_{c_{max,B}} = \sigma_{f_{max,B}} v_f = 0.83 \cdot 4.1 \text{ GPa} \approx 3.4 \text{ GPa}$
- $\sigma_{c_{max,C}} = \sigma_{f_{max,C}} v_f = 0.83 \cdot 2.6 \text{ GPa} \approx 2.2 \text{ GPa}$

Εφόσον το ένα φύλλο του εκάστοτε υλικού αποτελείται από μόνο 2 στρώσεις ινών στην διεύθυνση του εφελκυσμού 0° υποθέτουμε πως το όριο θραύσης ελαττώνεται στο μισό καθώς οι ίνες στη διεύθυνση των 90° δεν αντιστέκονται στην εφελκυστική δοκιμή. Επομένως :

- $\sigma_{c_{max,A}} \approx 1.25 \text{ GPa}$
- $\sigma_{c_{max,B}} \approx 1.7 \text{ GPa}$
- $\sigma_{c_{max,C}} \approx 1.1 \text{ GPa}$

Οι ποσότητες αυτές μπορούν να χρησιμεύσουν απλά ως «κατά προσέγγιση δείκτες» της αποτελεσματικότητας των εκάστοτε εφελκυστικών δοκιμών και φυσικά δεν τις αντικαθιστούν [81].

Παρατηρούμε έστω και με αυτόν τον τρόπο την «κυριαρχία» του υλικού Β έναντι των Α και C.

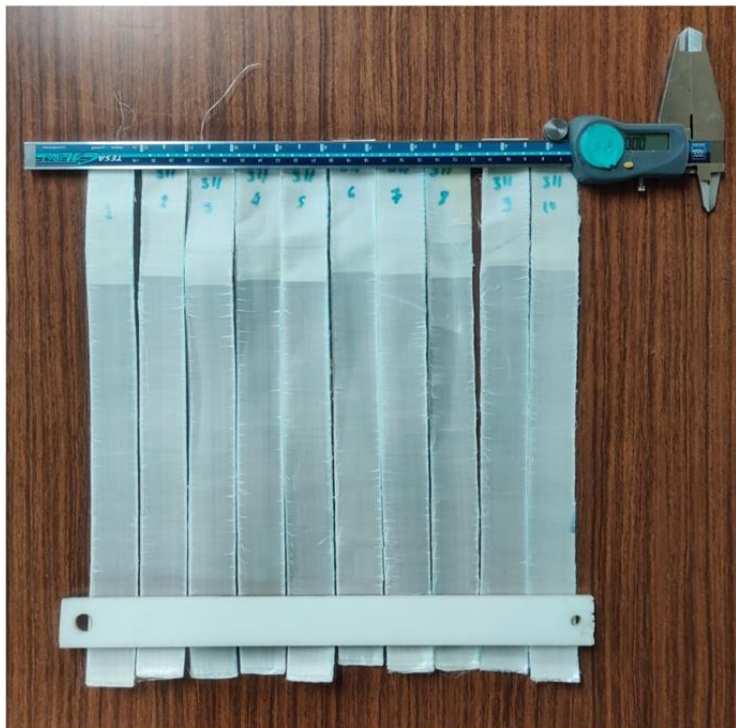
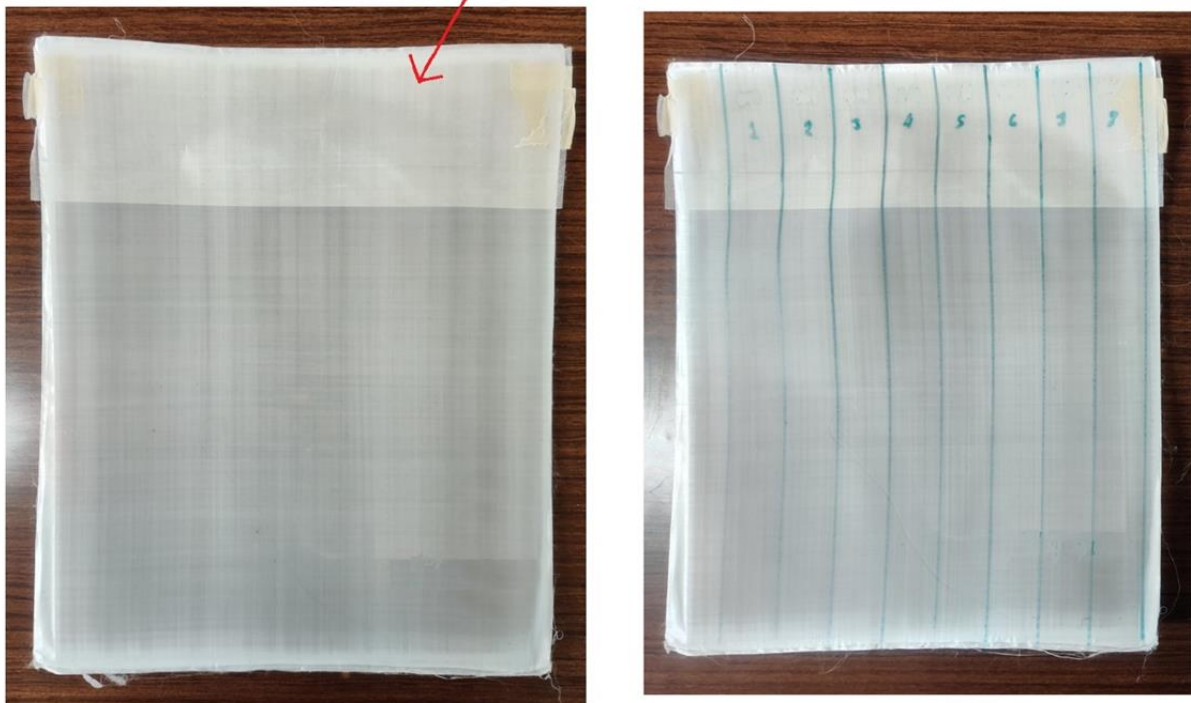
5.2.2 Αντοχή σε αποφλοίωση-T-Peel Strength :

Συνεχίζοντας τις μηχανικές μας δοκιμές με την δοκιμή αποφλοίωσης των δοκιμίων, σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM D1876** της **§4.2**, είναι επιθυμητό να αναφέρουμε πως τα **δοκίμια UHMWPE υλικών Α, Β και C** αποτελούν **συγκόλληση 2 φύλλων προεμποτισμένων (pre-impregnated) ινών** με διάταξη (συνολικά 8 στρώσεις ινών) μέσα σε μήτρες ρητίνης και κατασκευάζονται ξανά με τη μέθοδο που περιγράφεται στην **§3.3.5**.

Υπενθυμίζουμε πως απαραίτητη προϋπόθεση είναι, σε ένα τμήμα του συνολικού μήκους Α+Β, τα δύο φύλλα να παραμένουν ελεύθερα (Β) ώστε να συγκρατηθούν από τις δαγκάνες της μετρητικής διάταξης.

Για την διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων, χαράσσονται γραμμές πλάτους 25.4 mm επάνω σε φύλλα συνθέτων Α, Β και C έως και τα ασυγκόλλητα άκρα μήκους 76 mm. Κατόπιν κόβονται οι λωρίδες κατά μήκος των γραμμών (βλ. **Εικόνα 135**).

Ελεύθερα ασυγκόλλητα άκρα
συγκράτησης μήκους 76 mm



Εικόνα 135 : Προετοιμασία δοκιμών αποφλοίωσης.

Για τις διαστάσεις των δοκιμών αποφλοίωσης των διαφορετικών υλικών Α, Β και C έχουμε συγκεκριμένα :

- **Υλικό Α** : 25.4 mm (πλάτος) x 305 mm (μήκος) x 0.278 mm (πάχος).
- **Υλικό Β** : 25.4 mm (πλάτος) x 305 mm (μήκος) x 0.260 mm (πάχος).
- **Υλικό C** : 25.4 mm (πλάτος) x 305 mm (μήκος) x 0.550 mm (πάχος).

Και σε αυτό το πείραμα ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι η μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου **Instron® 4482** του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Πιο συγκεκριμένα τα δύο ελεύθερα άκρα των δοκιμών τοποθετούνται, μαζί με γλωττίδες από γυαλόχαρτο, στις δύο αρπάγεις της μηχανής όπου και συσφίγγονται (βλ. **Εικόνα 136**).

Αφού η μηχανή βαθμονομηθεί (πριν από κάθε δοκιμή), η επάνω αρπάγη ξεκινά να αποφλοιώνει το εκάστοτε δοκίμιο με ταχύτητα 254 mm/min (10 in/min). Υπενθυμίζουμε πως η πραγματική ταχύτητα διαχωρισμού του δεσμού μεταξύ των 2 φύλλων (ή των επιμέρους στρώσεων) είναι 127 mm/min (5 in/min) ενώ δεν παρατηρείται ολίσθηση των δοκιμών. Το πείραμα τελειώνει όταν έχουν αποφλοιωθεί κατ' ελάχιστο 200 mm μήκους της συγκολλημένης περιοχής για 10 δοκίμια ανά υλικό Α, Β και C (βλ. **Εικόνα 137**). Αυτό σημαίνει πως η επάνω αρπάγη θα διανύσει κατ' ελάχιστο 400 mm κατακόρυφη απόσταση.

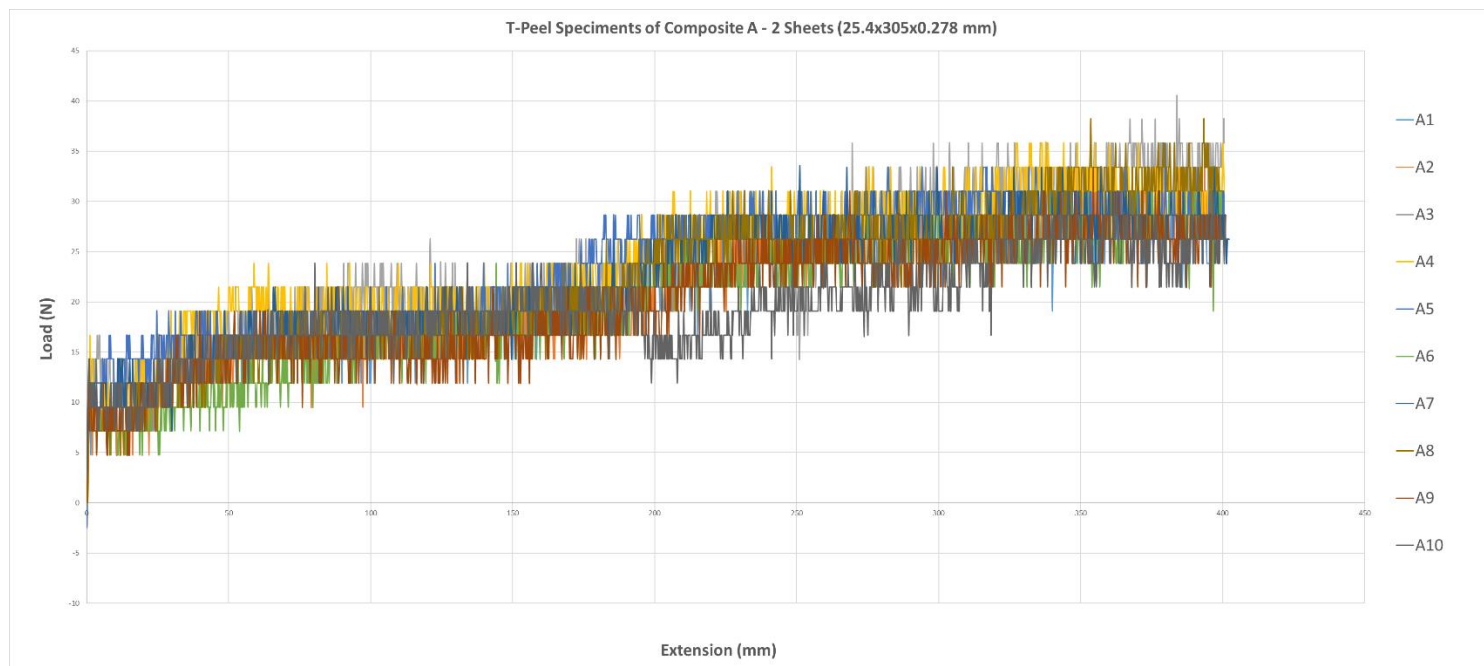


Εικόνα 136 : Δοκίμιο αποφλοίωσης στις μηχανικές αρπάγεις της Instron® 4482.



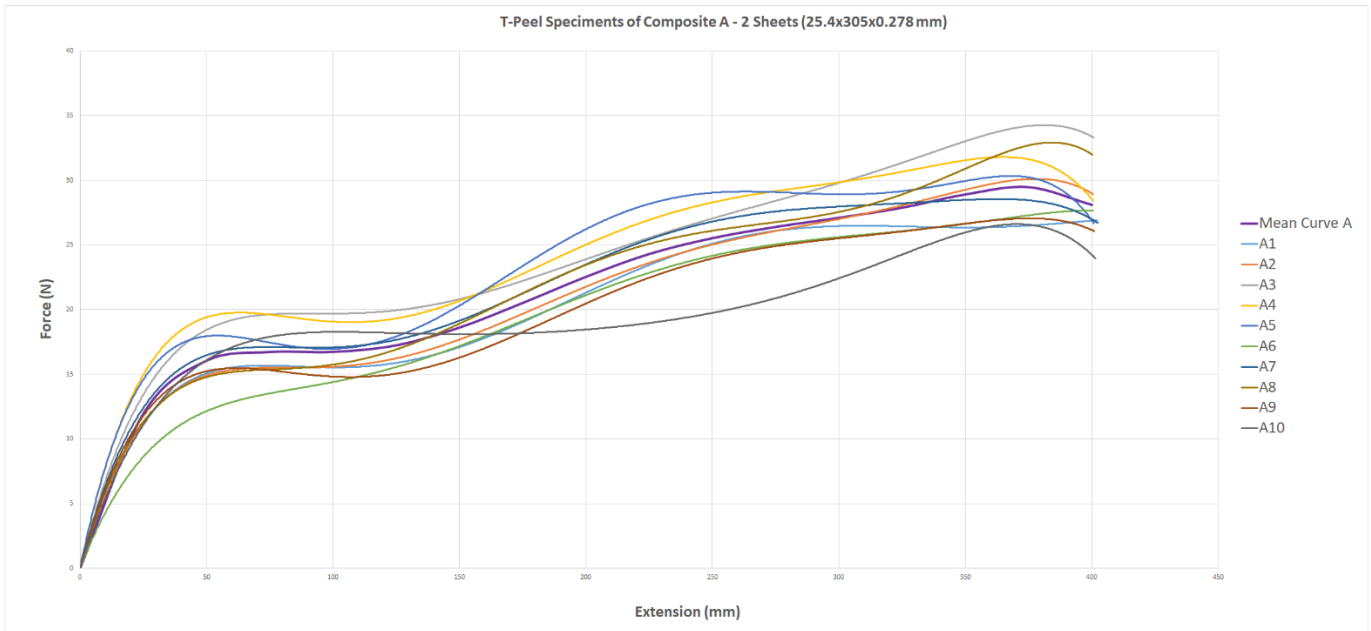
Εικόνα 137 : Δοκίμιο αποφλοίωσης μετά το πέρας της δοκιμής.

Η μορφή της πληροφορίας, των διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης που λαμβάνουμε από την μετρητική διάταξη αποτυπώνεται στην **Εικόνα 138**. Ο θόρυβος στα δεδομένα είναι αναπόφευκτα έντονος. Αυτό συμβαίνει διότι το μέγεθος των δυνάμεων που επιθυμούμε να μετρήσουμε σε μία μηχανή τάξης των 100 kN είναι πολύ μικρό, ύψους 50 N, συγκριτικά με τις ικανότητες της μηχανής. Επομένως ακόμα και οι μικροί κραδασμοί λειτουργίας της μηχανής επηρεάζουν την καταγραφή των δεδομένων.

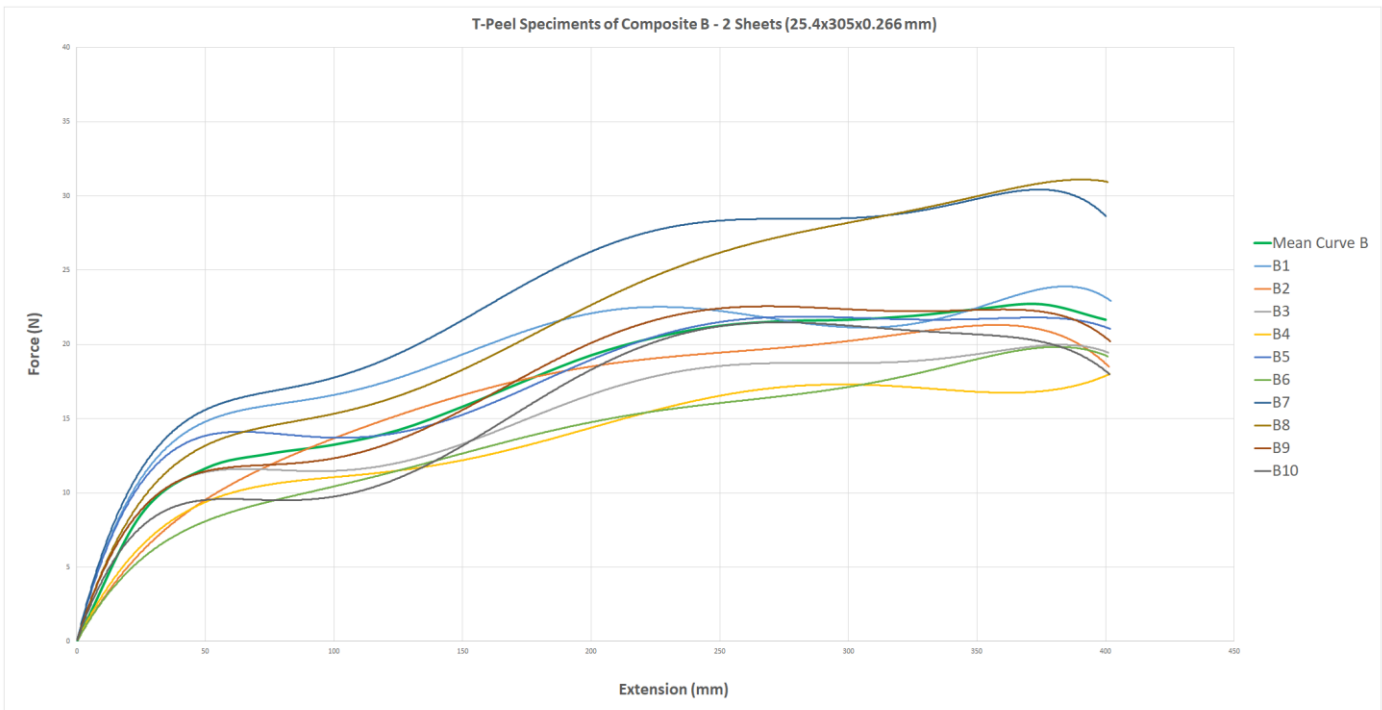


Εικόνα 138 : Ακατέργαστα δεδομένα δύναμης αποφλοίωσης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια του υλικού A.

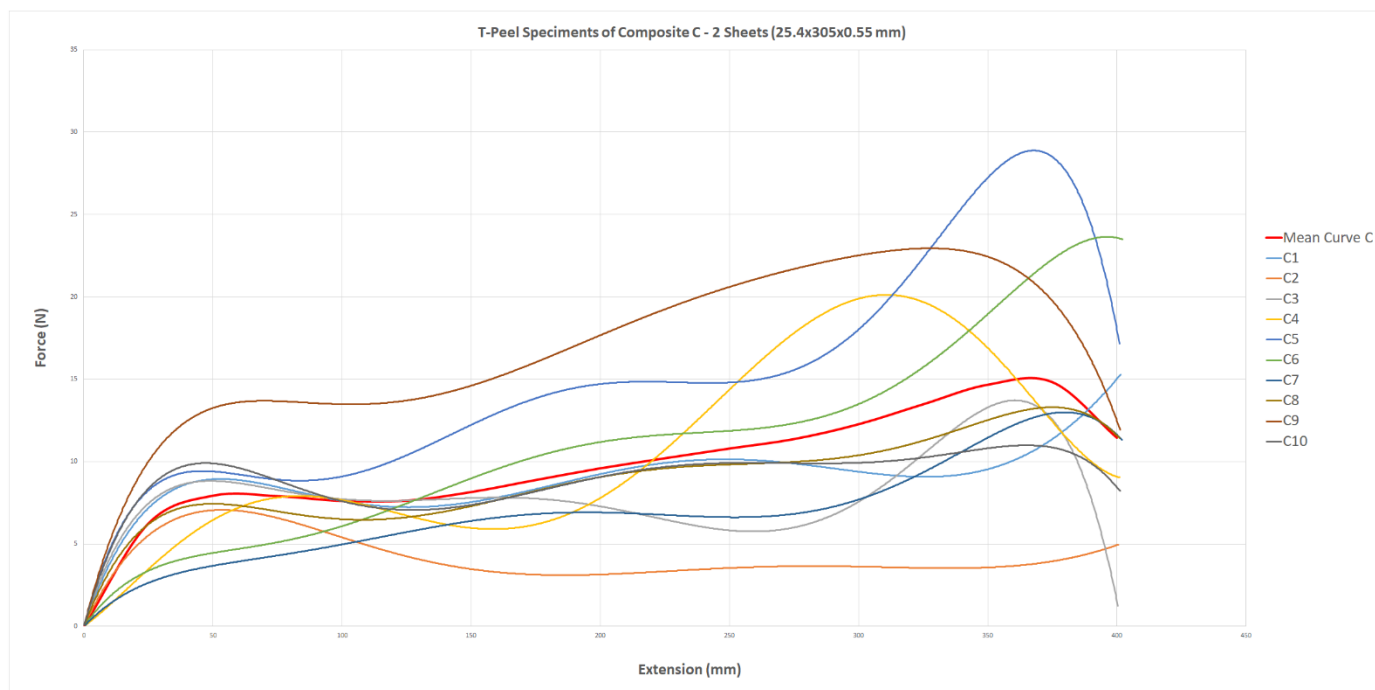
Κατόπιν εφαρμογής φίλτρων στην παραπάνω πληροφορία καταφέρνουμε να εξαλείψουμε αρκετά τον θόρυβο. Λαμβάνουμε επομένως τα ακόλουθα 3 διαγράμματα όπου αποτυπώνεται η πορεία της δύναμης αποφλοίωσης συναρτήσει της μετατόπισης της πάνω αρπάγης και για τα 10 δοκίμια των υλικών A, B και C, σε υπέρθεση με την αντίστοιχη μέση καμπύλη τους.



Εικόνα 139 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια υλικού A και η μέση καμπύλη τους.



Εικόνα 140 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια υλικού B και η μέση καμπύλη τους.



Εικόνα 141 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια υλικού C και η μέση καμπύλη τους.

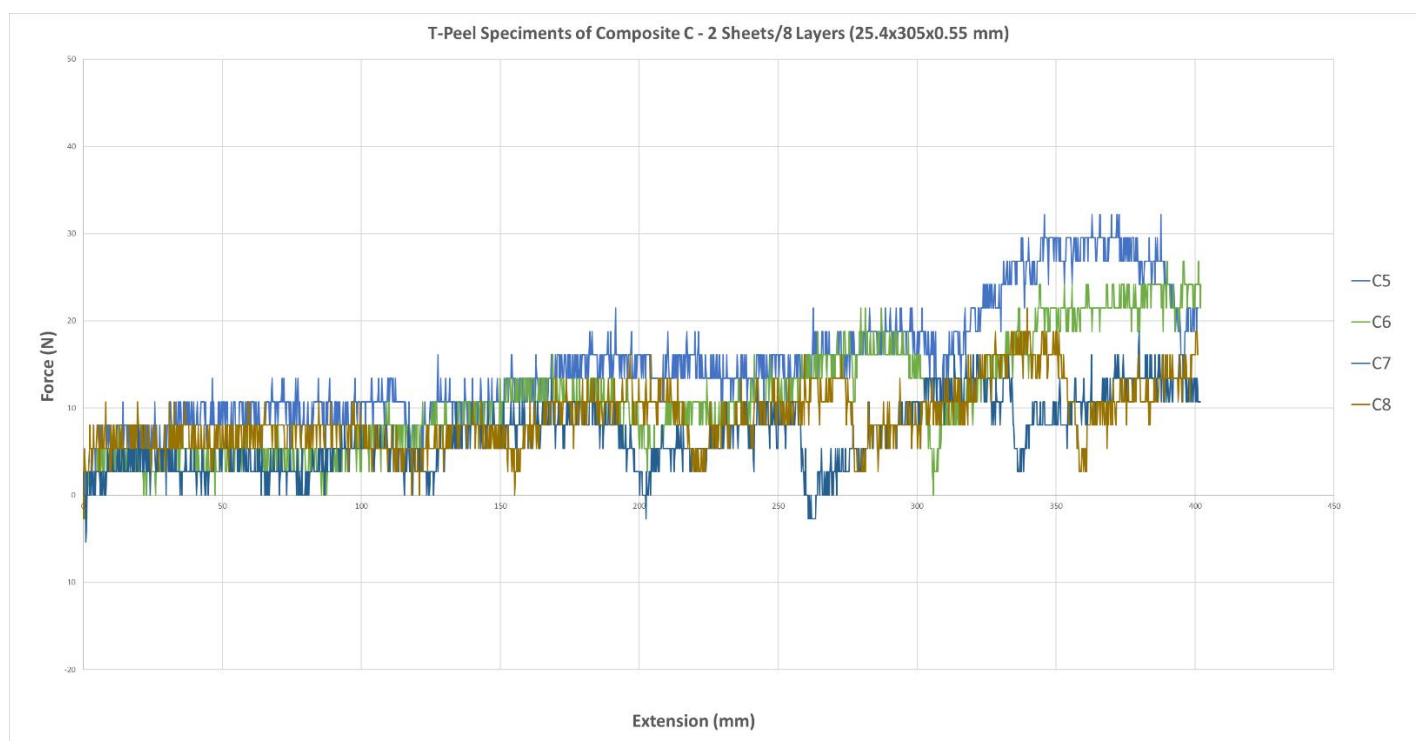
Στεκόμαστε στην ιδιαίτερη μορφή των καμπυλών για τα δοκίμια C5, C6, C7 και C8 του υλικού C και συγκεκριμένα στην αρχική πληροφορία τους στην Εικόνα 137. Παρατηρούμε πως οι απότομες πτώσεις της δύναμης αποφλοίωσης για τα δοκίμια αυτά ακολουθούν κατά κάποιο τρόπο τα σημεία των ανομοιομορφιών των δοκιμίων C5, C6, C7 και C8 της **Εικόνας 142**.

Φαίνεται πως λόγω τραυματισμού των δειγμάτων κατά την κοπή τους και καθώς η ρητίνη του υλικού C είναι ιδιαίτερα κολλώδης, οδήγησε το ψαλίδι να «μασήσει» το αρχικό δίφυλλο (βλ. **Εικόνα 135**) σε εμφανή σημεία. Η στιγμή της αποκόλλησης των δύο φύλλων, στο σημείο όπου η μήτρα έχει «σπάσει» αποτυπώνεται στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης με άμεση πτώση της δύναμης αποφλοίωσης.



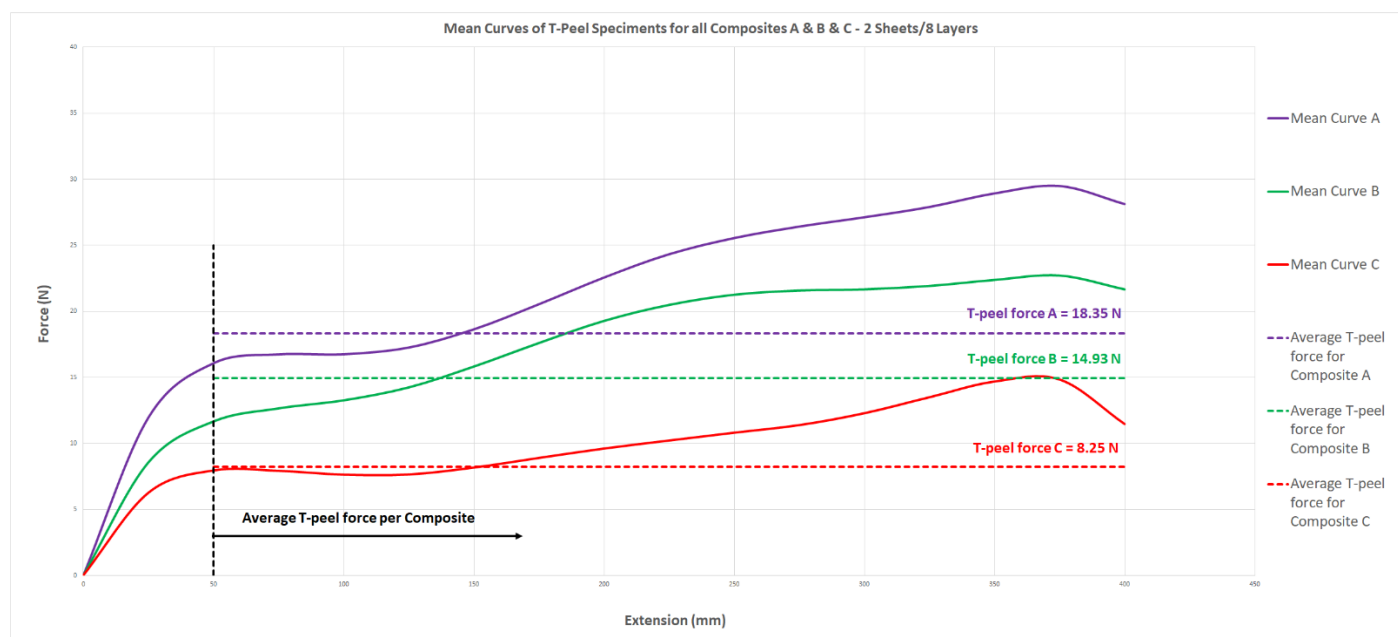
τραυματισμός (της μήτρας) των δοκιμών υλικού C κατά την προετοιμασία τους.

Εικόνα 142 : Σημεία τραυματισμού των δοκιμών αποφλοίωσης C5, C6, C7 και C8, υλικού C.



Εικόνα 143 : Ακατέργαστα δεδομένα δύναμης αποφλοίωσης-μετατόπισης για τα δοκίμια C5, C6, C7 και C8, υλικού C.

Τέλος παρατίθεται, στην **Εικόνα 144**, η υπέρθεση των μέσω καμπυλών κατόπιν αποφλοίωσης των δοκιμών από υλικά A, B και C προς σύγκριση της συγκολλητικής τους ικανότητας. Φαίνονται ακόμα οι υπολογισμοί των μέσων δυνάμεων αποκόλλησης τους για τα πρώτα 127 mm της συγκολλημένης περιοχής μετά την εμφάνιση της πρώτης κορυφής της εκάστοτε καμπύλης, περί τα 50 mm και για τα 3 υλικά .



Εικόνα 144 : Υπέρθεση μέσω καμπυλών αποφλοίωσης και μέσης δύναμης αποφλοίωσης για τα δοκίμια υλικών A, B και C.

Κατόπιν μιας γρήγορης σύγκρισης των αποτελεσμάτων παρατηρούμε πως η δύναμη αποφλοίωσης του υλικού A, $F_{T-peel,A} = 18.35 \text{ N}$, είναι αρκετά μεγαλύτερη του υλικού C, $F_{T-peel,C} = 8.25 \text{ N}$ αλλά ίδιας τάξης μεγέθους με του υλικού B, $F_{T-peel,B} = 14.93 \text{ N}$.

Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκε πως δεν είχαν διαχωριστεί όλα τα δοκίμια των υλικών A, B και C απολύτως διαφυλλικά/συμμετρικά, ακριβώς δηλαδή στη διεπιφάνεια των δύο συγκολλημένων φύλλων $[0^\circ/90^\circ]_2$, αλλά κάποια είχαν διαχωριστεί διαστρωματικά/ενδοφυλλικά, σε μία από τις υπόλοιπες διεπιφάνειες των στρώσεων του ίδιου φύλλου.

Συγκεκριμένα τα δοκίμια που αποφλοιώθηκαν απόλυτα διαφυλλικά, στην κύρια επιφάνεια συγκόλλησης, ήταν το δοκίμιο A7 του υλικού A, το δοκίμιο B6 του υλικού B και τα δοκίμια C1, C2, C5, C6, C9 του υλικού C.

Σε αυτές τις περιπτώσεις συμπεραίνουμε πως η συγκολλητική δύναμη (interlaminar strength) μεταξύ των δύο φύλλων είναι μικρότερη από την αντίστοιχη συνεκτική δύναμη μεταξύ δυο στρώσεων του ίδιου προκατασκευασμένου φύλλου (intralaminar strength) για τα υλικά A και B. Όσον αφορά το υλικό C το φαινόμενο δείχνει να αντιστρέφεται.

Ο ενδοφυλλικός διαχωρισμός επαναλήφθηκε ακόμα και όταν επιχειρήθηκε αποφλοίωση σε δεύτερο σετ (δεκάδων) δοκιμών για τα υλικά Α και Β. Βασιζόμενοι λοιπόν απόλυτα στα πειραματικά μας αποτελέσματα δεν μπορούμε να αμφισβητήσουμε την υπεροχή της συγκολλητικής ικανότητας των υλικών Α και Β έναντι του C. Στην παράγραφο που ακολουθεί θα φανεί αν και κατά πόσο η δύναμη αποφλοίωσης και κατ' επέκταση η συνεκτικότητα μεταξύ των επάλληλων φύλλων ενός πολύστρωτου συνθέτου ινών UHMWPE, παίζει ρόλο στην καμπτική συμπεριφορά του πάνελ.

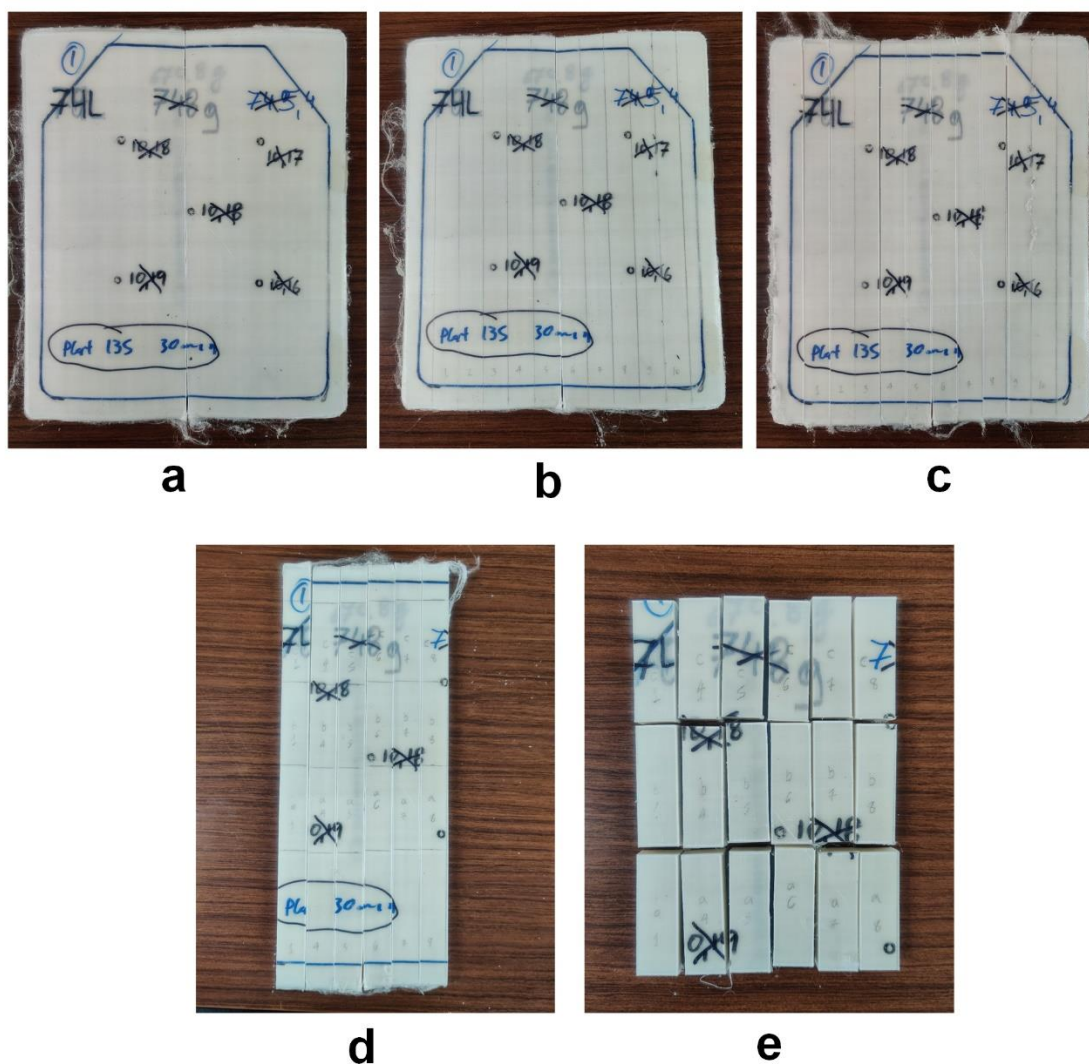
5.2.3 Αντοχή σε διάτμηση-Bending Stress :

Τελειώνοντας τις μηχανικές μας δοκιμές με την δοκιμή κάμψης, σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM D2344M** της §4.3, για τον προσδιορισμό της διατμητικής τάσης των **υλικών Α, Β και C**, επισημαίνουμε πως τα σχετικά δοκίμια προεμποτισμένων (pre-impregnated) ινών UHMWPE αποτελούν συγκόλληση **69, 74 και 35 φύλλων** κατασκευαστικού **πάχους 0.139 mm, 0.130 mm και 0.275 mm** διάταξης $[0^\circ/90^\circ]_2$ **αντίστοιχα** και παρασκευάζονται και εδώ με τη μέθοδο που περιγράφεται στην **§3.3.5**. Ο διαφορετικός αριθμός των φύλλων οφείλεται στο ίδιο επιθυμητό πάχος των δοκιμών. Το **πάχος που επιλέγουμε είναι τα 9.6 mm**, όμοιο με το αντίστοιχο πάχος των πάνελ των βαλλιστικών δοκιμών, προς ευκολία σύγκρισης. Λόγω του διαφορετικού κατασκευαστικού πάχους των σύνθετων φύλλων, αντιλαμβανόμαστε πως **τα δοκίμια Α, Β και C θα αποτελούνται από 276, 296 και 140 στρώσεις ινών UHMWPE, σε διάταξη $[0^\circ/90^\circ]$, αντίστοιχα.**

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2344M, όπως προαναφέραμε στην **§3.3.5**, το πάχος 9.6 mm καθορίζει όλες τις διαστάσεις των δοκιμών αλλά και την απόσταση μεταξύ των στηρίξεων της διάταξης (βλ. **Εικόνα 89**) ως :

- **πάχος : 9.6 mm**
- **μήκος : 6 x πάχος = 57.6 mm**
- **απόσταση μεταξύ στηρίξεων (span length) : 4 x πάχος = 38.4 mm**
- **πλάτος : 2 x πάχος = 19.2 mm**

Για την προετοιμασία των δοκιμών χαράσσονται και κόβονται λωρίδες πλάτους 38.4 mm από τα σύνθετα πάνελ UHMWPE (της μορφής της **Εικόνας 55**) των υλικών Α, Β και C αντίστοιχα, αφού πρώτα αυτά παχυμετρηθούν σε διάφορα σημεία για την εξασφάλιση του ομοιόμορφου τους πάχους. Ύστερα οι λωρίδες κόβονται σε μήκη 57.6 mm (βλ. **Εικόνα 145**). Επιλέγονται τυχαία 5 δοκίμια, ανά υλικό, από το σύνολο των δοκιμών που προκύπτουν από τα αρχικά πάνελ.



Εικόνα 145 : Προετοιμασία δοκιμίων κάμψης του υλικού Β (α) αρχικό σύνθετο πάνελ, (β) χάραξη πλάτους δοκιμίων, (γ) κοπή λωρίδων δοκιμίων, (δ) επιλογή λωρίδων από το σύνολο του πάνελ, (ε) τυχαία εκλογή δοκιμίων.

Η πειραματική διάταξη, όπου τοποθετούνται τα δοκίμια κάμψης, προϋποθέτει, σύμφωνα με τις διαστάσεις της **Εικόνας 89**, κύλινδρο άσκησης φορτίου διαμέτρου 6 mm και κυλίνδρους στήριξης διαμέτρων 3 mm. Λόγω έλειψης του συγκεκριμένου εξοπλισμού από το εργαστήριο σταθεροποιήσαμε, τον κύλινδρο του φορτίου, αυτοσχέδια με χρήση σύρματος, επάνω σε μία προϋπάρχουσα ορθογωνική ράβδο που φέρει μια κοίλη διαμόρφωση όπως φαίνεται στην **Εικόνα 147**. Οι κάτω κύλινδροι στήριξης τοποθετήθηκαν και προσδέθηκαν επάνω στους προϋπάρχοντες της διάταξης όπως φαίνεται στην **Εικόνα 146**, αφού βεβαιωθήκαμε πως το δοκίμιο δεν θα κινδυνέψει να έρθει σε επαφή με τη διάταξη, εκτονώνοντας το φορτίο του.

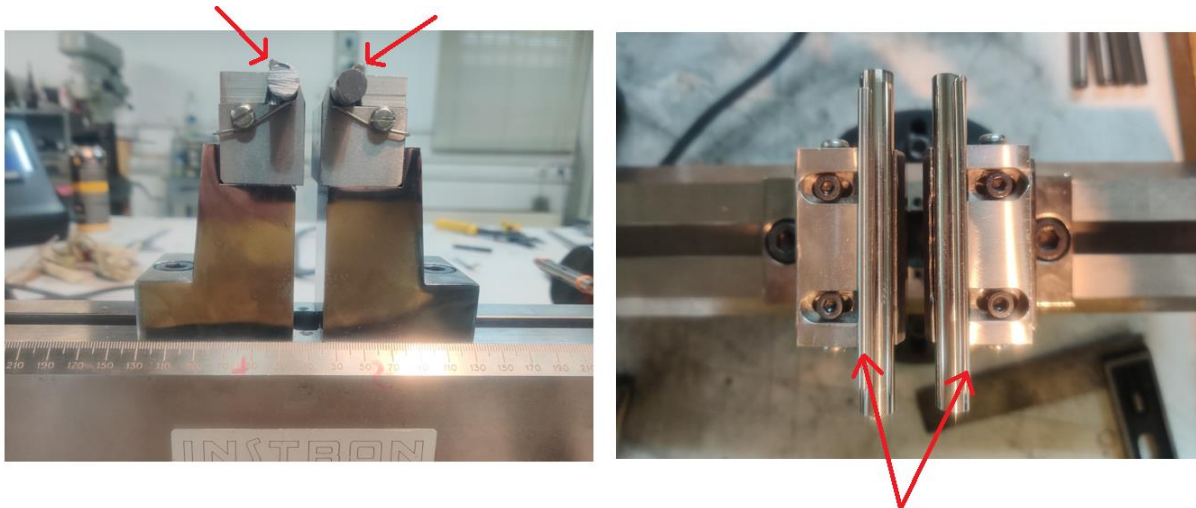
Τα δοκίμια τοποθετούνται επάνω στους κυλίνδρους στήριξης και κεντράρονται ως προς τον επάνω κύλινδρο του φορτίου. Υπενθυμίζεται πως η ελάχιστη απόσταση των κάτω στηρίξεων από τις ακμές του εκάστοτε δοκιμίου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το πάχος του. Δηλαδή το μήκος του δοκιμίου που εξέχει (overhanging length) πέρα από τα σημεία στήριξης, δεξιά και αριστερά, πρέπει να ξεπερνά τα 9.6 mm. Στην περίπτωση μας η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων είναι 38.4 mm ενώ το συνολικό μήκος τους είναι 57.6. Αυτό σημαίνει πως το εξέχων μήκος θα είναι $(57.6 \text{ mm} - 38.4 \text{ mm})/2 = 19.2/2 \text{ mm} = 9.6 \text{ mm}$. Επομένως η συνθήκη πληρείται.

Αφού ο κύλινδρος άσκησης του φορτίου έρθει να ακουμπήσει (με χειροκίνητο χειρισμό) στην επάνω επιφάνεια του κάθε δοκιμίου και η μηχανή βαθμονομηθεί (πριν από κάθε δοκιμή), ξεκινά η εφαρμογή του καμπτικού φορτίου.

Υπενθυμίζεται ακόμα πως το φορτίο P εφαρμόζεται μέχρι να πληρείται έστω μία από τις ακόλουθες συνθήκες :

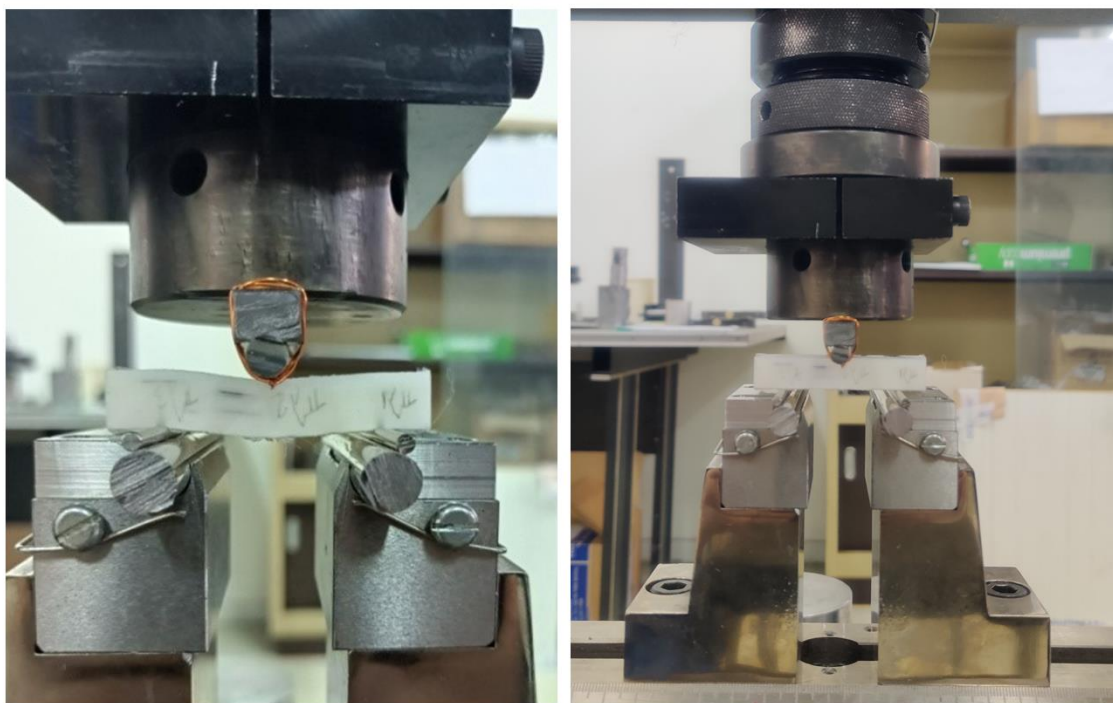
- Το φορτίο να εμφανίσει πτώση μεγαλύτερη ίση από το 30% του μέγιστου εμφανιζόμενου, δηλαδή της μέγιστης διατμητικής τάσης.
- Το δοκίμιο να διαιρεθεί σε δύο κομμάτια (πλήρης διαχωρισμός).
- Η απόσταση που διένυσε η κυλινδρική κεφαλή της φόρτισης να ξεπεράσει το πάχος του δοκιμίου.

Επιλέγουμε την πρώτη συνθήκη καθώς είναι ευδιάκριτη στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης που εξελίσσεται στο παράθυρο του λογισμικού **BLUEHILL 2**.



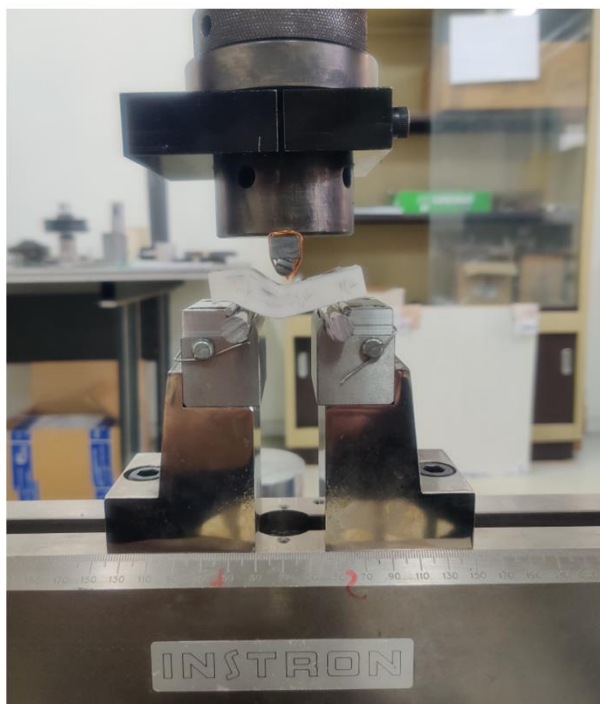
**κύλινδροι στήριξης δοκιμίων
κάμψης διαμέτρων 3 mm**

Εικόνα 146 : Αυτοσχέδια συγκράτηση των κυλίνδρων στήριξης διαμέτρου 3 mm για τα δοκίμια κάμψης τριών σημείων.



a

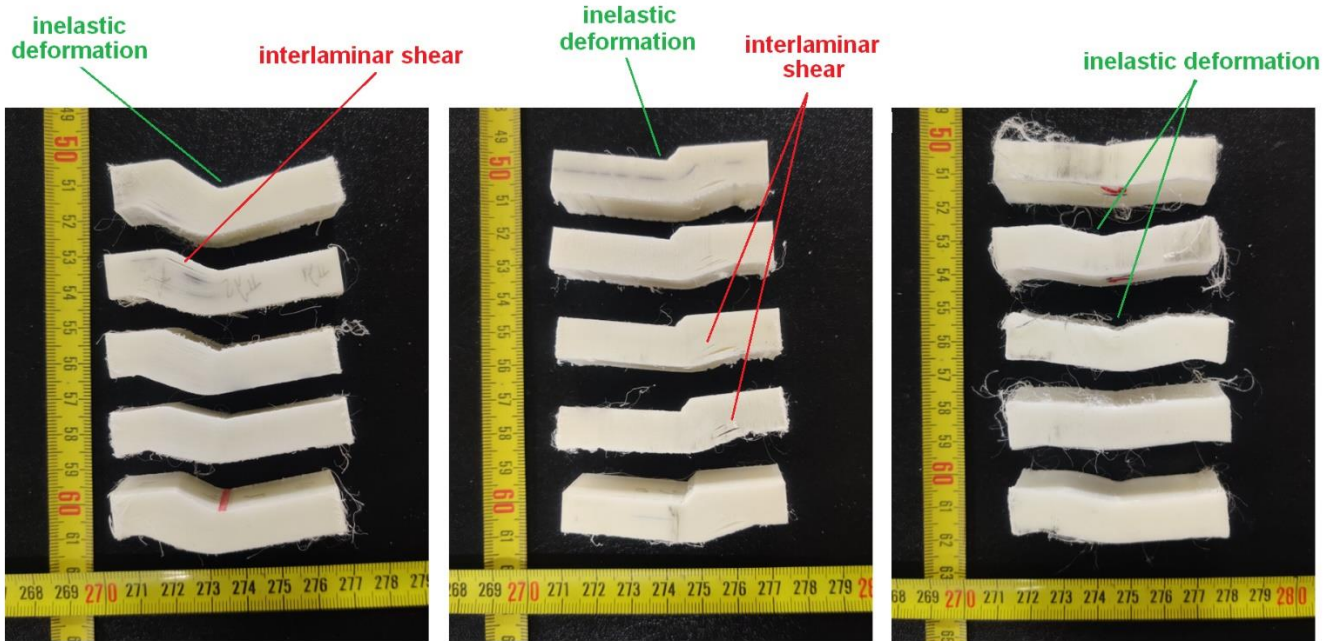
b



c

Εικόνα 147 : (a) Σταθεροποίηση του κυλίνδρου άσκησης φορτίου, (b) Δοκίμιο προς της κάμψη τριών σημείων, (c) Δοκίμιο κατόπιν της καμπτικής δοκιμής.

Η μορφή των δοκιμίων κατόπιν της κάμψης και υπο κλίμακα φαίνεται στην **Εικόνα 148**. Παρατηρούμε πως εμφανίζονται και οι δύο βασικοί τρόποι αστοχίας, της διαστρωματικής διάτμησης/αποκόλλησης και της ανελαστικής παραμόρφωσης της §4.3.



Bending Specimens of Composite A

Bending Specimens of Composite B

Bending Specimens of Composite C

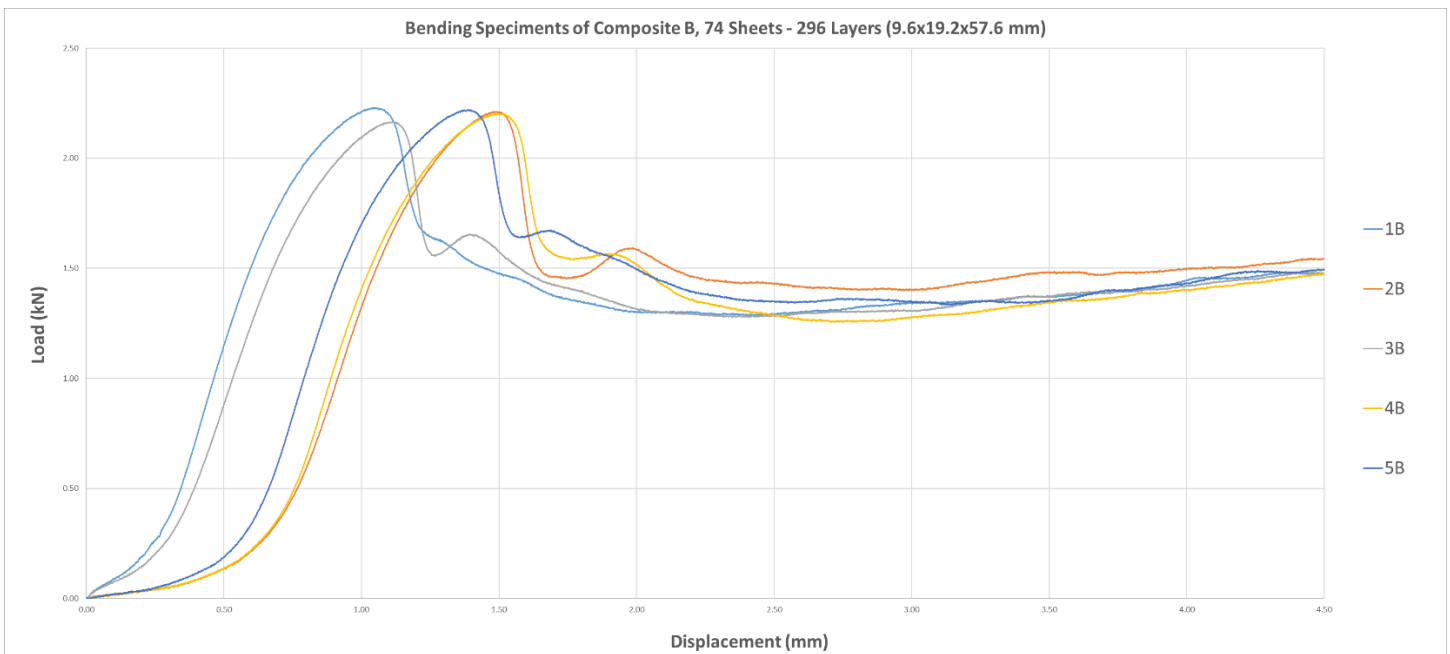
Εικόνα 148 : Πολύστρωτα δοκίμια υλικών A, B και C με εμφανείς μηχανισμούς αστοχίας.

Αρχικά παρατηρούμε πως τα δοκίμια δεν είναι απολύτως συμμετρικά ως προς τον κάθετο άξονα συμμετρίας του. Η καμπύλη/τόξο βύθισης τους εν ολίγοις είναι μετατοπισμένη προς την μία ακμή του εκάστοτε δοκιμίου. Αυτό συμβαίνει διότι το κέντρο συμμετρίας (και σημείο άσκησης του καμπτικού φορτίου) της άνω επιφάνειας του δοκιμίου τοποθετήθηκε χειροκίνητα και λίγο έκκεντρα ως προς τον άνω κύλινδρο άσκησης φορτίου. Μπορούμε να θεωρήσουμε αυτό το σφάλμα συστηματικό και να προχωρήσουμε στην ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας των δοκιμίων.

Είναι εμφανές πως η διαστρωματική αποκόλληση (interlaminari shear-delamination) είναι εντονότερη στα δοκίμια του υλικού B σε σύγκριση με των υλικών A και C. Το υλικό B παρουσιάζει δηλαδή «συμπεριφορά επαναφοράς» διότι κατόπιν του διαστρωματικού (συγκεκριμένα διαφυλλικού) διαχωρισμού η κάμψη σταδιακά παύει να εμφανίζεται με τον ίδιο ρυθμό κατά το βάθος του δοκιμίου καθώς το φορτίο εκτονώνεται με το μηχανισμό αυτό. Αντίθετα στα δοκίμια υλικού C δεν παρατηρείται ο μηχανισμός της διαστρωματικής διάτμησης, ωστόσο η ανελαστική παραμόρφωση είναι παρούσα σε όλα τα δοκίμια και των τριών υλικών.

Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την υψηλή και αντίστοιχα την χαμηλή διαφυλλική συγκολλητική ικανότητα των δοκιμών Α, Β και C όπως προέκυψαν από τις δοκιμές αποκόλλησης (T-Peel) της προηγούμενης παραγράφου §4.3.2. Μία υψηλή συγκολλητική διαφυλλική πρόσφυση φαίνεται να βοηθά στο να διατηρηθεί μεν η «ακεραιότητα» του πολύστρωτου συνθέτου αλλά αποτρέπει τον διαχωρισμό των φύλλων και άρα την «ανακούφιση» των καμπτικών τάσεων κατά το πάχος του δοκιμίου. Συνδέοντας τον μηχανισμό αυτό με τη (αντι)βαλλιστική συμπεριφορά ενός σύνθετου πάνελ (εξαρτώμενη εκτός των άλλων από τον τύπο του βλήματος και τους υπόλοιπους συντελεστές της θωράκισης) μια έντονη διαστρωματική διάτμηση οδηγεί, κατ' επέκταση, σε αφομείωση του μηχανισμού BFS και άρα των τραυματισμών του χρήστη λόγω «απορόφησης» του μηχανισμού BFD κατά το πάχος του συνθέτου. Αντίθετα μία υψηλή συνεκτικότητα μεταξύ των επάλληλων φύλλων που εμποδίζει τον μηχανισμό BFD οδηγεί, εν δυνάμει, σε ένα βαθύτερο τραύμα.

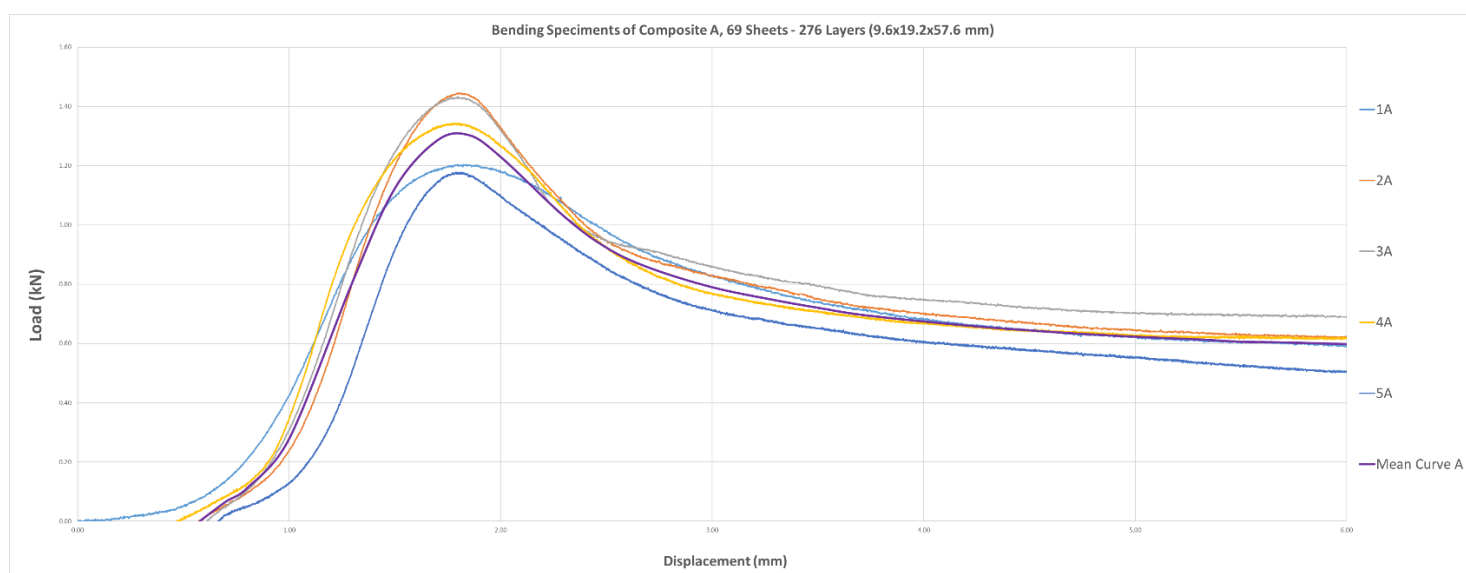
Τα αρχικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν λαμβάνουν, για το υλικό Β για παράδειγμα, την μορφή που φαίνεται στην **Εικόνα 149**. Παρατηρούμε πως, παρ' όλο που οι καμπύλες όλων των δοκιμών έχουν την επιθυμητή μορφή, δεν είναι «συμμετρικά» τοποθετημένες γύρω από τα μέγιστο εμφανιζόμενο φορτίο στον οριζόντιο άξονα. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως κατά την εκκίνηση της δοκιμής το έμβολο βύθισης ερχόταν ήδη σε επαφή και άρα προκαλούσε μία «προπαραμόρφωση» στο εκάστοτε δοκίμιο κάμψης. Αυτή η προσεγγιστική επαφή του εμβόλου με το δοκίμιο δεν αποτελεί παρά μία χειροκίνητη πρακτική, αναπόφευκτη παράμετρο του πειράματος και κατ' επέκταση της εγκατάστασης.



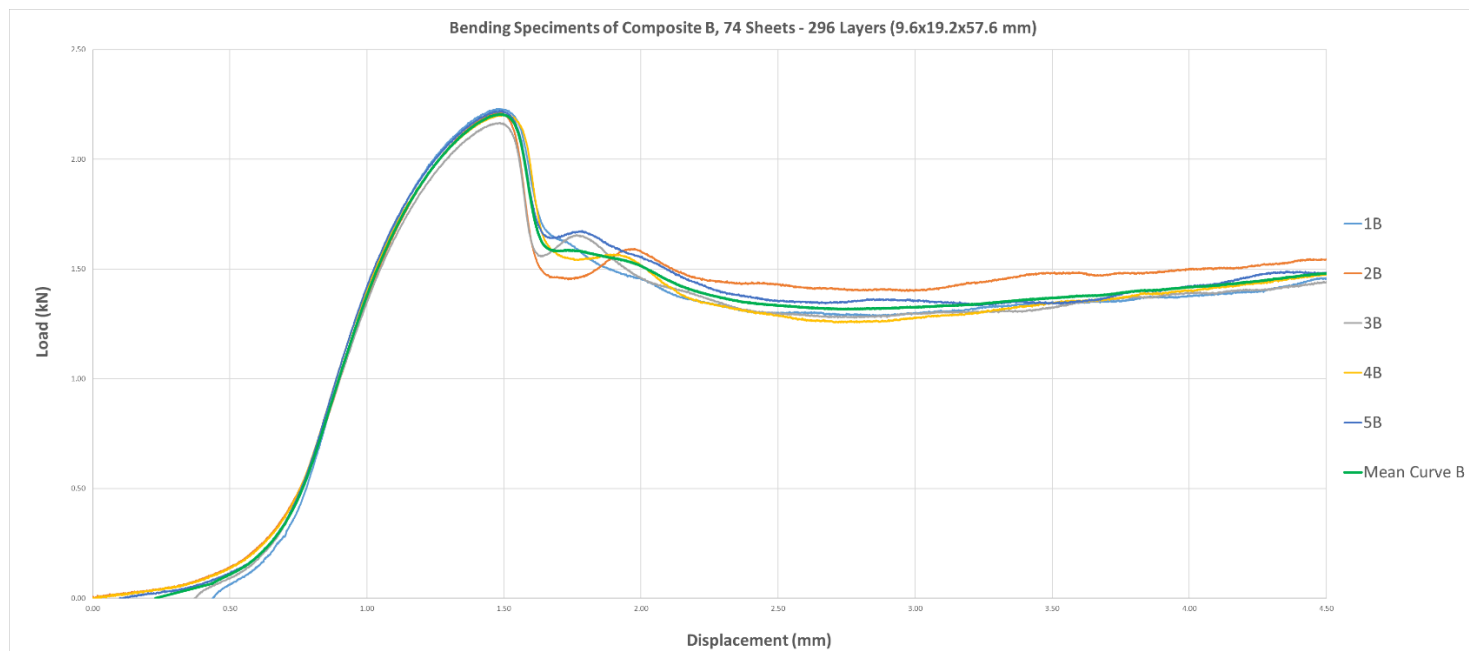
Εικόνα 149 : Αρχική μορφή των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια κάμψης του υλικού Β.

Αντιλαμβανόμαστε πως για να προκύψει μία μέση καμπύλη που να υπερθέτει σωστά και τα 5 δοκίμια κάθε υλικού θα πρέπει οι καμπύλες να «κεντραριστούν» γύρω από το μέγιστο εμφανιζόμενο φορτίο.

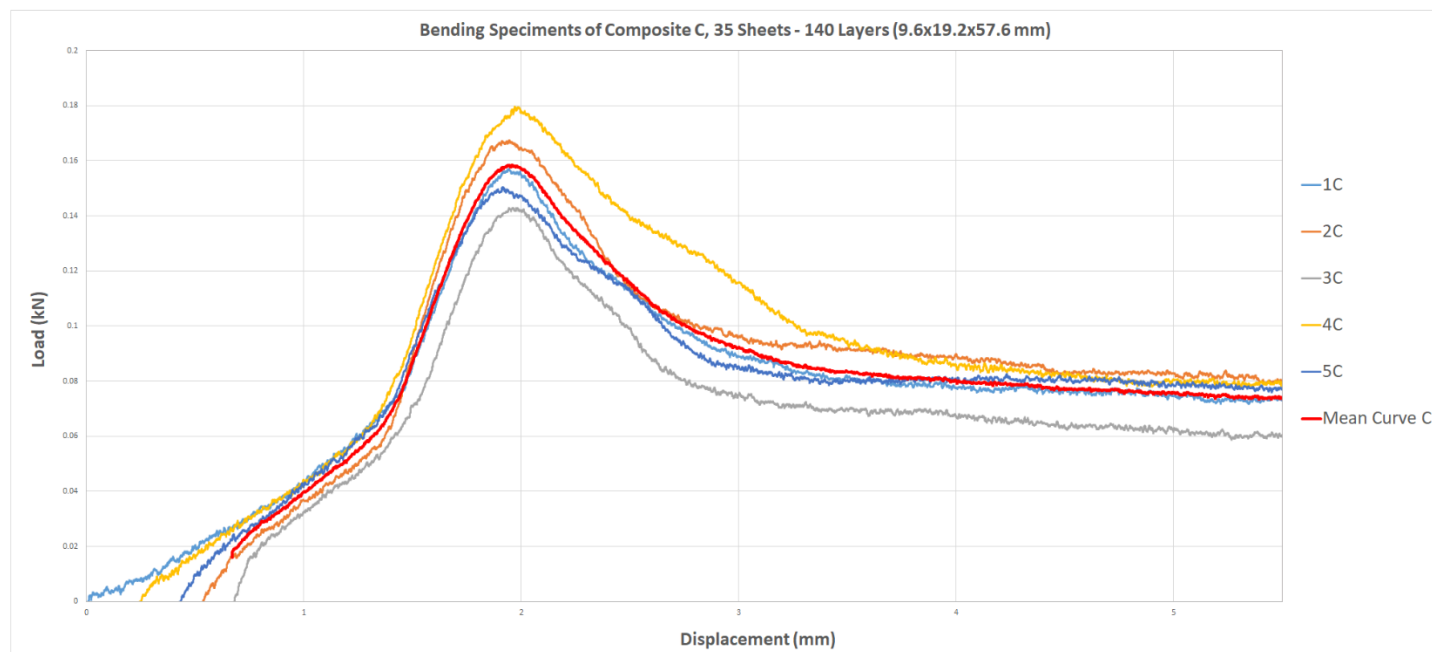
Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικών Α, Β και C υπό κάμψη φαίνονται στις **Εικόνες 150, 151 και 152** με υπέρθεση των αντίστοιχων μέσων καμπυλών. Τέλος παρατίθεται, στην **Εικόνα 153**, η υπέρθεση των μέσων αυτών καμπυλών, προς σύγκριση της διατμητικής αντοχής των τριών υλικών ιδίων διαστάσεων. Η πραγματική βύθιση του εμβόλου για την οποία εμφανίζεται το εκάστοτε μέγιστο/μέσο φορτίο, για τα 3 υλικά δοκίμια, αποτυπώνεται στην **Εικόνα 147** όπου η καμπτική δύναμη έχει ως αφετηρία το μηδέν.



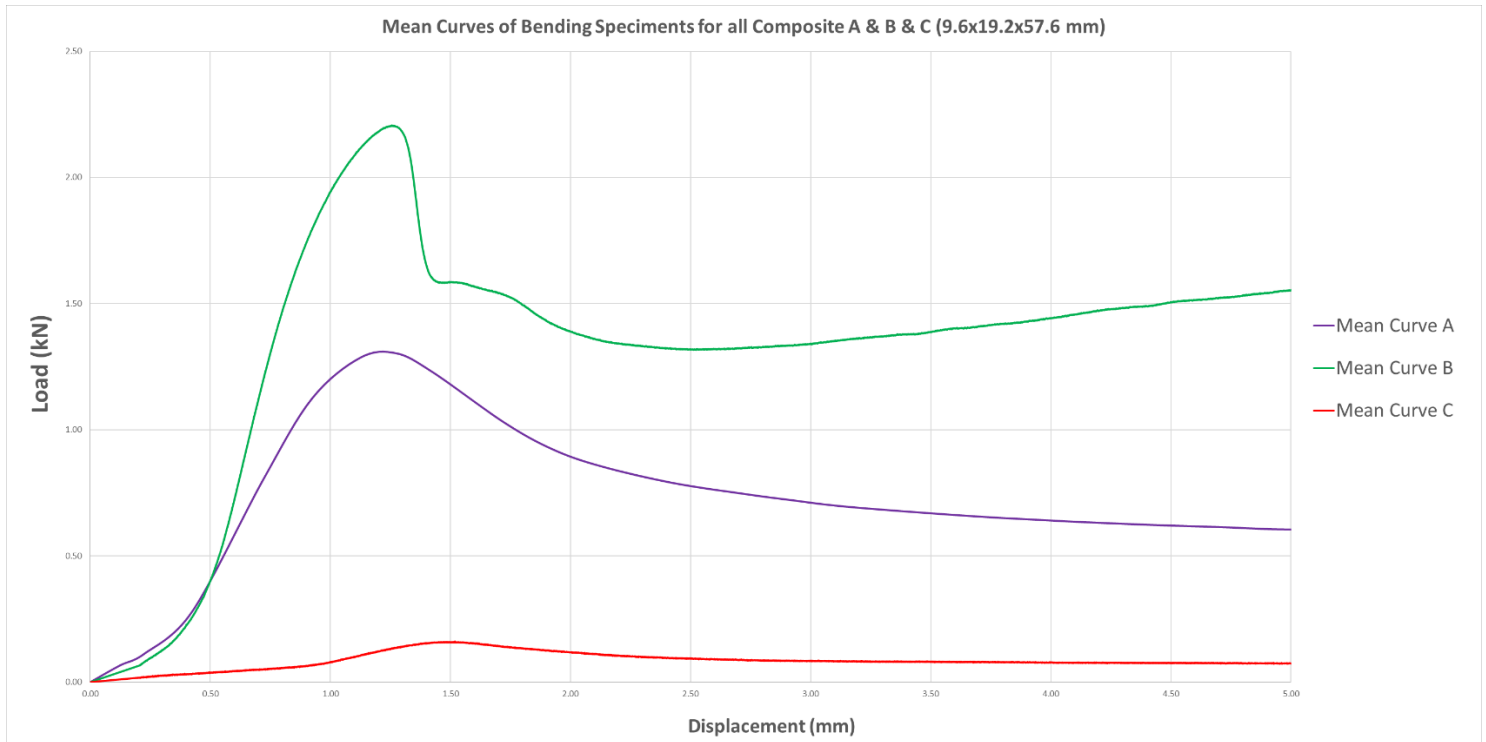
Εικόνα 150 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικού Α και η μέση καμπύλη τους.



Εικόνα 151 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικού B και η μέση καμπύλη τους.



Εικόνα 152 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικού C και η μέση καμπύλη τους.



Εικόνα 153 : Υπέρθυση μέσω διαγραμμάτων κάμψης για τα δοκίμια υλικών A, B και C.

Όπως φαίνεται στην καμπύλη της **Εικόνας 152**, λόγω της τάξης μεγέθους της καμπτικής δύναμης στην οποία υπόκεινται τα δοκίμια υλικού C και λόγω των κραδασμών της μηχανής κατά την καταγραφή των δεδομένων (όπως παρατηρήθηκε και στην **§5.2.2.**) παρουσιάζει περισσότερο θόρυβο από τις αντίστοιχες καμπύλες των υλικών A και B. Ο θόρυβος εδώ ωστόσο είναι διαχειρίσιμος και δεν αλλοιώνει εντελώς την ζητούμενη μορφή των δεδομένων. Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε πως το διάγραμμα της **Εικόνας 152** δεν αποτελεί την αρχική πληροφορία και παρ' όλο που δεν απέχει πολύ από αυτήν έχει υποστεί κάποια εξομάλυνση προς διευκόλυνση του αναγνώστη.

Από την **σχέση (16)** της **§4.3** υπολογίζουμε με βάσει το μέγιστο εμφανιζόμενο καμπτικό φορτίο P_{max} της **Εικόνας 153**, την μέγιστη διατμητική τάση (shear stress) των δοκιμών, υλικών A, B και C, για γνωστό πλάτος, $b = 19.2$ mm και πάχος, $h = 9.6$ mm, ως :

- $\sigma_{s,A} = 0.75 \frac{P_{max,A}}{bh} = 0.75 \frac{1.3 \text{ kN}}{184.3 \text{ mm}^2} \approx 5.30 \text{ MPa}$
- $\sigma_{s,B} = 0.75 \frac{P_{max,B}}{bh} = 0.75 \frac{2.2 \text{ kN}}{184.3 \text{ mm}^2} \approx 8.98 \text{ MPa}$
- $\sigma_{s,C} = 0.75 \frac{P_{max,C}}{bh} = 0.75 \frac{0.16 \text{ kN}}{184.3 \text{ mm}^2} \approx 0.66 \text{ MPa}$

Οι μέγιστες καμπτικές τάσεις των **δοκιμών υλικών A και B** εμφανίζονται σε **κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου περί τα 1.26 mm** και αντίστοιχα σε μετατόπιση **1.52 mm** για τα δοκίμια υλικού C.

Συμπεραίνουμε πως το **υλικό B υπερτερεί, μηχανικά**, των A και C καθώς παρουσιάζει αυξημένη καμπτική αντοχή και επαναφορά (μέσω της διαστρωματικής αποκόλλησης) για ίδιες συνθήκες φόρτισης (ίδια μετατόπιση εμβόλου, ίδιες διαστάσεις δοκιμίων κτλ). Από την άλλη η καμπτική αντοχή του υλικού C κινείται σε εμφανώς μικρότερη τάξη μεγέθους των A και B. Αποδεικνύεται έτσι η ανεπάρκεια του πάχους του σε υψηλά καμπτικά φορτία και κατ' επέκταση ο λόγος για τον οποίο τείνει να χρησιμοποιείται σε αλεξίσφαιρες θωρακίσεις με αυξημένο πάχος και βάρος.

5.3 Συμπεράσματα μηχανικών δοκιμών

Τα συμπεράσματα των άνωθεν μηχανικών δοκιμών της κάμψης τριών σημείων (3 point bending), της δοκιμής αποφλοιώσης (T-Peel) αλλά και της βιβλιογραφικής ανασκόπησης γύρω από την αντοχή εφελκυσμού των τριών υλικών A, B και C, συνοψίζονται ως :

- Οι ίνες του σύνθετου υλικού B φαίνεται να υπερέχουν, μηχανικά, των ινών των υλικών A και C καθώς κατέχει τάση θραύσης 4.1 GPa έναντι των 3.0 GPa και 2.6 GPa, για τα υλικά A και C και για όμοια γραμμική πυκνότητα αντίστοιχα. Οι προεμποτισμένες ίνες, παρ' όλη την υποβάθμιση που υπόκεινται κατά την θερμοσυμπίεση του εκάστοτε σύνθετου πάνελ (χάνουν περί το 20% της εφελκυστικής αντοχής τους), βρίσκονται σε πολύ μεγάλο κλάσμα όγκου (>80%) μέσα σε όμοιες πολυμερικές μήτρες ρητίνης (PU ή SIS), γεγονός που καθιστά τον ρόλο της μήτρας κυρίως «προστατευτικό». Από την άλλη η (αντι)βαλλιστική ικανότητα των σύνθετων υλικών, που βασίζεται στις διαδοχικές μικροθραύσεις (microfractures) κατά την διείδυση του βλήματος, έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια της κινητικής ενέργειας του βλήματος. Η απόδοση του εκάστοτε σύνθετου υλικού εξαρτάται λοιπόν από τη μέγιστη τάση θραύσης των ινών του. Επομένως μπορούμε να κάνουμε την απλή παραδοχή πως η κυριαρχία αντοχής θραύσης των σύνθετων A, B και C θα ακολουθεί την κυριαρχία των ινών $B \gg A \gg C$.
- Από τις τρεις καμπύλες τη **Εικόνας 144** οι μέσες δυνάμεις αποφλοιώσης των υλικών A, B και C προκύπτουν ως $F_{T-peel,A} = 18.35 \text{ N}$, $F_{T-peel,B} = 14.93 \text{ N}$ και $F_{T-peel,C} = 8.25 \text{ N}$ αντίστοιχα. Τα υλικά A και B φαίνεται να κατέχουν ίδιας τάξης και ταυτόχρονα υψηλότερη συγκολλητική (διαφυλλική και ενδοφυλλική) ικανότητα από το υλικό B.
- Λόγω χαμηλής διαφυλλικής πρόσφυσης το υλικό C τείνει να χρησιμοποιείται σε (αντι)βαλλιστικές διατάξεις αυξημένου πάχους και βάρους.
- Από τις καμπύλες της **Εικόνας 153** το μέγιστο εμφανιζόμενο καμπτικό φορτίο υπολογίστηκε ως 5.3 MPa, 8.98 MPa και 0.66 MPa για τα πολύστρωτα δοκίμια υλικών A, B και C αντίστοιχα. Αυτό είναι εμφανές και στην **Εικόνα 148** όπου τα δοκίμια υλικού B φαίνεται «ανακουφίζονται» με τον μηχανισμό αστοχίας της διαφυλλικής αποκόλλησης (interlaminar shear-delamination) περισσότερο των A και C. Το υλικό B επομένως υπερτερεί, μηχανικά, των A και C καθώς παρουσιάζει αυξημένη καμπτική αντοχή και επαναφορά. Παρ' όλη την επαναφορά του τόσο το υλικό B όσο και τα A και C παραμορφώνονται εν τέλη πλαστικά.

6. Γενικά Συμπεράσματα

Με την πολυπρισματική διερεύνηση του εκπονήματος μπορούμε να συγκεντρώσουμε τα βασικά πορίσματα, περιλαμβάνοντας τις βασικές συνιστώσες και μεταβλητές μίας θωράκισης υπό βαλλιστική δοκιμή. Ταυτόχρονα μπορούμε να συσχετίσουμε τη (αντι)βαλλιστική απόκριση των θωρακίσεων με τη μηχανική.

Δεν ξεχνάμε πως η τελική απόδοση μιας θωράκισης είναι πολυπαραγοντική καθώς εξαρτάται αρχικά από τη συμπεριφορά του καθενός συστατικού του υβριδικού συνθέτου (κεραμικό, σύνθετη πλάκα UHMWPE, βαλλιστικός αφρός), από τον κατάλληλο και επαρκή συνδυασμό τους κατά την μορφοποίηση του τελικού προϊόντος αλλά και από τον τρόπο δοκιμής τους, δηλαδή το μοτίβο αρίθμησης των βολών και φυσικά το είδος του βλήματος.

Τα γενικά συμπεράσματα παρατίθενται με μία τυπική «ιεραρχία» από τους πλέον σημαντικούς συντελεστές μίας θωράκισης προς τους λιγότερο ουσιώδεις. Δηλαδή :

- Ο απώτερος σκοπός μίας θωράκισης είναι τρίπτυχος : να σταματήσει την διάτρηση (ακινητοποίηση του βλήματος), να επιφέρει το μικρότερο δυνατό αποτύπωμα BFD και να περιορίσει την θραυσματοποίηση των συντελεστών της.
- Οι δύο βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν μία καλή θωράκιση είναι η παροχή προστασίας και η ελαχιστοποίηση του πάχους και του βάρους της διάταξης, για δεδομένη (αντι)βαλλιστική απόδοση (αλλά και η ανάγκη βελτιστοποίησης του σχήματος και της ευκαμψίας), από την άλλη, η οποία και επάγεται τη διατήρηση της δομής της.
- Ο αριθμός/θέση βολής σχετίζεται με την σταδιακή υποβάθμιση της θωράκισης καθώς αυτή σταδιακά αποκτά "μνήμη".
- Η διάταξη των θέσεων των βολών (μοτίβο αρίθμησης) επηρεάζει την μεταφορά των μηχανισμών αστοχίας και άρα (αντι)βαλλιστικά δοκίμια με διαφορετική διαταξη δεν είναι εντελώς συγκρίσιμα.
- Η καταστροφική καταπόνηση του μονοκεραμικού και του σύνθετου πάνελ είναι επιθυμητή καθώς μειώνεται έτσι η επιρροή της βαλλιστικής κρούσης στον χρήστη (αφομείωση μηχανισμού BFD).
- Ανεξαρτήτως πάχους σύνθετου πάνελ η εκάστοτε θωράκιση, βαλλόμενη από διατρητικά πυρά συμπαγούς πυρήνα και υψηλής ενέργειας εξόδου (τύπου MSC) «κινδυνεύει» από διάτρηση (μεγάλο βάθος διείσδυσης DOP) παρά από εκτενή παραμόρφωση (delamination) η οποία οδηγεί με τη σειρά της σε ένα πιο «άτονο» αποτύπωμα BFD καθώς η εξάπλωση της ενέργειας του βλήματος γίνεται επιφανειακά των επάλληλων φύλλων παρά κατά το πάχος του συνθέτου. Αντίθετα μη διατρητικά βλήματα (τύπου M80) ακόμα υψηλότερης ενέργειας παρουσιάζουν μικρότερη διατρητικότητα αλλά βαθύτερο αποτύπωμα BFD.

- Είναι προτιμότερο ένα ρηχό και ευρύ τραύμα παρά ένα συγκεντρωμένο και βαθύ, με σκοπό την αφομείωση του BFS και εν δυνάμει των τραυματισμών του χρήστη λόγω του μηχανισμού BFD.
- Η θραύση της μονοκεραμικής πλάκας εξαρτάται, πέραν της παρουσίας η μη αραμιδικής ενίσχυσης και κατά τον μεγαλύτερο βαθμό από την γεωμετρική αντιστοιχία/επαφή της με το σύνθετο κατά την συσσωμάτωση τους (autoclave ή απλά συνθήκες κενού), την ποιότητα της συγκόλλησης (ποιότητα συγκολλητικών μέσων) αλλά και την ποιότητα του κεραμικού.
- Η αραμιδική ενίσχυση συμβάλει στην καλή συγκόλληση της ολισθηρής επιφάνειας του σύνθετου πάνελ UHMWPE με το κεραμικό, στη διατήρηση της «υγείας» του μονοκεραμικού κατά την πρόοδο των βολών αλλά και στο να χωριστεί η διεπιφάνεια κεραμικού-αραμιδίου και σύνθετου πάνελ χωρίς να δασκορπιστεί πλήρως το πρώτο.
- Για τη θραυστομηχανική μελέτη των φαινομένων αστοχίας μίας θωράκισης, ανεξαρτήτου (αντι)βαλλιστικής επίδοσης, η πρώτη βολή είναι και η πιο αξιόπιστη καθώς αυτή «παραβιάζει» για πρώτη φορά την πρόσφυση μεταξύ μονοκεραμικού και σύνθετου πάνελ.
- Οι τρόποι αντιστάθμισης των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας της εκάστοτε θωράκισης εξαρτώνται από τον τύπο και το πλήθος των απειλών που καλείται αυτή να αντιμετωπίσει, εν ολίγοις το επίπεδο της θωράκισης. Η αύξηση του πάχους του βαλλιστικού αφρού ή και του κεραμικού αποτελούν γενικά ικανές μεθόδους αντιστάθμισης ιδιαίτερα ενάντια σε βλήματα υψηλής ενέργειας εξόδου (M80, MSC).
- Για δεδομένο πάχος αφρού, διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά οδηγούν σε διαφορετική απορρόφηση ενέργειας του βλήματος, η οποία και αποτυπώνεται στο βάθος BFS λόγω παραμόρφωσης του εκάστοτε σύνθετου πάνελ μέσω του μηχανισμού BFD.
- Το υφασμάτινο κάλυμα/αμπαλάζ και η αντιθραυσματική επίστρωση (spall liner) μιας θωράκισης συγκρατούν τα θραύσματα του κεραμικού ή και του βλήματος και καθυστερούν τον πλήρη «εκφυλισμό» της από τα βαλλόμενα πυρά.
- Τα σύνθετα πάνελ υλικού A παρουσιάζουν, για δεδομένο βλήμα, μεγαλύτερο βάθος διείδυσης DOP από τα πάνελ υλικού B και επομένως καθίστανται (αντι)βαλλιστικά υποδεέστερα.
- Τα βλήματα MSC παρουσιάζουν, για δεδομένη θωράκιση, μεγαλύτερο βάθος DOP των SS109 και M80
- Η εκτενής παραμόρφωσή των βλημάτων MSC συμπαγούς πυρήνα, αντανακλά καλύτερα την υψηλή απόδοση των σύνθετων πάνελ UHMWPE και ωφελεί την κατανόηση των ιδιοτήτων τους.
- Τα βλήματα τύπου M80 βοηθούν περισσότερο στην μελέτη της πολυπλοκότητας της αποκόλλησης των στρώσεων ως μηχανισμού αστοχίας.
- Σημαντικός παράγοντας του «κατά πλάτος» αντί για «κατά πάχος» διαμοιρασμού της ενέργειας ενός βλήματος, ανεξαρτήτως τύπου, είναι η υψηλή ελαστικότητα των

προεμποτισμένων ινών UHMWPE σε συνδυασμό πάντα με την βέλτιστη πρόσφυση τους στην μήτρα.

- Η μήτρα που συγκρατεί τις ίνες σε «ευθυγράμμιση» κατέχει μικρή περιεκτικότητα κατ'όγκο (<20%) και κυρίως τον ρόλο του «ενισχυτικού-συγκολλητικού» μέσου τους.
- Η (αντι)βαλλιστική ικανότητα των σύνθετων υλικών βασίζεται στις διαδοχικές μικροθραύσεις (microfractures) κατά την διείσδυση του βλήματος που έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια της κινητικής ενέργειας του. Η απόδοση του εκάστοτε σύνθετου υλικού εξαρτάται από τη μέγιστη τάση θραύσης των ινών του. Εδραιώνεται έτσι η σειρά «κυριαρχίας» των ινών ως B>>A>>C.
- Το υλικό B επομένως υπερτερεί, μηχανικά, των A και C καθώς παρουσιάζει αυξημένη καμπτική αντοχή και επαναφορά.
- Τα υλικά A και B κατέχουν υψηλότερη συγκολλητική (διαφυλλική και ενδοφυλλική) ικανότητα από το υλικό B. Λόγω χαμηλής διαφυλλικής πρόσφυσης το υλικό C τείνει να χρησιμοποιείται σε (αντι)βαλλιστικές διατάξεις αυξημένου πάχους και βάρους.
- Φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση της καμπτικής και της αποφλοιωτικής συμπεριφοράς των υλικών. Υψηλή συγκολλητική ικανότητα μπορεί να προβεί ανεπιθύμητη αποτρέποντας την διαφυλλική αποκόλληση, έμμεσα την «εκτόνωση» του καμπτικού φορτίου και κατ' επέκταση την αφομείωση του μηχανισμού BFS (τραύματα του χρήστη), εάν θεωρήσουμε πως μία βαλλιστική κρούση αποτελεί μία ταχέως εξελισσόμενη καμπτική καταπόνηση.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκλίνουν με τα βαλλιστικά, καθιστώντας το σύνθετο υλικό ινών UHMWPE B μηχανικά στιβαρότερο και πιο αξιόπιστο των A και C.

7. Προτάσεις για βελτίωση κα μελλοντική μελέτη

Με βάση τα άνωθεν συμπεράσματα και τα προβλήματα που προέκυψαν, κυρίως στο Πειραματικό Μέρος, κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συγκεντρώνουμε κάποιες προτάσεις που δύναται να διευρύνουν την μελέτη επάνω στα υβριδικά σύνθετα κεραμικού-πάνελ ινών UHMWPE. Πιο συγκεκριμένα προτείνονται :

- Βελτίωση του τρόπου συγκράτησης των δοκιμών στην μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου Instron® 4482 του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ, ίσως με την προμήθεια υδραυλικών αρπάγων, με σκοπό την αποφυγή της ολίσθησης και την αξιοπιστία των δεδομένων.
- Απόλυτα συμμετρική τοποθέτηση των δοκιμών κάμψης ως προς το έμβολο πίεσης με σκοπό την ομοιόμορφία του τόξου βύθισης τους.
- Μηχανικές δοκιμές σε μεγαλύτερο εύρος σύνθετων υλικών ινών UHMWPE σε μηχανή τάξης μεγέθους αντίστοιχου της αντοχής των δοκιμών για αποφυγή του θορύβου στα αποτελέσματα.
- Καταγραφή της ταχύτητα εξόδου (exit velocity) των βλημάτων (σε διαμπερείς βολές λεπτότερων πάνελ) με ειδική κάμερα υψηλής ταχύτητας με σκοπό την ποσοστοποίηση της απορροφούμενης ενέργειας κρούσης από την εκάστοτε θωράκιση.
- Βαλλιστικές δοκιμές με ποικίλα πάχη των βασικών συντελεστών της θωράκισης (μονοκεραμική πλάκα, σύνθετο πάνελ, βαλλιστικός αφρός) και βαλλιστικές δοκιμές συνδυασμού σκληρής με μαλακή θωράκιση (in conjunction with) με σκοπό την αφομείωση του BFS.
- Επέκταση του εύρους των βλημάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση των θωρακίσεων ως προς την ποικιλία κάλυψης/προστασίας του χρήστη από διαφορετικές απειλές.
- Νέες μέθοδοι αξιολόγησης και πρωτοκόλλων για την αξιολόγηση της απόδοσης των θωρακίσεων. Αυτές οι μέθοδοι δύναται να περιλαμβάνουν πειράματα σε εργαστηριακές συνθήκες ή χρήση προηγμένων υπολογιστικών (ψηφιακών) προσομοιώσεων (π.χ Ansys, EDAG κ.α) που αναπαριστούν τις πραγματικές συνθήκες του δυναμικού φαινομένου μίας βαλλιστικής κρούσης. Η τριδιάστατη μοντελοποίηση των θωρακίσεων έχει δηλαδή ως σκοπό την θραυστομηχανική ανάλυση τους ως πεπερασμένα στοιχεία (FEA).
- Μελέτη και μελλοντική ανάπτυξη νέων υλικών θωράκισης επιπέδου III+++ (Special Threat) Stand Alone (SA) που μπορούν να προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη αντοχή και προστασία ενάντια σε πυρά. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση νέων συνθετικών υλικών (π.χ νανοϋλικών), κατασκευαστικών τεχνικών ή καινοτόμων μεθόδων παραγωγής.
- Βελτιστοποίηση της σχεδίασης, λαμβάνοντας υπ' όψην τους γεωμετρικούς παράγοντες, το πάχος και τη διάταξη/προσανατολισμό των επάλληλων φύλλων.
- Προηγμένες τεχνολογίες ανίχνευσης και αξιολόγησης των επιθέσεων που μπορούν να εντοπίζουν τις αδυναμίες και την επικινδυνότητα αστοχίας μιας θωράκισης, πριν καν

αυτή τεθεί σε βαλλιστική δοκιμή (μη καταστροφικός έλεγχος), με τη χρήση προηγμένων συστημάτων απεικόνισης (ακτινογραφίες κεραμικών πάνελ) ή επιφανειακών αισθητήρων για τον έλεγχο διάδοσης των κρουστικών κυμάτων στο σύνθετο (και τη συνολική θωράκιση).

8. Κατάλογοι Πινάκων και Εικόνων

8.1 Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Κατηγοριοποίηση συνθέτων με βάση τα συστατικά τους.	18
Πίνακας 2 : Συλλογή διατρητικών βλημάτων διαφορετικού διαμετρήματος [58].	44
Πίνακας 3 : NIJ Standard-0101.06 P-BFS performance test summary.	50
Πίνακας 4 : Χαρακτηριστικά απειλητικών βλημάτων για αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III +++ [67].	52
Πίνακας 5 : Ιδιότητες του Boron Carbide.	59
Πίνακας 6 : Ιδιότητες του Silicon Carbide υπό διαφορετικές κατασκευαστικές μεθόδους.	59
Πίνακας 7 : Ιδιότητες του Aluminium Oxide σε περιεκτικότητες 99.5%, 96% και 85%.....	60
Πίνακας 8 : Σύγκριση βασικών κεραμικών υλικών πάνελ.	60
Πίνακας 9 : Σύγκριση βασικών δομών κεραμικών ενθεμάτων.	62
Πίνακας 10 : Ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου κεραμικού ένθετου SiC πάχους 5.2 mm.	62
Πίνακας 11 : Μηχανικές Ιδιότητες και βαλλιστικό όριο V_{50} διαφόρων τύπων ινών [19]. ..	71
Πίνακας 12 : Διαστάσεις των παραμορφωμένων βλημάτων πρόσκρουσης στα πάνελ της Εικόνας 59.b και 59.c [86].	86
Πίνακας 13 : Διαστάσεις οπών του πάνελ πάχους 10 mm για τα δύο στάδια διάνοιξης της διαμπερούς οπής [86].	89
Πίνακας 14 : Διαστάσεις οπών των πάνελ πάχους 20 mm και 30 mm για τα τρία στάδια διάνοιξης της τυφλής οπής [86].	90
Πίνακας 15 : Γενική κατηγοριοποίηση σύνθετων πάνελ UHMWPE κατά πάχος [86].	91
Πίνακας 16 : Σύγκριση BFS και DOP όμοιων (αντι)βαλλιστικών δοκιμίων με διαφορετικά σύνθετα πάνελ UHMWPE από υλικά Α και Β.	93
Πίνακας 17 : Συνολικό βάθος αποτυπώματος BFS για διαφορετικά πάχη και τύπους βαλλιστικών αφρών για δεδομένο πάχος διαστρωματωμένου συνθέτου UHMWPE υλικού Α και δεδομένης κεραμικής πλάκας SiC.	97
Πίνακας 18 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 1.	126
Πίνακας 19 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 2.A.	131
Πίνακας 20 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 2.B.	134
Πίνακας 21 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 3.A.	138
Πίνακας 22 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 3.B.	141
Πίνακας 23 : Βασικά μεγέθη δοκιμίου 4.	145
Πίνακας 24 : Διάμετροι επιρροής βλημάτων για τα δοκίμια 2.A, 3.A και 4.	146
Πίνακας 25 : Βάθη διείσδυσης DOP (%) για τα δοκίμια 2.A, 2.B, 3.A και 3.B.	148
Πίνακας 26 : Βάθη διείσδυσης DOP (%) βολών από διαφορετικούς τύπους βλημάτων επί θωρακίσεων ίδιου σύνθετου πάνελ υλικού Α.	151
Πίνακας 27 : Βασικοί κίνδυνοι των τριών τύπων βλημάτων και δυνατοί μέθοδοι αντιστάθμισης τους.	156

8.2 Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 : Ιστορία των Υλικών [47].	12
Εικόνα 2 : Τριδιάστατη απεικόνιση διαστρωματωμένου σύνθετου υλικού [44].	13
Εικόνα 3 : Σχηματική αναπαράσταση συνθέτου υλικού (με διάφορους προσανατολισμούς ινών) [61].	14
Εικόνα 4 : Γενική ταξινόμηση σύνθετων υλικών [48].	16
Εικόνα 5 : Ταξινόμηση αποκλειστικά με βάση την ενισχυτική (μη συνεχή) φάση (κάτω) [49].	16
Εικόνα 6 : Κατηγοριοποίηση συνθέτων με βάση τα συστατικά τους [42].	19
Εικόνα 7 : Διάφορες γεωμετρικές μακροσύνθετων με ίνες και κονιόμορμα σωματίδια [1].	20
Εικόνα 8 : Σύνθετα τύπου «μήτρα-διασπορά» [2, 45].	21
Εικόνα 9 : Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων ενίσχυσης μήτρας : (α) με σωματίδια, (b) φυλλίδια ή ίνες μικρού ή μεγάλου μήκους, (c) συνεχείς ίνες και (d) ως διαστρωματώμενα σύνθετα με ένωση μονοδιάστατων φύλλων, με αφρό και με κυψελοειδή πυρήνα [43].	22
Εικόνα 10 : Η δομή του Kevlar® [45].	24
Εικόνα 11 : Υβριδικό σύνθετο ύφασμα με ίνες Kevlar® και ίνες άνθρακα (Carbon Fibers) σε «πλέξη διαγωνάλ» (twill weave) [46].	25
Εικόνα 12 : Μικροδομές τεσσάρων τύπων συνθέτων MMC : (a, b) SiCp/Al, (c, d) SiCp/Cu, (e) Diamond/Cu, (f) Ti-coated diamond, (g) Ni-coated diamond, (h) Cf/Cu composites; (i) Mo-coated carbon fiber σε ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) [52].	26
Εικόνα 13 : Επιφάνεια θραύσης συνθέτου ινών και μήτρας SiC (CMC) σε ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) [51].	27
Εικόνα 14 : Μικροδομές τεσσάρων τύπων συνθέτων PMC : (a) resin matrix, (b) R/SiC composite, (c) neem fiber composite, (d) coir fiber composite, and (e) hybrid SiC/neem/coir fiber composite σε ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) [53].	28
Εικόνα 15 : Είδη νανοσωλήνων άνθρακα.	30
Εικόνα 16 : Κυψελοειδές πλέγμα γραφενίου [41].	31
Εικόνα 17 : Δομή μοντμοριλλονίτη (2:1) [41].	33
Εικόνα 18 : Δομή νανοσωλήνα αλλοϋσίτη [41].	34
Εικόνα 19 : Σχηματική αναπαράσταση συνθετικών ζεολίθων [41].	35
Εικόνα 20 : Η κρυσταλλική δομή της κυτταρίνης [41].	36
Εικόνα 21 : Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) αραιών εναιωρημάτων (a) νανοϊνιδίων κυτταρίνης κατασκευασμένων από ινδική συκή και (b) νανοκρυστάλλων κυτταρίνης εξαγόμενων από ίνες ραμί [36].	37
Εικόνα 22 : Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) νανοςύνθετου πολυμερούς LaNi ₅ -SiO ₂ ₃₀₀ (αριστερά) με οπισθοσκέδαση (πάνω αριστερά) και LaNi ₅ -ABS (δεξιά) κατόπιν ξηρής επίστρωσης με σωματίδια σε μύλο ανάδευσης (tumbling mill) [41,54].	38
Εικόνα 23 : Αναπαράσταση της διαδικασίας παραγωγής συμβατοποιημένων νανοσωματιδίων PVDF/SWCNT [41].	38
Εικόνα 24 : Σχηματική αναπαράσταση επι τόπου πολυμερισμού [41].	39
Εικόνα 25 : Σχηματική αναπαράσταση ανάμειξης διαλύματος [41].	39

Εικόνα 26 : Σχηματική αναπαράσταση ανάμειξης τήγματος [41].....	40
Εικόνα 27 : Συγκράτηση θραυσμάτων χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) την τοποθέτηση εσωτερικής μεμβράνης [3,56].	41
Εικόνα 28 : Δείγμα αντιθραυσματικής μεμβράνης-Spall Liner.	42
Εικόνα 29 : Συγκράτηση θραυσμάτων χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) αντιθραυσματική επίστρωση, εξωτερικά της θωράκισης.	42
Εικόνα 30 : Kevlar Soft Armor (αριστερά) και Hard Body Armor (δεξιά) [59].....	44
Εικόνα 31 : «Σκληρή» θωράκιση (hard armor-αριστερά) σε συνδυασμό με (ICW) «μαλακή» θωράκιση (μέση) και «σκληρή» θωράκισης (δεξιά) με διαστρωμάτωση κεραμικής πλάκας(faceplate), κυψελοειδούς πυρήνα, μεταλλικής πλάκας (rear/backing plate) σε διάταξη sandwich [57, 60].	46
Εικόνα 32 : Διαδοχικές θραύσεις (απλών) υαλοπινάκων μέσω βλήματος (σταδιακή απώλεια ενέργειας του βλήματος, μέσω της θραύσης τους) [62].	47
Εικόνα 33 : Συνθήκες φόρτισης των ινών σε ορθογωνικά-πλεκτό σύνθετο κατά τη διεύθυνση του βλήματος [3].	48
Εικόνα 34 : Οι δύο φάσεις μιας βαλλιστικής κρούσης σε σύνθετη πλάκα : Φάση εισόδου-αστοχία της θωράκισης (επάνω) και φάση παραμόρφωσης του συνθέτου-ακινητοποίησης του βλήματος (κάτω).	49
Εικόνα 35 : Γωνία προσβολής κατά NIJ Standard-0101.06.	51
Εικόνα 36 : Αντιστοιχία επιπέδων θωράκισης κατά NIJ 0101.06 και χαρακτηριστικών τους βλημάτων [70].....	51
Εικόνα 37 : Παράδειγμα βασικής διαστασιολόγησης βλήματος.	53
Εικόνα 38 : Τρόπος μέτρησης αποτυπωμάτων BFS κατά NIJ Standard-0101.06.	54
Εικόνα 39 : Αποδεκτοί τρόποι πρόσδεσης βαλλιστικών δοκιμών κατά NIJ Standard-0101.06.....	55
Εικόνα 40 : Τυπική διάταξη βαλλιστικών δοκιμών κατά το πρότυπο NIJ Standard-0101.04 [75].	56
Εικόνα 41 : Σχηματική απεικόνιση πλάγιας όψης της τελικής εσοχής στον πηλό (αριστερά), παράδειγμα αποτυπώματος πραγματικής εσοχής κατόπιν βολής με βλήμα διαμετρήματος 9 mm (κέντρο) και εξομάλυνση της επιφάνειας του πηλού για μέτρηση του πραγματικού βάθους BFS [74] (δεξιά)	57
Εικόνα 42 : Κανόνες αρίθμησης της τοποθεσίας διαδοχικών βολών κατά NIJ Standard-0101.06.....	58
Εικόνα 43 : Ιδιότητες των κεραμικών και η βαρύτητα τους όσον αφορά τις βαλλιστικές εφαρμογές τους [69].....	61
Εικόνα 44 : Βασικές δομές κεραμικών ενθεμάτων : a. με τετράγωνες φολίδες, b. Με εξαγωνικές φολίδες, c. μονοκεραμική πολυκάμπυλη πλάκα, d. μονοκεραμική καμπύλη πλάκα [68].	61
Εικόνα 45 : Μονοκεραμική πλάκα SiC πάχους 5.2 mm.....	63
Εικόνα 46 : Υφασμάτινες ενισχύσεις Kevlar® (a) πριν την βαλλιστική δοκιμή (αριστερά), (b) κατόπιν βαλλιστικής δοκιμής, (c,d) ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) των ινών κατόπιν αστοχίας τους [85].	64

Εικόνα 47 : Θραύση κεραμικών μετά από βαλλιστική κρούση. (a) κεραμικό αλουμίνιας-μουλίτη (σύνθεσης AM2), βλήμα 7.62x63 mm (APM2) (αφαιρέθηκαν ορισμένα θραύσματα κεραμικού); (b) κεραμικό RBSC (Reaction-bonded silicon carbide), βλήμα 7.62x54R LPS; (c) συμπαγές κεραμικό SiC, βλήμα 7.62x51 mm FMJ (NATO). (d) βιομορφικό RBSC, βλήμα 7.62x63 mm (APM2); (e) κεραμικό ASN, βλήμα 7.62x51 mm FMJ (NATO). (f) κεραμικό AS,2 βλήματα 7.62x51 mm FMJ (NATO) σε 1 πλακίδιο (διαστάσεων 110x110 mm) [82].	65
Εικόνα 48 : Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ινών UHMWPE με τη μέθοδο πήγματος (gel-spinning process) [106].	75
Εικόνα 49 : Σχηματική αναπαράσταση τυπικής παραγωγής πολύστρωτου συνθέτου ινών UHMWPE [104].	76
Εικόνα 50 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας κατασκευής πολύστρωτων συνθέτων με ίνες UHMWPE.	77
Εικόνα 51 : (a) Καλούπι θέρμανσης/ψύξης και μορφοποίησης φύλλων με προεμποτισμένες ίνες UHMWPE (έξι θέσεων), (b) Δίκτυο ψύξης / θέρμανσης του καλούπιού, (c) Καλούπι υπό πίεση και θερμοκρασία, πληρωμένο με μορφοποιούμενα φύλλα UHMWPE [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].	77
Εικόνα 52 : Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού Α.	79
Εικόνα 53 : Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού Β.	79
Εικόνα 54 : Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού C.	80
Εικόνα 55 : Μορφοποιημένα φύλλα UHMWPE σε πάνελ κατόπιν εξόδου από το καλούπι (πίσω) και μετά το πέρας της μορφοποίησης σε σχήμα SAPI (εμπρός)	80
Εικόνα 56 : Σχηματική αναπαράσταση βασικών μερών ενός διατρητικού βλήματος [87].	83
Εικόνα 57 : (a) Φωτογραφικό υλικό διαφόρων τομών, με χρήση υδροκοπής-waterjet, παραμορφωμένων διατρητικών βλημάτων (του ατσάλινου πυρήνα του) 7.62x39 mm MSC και (b) σχηματική αναπαράσταση παραμορφωμένου βλήματος-πυρήνα σε σχήμα «μανιταριού» με βασικές διαστάσεις [86].	83
Εικόνα 58 : (a) Εμπρόσθια, πίσω και (b) πλάγια όψη των επιφανειών των πυροβολημένων πάνελ UHMWPE [86].	84
Εικόνα 59 : Τομές στα σημεία πρόσκρουσης των βλημάτων επί σύνθετων πλακών UHMWPE με πάχη (a) 10 mm (διαμπερής οπή), (b) 20 mm και (c) 30 mm αντίστοιχα [86].	85
Εικόνα 60 : Διάταξη (αντι)βαλλιστικού ελέγχου πάνελ πάχους 10, 20 και 30 mm κατά NIJ-0101.06 [86].	87
Εικόνα 61 : Σχηματική αναπαράσταση των σημείων πρόσκρουσης και της κάμερας μέτρησης υψηλής ταχύτητας (δεξιά) [86].	88

Εικόνα 62 : Σχηματική αναπαράσταση της τομής των οπών των σύνθετων πάνελ UHMWPE για (a) πάχος 10 mm και (b) πάχη 20 mm και 30 mm (δεξιά) με τα αντίστοιχα στάδια διείσδυσης.	89
Εικόνα 63 : Συμπύκνωση των ινών και της μήτρας [86].	90
Εικόνα 64 : Σχηματική απεικόνιση των μεγεθών DOP, CP και PP παρουσία κεραμικού....	92
Εικόνα 65 : Παράδειγμα μέτρησης των μεγεθών CP,DOP και PP σε τομή σημείου βολής.	93
Εικόνα 66 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των δοκιμών υλικού A (αριστερά) και υλικού B (δεξιά) του Πίνακα 16.	94
Εικόνα 67 : Τυπικό παράδειγμα βαλλιστικού αφρού της εταιρείας ZOTEK® N – Zotefoams [73].	95
Εικόνα 68 : Πολυκαρβονικό φύλλο πάχους 1 mm [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].....	96
Εικόνα 69 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των τεσσάρων δοκιμών υλικού A του Πίνακα 17.	98
Εικόνα 70 : Προσαρμογή κεραμικής πλάκας πάνω πολύστρωτο σύνθετο, πριν τον κλίβανο [63].	99
Εικόνα 71 : Παράδειγμα αυτόματου κλίβανου αναθέρμανσης-σκλήρυνσης (autoclave curing) σύνθετων υλικών (αριστερά) με ενδεικτική την εσωτερική του διάταξη (δεξιά) [64,65].	100
Εικόνα 72 : Παράδειγμα σχηματικής απεικόνισης μίας διάταξης συγκόλλησης του τελικού υβριδικού συνθέτου.	102
Εικόνα 73 : Συγκόλληση αντιθραυσματικής επίστρωσης, μονοκεραμικού ,πολύστρωτου συνθέτου UHMWPE και βαλλιστικού αφρού σε σακούλες κενού [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].	103
Εικόνα 74 : Θωράκιση χωρίς αντιθραυσματική προστασία και προ συγκόλλησης (αριστερά) και με αντιθραυσματική προστασία (δεξιά) κατόπιν συγκόλλησης [Φωτογραφικό αρχείο Βενετσάνου Βασιλείου Οδυσσέα].....	104
Εικόνα 75 : Παράδειγμα τελικής μορφής θωράκισης SAPI επιπέδου III+++ (SA) κατά NIJ Standard-0101.06 [79].	105
Εικόνα 76 : Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Stress-Strain curves) κατά ASTM D3039/D3039M [89]	107
Εικόνα 77 : Τυπική μορφή διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης (stress-strain) εφελκυσμού συνθέτου ινών UHMWPE [96].....	108
Εικόνα 78 : Μικρογραφήματα SEM επιφάνειας θραύσης ινών (a) υψηλού μέτρου ελαστικότητας, (b) υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό (πολυμερική μήτρα) [98].	108
Εικόνα 79 : Καμπύλες υποθετικών συνθέτων με όλκιμες και ψαθυρές ίνες και όλκιμη μήτρα [97].	109
Εικόνα 80 : Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής εφελκυσμού.	110
Εικόνα 81 : Ενδεικτικό διαζονικό επιμηκυνσιόμετρο [90].	110
Εικόνα 82 : Κωδικοποίηση των τρόπων αστοχίας δοκιμών εφελκυσμού κατά D3039/D3039M [89].	111

Εικόνα 83 : Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής σε αποφλοίωση.....	114
Εικόνα 84 : Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, λεπτών φύλλων/δειγμάτων από κράματα αλουμινίου (5754 και 6111) συγκολλημένα με εποξειδική κόλλα XD4600, υπό διαστρωματική αποκόλληση (T-Peel) με ταχύτητα 5mm/min στους 23°C [99].	115
Εικόνα 85 : Αντιπροσωπευτικά δεδομένα διαστρωματικής αποκόλλησης (T-Peel) συνθέτων HB210 και HB212 της Dyneema® με και χωρίς σκλήρυνση του συγκολλητικού Sikaflex®-252 σε κλίβανο (ASC Process Systems autoclave) [63].	116
Εικόνα 86 : Μηχανισμοί αστοχίας λόγω καμπτικής καταπόνησης [94].	118
Εικόνα 87 : Σύνθετο HB210 της Dyneema® κατόπιν καμπτικής του καταπόνησης με εμφανείς τους μηχανισμούς αστοχίας της ανελαστικής παραμόρφωσης και της διαστρωματικής διάτμησης [63].	118
Εικόνα 88 : Σχηματική αναπαράσταση διάτμησης βραχείας δοκού.....	119
Εικόνα 89 : Σχηματική αναπαράσταση διάτμησης επίπεδης βραχείας δοκού κατά D2344M [94].	121
Εικόνα 90 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης διάτμησης βραχέων δοκών συνθέτων ινών γυαλιού (glass fiber) σε ακρυλική (acrylic) και εποξειδική (epoxy) μήτρα [100].	122
Εικόνα 91 : (Αντι)βαλλιστικό δοκίμιο 1 με εμφανές το σημείο πρόσκρουσης επάνω στο κεραμικό (αριστερά) και η σύνθετη πλάκα UHMWPE υλικού A κατόπιν διαχωρισμού της στη διεπιφάνεια αραμιδικής ενίσχυσης-συνθέτου.....	125
Εικόνα 92 : Μεγέθυνση του σημείου πρόσκρουσης (αριστερά) και μέτρηση των 2 διαμέτρων της ελλειψοειδούς θραυσμένης περιοχής (κέντρο και δεξιά).	126
Εικόνα 93 : Τομή του μοναδικού σημείου βολής του δοκιμίου 1 με βλήμα M80 FMJ. ...	126
Εικόνα 94 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των δοκιμίων 2.A. και 2.B.....	127
Εικόνα 95 : Δοκίμιο 2.A (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διαπιφάνεια συνθέτου (με τομές των σημείων βολής)-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση), (d) πίσω όψη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος με εμφανή τον βαλλιστικό αφρό.	128
Εικόνα 96 : Αρίθμηση (καθρέπτης) των βολών του δοκιμίου 2.A στην διεπιφάνεια συνθέτου-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση).	129
Εικόνα 97 : Σημεία βολών του δοκιμίου 2.A σε τομή και υπό κλίμακα.	130
Εικόνα 98 : Δοκίμιο 2.B (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διαπιφάνειες αντιθραυσματικής μεμβράνης-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση)-συνθέτου, (d) σύνθετη πλάκα κατόπιν αφαίρεσης του θραυσμένου κεραμικού, (e) πίσω όψη με κάλυμα.	132
Εικόνα 99 : Σημεία βολών του δοκιμίου 2.B σε τομή και υπό κλίμακα.	133
Εικόνα 100 : Μοτίβο αρίθμησης βολών των δοκιμίων 3.A. και 3.B.....	134
Εικόνα 101 : Δοκίμιο 3.A (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διαπιφάνεια συνθέτου (με τομές των σημείων βολής)-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση), (d) πίσω όψη με κάλυμα.....	135

Εικόνα 102 : Αρίθμηση (καθρέπτης) των βολών του δοκιμίου 3.A στην διεπιφάνεια συνθέτου-κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση).	136
Εικόνα 103 : Σημεία βολών του δοκιμίου 3.A σε τομή και υπό κλίμακα.	137
Εικόνα 104 : Δοκίμιο 3.B (a) εμπρόσθια όψη πριν την αφαίρεση του καλύματος, (b) αντιθραυσματική μεμβράνη κατόπιν αφαίρεσης του καλύματος, (c) διεπιφάνεια κεραμικής πλάκας (χωρίς αραμιδική ενίσχυση)-συνθέτου, (d) σύνθετο χωρίς θραύσματα κεραμικού με τομές βολών, (e) πίσω όψη χωρίς κάλυμα.....	139
Εικόνα 105 : Σημεία βολών του δοκιμίου 3.B σε τομή και υπό κλίμακα.	140
Εικόνα 106 : Μοτίβο αρίθμησης βολών του δοκιμίου 4.	141
Εικόνα 107 : Δοκίμιο 4 (a) εμπρόσθια όψη αντιθραυσματικής επίστρωσης κατόπιν αφαίρεση του καλύματος, (b) σύνθετη πλάκα (με τομές βολών), (c) κεραμική πλάκα με αραμιδική ενίσχυση, (d) πίσω όψη με κάλυμα.	142
Εικόνα 108 : Αρίθμηση (καθρέπτης) των βολών του δοκιμίου 4 στην διεπιφάνεια συνθέτου-κεραμικής πλάκας με αραμιδική ενίσχυση.	143
Εικόνα 109 : Σημεία βολών του δοκιμίου 4 σε τομή και υπό κλίμακα.	144
Εικόνα 110 : Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμίων 2.A, 3.A και 4.	147
Εικόνα 111 : Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμίων 2.A, 2.B, 3.A και 3.B.....	148
Εικόνα 112 : Χαρακτηρισμός σταδίων διάνοιξης οπής 2 και 3 για μη διατρητικά βλήματα M80 FMJ επί τομής στο σημείο βολής 6 του δοκιμίου 2.A.	149
Εικόνα 113 : (a) βολή 6 του δοκιμίου 2.B με παρουσία θραύσματος κεραμικού στην κοιλότητα, (b) βολή 2 του δοκιμίου 2.B με κοιλότητα σε σχήμα ημισφαιρικού κρατήρα, (c) βολή 2 του δοκιμίου 3.A με παρουσία παραμορφωμένης κεφαλής του βλήματος.	150
Εικόνα 114 : Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμίων 2.A και 4.	152
Εικόνα 115 : Τομές βολών επί δοκιμίων σύνθετου πάνελ υλικού A με τρεις διαφορετικούς τύπους βλήματος M80, SS109 (μη διατρητικά) και MSC (διατρητικό).	153
Εικόνα 116 : (a-b-c) Διαστασιολόγηση παραμορφωμένου συμπαγούς πυρήνα βλήματος MSC 7.62x39 επί δοκιμίου 4, σύνθετου πάνελ UHMWPE υλικού A, (d) Μικρομέτρηση τελκής διαμέτρου συμπαγούς πυρήνα, (e) Παραμορφωμένος πυρήνας (κέντρο) με θραύσματα του μεταλλικού περιβλήματος (steel jacket) εκατέρωθεν.....	154
Εικόνα 117 : Προετοιμασία δοκιμίων εφελκυσμού.	158
Εικόνα 118 : Μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου Instron® 4482 του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ.....	159
Εικόνα 119 : Δοκίμιο εφελκυσμού στις μηχανικές αρπάγεις της Instron® 4482 προ της δοκιμής.....	160
Εικόνα 120 : Λεία διαμόρφωση των αρπαγών της Instron® 4482.	161
Εικόνα 121 : Ηλεκτρονική μικρογραφία της επιφάνειας των ινών UHMWPE σε σύνθετο πολυμερικής μήτρας (a) στην κατεύθυνση 0°, (b) ορατές ίνες στην κατεύθυνση των 90°, κάθετες στην διεύθυνση φόρτισης κατόπιν αφαίρεσης της πρώτης στρώσης ινών, προ εφελκυσμού [81].....	161
Εικόνα 122 : Ολίσθηση των δοκιμίων στις μηχανικές αρπάγεις της Instron® 4482.	162
Εικόνα 123 : Αυξομείωση της εφελκυστικής τάσης λόγω ολίσθησης στις αρπάγεις, κατά τον εφελκυσμό μονόφυλλου δοκιμίου [0°/90°] ₂ υλικού Spectra Shield® SR-1226 της	

Honeywell (προεμποτισμένες ίνες UHMWPE, μήτρα καουτσούκ) σε μηχανή Instron® 4482 5900R UTM, με υδραυλικές αρπάγεις [81].	163
Εικόνα 124 : Υδραυλικές αρπάγεις της εταιρείας Instron® με δύναμη συγκράτησης έως και 600 kN για στατικά φορτία [102].	163
Εικόνα 125 : Αστοχία στις ακμές μονόφυλλου δοκιμίου από σύνθετο ινών UHMWPE σε υδραυλικές αρπάγεις χωρίς ειδική διαμόρφωση σύσφιξης.	164
Εικόνα 126 : Παραδείγματα ειδικών διαμορφώσεων συγκράτησης για υδραυλικές αρπάγεις [81, 101].	164
Εικόνα 127 : Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικά σύνθετα ινών UHMWPE (μονόφυλλα δοκίμια $[0^\circ/90^\circ]_2$).	165
Εικόνα 128 : Τρόπος θραύσης των ινών μονόφυλλου δοκιμίου από σύνθετο ινών UHMWPE με (α) μήτρα καουτσούκ, (β) μήτρα πολυουρεθάνης.	166
Εικόνα 129 : Ηλεκτρονική μικρογραφία των ινών UHMWPE σε σύνθετο πολυμερικής μήτρας (α) Εμπρόσθια επιφάνεια (κατεύθυνση 0°) με εμφανώς θραυσμένες και πεπλεγμένες ίνες, (β) Πίσω επιφάνεια, όπου φαίνεται ο διαχωρισμός των ινών στην κατεύθυνση των 90° , κατόπιν εφελκυσμού [81].	166
Εικόνα 130 : (α) Δοκίμια εφελκυσμού με διαφοροποιήσεις στις ακμές συγκράτησης και (β) Μεγέθυνση των ακμών (1) χωρίς διαμόρφωση, (2) με καρφωτικά σύρματα, (3,5) με σταυροειδή ραφή, (4) με ορθογωνικό μοτίβο.	167
Εικόνα 131 : Αυξομείωση της εφελκυστικής τάσης λόγω ολίσθησης στις αρπάγεις, κατά τον εφελκυσμό μονόφυλλου δοκιμίου $[0^\circ/90^\circ]_2$ υλικού B σε μηχανή Instron® 4482, με μηχανικές αρπάγεις.	168
Εικόνα 132 : Δοκίμιο 2 φύλλων σύνθετου υλικού A κατόπιν εφελκυστικής δοκιμής.	169
Εικόνα 133 : Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το δοκίμιο της Εικόνας 132.	169
Εικόνα 134 : Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο της Εικόνας 132.	170
Εικόνα 135 : Προετοιμασία δοκιμίων αποφλοίωσης.	173
Εικόνα 136 : Δοκίμιο αποφλοίωσης στις μηχανικές αρπάγεις της Instron® 4482.	174
Εικόνα 137 : Δοκίμιο αποφλοίωσης μετά το πέρας της δοκιμής.	175
Εικόνα 138 : Ακατέργαστα δεδομένα δύναμης αποφλοίωσης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια του υλικού A.	176
Εικόνα 139 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια υλικού A και η μέση καμπύλη τους.	177
Εικόνα 140 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια υλικού B και η μέση καμπύλη τους.	177
Εικόνα 141 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για τα 10 δοκίμια υλικού C και η μέση καμπύλη τους.	178
Εικόνα 142 : Σημεία τραυματισμού των δοκιμίων αποφλοίωσης C5, C6, C7 και C8, υλικού C.	179
Εικόνα 143 : Ακατέργαστα δεδομένα δύναμης αποφλοίωσης-μετατόπισης για τα δοκίμια C5, C6, C7 και C8, υλικού C.	179
Εικόνα 144 : Υπέρθεση μέσω καμπυλών αποφλοίωσης και μέσης δύναμης αποφλοίωσης για τα δοκίμια υλικών A, B και C.	180

Εικόνα 145 : Προετοιμασία δοκιμίων κάμψης του υλικού Β (α) αρχικό σύνθετο πάνελ, (b) χάραξη πλάτους δοκιμίων, (c) κοπή λωρίδων δοκιμίων, (d) επιλογή λωρίδων από το σύνολο του πάνελ, (e) τυχαία εκλογή δοκιμίων.	182
Εικόνα 146 : Αυτοσχέδια συγκράτηση των κυλίνδρων στήριξης διαμέτρου 3 mm για τα δοκίμια κάμψης τριών σημείων.	183
Εικόνα 147 : (a) Σταθεροποίηση του κυλίνδρου άσκησης φορτίου, (b) Δοκίμιο προς της κάμψη τριών σημείων, (c) Δοκίμιο κατόπιν της καμπτικής δοκιμής.	184
Εικόνα 148 : Πολύστρωτα δοκίμια υλικών Α, Β και C με εμφανείς μηχανισμούς αστοχίας.	185
Εικόνα 149 : Αρχική μορφή των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια κάμψης του υλικού Β.	186
Εικόνα 150 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικού Α και η μέση καμπύλη τους.	187
Εικόνα 151 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικού Β και η μέση καμπύλη τους.	188
Εικόνα 152 : Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τα 5 δοκίμια υλικού C και η μέση καμπύλη τους.	188
Εικόνα 153 : Υπέρθυση μέσω των διαγραμμάτων κάμψης για τα δοκίμια υλικών Α, Β και C.	189

9. Κατάλογος Αναφορών

- [1] Επιστήμη και Τεχνολογία των Σύνθετων Υλικών, Κ. Γ. Μπέλτσιος, 2010.
- [2] A.K. Kaw, Mechanics of Composite Materials, CRC Press, 2006.
- [3] Composites for Ballistic Applications, Composites Processing, P.J. Hogg, CPA, Bromsgrove, U.K. March 2003.
- [4] The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement, Kurtz, Steven M., Academic Press, 2004.
- [5] Ultrahigh molecular weight polyethylenes (uhmwpe). Engineered Materials Handbook, Stein, H. L., 1998.
- [6] Development of edible coatings for minimally processed fruits and vegetables, Wong, D. W. S.; Camirand, W. M.; Pavlath, A. E.; Krochta, J. M.; Baldwin, E. A. and Nisperos-Carriedo, Technomic Publishing Company, Lancaster, 1994.
- [7] Ultra high molecular weight polyethylene; UHMWPE. chemyq.com
- [8] Handbook of Fiber Science and Technology Volume3: High Technology Fibers, Lewin (1996-07-09)
- [9] The Effect of Processing Conditions on the Performance of UHMWPE-Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites, Fejdys, M.; Landwijt, M.; Kucharska-Jastrzabek, A.; Struszczyk, M., 2016
- [10] The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates, Karthikeyan, K.; Russell, B.; Fleck, N.; Wadley, H.; and Deshpande, V., 2012
- [11] New insight into the influence of molecular dynamics of matrix elastomers on ballistic impact deformation in UHMWPE composites, Hsieh, A.; Chantawansri, T.; Hu, W.; Cain, J.; and Yu, J., 2016
- [12] Shapeable Matrix-Free Spectra Fiber-Reinforced Polymeric Composites via High-Temperature High-Pressure Sintering: Process-Structure-Property Relationship, Xu, T. and Farris, R., 2005
- [13] Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition, Donald E. Carlucci, Sidney S. Jacobson, 2008
- [14] "Perforation of FRP laminates and sandwich panels subjected to missile impact", SR Reid, HM Wen
- [15] Dimensionless Parameters for Optimization of Textiles-Based Body Armor Systems, Cunniff, P., 1999
- [16] "Penetration Failure Mechanisms of Armor-Grade Fiber Composites under Impact", Lee, B.; Walsh, T.; Won, S.; Patts, H.; Song, J., and Mayer, A., 2000
- [17] "Optimizing the Impact Resistance of Matrix-Free Spectra Fiber-reinforced Composites", Xu, Tao and Farris, Richard, 2005)
- [18] "Polyethylene ballistic laminates: Failure mechanics and interface effect", Karthikeyan, K. and Russell, BP, 2014

- [19] “Mechanisms of Dynamic Deformation and Failure in Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber-Polymer Matrix Composites”, O’Masta, Mark, 2014
- [20] “High-Pressure Sintering of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Film Laminates: Processing and Interlaminar Strength”, O’Brien, D.; Parquette, B.; Bogetti, T.; Yiournas, A.; and Wagner, J.
- [21] Influence of Matrix Type and Processing Conditions on the Morphology of the Interface and Interfacial Adhesion of PE/PE Composites. Proceedings of the Asian-Astralasian Conference on Composite Materials, Masoomi, M.; Ghaffarian, S.; and Mohammadi, N., 2004
- [22] “Armour: Materials, Theory, and Design”, Hazell, Paul J., 2016
- [23] “Pressure-induced crystallization of polymers with dispersion of nanoparticles: Structure, interfacial interaction, and micromechanism of fracture”, Ramuni, V.; Yuan, Q.; Chen, J.; and Misra, R.D.K., 2010
- [24] “Manufacturing of Single Polymer Materials Based on Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Fibers by Hot Compaction”, Zherebtsov, D., Chukov, D., Torokhov, V., Statnik, E., 2020
- [25] “Effects of Variation in Autoclave Pressure, Cure Temperature, and Vacuum-Application Time on the Porosity and Mechanical Properties of a Carbon/Epoxy Composite”, Koushyar, Hoda, 2007
- [26] “A Quasi-Static Indentation Methodology for Screening Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composites for Ballistic Performance”, Cain, J.; Vargas-Gonzalez, L.; and Gaviola, M., 2018
- [27] Round-robin validation exercise for the thick adherend shear test in compression, RD Mera, GD Sims, 2003
- [28] Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials. Composites, Xie M, Adams D., 1995
- [29] Elasticity analysis of orthotropic beams under concentrated loads, Whitney JM., 1985
- [30] An elasticity analysis for orthotropic beams subjected to concentrated loads, Sullivan JL, Van Oene H., 1986
- [31] Inclined Double Notch Shear Test for Improved Interlaminar Shear Strength Measurements, J. Neumeister, Ac Palsson, 1998
- [32] Tanaka K, Yamabe T, Fukui K. The Science and Technology of Carbon Nanotubes. Elsevier; 1999. p. 750. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042696-9.X5000-9>
- [33] Guldi DM, Martín N. Carbon Nanotubes and Related Structures: Synthesis, Characterization, Functionalization, and Applications. Wiley-VCH; 2010. p. 539. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527629930>
- [34] de Melo CCN, Beatrice CAG, Pessan LA, de Oliveira AD, Machado FM. Analysis of nonisothermal crystallization kinetics of graphene oxide-reinforced polyamide 6 nanocomposites. *Thermochimica Acta*. 2018;667:111-121

- [35] Pasbakhsh P, Churchman GJ, Keeling JL. Characterisation of properties of various halloysites relevant to their use as nanotubes and microfibre fillers. *Applied Clay Science*. 2013;74:47-57
- [36] Dufresne A. Cellulose nanomaterial reinforced polymer nanocomposites. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2017;29:1-8
- [37] Sherman JD. Synthetic zeolites and other microporous oxide molecular sieves. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1999 Mar 30;96(7):3471-8. doi: 10.1073/pnas.96.7.3471. PMID: 10097059; PMCID: PMC34289.
- [38] Król, M. Natural vs. Synthetic Zeolites. *Crystals* 2020, 10, 622. <https://doi.org/10.3390/cryst10070622>.
- [39] Breuer, O. and U. Sundararaj, Big returns from small fibers: A review of polymer/carbon nanotube composites. *Polymer Composites*, 2004.
- [40] Schneemann A, White JL, Kang S, Jeong S, Wan LF, Cho ES, Heo TW, Prendergast D, Urban JJ, Wood BC, Allendorf MD, Stavila V. Nanostructured Metal Hydrides for Hydrogen Storage. *Chem Rev*. 2018 Nov 28;118(22):10775-10839. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00313. Epub 2018 Oct 2. PMID: 30277071.
- [41] Dantas de Oliveira A and Augusto Gonçalves Beatrice C (2019) Polymer Nanocomposites with Different Types of Nanofiller. *Nanocomposites - Recent Evolutions*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.81329.
- [42] Callister W.D. Jr., *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών*, 5η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- [43] Ahmad Sobri, Sharizal & Heinemann, Robert & Whitehead, David. (2020). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites: Machining Aspects and Opportunities for Manufacturing Industries. 10.1007/978-3-030-45489-0_2.
- [44] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/12/Multi-layered_composite_material#.ZADFb8zr1ZQ.link
- [45] <https://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html>
- [46] Medeiros, Roberto & Nóbrega, Selma & Aquino, E.. (2019). Failure Theories on Carbon/Kevlar Hybrid Fabric Based Composite Laminate: Notch and Anisotropy Effects. *Materials Research*. 22. 10.1590/1980-5373-mr-2018-0099.
- [47] Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., (2007) *Σύνθετα υλικά*, Αθήνα:Κλειδάριθμος
- [48] ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΔΙΑ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΦΑΣΕΩΣ, Μπέη-Κορωναίου Αθανασίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [49] “Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, εφαρμοζόμενα στην αεροναυπηγική με έμφαση στην συντήρησή τους”, Σύκας Βασίλειος, 2019, <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.9383>

- [50] Basutkar, Ameya & Kolekar, Aniket. (2020). A Review on Properties and Applications of Ceramic Matrix Composites. 10.13140/RG.2.2.20304.53766.
- [51] J. Ramirez-Rico, F. Stolzenburg, J.D. Almer, J.L. Routbort, D. Singh, K.T. Faber, In situ imaging and strain determination during fracture in a SiC/SiC ceramic matrix composite, *Scripta Materialia*, Volume 69, Issue 7, 2013.
- [52] Qu, Xuanhui & Zhang, Lin & WU, Mao & Ren, Shubin. (2011). Review of metal matrix composites with high thermal conductivity for thermal management applications. *Progress in Natural Science: Materials International*. 21. 189–197. 10.1016/S1002-0071(12)60029-X.
- [53] Pandiyarajan, R. & Starvin, Michael & Ananth M, Belsam & .S, Marimuthu & S, Sabarish & Ponsuriyaprakash, S. (2022). Experimental investigation of morphological and mechanical properties of SiC-neem-coir fiber reinforced hybrid composite. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 45. 1-11. 10.1080/02533839.2022.2078414.
- [54] Pentimalli, Marzia, Enrico Imperi, Mariangela Bellusci, Carlo Alvani, Andrea Santini, and Franco Padella. 2012. "Silica-Metal Composite for Hydrogen Storage Applications" *Crystals* 2, no. 2: 690-703. <https://doi.org/10.3390/cryst2020690>
- [55] Huang, Jiaying (Wilmette, IL, US), Chiou, Kevin (Chicago, IL, US), 2020, ADDITIVE-FREE CARBON PARTICLE DISPERSIONS, PASTES, GELS AND DOUGHS, United States Northwestern University (Evanston, IL, US), 20200277195, <https://www.freepatentsonline.com/y2020/0277195.html>
- [56] <https://www.defence-industries.com/products/scanfiber-composites/scanguard-spall-liner>
- [57] Luz, Fernanda & Da Costa Garcia Filho, Fabio & Oliveira, Michelle & Nascimento, Lucio & Monteiro, Sergio. (2020). Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison. *Polymers*. 12. 1920. 10.3390/polym12091920.
- [58] M. Edwards "Land Based Military Applications" section 6.37, *Comprehensive Composite Materials*, published by Elsevier.
- [59] <https://www.fortressarmour.com/difference-soft-hard-body-armour/#:~:text=Simply%20put%2C%20soft%20body%20armour,like%20those%20from%20a%20rifle.&text=Hard%20Body%20Armour%20Plates%20composed,foundation%20of%20hard%20body%20armour.>
- [60] Qiao, Pizhong & Yang, Mijia & Bobaru, Florin. (2008). Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials: Review. *Journal of Aerospace Engineering - J AEROSP ENG*. 21. 10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(235).
- [61] <https://docplayer.gr/6615304-Meleti-tis-metavolis-tis-aposvesis-polymeron-kai-syntheton-ylikon-me-tin-prosthiki-nanosomatidion.html>
- [62] https://gigazine.net/gsc_news/en/20220726-bullet-glass/
- [63] Roth, Melissa J. 2021. Effects of Autoclaving On the Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composites. : Worcester Polytechnic Institute.

- [64] https://www.qdeverttech.com/page93?product_id=211
- [65] Nguyen-Dinh, Ngoc & Zitoune, Rédouane & Bouvet, Christophe & Le Roux, Sabine. (2018). Surface integrity while trimming of composite structures: X-ray tomography analysis. *Composite Structures*. 210. 735-746. 10.1016/j.compstruct.2018.12.006.
- [66] Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06
- [67] <https://www.ar500armor.com/levels-of-body-armor>
- [68] https://s.alicdn.com/@sc04/kf/Ha7716d65b4ba4380b75da898e1b87a13x.png_300x300.png
- [69] Nikhil D. Andraskar, Gaurav Tiwari, Manmohan Dass Goel, Impact response of ceramic structures - A review, *Ceramics International*, Volume 48, Issue 19, Part A, 2022, Pages 27262-27279, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.313>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884222023471>)
- [70] <https://midwestarmor.com/how-to-choose-the-right-body-armor/>
- [71] Uddin, Mohammed & H, Mahfuz & Zainuddin, Shaik & Jeelani, Shaik. (2009). Improving Ballistic Performance of Polyurethane Foam by Nanoparticle Reinforcement. *Journal of Nanotechnology*. 2009. 10.1155/2009/794740.
- [72] A.G. Hanssen, M. Langseth, O.S. Hopperstad, Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 24, Issue 5, 2000, Pages 475-507, ISSN 0734-743X, [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00170-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00170-0).
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X99001700>)
- [73] <https://www.zotefoams.com/product/zotek/zotek-n-high-performance-cross-linked-nylon-foam/>
- [74] Park, Jong-Lyoul & Chi, Yong-Seung & Hahn, M. & Kang, Taewook. (2012). Kinetic Dissipation in Ballistic Tests of Soft Body Armors. *Experimental Mechanics*. 52. 10.1007/s11340-011-9583-z.
- [75] Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.04
- [76] Chikkali, S., Ambade, A.V., de Bruin, B., & Shaver, M. (Eds.). (2017). *Metal-Catalyzed Polymerization: Fundamentals to Applications* (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315153919>.
- [77] Saleema, N. & Li, C. & Nikumb, Suwas. (2020). Adhesive bonding of ceramic-based armor system.
- [78] M. Grujicic, B. Pandurangan, B. d'Entremont, The role of adhesive in the ballistic/structural performance of ceramic/polymer–matrix composite hybrid armor, *Materials & Design*, Volume 41, 2012, Pages 380-393, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.023>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691200324X>)
- [79] <https://www.hoplitearmor.com/collections/sapi-plates-level-iii>

- [80] Reyes, G. & Cantwell, W.J.. (2004). The High Velocity Impact Response of Composite and FML-reinforced Sandwich Structures, Composites. Composites Science and Technology. 64. 35-54. 10.1016/S0266-3538(03)00197-0.
- [81] Kartikeya Kartikeya, Hemant Chouhan, Aisha Ahmed, Naresh Bhatnagar, Determination of tensile strength of UHMWPE fiber-reinforced polymer composites, Polymer Testing, Volume 82, 2020, 106293, ISSN 0142-9418, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106293>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941819317568>)
- [82] Eugene Medvedovski, Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1, Ceramics International, Volume 36, Issue 7, 2010, Pages 2103-2115, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884210002087>)
- [83] Eugene Medvedovski, Alumina–mullite ceramics for structural applications, Ceramics International, Volume 32, Issue 4, 2006, Pages 369-375, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.04.001>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884205000945>)
- [84] Eugene Medvedovski, Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2, Ceramics International, Volume 36, Issue 7, 2010, Pages 2117-2127, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.022>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884210002099>)
- [85] Shih, Cheng-Hung, Jhu-Lin You, Yung-Lung Lee, An-Yu Cheng, Chang-Pin Chang, Yih-Ming Liu, and Ming-Der Ger. 2022. "Design and Ballistic Performance of Hybrid Plates Manufactured from Aramid Composites for Developing Multilayered Armor Systems" Polymers 14, no. 22: 5026. <https://doi.org/10.3390/polym14225026>.
- [86] Cao, Mingjin & Chen, Li & Xu, Rongzheng & Fang, Qin. (2021). Effect of the temperature on ballistic performance of UHMWPE laminate with limited thickness. Composite Structures. 277. 114638. 10.1016/j.compstruct.2021.114638.
- [87] Mo, Genlin & Ma, Qianwen & Jin, Yongxi & Yan, Wenmin & Li, Zhongxin & Wu, Zhilin. (2020). Delamination process in cross-ply UHMWPE laminates under ballistic penetration. Defence Technology. 17. 10.1016/j.dt.2020.05.001.
- [88] Heisserer, Ulrich & Werff, Harm & Hendrix, Joke. (2013). Ballistic depth of penetration studies in Dyneema® composites. Proceedings - 27th International Symposium on Ballistics, BALLISTICS 2013. 2. 1936-1943.
- [89] ASTM D3039/D3039M-00 (2000) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [90] <https://www.epsilontech.com/products/averaging-and-bi-axial-extensometer-model-3560/>
- [91] Helliker, A. Lightweight Ballistic Composites 2nd Ed. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 2016.

- [92] ASTM D1876, 2008 Edition, 2023 - Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)
- [93] Zhang, X.; Wang, Y.; Lu, C., Cheng, S. "Interfacial adhesion study on UHMWPE fiberreinforced composites." *Polymer Bull.* (2011) 67:527-540.
- [94] ASTM D2344/D2344M-16 (2016) Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.
- [95] <https://imechanica.org/node/22196>
- [96] Sun, Ruizhou & Feng, Yuezhan & Wang, Bo & Liu, Chuntai & Shen, Changyu. (2019). Enhanced interfacial and mechanical property of biodegradable poly(butylene succinate) film via introducing ultrahigh molecular weight polyethylene shish-kebab fibers. *Materials Research Express.* 6. 10.1088/2053-1591/ab5ec9.
- [97] <https://core.ac.uk/download/pdf/14704533.pdf>
- [98] https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5827373/mod_resource/content/0/Aula07_materiais_compositos.pdf
- [99] I. Georgiou, A. Ivankovic, A.J. Kinloch, V. Tropsa, Rate Dependent Fracture Behaviour of Adhesively Bonded Joints, Editor(s): B.R.K. Blackman, A. Pavan, J.G. Williams, European Structural Integrity Society, Elsevier, Volume 32, 2003, Pages 317-328, ISSN 1566-1369, ISBN 9780080441955, [https://doi.org/10.1016/S1566-1369\(03\)80105-X](https://doi.org/10.1016/S1566-1369(03)80105-X).
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156613690380105X>)
- [100] Obande, Winifred & Mamalis, Dimitrios & Ray, Dipa & Yang, Liu & O'Bradaigh, Conchur. (2019). Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites. *Materials & Design.* 175. 107828. 10.1016/j.matdes.2019.107828.
- [101] D. Naik, S. Sankaran, B. Mobasher, S.D. Rajan, J.M. Pereira, Development of reliable modeling methodologies for fan blade out containment analysis – Part I: Experimental studies, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 36, Issue 1, 2009, Pages 1-11, ISSN 0734-743X, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.03.007>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X08002157>)
- [102] <https://www.Instron®.com/en/products/testing-accessories/grips/advanced-hydraulic-wedge-action-grips>
- [103] Kartikeya Kartikeya, Hemant Chouhan, Aisha Ahmed, Naresh Bhatnagar, Determination of tensile strength of UHMWPE fiber-reinforced polymer composites, *Polymer Testing*, Volume 82, 2020, 106293, ISSN 0142-9418, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106293>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941819317568>)
- [104] B.P. Russell, K. Karthikeyan, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, The high strain rate response of Ultra High Molecular-weight Polyethylene: From fibre to laminate, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 60, 2013, Pages 1-9, ISSN 0734-743X, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.03.010>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X13000742>)

- [105] Smith, P., Lemstra, P.J. Ultra-high-strength polyethylene filaments by solution spinning/drawing. *J Mater Sci* 15, 505–514 (1980).
<https://doi.org/10.1007/BF02396802>
- [106] B.P. Russell, K. Karthikeyan, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, The high strain rate response of Ultra High Molecular-weight Polyethylene: from fibre to laminate, *Int. J. Impact Eng.* 60 (2013) 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.03.010>.