Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο - ΕΛΜΕΠΑ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τίτλος Πτυχιακής Εργασίας

Τεχνολογίες Θωράκισης Σώματος σε Προβλήματα Κρούσης και Έκρηξης

Ονοματεπώνυμο φοιτητή

Εμμανουήλ Πολυζωάκης
ΑΜ: ΤΜ6526

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ
Ντιντάκης Ιωάννης

Ηράκλειο 2024

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων 2
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων 5
Πρόλογος - Ευχαριστίες 6
Περίληψη 7
Abstract 8
Εισαγωγή 9
Κεφάλαιο 1ο Ιστορική Αναδρομή 10
1.1 Η ιστορία και η εξέλιξη της προσωπικής πανοπλίας 11
1.1.1 Ο σχεδιασμός της προστασίας σώματος στα αρχαία χρόνια 16
1.2 Η σύγχρονη πανοπλία σώματος 19
1.2.1 Η ανάγκη για την προστασία του σώματος 20
1.2.2 Σύγχρονη αλεξίσφαιρη θωράκιση 21
1.2.3 Κατάταξη της σύγχρονης θωράκισης σώματος 23
1.2.3.1 Θωράκιση βαλλιστικής προστασίας 24
1.2.3.2 Θωράκιση σώματος από βολές εκρηκτικών 27
1.2.3.3 Μελλοντική εξέλιξη της προστασίας σώματος σε εκρηκτικά και βαλλιστικά βλήματα 28
1.2.3.4 Προστασία από μαχαίρωμα και ακίδες 29
Κεφάλαιο 2ο Υλικά στην κατασκευή προσωπικής θωράκισης 31
2.1 Υφαντουργικές ίνες 33
2.1.1 Κατηγορίες ινών 35
2.2 Ιδιότητες ινών 37
2.3 Μηχανικές Ιδιότητες 40
2.4 Ίνες Υψηλής Επίδοσης (High-Performance Fibers - HPF) 43
2.5 Έργο θραύσης ινών 49
2.6 Ιδιότητες ερπυσμού ινών 49
2.7 Τριβολογικές ιδιότητες ινών 50
2.8 Θερμικές ιδιότητες ινών 51
2.9 Χημική αντίσταση ινών 55
Κεφάλαιο 3ο Σχεδίαση Αλεξίσφαιρης Θωράκισης 56
3.1 Κριτήρια για τον σχεδιασμό μοντέρνας θωράκισης σώματος 57
3.2 Μαλακή θωράκιση σώματος 59
3.3 Ταχύτητα σφαίρας 62
3.4 Αρχιτεκτονική υφάσματος 63

3.5 Μηχανισμός αστοχίας της θωράκισης κάτω από την κρούση σφαίρας 65
3.5.1 Μηχανισμός μετάδοσης παραμόρφωσης από την σύγκρουση της σφαίρας 67
3.5.2 Επίδραση της δομής πλέξης 71
3.6 Αναλυτικά μοντέλα διείσδυσης σφαιρών μέσω του υφάσματος 74
3.6.1 Θωράκιση μονής στρώσης 74
3.6.2 Θωράκιση πολλαπλών στρώσεων 76
3.7 Επίδραση παραμέτρων στην βαλλιστική ταχύτητα 78
3.7.1 Επίδραση των ιδιοτήτων των ινών στη βαλλιστική ταχύτητα 78
3.7.2 Επίδραση πάχους του υφάσματος 80
3.7.3 Επίδραση της ταχύτητας κρούσης της σφαίρας στην βαλλιστική ταχύτητα 81
3.7.4 Επίδραση της γεωμετρίας της σφαίρας 82
3.8 Χρήση σκληρών πλακών από ενισχυμένο πολυμερές 83
Κεφάλαιο 4ο Θωράκιση σώματος απέναντι σε εκρήξεις, θραύσματα και αιχμηρά αντικείμενα 86
4.1 Συμπεριφορά υφάσματος κάτω από δύναμη πίεσης 87
4.2 Η επίδραση της πίεσης από έκρηξη 89
Κεφάλαιο 5ο Δοκιμές συστημάτων θωράκισης και προστασίας σώματος 94
Κεφάλαιο 6ο Χρήση Αυξητικών Υλικών σε Πλάκες - Προβλήματα Κρούσης και Έκρηξης 110
6.1 Αυξητικά υλικά 113
6.1.1 Αυξητικές δομές 113
6.1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά 118
6.1.3 Προστατευτικά χαρακτηριστικά 120
6.1.4 Απορρόφηση Ενέργειας 122
6.2 Επισκόπηση των εκρηκτικών και των βαλλιστικών φορτίων 123
6.3 Υλικό, κατασκευή και μέθοδος έρευνας για διερεύνηση εκρηκτικής και βαλλιστικής φόρτισης σε αυξητικά 125
6.3.1 Υλικό, μέθοδος και δομή 125
6.3.2 Κατασκευή αυξητικών δομών 127
6.3.2.1 Προσθετική κατασκευή 127
6.3.2.2 Αφαιρετική κατασκευή 129
6.3.2.3 Μέθοδοι δίπλωσης και κάμψης φύλλων 130
6.3.2.4 Διακριτή συναρμολόγηση 134
6.3.2.5 Άλλες μέθοδοι 136
6.3.2.6 Τρέχοντα θέματα και μελλοντικές κατευθύνσεις για μεγάλης κλίμακας κατασκευή αυξητικής κατασκευής 137
6.4 Μέθοδοι δοκιμής και προσομοίωσης 138
6.4.1 Δοκιμές έκρηξης 138

6.4.2 Βαλλιστικές δοκιμές κρούσης 141
6.5 Μέθοδοι αριθμητικής μοντελοποίησης 144
6.6 Απόδοση αυξητικών κατασκευών υπό έκρηξη και βαλλιστική φόρτιση 146
6.6.1 Μηχανισμός παραμόρφωσης 146
6.6.2 Ολική απόδοση προστασίας 149
6.6.2.1 Προστασία από έκρηξη 149
6.6.2.2 Βαλλιστική προστασία 152
6.6.3 Επίδραση κρίσιμων παραγόντων σχεδιασμού στην απόδοση προστασίας 156
6.6.3.1 Υλικό βάσης 156
6.6.3.2 Αποτελεσματικός αρνητικός λόγος Poisson 157
6.6.3.3 Πάχος τοιχώματος και πλάκας 158
6.6.3.4 Σχετική πυκνότητα πυρήνα 159
6.6.3.5 Αριθμός επιπέδων αυξητικών κελιών 159
6.6.3.6 Διαβάθμιση κυτταρικού τοιχώματος πολλαπλών στρωμάτων 160
6.6.3.7 Συνοριακές συνθήκες 160
6.6.3.8 Καμπυλότητα πάνελ 161
6.6.3.9 Υλικό πλήρωσης 161
6.6.3.10 Ωθηση έκρηξης και ρυθμός καταπόνησης 162
6.6.3.11 Γεωμετρία βλήματος 164
Κεφάλαιο 7ο Συμπεράσματα 165
Βιβλιογραφία 168
Άλλες πηγές 214

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

ABL	Armor Ballistic Limit
AI	Angle Incidence
AP	Armor Piercing
ASPF	Antistatic Segmented Protection Fabric
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFS	Backface Signature
BL	Ballistic Limit
BR	Bending Radius
BSA	Blade Sharpness
CFF	Crossing–over Firmness Factor
CPC	Chemical Protective Clothing
FMJ	Full Metal Jacket
FPF	Flexible Protection Fabric
FYF	Floating Yarn Factor
HITS	Hornady Index of Terminal Standards
HM	High Modulus
HPF	High-Perfomance Fibers
HS	High Strength
HT	High Temperature
MMF	Man Made Fiber
NIJ	National institute of Justice
PA	Protective Armor
PAN	Polyacrylonitrile
PBI	Polybenzimidazole
PBO	Polybenzoxazoles
PC	Polycarbonate
PE	Polyethylene
PF	Protective Fabric
PMMA	Polymethyl Methacrylate
PPTA	Poly-Paraphenylene Terephthalamide
RN	Round nosed
SJHP	Semi-jacketed hollow point
UHMWPE	Ultra-High Molecular Weight Polyethylene
UV	Ultraviolet

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου Ηρακλείου Κρήτης, κατά το έτος 2023-2024

Σε αυτό το σημείο επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μου, Καθηγητή κ. Ντιντάκη Ιωάννη ,που μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία με τίτλο, «Τεχνολογίες Θωράκισης Σώματος σε Προβλήματα Κρούσης και Έκρηξης», για την καθοδήγηση ειδικά στις αρχές αλλά και καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για την κατανόηση που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος της συνεργασίας μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την οικονομική – ψυχολογική στήριξη, καθώς και την αγάπη που μου έχουν προσφέρει σε όλα αυτά τα χρόνια που ζω και σπουδάζω στο Ηράκλειο, ομοίως και στους παιδικούς – φοιτητικούς φίλους μου για όλα όσα έχουμε περάσει μαζί.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την εξέλιξη της προσωπικής πανοπλίας από την αρχαιότητα έως τη σύγχρονη εποχή, εστιάζοντας στη θωράκιση του ανθρώπινου σώματος. Το πρώτο κεφάλαιο προσφέρει μια ιστορική αναδρομή σχετικά με την ανάπτυξη της πανοπλίας, ενώ εξετάζει τη σύγχρονη θωράκιση σώματος και τις διάφορες κατηγορίες προστασίας, συμπεριλαμβανομένης της βαλλιστικής, εκρηκτικής και αντιμαχαίρων προστασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή προσωπικής θωράκισης, αναλύοντας τις υφαντουργικές ίνες, τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες τους, καθώς και τις δοκιμές που υφίστανται για την αξιολόγησή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εξετάζεται ο σχεδιασμός της αλεξίσφαιρης θωράκισης, περιλαμβάνοντας κριτήρια σχεδιασμού, μηχανισμούς αστοχίας και αναλυτικά μοντέλα διείσδυσης σφαιρών.

Το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη θωράκιση σώματος απέναντι σε εκρήξεις, θραύσματα και αιχμηρά αντικείμενα, ενώ το πέμπτο αναλύει τις δοκιμές συστημάτων θωράκισης και προστασίας σώματος.

Στο έκτο κεφάλαιο, εξετάζεται η χρήση αυξητικών υλικών σε πλάκες, καλύπτοντας τα γενικά χαρακτηριστικά τους, τις δοκιμές και μοντελοποιήσεις για την αξιολόγηση της απόδοσής τους κάτω από έκρηξη και βαλλιστική φόρτιση.

Τέλος, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στα συμπεράσματα, παρέχοντας έναν ενιαίο καθολικό απολογισμό για την έρευνα και τις εξετάσεις που περιλαμβάνονται στην εργασία, καθώς και μελλοντικές προοπτικές στον τομέα της προσωπικής πανοπλίας και της θωράκισης σώματος.

Abstract

This work explores the evolution of personal armor from ancient times to the modern era, with a focus on body armor. The first chapter provides a historical overview of armor development, examining modern body armor categories such as ballistic, explosive, and anti-stab protection.

The second chapter delves into the materials used in personal armor construction, analyzing textile fibers, their mechanical and chemical properties, and the testing methods employed for evaluation.

In the third chapter, the design of ballistic armor is discussed, covering design criteria, soft body armor, projectile velocity, fabric architecture, and mechanisms of failure under projectile impact. Detailed penetration models are also presented.

The fourth chapter shifts its focus to body armor against explosions, fragments, and sharp objects, exploring fabric behavior under pressure and the impact of explosion pressure.

The fifth chapter analyzes tests for armor systems and body protection, providing insights into their effectiveness and reliability.

In the sixth chapter, the use of augmentative materials in plates is examined, addressing their general characteristics, protective features, and their performance evaluation under explosive and ballistic loads.

Finally, the last chapter concludes the work, offering a comprehensive summary of the research and examinations included, along with future prospects in the field of personal armor and body protection.

Εισαγωγή

Η προστασία είναι απαραίτητη για την ασφάλεια των ατόμων σε ορισμένα επαγγέλματα όπου ενδέχεται να εκτεθούν σε χημικούς κινδύνους, αιχμηρά εργαλεία, βελόνες, μαχαίρια, εκρηκτικά και σφαίρες. Η θωράκιση ατομικής προστασίας μπορεί να ταξινομηθεί ως βιομηχανική, γεωργική, στρατιωτική, ιατρική, αθλητική ή διαστημική προστατευτική θωράκιση, ανάλογα με την ειδική εφαρμογή της. Ο βασικός σκοπός της θωράκισης είναι να προστατεύει το σώμα από τους εξωτερικούς κινδύνους και, ταυτόχρονα, να διατηρεί την ασφάλεια και την άνεση.

Ο σχεδιασμός της θωράκισης σώματος είναι μια πολύ παλιά τέχνη και επιστήμη. Χρησιμοποιεί τα καλύτερα υλικά και τεχνολογία για να παρέχει προστασία και άνεση στον χρήστη. Θα πρέπει να προστατεύει από ένα ευρύ φάσμα πυρομαχικών διαφορετικών διαμετρημάτων, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούνται από πιστόλια, τουφέκια, αυτόματα όπλα, καθώς και από μικρά θραύσματα από εκρηκτικά. Ο σχεδιασμός του αλεξίσφαιρου γιλέκου του επιτρέπει να απορροφά την ενέργεια της σφαίρας μέσω της αντίστασης διείσδυσής του και μειώνει τη δύναμη κρούσης που ασκείται στο σώμα, προκαλώντας τραύμα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα αλεξίσφαιρα γιλέκα ξεκίνησαν από δέρμα, μπρούτζο και σίδερο και εξελίχθηκαν σε μια εύκαμπτη πανοπλία με τη χρήση πολυστρωματικών υφασμάτων από διαφορετικές ίνες. Παρά την πρόοδο των εφευρέσεων των νέων τύπων ινών με πολύ υψηλή αντοχή και σκληρότητα, υπάρχει συνεχής ανάγκη για βελτίωση για τη διαχείριση της τάσης αύξησης της ικανότητας των όπλων παρέχοντας υψηλή ενέργεια στομίου σφαίρας. Επομένως, το αλεξίσφαιρο γιλέκο θα πρέπει να έχει χαμηλή αναλογία βάρους αλεξίσφαιρου γιλέκου προς δύναμη αντίστασης στη διείσδυση.

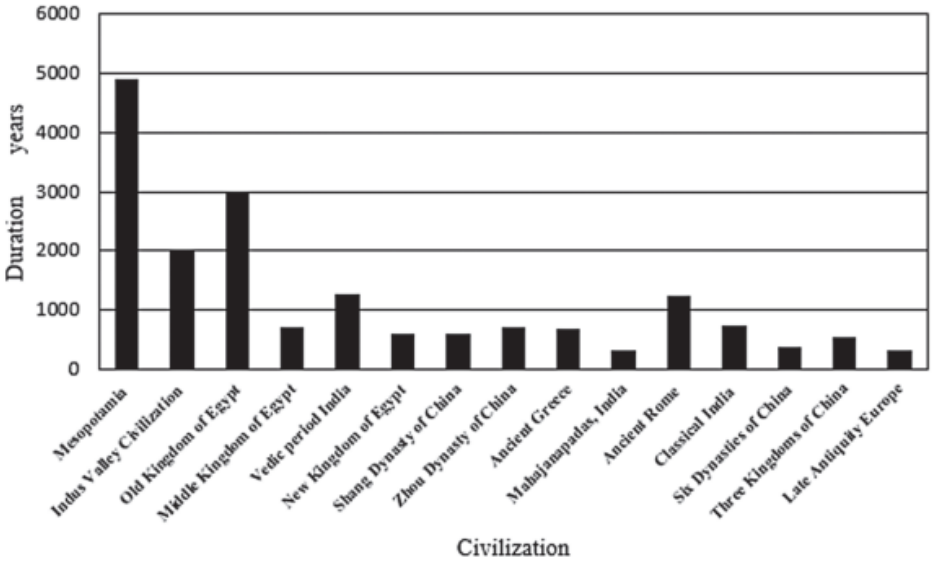
Ο σχεδιασμός ανθεκτικής στα μαχαίρια πανοπλίας διαφέρει από αυτόν των αλεξίσφαιρων γιλέκων. Είναι σχεδιασμένα ενάντια στη διείσδυση από αιχμηρά αντικείμενα, όπως μαχαίρια, βελόνες και άλλα αιχμηρά εργαλεία. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την ανθεκτική στις μαχαιριές εύκαμπτη θωράκιση είναι κατασκευασμένο από πολυστρωματικά υφάσματα από διαφορετικές ίνες.

Κεφάλαιο 1ο Ιστορική Αναδρομή

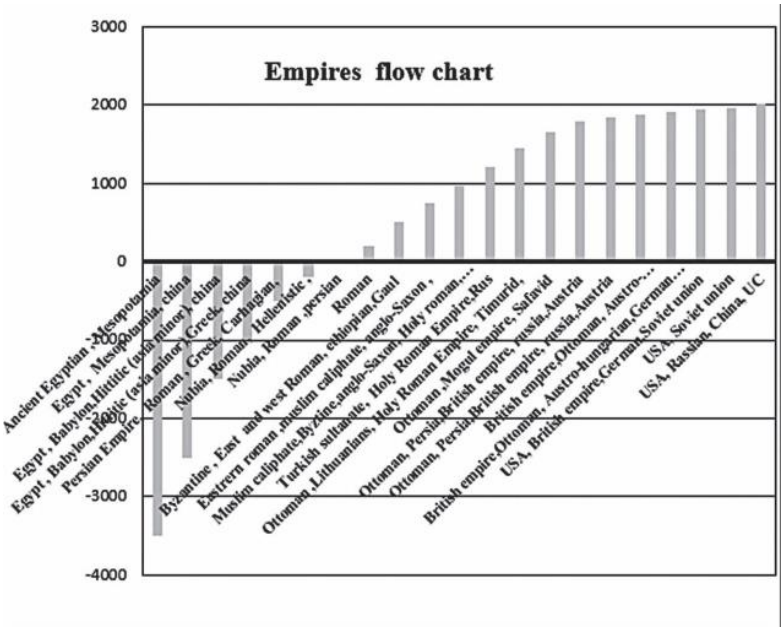
Στα τελευταία 7000 χρόνια, η ανθρωπότητα πέρασε από διάφορες περιόδους που μπορούν να ταξινομηθούν ως Κλασική Εποχή (3600 π.Χ.–500 μ.Χ.), Μετακλασική Εποχή (500–1500), Πρώιμη Σύγχρονη Περίοδος (1500–1750), Μέση Σύγχρονη Περίοδος (1750–1914), και Μοντέρνα εποχή (1914–2018)[1]. Μπορεί επίσης να καταγραφεί σύμφωνα με τα κύρια γεγονότα. Ο ιστορικός ασχολείται γενικά με τα μεγάλα γεγονότα που έχουν λάβει χώρα αλλά και τη φθορά των αυτοκρατοριών στα διάφορα μέρη του γνωστού κόσμου. Η ιστορία, ως δράση των ανθρώπων, είναι πάντα το αποτέλεσμα μεγάλων γεγονότων, όπως πόλεμοι, φυσικές καταστροφές, εφευρέσεις, ανακαλύψεις ή κοινωνικές και πολιτικές αλλαγές

Η έναρξη του πολιτισμού σε μια συγκεκριμένη περιοχή οφειλόταν στη διαθεσιμότητα των πόρων που επιτρέπουν τη συγκέντρωση των κοινοτήτων και την ενοποίησή τους για να σχηματίσουν ένα έθνος με αρκετό αριθμό κατοίκων, που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τους πόρους και επίσης να αναπτύξει έναν στρατό για να τους υπερασπιστεί, θέτοντάς κανόνες και κανονισμούς για να οργανώνουν τις καθημερινές τους δραστηριότητες και, τέλος, αξιοποιώντας την ικανότητα της επιστήμης και της τεχνολογίας να αναπτύσσουν και νέες μεθόδους και εργαλεία για την αύξηση των ικανοτήτων τους.

Η εικόνα 1.1 απεικονίζει την περίοδο έναρξης και αποσύνθεσης κάθε πολιτισμού. Συνήθως, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες είτε γεωγραφικούς, πολέμους, φυσικές καταστροφές, είτε από τα εσωτερικά προβλήματα και τη διαίρεση των υπό έλεγχο κρατών και τελικά το πιο σημαντικό, την άνοδο ενός άλλου πολιτισμού που αρχίζει να ανταγωνίζεται και να προσπαθεί να κατακτήσει τον υφιστάμενο. Οι πολιτισμοί στη Βόρεια Αφρική, τη Μεσόγειο και τη Βόρεια Ασία άρχισαν να αναπτύσσονται, και να ακμάζουν για διάφορους λόγους. Ο πιο σημαντικός ήταν η σύγκρουση μεταξύ των υπαρχόντων πολιτισμών και των αναπτυσσόμενων νέων πολιτισμών που κατακτήθηκαν μέσω της εφαρμογής νέων όπλων, πολεμικής στρατηγικής ή συμμάχων [2]. Η εικόνα 1.2 απεικονίζει διαφορετικές αυτοκρατορίες και την περίοδο που υπήρξαν. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι σε κάθε περίοδο, πολλές αυτοκρατορίες μπορεί να υπήρχαν ταυτόχρονα και γι' αυτό, πολέμησαν μεταξύ τους, οδηγώντας στην εξαφάνιση της μιας και στην ενίσχυση της άλλης. Αυτό συνέβη στη Μεσοποταμία, την Αίγυπτο, τη Βαβυλωνία, την Περσία, ακόμη και στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία. Γενικά, η ανάπτυξη μιας αυτοκρατορίας αφορά ένα κεντρικό κράτος, που επεκτείνει τον πολιτικό έλεγχο σε εδάφη και ανθρώπους όσο περισσότερο μπορεί με στρατιωτικά, οικονομικά ή πολιτιστικά μέσα [3].



Εικόνα 1.1 Η διάρκεια των διαφορετικών αρχαίων πολιτισμών (6000 π.Χ.–600 μ.Χ.).



Εικόνα 1.2 Οι κύριες αυτοκρατορίες στη Μέση Ανατολή, την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική μέσω διαφορετικών ηλικιών.

Η ιστορία λέει ότι οι άνθρωποι βρίσκονται σε συνεχή μάχη και συνεχώς υπάρχει αυξημένη ζήτηση για πιο προηγμένα όπλα και προστατευτικές πανοπλίες

1.1 Η ιστορία και η εξέλιξη της προσωπικής πανοπλίας

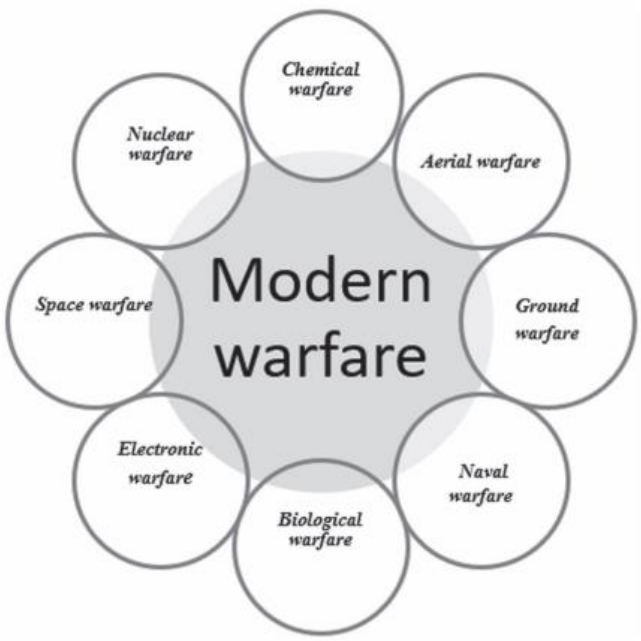
Σε μια πρόσφατη έκθεση του αμυντικού προϋπολογισμού των ΗΠΑ διαπιστώθηκε ότι οι δαπάνες για όπλα και εξοπλισμό αυξήθηκαν το 2017 σε ένα παγκόσμιο σύνολο 1,57 τρισεκατομμυρίων δολαρίων. Οι Ηνωμένες Πολιτείες εξακολουθούν να είναι οι μεγαλύτεροι αγοραστές παγκοσμίως [4,5]. Οι στρατιωτικές δαπάνες ως ποσοστό του ΑΕΠ των διαφόρων χωρών ποικίλλουν μεταξύ 1% και 13,7%

[6].

Η ιστορία και η πρόοδος της θωράκισης ξεκίνησαν με την ανάπτυξη όπλων που ήταν συνεχώς προοδευτικά στην ιστορία της ανθρωπότητας. Κατά τη διάρκεια των αιώνων, διαφορετικοί πολιτισμοί ανέπτυξαν θωράκιση σώματος για χρήση κατά τη διάρκεια της μάχης [7]. Οι Αιγύπτιοι, οι Μεσοποταμιοί, οι Πέρσες και οι Έλληνες χρησιμοποιούσαν πολυστρωματικό ύφασμα ή δέρμα. Πολλές εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια δαπανώνται ετησίως για την ανάπτυξη όπλων. Η πρόοδος στους τύπους όπλων προχωρά παράλληλα με τα επιτεύγματα της επιστήμης και της τεχνολογίας. Το σχήμα και η αποτελεσματικότητα των όπλων ήταν αποτέλεσμα του βαθμού απειλής, ξεκινώντας από τα δόρατα που εφευρέθηκαν το 40.000 π.Χ. και αναπτύχθηκαν στις διάφορες περιόδους των ανθρώπινων πολιτισμών, το 23.000 π.Χ. το μπούμερανγκ, το 20.000 π.Χ., τα τόξα και βέλη, το 5300 π.Χ. τα βλήματα όπλων, το 5000 π.Χ. τα πρώτα μεταλλικά στιλέτα και ξίφη, το 500 π.Χ. ο πολιορκητικός κριός και όπλα, η βαλλίστρα, μεταξύ 800 και 1300 μ.Χ. η πυρίτιδα, τα καιόμενα βέλη και οι πρωτόγονες βόμβες, μεταξύ 1200 και 1600, τα μεγάλα ξίφη, κανόνια χειρός και πυροβόλα όπλα. Μεταξύ του1368 και 1750, η τεχνολογία των πυροβόλων όπλων προχώρησε. Μεταξύ του 1750 και 1800, οι πύραυλοι έγιναν μόνιμος εξοπλισμός και τα υποβρύχια χρησιμοποιήθηκαν σε μάχες. Μεταξύ 1800 και 1850, εισήχθησαν οι οβίδες θραυσμάτων, και το όπλο με πολλαπλές περιστρεφόμενες κάνες. Μεταξύ 1850 και 1900, εφευρέθηκαν τα πρώτα πολυβόλα, το στρατιωτικό υποβρύχιο, το πλήρως αυτόματο πολυβόλο και το πρώτο αλεξίσφαιρο γιλέκο. Μεταξύ 1900 και 1950, εισάχθηκε ο σιγαστήρας όπλων, τα πρώτα τανκς, ο βαλλιστικός πύραυλος, η πρώτη πυρηνική βόμβα, η πρώτη επιτυχημένη δοκιμή πυρηνικής βόμβας, ο πύραυλος μεγάλου βεληνεκούς. Μεταξύ 1950 και 2000, η πρώτη βόμβα υδρογόνου, το πιστόλι ακτίνων, τα όπλα λέιζερ, η τορπίλη υπερσπηλαίωσης, το αντιδορυφορικό λέιζερ. Το 2000 και το 2017, η ασπίδα αντιπυραυλικής άμυνας, το λέιζερ υψηλής ενέργειας, το πλακίδιο κινητικής ενέργειας, η μονάδα που εκτοξεύει NUKE (βλήμα πυρηνικού πυροβολικού), τα όπλα ηλεκτρονικού πολέμου, τα όπλα άμεσης ενέργειας, οι αυτοδιευθυνόμενες σφαίρες, το μη επανδρωμένο υποβρύχιο κυνηγό, τα κανόνια λέιζερ, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, τα πολεμικά ρομπότ, τα όπλα διαστημικού πολέμου και ούτω καθεξής.

Ο ρυθμός προόδου στην εφεύρεση των νέων όπλων τα τελευταία 50 χρόνια είναι τεράστιος και ταχύτερος από ποτέ στην ανθρώπινη ιστορία. Ο σύγχρονος πόλεμος μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικά στοιχεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3, και μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους τους διαθέσιμους πόρους για να καταστρέψει τον εχθρό. Πιο πρόσφατα, αναπτύχθηκε η έννοια του χώρου μάχης, ως ολοκληρωμένης διαχείρισης πληροφοριών όλων των σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν τις πολεμικές επιχειρήσεις από τις ένοπλες δυνάμεις για το στρατιωτικό θέατρο

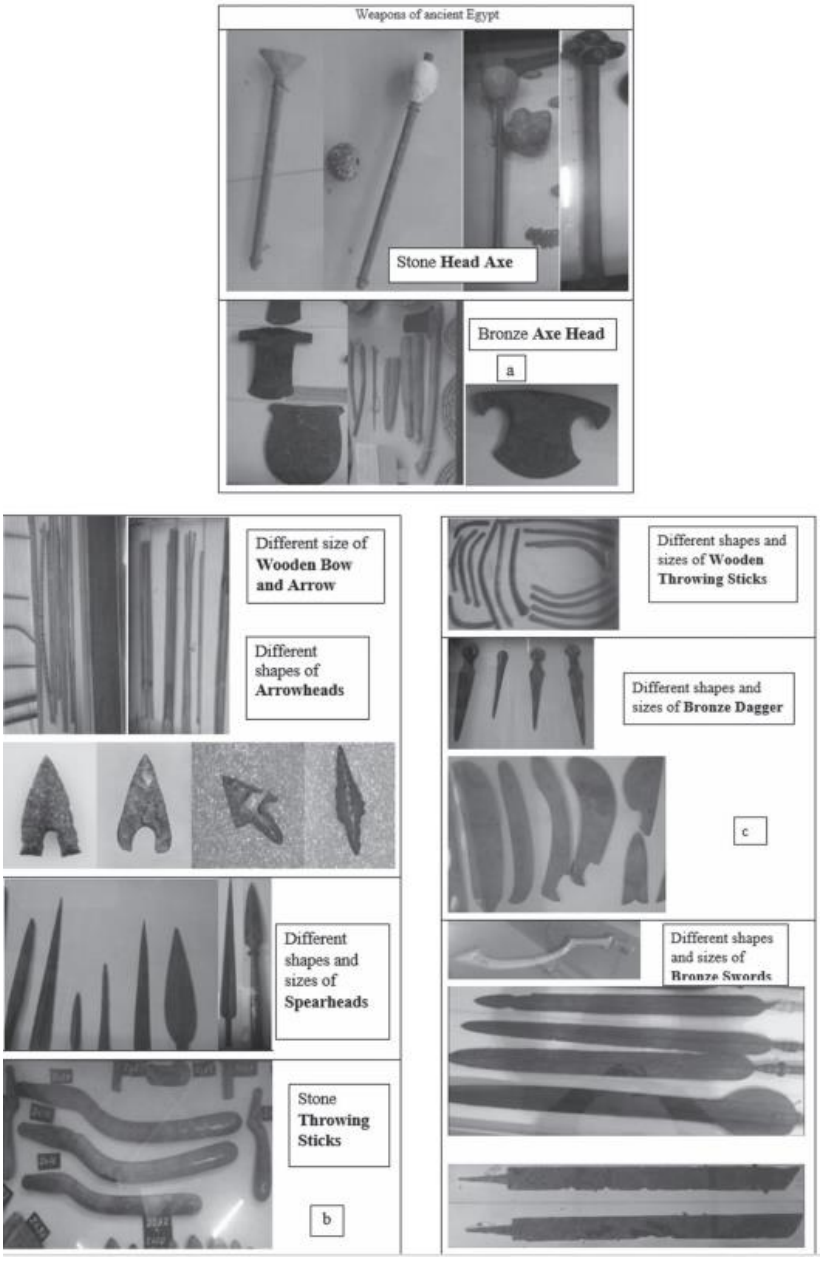
επιχειρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών, του αέρα, της ξηράς, της θάλασσας και του διαστήματος [8]. Επίσης, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν προστατευτικές θωρακίσεις για την ασπίδα έναντι των διαφόρων πιθανών απειλών.



Εικόνα 1.3 Σύγχρονα πολεμικά στοιχεία.

Υπάρχει μια ισχυρή σχέση μεταξύ της ανάπτυξης της θωράκισης και της προόδου των χρησιμοποιημένων όπλων. Ο σχεδιασμός των πανοπλιών και των υλικών τους έγινε για να μειώσει τις πιθανότητες να τραυματιστούν οι στρατιώτες κατά τη διάρκεια των μαχών [9] Οι πρώτοι Αιγύπτιοι στρατιώτες έφεραν έναν απλό οπλισμό που αποτελούταν από ένα δόρυ με χάλκινη αιχμή και μια μεγάλη ξύλινη ασπίδα καλυμμένη με δέρμα. Το δόρυ προβλεπόταν να μαχαιρώνει τον εχθρό, επιτρέποντας στον στρατιώτη να έχει μεγαλύτερη πρόσβαση στον εχθρό[10,11]

Η εικόνα 1.4 απεικονίζει τα βασικά σχήματα που είχαν λόγχες, τσεκούρια, κοντά σπαθιά, στιλέτα και βέλη που αναπτύχθηκαν στην Πρώιμη Δυναστική Περίοδο στην Αίγυπτο με τα χρόνια. Επίσης, η Εικόνα 1.4 δείχνει παραδείγματα των όπλων που βρέθηκαν, και εκθέτονται στο μουσείο του Καΐρου στην Αίγυπτο. Το κύριο όπλο που χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι Αιγύπτιοι ήταν το τόξο και το βέλος με αιχμές φτιαγμένες αρχικά από σκληρές πέτρες και αργότερα εισήχθη η χάλκινη αιχμή βέλους. Το βάρος του βέλους κυμαινόταν μεταξύ 15 και 25 g, η ταχύτητα του βέλους μπορούσε να φτάσει τα 50 m/s και η μέση δύναμη κρούσης μπορεί να φτάσει τα 50 N [10,11]



Εικόνα 1.4 Μερικά αρχαία αιγυπτιακά όπλα (Αιγυπτιακό Μουσείο, Κάιρο, Αίγυπτος).

Οι ακοντιστές υποστηρίζονταν από τοξότες που έφεραν ένα σύνθετο τόξο και βέλη με αιχμές από σκληρή πέτρα ή/και χαλκό ακονισμένο σε αιχμή, (Εικόνα 1.5), που ήταν το σημαντικότερο όπλο τον αιγυπτιακό στρατό. Τα χάλκινα ξίφη χρησιμοποιήθηκαν επίσης στις μάχες του αιγυπτιακού στρατού ως ένα από τα όπλα μάχης σώμα με σώμα.



Εικόνα 1.5 Αρχαίοι Αιγύπτιοι στρατιώτες που φέρνουν τα όπλα τους (Αιγυπτιακό Μουσείο, Κάιρο, Αίγυπτος)

Η εικόνα 1.6 απεικονίζει τον Ραμσή Β' με το μεγάλο τόξο του να πολεμά τον εχθρό. Το τόξο και τα βέλη διαφορετικών κατασκευών και διαστάσεων μπορούσαν να χτυπήσουν τον εχθρό από μεγάλη απόσταση. Το σχήμα του τόξου ήταν αρκετά διαφορετικό τόσο σε διάσταση όσο και σε είδος υλικού, ανάλογα με το εύρος του βέλους. Η σύνθετη δομή τόξου αναπτύχθηκε για να επιτρέπει μεγαλύτερη απόσταση, δύναμη και ευελιξία [12–15].



Εικόνα 1.6 Ο Ραμσής Β' επιτίθεται στον εχθρό του. [15]

Η θωράκιση του Αιγύπτιου στρατιώτη δεν ήταν παρά δερμάτινες λωρίδες τυλιγμένες γύρω από το στήθος του και βασιζόταν κυρίως σε μια ασπίδα για να προστατευτεί από τα βέλη του εχθρού. Ασπίδες διαφορετικών σχημάτων κατασκευάζονταν από ξύλινο πλαίσιο καλυμμένο με δέρμα. Το μέγεθος της ασπίδας ποικίλλει ώστε να καλύπτει είτε όλο το σώμα του στρατιώτη είτε μόνο το στήθος του. Το υλικό αναπτύχθηκε σύμφωνα με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας των υλικών στις διάφορες περιόδους: μπρούτζος, σίδηρος ή χάλυβας για να παρέχει καλύτερη προστασία [16].

Η ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών αντανακλάται και στην τεχνολογία της εφεύρεσης των όπλων. Το χάλκινο κοντό ξίφος αντικαταστάθηκε από σιδερένια ξίφη τον 13ο αιώνα π.Χ. Το μέγεθος και το σχήμα είχαν αναπτυχθεί έντονα στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία καθώς και στην Περσική Αυτοκρατορία, αν και οι Κινέζοι χρησιμοποίησαν ξίφος με μονή κόψη στα τέλη του 12ου αιώνα π.Χ. Στο Μεσαίωνα, το σπαθί γίνεται το κύριο όπλο σε όλες τις μάχες μεταξύ διαφορετικών αυτοκρατοριών. Με την ανάπτυξη νέας τεχνολογίας χάλυβα, τα όπλα με μονή κόψη έγιναν δημοφιλή.

1.1.1 Ο σχεδιασμός της προστασίας σώματος στα αρχαία χρόνια

Η πανοπλία σώματος είναι το κάλυμμα που τοποθετείται πάνω από το σώμα για να το προστατεύει από τον τραυματισμό κατά τη διάρκεια της εμπλοκής στη μάχη. Οι παλιοί πολιτισμοί επινόησαν διάφορους τύπους θωράκισης σώματος, ξεκινώντας με τη χρήση του δερμάτινου καλύμματος και το ανέπτυξαν περαιτέρω για να προστατεύουν τους στρατιώτες με τη χρήση σκληρών πανοπλιών από μπρούτζο και σίδηρο. Ο Ρωμαϊκός και ο Κινεζικός πολιτισμός ανέπτυξαν διάφορους τύπους εύκαμπτων και σκληρών πανοπλιών για να καλύπτουν όλα τα μέρη του σώματος. Το πρόβλημα ήταν να παρέχεται πλήρης προστασία του σώματος και ταυτόχρονα να επιτρέπεται η ευέλικτη και γρήγορη κίνηση των πολεμιστών. Η βαριά πανοπλία μερικές φορές ήταν η αιτία της ήττας του στρατού λόγω της αργής κίνησής του εναντίον των γρήγορων κινήσεων των εχθρικών πολεμιστών, ακόμα κι αν ήταν λιγότερο προστατευμένοι. Η αρχαία Κίνα εφηύρε τους αλληλοσυνδεόμενους δακτυλίους αλυσίδων για να χρησιμοποιηθούν ως θωράκιση σώματος, ενώ οι Ρωμαίοι και οι Έλληνες εισήγαγαν την επιμεταλλωμένη πανοπλία.

Η ασπίδα χρησιμοποιήθηκε για την μακρινή προστασία του σώματος του πολεμιστή από δόρατα και βέλη. Αναπτύχθηκε επίσης ως θωράκιση σώματος χρησιμοποιώντας σκληρό δέρμα, ξύλο, μπρούτζο, σίδερο για την προστασία των στρατιωτών. Χιλιάδες ιδέες επινοήθηκαν για να αναπτυχθεί μια θωράκιση σώματος για την υπεράσπιση των πολεμιστών από τα εχθρικά όπλα και να είναι αποτελεσματικά αδιαπέραστη σε ξίφη, λόγχες ή δόρατα και από αμβλύ τραύματα. Οι πολιτισμοί της Κίνας και της Ιαπωνίας έχουν μακρά ιστορία στην εφεύρεση των πανοπλιών και των όπλων. Οι στρατιώτες τους φορούσαν εύκαμπτες πανοπλίες από το 210 π.Χ. Οι Κινέζοι εισήγαγαν για πρώτη φορά την εύκαμπτη θωράκιση ενώνοντας κομμάτια δέρματος με νήματα κορδονιού για να σχηματίσουν μια εύκαμπτη περιοχή που ταιριάζει με το σχήμα του σώματος (ελασματική πανοπλία). Επίσης, τον 14ο αιώνα, χρησιμοποιήθηκε μια επιμεταλλωμένη πανοπλία από επικαλυπτόμενο μέταλλο καρφωμένο μέσα σε ένα ύφασμα ή δερμάτινο ένδυμα [17,18].

Ένα άλλο σχέδιο της πανοπλίας ήταν η φολιδωτή πανοπλία. Οι φολιδωτές ήταν κατασκευασμένες από

δέρμα, μπρούτζο, σίδηρο ή οποιοδήποτε άλλο σκληρό υλικό που επικαλύπτονταν η μια πάνω στην άλλη σε διαδοχικές σειρές στερεωμένες σε ύφασμα ή δερμάτινο υλικό. Οι Ίνκας έβαλαν βαμβάκι ανάμεσα σε στρώματα υφάσματος και δέρματος και έραβαν αυτό το υλικό, δημιουργώντας γιλέκα και κορμάκια. Αυτή η βαμβακερή θωράκιση ήταν πολύ πυκνή και μπορούσε να έχει πάχος δύο δακτύλων και απωθούσε βέλη και λόγχες σχεδόν όπως και μια ισπανική θωράκιση από χάλυβα, αλλά ήταν πολύ πιο ελαφριά, πιο δροσερή και πιο εύκαμπτη [19].

Η ολόσωμη θωράκιση εμφανίστηκε σε συνδυασμό με την εμφάνιση της αλυσιδωτής πανοπλίας, η οποία ασφαλίζει το σώμα με λιγότερο βάρος και υψηλή ευελιξία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι του τύπου αυτού με διαφορετικά σχέδια και συνδυασμό μεταλλικής πλάκας, αλυσίδας, δέρματος, επιμεταλλωμένης αλυσίδας, όπως [20–51]:

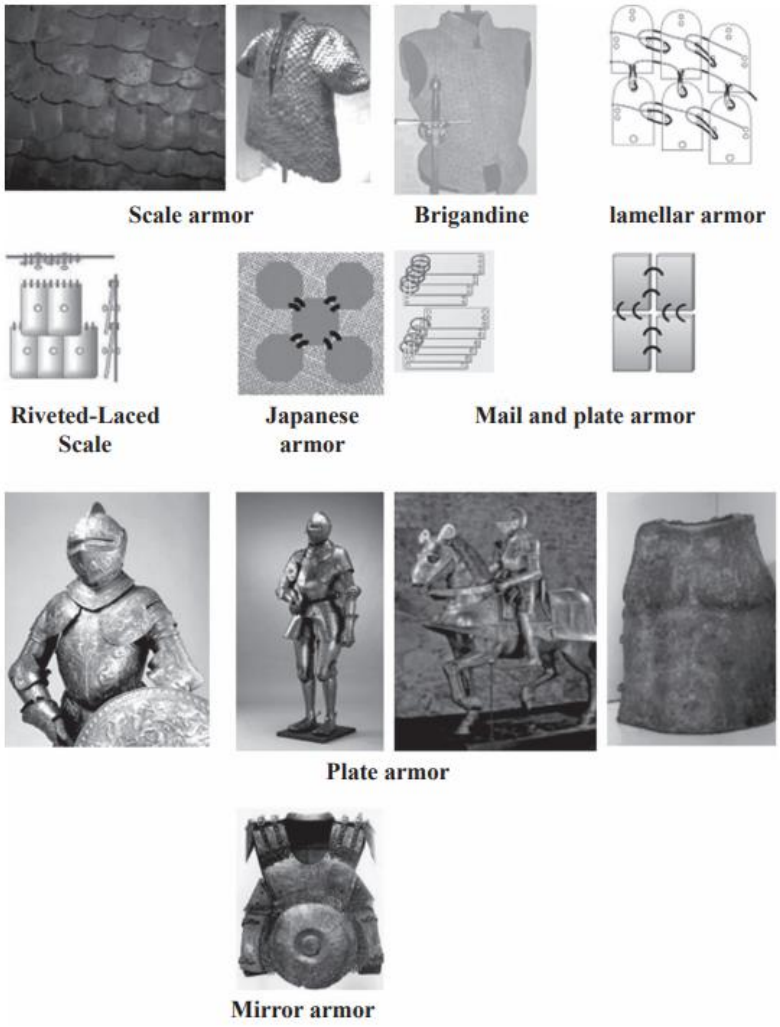
- Ελασματοειδής θωράκιση[1] που σχηματίζεται από μικρά κομμάτια δέρματος, μπρούντζου ή χάλυβα στερεωμένα μεταξύ τους με χοντρά πτερύγια από νήμα σε διαφορετικό σχέδιο.
- Στρωτή θωράκιση[2] δομημένη από οριζόντιες επικαλυπτόμενες σειρές συμπαγών πλακών.
- Φολιδωτή Θωράκιση[3]: Πανοπλία που αποτελείται από πολλές επιμέρους μικρές φολίδες θωράκισης (πλάκες) διαφόρων σχημάτων που συνδέονται μεταξύ τους και σε ένα υπόστρωμα από ύφασμα ή δέρμα σε αλληλοκαλυπτόμενες σειρές. Η φολίδα μπορεί να είναι από μπρούτζο, σίδηρο ή δέρμα
- Αλυσιδωτή Θωράκιση[4] : Οι μικροί μεταλλικοί δακτύλιοι συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν περιοχή που καλύπτει τη θωράκιση σώματος.
- Θωράκιση αλυσίδας και πλάκας[5]: Σε αυτή τη δομή, οι δακτύλιοι των αλυσίδων τοποθετούνταν σε νάρθηκα από μια μεταλλική πλάκα για να αυξηθεί η προστασία σε μια συγκεκριμένη περιοχή της θωράκισης. Ο τύπος σύνδεσης των δακτυλίων αλυσίδας με την πλάκα μπορεί να ή να μην επιτρέπει την επικάλυψη των μεταλλικών πλακών για την ενίσχυση του στήθους.
- Θωράκιση πλάκας[6]: Σχεδιάστηκε από σφυρήλατα χαλύβδινα ελάσματα για να καλύπτει τα διάφορα μέρη του σώματος και ταυτόχρονα να επιτρέπει την κίνησή τους.

[1] Lamellar armor
[2] Laminar armor
[3] Scale armor
[4] Mail armor
[5] Mail and plate armor
[6] Plate armor

- Η λαμέ θωράκιση[7] είναι κατασκευασμένη από μεταλλικές πλάκες διαμορφωμένες ώστε να παίρνουν τη μορφή του τμήματος που θα καλύπτεται από τη θωράκιση και συνδέονται μεταξύ τους με χοντρά νήματα.
- Brigandine Karuta (Ιαπωνική πανοπλία): Βαριά υφασμάτινη ή δερμάτινη πανοπλία που σχηματίζεται από πολλαπλές στρώσεις υφάσματος με μια σιδερένια πλάκα ενδιάμεσα.
- Kikko (Ιαπωνική πανοπλία): Σιδερένιες ή δερμάτινες πλάκες εξαγωνικού σχήματος που συνδέονται μεταξύ τους με σιδερένια δαχτυλίδια και στερεώνονται στην επιφάνεια από βαρύ ύφασμα καμβά για να μιμούνται το κέλυφος της χελώνας.
- Kusari (Ιαπωνική πανοπλία - θώρακας): Είναι μια κατηγορία ιαπωνικής θωράκισης αλυσίδας.
- Βρασμένο δέρμα: Το βρασμένο δέρμα είναι πιο μαλακό, μπορεί να διαμορφωθεί για να δώσει το απαιτούμενο σχήμα του σώματος και μπορεί να ενισχυθεί με μεταλλική πλάκα για περισσότερες προστασίες.
- Θωράκιση δαχτυλιδιού[8]: Μεταλλικοί κρίκοι ή κουμπιά διαφόρων σχημάτων ραμμένα σε δέρμα ή βαρύ ύφασμα.
- Θωράκιση νάρθηκα[9]: Η θωράκιση νάρθηκα που κατασκευάζεται από ρίγες μετάλλου ραμμένες σε βαρύ ύφασμα.
- Η θωράκιση καθρέφτη[10] είναι μια μεταλλική θωράκιση που φοριέται πάνω από τους άλλους τύπους θωράκισης ως ενίσχυση για την αύξηση της προστασίας.

Η εικόνα 1.7 απεικονίζει την ιδέα των διαφορετικών στοιχείων των σχεδίων θωράκισης [20–31].

[7] Lame armor
[8] Ring armor
[9] Splint armor
[10] Mirror armor



Εικόνα 1.7 Στοιχεία μερικών αρχαίων σχεδίων θωράκισης σώματος. [20-31].

Οι σύγχρονες τεχνολογίες έχουν αναπτύξει τις νέες πανοπλίες βασισμένες στα παραπάνω αρχαία σχέδια της θωράκισης σώματος χρησιμοποιώντας νέα προηγμένα υλικά από ίνες. Η αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού της θωράκισης είναι να έχει τη μέγιστη αναλογία προστασίας προς βάρος και να εγγυάται την ευελιξία και την ευκολία κίνησης.

1.2 Η σύγχρονη πανοπλία σώματος

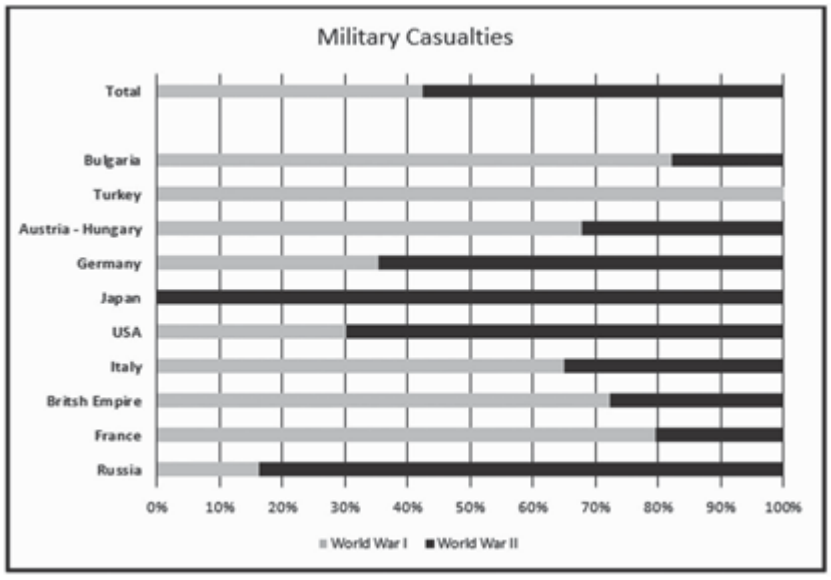
Η εξέλιξη των οπλισμών οδήγησε αναπόφευκτα και στην εξέλιξη της θωράκισης σώματος. Η παράγραφος αυτή εστιάζει στις ανάγκες της σύγχρονης θωράκισης.

1.2.1 Η ανάγκη για την προστασία του σώματος

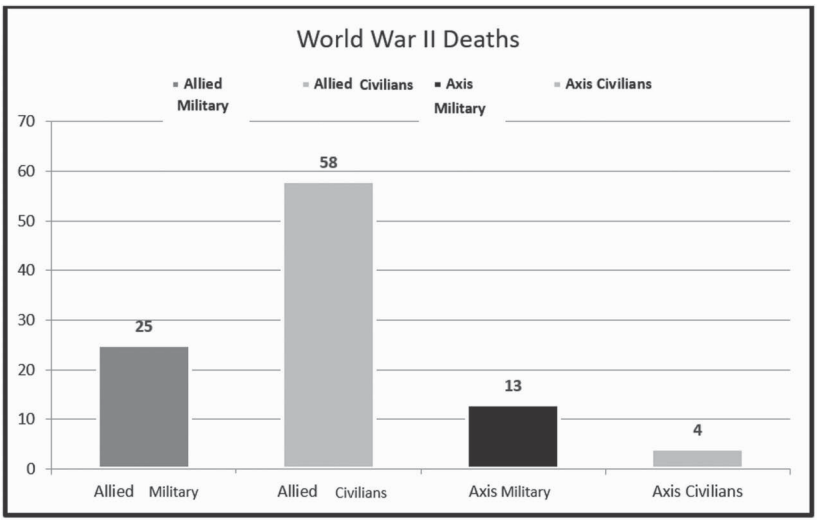
Στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι στρατιωτικές απώλειες αυξήθηκαν σε σύγκριση με τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο λόγω της τεράστιας ανάπτυξης των όπλων που χρησιμοποιήθηκαν και της έλλειψης προστασίας για τους στρατιώτες. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.8, η ποσοστιαία αύξηση των στρατιωτικών απωλειών στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο έφτασε το 400% σε σχέση με ότι στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο [52].

Καθώς τα όπλα γίνονται πιο εξελιγμένα, η ανάγκη για προστασία όχι μόνο των στρατιωτών αλλά και των πολιτών αποδείχθηκε πολύ ζωτική. Η εικόνα 1.9 δείχνει ότι το ποσοστό θανάτου των αμάχων κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ήταν μεγαλύτερο από το στρατιωτικό προσωπικό.

Μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, η ζήτηση για νέο σχεδιασμό της θωράκισης σώματος αυξήθηκε και αυξήθηκε περαιτέρω μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Το ποσοστό των συνολικών στρατιωτικών απωλειών αυξήθηκε σε ορισμένες χώρες όπως η Γερμανία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και στη Ρωσία σχεδόν τριπλασιάστηκε. Κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ο αριθμός των θανάτων αμάχων στις συμμαχικές χώρες αυξήθηκε, ιδιαίτερα στη Ρωσία [53].

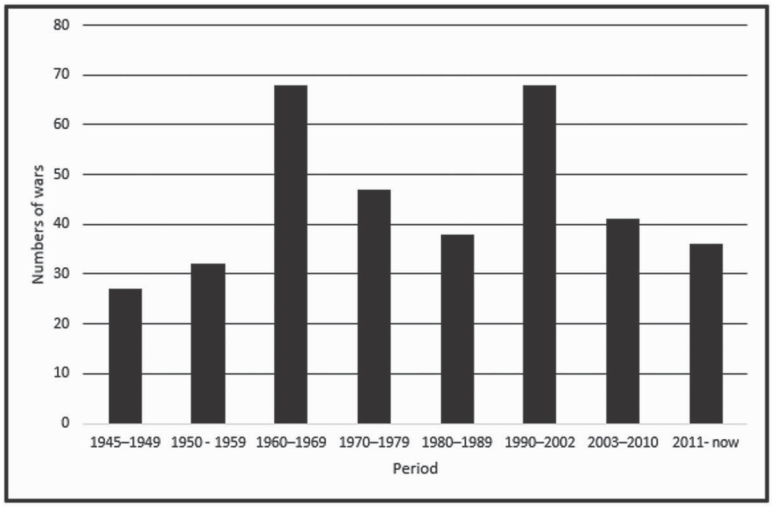


Εικόνα 1.8 Το ποσοστό των στρατιωτικών απωλειών κατά τη διάρκεια του Α΄ και Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου (σημείωση: Η Ιαπωνία συμμετείχε στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η Τουρκία συμμετείχε στον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο).



Εικόνα 1.9 Κατανομή του ποσοστού θανάτων για στρατιωτικούς και πολίτες κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

Ακόμη και τα τελευταία 70 χρόνια, πολλοί πόλεμοι και συγκρούσεις συνέβησαν στις διάφορες περιοχές του νέου κόσμου. Ο αριθμός των πολέμων και των στρατιωτικών συγκρούσεων, κατά μέσο όρο, έφτασε τους 45 πολέμους στις διάφορες ζώνες των ηπείρων, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.10.



Εικόνα 1.10 Η συχνότητα του πολέμου μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο

Ο πόλεμος στη σύγχρονη εποχή ήταν ο εγκλεισμός αμάχων και πολιτικών υποδομών ως στόχοι για την καταστροφή της ικανότητας του εχθρού να εμπλέκεται σε πόλεμο [54].

1.2.2 Σύγχρονη αλεξίσφαιρη θωράκιση

Μετά την εφεύρεση της πυρίτιδας και των πυροβόλων όπλων, η θωράκιση σώματος αναπτύχθηκε συνεχώς με μια νέα ιδέα να είναι ελαφρύτερη και ισχυρότερη για να προστατεύει από τη διείσδυση διαφορετικών διαμετρημάτων [55]. Κατά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, η θωράκιση σώματος δεν χρησιμοποιήθηκε. Ωστόσο, τα πειράματα ξεκίνησαν αργότερα σε ορισμένα σχέδια. Μια βελτιωμένη

έκδοση αναφέρθηκε το 1916 για την προστασία του στήθους του χρήστη, αλλά ήταν βαριά λόγω της χρήσης χαλύβδινης πλάκας. Το Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας και Εμπορικών Σημάτων των ΗΠΑ καταγράφει αρχεία που χρονολογούνται από το 1919 για διάφορα σχέδια αλεξίσφαιρων γιλέκων και ενδυμάτων τύπου θωράκισης σώματος.

Η εικόνα 1.11 δείχνει τις δοκιμές της θωράκισης σώματος στις αρχές του 20ου αιώνα, γεγονός που δείχνει την ευαισθητοποίηση του κοινού για την ανάγκη ενός αλεξίσφαιρου γιλέκου. Στα μέσα του 20ου αιώνα, επιταχύνθηκαν περισσότερες προσπάθειες για την ανάπτυξη μιας θωράκισης σώματος. Στο πρώιμο στάδιο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, κατασκευάστηκαν διάφορα μοντέλα θωράκισης ελαφρού και μεγάλου βάρους με την εισαγωγή σκληρών πλακών από σύνθετα φύλλα υαλοβάμβακα (Doron Plate) [56].



Εικόνα 1.11 Δοκιμή αλεξίσφαιρου γιλέκου στην Ουάσιγκτον, DC, Σεπτέμβριος 1923. [56].

Η πρόοδος της θωράκισης του σώματος τους τελευταίους αιώνες μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα ορόσημα [57–65]:

- 1800 μ.Χ., μεταξωτό σώμα θωράκισης, δύο χαλύβδινες πλάκες τοποθετημένες σε βαλλιστική πανοπλία.
- 1919–1923, μεταξωτή θωράκιση, χοντρό υφασμάτινο γιλέκο από πολλαπλά στρώματα βαμβακερής επένδυσης και υφάσματος.
- 1942, Nylon αλεξίσφαιρα γιλέκα, ογκώδη τζάκετ αποτελούμενα από πλάκες από χάλυβα ή μαγγανίου ραμμένες σε γιλέκο από βαλλιστικό νάιλον, σύνθετες πλάκες από υαλοβάμβακα.
- 1967, αλεξίσφαιρα γιλέκα Nomex.
- 1970, αλεξίσφαιρα γιλέκα Kevlar 29

- 1988, αλεξίσφαιρα γιλέκα Kevlar 29
- 1989, αλεξίσφαιρα γιλέκα Spectra
- 2014, μη υφασμένες άκαμπτες πλάκες Spectra, πάνελ ασπίδας που ενσωματώνει το Spectra ως ενισχυτικές ίνες σε εύκαμπτη ρητίνη.

Υπάρχουν επίσης αρκετές καινοτομίες που χρησιμοποιούν πρόσφατα αναπτυγμένα υλικά για τη βελτίωση των προϊόντων θωράκισης με διάφορους τρόπους:

1. Νέες ίνες: Dyneema, Zylon, Twaron, Vectran, άνθρακας, ίνες γυαλιού
2. Κεραμικοί δίσκοι, ο καθένας χωριστά τοποθετημένος σε φορέα γιλέκου, και όλοι επικαλύπτονται μεταξύ τους
3. Κεραμικές πλάκες
4. Σύνθετο υλικό πολυουρεθάνης-γραφενίου
5. Gold Shield GV-2017
6. Τεχνολογία Tegris™
7. Βαλλιστικά υλικά με βάση το Innegra™ SPP
8. Μακριοί νανοσωλήνες άνθρακα—στην περιοχή μήκους χιλιοστών—σε μορφή νήματος και μη υφασμένου φύλλου
9. Kevlar® KM2 Plus fiber
10. Kevlar®149
11. Εύκαμπτα σύνθετα
12. Σύνθετη δομή νανοϊνών
13. Υγρή θωράκιση σώματος

Την τελευταία δεκαετία, δόθηκε μεγάλη προσοχή στην ανάπτυξη ενός νέου προστατευτικού συστήματος θωράκισης από τα σύνθετα υλικά ινών υψηλής απόδοσης.

1.2.3 Κατάταξη της σύγχρονης θωράκισης σώματος

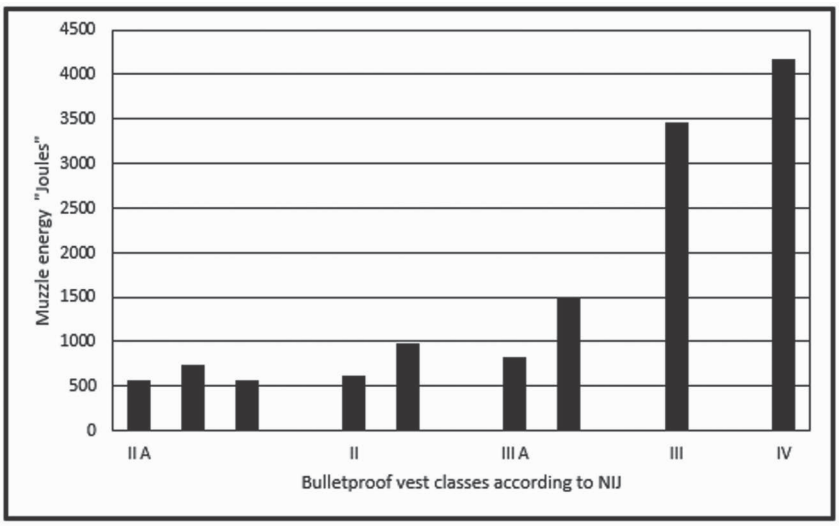
Οι προδιαγραφές θωράκισης προστασίας εξαρτώνται από τις αναμενόμενες απειλές. Οι διάφοροι διαθέσιμοι τύποι θωράκισης σώματος μπορούν να ταξινομηθούν ως:

- Θωράκιση βαλλιστικής προστασίας
- Θωράκιση προστασίας λεπίδας
- Θωράκιση προστασίας από ακίδες.

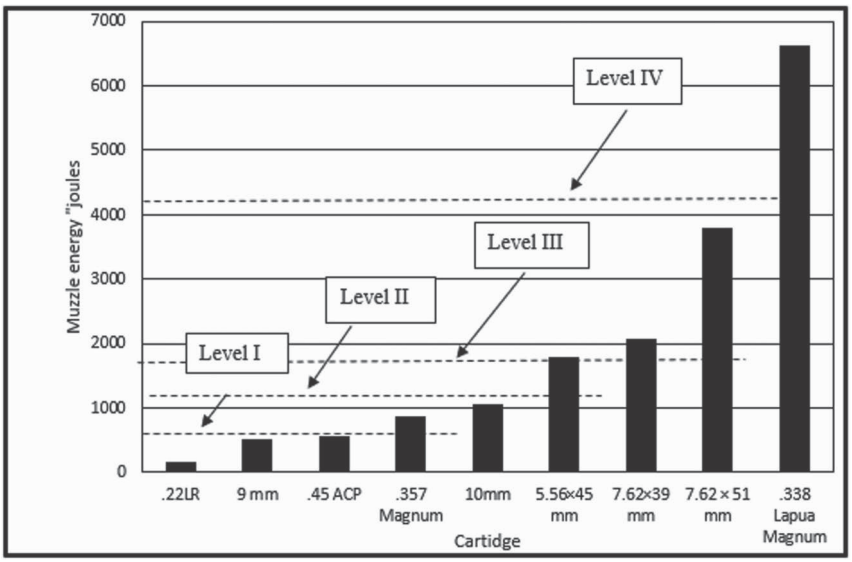
1.2.3.1 Θωράκιση βαλλιστικής προστασίας

Η κύρια λειτουργία της θωράκισης σώματος βαλλιστικής προστασίας είναι να απορροφά την ενέργεια κρούσης της σφαίρας για να μειώσει ή να σταματήσει τη διείσδυση της σφαίρας στο σώμα. Το σύγχρονο αλεξίσφαιρο γιλέκο αποτελείται από πολλά στρώματα υφάσματος ή ελασματοποιημένες ίνες ή και τα δύο, ικανά να προστατεύουν τους χρήστες από βλήμα όπλου μικρού διαμετρήματος και θραύσματα χειροβομβίδας.

Τα μαλακά γιλέκα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με την ικανότητα προστασίας τους που καθορίζει την απόδοση του γιλέκου. Τα επίπεδα προστασίας των προτύπων πανοπλίας συνιστώνται από το Εθνικό Ινστιτούτο Δικαιοσύνης - National Institute of Justice (NIJ) [66], την υποδιεύθυνση Επιστημονικής Ανάπτυξης του Υπουργείου Εσωτερικών του Ηνωμένου Βασιλείου – Home Office Scientific Development Branch (HOSDB) [67] ή το Γερμανικό Πρότυπο - Association of Test Laboratories for Attack Resistant Materials and. Constructions (VPAM) [68]. Η βαθμολογία του γιλέκου εξαρτάται από την αντοχή του στη διείσδυση και τη προστασία από αμβλύ τραύματα[69]. Το πρότυπο NIJ χώριζε το επίπεδο προστασίας για το αλεξίσφαιρο γιλέκο σε πέντε κατηγορίες ανάλογα με το βάρος της σφαίρας και την ταχύτητά της. Η ενέργεια του ρύγχους (η κινητική ενέργεια μιας σφαίρας καθώς αποβάλλεται από το στόμιο ενός πυροβόλου όπλου σε Joules) που πρέπει να απορροφά το αλεξίσφαιρο γιλέκο απεικονίζεται στην εικόνα 1.12. Η κλάση IV πρέπει να αντέχει σε 4162,77 J. Η ενέργεια του ρύγχους εξαρτάται από το βάρος της σφαίρας και την ταχύτητά της όταν προσκρούει στην επιφάνεια του αλεξίσφαιρου γιλέκου. Για τα διαφορετικά διαμετρήματα σφαίρας, η ενέργεια του ρύγχους απεικονίζεται στην εικόνα 1.13 [70]. Το επίπεδο κατηγορίας της αλεξίσφαιρης θωράκισης υποδεικνύει τις σφαίρες με την υψηλότερη ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει. Η ενέργεια του ρύγχους της σφαίρας του όπλου διαφέρει ανάλογα με το βάρος και την ταχύτητα βολής. Μπορεί να φτάσει τα 2000 J για σφαίρα κυνηγετικού όπλου με βάρος 12 g, ενώ για τουφέκι, η ενέργεια μπορεί να φτάσει τα 6500 J.



Εικόνα 1.12 Τα επίπεδα ενέργειας του ρύγχους σύμφωνα με το Εθνικό Ινστιτούτο Δικαιοσύνης [66]



Εικόνα 1.13 Η ενέργεια ρύγχους σφαίρας για τους διαφορετικούς τύπους διαμετρήματος σφαίρας [66]

Τα επίπεδα NIJ για την αλεξίσφαιρη θωράκιση σκιαγραφούν τη διαφορετική αντοχή του διαμετρήματος σφαίρας από την οποία μπορεί να προστατεύσει. Κάθε επίπεδο μπορεί να σταματήσει την ενέργεια του ρύγχους χαμηλότερου επιπέδου. Τα διαμετρήματα που χρησιμοποιούνται συνήθως (η κατά προσέγγιση εσωτερική διάμετρος της κάννης του όπλου [70]) κυμαίνονταν μεταξύ 4 και 12,7 mm. Το αλεξίσφαιρο γιλέκο μπορεί να προστατεύσει το σώμα από το διαφορετικό διαμέτρημα ανάλογα με το επίπεδό του, για παράδειγμα [71]:

- Το επίπεδο IIA μπορεί να προστατεύσει από σφαίρα διαμετρήματος 9 mm (8 g) σε ταχύτητα 373 ± 9,1 m/s, 557 J
- Το επίπεδο II μπορεί να προστατεύσει από 0,357 Magnum (10,2 g) σε ταχύτητα 436 ± 9,1 m/s, 965 J

- Το επίπεδο IIIA μπορεί να προστατεύσει από 0,44 Magnum (15,6 g) σε ταχύτητα 436 ± 9,1 m/s, 1483 J
- Το επίπεδο III μπορεί να προστατεύσει από το διαμέτρημα 0,308 (9,6 g) σε ταχύτητα 847 ± 9,1 m/s, 3444 J
- Το επίπεδο IV μπορεί να προστατεύσει από 0,30-0,60 διαμέτρημα (10,8 g) σε ταχύτητα 878 ± 9,1, m/s, 4163 J

Το γιλέκο επιπέδου IV θα προστατεύει από τα περισσότερα πυρομαχικά [72] όπως φαίνεται στην εικόνα 1.14.



Εικόνα 1.14 Πυρομαχικά που πρέπει να σταματήσουν από τη θωράκιση που συμμορφώνεται με τα πρότυπα NIJ 0101.06

Για την εκπλήρωση των απαιτήσεων των προτύπων του NIJ ή του Ηνωμένου Βασιλείου, χρησιμοποιούνται πολλά στρώματα υφάσματος ινών υψηλής απόδοσης με διαφορετικές δομές και τοπική πυκνότητα για να φτάσουν πάχος στρωμάτων υφάσματος 4–20 mm [71] Η πυκνότητα περιοχής του υφάσματος κυμαίνεται μεταξύ 100 και 160 g /m^2. Οι σύγχρονοι τύποι αλεξίσφαιρων γιλέκων παρέχονται με πλάκα θωράκισης (πάχους 0,7 cm), η οποία είναι μια άκαμπτη δομή, για προστασία από τη σφαίρα υψηλής ενέργειας που τοποθετείται στο μπροστινό μέρος του γιλέκου. Η σκληρή πλάκα είναι συνήθως μια σύνθετη δομή από ίνες υψηλής απόδοσης ή κεραμικό στρώμα που μπορεί να μειώσει την επιφανειακή πυκνότητα του υφάσματος και ταυτόχρονα να διατηρήσει υψηλό επίπεδο προστασίας [73]. Η μαλακή θωράκιση συνήθως προστατεύει τις περισσότερες απειλές με όπλα (Επίπεδο IIIA) από σφαίρες (0,357 SIG Full-Metal Jacket Flat-Nose (FMJ-FN), επίπεδη μύτη με πλήρες μεταλλικό χιτώνιο, ονομαστικής μάζας 8,1 g με ταχύτητα αναφοράς 430 m/s και 0,44 σφαίρες Magnum Semi-jacketed hollow point (SJHP),με ονομαστική μάζα 15,6 g σε ταχύτητα αναφοράς 408. Αντίστοιχα, η σκληρή πλάκα θωράκισης προστατεύει από σφαίρες Armor Piercing (AP) διάτρησης

πανοπλίας διαμετρήματος 0,30 (Στρατιωτική ονομασία ΗΠΑ M2 AP) με ονομαστική μάζα 10,8 g με ταχύτητα αναφοράς 878 ± 9,1 m/s [74]. Για να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα της μαλακής θωράκισης, μπορούν να προστεθούν πλάκες τραυματισμού με στόχο την ανάπτυξη γιλέκου μικρότερου βάρους και υψηλότερης απόδοσης που μπορεί να βελτιώσει την κινητικότητα, την απόδοση και την άνεση.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την αλεξίσφαιρη πανοπλία ξεκίνησε με σιδερένιο γιλέκο και εξελίχθηκε σε μια εύκαμπτη θωράκιση μέσω της χρήσης υφασμάτων πολλαπλών στρώσεων από διαφορετικές ίνες, όπως βαμβάκι, μετάξι, νάιλον, Kevlar, Kevlar® 29, Kevlar® 129, Kevlar® Protera, Ίνα Spectra®, GoldFlex®, Spectra Shield®, Twaron®, Dyneema, Zylon®. Πολλά σχέδια των σύγχρονων αλεξίσφαιρων γιλέκων υπάρχουν στην αγορά για να συμμορφώνονται με τα πρότυπα και να ικανοποιούν την άνεση του χρήστη. Η εικόνα 1.15 απεικονίζει ένα παράδειγμα τέτοιου αλεξίσφαιρου γιλέκου [55].



Εικόνα 1.15 Μοντέρνο αλεξίσφαιρο γιλέκο

1.2.3.2 Θωράκιση σώματος από βολές εκρηκτικών

Η χρήση στρατιωτικών εκρηκτικών, καθώς και άλλοι εκρηκτικοί μηχανισμοί, είναι αλληλένδετες λειτουργίες σε στρατιωτικά πεδία (πυρομαχικά που δεν έχουν εκραγεί και εξουδετέρωση βομβών), καθώς και εξουδετέρωση βομβών για λόγους δημόσιας ασφάλειας, όπως βόμβες που συναντώνται σε τρομοκρατικές απειλές. Για να ελαχιστοποιηθεί αυτός ο κίνδυνος, συνήθως εφαρμόζεται μια πολύ ισχυρή θωράκιση για προστασία εμπρός και πίσω, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.16. Σε αυτή την περίπτωση, η μάζα της πανοπλίας δεν είναι τόσο σημαντική όσο η πλήρης προστασία του σώματος του χρήστη. Οι τεχνικοί εξουδετέρωσης εκρηκτικών μηχανισμών πρέπει να φορούν προστατευτικό

ρουχισμό για να προστατευθούν από την απειλή της υπερπίεσης, του θρυμματισμού, της πρόσκρουσης και της θερμότητας [75]. Παράλληλα πρέπει να προστατεύει τη σπονδυλική στήλη και το κεφάλι σε περίπτωση που ο χρήστης ανατραπεί από έκρηξη, ενώ, θα πρέπει να υπάρχει και θερμική προστασία. Η ελευθερία κίνησης για αποτελεσματική εργασία απαιτεί ένα περιορισμό μέγιστου βάρους. Τα μασχαλιαία προστατευτικά και τα ενισχυμένα πλευρικά βαλλιστικά ένθετα χρειάζονται για περισσότερη προστασία [76,77,78] όπως φαίνεται στην εικόνα 1.16.



Εικόνα 1.16 Στολή τεχνικού εξουδετέρωσης βομβών [78].

Για να σταματήσει αποτελεσματικά ένα κύμα έκρηξης, απαιτούνται παχιά στρώματα αφρού Kevlar και πλαστικού για την πρόληψη σοβαρών βλαβών στο σώμα. Το βάρος μπορεί να φτάσει τα 40 κιλά ή περισσότερο.

1.2.3.3 Μελλοντική εξέλιξη της προστασίας σώματος σε εκρηκτικά και βαλλιστικά βλήματα

Η ανάπτυξη βλημάτων υψηλής ταχύτητας και εκρηκτικών υλικών οδήγησε σε μια εξέλιξη στην προηγμένη βαλλιστική θωράκιση σώματος με απαιτήσεις για τα νέα συστήματα να είναι ανθεκτικά στη φθορά του υφάσματος, ευέλικτα και ελαφριά και με υψηλή και αποτελεσματική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας [79]. Οι πρόσφατες τάσεις για τη σύγχρονη θωράκιση σώματος περιλαμβάνουν

- Γιλέκο νανοσωλήνων υπεράνθρακα
- Τύπος βαλλιστικού γιλέκου από δέρμα
- Ενσωματωμένη επικαλυπτόμενη διαμόρφωση ιδιοτήτων υψηλού εφελκυσμού
- Ανάπτυξη νέων ινών
- Βελτιωμένα σχέδια από ύφασμα πολλαπλών στρώσεων (3D)

- Νέο σύνθετο ύφασμα-πολυμερές
- Κεραμική θωράκιση
- Σύστημα βιομιμητικού υλικού
- Ενσωματωμένη πολυστρωματική σύνθετη θωράκιση

1.2.3.4 Προστασία από μαχαίρωμα και ακίδες

Ο αριθμός των τρομοκρατικών επιθέσεων έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Υπήρξαν 500.000 περιπτώσεις που αναφέρθηκαν κατά την περίοδο 2009–2015 παράνομης μεταφοράς μαχαιριών [79]. Η θωράκιση σώματος με αντοχή σε μαχαιρώματα θα πρέπει να παρέχει προστασία έναντι τραυματισμού από διείσδυση λεπίδων, όπως μαχαίρια ή όπλα με αιχμηρή αιχμή, ενώ η θωράκιση προστασίας από ακίδες θα πρέπει να παρέχει προστασία από τραυματισμό από τη διείσδυση λεπίδων μαχαιριών χαμηλότερης ποιότητας και όπλων τύπου ακίδας. Ο σχεδιασμός πανοπλίας με ανθεκτικότητα στα μαχαίρια είναι βασικά διαφορετικός από αυτόν του αλεξίσφαιρου γιλέκου. Κατά συνέπεια, μπορεί να προστατεύσει από σφαίρες σε μικρότερο βαθμό,. Τα μαχαίρια και οι βελόνες έχουν πιο αιχμηρά σημεία από τις σφαίρες και απαιτούν διαφορετικό είδος κατασκευής υλικού και υφάσματος. Η θωράκιση σώματος Antiknife έχει σχεδιαστεί για προστασία από μαχαιρώματα από το μπροστινό, το πίσω μέρος και το πλάγιο κάθετο.

Η ανθεκτική στο μαχαίρωμα θωράκιση είναι μια εύκαμπτη θωράκιση, που χρησιμοποιεί πολυστρωματικά υφάσματα από διαφορετικές ίνες, για παράδειγμα, πολυεστέρα, νάιλον, Cardura®, Coolmax®, Gore-Tex® και Kevlar®. Το γιλέκο θα επιτρέψει στη λεπίδα του μαχαιριού να περάσει ανάμεσα στις κλωστές του υφάσματος χωρίς να το κόψει και η άσκηση αρκετής πίεσης στη λεπίδα του μαχαιριού απορροφά την ενέργεια μαχαιρώματος καθώς περνά μέσα από το στρώμα του γιλέκου. Γίνεται προσπάθεια να αναπτυχθεί εύκαμπτη θωράκιση σώματος χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους θερμοπλαστικών μεμβρανών για τον εμποτισμό του υφάσματος Kevlar [80,81].

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα για τη δοκιμή της απόδοσης των θωρακίσεων, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η συμμόρφωσή τους με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τα επίπεδα προστασίας της θωράκισης σώματος. Τα πιο κοινά είναι το πρότυπο NIJ, τα πρότυπα θωράκισης σώματος HOSDB για την αστυνομία του Ηνωμένου Βασιλείου και τα γερμανικά πρότυπα Protection Class - SK1 [82,83]. Σύμφωνα με την ταξινόμηση της θωράκισης σώματος με αντοχή σε μαχαιρώματα, τρία επίπεδα προστασίας παρουσιάζονται σε αυτό το πρότυπο. Το πρότυπο για το επίπεδο προστασίας εξαρτάται από τη μέγιστη διείσδυση του αντικειμένου στη θωράκιση σώματος (λιγότερο από 7 mm και για υψηλή ενέργεια 20 mm). Οι επιδόσεις έχουν αξιολογηθεί ως προς το μέγεθος της διείσδυσης που εμφανίζεται ως συνάρτηση των ενεργειών πρόσκρουσης. Για θωράκιση χαμηλής προστασίας, η

ενέργεια κρούσης είναι 36 J, για το δεύτερο επίπεδο είναι 50 J και η υψηλή ενέργεια είναι 65 J. Η τυπική τερματική ταχύτητα επίθεσης με μαχαίρι είναι 6–10 m/s. Η κρουστική φόρτιση στο μαχαίρι πλησιάζει τα 1000 N.

Στα τελευταία πρότυπα του Ηνωμένου Βασιλείου του 2017, υπάρχουν δύο επίπεδα: E1—μέγιστη διείσδυση 8 mm ή μικρότερη και μόνο μία διείσδυση 9 mm για ενέργεια 24–33 J και E2—μέγιστη διείσδυση 20 mm ή κάτω και μόνο μία διείσδυση 30 mm για ενέργεια επίπεδο 36–50 J. Οι ακίδες αξιολογούνται μόνο στο ενεργειακό επίπεδο E1 και δεν επιτρέπονται διεισδύσεις.

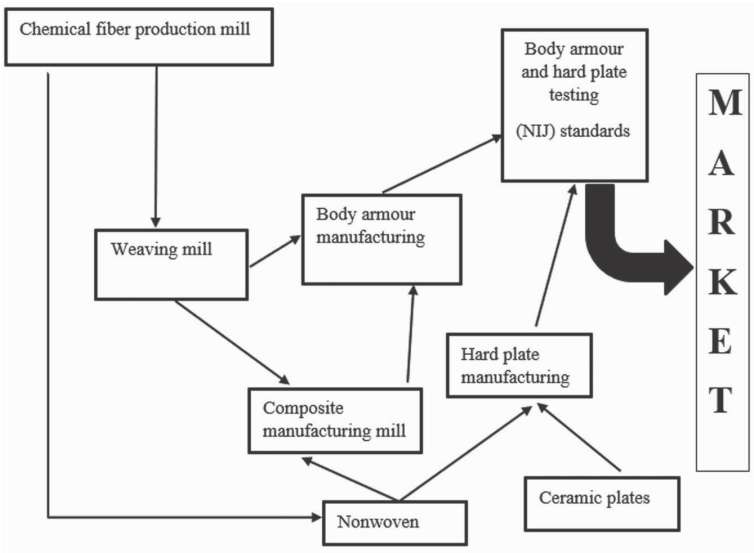
Αναπτύχθηκε ένας άλλος τύπος σχεδίασης θωράκισης σώματος, η κρυφή προστατευτική θωράκιση σώματος [84] για προστασία από αυτοσχέδια όπλα και πιστόλια και ακατέργαστα όπλα μαχαιρώματος/σχισμής, όπως κοπή πάγου, λεπίδα ή κοπή.

Κεφάλαιο 2ο Υλικά στην κατασκευή προσωπικής θωράκισης

Από τον 15ο αιώνα, η εφαρμογή προστατευτικού υφάσματος ως κύριο υλικό για την θωράκιση του σώματος χρησιμοποιούσε μεταξωτό ύφασμα. Η αύξηση της ζήτησης για τις προηγμένες ίνες για την προστατευτική θωράκιση σώματος έχει επηρεαστεί άμεσα από τα σύγχρονα σχέδια θωράκισης, τα οποία με τη σειρά τους πέτυχαν την αύξηση της ενέργειας των βλημάτων. Αυτό το κεφάλαιο εξοικειώνει με τις αναλύσεις των διαφορετικών τύπων υφαντικών ινών και τις φυσικές, μηχανικές, χημικές, θερμικές, τριβολογικές ιδιότητές τους που καθορίζουν την απόδοση και την άνεση της θωράκισης. Επίσης, επιτρέπει τον προσδιορισμό του κόστους σε συνδυασμό με τις προστατευτικές δυνατότητες θωράκισης σώματος και την αξιολόγηση κινδύνου.

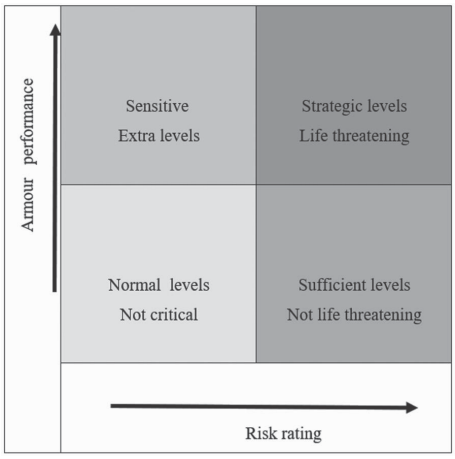
Στη σύγχρονη εποχή, οι υφαντικές ίνες βρήκαν αυξανόμενες εφαρμογές στον τομέα των ρούχων άνεσης, και των τεχνικών και έξυπνων υφασμάτων. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, γεωυφάσματα, αθλητικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, ιατρικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, transtextiles, προστατευτικά υφάσματα και ούτω καθεξής, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης έως και 8%. Η εφαρμογή υφασμάτινου πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες προέκυψε ως καινοτόμα λύση στο σχεδιασμό προστατευτικών συστημάτων θωράκισης, όπως αλεξίσφαιρες πλάκες.

Το διάγραμμα ροής της βιομηχανίας θωράκισης σώματος, που δίνεται στην εικόνα 2.1, ξεκινά από το χημικό μύλο που παρέχει συνεχείς κλωστές πολλαπλών νημάτων ή μη συνεχείς ίνες σε ένα υφαντικό ή μη, μύλο, για την κατασκευή υφασμάτων. Τόσο τα υφαντά όσο και τα μη υφασμένα προϊόντα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των θωρακίσεων για αλεξίσφαιρα γιλέκα, γιλέκα με αντοχή σε μαχαιρώματα, γιλέκα με χημική αντίσταση, γιλέκα με αντοχή στη θερμότητα κ.λπ. Οι σκληρές πλάκες παράγονται από τα υφάσματα ως πολυστρωματικό σύνθετο πολυμερές ενισχυμένο με ύφασμα χρησιμοποιώντας τα ίδια υφάσματα ή κεραμικές πλάκες ή συνδυασμό διαφορετικών υλικών.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα ροής προϊόντων βιομηχανίας αλεξίσφαιρων γιλέκων

Τα δείγματα της θωράκισης πρέπει να συμμορφώνονται με τις τυπικές δοκιμές και τους κανονισμούς για κάθε τύπο προστασίας που πρόκειται να πιστοποιηθεί. Η απόδοση της θωράκισης θα καθορίσει το κόστος της και θα συνδυαστεί με τις προστατευτικές της ικανότητες και την αξιολόγηση κινδύνου. Η καθορισμένη απόδοση θωράκισης εξαρτάται από την ένταση της απειλής και την επίπτωση στο χρήστη. Η απόφαση του επιπέδου απόδοσης της προστατευτικής θωράκισης σε ένα απλό μοντέλο φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Μοντέλο για τη στρατηγική της επιλογής προστατευτικής θωράκισης

Η αρχιτεκτονική της προστατευτικής θωράκισης με συνδυασμό ινών και ιδιοτήτων άλλων υλικών έχει ως αποτέλεσμα τα προϊόντα να ανταποκρίνονται επαρκώς στις απειλές και να επιτυγχάνουν την ισορροπία μεταξύ άνεσης και ασφάλειας. Νέες ίνες και συστήματα αρχιτεκτονικής θα οδηγήσουν στις νέες κατευθύνσεις για θωράκιση μικρού βάρους και υψηλότερων επιπέδων ασφάλειας.

2.1 Υφαντουργικές ίνες

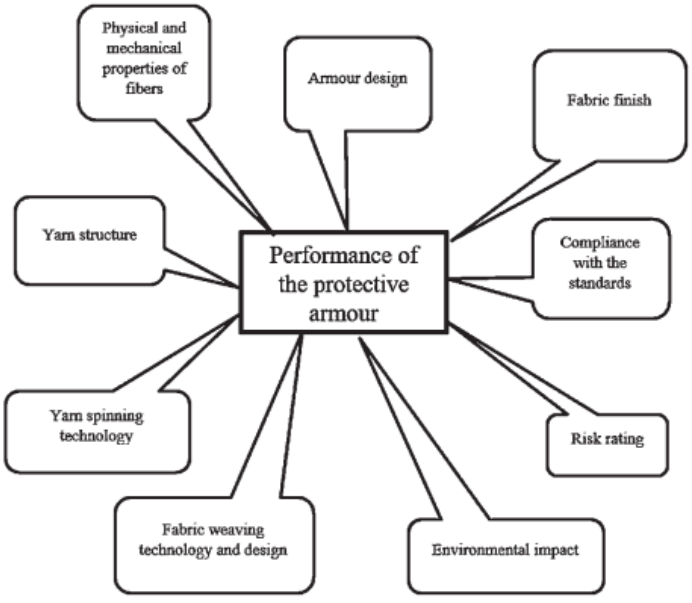
Τα νήματα κατασκευάζονται από ίνες που μπορεί να είναι:

- Κοντές
- Μακριές μη συνεχείς ίνες
- συνεχείς
- Νανοΐνες

Η διάταξη των ινών στο σώμα του νήματος τονίζει τις φυσικές, μηχανικές, θερμικές και άλλες ιδιότητες του νήματος.

Το προστατευτικό ύφασμα Protective Fabric (PF), το οποίο μπορεί να είναι υφαντό, πλεκτό, πλεγμένο και ούτω καθεξής, μπορεί να κατασκευαστεί από νήματα που έχουν σχεδιαστεί με διαφορετικούς τρόπους για να σχηματίσουν ένα φύλλο υφάσματος. Οι μηχανικές, χημικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες των PF είναι άμεση συνάρτηση των ιδιοτήτων των ινών και των νημάτων και των προδιαγραφών και της δομής του υφάσματος. Όλα τα παραπάνω έχουν επιτακτική επιρροή στην απόδοση μιας θωράκισης. Η ταχύτητα παραμόρφωσης βρέθηκε ότι είναι συνάρτηση του συντελεστή Young και της πυκνότητας της ίνας και έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της προστατευτικής θωράκισης (PAP).

Η εικόνα 2.3 απεικονίζει τον συνδυασμό των στοιχείων που καθορίζουν τα στοιχεία του σχεδιασμού της θωράκισης και κατά συνέπεια επηρεάζουν την απόδοσή του.



Εικόνα 2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το PAP

Για να κατασκευαστεί μια μαλακή θωράκιση με χαμηλότερο κόστος με την υψηλότερη ικανότητα εξυπηρέτησης και άνεσης, απαιτείται η επιλογή του κατάλληλου σχεδίου θωράκισης, του υλικού και της επιλογής της διαδικασίας κατασκευής. Η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί τις λειτουργικές ιδιότητες και τα οικονομικά προβλήματα θα πρέπει να ανακαλυφθεί. Οι ίνες είναι διαθέσιμες είτε με τη μορφή μικροϊνών είτε με τη μορφή νανοϊνών.

Το τελικό ύφασμα για υψηλή PAP εξαρτάται από τις ακόλουθες ιδιότητες των υφαντικών ινών:

- Φυσικές ιδιότητες

1. Απορρόφηση υγρασίας
2. Μορφολογικές ιδιότητες
3. Δυνατότητα αποικοδόμησης
4. Πυκνότητα

- Μηχανικές ιδιότητες

1. Αντοχή
2. Διατμητική αντοχή
3. Ελκιμότητα
4. Μέτρο Young
5. Αντοχή σε ερπυσμό
6. Αντοχή κόπωσης

- Θερμικές ιδιότητες

1. Συντελεστής θερμικής διαστολής
2. Θερμική αγωγιμότητα
3. Αναφλεξιμότητα ινών
4. Θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού
5. Σημείο τήξης

- Χημικές ιδιότητες

1. Χημική αντίσταση

- Ηλεκτρικές ιδιότητες

1. Χωρητικότητα

2. Διηλεκτρική σταθερά
3. Διηλεκτρική αντοχή
4. Ηλεκτρική αγωγιμότητα
5. Πιεζοηλεκτρικές σταθερές

- Ιδιότητες κατασκευής (προσαρμοστικότητα)

1. Ευκολία κατεργασίας
2. Ικανότητα σκλήρυνσης
3. Σχηματισιμότητα
4. Τεχνικές συνένωσης

- Περιβαλλοντική επίπτωση
- Επίπτωση ακτινοβολίας
- Κόστος

2.1.1 Κατηγορίες ινών

Οι υφαντικές ίνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες σύμφωνα με τον El Messiry [85]:

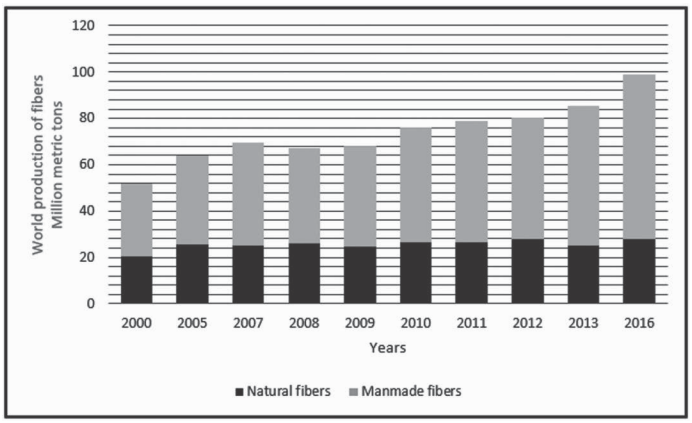
Φυσικές ίνες

- Φυτικές ίνες: Βαμβάκι, Γιουτ, Λινάρι, Κάνναβη, Ράμι, Κενάφ, Σιζάλ, Ίνες Καρύδας κ.λπ.
- Ζωικές ίνες: Μαλλί, Μετάξι, Αλπακά, Καμήλα, Λάμα, Μοχέρ, Κασμίρ, Ανγκόρα κ.λπ.
- Ορυκτές ίνες: Αμίαντος
- Ανόργανες ίνες: Glassand Carbon.

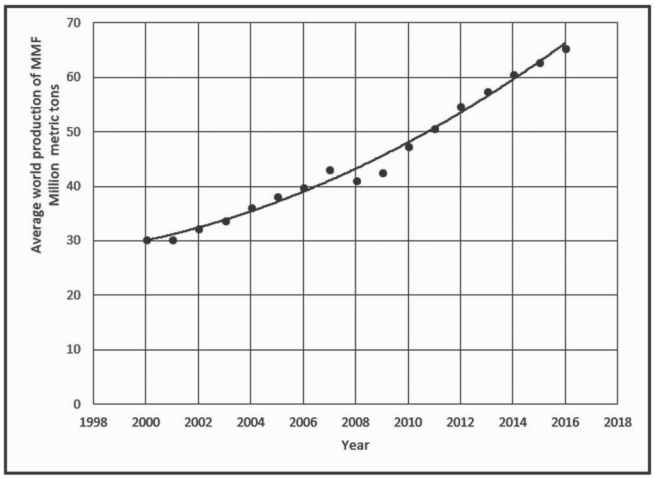
Τεχνητές ίνες - Man Made Fiber (MMF)

- Αναγεννημένες ίνες κυτταρίνης: ρεγιόν βισκόζης, οξική κυτταρίνη, μοντάλ, μπαμπού, καουτσούκ, lyocell
- Αναγεννημένες πρωτεϊνικές ίνες: Καζεΐνη, αζλον
- Συνθετικές ίνες: Πολυεστέρας, νάιλον, ακρυλικό, vectran, kevlar, συνθετικό καουτσούκ, χλωριούχο πολυβινύλιο, ελαστίνη κ.λπ.

Η εικόνα 2.4 απεικονίζει την παραγωγή της φυσικής και χημικής ίνας τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η οποία δείχνει την τάση μείωσης της πρώτης, 26,5 εκατομμύρια μετρικούς τόνους,[86-91] και τη συνεχή αύξηση της ζήτησης για ανθρωπογενείς ίνες (MMF). Η παραγωγή ινών το 2016 έφτασε τους 99 εκατομμύρια τόνους όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5.

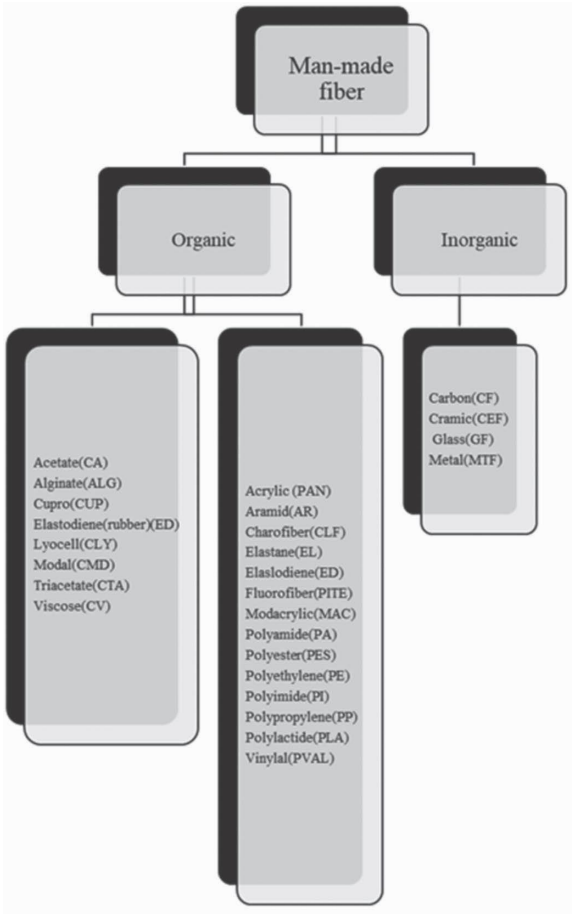


Εικόνα 2.4 Παγκόσμια παραγωγή ινών [85]



Εικόνα 2.5 Παγκόσμια παραγωγή τεχνητών ινών [85]

Οι τεχνητές ίνες MMF μπορούν να ταξινομηθούν ως οργανικές και ανόργανες. Η εικόνα 2.6 δείχνει τη γενική ταξινόμηση των MMF.



Εικόνα 2.6 Γενική ταξινόμηση τεχνητών ινών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε PF απαιτεί μια ίνα ή ένα μείγμα με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές για να εκπληρώσει την τελική του χρήση.

2.2 Ιδιότητες ινών

Έχει δοθεί αυξημένη έμφαση στην ανάπτυξη βελτιωμένων ελαφρών συστημάτων θωράκισης σώματος, καθώς και στην ανάπτυξη νέων υλικών θωράκισης υψηλής απόδοσης [92]. Οι μελέτες των βαλλιστικών PF έχουν ασχοληθεί με το μικρό μέγεθος αντί για το macro μέγεθος, από τις κλίμακες μήκους υφάσματος και νήματος έως την κλίμακα μήκους υπο-ινών που επέτρεψε τη δημιουργία των σχέσεων μεταξύ της αντίστασης διείσδυσης του υφάσματος και διαφόρων φαινομένων σε επίπεδο ινών, όπως η τριβή ινών-ινών, οι εγκάρσιες ιδιότητες των ινών, η μορφολογία των ινών , ρεολογικές ιδιότητες των υφαντικών ινών, η στοχαστική φύση της αντοχής των ινών και η πυκνότητα συσκευασίας των ινών.

Το πρωταρχικό πρόβλημα που πρέπει να λυθεί είναι η επιλογή του κατάλληλου υλικού για να ληφθεί το τελικό σχεδιασμένο PF που ικανοποιεί τις απαιτήσεις PAP με το ελάχιστο κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια ζωής της προστατευτικής θωράκισης.

Γενικά, οι ίνες μπορούν να ταξινομηθούν ως νήματα με καθορισμένο μήκος ή συνεχή νήματα με απροσδιόριστο μήκος. Οι περισσότερες από τις φυσικές ίνες έχουν καθορισμένο μήκος, εκτός από το μετάξι, ενώ οι συνθετικές ίνες είναι συνεχείς ίνες και μπορούν να συρραφούν όταν χρειάζεται. Έτσι, η πρώτη ιδιότητα που περιγράφει τις ίνες είναι το μήκος της ίνας. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που καθορίζουν τη γεωμετρία της ίνας, για παράδειγμα, η διάμετρος της ίνας, το σχήμα διατομής της ίνας, οι πτυχές της ίνας, ο λόγος διαστάσεων της ίνας (*l/d*), το μήκος της ίνας και η λεπτότητα της ίνας. Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του υφάσματος.

- **Διάμετρος ίνας**

Το εύρος της διαμέτρου της ίνας (d_f) ποικίλλει από μικρόμετρα σε νανόμετρα. Καθορίζει τις ακόλουθες ιδιότητες της ίνας, του νήματος και του υφάσματος: τριβή, ακαμψία κάμψης Bending Radius (BR), ερπυσμό, ελαστικότητα, όγκο, πορώδες, θερμική συμπεριφορά, ταχύτητα μετάβασης υδρατμών, απορρόφηση υγρασίας, ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.λπ. Η διάμετρος της κλωστής από πολλαπλά νήματα (d_y), που αποτελείται από n_f νήματα με πυκνότητα (ρ_f), αριθμός νημάτων (tex_f) και κλάσμα όγκου ινών (V_f), είναι:

$$d_y = 0.00357[\frac{n_f tex_f}{\rho_f V_f}]^{0.5} \quad (1)$$

Η θεωρητική τιμή για νήματα με τετραγωνικό σχήμα είναι V_f = 0,785, ενώ για εξαγωνικές διατομές ινών είναι V_f =0,906, [93,94]

Η κλωστή πολλαπλών νημάτων έχει ένα αριθμό συνεχών νημάτων ανάλογα με τον αριθμό τους. Η κλωστή πολλαπλών νημάτων Kevlar 29 από 44 tex μπορεί να έχει από 120 έως 267 νήματα με διάμετρο νήματος μεταξύ 10 και 18 μ(μικρά). Για παράδειγμα, η διάμετρος του Kevlar 49 d_f είναι 10–11,[93], του PAN d_f= 6–8,[93], του Pitch d_f=10, του E-glass d_f =10, και του Nextel d_f =11 μ. Για ίνες Kevlar, Nomex, άνθρακα, πολυαιθυλένιού υψηλής απόδοσης και πολυβενζοξαζόλης - Polybenzoxazoles (PBO), οι ιδιότητες εφελκυσμού τους εξαρτώνται από τη διάμετρο της ίνας του νήματος.

- **Σχήμα της διατομής της ίνας**

Στις MMF, η διάμετρος είναι σταθερή σε όλο το μήκος του νήματος, αλλά μπορεί να έχει διάφορα σχήματα ανάλογα με την τελική χρήση της ίνας. Το σχήμα της διατομής των MMF μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας διάφορα σχήματα κλωστής για να ληφθεί η διατομή που ταιριάζει σε μια

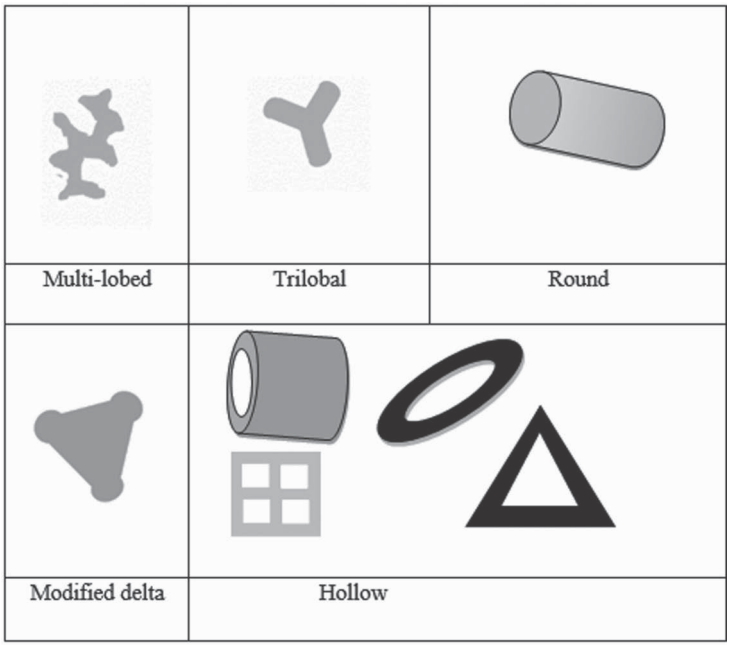
συγκεκριμένη εφαρμογή. Η εικόνα 2.7 παρουσιάζει τα σχήματα διατομής ορισμένων MMF. Τα σχήματα της διατομής των ινών επηρεάζουν επίσης τις ακόλουθες ιδιότητες ινών:

- Επιφάνεια ινών
- Ακαμψία κάμψης ινών
- Αντοχή σε ίνες
- Απορρόφηση ινών-νερού
- Ιδιότητες τριβής ινών
- Αντοχή στην τριβή των ινών.

Το προφίλ της διατομής παίζει έντονο ρόλο στις μηχανικές, θερμικές και πολλές άλλες ιδιότητες των νημάτων.

Η αντοχή του υφάσματος, η αντοχή σε σχίσιμο, η αντοχή σε διάτμηση, η αντίσταση διάτρησης, η επιφανειακή τριβή του υφάσματος και οι θερμικές ιδιότητες είναι συνάρτηση του σχήματος της διατομής της ίνας. Το σχήμα της διατομής της ίνας έχει πιο εμφανή επίδραση στο σχίσιμο των υφασμάτων παρά στην αντοχή στη θραύση [95,96].

Οι ιδιότητες θερμικής άνεσης μιας προστατευτικής θωράκισης, δηλαδή η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική απορρόφηση και η θερμική αντίσταση, οι υδρατμοί και η διαπερατότητα του αέρα των υφασμένων υφασμάτων επηρεάζονται επίσης από τα διαφορετικά σχήματα διατομής των ινών. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται στα υφάσματα που υφαίνονται με κοίλες ίνες σε σύγκριση με εκείνα που υφαίνονται με συμπαγείς ίνες. Ως αποτέλεσμα, η θερμομονωτική ιδιότητα των υφασμάτων που παράγονται από κοίλες ίνες είναι χαμηλότερη [97].



Εικόνα 2.7 Σχήματα διατομής νήματος [96]

- **Μήκος ίνας**

Οι MMF, είτε ως συνεχές νήμα (L = ∞) είτε ως τμήματα νήματος, κατασκευάζονται συνήθως με μία από τις ακόλουθες μεθόδους κλώσης: υγρή, ξηρή, τήξη, περιδίνηση γέλης και ηλεκτροϊνοποίηση. Οι ίνες που έχουν περιορισμένο ή πεπερασμένο μήκος κλώθονται σε συνεχή νήματα και στη συνέχεια προχωρούν στην ύφανση, το πλέξιμο ή το πλέξιμο σε ύφασμα ή μετατρέπονται απευθείας σε μη υφασμένο ύφασμα.

2.3 Μηχανικές Ιδιότητες

Οι τεχνητές υφαντικές ίνες είναι ιξωδοελαστικά υλικά, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τον τρόπο παραμόρφωσης του PF υπό τα ασκούμενα φορτία, σταθερά ή δυναμικά. Η αντοχή σε εφελκυσμό των MMF είναι η συνάρτηση του πολυμερούς τους, του βαθμού πολυμερισμού και της διάταξης του πολυμερούς της μοριακής δομής.

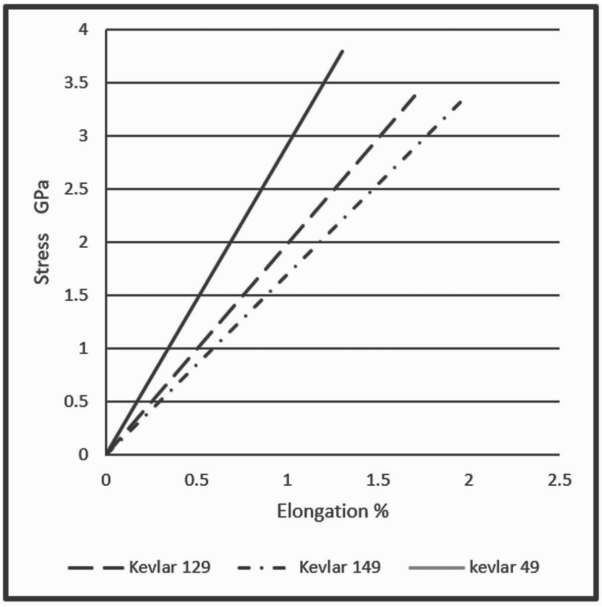
Τα υλικά θωράκισης υπόκεινται σε διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους κατά τη διάρκεια της ζωής τους που μπορεί να προκαλέσουν επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Έτσι, η επιλογή του υφαντικού υλικού για τα PF θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις αναμενόμενες καταστάσεις. Στα υφάσματα που χρησιμοποιούνται για την προστασία από τη θερμότητα, οι μηχανικές τους ιδιότητες και η διατήρηση της αντοχής τους δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία εργασίας και το

χρόνο έκθεσης στη θερμότητα. Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι:

1. Φορτίο θραύσης «N» ή αντοχή (g/den, g/tex, N/tex ή MPa),
2. Ποσοστό επιμήκυνσης θραύσης,
3. Έργο θραύσης (Joule, J/m^2),
4. Αρχικός συντελεστής, συντελεστής ελαστικότητας (g/den, g/tex, N/texor GPa),
5. Συντελεστής εργασίας,
6. Ελαστική ανάκτηση,
7. Ερπυσμός,
8. Όριο κόπωσης (MPa),
9. Δύναμη κοπής (N, N/tex ή MPa),
10. Συντελεστής τριβής,
11. Κατακράτηση θερμότητας αντοχής, και
12. Ευφλεκτότητα.

- **Αντοχή ινών**

Τα PF υπόκεινται σε διάφορους τύπους δυνάμεων κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας τους. Αυτές οι δυνάμεις διαφέρουν ανάλογα με τον σχεδιασμό της θωράκισης και την τελική χρήση της. Αντίστοιχα, οι μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Για τις οργανικές MMF, οι ιδιότητες εφελκυσμού τους είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας έκθεσης, οι αυξανόμενες θερμοκρασίες μειώνουν το μέτρο ελαστικότητας των ινών, την αντοχή και αυξάνουν την επιμήκυνση θραύσης. Για παράδειγμα, το Kevlar 29 έχει μείωση αντοχής από 275,79 σε 262,0 MPa μετά από έκθεση στους 160°C για διάρκεια 500 ωρών και η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 250°C μειώνει την αντοχή του στα 106,87 MPa όταν εκτίθεται για 80 ώρες [98]. Το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται κατά 25% όταν η θερμοκρασία αυξάνεται από 30°C σε 200°C. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης των ινών Kevlar απεικονίζει τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων αντοχής σύμφωνα με τη μοριακή δομή της ίνας, (εικόνα 2.8), αλλά η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης της ίνας είναι σχεδόν μια ευθεία γραμμή [99].



Εικόνα 2.8 Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης ινών Kevlar [99]

Οι μηχανικές ιδιότητες του νήματος επηρεάζονται από διάφορες άλλες παραμέτρους, όπως μηχανικές ιδιότητες, ιδιότητες τριβής και προδιαγραφές νημάτων και δομικές παραμέτρους των ινών.

Το ύφασμα είναι ένα φύλλο 2D ή 3D που σχηματίζεται από τη σύμπλεξη δύο ή περισσότερων σετ νημάτων. Οι συμπλέξεις του νήματος θα δώσουν στο ύφασμα την ακεραιότητά του. Οι μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των ινών, του αριθμού των νημάτων, των ιδιοτήτων τριβής μεταξύ των νημάτων, της επιφανειακής πυκνότητας του υφάσματος και της στεγανότητας και του σχεδίου ύφανσης του υφάσματος. Για παράδειγμα, οι ιδιότητες εφελκυσμού των MMF επηρεάζονται από την τιμή του ρυθμού επέκτασης φορτίου, επομένως, θα αντανακλάται στο ύφασμα που κατασκευάζεται από αυτά. Αποκαλύφθηκε ότι το μέτρο του Young, η αντοχή σε εφελκυσμό, η μέγιστη καταπόνηση θραύσης και η σκληρότητα του υφάσματος Kevlar 49 αυξάνονται με την αύξηση του ρυθμού φορτίου-επέκτασης [100-101]. Υφαντά υφάσματα υψηλής αντοχής και σκληρότητας είναι ιδανικά υλικά για χρήση στη δομή και το σώμα συστήματα προστασίας όπου απαιτείται υψηλή απορρόφηση ενέργειας.

2.4 Ίνες Υψηλής Επίδοσης (High-Performance Fibers - HPF)

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών - Man Made Fiber (MMF) περιστρέφονται στη μοριακή τους δομή, η οποία μπορεί να διαταχθεί σε κρυσταλλική ή άμορφη. Οι αλυσίδες μορίων διατάσσονται κυρίως κατά μήκος του άξονα των ινών και συνδέονται με διαμοριακούς δεσμούς [102]. Οι HPF είναι οι τεχνικές ίνες που διαθέτουν υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, με χαμηλή πυκνότητα και είναι ικανές για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζουν χημική αντοχή, αντοχή σε τριβή, αντοχή σε κόπωση, θερμική αντίσταση και αντοχή στην κοπή. Οι HPF χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους αντοχή (3–7 GPa) και μέτρο του Young (50–400 GPa). Οι ιδιότητές τους τις καθιστούν ιδανικές για την κατασκευή βαλλιστικού PF και αντίστασης στο μαχαίρωμα εφαρμογές, χημική προστατευτική ενδυμασία, θωράκιση κατά εκρήξεων κ.λπ.

Αυτές οι ιδιότητες αποκτώνται μέσω του ισχυρού και συνεχούς αξονικού δεσμού και του εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους με μια γραμμική σειρά από ομοιοπολικά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα και δεσμούς υδρογόνου.

Οι HPF είναι πολυμερείς ίνες (οργανικό χημικό υλικό, Kevlar, Twaron, Technora, Zylon, M5, Nomex, Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE), Spectra, Dyneema) και άνθρακα. Οι ανόργανες HPF είναι κεραμικές ίνες βοριοπυριτικού γυαλιού και αλουμίνας (Nextel). Οι μέθοδοι για την κλώση των ινών MMF [99] δίνονται στον Πίνακα 2.1. Οι ίνες πολυμερούς μπορούν να κλωστούν σε ένα ή περισσότερα συστήματα, όπου το καθένα έχει ως αποτέλεσμα μια ίνα με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Η θεμελιώδης ακολουθία της κλώσης MMF ξεκινά με το μονομερές και προχωρά στον πολυμερισμό, την εξώθηση, το τέντωμα, τη θερμική πήξη και την εφαρμογή φινιρίσματος. Για την ηλεκτροϊνοποίηση, τα πολυμερή διαλύονται πλήρως στους κατάλληλους διαλύτες και στη συνέχεια χρησιμοποιείται υψηλή τάση για να δημιουργηθεί ένας ηλεκτρικά φορτισμένος πίδακας διαλύματος πολυμερούς. Το ηλεκτροστατικό πεδίο υπερνικά την επιφανειακή τάση του υγρού σταγονιδίων και οδηγεί στην εξάτμιση του διαλύτη, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μιας λεπτής ίνας που μπορεί να συλλεχθεί στον γειωμένο συλλέκτη. Για πολυμερή που είναι δύσκολο να διαλυθούν σε θερμοκρασία δωματίου, εισήχθη η ηλεκτροϊνοποίηση γέλης.

Πίνακας 2.1 Συστήματα κλώσης ινών MMF [100-102]

Ίνα	*Πολυμέρες*	*Μέθοδος δημιουργίας*	*Σύντομη περιγραφή*
Nylon	Polyamide	Melt	Κλώση τήγματος: είτε λιωμένο πολυμερές είτε σφαιρίδια πολυμερούς τήκονται μέσω του κλωστηρίου. Καθώς τα νήματα εξωθούνται, ψύχονται με αέρα ή αέριο
Vectran	Polyester	Melt	
Glass		Melt	
PET	Polyethylene terephthalate	Melt	

PBI	Polybenzimidazole	Dry	Ξηρή κλώση: το πολυμερές διαλύεται σε πτητικό διαλύτη και εξωθείται μέσω του κλωστηρίου. Το διάλυμα περνάει από μια διαδικασία ξήρανσης στον πύργο, όπου ο διαλύτης εξατμίζεται σε ένα ρεύμα ζεστού αέρα
PBO	Polybenzobisoxazole	Gel	Κλώση γέλης: το πολυμερές βρίσκεται σε κατάσταση «τζελ». Περνά από τη διάλυση πολυμερούς, την κλώση ενός διαλύματος, τη ζελατινοποίηση και την κρυστάλλωση, την εκχύλιση με διαλύτη. Οι ίνες αρχικά ξηραίνονται στον αέρα και μετά ψύχονται περαιτέρω σε λουτρό υγρού. Το διάλυμα του πολυμερούς στη συνέχεια εξωθείται και ψύχεται για να σχηματίσει ίνες που μοιάζουν με γέλη, ενώ ακολουθεί υπέρ-εξώθηση και απομάκρυνση του εναπομείναντος διαλύτη
Dyneema	Polyethylene	Gel	
Spectra	Polyethylene	Gel	
Kevlar	Aramid	Gel	
PAN		Gel	
Nomex	Aramid	Wet	Υγρή κλώση: χρησιμοποιείται ένας μη πτητικός διαλύτης για τη μετατροπή της πρώτης ύλης σε διάλυμα που εξωθείται μέσω του κλωστήρα και ο διαλύτης απομακρύνεται σε υγρό μέσο πήξης
PAN		Dry-jet-wet	Dry-jet-wet: το πολυμερές διαλύεται σε κατάλληλο διαλύτη για να παραχθεί το διάλυμα ινών. Αυτό το διάλυμα στη συνέχεια εξωθείται υπό θερμότητα και πίεση σε ένα μικρό διάκενο αέρα πριν εισέλθει σε λουτρό πήξης
PBI PEC PAN/PLA, etc.	Conducting polymers Polyethylene terephthalate Poly (2-hydroxyethyl methacrylate	Electrospinning	Ηλεκτροϊνοποίηση: έχει εφαρμοστεί κυρίως σε διαλύματα πολυμερών. Ωστόσο, έχει γίνει και επεξεργασία σε τήγμα. Υψηλή θετική τάση εφαρμόζεται σε ένα πολυμερές ρευστό, που συνήθως περιέχεται σε μια σύριγγα, σε σχέση με έναν γειωμένο συλλέκτη
PE PP PET	Polymers not properly solvent at room temperature: polyethylene, polypropylene, and polyethylene terephthalate	Gel-Electrospinning	Gel-electropinning: Το νήμα πολυμερούς σχηματίζεται με ηλεκτροϊνοποίηση σε υψηλή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το νήμα υφίσταται ηλεκτροστατικά καθοδηγούμενες διεργασίες

τραβήγματος και χτυπήματος σε υψηλή θερμοκρασία. (ΗΠΑ 2017/0101726A1)

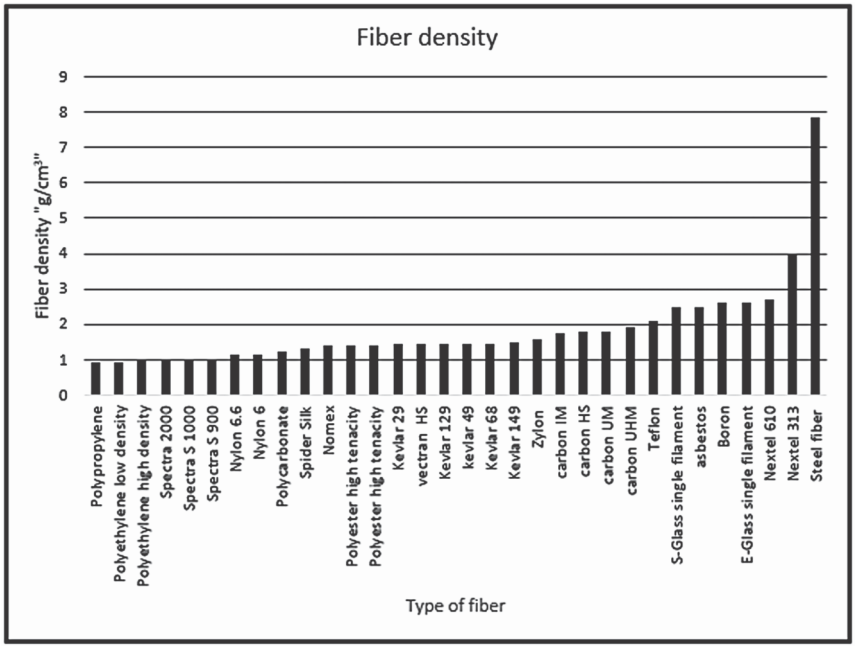
Τα HPF είναι αναπτυγμένα υφάσματα που χρησιμοποιούνται για ειδικές τεχνικές λειτουργίες, όπως θωράκιση αντοχής στη θερμότητα, προστατευτικό πανί χημικής αντοχής, γάντια αντίστασης κοπής, σκληρές πλάκες απορρόφησης ενέργειας κρούσης, ηλεκτρομαγνητική θωράκιση, γιλέκο επιβραδυντικό φλόγας, γιλέκο ασπίδας ακτινοβολίας, γιλέκο ανθεκτικό σε μαχαιρώματα, αλεξίσφαιρο γιλέκο, κ.λπ. Οι μηχανικές ιδιότητες των HPF δίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών [103-124]

Ίνα	***Πυκνότητα (g/cm^3)***	***Αντοχή (Gpa)***	***Μέτρο Young (Gpa)***	***Επιμήκυνση θραύσης (5)***	***Ειδική αντοχή [Gpa/(g/cm^3)]***	***Ειδικό μέτρο ελαστικότητας [GPa/(g/cm^3)]***
Asbestos	2.5	1.36	172	0.9	0.5	68.8
Boron	2.61	3.5	380	0.7	1.3	145.6
Carbon HM	1.8	3.7	387	0.95	2.1	215.0
Carbon HS	1.8	3.1	275	1.35	1.7	152.8
Carbon IM	1.75	4.45	296	1.5	2.5	169.1
Carbon UHM	1.9	2.65	633.5	0.45	1.4	333.4
Pan	1.8	5.6	300		3.1	166.7
E-Glass S. Filament	2.61	3.79	70.5	4.8	1.5	27.0
Kevlar 129	1.45	3.38	99	1.7	2.3	68.3
Kevlar 149	1.47	3.4	186	2	2.3	126.5
Kevlar 29	1.44	3.6	83	2.2	2.5	57.6
Kevlar 49	1.45	3.8	131	1.3	2.6	90.3
Kevlar 68	1.45	2.9	107	3.3	2.0	73.8
Kavlar MK2	1.45	4.52	84.62	4.52	3.12	58.35
Nextel 312	2.7	1.63	135	–	0.6	50.0
Nextel 440	3.05	2.1	189	–	0.7	62.0
Nextel 480	3.05	2.25	224	–	0.7	73.4
Nextel 610	3.96	2.27	328	–	0.6	82.8
Nomex	1.38	0.6	17	21–30	0.4	12.3
Nylon 6	1.14	0.0862	2.8	23–42	0.1	2.5
Nylon 66	1.13	0.092	3.3	26–32	0.1	2.9
Pbo “Zylon”	1.56	5.8	270	2.5	3.7	173.1
Polycarbonate	1.2	0.07	3	-125	0.1	2.5
Polyester	1.38	0.683	9.8	40	0.5	7.1
Polyester H. modulus	1.38	0.83	12.7	25	0.6	9.2
Polyethylene H. density	0.95	0.586	1.2	up to 500	0.6	1.3
Polyethylene L density	0.92	0.241	0.12	up to 1000	0.3	0.1

Polypropylene	0.9	0.7	6.8	up to 45	0.8	7.6
S-Glass single filament	2.485	4.826	85.6	5.4	1.9	34.4
Silk	1.36	0.65	4.3	25	0.5	3.2
Spectra 2000	0.97	3.25	116	2.9	3.4	119.6

Οι τεχνολογίες ινών έχουν φέρει επανάσταση στην απόδοση των ινών αναπτύσσοντας νέο υλικό για να πληροί ένα συγκεκριμένο κριτήριο για την προστατευτική θωράκιση, την αντοχή και την άνεση του χρήστη. Η εικόνα 2.9 απεικονίζει τη σύγκριση της πυκνότητας των ινών για διάφορους τύπους ινών που δείχνει ότι όλες οι ίνες έχουν πυκνότητα πολύ μικρότερη από τον χάλυβα.



Εικόνα 2.9 Πυκνότητα ινών [120]

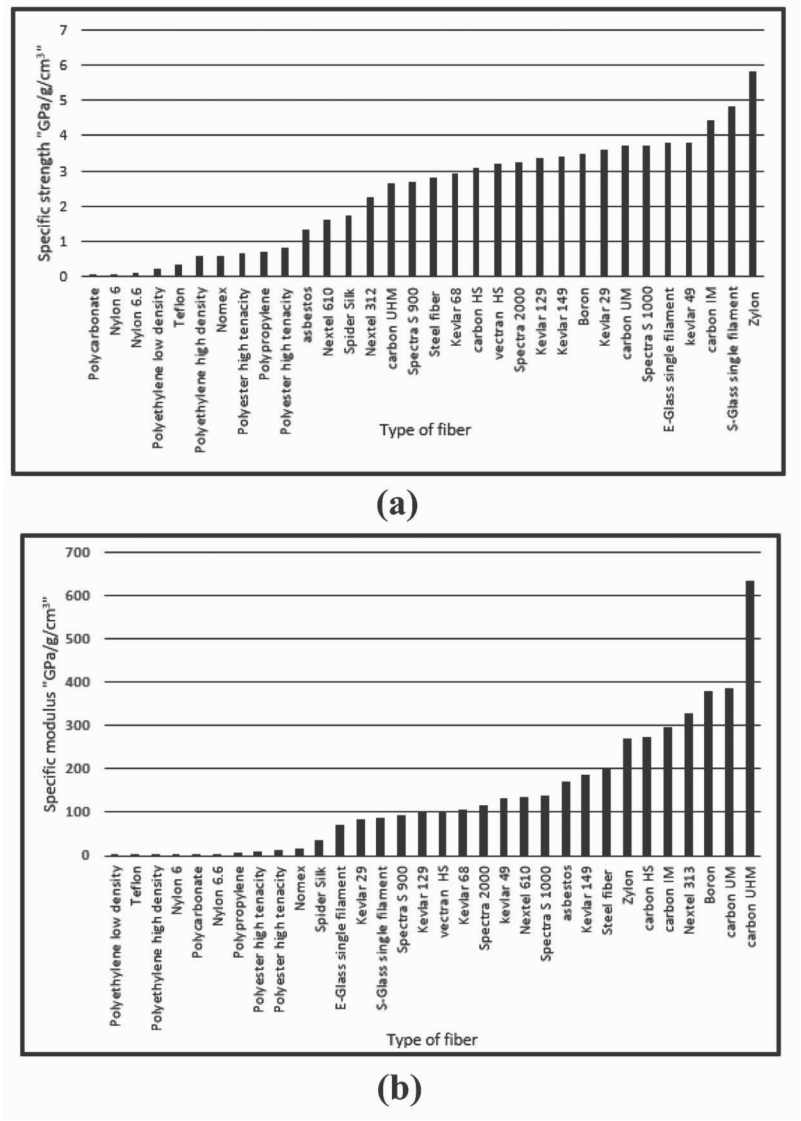
Η ειδική αντοχή και ο συντελεστής μέτρησης ορισμένων επιλεγμένων ινών απεικονίζονται στην εικόνα 2.10a,b, καταδεικνύοντας την ειδική αντοχή των ινών MMF και τον ειδικό συντελεστή τους.

Η εικόνα 2.11a,b δείχνει την ύπαρξη σχέσης μεταξύ της αντοχής και του συντελεστή ίνας και της πυκνότητας της ίνας [103].

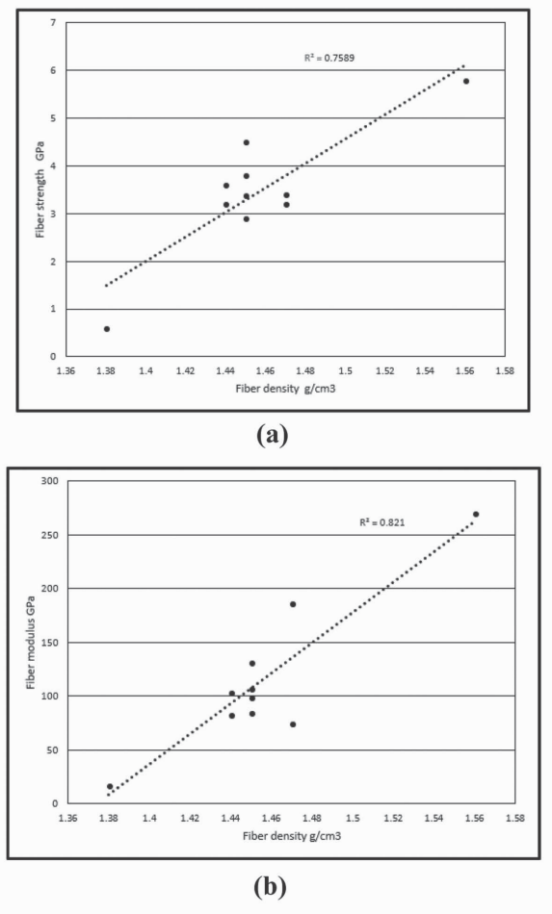
Για υψηλή απόδοση θωράκισης, οι ίνες έχουν υψηλή ειδική αντοχή και μέτρο, είναι προτιμότερο να έχουν μικρότερο βάρος θωράκισης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12, παρατηρείται μια γραμμική παλινδρόμηση.

Στην επιστήμη των ινών, μια ιδιότητα μιας ίνας μπορεί να βελτιωθεί αλλά συνοδεύεται από μείωση ενός άλλου χαρακτηριστικού, για παράδειγμα η αύξηση του βαθμού πολυμερισμού του πολυμερούς

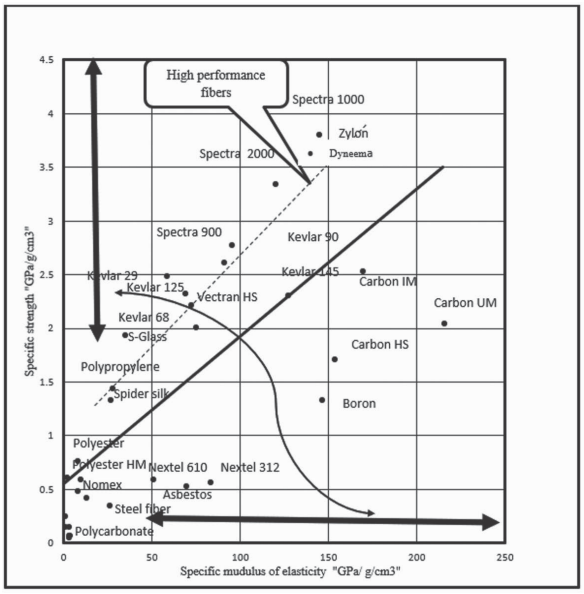
αυξάνει την αντοχή της ίνας αλλά χάνει τη σκληρότητά της [125]. Οι θεωρητικές μέγιστες τιμές για την αντοχή και το μέτρο που παρουσιάζονται ότι για πολλές πολυμερείς ίνες είναι ακόμα δυνατές οι ουσιαστικές βελτιώσεις στις ιδιότητες [126].



Εικόνα 2.10 Ιδιότητες ινών (α) ειδική αντοχή ινών και (β) ειδικό μέτρο ινών [103]



Εικόνα 2.11 Επίδραση της πυκνότητας των ινών (α) η αντοχή των ινών έναντι της πυκνότητας των ινών και (β) ο συντελεστής ίνας έναντι της πυκνότητας των ινών [103]



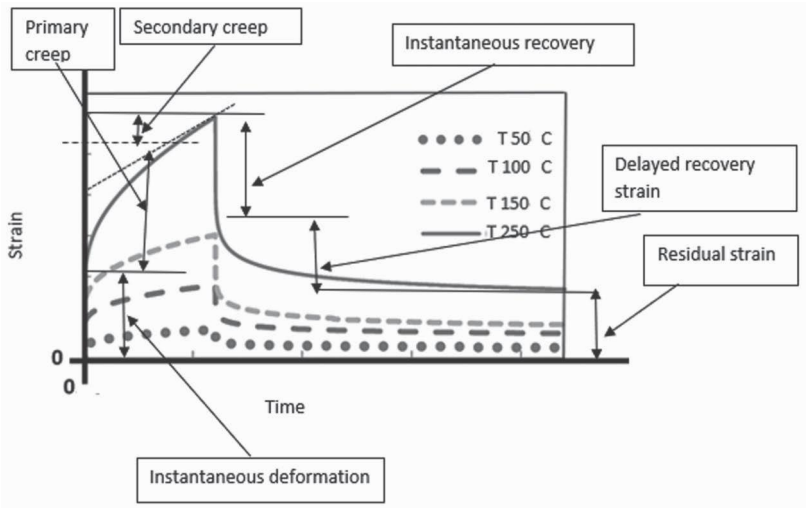
Εικόνα 2.12 Ειδική αντοχή έναντι συντελεστή ελαστικότητας HPF [125]

2.5 Έργο θραύσης ινών

Το έργο θραύσης των ινών είναι ένας δείκτης του κατά πόσο η ίνα είναι ισχυρή και αρκετά εκτάσιμη για να αντέχει την ξαφνική δύναμη κρούσης, καθορίζει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των υφασμάτων όταν υποβάλλονται σε βαλλιστική κρούση. Οι ιδιότητες κρούσης του PF εξαρτώνται από την ικανότητα της ύφανσης του υφάσματος να απορροφά την ενέργεια από μια κρούση υψηλής ταχύτητας. Η απορροφούμενη ενέργεια από το ύφασμα εξαρτάται από τη διάδοση της ταχύτητας του διαμήκους κύματος καταπόνησης υπό τη δύναμη κρούσης [127]. Η ταχύτητα διάδοσης της τάσης στις ίνες εξαρτάται από το ειδικό μέτρο ελαστικότητας τους. Η υψηλότερη ταχύτητα πρόσκρουσης βλήματος στις ίνες με χαμηλότερη ταχύτητα διάδοσης της τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση τάσης στην περιοχή της κρούσης. Έχει επιβεβαιωθεί ότι η ταχύτητα διάδοσης της παραμόρφωσης των νημάτων και των υφασμάτων είναι χαμηλότερη από αυτή των ινών, λόγω της πολύπλοκης δομής των νημάτων και των υφασμάτων, επομένως το κύμα παραμόρφωσης θα διαδίδεται διαφορετικά [128].

2.6 Ιδιότητες ερπυσμού ινών

Όταν το υφαντικό υλικό υπόκειται σε τάση, το υλικό παραμορφώνεται στιγμιαία και θα συνεχίσει να παραμορφώνεται υπό την ίδια τιμή τάσης. Η καταπόνηση κατά τη διάρκεια του ερπυσμού θα πάρει το σχήμα που απεικονίζεται στην εικόνα 2.13. Η παραμόρφωση ερπυσμού ξεκινά με τη στιγμιαία παραμόρφωση, μετά τη δευτερεύουσα παραμόρφωση και τελειώνει σε μια ζώνη που χαρακτηρίζεται από υψηλό ρυθμό παραμόρφωσης που ολοκληρώνεται με θραύση. Όταν αφαιρεθεί η τάση, το υλικό θα ανακτήσει την παραμόρφωσή του με την ίδια σειρά, καταλήγοντας σε μόνιμη παραμόρφωση. Τα φαινόμενα ερπυσμού ξεκινούν με τη στιγμιαία παραμόρφωση, ακολουθούμενη από δευτερεύουσα παραμόρφωση, και καθώς αφαιρείται το φορτίο, ακολουθεί η στιγμιαία ανάκτηση ακολουθούμενη από μόνιμη παραμόρφωση, η οποία διαφέρει με τον τύπο των ινών, τις προδιαγραφές του νήματος και του υφάσματος, τη θερμοκρασία και την εφαρμοζόμενη τάση. Η ιδιότητα ερπυσμού των MMF όταν χρησιμοποιείται σε ύφασμα λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία. Έχει βρεθεί ότι η καταπόνηση εκφράζεται ως συνάρτηση του χρόνου, για τις MMF: στο 70% του φορτίου θραύσης τους κυριαρχεί ένας πρωτεύων μηχανισμός ερπυσμού και σε υψηλότερα φορτία ένας δευτερεύων ερπυσμός γίνεται όλο και πιο σημαντικός [129].



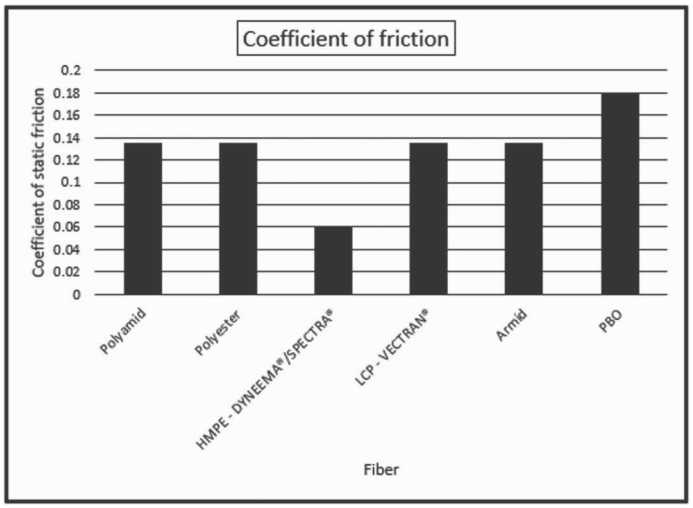
Εικόνα 2.13 Καμπύλη ερπυσμού – χρόνου. [129]

Η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, του πρωτογενούς ερπυσμού και της υπολειπόμενης καταπόνησης αυξάνονται όπως φαίνεται στην εικόνα 2.13. Οι ιδιότητες ερπυσμού των ινών p-αραμιδίου διαφέρουν από τις άλλες ίνες με υψηλό προσανατολισμό. Το Vectran HS (υγρό κρυσταλλικό πολυμερές) παραμορφώνεται σε ερπυσμό με ρυθμό τέσσερις φορές πιο αργό από το Kevlar 29 [130]. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις ιδιότητες ερπυσμού των ινών για θερμικές ασπίδες PF.

2.7 Τριβολογικές ιδιότητες ινών

Η τριβολογική ιδιότητα είναι μία από τις ιδιότητες που επηρεάζουν όλες τις μηχανικές ιδιότητες των νημάτων και των υφασμάτων καθώς και τις παραμέτρους επεξεργασίας. Η ιδιότητα τριβής των ινών διαφέρει από τη μεταλλική τριβή, επομένως οι ίνες στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι ομαλές ή ευθείες, και συνεπώς, οι δυνάμεις τριβής (δυνάμεις συνοχής) μπορούν να ενεργοποιηθούν κάτω και από μη κανονικό φορτίο.

Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από τον αριθμό των ινών, τη μορφολογία της επιφάνειας των ινών, την πτυχή της ίνας, το σχήμα διατομής της ίνας και το φινίρισμα των ινών. Η εικόνα 2.14 δίνει τον συντελεστή τριβής για ορισμένες ίνες [131]. Ο συντελεστής τριβής (μ) του Vectran είναι 0,12–0,15 [132] όπως για τα περισσότερα HPF, εκτός από τις ίνες PBO, οι οποίες πέτυχαν υψηλότερο συντελεστή τριβής (μ) 0,18.



Εικόνα 2.14 Συντελεστής τριβής HPF [131]

Ο συντελεστής τριβής των ινών, των νημάτων και των υφασμάτων είναι αρκετά διαφορετικός. Ο συντελεστής τριβής του νήματος εξαρτάται από τον τύπο ίνας, την προδιαγραφή του νήματος, τις δομικές παραμέτρους του νήματος, την πυκνότητα συσκευασίας ινών και τον παράγοντα συστροφής, ενώ ο συντελεστής τριβής του υφάσματος εξαρτάται από τον τύπο ίνας, την προδιαγραφή νήματος, το σχέδιο ύφανσης, την πυκνότητα συσκευασίας, τον παράγοντα κάλυψης υφάσματος , τη στεγανότητα του υφάσματος και το ποσοστό πτύχωσης. Γενικά, ο συντελεστής τριβής του υφάσματος είναι υψηλότερος από τον συντελεστή τριβής ινών λόγω των δομικών παραμέτρων του νήματος και της τραχύτητας της επιφάνειας του υφάσματος. Αυτό σχετίζεται με τη μεταβλητότητα στη μορφολογία της επιφάνειας του υφάσματος κατά την εφαρμογή μιας δύναμης τριβής.

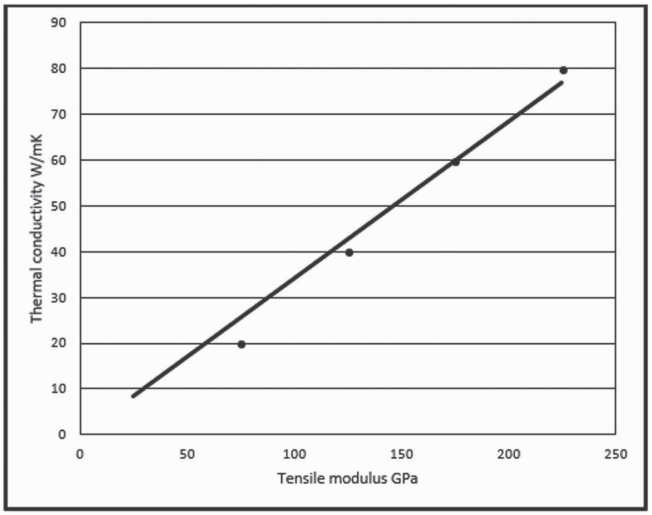
2.8 Θερμικές ιδιότητες ινών

Η θερμική αντίσταση είναι η κρίσιμη ιδιότητα του PF που χρησιμοποιείται για πυροσβέστες και ασπίδες θερμότητας για να κρατά τη θερμότητα έξω αλλά και να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του χρήστη. Βρέθηκε ότι οι θερμικές αγωγιμότητες (k) των περισσότερων πολυμερών υλικών είναι χαμηλότερες από αυτές των μετάλλων, ανάλογα με τη μοριακή δομή των ινών. Τα άμορφα πολυμερή είναι μικρότεροι ημιαγωγοί [132]. Όμως, για παράδειγμα, τα πολυμερή υλικά υψηλής κρυσταλλοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των ινών πολυαιθυλενίου Polyethylene (PE) υψηλής αντοχής και των ινών πολυπαρα-φαινυλενίου-βενζο-δις-οξαζόλης (PBO) υψηλής αντοχής, είναι γνωστό ότι διαθέτουν υψηλή τιμή (k) όπως αυτή των μετάλλων.

Η τιμή (k) των πολυμερών ινών στην κατεύθυνση της ίνας εξαρτάται από την κρυσταλλικότητα, τον προσανατολισμό, το μέγεθος των κρυστάλλων, το μήκος των μοριακών αλυσίδων, τα χημικά σημεία γεφύρωσης και τις μορφολογίες που αποτελούνται από κρύσταλλο και άμορφο [133,134]. Η τιμή της

θερμικής αγωγιμότητας (k) προς την κατεύθυνση της μοριακής αλυσίδας του PE, του τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου και του πολυπροπυλενίου αυξάνεται με την αυξανόμενη κρυσταλλικότητα και τον προσανατολισμό του κρυστάλλου.

Έτσι, για τα HPF η θερμική τους αγωγιμότητα θα αυξηθεί γραμμικά αναλογικά με το μέτρο εφελκυσμού [133] όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται για τα παχύτερα νήματα πολλαπλών νημάτων. Πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή (k) των ινών είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Οι ίνες υψηλής αντοχής έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα διαμήκους και χαμηλότερη εγκάρσια θερμική αγωγιμότητα [135]. Η τιμή (k) των νημάτων και του υφάσματος (σύνολο ινών-αέρα) εξαρτάται από τις προδιαγραφές και τη χύδην πυκνότητά τους καθώς και από την πυκνότητα συσκευασίας των ινών, τη διάταξη των ινών και θερμική αγωγιμότητα ινών. Ωστόσο, η θερμική αντίσταση των νημάτων και των υφασμάτων είναι υψηλότερη από αυτή των ινών που τα αποτελούν. Κατά συνέπεια, η τιμή (k) των ινών θα είναι μικρότερης σημασίας από τη θέση τους στο χώρο του όγκου του νήματος ή του υφάσματος [136]. Ο Πίνακας 2.3 δίνει την τιμή θερμικής αγωγιμότητας (k) ορισμένων επιλεγμένων ινών.



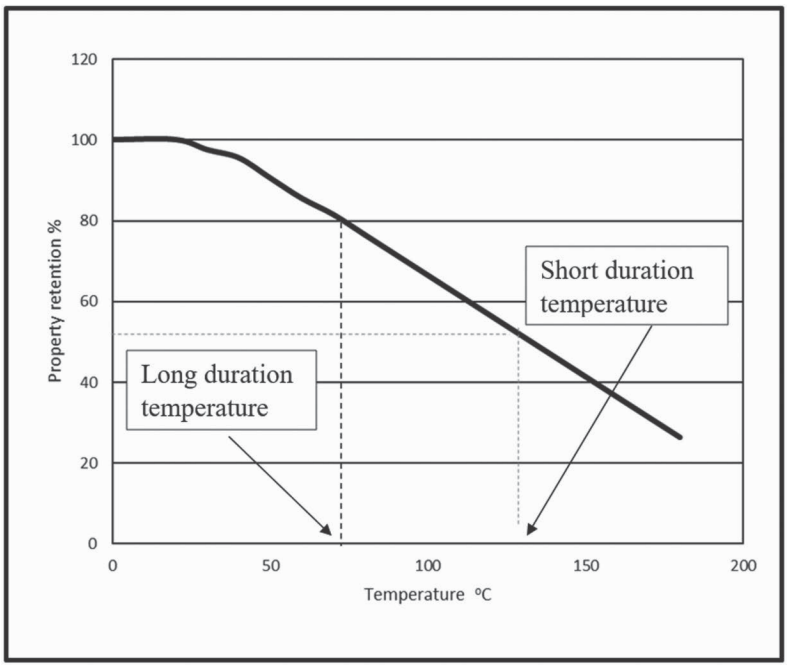
Εικόνα 2.15 Θερμική αγωγιμότητα έναντι συντελεστή ελαστικότητας ινών πολυαιθυλενίου υψηλής αντοχής [133]

Πίνακας 2.3 Θερμική αγωγιμότητα (k) ινών. [133-142]

Ίνα	*Θερμική αγωγιμότητα **(W/mK)***	*Ίνα*	*Θερμική αγωγιμότητα **(W/mK)***
PAN (according to its modulus)	5-90	PBI	0,41
Pitch (according to its modulus)	120-800	Dyneema (HDPE)	20
Nylon	0,25-0,7	Kevlar	0,04
High strength PE	28	NOMEX	0,139-0,25
Polystyrene	2	Glass fiber	1,28-1,32
PBO (Zylon)	14-20	Polypropylene	
Vectran	1,5	Alumina-silica ceramic fibers	0,09-0,22
Aramid	2,5	E-Glass	1,04

Η αντοχή στη θερμότητα των ινών είναι σημαντική για την τελική χρήση τους, όπως σε πυρίμαχο γιλέκο ή θερμική ασπίδα. Οι ίνες δεν πρέπει να αλλοιώνονται ως προς τις ιδιότητές τους σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας. Γενικά, η αντοχή της ίνας μειώνεται όταν η ίνα εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρόνο λειτουργίας. Η εικόνα 2.16 δείχνει ότι τα ποσοστά διατήρησης ιδιοτήτων μειώνονται με τη θερμοκρασία. Η αντοχή της ίνας Kevlar φθάνει το 55% στους 300°C, ενώ η ίνα PBO εξακολουθεί να έχει αντοχή 80%, [143]. Η αντοχή της ίνας Vectran θα χάσει το 50% της σε θερμοκρασία 135°C και το Vectran High Temperature (HT) αντίστοιχα το ίδιο στους 145°C, ενώ το Vectran UM στους 150 °C. Οι τυπικές ίνες Aramid θα χάσουν το 50% της αντοχής τους στους 430°C και οι ίνες HM Aramid αντίστοιχα στους 230°C [144]. Το Zylon διατηρεί το 40% της αντοχής του στους 500°C, ο συντελεστής τους στους 400°C διατηρεί το 75% του συντελεστή του σε αντίστοιχη θερμοκρασία δωματίου (η θερμοκρασία τήξης του Zylon είναι 600°C) [145].

Μετά την έκθεση των ινών NOMEX σε ξηρό αέρα στους 260°C για 1000 ώρες και μετά την επαναφορά τους σε θερμοκρασία δωματίου, η αντοχή στη θραύση και η σκληρότητα είναι περίπου 65% αυτών που εμφανίζονταν πριν από την έκθεση [146].



Εικόνα 17.16 Διατήρηση αντοχής ινών σε σχέση με τη θερμοκρασία [146]

Η Θερμική δευτεροποίηση των ινών με διαφορετικούς ρυθμούς που εξαρτώνται από τη χημική δομή της ίνας και τον χρόνο έκθεσης, καταστρέφοντας έτσι την ακεραιότητά τους.

Η ίνα m-Aramid τήκεται ή ανασυντίθεται στους 400°C, ενώ για τις ίνες PBO και UHMWPE η αντίστοιχη θερμοκρασία είναι 650°C και 150°C, αντίστοιχα, [147] για p-Aramid και Polybenzimidazole (PBI) fibers είναι 550°C, και για τον πολυεστέρα είναι 260°C. Η αντοχή στη θερμότητα από ανθρακονήματα είναι αυξημένη έως τους 2000°C. Η μέγιστη συνιστώμενη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας (COT) πρέπει να είναι μικρότερη από αυτά τα όρια. Για τις ίνες Spectra, το ενδεδειγμένο όριο θερμοκρασίας μεγάλης διάρκειας είναι 70°C και για μικρή διάρκεια 130°C [147].

Εκτός από τις θερμικές ιδιότητες των ινών, η θερμική συμπεριφορά των υφασμάτων επηρεάζεται επίσης από τη διάταξη των ινών στα νήματα, το σχέδιο του υφάσματος, το πάχος, το χνουδωτό και το πορώδες του. Οι συνιστώμενες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας για επιλεγμένες ίνες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 Συνιστώμενη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας (COT)°C. [140-152]

Ίνα	*COT (°C)*	*Ίνα*	*COT (°C)*
HPPE	70–82	PBI	260–400
PAN (according to its modulus)	300–537	Lastan	200
Pitch (according to its modulus)	300–537	Dyneema (HDPE)	120
Nylon	260	Kevlar	149–177
High strength PE	130	NOMEX	204
Polystyrene	–	Glass fiber	260
PBO (Zylon)	287–316	Polypropylene	107
Vectran	145	Dyneema	70
Aramid; standard	430	Aramid; high modulus	230
Spectra	70		

2.9 Χημική αντίσταση ινών

Η χημική αντοχή των ινών είναι η ικανότητά τους να προστατεύουν από χημική επίθεση ή αντίδραση διαλύτη. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη χημική αντοχή της ίνας, όπως η χημική συγκέντρωση, ο χρόνος έκθεσης και η θερμοκρασία. Τα ανθεκτικά σε χημική επίθεση PF έχουν σχεδιαστεί για να εμποδίζουν τη διείσδυση του χημικού υγρού ή αερίων μέσω της χρήσης ινών που αντιστέκονται στην αποικοδόμηση από τα χημικά υγρά και το προληπτικό ύφασμα που δεν επιτρέπει στα χημικά ή το αέριο να διεισδύσει μέσω των πόρων του υφάσματος.

Τα περισσότερα από τα HPF έχουν καλή έως εξαιρετική αντοχή σε οξέα, αλκάλια και οργανικούς διαλύτες. Η βαθμολογία χημικής αντοχής:

- Το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) είναι εξαιρετικό.
- Το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) είναι υψηλό.
- Το NOMEX είναι πολύ καλό (αποδομείται από ισχυρά αλκάλια σε υψηλές θερμοκρασίες).
- Το PBI είναι καλό.
- Το πολυαιθυλένιο UHMWPE εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους είναι χαμηλό.

Το Kevlar είναι αποδεκτό, ορισμένες ισχυρές βάσεις υδατικών οξέων και το υποχλωριώδες νάτριο μπορούν να προκαλέσουν αποικοδόμηση, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες.

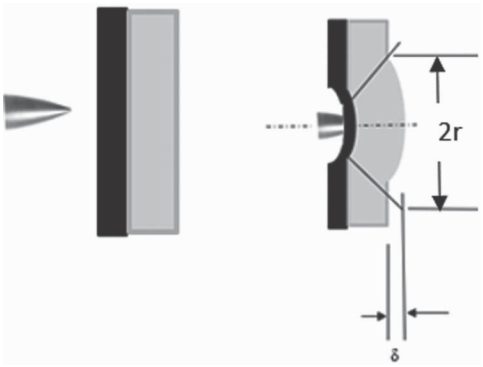
Για το PF, η μέγιστη τιμή του ρυθμού διείσδυσης, μg/(m^2/min) (American Society for Testing and Materials ASTM F903, ASTM F739), η θωράκιση χημικής προστασίας δεν είναι μονοκόμματο ύφασμα, η παρουσία ραφών μπορεί να είναι υψηλότερος ρυθμός διείσδυσης για χημικά ή αέρια σε σύγκριση με PF [152].

Κεφάλαιο 3ο Σχεδίαση Αλεξίσφαιρης Θωράκισης

Οι εύκαμπτες μαλακές πανοπλίες σώματος προτιμώνται πλέον για την απόδοσή τους και τα πλεονεκτήματα έναντι των σκληρών λόγω του χαμηλού βάρους, της άνεσης και της διευκόλυνσης της κινητικότητας του χρήστη. Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος θωράκισης θα πρέπει να εξισορροπεί τρία αντικρουόμενα χαρακτηριστικά: αποτελεσματική προστασία, κινητικότητα και άνεση. Η άνεση της θωράκισης επηρεάζεται από όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τόσο την απόδοση προστασίας όσο και την κινητικότητα [153].

Κατά βάση, η εύκαμπτη θωράκιση σώματος αποτελείται από το πολυστρωματικό ύφασμα και ή από εύκαμπτα ινώδη σύνθετα υλικά. Έχει αναγνωριστεί ότι ο αριθμός των μεταβλητών που επηρεάζουν την απόδοση της προστατευτικής ευέλικτης θωράκισης σώματος είναι τεράστιος, συνυπολογίζοντας και τις αλληλεπιδράσεις αυτών, που κάνουν την πρόβλεψη των επιπτώσεών τους πιο περίπλοκη. Ο σχεδιαστής της αλεξίσφαιρης θωράκισης ξεκινά με την επιλογή των βασικών σχεδιαστικών αρχών και τις τροποποιήσεις που βασίζονται στη δοκιμή πεδίου και την αξιολόγηση της θωράκισης σώματος [153].

Το ύφασμα, όταν χτυπηθεί από σφαίρα, παραμορφώνεται στην περιοχή που έρχεται σε επαφή με τη σφαίρα και γύρω από αυτήν (Εικ. 3.1) και παραμορφώνεται προκαλώντας μια «υπογραφή» στο πίσω μέρος του βάθους «δ» [153].



Εικόνα 3.1 Παραμόρφωση εύκαμπτης θωράκισης σώματος από χτύπημα από σφαίρα. [153]

Η βασική αρχή του σχεδιασμού της αλεξίσφαιρης θωράκισης αναγνωρίζει τα ακόλουθα:

1. Η κινητική ενέργεια της σφαίρας πρέπει να απορροφάται πλήρως από το υλικό θωράκισης χωρίς διείσδυση στα πίσω στρώματα.
2. Μια «υπογραφή» στο πίσω μέρος πρέπει να έχει το ελάχιστο βάθος «δ» και μια ευρύτερη α-κτίνα «r».

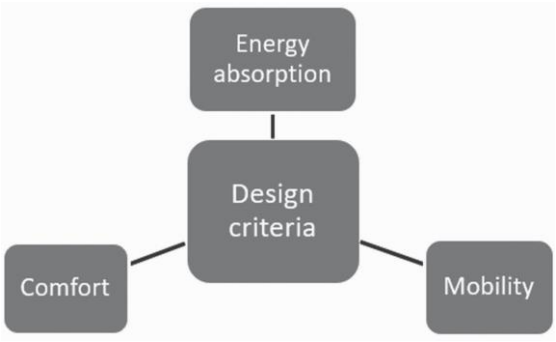
Σε ορισμένες περιπτώσεις εύκαμπτης θωράκισης, η αύξηση του «δ» προκαλεί αμβλύ τραύμα από τη πανοπλία, ακόμη και όταν καταφέρνει να σταματήσει εντελώς τη σφαίρα. Μπορούν να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα ως λύσεις [153]:

1. Οι μηχανικές ιδιότητες και η δομή του υλικού του υφάσματος είναι ικανές να αναδιανέμουν την καταπόνηση σε μεγάλη περιοχή με υψηλή ταχύτητα πριν από την αστοχία.
2. Το πολυστρωματικό σώμα της μήτρας θωράκισης μπορεί να επιτρέψει στην αποκόλληση να αυξήσει την απορρόφηση ενέργειας.
3. Χρήση HPF (Ίνες Υψηλής Απόδοσης)
4. Εφαρμογή απορροφητικών υλικών και κατασκευών μεταξύ των υφασμάτινων στρωμάτων HPF που λειτουργούν ως αμορτισέρ.
5. Χρήση μιας σκληρής ή μαλακής πλάκας υλικού.
6. Αύξηση του συντελεστή τριβής μεταξύ υφάσματος και σφαίρας.
7. Αύξηση των συντελεστών τριβής μεταξύ νημάτων, μεταξύ νημάτων και επιφάνειας σφαίρας, μεταξύ της επιφάνειας των διαφορετικών υφασμάτινων στρωμάτων της θωράκισης.
8. Εφαρμογές υβριδικών υλικών για την παραγωγή ισοτροπικής σύνθετης δομής πλακών.
9. Αξιοποίηση ενός νέου υλικού που αλλάζει τη δομή του υπό τη δύναμη κρούσης.
10. Εφαρμογές φύλλων γραφίτη ως μέρος της θωράκισης.

Η επιτυχία στον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού των παραπάνω παραγόντων οδηγεί σε καλύτερο σχεδιασμό θωράκισης. Σε όλες τις λύσεις, το πρόβλημα του βάρους της θωράκισης είναι μόνιμα καθοριστικός παράγοντας για κάθε σχέδιο.

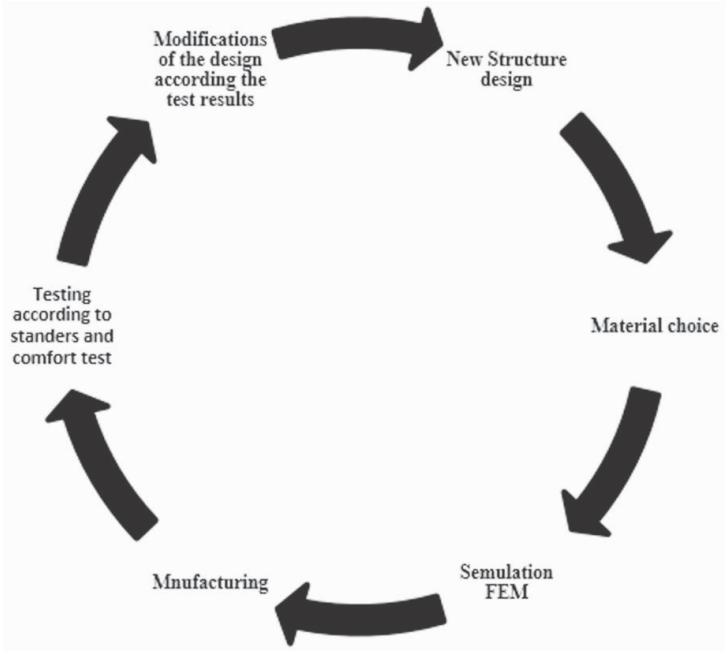
3.1 Κριτήρια για τον σχεδιασμό μοντέρνας θωράκισης σώματος

Τα κριτήρια σχεδίασης θωράκισης θα πρέπει να ικανοποιούν την κύρια προϋπόθεση - να προστατεύουν τον χρήστη από ένα συγκεκριμένο επίπεδο απειλής μέσω της επίλυσης του προβλήματος της απορρόφησης ενέργειας και, ταυτόχρονα, να διασφαλίζουν την ελεύθερη κινητικότητα και τις απαιτήσεις άνεσης του χρήστη (Εικ. 3.2).



Εικόνα 3.2 Κριτήρια σχεδιασμού στοιχείων [153]

Για κάθε στοιχείο της διαδικασίας σχεδιασμού, τα βήματα, που υποδεικνύονται στην εικόνα 3.3, αντιπροσωπεύουν μια διαδικασία σχεδιασμού κλειστού βρόχου για αντίδραση στο απρόβλεπτο των απαιτήσεων ασφαλείας.



Εικόνα 3.3 Βήματα σχεδίασης πανοπλίας [153]

Κατά συνέπεια, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος θωράκισης θα πρέπει να εξισορροπεί τρία αντικρουόμενα χαρακτηριστικά: αποτελεσματική προστασία, κινητικότητα και άνεση. Για παράδειγμα, η αποτελεσματικότητα της προστασίας είναι άμεσα υπεύθυνη για το βάρος της θωράκισης ενώ η κινητικότητα επιδεινώνεται άμεσα από το βάρος της θωράκισης και τέλος, η άνεση της θωράκισης επηρεάζεται από όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τόσο την απόδοση προστασίας όσο και την κινητικότητα. Η στενή εφαρμογή της θωράκισης βελτιώνει την κινητικότητα αλλά έχει αρνητική επίδραση στην άνεση. Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση πανοπλίας κατά τη διάρκεια

διαφορετικών δραστηριοτήτων μειώνει σημαντικά την κινητικότητα κατά τη διάρκεια βασικών στοιχείων εργασίας και έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη φυσιολογική προσπάθεια, λειτουργικότητα και κόστος [153]. Οι μεταβλητές είναι και δεν περιορίζονται σε: σχέδιο υφάσματος, πάχος υφάσματος, αριθμό στρώσεων, πυκνότητα επιφάνειας υφάσματος, ακαμψία υφάσματος, ιδιότητες υλικού ινών και κατασκευή συστήματος

3.2 Μαλακή θωράκιση σώματος

Σε όλη την ιστορία, τα άτομα προσπαθούν πάντα να αναζητήσουν καλύτερα υλικά για να προστατευτούν από τραυματισμούς από όπλα διαφόρων τύπων. Για βαλλιστική προστασία, οι μαλακές πανοπλίες σώματος κατασκευάζονται από πολλαπλές στρώσεις υφάσματος Kevlar με τουλάχιστον 28 στρώσεις και έως και 90 στρώσεις που απαιτούνται για να επιτευχθεί το πάχος της θωράκισης ώστε να αντιμετωπισθεί η σφαίρα στο απαραίτητο επίπεδο προστασίας [154]. Το PAP βασίζεται σε ιδιότητες ινών, σχέδιο υφάσματος , και γραμμική πυκνότητα υφάσματος. Η βαλλιστική ενέργεια της θωράκισης αυξάνεται με τον μεγάλο αριθμό στρωμάτων υφάσματος και το πάχος του. Αν υποτεθεί ότι η συνολική ενέργεια βλήματος που πρέπει να αντιμετωπισθεί από την πανοπλία σε ένα ορισμένο επίπεδο απειλής είναι E_s και η ενέργεια απορρόφησης ανά στρώμα του υφάσματος είναι EF_{fabric}, τότε ο κατά προσέγγιση αριθμός των στρωμάτων υφάσματος που απαιτούνται για την θωράκιση είναι:

$$n = KE_s/EF_{fabric} \quad (2)$$

Στη συνέχεια, η πυκνότητα της περιοχής θωράκισης δίνεται ως:

$$W_t = K(E_s/EF_{fabric})W_{fabric} \quad (3)$$

Το βαλλιστικό όριο θωράκισης - Armor Ballistic Limit (ABL) είναι το μέγιστο για μη διείσδυση της σφαίρας. Η υπογραφή πίσω προσώπου Backface Signature (BFS) συμμορφώνεται με τις τυπικές τιμές (πρότυπα NIJ). Απλώς, η θωράκιση είναι μια πλάκα σε εύκαμπτη βάση, με μέγιστη παραμόρφωση:

$$\delta_{max} = f^n(V_{bullet}, EF_{fabric}, J, \gamma, b, W_t, W_{fabric}, V_{ballistic}, m, M, FE_{fabric}, S_{fabric}) \quad (4)$$

Όπου φαίνεται ότι το δ_{max} εξαρτάται βασικά από τις δυναμικές ιδιότητες του υλικού θωράκισης.

Για ευκολία, τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις και στα επόμενα παρουσιάζονται στο πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Λίστα συμβόλων και συντομογραφιών

Σύμβολο	*Επεξήγηση*	*Σύμβολο*	*Επεξήγηση*
PAP	απόδοση προστατευτικής θωράκισης	E_{armor}	συντελεστής Young θωράκισης
K	συντελεστής ασφάλειας	J	Δεύτερη ροπή αδράνειας επιφάνειας πανοπλίας
HPF	ίνα υψηλής απόδοσης	δ_{max}	μέγιστη εκτροπή της θωράκισης υπό τη δύναμη
KE	κινητική ενέργεια	M	μάζα της περιοχής θωράκισης που συμμετέχει στην αντίσταση της κρούσης
C_t	σταθερά του υφάσματος	$V_{ballistic}$	βαλλιστική ταχύτητα στρώσης υφάσματος
E_{muzzle}	ενέργεια ρύγχους	m	μάζα σφαίρας
W_t	βάρος θωράκισης/m^2	R_p	ακτίνα της σφαίρας
W_{fabric}	βάρος υφάσματος/m^2	E_{fabric}	Μέτρο Young υφάσματος
E_s	επίπεδο ενέργειας που πρέπει να νικηθεί από την πανοπλία	S_{fabric}	Αντοχή υφάσματος
EF_{fabric}	ενέργεια που απορροφάται από το ένα στρώμα του υφάσματος	γ	συντελεστής ακαμψίας θεμελίωσης ανά μονάδα επιφάνειας
E_{bullet}	κινητική ενέργεια σφαίρας	V_s	ταχύτητα διαμήκους κύματος
N	αριθμός υφασμάτινων στρωμάτων της θωράκισης	ρ	πυκνότητα υλικού (ρ_f, ρ_y, ρ_{fabric} είναι η πυκνότητα για ίνες, νήματα, ύφασμα, αντίστοιχα)
V_{bullet}	βαλλιστική ταχύτητα σφαίρας	σ	Αντοχή θραύσης υλικού (σ_f, σ_y, σ_{fabric} είναι η πυκνότητα για ίνες, νήματα, ύφασμα, αντίστοιχα)
E_f	Μέτρο Young ινών	f_{wp}	συνολικός αριθμός επιπλεύσεων σε κατεύθυνση στημονιού ανά επανάληψη
V_c	ταχύτητα κωνικού κύματος	f_{wf}	συνολικός αριθμός επιπλεύσεων στην κατεύθυνση πλήρωσης ανά επανάληψη
V_{bullet}	βαλλιστική ταχύτητα σφαίρας	R_{wp}	αριθμός νημάτων στημονιού ανά επανάληψη
ε_{yarn}	μέγιστη παραμόρφωση στα νήματα	R_{wf}	αριθμός νημάτων πλήρωσης ανά επανάληψη
$R_{c,max}$	μέγιστη ακτίνα κώνου	W_{wf}	πλάτος των νημάτων πλήρωσης
R_c	ακτίνα κώνου	w_{wP}	πλάτος των νημάτων στημονιού
C_s	Ταχύτητα εγκάρσιου κύματος Euler	D_{wf}	απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών νημάτων πλήρωσης
CFF	συντελεστής σταθερότητας cross-over	D_{wp}	απόσταση μεταξύ δύο παρακείμενων νημάτων στημονιού
FYF	συντελεστής πλεούμενου νήματος	σ_{cx-y}	τάση συμπίεσης του υλικού
I	δείκτης διαπλοκής	$N_{compactness}$	κάθετη δύναμη στο σώμα της σφαίρας λόγω της συμπίεσης των νημάτων

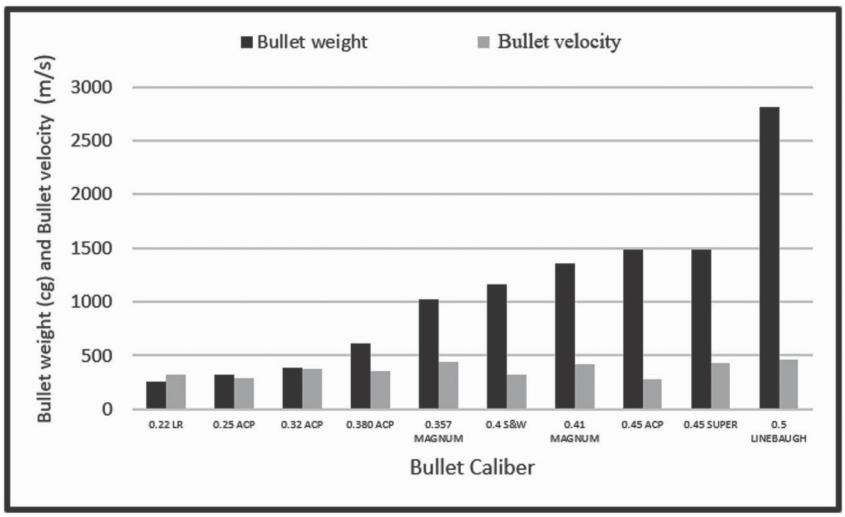
i_{wp}	συνολικός αριθμός συμπλοκών σε κατεύθυνση στημονιού ανά επανάληψη	m_{wf}	αριθμός των νημάτων πλήρωσης που εμπλέκονται στην τεντωμένη ζώνη
i_{wf}	συνολικός αριθμός συμπλοκών στην κατεύθυνση πλήρωσης ανά επανάληψη	n_{wp}	αριθμός των νημάτων στημονιού που εμπλέκονται στην τεντωμένη ζώνη
A_{wf}	περιοχή διατομής του νήματος πλήρωσης	D_{bullet}	διάμετρος σφαίρας
A_{wp}	περιοχή διατομής του νήματος στημονιού	$E_{absorbed}$	ενέργεια που απορροφάται από το ύφασμα
σ_{wf}	τάση αστοχίας των νημάτων πλήρωσης	V(T)	την ταχύτητα της σφαίρας μετά τη διέλευση από το στόχο
σ_{wp}	τάση αστοχίας των νημάτων στημονιού	V(0)	ταχύτητα της σφαίρας πριν από την κρούση
K	αριθμός υπό διάτμηση νημάτων στη ζώνη κρούσης	ES	ενέργεια για να κόψει τα νήματα
T	δύναμη διάτμησης νήματος	ED	ενέργεια για την παραμόρφωση όλων των νημάτων και δύναμη τραβήγματος του νήματος
V_{before_impact}	Το βλήμα ταξιδεύει αρχικά με ταχύτητα	ET	ενέργεια αστοχίας εφελκυσμού νημάτων που έχουν άμεση πρόσκρουση
E	Συντελεστής Young υλικού ινών	EF	ενέργεια για να ξεπεραστεί η τριβή μεταξύ των στρωμάτων του υφάσματος
ρ_m	πυκνότητα υλικού ινών	EJ	ενέργεια για να ξεπεραστεί η τριβή μεταξύ του σώματος της σφαίρας και των νημάτων
F_i	δυνάμεις συμπίεσης του i στρώματος υφάσματος	EM	ενέργεια για την παραμόρφωση του υφάσματος κατά την κρούση σχηματίζοντας σχήμα κώνου
σ_{ci}	τάση συμπίεσης του στρώματος i	V_{bullet_p} (t)	ταχύτητα της σφαίρας κατά τη διείσδυση τη στιγμή t
m(t)	μάζα του υφάσματος που συνδέεται με τη σφαίρα τη στιγμή t	B	μισή γωνία της κωνικής άκρης της σφαίρας
V_{bullet} (t)	ταχύτητα σφαίρας τη στιγμή t	ρ_{bullet}	πυκνότητα υλικού σφαίρας
V_{bullet} (T)	ταχύτητα σφαίρας κατά την έξοδο από το στόχο	R	ακτίνα της σφαίρας
V_{bullet} (0)	ταχύτητα κρούσης σφαίρας	$T_{ballistic}$	συνολικός χρόνος βαλλιστικής πρόσκρουσης
A_p	Επιφάνεια παρουσίασης βλήματος	$\rho_{laminate}$	πυκνότητα πολυστρωματικού υλικού
V_{50}	βαλλιστικό όριο	σ_c	αντοχή σε θλίψη εκτός επιπέδου του πολυστρωματικού υλικού
A_d	πυκνότητα επιφανείας συστήματος	S_{sp}	διατμητική αντοχή βουλώματος
ε_{max}	παραμόρφωση αστοχίας του υφάσματος	H	πάχος πολυστρωματικού υλικού

K_{max}	σταθερά συγκέντρωσης παραμόρφωσης	E3	μέτρο ελαστικότητας διαμέσου πάχους
T_m	πάχος του υλικού	σ_R	μέση πίεση αντίστασης που παρέχεται από το υλικό στόχο
A_{bullet}	επιφάνεια του σώματος της σφαίρας	α_0	(V_t / V_{bullet})
SF	συντελεστής σχήματος σφαίρας = $\sin^2 \beta$	β_0	m/M
γ_0	$(V_{balistic}/V_{bullet})$	R_{ci}	ακτίνα μετώπου κύματος κώνου κανονικοποιημένη προς την ακτίνα σφαίρας
ζ_0	παράγοντας που σχετίζεται με την επίδραση του σχήματος της μύτης σφαίρας	R_i	(R_{c1}/R_p)
η_0	παράγοντας που σχετίζεται με το υλικό και τη δομή της θωράκισης	R_c	κωνική ακτίνα μετώπου κύματος του πρώτου στρώματος
θ_i	τη γωνία κλίσης της σφαίρας προς την επιφάνεια του στρώματος	V_{si}	ταχύτητα κύματος παραμόρφωσης στο στρώμα ύφανσης ι
I	1, … , n	V_{sj}	ταχύτητα κύματος παραμόρφωσης στο στρώμα ύφανσης j
n	τον αριθμό των στρώσεων υφάσματος		

3.3 Ταχύτητα σφαίρας

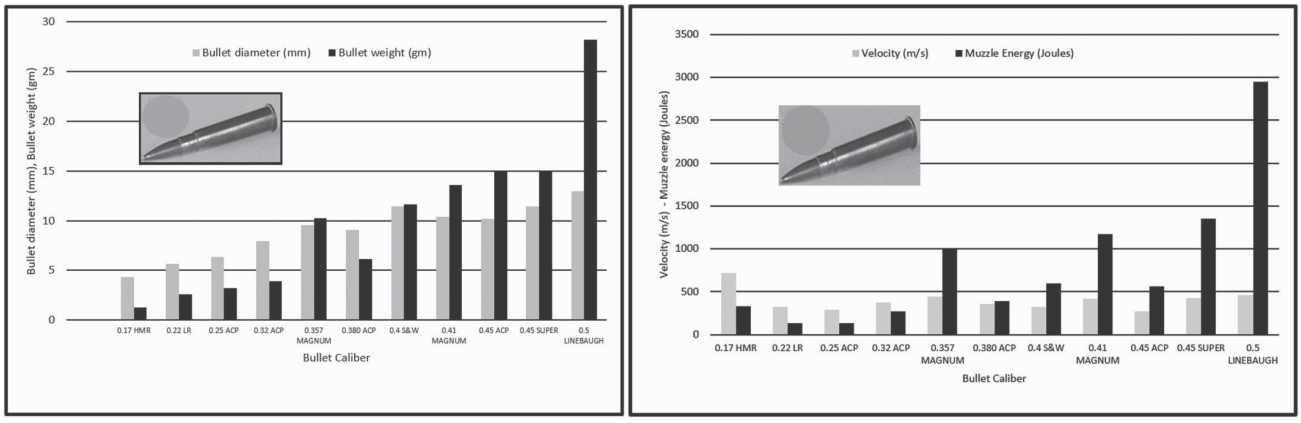
Η ταχύτητα της σφαίρας συγκεκριμένης σχεδίασης σφαίρας (ταχύτητα ρύγχους) [155] βρέθηκε ότι εξαρτάται από την κινητική ενέργεια των πυρομαχικών διεισδύσεως και τη μάζα και την ακτίνα του βλήματος. Ένα παράδειγμα του βάρους της σφαίρας και της ταχύτητας στομίου τους (Εικ. 3.4) δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα της σφαίρας, τόσο μικρότερη θα είναι η ταχύτητα στομίου της για τον ίδιο τύπο κάνης και πυρομαχικού, όπως δίνεται από την εξίσωση

$$V_{bullet} = \left(\frac{2E_{myzzle}}{M}\right)^{0.5} \quad (5)$$



Εικόνα 3.4 Ταχύτητα ρύγχους σφαίρας έναντι βάρους σφαίρας [155]

Οι προδιαγραφές της σφαίρας εξαρτώνται από το διαμέτρημα, την ταχύτητα του ρύγχους και την ενέργεια του ρύγχους [156] (Εικ. 3.5α, β). Το βάρος της σφαίρας, η διάμετρός της, η ενέργεια του ρύγχους και η ταχύτητα του ρύγχους συσχετίζονται. Το βάρος της σφαίρας είναι ένα καθοριστικό στοιχείο της ανάκρουσης, όπως και ο λόγος βάρους/ταχύτητας σφαίρας. Η ικανότητα της θωράκισης να νικήσει τη σφαίρα είναι η βαλλιστική της ταχύτητα και θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από V_{bullet}. Ενώ το βαλλιστικό όριο Ballistic Limit (BL)V_{50} εκφράζει την ταχύτητα της σφαίρας όταν διαπερνά πλήρως υλικό βαλλιστικής θωράκισης με πιθανότητα περίπου 50%.



Εικόνα 3.5 Παραδείγματα προδιαγραφών σφαιρών: (α – αριστερά) βάρος και διάμετρος. (β - δεξιά) η ταχύτητα και η ενέργεια του ρύγχους των διαμετρημάτων του όπλου [156]

3.4 Αρχιτεκτονική υφάσματος

Η αρχιτεκτονική του υφάσματος αφορά στο τρόπο με τον οποίο οι ίνες, τα τμήματα νημάτων ή τα συνεχή νήματα, διατάσσονται για να σχηματίσουν ένα συνεχές ομοιογενές φύλλο υφάσματος για τις διάφορες εφαρμογές. Ο τρόπος διάταξης των νημάτων επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του

υφάσματος. Οι προδιαγραφές των νημάτων, όπως ο αριθμός, η συστροφή, η ομοιομορφία, οι ιδιότητες τριβής του νήματος, οι μηχανικές ιδιότητες του, αντανακλούν άμεσα τη βαλλιστική απόδοση του υφάσματος. Όταν το ύφασμα αποτελεί πρόβλημα, θα πρέπει να προσδιορίζονται η δομή, η πυκνότητα της περιοχής, η στεγανότητα, η διαχείριση της υγρασίας και οι δυναμικές μηχανικές του ιδιότητες. Οι ίνες ή τα νήματα σχηματίζουν υφάσματα με διαφορετικές αρχιτεκτονικές 2D ή 3D (Πίνακας 3.2) και κάθε μια έχει διαφορετικές τελικές ιδιότητες που καθορίζουν την καταλληλότητα της για χρήση στην αλεξίσφαιρη θωράκιση.

Πίνακας 3.2 Παρατηρήσεις για τις δομικές ιδιότητες των υφασμάτων [156]

Αρχιτεκτονική 2D	*Πληροφορίες*	*Αρχιτεκτονική 3D*	*Πληροφορίες*
Υφασμένο ύφασμα	Λεπτό, ισότροπο, υψηλής αντοχής, συντελεστής Young και χαμηλή ακαμψία κάμψης και συντελεστής διάτμησης	Πολυαξονικά πλεκτά υφάσματα	Παχύ, λιγότερη ευελιξία, περιορισμένη αντοχή στην κατεύθυνση z
Πλεκτό ύφασμα	Ανισότροπο, υψηλή εκτασιμότητα, χαμηλή αντοχή, ακαμψία με υψηλά χαρακτηριστικά και υψηλό πορώδες	Ύφανση με τρισδιάστατο περίγραμμα	Περιορισμένα σχήματα, προφίλ με σταθερή διατομή, υψηλή ακαμψία κάμψης και συντελεστή διάτμησης
Τριαξονικό ύφασμα	Ισότροπο, χαμηλή εκτασιμότητα, χαμηλό συντελεστή διάτμησης και υψηλή αντοχή σε σχίσιμο	Ραμμένο ύφασμα	Περιορισμένη ευκαμψία, περιορισμένη αντοχή στην κατεύθυνση z, χαμηλή ετερογένεια στις ιδιότητες σε κατευθύνσεις x, y, z και υψηλή συμπίεση
Ύφασμα πλεξούδας	Ισότροπο, χαμηλή εκτασιμότητα, υψηλό μέτρο διάτμησης και αντίσταση διείσδυσης. Υψηλή καμπτική ακαμψία	3D πολυαξονική ύφανση	Ανισότροπο, υψηλή ακαμψία θραύσης, υψηλός συντελεστής διάτμησης και υψηλή τάση συμπίεσης
Μη υφασμένο ύφασμα	Ανισότροπο, υψηλή εκτασιμότητα, χαμηλή αντοχή και ακαμψία σε κάμψη, υψηλό πορώδες και αντίσταση διείσδυσης και ετερογένεια στις ιδιότητες σε κατευθύνσεις x, y, z	Διαχωριστικό ύφασμα	Ανισότροπο σε ιδιότητες σε κατευθύνσεις x, y, z. Εύκαμπτο, υψηλό πορώδες, χαμηλό συντελεστή διάτμησης, υψηλή συμπιεστότητα σε κατευθύνσεις z και υψηλό πορώδες
		3D πλεκτό ύφασμα	Ανισότροπο, εύκαμπτο, υψηλό πορώδες, χαμηλό μέτρο διάτμησης και ετερογένεια στις ιδιότητες σε κατευθύνσεις x, y, z

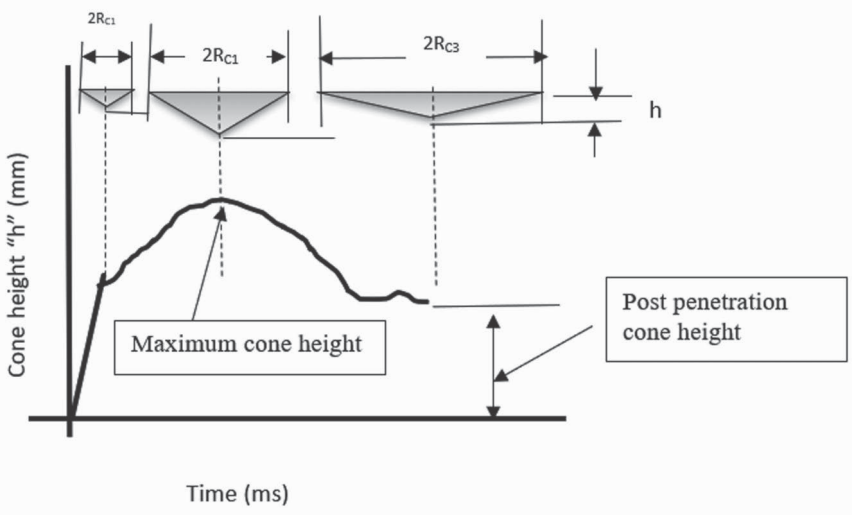
	Τρισδιάστατο ύφασμα πλεξούδας	Εύκαμπτο, υψηλή αντοχή, χαμηλό συντελεστή διάτμησης και ετερογένεια στις ιδιότητες σε κατευθύνσεις x, y, z
	Πλεκτό μη υφασμένο ύφασμα πολλαπλών στρώσεων	Ανισότροπος, υψηλή ακαμψία, μικρότερη ευκαμψία, υψηλός συντελεστής διάτμησης και ετερογένεια στις ιδιότητες σε κατευθύνσεις x, y, z

3.5 Μηχανισμός αστοχίας της θωράκισης κάτω από την κρούση σφαίρας

Η εύκαμπτη θωράκιση έχει σχεδιαστεί για να αποτρέπει τη διείσδυση της σφαίρας με την πλήρη απορρόφηση της ενέργειας της σφαίρας της πριν από τη διείσδυσή της σε όλο το πάχος της θωράκισης. Όταν η σφαίρα χτυπήσει την πανοπλία, τα στρώματα του υφάσματος θα παραμορφωθούν και θα δημιουργήσουν έναν κώνο στη περιοχή όπου η σφαίρα άγγιξε τα στρώματα του υφάσματος. Καθώς η περιοχή διάδοσης της παραμόρφωσης του υφάσματος αυξάνεται, το ύψος του κώνου (h) αυξάνεται επίσης. Η μετατόπιση του υφάσματος εκτός επιπέδου αυξάνεται καθώς η σφαίρα πιέζει το ύφασμα, ο ρυθμός μετατόπισης είναι υψηλός στα πρώτα χιλιοστά του δευτερολέπτου και μειώνεται με περαιτέρω διείσδυση της σφαίρας στο πάχος της θωράκισης (Εικ. 3.6).

Κατά την πρόσκρουση της σφαίρας, το ταχύτερο κύμα διαμήκους καταπόνησης θα διαδοθεί μέσω των νημάτων και ταυτόχρονα, ένα πιο αργό κινούμενο κύμα κινούμενο πλαγίως θα ξεκινήσει προς την άλλη κατεύθυνση του υλικού από το σημείο στερέωσής του. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του διαμήκους κύματος παραμόρφωσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διασπορά της ενέργειας κρούσης. Η ταχύτητα διαμήκους κύματος για ισότροπο στερεό υλικό δίνεται από:

$$V_s = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{0.5} \quad (6)$$



Εικόνα 3.6 Διάδοση ύψους κώνου υφάσματος

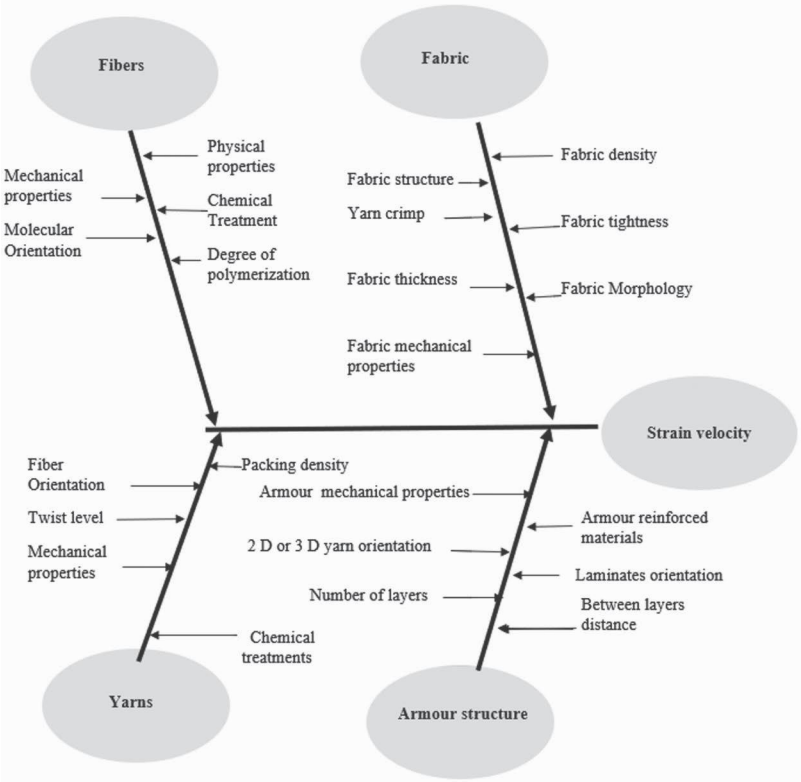
Η εξίσωση 6 μπορεί να εφαρμοστεί για στερεές ίνες. Για τα νήματα, το V_s είναι λιγότερο και για το ύφασμα, είναι πολύ μικρότερο. Αρκετές έρευνες έχουν αποκαλύψει ότι οι τυχαία προσανατολισμένες ίνες έχουν χαμηλό διαμήκες κύμα, δυναμικό μέτρο και ορισμένες άλλες ιδιότητες. Υποδείχθηκε ότι οι ερμηνείες για το μέτρο σχετίζονται τόσο με τις φυσικές όσο και με τις χημικές δομές των συνθετικών ινών σε ένα ευρύ φάσμα και επηρεάζονται από το μέτρο ελαστικότητας των νημάτων, καθώς και τη στατική και δυναμική αντοχή των νημάτων, τις παραμέτρους ανάκτησης των νημάτων, την ακαμψία κάμψης του υφάσματος και την αντοχή στην τριβή των νημάτων και των υφασμάτων [157-163]. Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του ακουστικού δυναμικού συντελεστή των νημάτων και του παράγοντα συστροφής τους και των προσανατολισμών των ινών οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο ηχητικός συντελεστής επηρεάζεται σημαντικά από αυτές τις παραμέτρους, όπως καθώς και από την αναλογία ανάμειξης των διαφορετικών συστατικών τους [164,165]. Επιπλέον, οι δυναμικοί συντελεστές εξαρτώνται επίσης από τη διαμόρφωση των μεμονωμένων ινών μέσα σε ένα ύφασμα [166]. Η μετατροπή της ίνας στο νήμα οδηγεί σε μείωση του επιπέδου του συντελεστή ήχου, μια περαιτέρω μείωση αντιστοιχεί στη μετατροπή των νημάτων σε ύφασμα, η οποία είναι συνάρτηση μιας δομής υφάσματος [167].

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ταχύτητας του ήχου, του προσανατολισμού των ινών σε ένα ύφασμα, της ανισοτροπίας του υλικού και ιδιοτήτων απόδοσης όπως η αντοχή, η ακαμψία, η ελαστικότητα και η ελαστικότητα του υλικού έχουν περιγραφεί ως οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την ηχητική ταχύτητα [168]. Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά βαλλιστικών κρούσεων σε δομές θωράκισης, η πλήρης κατανόηση της διάδοσης των κυμάτων τάσης είναι κρίσιμη. Η εικόνα 3.7 απεικονίζει τους παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης των τάσεων των υφασμάτων [162].

Η ταχύτητα του ήχου στο ύφασμα είναι η εξής:

$$V_s = C_f \left(\frac{E}{\rho}\right)^{0.5} \quad (7)$$

Όπου το C_i εξαρτάται από όλες τις παραπάνω παραμέτρους.



Εικόνα 3.7 Ταχύτητα διάδοσης παραμορφώσεων [162]

3.5.1 Μηχανισμός μετάδοσης παραμόρφωσης από την σύγκρουση της σφαίρας

Ένα αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της διείσδυσης και της διάτρησης της θωράκισης που χτυπήθηκε από άκαμπτες σφαίρες αναπτύχθηκε από αρκετούς ερευνητές [169-171]. Ο μηχανισμός παραμόρφωσης ενός υφάσματος υπό την πρόσκρουση από σφαίρα μπορεί να συνοψιστεί ως [172,173]:

- Κατά την πρόσκρουση της σφαίρας στο μονό στρώμα υφάσματος, υπάρχει σχεδόν στιγμιαία μεταφορά ορμής σε ένα κυκλικό μέρος του υφάσματος στην περιοχή άμεσης επαφής, ακολουθούμενη αμέσως από την έναρξη ενός ακτινικά αναπτυσσόμενου κύματος εφελκυσμού και ενός βραδύτερου εγκάρσιου κύματος για να σχηματιστεί ένας διαρκώς αυξανόμενος σε μέγεθος κώνος με τη σφαίρα στην κορυφή του

- Τα νήματα, σε άμεση επαφή με την άκρη της σφαίρας στις κατευθύνσεις στημονιού και πλήρωσης, θα τεντωθούν και θα οδηγήσουν σε ένα διαμήκη κύμα παραμόρφωσης μακριά από την περιοχή επαφής.
- Τα άλλα νήματα, που δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το άκρο της σφαίρας, θα τραβηχτούν έξω στο σημείο τομής της πρώτης ομάδας νημάτων και έξω από το αρχικό επίπεδο υφάσματος.
- Ο κώνος, που σχηματίζεται λόγω της παραμόρφωσης του υφάσματος υπό τη βαλλιστική κρούση, θα αυξηθεί όσον αφορά στο ύψος του με το ρυθμό επιβράδυνσης ανάλογα με τον ρυθμό μείωσης της ταχύτητας της σφαίρας κατά τη διάρκεια του χρόνου πρόσκρουσης. Κατά συνέπεια, υπάρχει διάδοση κύματος στο επίπεδο και στο πάχος.
- Όταν μια ίνα, νήμα ή ύφασμα υποβάλλεται σε εξωτερική κρούση, παράγεται ένα εγκάρσιο κύμα και διαδίδεται στο νήμα ή το ύφασμα. Η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος έχει βρεθεί ότι είναι κρίσιμη για τη βαλλιστική απόδοση της θωράκισης [174].
- Η διαμήκης παραμόρφωση της ύφανσης θα διαδοθεί με την ταχύτητα του ήχου, και οι δύο πλέξεις θα βρίσκονται υπό τάση μέχρι η τάση στα νήματα να φτάσει στο όριο θραύσης.
- Τα νήματα στις περιοχές, που δεν έρχονται σε επαφή με το άκρο της σφαίρας, θα παρουσιάσουν επίσης παραμορφώσεις λόγω μεταφοράς των δυνάμεων στο σημείο των συμπλοκών τους, της τριβής νήματος με νήμα, και επομένως αυτό το φαινόμενο θα διέπεται από τη δομή της ύφανσης, το συντελεστή τριβής μεταξύ των νημάτων και της στεγανότητας του υφάσματος.
- Γενικά είναι επιθυμητή η μεγαλύτερη ταχύτητα εγκάρσιου κύματος για να διαχέεται γρήγορα η ενέργεια κρούσης. Έχει αποκαλυφθεί ότι σε κρούση υψηλής ταχύτητας, δεν έχουν χτυπηθεί όλα τα νήματα στιγμιαία, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε προοδευτική πρώιμη αστοχία του νήματος. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι η ενέργεια που απορροφάται από τον στόχο μπορεί να είναι χαμηλή κατά την πρώτη στιγμή της πρόσκρουσης.
- Το ύφασμα θα παραμορφωθεί, δημιουργώντας έναν κώνο στο σημείο διείσδυσης της σφαίρας. Εάν η δύναμη που δημιουργείται από τη σφαίρα στα γύρω νήματα είναι μικρότερη από την ενέργεια τριβής, η σφαίρα θα διεισδύσει έως ότου η συνολική κινητική ενέργεια της σφαίρας θα είναι μικρότερη από την ενέργεια τριβής συμπαγούς υφάσματος και την ενέργεια παραμόρφωσης του υφάσματος. Διαφορετικά, η σφαίρα θα περάσει.

Η άκρη της σφαίρας μπορεί να τρυπήσει το ύφασμα ανάμεσα στα νήματα χωρίς να τα κόψει και να σπρώξει τα νήματα στην άκρη χωρίς να τα κόψει. Συμπυκνώνοντας τα νήματα στην άκρη γύρω από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας, η σφαίρα θα υποβληθεί στην τριβή μεταξύ των νημάτων και του σώματος της σφαίρας, πιέζοντας τα νήματα στην άκρη με την αύξηση της πίεσης στη σφαίρα που αυξάνει τη δύναμη τριβής καθώς η σφαίρα προχωρά μέσα στο πάχος υφάσματος.

Η ακτίνα του κώνου αυξάνεται ακαριαία μετά την κρούση και συνεχίζει να αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του κώνου, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της σφαίρας, τόσο μικρότερη θα είναι η ακτίνα του κώνου λόγω του μικρότερου χρόνου πρόσκρουσης μέχρι την αστοχία του υφάσματος [175]. Το μέγιστο ύψος του κώνου αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η ταχύτητα κρούσης. Η ταχύτητα του κύματος του κώνου V_c μπορεί να δοθεί ως [176]:

$$V_c = constant(V_s)^{0.333}(0.707V_{bullet})^{0.667} \quad (8)$$

Η σταθερά μπορεί να ληφθεί ως 1 [177,178]Q

$$V_c = constant\left(\frac{E}{\rho}\right)^{0.1665}(0.707V_{bullet})^{0.667} \quad (9)$$

Για πολυστρωματική συναρμολόγηση i στρώσεων:

$$V_{c,i} = constant\left(\frac{E_i}{\rho_i}\right)^{0.1665}(0.707V_{bullet})^{0.667} \quad (10)$$

Η μέγιστη καταπόνηση στα νήματα συμβαίνει όταν η ακτίνα του κώνου R_c είναι ίση με τη μέγιστη ακτίνα του κώνου $R_{c,max}$, η οποία μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση ως [176]:

$$R_{c,max} \approx R_p\left[\left(1-\frac{m}{M}\right)/2(\frac{m}{M})\right]^{0.5} \quad (11)$$

Κατά συνέπεια, η μέγιστη καταπόνηση στα νήματα υπολογίζεται κατά προσέγγιση ως

$$\varepsilon_{yarn} = \varepsilon_p(0)K_q \quad (12)$$

όπου το K_q είναι συνάρτηση του λόγου της πυκνότητας του υλικού της θωράκισης προς τη πυκνότητα της σφαίρας και η ταχύτητα διάδοσης της παραμόρφωσης V_s [176,179] και ε_p (0) είναι η τάση στο άκρο της σφαίρας της ακτίνας R_p αμέσως μετά την κρούση.

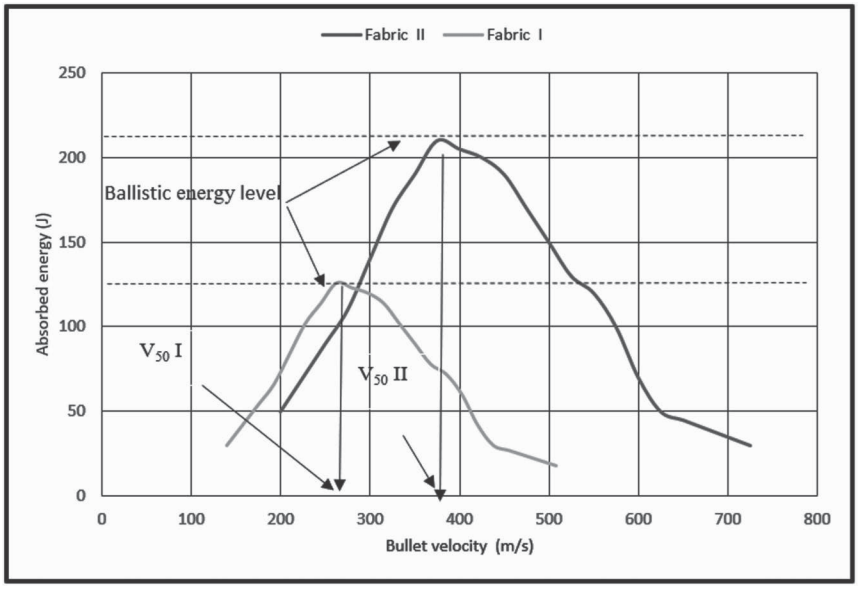
Η ταχύτητα εγκάρσιου κύματος C_s του Euler βρέθηκε να είναι [176]:

$$C_s = (0.5V_s)^{0.333}V_{bullet}^{0.667} \quad (13)$$

$$V_s = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{0.5} \quad (14)$$

Στην περίπτωση των στριμμένων νημάτων, τόσο η αντοχή όσο και ο συντελεστής ελαστικότητας αλλάζουν καθώς αυξάνεται η συστροφή. Το εγκάρσιο κύμα Euler διαδίδεται με υψηλότερες ταχύτητες στα στριμμένα νήματα από ίνες από ότι στα κανονικά. Από την παραπάνω ανάλυση, συνάγεται το

συμπέρασμα ότι το ύφασμα πρέπει να έχει υψηλή ελαστική ενέργεια ανά μονάδα μάζας και την ικανότητα να τη μεταφέρει μακριά από τη ζώνη κρούσης όσο το δυνατόν γρηγορότερα με την ταχύτητα V_s . Εάν δεν συμβεί αυτό, θα οδηγήσει σε συγκέντρωση τάσεων κάτω από την περιοχή πρόσκρουσης και η σφαίρα διεισδύει εύκολα μέσα από το ύφασμα. Οι προδιαγραφές του υφάσματος και της δομής της θωράκισης επηρεάζουν την ενέργεια που απορροφάται, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ταχύτητα πρόσκρουσης της σφαίρας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της σφαίρας, τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή της ενέργειας που απορροφάται από το ύφασμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8. Σημαίνει ότι η βαλλιστική ταχύτητα της θωράκισης ($V_{ballistic}$), που αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια απορρόφησης του υφάσματος, για το ύφασμα I είναι 240 m/s και για το ύφασμα II είναι 380 m/s. Για μεγαλύτερη ταχύτητα σφαίρας, η απορρόφηση της ενέργειας θα μειωθεί απότομα [178].



Εικόνα 3.8 Καμπύλη απορρόφησης ενέργειας από ύφασμα – ταχύτητα σφαίρας [178]

Η αστοχία του νήματος υπό την κρούση από τη σφαίρα διαρκεί διάφορες φάσεις:

I. Decrimping
II. Τράβηγμα των νημάτων κάτω από την αύξηση της τάσης κατά τη διάρκεια του σχηματισμού κώνου.
III. Αστοχία νημάτων υπό εφελκυστική φόρτιση. Η δύναμη έλξης βρέθηκε να εξαρτάται από την τριβή μεταξύ των νημάτων και τον αριθμό των τομών των νημάτων.

Η φάση I χαρακτηρίζεται από τη δομή πλέξης, ενώ η φάση II εξαρτάται από τη σταθερότητα του υφάσματος και τον συντελεστή τριβής μεταξύ των νημάτων. Τέλος, η φάση III είναι συνάρτηση της

αντοχής του νήματος, της σκληρότητας και της ομοιομορφίας των νημάτων. Ο μηχανισμός παραμόρφωσης του υφάσματος υπό κρούση επιτυγχάνεται με την αύξηση της τάσης στο ύφασμα, οδηγώντας στην αύξηση της μέγιστης δύναμης έλξης.

Αποκαλύφθηκε ότι η σφαίρα θα τρυπήσει το ύφασμα όταν φτάσει το κύμα ανάκρουσης, η τάση εφελκυσμού εξαφανιστεί και το εγκάρσιο κύμα σταματήσει.

Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι δυναμικές ιδιότητες των νημάτων και των υφασμάτων καθώς η διάρκεια κρούσης είναι σε μικροδευτερόλεπτα. Κατά συνέπεια, η δυναμική απόκριση του υφάσματος στη δύναμη κρούσης θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, διαφορετικά, εμφανίζεται πρώιμη αστοχία του υφάσματος και αναμένεται διείσδυση σφαίρας. Ο συντελεστής ελαστικότητας των νημάτων αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης ενώ η αντοχή εφελκυσμού των νημάτων μειώνεται κατά την κρουστική φόρτιση. Επομένως, η ενέργεια παραμόρφωσης του νήματος εξαρτάται από τον τύπο του υλικού του νήματος [178-181]. Η ανωμαλία της αντοχής του νήματος πρέπει να είναι ελάχιστη, είτε για νήματα από φυσικές ίνες είτε για συνθετικά, για να αποφευχθεί η πρόωρη αστοχία ορισμένων νημάτων υπό κρούση, που αντιστοιχεί σε η αστοχία του υφάσματος σε πίεση μικρότερη από τη μέση τάση του υφάσματος.

3.5.2 Επίδραση της δομής πλέξης

Η απλή ύφανση είναι η πιο συχνή δισδιάστατη δομή υφάσματος που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό των θωρακίσεων λόγω της σταθερότητας, της υψηλότερης πυκνότητας, του αριθμού των τομών, της τριβής μεταξύ του συμπλεγμένου συνόλου των νημάτων στημονιού και πλήρωσης, της στεγανότητας, της δύναμης έλξης του νήματος και του συντελεστή διάτμησης σε σχέση με τις άλλες υφασμάτινες δομές. Η απόδοση του υφάσματος υπό την κρούση σφαίρας εξαρτάται από το πόση ενέργεια θα απορροφηθεί μέσω των διαφορετικών συστατικών του, κάτι που διερευνήθηκε από αρκετούς ερευνητές [178-182]. Ορισμένες από τις παραπάνω παραμέτρους έχουν αντιφατική επίδραση στην ενέργεια απορρόφησης του υφάσματος. Η χαλαρή δομή με μικρό αριθμό διασταυρώσεων των νημάτων στημονιού και πλήρωσης έχει μικρότερη δύναμη τραβήγματος του νήματος και μειώνει την παρεμβολή της διάδοσης του κύματος παραμόρφωσης κατά τη βαλλιστική κρούση. Η υψηλότερη στεγανότητα του υφάσματος δίνει μεγαλύτερη πυκνότητα περιοχής και ταυτόχρονα αυξάνει τις μονάδες διάτμησης που αυξάνουν τη βαλλιστική ταχύτητα. Η αύξηση της τριβής μεταξύ των νημάτων βελτιώνει την ακαμψία του υφάσματος και τη δύναμη τραβήγματος του νήματος, καθυστερώντας το σπάσιμο των νημάτων υπό τη δύναμη κρούσης μέσω της αύξησης της ενέργειας παραμόρφωσής τους [178].Συνεπώς, συνιστάται η χρήση ενός ισορροπημένου υφάσματος,

δηλαδή υφάσματος με τον ίδιο αριθμό νημάτων και τον ίδιο αριθμό νημάτων και στις δύο κατευθύνσεις στημονιού και πλήρωσης. Οι ακόλουθοι παράγοντες προτάθηκαν για να εξηγήσουν την περιοχή επαφής των νημάτων [183]:

Crossing–over Firmness Factor (CFF) = Αριθμός γραμμών διασταύρωσης σε πλήρη επανάληψη/Αριθμός σημείων σύμπλεξης σε πλήρη επανάληψη (15)

Floating Yarn Factor (FYF)= Αριθμός αιωρούμενων τμημάτων σε πλήρη επανάληψη/ Αριθμός σημείων σύμπλεξης σε πλήρη επανάληψη. (16)

Μια άλλη προσέγγιση εισήχθη με διαίρεση των νημάτων πλήρωσης ή στημονιού σε τρία μέρη: επαφή, σύμπλεξη και χώρο, για να περιγραφεί η επίδραση κάθε μέρους του νήματος στη συμπεριφορά του υφάσματος υπό βαλλιστική κρούση [184].

Μια τροποποίηση στις εξισώσεις 15 και 16 είναι η αντικατάσταση των παραμέτρων CFF και FYF με το δείκτη συμπλέξεως (I) και το δείκτη float (F). Η σταθερότητα του υφάσματος θα είναι στις κατευθύνσεις στημονιού και πλήρωσης ως:

$$I = \left(i_{wp} + i_{wf}\right)/\left(R_{wp} - R_{wf}\right) \quad (17)$$

$$F = \left(f_{wp} + f_{wf}\right)/\left(R_{wp} - R_{wf}\right) \quad (18)$$

Για ολόκληρο το ύφασμα, ο παράγοντας ύφανσης που εξηγεί τη σταθερότητα είναι:

$$Firness = \left(\frac{1}{F}\right)\left(\, i_{wp}W_{wf}D_{wp} + i_{wf}W_{wp}D_{wf}\right) + \left(\, f_{wp}W_{wf}D_{wp} + f_{wf}W_{wp}D_{wf}\right)/(R_{wp}R_{wf}D_{wp}D_{wf}) \quad (19)$$

Για ισορροπημένο ύφασμα [185]:

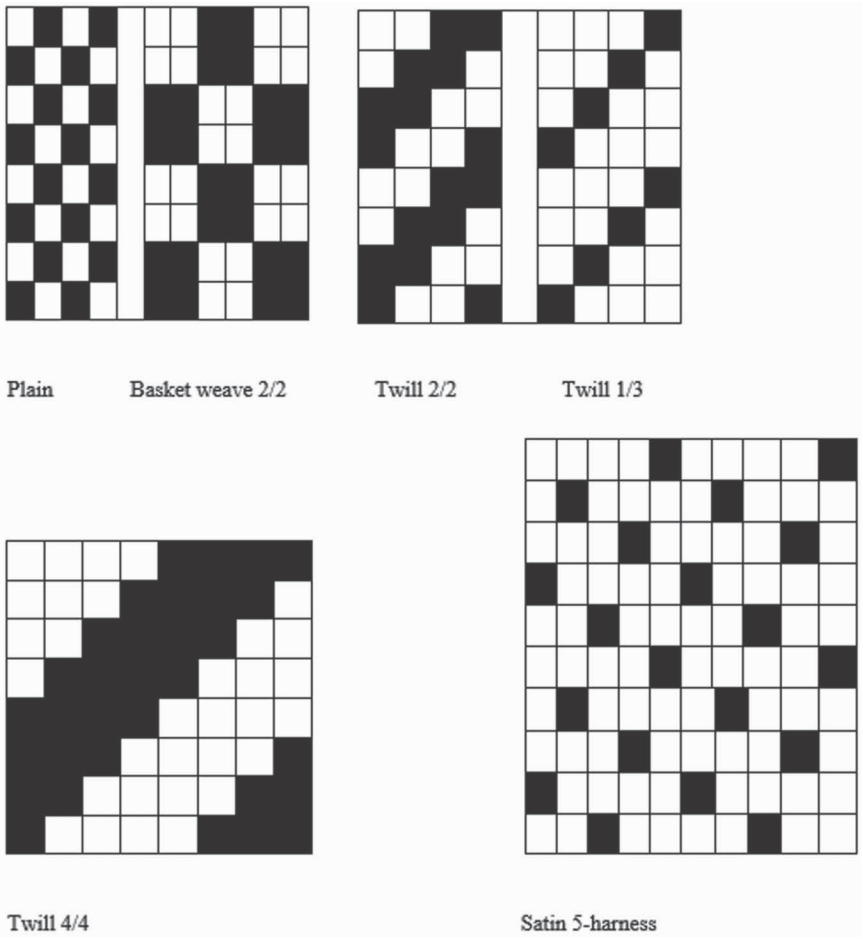
$$Firmness = (\frac{1}{F})(\frac{2W_{wp}}{D_{wp}}) \quad (20)$$

Η απλή ύφανση έχει την υψηλότερη σταθερότητα σε σύγκριση με άλλες διαφορετικές δομές.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9, ο αριθμός των συμπλοκών τόσο στις κατευθύνσεις στημονιού όσο και στις κατευθύνσεις πλήρωσης ποικίλλει ανάλογα με το σχέδιο ύφανσης. Η διάδοση της τάσης στο ύφασμα στην πρόσκρουση της σφαίρας θα ποικίλλει ως προς το μέγεθος και την κατεύθυνση ως συνάρτηση του σχεδίου ύφανσης. Έτσι, η απορροφούμενη ενέργεια βρέθηκε να είναι υψηλότερη για

την απλή ύφανση από ό,τι για τις άλλες δομές υφάσματος και η υπολειπόμενη ταχύτητα σφαίρας λόγω υψηλότερης ποσότητας τριβής νήματος-σφαίρας είναι μικρότερη. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις πολυστρωματικών κατασκευών, η απόδοση της βαλλιστικής αντίστασης επηρεάζεται λιγότερο από την αρχιτεκτονική ύφανσης και τη σταθερότητα του υφάσματος [185], ειδικά σε μεγάλο αριθμό στρωμάτων υφάσματος. Παρόλα αυτά, η χρήση της διάταξης υφασμάτων με γωνιακή στρώση δομής πολλαπλών στρώσεων βελτιώνει την έκταση της ισοτροπίας που οδηγεί σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας. Συνεπώς, συνιστάται να αυξηθεί ο αριθμός των στρώσεων και να μειωθεί η γωνία μεταξύ των νημάτων στημονιού στις διαδοχικές στρώσεις [186]. Για παράδειγμα, η ενέργεια απορρόφησης του συγκροτήματος υφάσματος αυξήθηκε γραμμικά με την αύξηση της γωνίας προσανατολισμού στην περίπτωση οκτώ στρώσεων υφάσματος ευθυγραμμισμένες καθώς το [0/22.2/45/67.2] είναι υψηλότερο από το ευθυγραμμισμένο με ύφασμα [0/0/0/0] . Ο αντίκτυπος

η απορρόφηση ενέργειας από αυτά τα γωνιακά υφασμάτινα πάνελ έδειξε αύξηση σε σχέση με το ευθυγραμμισμένο αντίστοιχο, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων [187].

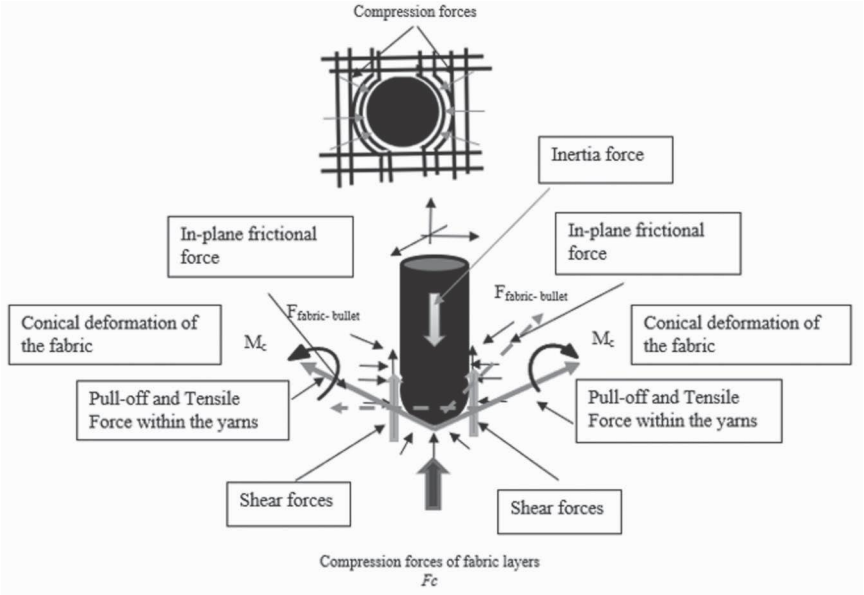


Εικόνα 3.9 Διαφορετικά σχέδια ύφανσης [185]

3.6 Αναλυτικά μοντέλα διείσδυσης σφαιρών μέσω του υφάσματος

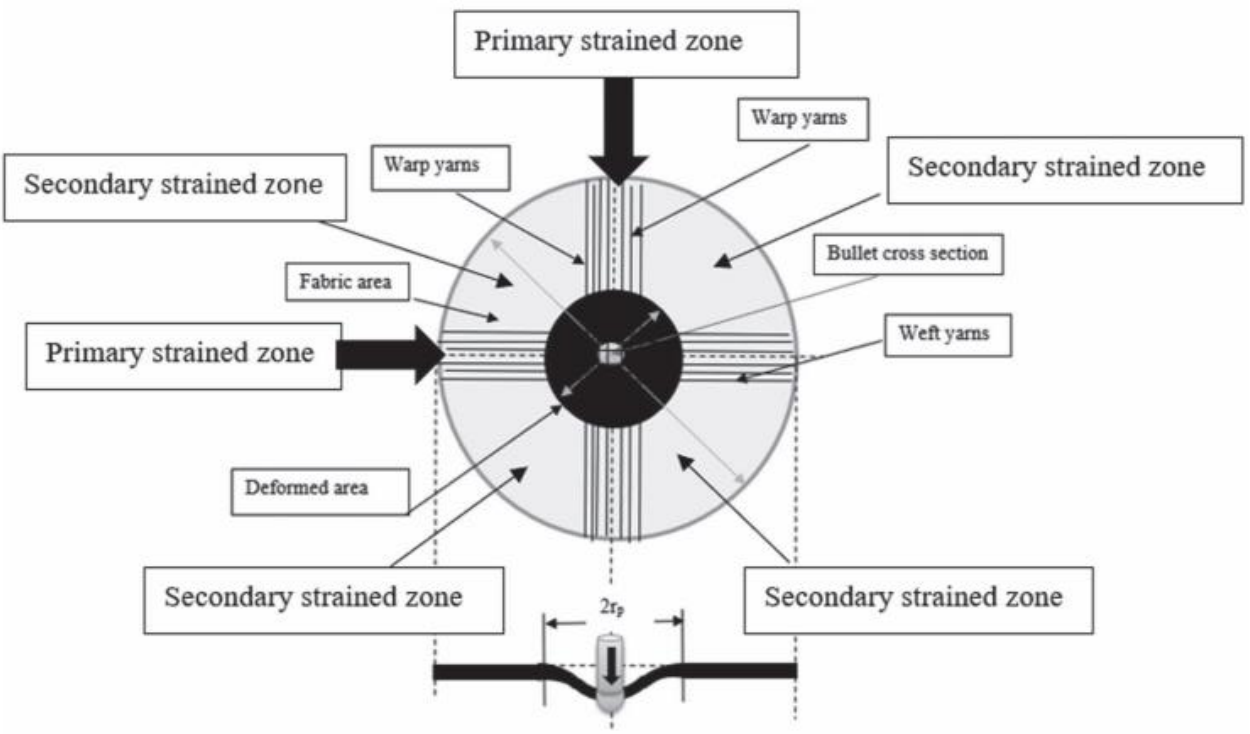
3.6.1 Θωράκιση μονής στρώσης

Για τη μελέτη των βαλλιστικών επιπτώσεων έχουν χρησιμοποιηθεί αναλυτικές μέθοδοι. Το ύφασμα έχει πολύ περίπλοκη γεωμετρία. Υπό τις συνθήκες φόρτισης κρούσης, η παραμόρφωση του υφάσματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της συμπεριφοράς του αρχιτεκτονικού υφάσματος υπό τις δυναμικές δυνάμεις και της αλλαγής στις μηχανικές ιδιότητες των ινών. Στις περισσότερες περιπτώσεις για αλεξίσφαιρες πανοπλίες, η σφαίρα θα αντιμετωπιστεί από αρκετές δυνάμεις αντίστασης αφού αγγίξει την επιφάνεια του υφάσματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10 Δυνάμεις που δρουν στη σφαίρα κατά την πρόσκρουσή της στην κύρια τεντωμένη ζώνη.

Η κίνηση της περιοχής κάτω από το άκρο της σφαίρας θα προκαλέσει διάδοση καταπόνησης κατά μήκος της κατεύθυνσης εντός του επιπέδου, κύμα συμπίεσης, καθώς και κύμα διάτμησης, θα δημιουργηθούν στην ίδια στιγμή στην κατεύθυνση του πάχους. Η τάση συμπίεσης θα οδηγήσει σε σχηματισμό κωνικής παραμόρφωσης κάτω από το άκρο της σφαίρας (Εικ. 3.11) με αποτέλεσμα την τάση στα νήματα στημονιού και πλήρωσης που σχηματίζουν τον κώνο κατά την πρόσκρουσή τους στην κύρια τεντωμένη ζώνη. Σε αυτό το στάδιο, οι δυνάμεις τριβής στο επίπεδο μεταξύ των νημάτων στημονιού και πλήρωσης αντιστέκονται στο σχηματισμό του κώνου. Η αστοχία των νημάτων κάτω από τις τάσεις, τη συμπίεση, την τάση ή τη διάτμηση, συμβαίνει εάν οι παραμορφώσεις τους υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τάσεις αστοχίας. Τα νήματα στη δευτερεύουσα τεντωμένη ζώνη θα αντιστέκονται στην κίνηση αυτών στην κύρια ζώνη λόγω της τριβής μεταξύ των νημάτων στο σημείο τομής και μεταξύ των γειτονικών νημάτων, γεγονός που αυξάνει τις δυνάμεις έλξης.



Εικόνα 3.11 Σχηματική παρουσίαση παραμόρφωσης απλού υφάσματος υπό διείσδυση σφαίρας.

Δίνεται δύναμη αντίστασης, που ενεργεί στη σφαίρα κατά τη διείσδυσή της ως:

$$F = N_{compactness} + \sum k\tau + \sum m_{wf}A_{wf}\sigma_{wf} + \sum m_{wp}A_{wp}\sigma_{wp} + F_{out-plane\ yarn\ frictional\ force} + F_{conical\ deformation} \quad (21)$$

Για να σταματήσει η σφαίρα, η τιμή F (εξ. 21) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με $F_{bullet}(0)$ και η $F_{conical\ deformation}$ είναι η δύναμη που απαιτείται για την κάμψη του υφάσματος υπό τη δύναμη αδράνειας της σφαίρας, η οποία είναι συνάρτηση της ακαμψίας της κάμψης του υφάσματος και της αντοχής του νήματος. Το μέγεθος του κώνου αυξάνεται σε διάμετρο και ύψος καθώς η σφαίρα χτυπά την περιοχή του υφάσματος κάτω από την άκρη της σφαίρας.

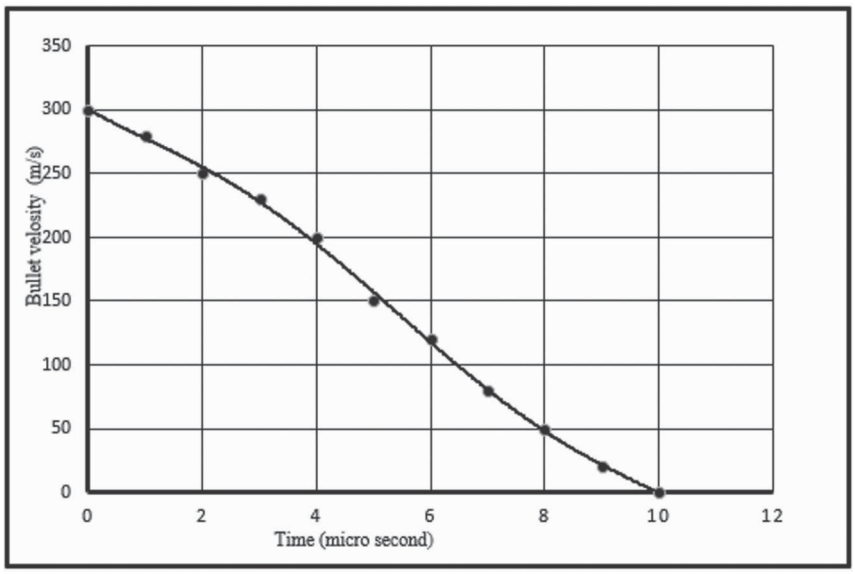
Εάν η σφαίρα ταξιδεύει αρχικά με ταχύτητα $V_{before\ impact}$, τότε η καταπόνηση των νημάτων στην άκρη της σφαίρας (ακτίνα R) αμέσως μετά την κρούση είναι:

$$\varepsilon_{p0} = \left[V_{before\ impact}/(1.44(E/\rho_m)^{0.5}\left(1+\frac{m}{M}\right))\right]^{1.333} \quad (22)$$

Η ταχύτητα της σφαίρας αμέσως μετά την κρούση είναι

$$V_0 = V_{before\ impact}/\left(1+\frac{m}{M}\right) \quad (23)$$

Η ταχύτητα της σφαίρας μειώνεται λόγω της δύναμης αντίστασης F, ενώ η καταπόνηση στα νήματα αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ύψος του κώνου και φτάνοντας στην κορυφαία τάση στη μέγιστη τιμή της. Η εικόνα 3.12 απεικονίζει τη μεταβολή της ταχύτητας της σφαίρας κατά τη διείσδυση μέσω του υλικού θωράκισης. Η κλίση της καμπύλης V–t εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το πάχος του στόχου, οι ιδιότητες του υλικού, η δομή του υλικού, η ταχύτητα κρούσης και οι γεωμετρικές παράμετροι σφαίρας



Εικόνα 3.12 Ταχύτητα σφαίρας σε σχέση με τον χρόνο πρόσκρουσης μέσω της θωράκισης.

3.6.2 Θωράκιση πολλαπλών στρώσεων

Από την παραπάνω ανάλυση, η ενέργεια που χάνεται από τη σφαίρα κατά τη διέλευση της από το ύφασμα είναι ίση με την ενέργεια που απορροφάται από τον υλικό στόχο στην περιοχή που στοχεύει η σφαίρα. Η απορροφούμενη ενέργεια των πολυστρωματικών δομών εξαρτάται από τη γωνία προσανατολισμού και την απόσταση μεταξύ των στρωμάτων του υφάσματος. Στην περίπτωση μηδενικού κενού, τα στρώματα θα συμπιεστούν μεταξύ τους για να λειτουργήσουν ως μέσο αντίστασης για τη διείσδυση της σφαίρας. Ωστόσο, η αστοχία των στρωμάτων θα ξεκινήσει διαδοχικά καθώς η σφαίρα διεισδύει μέσα από το επιφανειακό στρώμα. Στην περίπτωση του συστήματος πολλαπλών στρώσεων με απόσταση μεταξύ τους, η ταχύτητα κρούσης του δεύτερου στρώματος θα είναι η ταχύτητα εξόδου του πρώτου. Οι δυνάμεις συμπίεσης στρωμάτων υφάσματος χωρίς κενά μπορούν να δοθούν ως:

Η συνολική δύναμη συμπίεσης των στρωμάτων:

$$F_c = \sum F_{ci} \qquad (24)$$

Η δύναμη συμπίεσης για κάθε στρώμα μπορεί να εκφραστεί ως

$$F_{ci} = D_{bullet}{}^{2}\,\sigma_{ci}/\sin\theta_{i}. \quad (25)$$

Για στρώματα με μη μηδενική απόσταση, η απορροφούμενη ενέργεια από κάθε στρώμα ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα της σφαίρας η οποία έδειξε ότι η απορροφούμενη ενέργεια (E) είναι χαμηλή σε υψηλή ταχύτητα σφαίρας και αυξάνεται η απορρόφηση στα διαδοχικά στρώματα, αλλά μειώνεται ξανά σε χαμηλότερη ταχύτητα σφαίρας. Όλα αυτά τα συνδυασμένα αποτελέσματα καθιστούν το πρόβλημα της βαλλιστικής πρόσκρουσης μέσω των πολλαπλών ινωδών δομών ένα περίπλοκο μοντέλο. Ο κώνος παραμόρφωσης θα είναι παρόμοιος για όλα τα στρώματα εάν το μέγιστο ύψος του κώνου για ένα μόνο στρώμα είναι μικρότερο από το διάστημα μεταξύ των στρωμάτων. Στην περίπτωση πολυστρωματικών, η ακτίνα του κώνου σε οποιοδήποτε από τα στρώματα δίνεται από το [186]

$$R_{c} = 1 + (V_{si}/V_{sj})^{0.333}\,(R_{1}-1). \quad (26)$$

Εάν ο χώρος μεταξύ των στρωμάτων είναι μεγαλύτερος από εκείνο του μέγιστου ύψους κώνου μιας στρώσης, οι κώνοι για τα πρώτα κρουσμένα στρώματα δεν θα παρεμβαίνουν στα άλλα στρώματα. Η τιμή του V μειώνεται καθώς το T' (το κανονικοποιημένο συνολικό διάκενο της θωράκισης διαιρούμενο με την ακτίνα της σφαίρας) αυξάνεται για μεγάλο αριθμό στρωμάτων. Στην πολυστρωματική θωράκιση με αμελητέα απόσταση, τα κύματα τάσης και κώνου σε όλα τα στρώματα ξεκινούν σχεδόν ταυτόχρονα και σχεδόν όλα τα στρώματα αποτυγχάνουν μαζί. Μετά την αστοχία των νημάτων σε ένα συγκεκριμένο στρώμα, η σφαίρα υπόκειται συνεχώς σε δυνάμεις τριβής από την επαφή με νήματα μέχρι την πλήρη διείσδυσή του έξω από αυτά. Το πλάτος των ζωνών του νήματος έλξης, που σχετίζεται με τη μεταφορά ενέργειας στα νήματα στην περίπτωση των πολυστρωματικών, αυξήθηκε περισσότερο από το πλάτος της διαμέτρου της σφαίρας λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στρωμάτων. Το πλάτος των στραγγισμένων νημάτων στη ζώνη έλξης είναι μικρότερο για τον πρώτο αριθμό στρώσεων σε σχεδόν σταθερό, για λιγότερα από 35 στρώματα και θα αυξάνεται με τον αυξανόμενο αριθμό στρώσεων. Αυτό σημαίνει ότι για μεγαλύτερο αριθμό στρώσεων, είναι αξιοσημείωτη μεγαλύτερη αντίσταση των νημάτων έλξης [187]. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της τριβής μεταξύ των νημάτων σε διαφορετικά στρώματα που οδηγεί σε διεύρυνση της ζώνης έλξης. Η ανάλυση της καταπόνησης στα νήματα στην περιοχή κρούσης έχει μελετηθεί θεωρητικά από αρκετούς ερευνητές, [188-194] που αποκάλυψε τις επιπλοκές στην επίτευξη μιας συγκεκριμένης λύσης για την ικανοποίηση των διαφορετικών υλικών και δομών της προστατευτικής θωράκισης υπό

κρούση από την σφαίρα.

3.7 Επίδραση παραμέτρων στην βαλλιστική ταχύτητα

3.7.1 Επίδραση των ιδιοτήτων των ινών στη βαλλιστική ταχύτητα

Υπάρχουν διάφοροι τύποι για την αξιολόγηση της σκληρότητας των ινών και της ταχύτητας ύφανσης των τάσεων. Η ταχύτητα διάδοσης της παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη εξίσωση [195]:

$$V_s = \sqrt{E_f/\rho_f}, \tag{27}$$

όπου V είναι η διαμήκης ταχύτητα κύματος σε m/s, E είναι ο συντελεστής ίνας σε Pa και ρ είναι η πυκνότητα όγκου της ίνας σε g/m^3

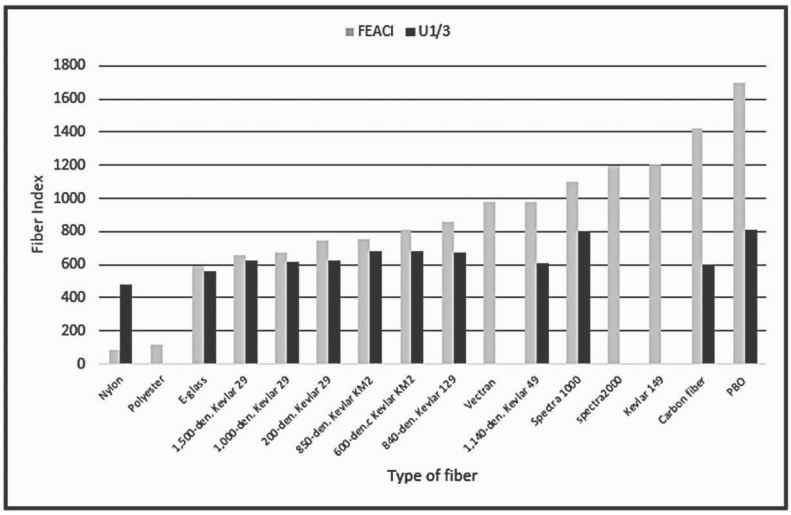
Μια αδιάστατη ιδιότητα ίνας U ορίζεται ως το γινόμενο της ειδικής σκληρότητας της ίνας και της ταχύτητας κύματος παραμόρφωσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποιοτική αξιολόγηση της απόδοσης των ινών, που επηρεάζεται από τη μάζα της σφαίρας [196]:

$$U = (\sigma_f \varepsilon_f/2\rho_f)\,(E_f/\rho_f)^{0.5}. \tag{28}$$

Ένας τροποποιημένος τύπος για την έκφραση του δείκτη ικανότητας απορρόφησης ενέργειας ινών (FCI) βασίστηκε ως [47]:

$$FCI = (T_f V_s) \tag{29}$$

όπου T είναι η αντοχή της ίνας σε «GPa» και V είναι η ταχύτητα διαμήκους κύματος.



Εικόνα 3.13 Δείκτης ινών (FCI και $U^{1/3}$) για διαφορετικούς τύπους ινών

Η εμπειρική εργασία για τη συσχέτιση της απόδοσης της βαλλιστικής πρόσκρουσης με τα χαρακτηριστικά σφαίρας και στόχου έχει αποδώσει άβολες διαστάσεις σχέσεις μεταξύ της ταχύτητας διάτρησης και των ποσοτήτων στόχου και σφαίρας [197]. Οι αναλογίες διαστάσεων του συστήματος θωράκισης σφαίρας θεωρούνται ως:

$$\Phi\,[(V_{50}/U^{0.333}), A_d\,A_p/M)] = 0. \qquad (30)$$

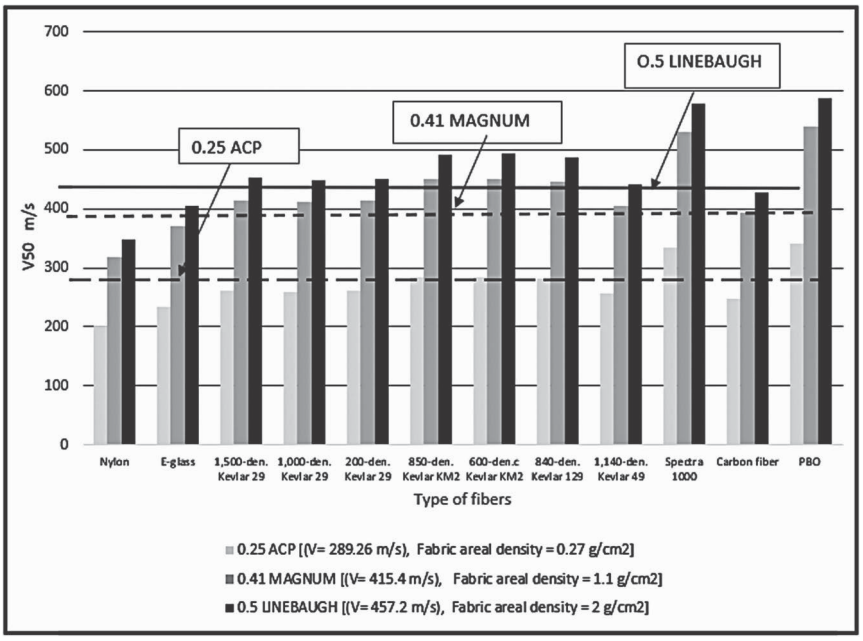
Για κάθε τύπο υλικού, η τιμή (V(0)/U0.333) είναι ανάλογη του

(A_dA_p/M) για γωνία πρόσπτωσης Angle Incidence(AI) θ = 0°. Για τη γωνία θ, το βαλλιστικό όριο V_{50} (θ) είναι:

$$V_{50}\,(\theta) = V_{50}(0)\,X^{\sec(\theta)-1}, \qquad (31)$$

όπου το X είναι σταθερό, προσδιοριζόμενο από την εξίσωση παλινδρόμησης των πειραματικών δεδομένων, το V(0) είναι το βαλλιστικό όριο στη γωνία πρόσπτωσης θ = 0°.

Το βαλλιστικό όριο V υπολογίστηκε για διαφορετικούς τύπους ινών και πυκνότητα υφασμάτων για να αντέχουν την ενέργεια διαφορετικών διαμετρημάτων σφαίρας, όπως δίνεται στην εικόνα 46. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν μπορούν όλες οι ίνες να νικήσουν τη σφαίρα των διαφορετικών διαμετρημάτων. Συνεπώς, ο τύπος της ίνας πρέπει να επιλεγεί με ακρίβεια.

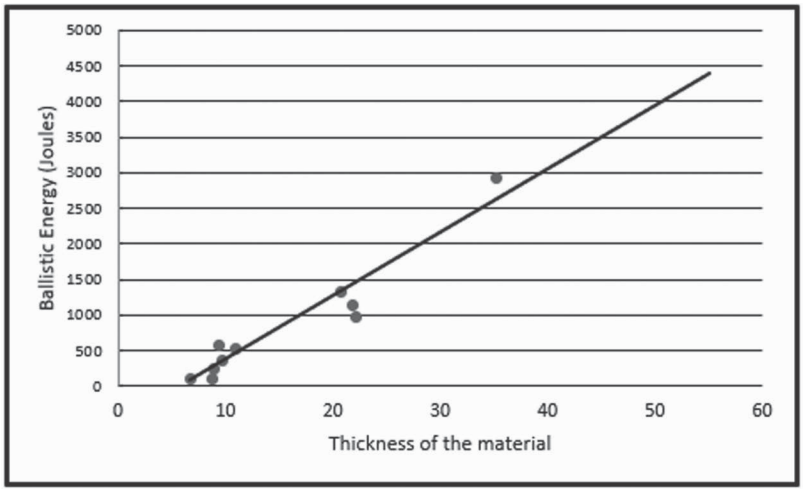


Εικόνα 3.14 Βαλλιστικό όριο σε σχέση με την πυκνότητα της περιοχής του υφάσματος

3.7.2 Επίδραση πάχους του υφάσματος

Η βαλλιστική ταχύτητα ή όριο είναι η ταχύτητα που απαιτείται προκειμένου μια σφαίρα να διεισδύσει αξιόπιστα (τουλάχιστον το 50% των φορών) σε ένα υλικό. Η σφαίρα, γενικά, δεν θα διαπεράσει έναν δεδομένο στόχο όταν η ταχύτητα της σφαίρας είναι χαμηλότερη από το βαλλιστικό όριο V.

Η σχέση μεταξύ της βαλλιστικής ενέργειας και του πάχους των στρωμάτων θωράκισης θα πάρει το σχήμα της σχέσης που δίνεται στην εικόνα 3.15. [198]



Εικόνα 3.15 Βαλλιστική ενέργεια έναντι πάχους υλικού στόχου.

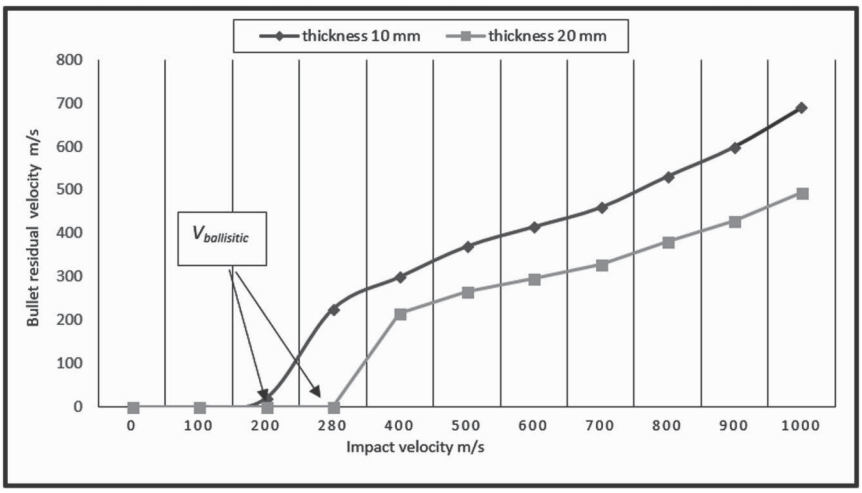
Τα πολυστρωματικά υφάσματα Aramid μπορούν να σταματήσουν μόνο σφαίρες 7,62 mm (~850 m/s ως ταχύτητα κρούσης). Η σφαίρα διατρυπά εύκολα τη λεπτή πανοπλία. η θωράκιση αρχίζει να

απορροφά υψηλότερη ενέργεια κρούσης σε πάχος άνω των 37,5 mm μέχρι να μπορέσει να σταματήσει εντελώς τη σφαίρα με πάχος μεγαλύτερο από 50 mm.[198]

Για να αυξηθεί το πάχος της θωράκισης χωρίς να αυξηθεί το τοπικό βάρος, τα ινώδη υλικά θωράκισης σώματος θα πρέπει να έχουν ίνες χαμηλής πυκνότητας, πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και υψηλή ακαμψία.

3.7.3 Επίδραση της ταχύτητας κρούσης της σφαίρας στην βαλλιστική ταχύτητα

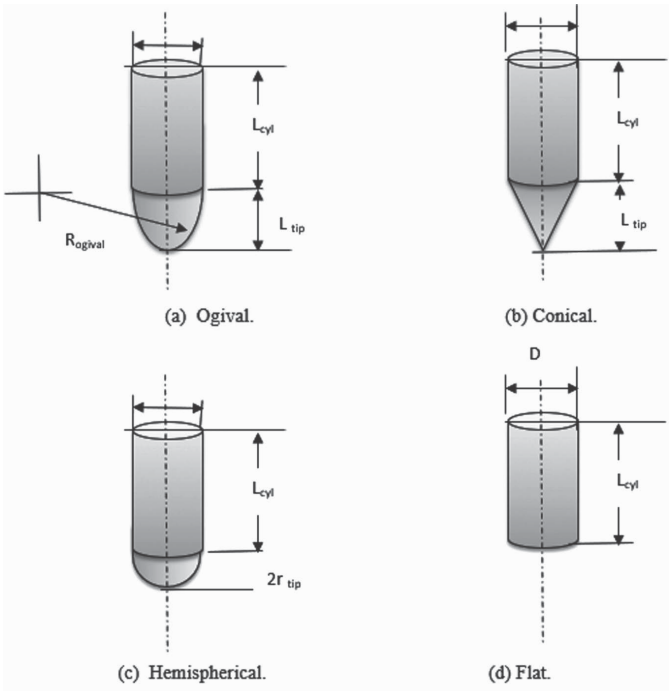
Εάν η ταχύτητα της σφαίρας στο τέλος του συμβάντος κρούσης είναι μηδέν, τότε η σφαίρα σταματά από τη θωράκιση, $V_{balistic} \leq V$. Η συμπεριφορά του στόχου σε διαφορετικές ταχύτητες κρούσης σφαίρας παρουσιάζεται στην εικόνα 3.16. Η σφαίρα με ταχύτητα κρούσης έως 200 m/s δεν θα διαπεράσει το υλικό στόχο πάχους 10 ή 20 mm. Σε υψηλότερη ταχύτητα, η σφαίρα διατρυπά το στόχο, βγαίνοντας με διαφορετική υπολειπόμενη ταχύτητα, ανάλογα με το πάχος του στόχου. Σε πάχος στόχου 10 mm, η βαλλιστική ταχύτητα είναι 200 m/s και με την αύξηση του πάχους στόχου στα 20 mm, αυτή η ταχύτητα αυξάνεται στα 280 m/s. Οι περισσότερες από τις δυνάμεις που αντιστέκονται στη διείσδυση της σφαίρας είναι συνάρτηση της ταχύτητας της σφαίρας, επομένως θα επηρεάσουν την τιμή της βαλλιστικής ταχύτητας της θωράκισης.



Εικόνα 3.16 Σχέση ταχύτητας κρούσης σφαίρας και βαλλιστικής ταχύτητας

3.7.4 Επίδραση της γεωμετρίας της σφαίρας

Οι βασικές παράμετροι, που καθορίζουν την αντίσταση της σφαίρας, είναι το σχήμα μιας σφαίρας, η τριβή μεταξύ των νημάτων και της σφαίρας και η τριβή μεταξύ των νημάτων [40]. Ο κυρίαρχος παράγοντας στη ζημιά της θωράκισης είναι το σχήμα της αιχμής της κρουστικής σφαίρας. Η άκρη της σφαίρας έχει πολλά προφίλ με διαφορετικές γεωμετρικές διαστάσεις (Εικ. 3.17).



Εικόνα 3.17 Γεωμετρία σφαιρών

Η χρήση του κωνικού άκρου θα αυξήσει την πίεση συμπίεσης στην άκρη της σφαίρας, οδηγώντας σε ταχύτερη διείσδυση μέσω του υλικού θωράκισης.[199-200]

Η πρόσκρουση της σφαίρας σε μια σκληρή πλάκα έδειξε ότι η άκρη της σφαίρας σε επαφή με τον στόχο θα παραμορφωθεί. Με περαιτέρω διείσδυση το σχήμα του άκρου θα αλλάξει σε σφαιρικό σχήμα ή θα κατακερματιστεί, ανάλογα με τη σκληρότητα της επιφάνειας στόχου.[201] Ο συντελεστής σφαίρας ($1/L^{0,5}$), όπου L είναι το μήκος της σφαίρας, μπορεί να χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την απόδοση της σφαίρας. Μια πιο μυτερή σφαίρα δεν επιβραδύνεται τόσο γρήγορα όσο μια αμβλεία σφαίρα σε υψηλότερες ταχύτητες. Σε χαμηλότερες ταχύτητες, οι μυτερές σφαίρες επιβραδύνονται πιο γρήγορα,[202] αλλά η παραμόρφωση της πίσω πλάκας αυξάνεται. Περισσότερη ενέργεια απορρόφησης καταγράφεται στο κωνικό άκρο με χαμηλή ταχύτητα κρούσης, ωστόσο σε μεγάλο αριθμό στρωμάτων υφάσματος η διαφορά μεταξύ των σχημάτων του άκρου είναι ασήμαντη.[203] Για το μονόφυλλο ύφασμα Twaron CT716 απλής ύφανσης, κωνικές και ωοειδείς σφαίρες τρύπησαν το ύφασμα με την ελάχιστη ποσότητα νημάτων τραβήγματος και τα νήματα τεντωμένα μέχρι αστοχίας.

Οι σφαίρες με επίπεδη κεφαλή παγιδεύτηκαν εντός του πάχους του νήματος και οι ημισφαιρικές σφαίρες παρήγαγαν μετατόπιση περισσότερων νημάτων προς τα έξω [204-205] λόγω της μεγάλης περιοχής επαφής σφαίρας-στόχου. Η μέγιστη τιμή της δύναμης έλξης βρίσκεται είτε εντός είτε εκτός επιπέδου και είναι γραμμικά ανάλογη με την τιμή της προέντασης που εφαρμόζεται στο ύφασμα. Το βαλλιστικό όριο για την ίδια μάζα της σφαίρας αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος της σφαίρας, η σχέση είναι σχεδόν γραμμική. Επιπλέον, με την ίδια διάμετρο της σφαίρας, καθώς αυξάνεται η μάζα της σφαίρας, η βαλλιστική οριακή ταχύτητα μειώνεται. Αλλά καθώς αυξάνεται η μάζα, αυξάνεται και ο ρυθμός μείωσης της βαλλιστικής οριακής ταχύτητας. [209]. Όλες οι σφαίρες που διαθέτουν δυνατότητες σφήνωσης μέσα από το ύφασμα, όπως ημισφαιρικά, ωοειδή και κωνικά σχήματα, προκαλούν σχίσιμο των ινών που δεν παρουσιάζει σημαντική εμφανή διαφορά από τα συστήματα ινών μονής στρώσης.[210]

3.8 Χρήση σκληρών πλακών από ενισχυμένο πολυμερές

Η συνολική κινητική ενέργεια της σφαίρας που χάνεται κατά τη διάρκεια του συμβάντος βαλλιστικής πρόσκρουσης είναι ίση με τη συνολική ενέργεια που απορροφάται από τον σύνθετο στόχο πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες μέχρι το χρονικό διάστημα που πρέπει να περάσει από αυτόν. Κατά τη διείσδυση της σφαίρας στη σκληρή πλάκα, θα πρέπει να έχει κινητική ενέργεια επαρκή για να υπερνικήσει τις ακόλουθες ενέργειες αντίστασης:

- Ενέργεια θλιπτικής τάσης λόγω της συμπαγούς πλάκας στην περιοχή επαφής με το άκρο της σφαίρας.
- Ενέργεια τριβής που απορροφάται κατά την αλληλεπίδραση του διεισδυτή και του πολυστρωματικού υλικού.
- Ενέργεια αποκόλλησης.
- Ενέργεια πυρόλυσης μήτρας.
- Ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης των δευτερευόντων νημάτων.
- Ενέργεια αστοχίας εφελκυστικής ίνας των πρωτογενών νημάτων.
- Απορρόφηση ενέργειας λόγω διάτμησης.
- Απορροφούμενη ενέργεια λόγω αποκόλλησης και απομάκρυνσης της ίνας.
- Απορρόφηση ενέργειας με βάση τις παραμέτρους laminate και
- Απορρόφηση ενέργειας λόγω σχηματισμού κώνου.

Η διατμητική δύναμη απόφραξης αντιπροσωπεύει το υψηλότερο ποσοστό ενέργειας απορρόφησης της πλάκας.

Η ταχύτητα της σφαίρας θα μειωθεί κατά τη διείσδυση μέσω του στόχου, ανάλογα με την τάση συμπίεσης κατά την κατεύθυνση του πάχους σ , η πυκνότητα του υλικού στόχου ρ, η σταθερά της σφαίρας εξαρτάται από το σχήμα της σφαίρας, είναι ίση με 1 για ένα επίπεδο -τελική σφαίρα, για κυλινδρικό άκρο σφαίρας, SF = 0,5, και SF = $(\sin \alpha)^2$ για κωνικό σχήμα με γωνία κορυφής α.

Η ικανότητα του σύνθετου πολυστρωματικού υλικού να απορροφά την ενέργεια κρούσης εξαρτάται από τις πολυάριθμες μεταβλητές,[211] μεταξύ των οποίων το πάχος του και η ταχύτητα της σφαίρας είναι οι κυρίαρχοι παράγοντες. Ο μηχανισμός αστοχίας της σύνθετης πλάκας είναι αρκετά διαφορετικός από αυτόν της πολυστρωματικής υφασμάτινης θωράκισης ίδιου πάχους. Σε κρούση υψηλής ταχύτητας, η σύνθετη δομή δεν είναι σε θέση να αντέξει την καταπόνηση και την αποκόλληση. Όταν ξεκινήσει, θα μειώσει την ικανότητα του σύνθετου να απορροφά ενέργεια. Επιπλέον, για το σύνθετο υλικό, η συνεισφορά των νημάτων στη δευτερεύουσα ζώνη και στο σχηματισμό κώνου είναι μεγαλύτερη στην απορρόφηση ενέργειας. Αν και η ισχύς συγκόλλησης της μήτρας ινών αυξάνει την αντοχή του laminate, αλλά επίσης μειώνει τη διασπορά ενέργειας. Κατά συνέπεια, συνιστάται υφαντό ύφασμα με χαμηλή πτύχωση. Ο μηχανισμός αστοχίας του σύνθετου βρέθηκε να είναι διαφορετικός, ανάλογα με την ταχύτητα της σφαίρας. Σε χαμηλή ταχύτητα, η ενέργεια απορροφάται μέσω της καταπόνησης των στοιχείων του σύνθετου υλικού, των ινών και της μήτρας. Ενώ σε υψηλή ταχύτητα, το κλάσμα των ινών και η σύνθετη ρηγμάτωση επιτυγχάνονται από τη διεπιφανειακή αστοχία και, τέλος, κυριαρχεί η αποκόλληση υψηλής ταχύτητας των ελασμάτων. Κατά συνέπεια, ο μηχανισμός αστοχίας του σύνθετου υλικού ίνας συμβαίνει είτε μέσω της αστοχίας καταπόνησης των νημάτων ή της διατμητικής απόφραξης ή και των δύο. Η ενέργεια σχηματισμού κώνου αυξάνεται στο πρώιμο στάδιο του χρόνου κρούσης, στη συνέχεια πέφτει καθώς η σφαίρα διεισδύει περαιτέρω. Στο μεταξύ, η ενέργεια της παραμόρφωσης στη δευτερεύουσα ζώνη αυξάνεται μέχρι την πλήρη διείσδυση της σφαίρας μέσω του στόχου.

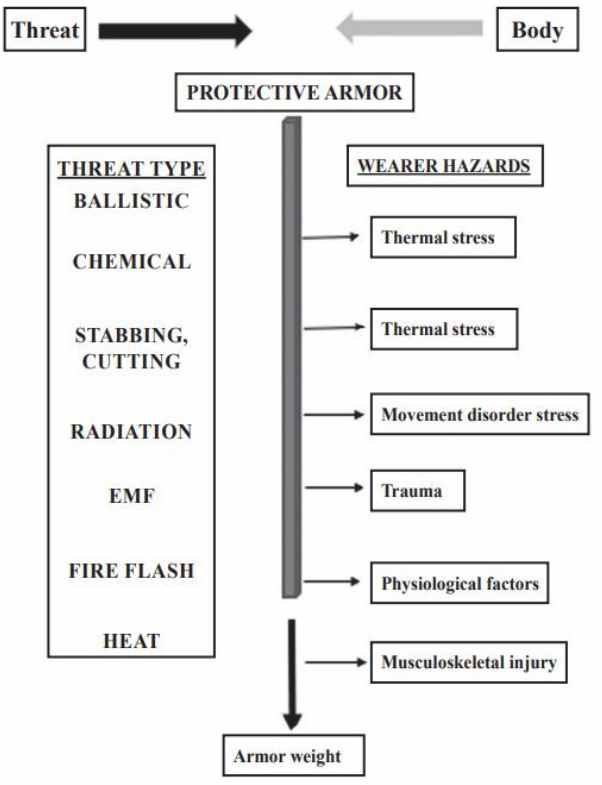
Το ποσοστό των διαφορετικών συστατικών της ενέργειας απορρόφησης διαφέρει, μαζί με τη σύνθετη δομή και τις προδιαγραφές, ιδίως το πάχος. Επιπλέον, η αύξηση των διαφορετικών ενεργειακών συνιστωσών έχει άμεση επίδραση στην ταχύτητα της σφαίρας V.

Ο συντελεστής ελαστικότητας της ίνας σε βαλλιστικούς ρυθμούς φόρτισης είναι υψηλότερος σε σύγκριση με τις τιμές που μετρήθηκαν από τις δοκιμές κατά κάποιο τρόπο στατικής τάσης, ενώ η αντοχή της μειώνεται, η αύξηση του συντελεστή ελαστικότητας της ίνας κυμαινόταν από κανένα σε σχεδόν τριπλασιασμό της σαν στατικής τιμής [26] Οι παραπάνω τύποι θα μπορούσε να είναι χρήσιμοι για την προκαταρκτική αξιολόγηση του μηχανικού σχεδιασμού της ελασματοποιημένης πλάκας FRP προκειμένου να μειωθεί το κόστος δοκιμής των δειγμάτων που σχεδιάστηκαν πρόσφατα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η συμπεριφορά του σύνθετου υπό κρούση χαμηλής ταχύτητας είναι αρκετά διαφορετική από όταν κρούεται με υψηλή ταχύτητα. Η δομή της αρχιτεκτονικής των ινών έχει σημαντική επίδραση στην κατεστραμμένη περιοχή, την ενέργεια που απορροφάται. Η απόκριση του συστήματος θωράκισης κυριαρχείται από την ανελαστική πρόσκρουση. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν τις επιπτώσεις στο σχεδιασμό του συστήματος θωράκισης σώματος. Από την απόκριση της πρώτης πληγείσας περιοχής, το σύστημα θωράκισης όταν έχει υψηλή καμπτική ακαμψία ή ακαμψία, κυριαρχείται από ανελαστική κρούση. [212-213] Η συμπεριφορά ζημιάς της πλάκας έδειξε αποκόλληση, αποκόλληση ίνας και αστοχία μήτρας ως τους πιθανούς μηχανισμούς υλικών ζημιών. Η τοπική παραμόρφωση και η διατμητική απόφραξη είναι οι κύριοι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας στη διάτρηση κρούσης [214,221] Για την ύφανση 2D, η τριβή στο επίπεδο, η πρωτογενής και δευτερεύουσα τάση των νημάτων είναι τα κύρια συστατικά της ενέργειας απορρόφησης [222].

Κεφάλαιο 4ο Θωράκιση σώματος απέναντι σε εκρήξεις, θραύσματα και αιχμηρά αντικείμενα

Ο κύριος στόχος των προστατευτικών πανοπλιών (PA) είναι να προστατεύσουν τον χρήστη από τις διάφορες απειλές που μπορεί να αντιμετωπίσει και να εξασφαλίσουν άνεση. Ωστόσο, υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ του τύπου απειλής και της προστατευτικής θωράκισης που αντανακλάται στον χρήστη, όπως θερμικό στρες, στρες κόπωσης, στρες διαταραχής κίνησης, βαθύς τραυματισμός, μώλωπες ή τραύμα. Η εικόνα 4.1 αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση μεταξύ του σώματος του χρήστη και της απειλής παρουσία προστατευτικής θωράκισης. Προφανώς, το προστατευτικό σύστημα θωράκισης δεν μπορεί να προστατεύσει από όλα τα επίπεδα των υπαρχουσών απειλών. Η απόδοση της θωράκισης, συνήθως, συμμορφώνεται με ένα ορισμένο επίπεδο προστασίας που είναι απαραίτητο για τον σκοπό για τον οποίο έχει σχεδιαστεί. Για αντοχή σε μαχαιρώματα, η προστατευτική θωράκιση, τα υλικά και το σύστημα θωράκισης θα πρέπει να προσαρμόζονται στα πρότυπα για το επίπεδο ενέργειας μαχαιρώματος με μαχαίρι ή ακίδα, και θραύσματα και έκρηξη όπως το NIJ Standard-0115.00, ενώ οι βαλλιστικοί θώρακες αναφέρονται στο NIJ Standard-0101.06 για την ενέργεια στομίου σφαίρας .



Εικόνα 4.1 Η αλληλεπίδραση μεταξύ σώματος και απειλής

4.1 Συμπεριφορά υφάσματος κάτω από δύναμη πίεσης

Τα εύκαμπτα προστατευτικά υφάσματα – Flexible Protection Fabrics (FPF) βρήκαν την ευρεία εφαρμογή τους στον βιομηχανικό, ιατρικό, στρατιωτικό και πολιτικό τομέα. Ωστόσο, έχουν γίνει συνεχείς προσπάθειες για την ανάπτυξη ινών υψηλής απόδοσης για ελαφριά μαλακά προστατευτικά υφάσματα. Οι επιδόσεις κοπής και μαχαιρώματος των προστατευτικών υφασμάτων είναι βασικές παράμετροι για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των υφασμάτων που έχουν σχεδιαστεί για προστασία από διάφορους τύπους μηχανικής κρούσης. Η μαλακή πανοπλία θα πρέπει να προσφέρει άνεση στον χρήστη, να είναι ελαφριά και οικονομικά αποδοτική. Η πανοπλία που είναι ανθεκτική σε μαχαιρώματα, έχει αρκετές ελλείψεις, όπως μεγάλο βάρος, ογκώδες σχήμα και δυσφορία, [222] ειδικά η γυναικεία πανοπλία που μπορεί να εμποδίσει την κινητικότητά της.[223,224]

Η προστατευτική θωράκιση που είναι ανθεκτική στα μαχαίρια έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει εργαλεία λεπίδας, μαχαίρι ή ακίδα.[225] Σε καθεμία από αυτές τις κατηγορίες, υπάρχουν τρία επίπεδα προστασίας από χαμηλή έως υψηλή με βάση την ενέργεια που θα έπληττε την προστατευτική θωράκιση κατά τη διάρκεια μιας επίθεσης. (Πρότυπο NIJ-0115.00). Η αντίσταση κοπής είναι μία από τις κύριες μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται στα προστατευτικά ρούχα.[225]

Οι απειλές με μαχαίρι μπορεί να είναι με γροθιά ή κοπή. Οι απειλές με μαχαίρι είναι, γενικά, πιο δύσκολες να σταματηθούν από τις απειλές με γροθιές λόγω της συνεχούς ζημιάς από την κόψη του μαχαιριού. Η αντοχή σε διάτρηση του υφάσματος είναι χαμηλότερη από την αντοχή εφελκυσμού ή τη διαξονική αντοχή εφελκυσμού του υφάσματος. Η αντοχή μαχαιρώματος του υφάσματος είναι ακόμη πιο χαμηλή.[226] Κατά συνέπεια, για την προστατευτική θωράκιση μαχαιρώματος, χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά με υψηλή αντοχή, σχίσιμο και τάση κοπής εκτός από ακαμψία και διάτμηση. Πολλοί ερευνητές[227–232] αποκάλυψαν ότι τα υφάσματα υψηλής αντοχής στην κοπή που σχηματίζουν πολλαπλά στρώματα διαφορετικών τύπων δομής ύφανσης ενίσχυσαν τον μηχανισμό της αντίστασης στα μαχαιρώματα.

Τα σενάρια μηχανισμού διείσδυσης στην υφαντική ύλη είναι:

- μαχαίρι με αιχμηρή λεπίδα σε υψηλή ταχύτητα
- διείσδυση κοφτερής λεπίδας σε χαμηλή ταχύτητα
- κοπή με κοφτερή λεπίδα
- Θραύσματα από έκρηξη

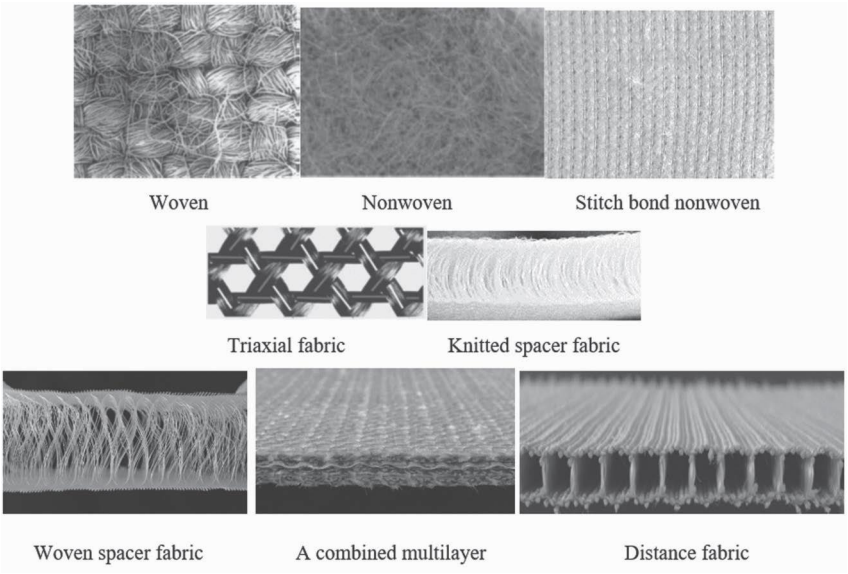
Κάθε θήκη έχει τη δύναμη αντίστασης του υφάσματος για τη διείσδυση της λεπίδας και βασίζεται στην ταχύτητα διείσδυσης της λεπίδας και στην κατασκευή του υφάσματος με διάτρηση. Υπάρχουν

διάφοροι τύποι υφασμάτινων δομών [233]:

- Δισδιάστατες κατασκευές (υφαντό ύφασμα, πλεκτό ύφασμα, μη υφαντό ύφασμα, πολυμερικά φύλλα, τριαξονικό ύφασμα κ.λπ.)
- Ύφασμα 3D (3D υφαντό ύφασμα, τρισδιάστατο πλεκτό ύφασμα, πολυαξονικό ύφασμα, ύφασμα με βελονιά, ύφασμα Mali watt, ύφασμα αποστάτη και τριαξονικό πλεκτό ύφασμα).

Η εικόνα 4.2 απεικονίζει τη μορφολογία ορισμένων υφαντικών κατασκευών.

Για διάφορες δομές ύφανσης, ο τρόπος διάτρησης με οποιοδήποτε διαμορφωμένο εργαλείο είναι διαφορετικός. Το προστατευτικό ύφασμα κατά του μαχαιρώματος Antistatic Segmented Protection Fabric (ASPF) θα πρέπει να έχει τη δύναμη διάτρησης μεγαλύτερη από τη δύναμη που απαιτείται για να διεισδύσει σε διαφορετικούς ιστούς του ανθρώπου, όπως μύες, δέρμα, μαλακοί ιστοί, χόνδροι, οστά της πλευράς και σπονδυλική στήλη. Οι ίνες κολλαγόνου, που είναι σχεδόν μη εκτατές, έχουν αντοχή μεταξύ 147 και 343 MPa, και καταπόνηση στη ρήξη από 35% έως 115%, ανάλογα με την ηλικία, την προστατευόμενη περιοχή και το μέτρο ελαστικότητας από 15 έως 150 MPa.[234] Έτσι, οι δυνάμεις να μαχαιρώσουν το δέρμα έχουν πολύ χαμηλή αξία. Αποκαλύφθηκε ότι η ταχύτητα μαχαιρώματος του βραχίονα είναι 10 m/s, ανάλογα με τη μέθοδο μαχαιρώματος και τη σχετική ταχύτητα μεταξύ των ταχυτήτων κίνησης του χρήστη και μαχαιρώματος. Η μέγιστη δύναμη διάτρησης μπορεί να φτάσει την τιμή 1990–4740 N.[235] Ο τρόπος με τον οποίο κρατιέται το μαχαίρι επηρεάζει άμεσα τη μέγιστη ταχύτητα που δημιουργείται κατά το μαχαίρωμα.[234] Η προστατευτική θωράκιση πρέπει να προστατεύει επαρκώς τον χρήστη από τη διείσδυση των αιχμηρών εργαλείων κάτω από τέτοιες δυνάμεις.



Εικόνα 4.2 Τύποι υφασμάτων

4.2 Η επίδραση της πίεσης από έκρηξη

Τα κύματα πίεσης διαδίδονται μέσω μιας δομής που υπόκειται σε έκρηξη ή κρούση. Η μηχανική για τα δύο φαινόμενα είναι παρόμοια, αν και οι χρονικές κλίμακες που σχετίζονται με μια έκρηξη είναι σημαντικά μικρότερες. Η προκύπτουσα ζημιά μπορεί να είναι δομικής φύσης εάν υπάρχει κατάρρευση ή άλλη απώλεια της δομικής ακεραιότητας ή λειτουργικής φύσης, εάν τα ευαίσθητα εξαρτήματα ενός στόχου αστοχήσουν. Επιπλέον, υπάρχουν δύο διακριτές ιδιότητες των κυμάτων πίεσης που προσκρούουν σε έναν στόχο που μπορεί να προκαλέσει αστοχία: τάσεις που μεταδίδονται άμεσα και τάσεις που προκαλούνται από την απόκριση στην ώθηση που εκπέμπεται από τα κύματα πίεσης. Όπως θα συζητηθεί σε αυτό το άρθρο, η σχετική σημασία των δύο χαρακτηριστικών εξαρτάται από τη χαρακτηριστική χρονική κλίμακα για τη δυναμική απόκριση του στόχου, σε σύγκριση με αυτή της πρόσκρουσης ή της έκρηξης. Απαιτούνται διαφορετικές στρατηγικές για τον μετριασμό τους και ο καλός σχεδιασμός της θωράκισης απαιτεί μια αντιστοιχία μεταξύ των ιδιοτήτων του στόχου,της πανοπλίας και μεταξύ αυτών και την φύση της απειλής.

Όπως περιγράφεται λεπτομερώς στις επόμενες παραγράφους, έχει γίνει πολλή δουλειά σχετικά με τη μηχανική της έκρηξης και τη σχέση της με τη βελτιστοποίηση δομών ανθεκτικών στις εκρήξεις. Λιγότερη δουλειά έχει γίνει για την προσαρμογή αρχιτεκτονικών υλικών για πανοπλίες που θα χρησιμοποιηθούν ως εξωτερική προστασία ευαίσθητων δομών, όπως ο εγκέφαλος σε ένα κρανίο.

Η πίεση, P , που ασκείται στην επιφάνεια μιας κατασκευής που υποβάλλεται σε έκρηξη ή κρούση αυξάνεται σε μια τιμή κορυφής του P_o , και στη συνέχεια διασπάται με την πάροδο του χρόνου, t, έτσι ώστε

$$P(t) = P_o f(t/t_o), \tag{32}$$

όπου t_0 είναι ένας χαρακτηριστικός χρόνος για την έκρηξη ή την πρόσκρουση. Για μια έκρηξη, η αρχική άνοδος είναι σχεδόν στιγμιαία και το Po εξαρτάται από τον τύπο και τη μάζα του εκρηκτικού υλικού, την απόσταση από την πηγή της έκρηξης και τη φύση της αλληλεπίδρασης ρευστού-δομής [235-240]. Για κρούση, το Po εξαρτάται από τη μάζα, την ταχύτητα, τις μηχανικές ιδιότητες της δομής και του κρουστικού βλήματος. Η μέγιστη πίεση είναι ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά μιας έκρηξης ή κρούσης. Το άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ώθηση που ασκείται στην επιφάνεια της κατασκευής:

$$I_0 = \int_0^\infty P(t)\, dt \tag{33}$$

Αυτή η ώθηση είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά της κινητικής ενέργειας που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στη δομή ή στα εξαρτήματα μέσα σε αυτήν.

Η επιμετάλλωση θωράκισης παρέχει ένα παράδειγμα μιας δομής που έχει σχεδιαστεί για να απορροφά άμεσα την ενέργεια που γεννιέται από την έκρηξη, χωρίς δομική αστοχία. Αυτή η μορφή θωράκισης μπορεί να απεικονιστεί ως συσφιγμένες πλάκες που υφίστανται κάμψη και τέντωμα ως απόκριση στην έκρηξη, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πλαστική παραμόρφωση που διαχέει ενέργεια [235, 241-247]. Πρόσθετες συνεισφορές στη διάχυση ενέργειας μπορούν να παρασχεθούν με την προσθήκη ενός πολυμερούς όπως η πολυουρία [248] στην πίσω επιφάνεια των πλακών [249-251]. Μια εναλλακτική προσέγγιση για το σχεδιασμό κατασκευών ανθεκτικών στις εκρήξεις είναι η ενσωμάτωση ενός πυρήνα που διαχέει ενέργεια, με τη μορφή αφρού ή ζευκτών, μεταξύ δύο πλακών πρόσοψης. Αυτές οι δομές σάντουιτς διαχέουν ενέργεια όταν η ώθηση του κύματος πίεσης μεταδίδει ορμή σε μια πλάκα πρόσοψης, η οποία στη συνέχεια παραμορφώνει τον πυρήνα. Οι δομές μπορούν να σχεδιαστούν με μεταλλικούς πυρήνες και πλάκες πρόσοψης [252-263], σύνθετες πλάκες πρόσοψης και πολυμερείς πυρήνες [264-269] ή υβρίδια μετάλλου-πολυμερούς [270].

Άλλες προσεγγίσεις για τη διάχυση της ενέργειας από μια έκρηξη περιλαμβάνουν τη χρήση κύστεων αέρα και θαλάμων γεμάτοι με υγρό [271-277], κοκκώδη συστήματα [278-280] γεμισμένα με αφρό[281]. Αυτές οι προσεγγίσεις βασίζονται σε διακυμάνσεις στη μάζα και την ακαμψία των εξαρτημάτων για τη διασπορά και την εξασθένιση της έκρηξης. Μια ενεργητική και όχι μια παθητική προσέγγιση για τον μετριασμό των εκρήξεων έχει προταθεί πρόσφατα από τους Wadley et al. [282], χρησιμοποιώντας έναν προ-συμπιεσμένο θρυμματιζόμενο αφρό που χαλαρώνει ακριβώς πριν από την

άφιξη της ώθησης που μεταφέρεται από την έκρηξη, δημιουργώντας ορμή σε αντίθεση με αυτή που αποκτήθηκε από την έκρηξη.

Οι μελέτες για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ έκρηξης, πανοπλίας και στόχων έχουν περιοριστεί στη συγκεκριμένη ανάλυση ενός κράνους μάχης [283-287], μεταξύ των οποίων μια αριθμητική μελέτη [283] έδειξε πώς η αντικατάσταση του αφρού από πολυουρία ως επίθεμα ανάρτησης μπορεί να μειώσει τη μέγιστη πίεση συμπίεσης στον εγκέφαλο και την ταχύτητά της. Πέρα από αυτόν τον τύπο εμπειρικής μελέτης, η βιβλιογραφία έχει επικεντρωθεί ελάχιστα στην κατανόηση των χαρακτηριστικών μιας έκρηξης από τα οποία πρέπει να προστατεύονται οι ευαίσθητοι στόχοι και πώς θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί η θωράκιση για να επιτευχθεί αυτό.

Πρόσφατα, υπήρξε μεγάλη δημοσιότητα σχετικά με τη ζημιά που μπορεί να προκληθεί στον εγκεφαλικό ιστό από έκρηξη και από κρούσεις στο κεφάλι σε αθλητικά ατυχήματα ή τροχαία ατυχήματα. Η φυσιολογική προέλευση της βλάβης δεν είναι καλά κατανοητή, αν και είναι γενικά αποδεκτό ότι είναι συνέπεια της υπερβολικής αξονικής παραμόρφωσης που προκύπτει από τοπικές αποκλίνουσες τάσεις [285-287]. Οι τοπικές καταπονήσεις μπορεί επίσης να ευθύνονται για την αστοχία ευαίσθητων μηχανικών αντικειμένων. Ως εκ τούτου, για τους σκοπούς της αξιολόγησης πιθανών στρατηγικών μετριασμού, είναι απαραίτητο να εντοπιστούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά οποιονδήποτε κυμάτων πίεσης που προκαλούνται από έκρηξη ή πρόσκρουση που μπορεί να κινηθούν διαμέσω της θωράκισης για να βλάψουν έναν στόχο.

Ένα απλοποιημένο, αλλά τυπικό, σύστημα που μπορεί να χρειάζεται προστασία από έκρηξη και κρούση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα δυναμικό σύστημα δύο συστατικών που αποτελείται από τον στόχο και τη δομή στήριξης. Η δομή στήριξης και ο στόχος είναι μάζες που συνδέονται με ένα ελατήριο και η δομή συνδέεται με ένα άκαμπτο θεμέλιο (πάκτωση) και με ένα δεύτερο ελατήριο. Το κίνητρο για αυτήν την υπόθεση είναι ένα απλό μοντέλο κεφαλής που μπορεί να θεωρηθεί ως εγκέφαλος συζευγμένος με ένα κρανίο μέσω του εγκεφαλονωτιαίου υγρού, με την κίνηση του κρανίου να αντιστέκεται από την προσκόλλησή του στο υπόλοιπο σώμα από τον λαιμό.

Το μέγεθος των τάσεων που ασκούνται στον στόχο σε ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να ελέγχεται είτε από το μέγεθος του κύματος πίεσης που προκαλείται από έκρηξη ή κρούση, Po , είτε από το μέγεθος της ώθησης που εκπέμπεται από το κύμα πίεσης , I_o. Η σχετική σημασία μεταξύ των δύο παραμέτρων εξαρτάται από το μέγεθος t_o που σημαίνει το μήκος της αλληλεπίδρασης μεταξύ του παλμού πίεσης και της δομής στήριξης (κρανίο), σε σύγκριση με τον χαρακτηριστικό χρόνο, τ_{target} για τη δυναμική απόκριση της δομής στήριξης και του στόχου. Εάν το t_o είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το τ_{target}, το

P_o είναι σημαντικό. Αντίθετα, εάν το t_o , είναι σημαντικά μικρότερο από το τ_{target}, το I_o είναι σημαντικό.

Αυτή η σημαντική εκτίμηση ότι είτε η πίεση είτε η ώθηση μπορεί να προκαλέσει βλάβη αναγνωρίστηκε ήδη από το 1943 [288] και αντανακλάται σε εμπειρικά κριτήρια για τον τραυματισμό στο κεφάλι [289-291]. Ωστόσο, συχνά μόνο η μέγιστη επιτάχυνση της δομής στήριξης (κρανίου) που μετράται σε μελέτες κρούσης με όργανα [292-297] υποθέτοντας ότι μόνο αυτό λειτουργεί ως αντιπρόσωπος για τις καταστροφικές τάσεις.

Ο ρόλος της καλά σχεδιασμένης θωράκισης είναι να διασφαλίζει ότι το μέγεθος του κύματος πίεσης και της ώθησής του, καθώς και το μήκος του χρόνου αλληλεπίδρασης μεταξύ του κύματος πίεσης και της κατασκευής, ελέγχονται για να διατηρούνται τυχόν προκύπτουσες τάσεις που ασκούνται στον στόχο κάτω από ένα κρίσιμο κατώφλι. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσαρμογή οποιασδήποτε ή και όλων των τριών παραμέτρων, ανάλογα με τη φύση της απειλής και τις ιδιότητες του στόχου. Σε αυτή την ενότητα, θα συνοψίσουμε τις γενικές στρατηγικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σχεδίαση πανοπλιών.

Η αναντιστοιχία σύνθετης αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον μετριασμό της πίεσης αιχμής που μεταδίδεται μέσω της θωράκισης. Η μεταδιδόμενη ώθηση επηρεάζεται από τη διασπορά ενέργειας εντός της θωράκισης, και από τις σχετικές μάζες της θωράκισης του προστατευμένου συστήματος. Μια προσέγγιση που βασίζεται σε βαριά θωράκιση έρχεται σε σύγκρουση με ένα κοινό κριτήριο σχεδιασμού, την ελαχιστοποίηση της μάζας. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η μείωση της μεταδιδόμενης ώθησης με τη διάχυση ενέργειας εντός της θωράκισης. Εάν αυτή η μείωση της ώθησης δεν είναι αρκετή για την προστασία του στόχου, απαιτείται μια εναλλακτική σχεδιαστική προσέγγιση: είτε πιο μαζική θωράκιση, είτε αύξηση του χρόνου αλληλεπίδρασης για να μετακινηθεί ο χώρος σχεδιασμού σε έναν χώρο στον οποίο είναι η πίεση, όχι η παρόρμηση, που πρέπει να μετριαστεί.

Η ενέργεια μπορεί να διαχέεται στην θωράκιση χρησιμοποιώντας μηχανισμούς όπως η πλαστικότητα και η ιξωδοελαστικότητα, καθώς και η τριβή και η αποκόλληση. Η πλαστική παραμόρφωση και η αποκόλληση είναι μη αναστρέψιμες και περιορίζονται σε μία μόνο χρήση. Για παράδειγμα, από τη στιγμή που ένα στοιχείο υλικού έχει παραμορφωθεί πλαστικά, δεν είναι σε θέση να διασκορπίσει ενέργεια από τα επόμενα κύματα τάσης του ίδιου μεγέθους. Η ιξωδοελαστική παραμόρφωση μπορεί να διαλύσει ενέργεια σε πολλαπλούς κύκλους. Ωστόσο, η απόδοση με την οποία η ενέργεια διαχέεται μέσα στα ιξωδοελαστικά υλικά εξαρτάται από τα πλάτη και τις συχνότητες οποιονδήποτε κυμάτων τάσης που κινούνται μέσα από αυτά. Γενικά, οι τάσεις που προκαλούνται από μια έκρηξη ή κρούση παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα συστατικών συχνοτήτων, μερικά μόνο από τα οποία θα σχετίζονται με

τη βέλτιστη απόσβεση ενός συγκεκριμένου ιξωδοελαστικού υλικού. Ως εκ τούτου, η εισαγωγή ενός στρώματος ιξωδοελαστικού υλικού στην θωράκιση, χωρίς σκέψη για τις χαρακτηριστικές συχνότητες του, μπορεί να μην είναι χρήσιμη. Αυτή η σκέψη οδήγησε σε μια νέα ιδέα που ονομάζουμε συντονισμό κρούσης ή έκρηξης, στην οποία χρησιμοποιείται μια πολυστρωματική κατασκευή για να συντονίσει τις τάσεις που προκαλούνται από κρούσεις και εκρήξεις σε συχνότητες που μπορούν να αντιστοιχιστούν στις βέλτιστες συχνότητες απαγωγής ενέργειας ενός ιξώδους. ελαστικό στρώμα.

Μια πρόσθετη σκέψη που εγείρεται είναι ότι υπάρχει ένα όριο στην πιθανή μείωση του μεταδιδόμενου παλμού, το οποίο εξαρτάται από τη μάζα της θωράκισης. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εάν η χρονική κλίμακα ενός παλμού πίεσης αυξηθεί, μπορεί να είναι δυνατό να μετακινηθεί ο χώρος σχεδιασμού εκτός του καθεστώτος στο οποίο η ζημιά συσχετίζεται με την ώθηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ως άμεση συνέπεια της διατήρησης της ορμής εάν η μέση πίεση ενός παλμού μειωθεί. Μπορεί επίσης να επιτευχθεί σε ιξωδοελαστικά υλικά ως συνέπεια της διασποράς που σχετίζεται με τις ελαστικές ιδιότητες που εξαρτώνται από τη συχνότητα. Αν και υπάρχουν επιπτώσεις διασποράς στην προσέγγιση που προτείνουμε, είναι σημαντικό να εκτιμήσουμε ότι η προσέγγιση βασίζεται κυρίως στη διασπορά.

Κεφάλαιο 5ο Δοκιμές συστημάτων θωράκισης και προστασίας σώματος

Το σύστημα θωράκισης σώματος πρέπει να περάσει συγκεκριμένες δοκιμές για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί, επομένως όλα τα στοιχεία της θωράκισης θα πρέπει να παρέχουν το ελάχιστο επίπεδο απόδοσης. Η θωράκιση, γενικά, αποτελείται από διαφορετικά στρώματα υφασμάτων, όπου το καθένα έχει μια ειδική λειτουργία που αντιπροσωπεύει ένα μέρος των απαιτήσεων του συστήματος θωράκισης. Οι συνθετικές ίνες μπορούν να σχεδιαστούν για πολλές τελικές χρήσεις για προστασία από διάφορες απειλές, ξεκινώντας από τη βαλλιστική απειλή έως την προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία. Νέες εξελίξεις στο MMF επέτρεψαν να προσδοθεί ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων στο προστατευτικό ύφασμα. Για παράδειγμα, το πυροσβεστικό γιλέκο προστασίας (Εικ. 5.1) αποτελείται από τρία θερμικά στρώματα, το φράγμα υγρασίας στη μέση και το εξωτερικό κέλυφος. Κάθε στρώμα είναι κατασκευασμένο από διαφορετικό τύπο ινών και δομή υφάσματος.



Εικόνα 5.1 Πυροσβεστικό γιλέκο [304]

Κατά συνέπεια, κάθε εξάρτημα θωράκισης θα δοκιμάζεται χωριστά καθώς και ολόκληρο το σύστημα θωράκισης. Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τις διαφορετικές μεθόδους δοκιμής.

Πίνακας 5.1 Βασικά τεστ για πανοπλία

ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

I. Ίνες

1. Φυσική διάμετρος, μήκος, πτυχή, τριβή, πυκνότητα, απορρόφηση υγρασίας, θερμοκρασία τήξης, θερμοκρασία διέλευσης
2. Μηχανικές εφελκυστικές ιδιότητες μονής ίνας, ίνες δέσμης, ερπυσμός, στρέψη
3. Χημική αντοχή: Αντοχή σε προσβολή από οξέα, βάσεις, διαλύματα αλάτων, οργανικούς διαλύτες και άλλες διάφορες χημικές ουσίες
4. Ηλεκτρικές ιδιότητες: Χωρητικότητα, διηλεκτρική σταθερά, διηλεκτρική αντοχή, ηλεκτρική ειδική αντίσταση και αγωγιμότητα, διαπερατότητα, πιεζοηλεκτρικές σταθερές
5. Θερμικές ιδιότητες: Ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα, θερμική διάχυση, συντελεστής θερμικής διαστολής
6. Αντοχή στην ακτινοβολία: Σταθερότητα ιδιοτήτων μετά από έκθεση σε διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας
7. Διαβαθμίσεις αναφλεξιμότητας TPP, δείκτης οξυγόνου, θερμοκρασία ανάφλεξης

II. Νήματα

1. Φυσικός αριθμός, αριθμός νημάτων, διάμετρος, συστροφή, αριθμός πτυχών, τριβή, πυκνότητα, απορρόφηση υγρασίας
2. Μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού, ερπυσμός, βαλλιστική αντίσταση, κόπωση
3. Χημική αντοχή: Αντοχή στην επίθεση από οξέα, βάσεις, κορεσμένο διάλυμα, οργανικούς διαλύτες και άλλες διάφορες χημικές ουσίες
4. Ηλεκτρική αντίσταση: Χωρητικότητα, διηλεκτρική σταθερά, διηλεκτρική αντοχή, ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα, διαπερατότητα, πιεζοηλεκτρικές σταθερές
5. Θερμικές ιδιότητες: Ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα, θερμική διάχυση, συντελεστής θερμικής διαστολής

III. Ύφασμα

1. Φυσική δομή υφάσματος, πυκνότητα περιοχής, πάχος, ευθυγράμμιση ινών, πορώδες και κατανομές πόρων, διαπερατότητα αέρα, απορρόφηση υγρασίας, διαπερατότητα ατμών
2. Μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού, ερπυσμός, αντοχή σε σχίσιμο, ακαμψία, αντοχή κόπωσης, συμπίεση, ταχύτητα διάδοσης παραμόρφωσης, αντοχή διάτμησης, δύναμη κοπής
3. Θερμικές ιδιότητες: Ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα, θερμική διάχυση, θερμική διαστολή
4. Αναφλεξιμότητα: Θερμοκρασία ανάφλεξης, θερμοκρασία αποσύνθεσης, μέγιστη θερμοκρασία φλόγας, στάλα τήξης, ρυθμός εξάπλωσης φλόγας
5. Ηλεκτρικές ιδιότητες: Αντίσταση όγκου, επιφανειακή ειδική αντίσταση, διηλεκτρική σταθερά, διηλεκτρική αντοχή, συντελεστής διάχυσης, αντίσταση τόξου
6. Δυναμικές παράμετροι: Δύναμη διάτρησης, δύναμη μαχαιρώματος, ενέργεια απορρόφησης κρούσης

ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗ ΠΑΝΟΠΛΙΑ

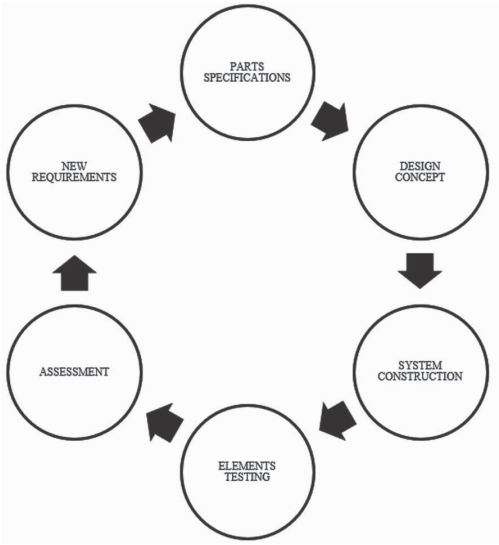
1. Βαλλιστικό επίπεδο βαλλιστικής προστασίας, V_{50} , V_0
2. Αντίσταση μαχαιρώματος, Δύναμη διάτρησης, δύναμη μαχαιρώματος
3. Χημική αντοχή Αντοχή σε προσβολή από οξέα, βάσεις, διαλύματα αλάτων, οργανικούς διαλύτες και άλλες διάφορες χημικές ουσίες
4. Ανθεκτικό στη φλόγα, Θερμοκρασία ανάφλεξης, θερμοκρασία αποσύνθεσης, μέγιστη θερμοκρασία φλόγας, στάλα τήξης, ρυθμός εξάπλωσης φλόγας
5. Θερμική θωράκιση, Θερμική αντίσταση, θερμική προστατευτική απόδοση, τιμή θερμικής απόδοσης τόξου, θερμική αγωγιμότητα, θερμική απορρόφηση, θερμική διάχυση

Το σχέδιο για το σχεδιασμό του συστήματος προστατευτικής θωράκισης είναι ένας κλειστός βρόχος και ακολουθεί τα βήματα που δίνονται στην Εικόνα 5.2:

- Ορισμός απαραίτητων παραμέτρων. (New Requirements)
- Επιλογή ιδεών σχεδίασης. (Design Concept)
- Επιλογή κατασκευής συστήματος θωράκισης. (System Construction)
- Καθορισμός των προδιαγραφών των νέων μερών. (Parts Specifications)
- Δοκιμή της απόδοσης της θωράκισης (Elements Testing)
- Ορισμός της νέας ανεπάρκειας της θωράκισης. (Assessment)

Η αξιολόγηση κάθε στοιχείου της προστατευτικής θωράκισης θα πρέπει να ακολουθεί ένα από τα αναγνωρισμένα πρότυπα δοκιμών. Υπάρχουν πολλά διεθνή και τοπικά πρότυπα δοκιμών για μεθόδους δοκιμής για κάθε στοιχείο της προστατευτικής θωράκισης για φυσικές, μηχανικές, χημικές, ηλεκτρικές, θερμικές κ.λπ. Ιδιότητες όπως:

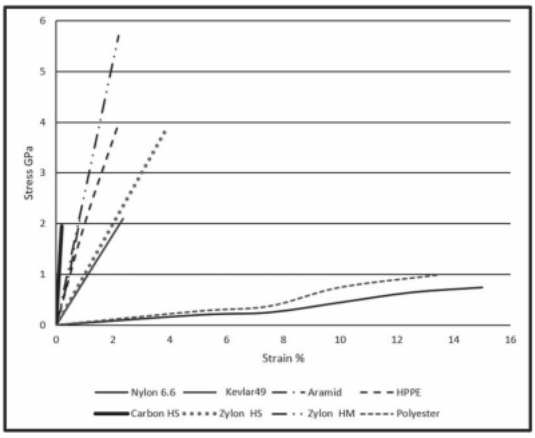
- ASTM - American Society for Testing and Materials (Αμερικάνικη Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών)
- BS - The British Standards Institution (Βρετανικό Ίδρυμα προτύπων)
- ISO - International Organization for Standardization (Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης)
- AATCC - American Association of Textile Chemists and Colorists (Αμερικάνικη Ένωση Χημικών και χρωματιστών υφασμάτων)
- DIN - German Institute for Standardization (Γερμανικό Ινστιτούτο Τυποποίησης)
- GOST R - Russian Governmental Standard (Ρωσικό κυβερνητικό πρότυπο)
- EN - European Standard (Ευρωπαϊκά πρότυπα)
- NFPA - National Fire Protection Association (Εθνικός σύλλογος πυροπροστασίας)
- GB - China National Standards (Εθνικά πρότυπα της Κίνας)



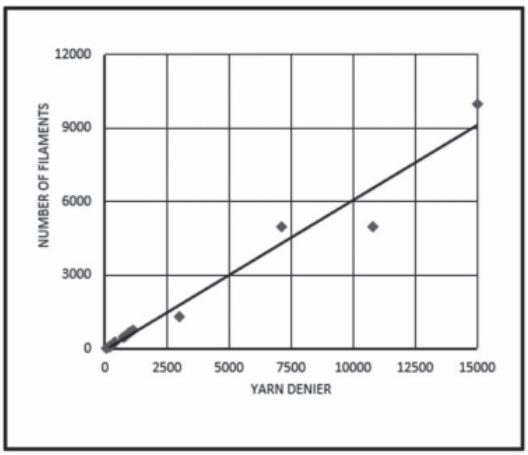
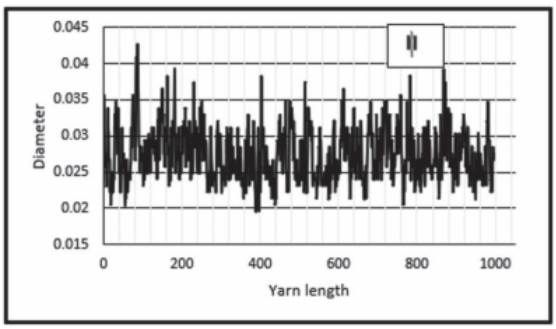
Εικόνα 5.2 Κύκλος σχεδίασης

Τα σύγχρονα προστατευτικά υφάσματα κατασκευάζονται από συνεχείς ίνες. Οι κύριες μηχανικές παράμετροι δίνονται στον Πίνακα 5.2.

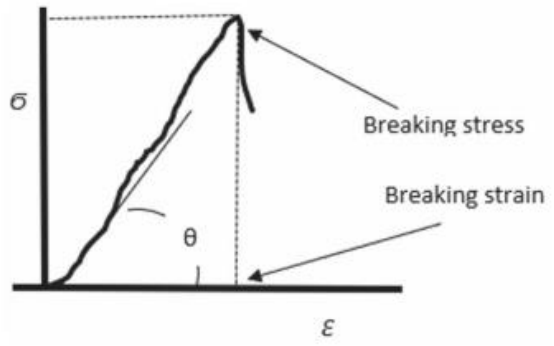
Πίνακας 5.2 Μερικές μηχανικές παράμετροι ινών, νημάτων και υφασμάτων [305]

Material	Dimensions	Remarks
Fibers		
Count	tex_f (g/km) or den_f (g/9 km)	Defined by: tex_f = weight of fiber "g"/length of fiber in "km" or den_f = weight of fiber "g"/length of fiber in "9 km"
Strength (tenacity)	*g/tex* or *g/den*	
		FIGURE 7.3 Fibers stress–strain curve of selected fibers.
Yarns		
Count	tex_y (g/km) or den_y (g/9 km)	Defined by: tex_y = weight of yarn in "g"/length of yarn in "km" or den_y = weight of yarn in "g"/length of yarn in "9 km"

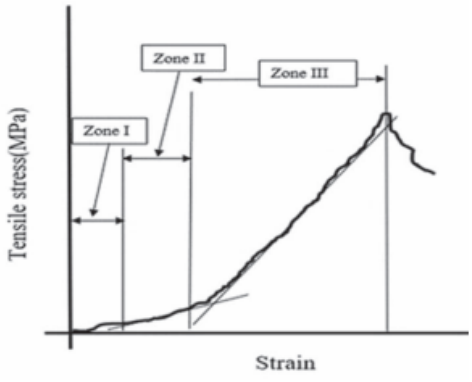
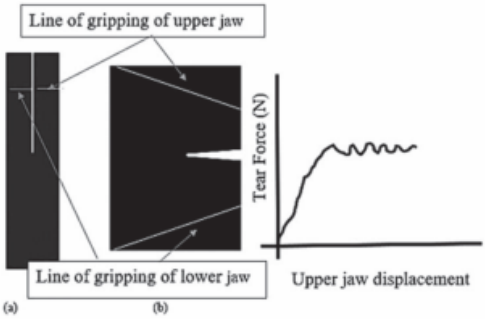
Πίνακας 5.3 (Συνέχεια πίνακα 5.2)

Material	Dimensions	Remarks
Number of filaments	$n = tex_y/tex_f$	 **FIGURE 7.4** The relation between number of filaments and yarn count.
Twist	T (turns/m)	For twist measurement of continuous filament yarns, untwist–twist method.
Twist factor (α)	$(tex)^{0.5}$(t/cm)	$T' = \alpha/(tex_y)^{0.5}$, where D_y is yarn diameter cm, $\tan\theta = 0.011\ T\ (tex_y/\varphi\ \rho)^{0.5}$, ρ is fiber density g/cm^3, φ is yarn packing density, and T is twist turns/cm.
Yarn evenness	Yarn mass coefficient of variation for various cut lengths (CVm) 1, 3, 10, and 50 m	 **FIGURE 7.5** Yarn diameter variation.

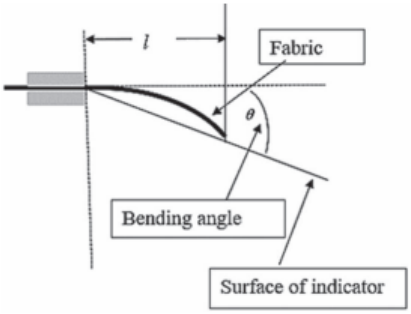
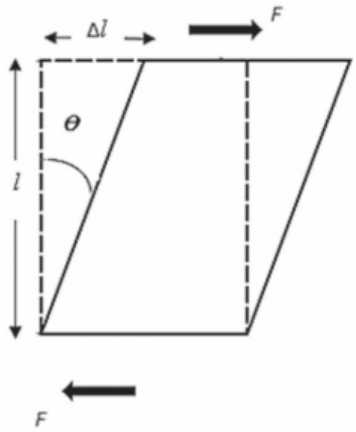
Πίνακας 5.4 (συνέχεια πίνακα 5.2)

Material	Dimensions	Remarks
Yarn strength (tenacity)	MPa	 **FIGURE 7.6** Yarn stress–strain curve. $\sigma = 10^3 \varphi \rho_f (N_{yarn}/tex)$ *tex* is yarn count, φ is yarn packing density, and ρ_f is fiber density (g/cm^3) (N_{yarn}) is yarn breaking load in Newton
Initial modulus, E_0	MPa	$E_0 = \sigma/(\varepsilon_o)$ (MPa), where E_0 is the initial modulus, σ is the stress, and ε_o is the corresponding strain
Work of rupture	Joule	Breaking load (N_{yarn}) × Breaking elongation (m)
Yarn creep	Elongation of the yarn under constant stress	
Fabric		
Fabric design		plain, twill, satin, basket, and so on.
Warp and weft crimp		$C\% = ((l_{yarn} - l_{fabric})/l_{fabric})\ 100$
Fabric GMS	g/m^2	GMS = (ends per cm) tex_{weft} (1 + $crimp_{weft}$ %)/10 + (warps per cm) tex_{warp} (1 + $crimp_{warp}$ %)/10
Fabric cover factor	%	= 0.444 {(tex(warp)/fiber density)$^{0.5}$ (number of warps per cm) + (tex(weft)/fiber density)$^{0.5}$ (number of weft per cm) − (0.444 (tex(warp)/fiber density)$^{0.5}$ (number of warps per cm)) × ((tex(weft)/fiber density)$^{0.5}$ (number of weft per cm))}
Fabric packing density	%	$\phi = (V_{fiber}/V_{fabric})$

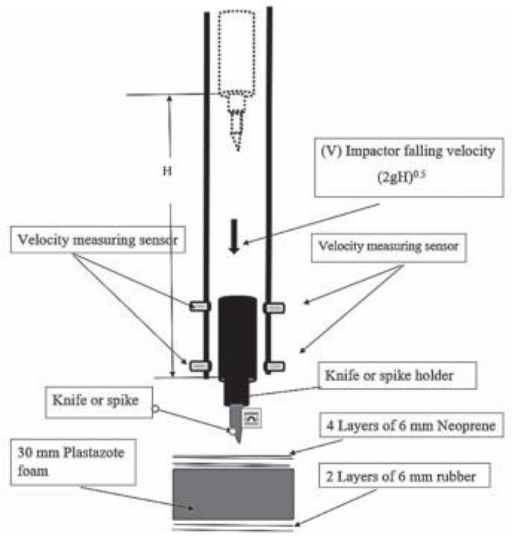
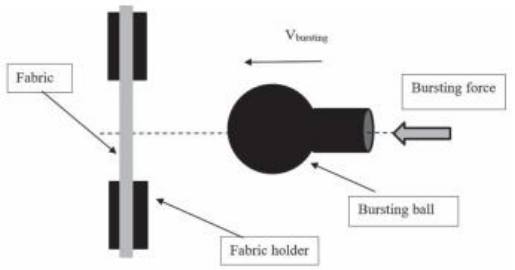
Πίνακας 5.5 (Συνέχεια πίνακα 5.2)

Material	Dimensions	Remarks
Fabric porosity	%	$= 1 - \phi$
Fabric air permeability	$cm^3/min/cm^2$	= rate of air flow (cm^3/min) / sample area (cm^2) × pressure drop (cm water)
Fabric strength	MPa	 **FIGURE 7.7** Fabric stress–strain curve. $\sigma = 10^3 (\Phi \rho_f / n B) (N_{fabric}/tex_{yarn})$ tex is yarn count "tex_y," Φ is yarn packing coefficient, ρ_f is fiber density (g/cm^3), n is number of ends/cm in the fabric, B is width of the tested fabric specimen (cm).
Fabric tear strength	Tear force (N)	 **FIGURE 7.8** (a) Tear test samples and (b) tear force-displacement curve.

Πίνακας 5.6 (συνέχεια πίνακα 5.2)

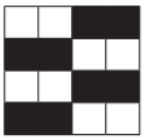
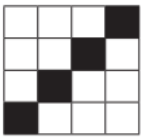
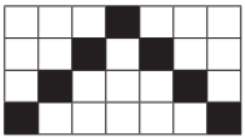
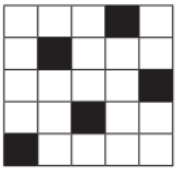
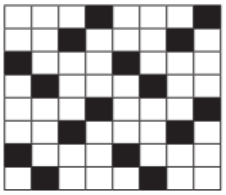
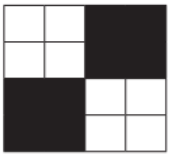
Material	Dimensions	Remarks
Fabric flexural rigidity	Micro N.m	 **FIGURE 7.9** Principle of fabric stiffness measurement. $C = M\, l^3\, [\cos(0.5\theta)/8 \tan\theta]$, where l is fabric length mm, θ is bend angle of fabric, M is fabric mass per unit area (g/m^2).
Fabric shear		 **FIGURE 7.10** Fabric under shear force. Shear stress $\tau = F/A$, Shear strain = $\Delta l/L$, Shear modulus = $(F/A)/\tan\Theta$, F is shear force, A is area of the fabric cross section, and τ is shear stress.

Πίνακας 5.7 (Συνέχεια πίνακα 5.2)

Material	Dimensions	Remarks
Dropped weight-impact stab-bing energy	Stabbing energy (J)	 **FIGURE 7.11** Dropped weight-impact stab tester. $E_{stabbing} = 0.5\ M\ V^2$, M is mass of the impactor.
Bursting strength	MPa	 **FIGURE 7.12** Sketch of ball-bursting strength tester. Bursting strength (MPa) = 0.001974 $F_{bursting}$, $F_{bursting}$ is applied force (N).

Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει μερικές από τις δομές υφαντού υφάσματος οι οποίες διαφέρουν κυρίως ως προς τον αριθμό των πλεγμάτων ανά επανάληψη. Ο σχεδιασμός του υφάσματος παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του υφάσματος υπό τους διαφορετικούς τύπους φορτίων και περιβαλλοντικών συνθηκών.

Πίνακας 5.8 [305]

Type of fabric design	Presentation	Type of fabric design	Presentation
Plain weave		2/2 rib weft weave	
2 × 2 mat weave		2/2 rib warp weave	
1/3 twill weave		Compound design	
1/4 satin weave		Crow fort satin weave	
2/1 twill		2/2 twill	
2/2 matt weave		5/5 twill	

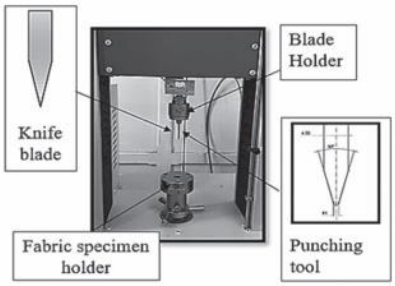
Material	Dimensions	Remarks
Puncture strength	*N*	

FIGURE 7.13 Punching attachment on universal testing machine.

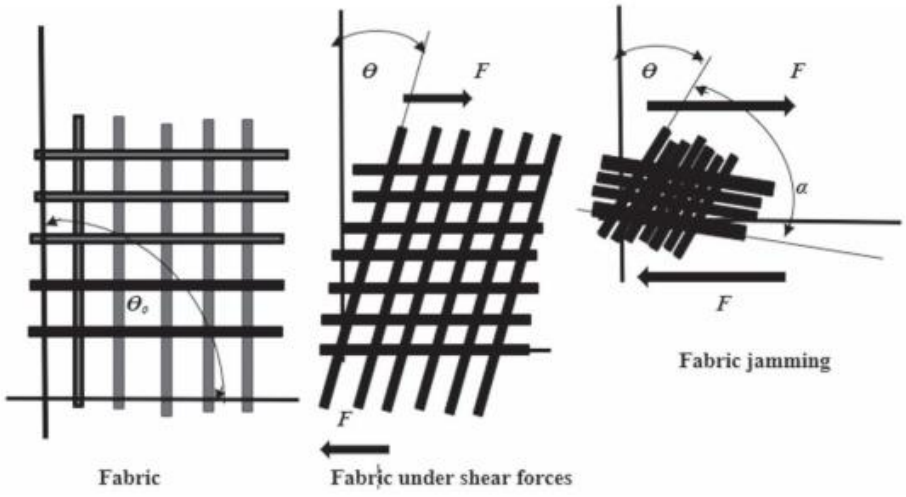
Οι μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος ελέγχονται από την ικανότητα των νημάτων να κινούνται και να αντιστέκονται στο εφαρμοζόμενο φορτίο καθώς και τον αριθμό των τομών νημάτων στημονιού και πλήρωσης στο σχέδιο του υφάσματος και του συντελεστή τριβής νήματος με νήμα. Για παράδειγμα,

ο συντελεστής διάτμησης του υφάσματος εξαρτάται από τη γωνία διάτμησης θ. Η εικόνα 5.3 απεικονίζει το σκίτσο του υφάσματος 2D υπό δύναμη διάτμησης. Καθώς η τιμή της διατμητικής δύναμης αυξάνεται, η γωνία διάτμησης αυξάνεται μέχρι να μπλοκάρουν τα νήματα και οποιαδήποτε περαιτέρω παραμόρφωση οδηγεί σε λυγισμό του υφάσματος. Για την ίδια δύναμη, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία διάτμησης, τόσο χαμηλότερος θα είναι ο συντελεστής διάτμησης του υφάσματος.

Ο μεγαλύτερος αριθμός διασταυρώσεων στημονιού και πλήρωσης είναι στην απλή ύφανση από ό,τι στα άλλα σχέδια, τα σατινέ σχέδια έχουν υψηλότερο συντελεστή διάτμησης. Ο μηχανισμός διάτμησης του υφάσματος δείχνει ότι σε μικρές τιμές διατμητικής δύναμης, οι οποίες δεν μπορούν να ξεπεράσουν την τριβή στις διασταυρώσεις των νημάτων πλήρωσης και στημονιού, η διατμητική τάση εξαρτάται από την παραμόρφωση στις διασταυρώσεις. Καθώς αυξάνεται η δύναμη διάτμησης, οι ολισθήσεις ξεκινούν από τη διασταύρωση των νημάτων, ακολουθούμενες από την παραμόρφωση συμπίεσης μέχρι το πλήρες μπλοκάρισμα του υφάσματος.

Η γωνία εμπλοκής α είναι συνάρτηση των

1. Αριθμό των νημάτων στημονιού και πλήρωσης ανά cm
2. Διάμετρος νήματος
3. Πυκνότητα συσκευασίας ινών
4. Γωνία εμπλοκής α
5. Προδιαγραφές υφάσματος
6. Σχέδιο υφάσματος



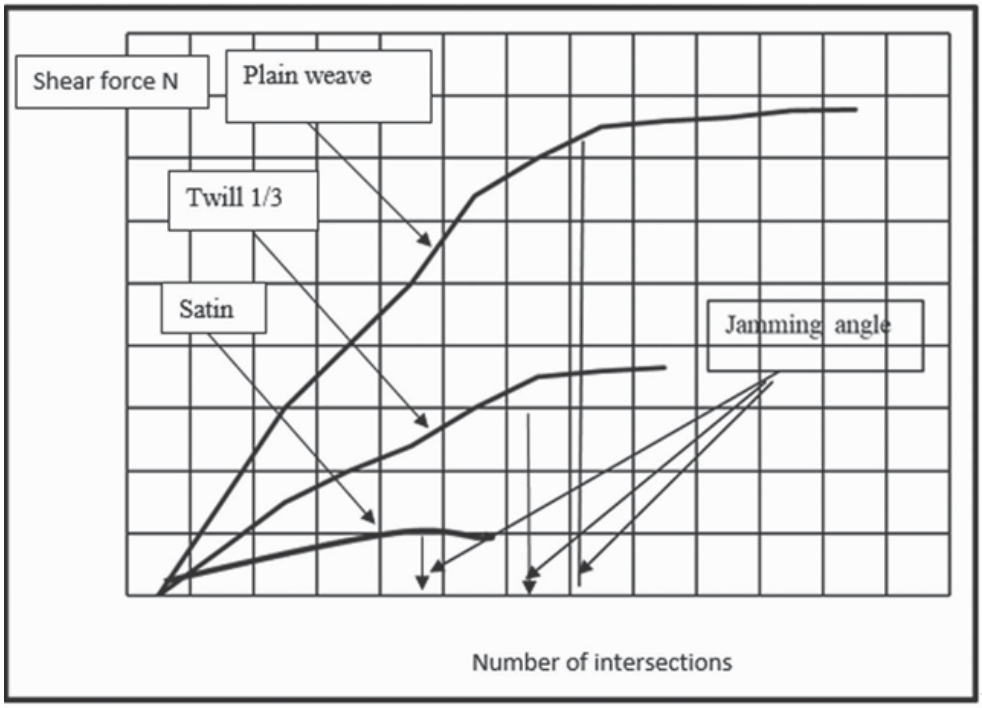
Εικόνα 5.3 Μηχανισμός διάτμησης υφάσματος [305]

Η απεικόνιση της σχέσης μεταξύ δύναμης διάτμησης και γωνίας διάτμησης για διαφορετικά σχέδια

υφασμάτων (Εικ. 5.4) δείχνει ότι η απλή ύφανση έχει τον υψηλότερο συντελεστή διάτμησης από τα άλλα σχέδια ύφανσης λόγω του υψηλότερου αριθμού πλεγμάτων νημάτων και της υψηλής στεγανότητας του υφάσματος.

Το χαρακτηριστικό διάτμησης του υφάσματος καθορίζει διάφορες ιδιότητες ως εξής:

1. Ένα ύφασμα για προσαρμογή σε επιφάνεια διπλής καμπυλότητας [26]
2. Διαξονική κατάσταση τάσης στο ύφασμα
3. Αντίσταση στο τρύπημα μιας σφαίρας, μαχαιριού ή ακίδας σε ένα ύφασμα κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης
4. Ο σχηματισμός ύψους κώνου κατά την κρούση



Εικόνα 18.4 Μια απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του συντελεστή διάτμησης και του αριθμού των τομών.

Το βάρος του υφάσματος ανά τετραγωνικό μέτρο παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό όλων των μηχανικών, φυσικών, ηλεκτρικών, θερμικών, ιδιοτήτων και της θερμικής επανάληψης και χημικής αντίστασης των υφασμάτων και επίσης καθορίζει όλες τις παραμέτρους σε συνδυασμό με την άνεση. Επιπλέον, το V της θωράκισης είναι ανάλογο με το πάχος του υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα και η απορροφητικότητα του υφάσματος είναι ευθέως ανάλογη με το πάχος του. Αποκαλύφθηκε ότι η θερμική ενέργεια που εισέρχεται σε ένα ύφασμα για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, όπου απαιτείται για να οδηγήσει την μεταφορά θερμότητας μέσω του πάχους του υφάσματος, έτσι ώστε να προκαλέσει έγκαυμα δεύτερου βαθμού στον ανθρώπινο ιστό, σχετίζεται άμεσα με το πάχος του υφάσματος. Στα

ελαφριά υφάσματα, η φλόγα εξαπλώνεται γρηγορότερα από ό,τι στα βαρέα χοντρά υφάσματα. Η αντοχή στα μαχαίρια και οι αλεξίσφαιρες ιδιότητες του προστατευτικού υφάσματος είναι ευθέως ανάλογες με το πάχος του υφάσματος.

Η αντοχή σε σχίσιμο του υφάσματος είναι μία από τις ιδιότητες που εμπλέκεται στην αντίσταση σε σφαίρα ή στα θραύσματά της μετά την κρούση να διεισδύουν μέσα από αυτό, αυξάνοντας την ισχύ αναστολής του υφάσματος.

Η αντοχή και ο συντελεστής του υφάσματος θεωρούνται ως οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν τη διείσδυση της σφαίρας στο βαλλιστικό ύφασμα. Αποκαλύφθηκε ότι ο σχηματισμός κώνου υφάσματος, όταν προσκρούεται από βλήμα, εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης της παραμόρφωσης.

Η χημική αντίσταση των προστατευτικών υφασμάτων (PFCR) είναι η επίδραση των διαφορετικών χημικών ουσιών στην υποβάθμιση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους, ιδιαίτερα στην αντοχή τους.

Τα PFCR ελέγχονται χρησιμοποιώντας οξέα, βάσεις, διάλυμα άλατος, διαλύτες και άλλες διάφορες χημικές ουσίες. Η χημική αντοχή εξαρτάται από τη χημική συγκέντρωση, τη θερμοκρασία και το χρόνο επαφής. Η αξιολόγηση του υλικού της χημικής αντοχής (χημικό προστατευτικό πανί) μπορεί να ταξινομηθεί στις ακόλουθες κατηγορίες σύμφωνα με την απώλεια της αντοχής του:

1. Κανένα (0–10% απώλεια δύναμης).
2. Ελαφρά (11–20% απώλεια αντοχής).
3. Μέτρια (21–40% απώλεια δύναμης).
4. Αισθητή (41–80% απώλεια αντοχής). και
5. Υποβαθμισμένο (81–100% απώλεια αντοχής).

Η έκθεση σε χημικούς κινδύνους, απαιτεί το προστατευτικό πανί από ειδικό υλικό Chemical Protective Clothing (CPC), το οποίο δεν μπορεί να προστατεύσει από όλους τους χημικούς κινδύνους, αλλά προστατεύει από περιορισμένο αριθμό χημικών ουσιών. Το FCR συσχετίζεται με τη χημική αντοχή ινών, δομή υφάσματος, προδιαγραφές υφάσματος, ιδιότητες υφάσματος, συμπεριλαμβανομένου του πάχους και του βάρους/m^2. Η διαπερατότητα αέρα του υφάσματος, το πορώδες και η επιφανειακή πυκνότητα είναι οι βασικοί παράγοντες για το CPC. Η χημική επίδραση στις ίνες, το ύφασμα και το σύστημα θωράκισης μπορεί να επηρεαστεί από τη χημική συγκέντρωση και τη θερμοκρασία, τη μέθοδο εφαρμογής της χημικής ουσίας - πιτσιλιές ή χημικούς ατμούς.

Οι βαθμολογίες χημικής επίδρασης μπορούν να ταξινομηθούν ως :

1. Κανένα αποτέλεσμα-εξαιρετικό,
2. Μικρό αποτέλεσμα-καλό,
3. Μέτριο αποτέλεσμα — δίκαιο, και
4. Σοβαρή επίδραση—δεν συνιστάται.

Η βαθμολογία όπως αναφέρεται από την ομάδα προηγμένων υλικών (AMG):

1. Ουσιαστικά κανένα αποτέλεσμα, λιγότερο από 5% αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες και λιγότερο από 2% αλλαγή σε βάρος και διαστάσεις.
2. Κάποια αλλαγή
3. Δεν συνιστάται.

Η MPE (Modern Plastics Encyclopedia 1986–87) Rating System προτείνει μια άλλη ταξινόμηση:

1. Καμία σημαντική επίδραση—1,0%, >0,5%, >20% αλλαγή σε βάρος, διάσταση και αντοχή, αντίστοιχα.
2. Σημαντικό, αλλά συνήθως όχι οριστικό—0,5–1,0%, 0,2–0,5%, 10–20% αλλαγή σε βάρος, διάσταση και αντοχή, αντίστοιχα.
3. Συνήθως σημαντική—>1,0%, >0,5%, >20% αλλαγή στο βάρος, τη διάσταση και την αντοχή, αντίστοιχα.

Λόγω της καταστροφικής επίδρασης ορισμένων χημικών ουσιών στις ιδιότητες των ινών, το φύλλο δεδομένων κάθε τύπου ινών δίνει μεγάλη προσοχή στο FCR του MMF.

Το FCR ελέγχεται χρησιμοποιώντας μόνο ορισμένες χημικές ουσίες όπως:

1. Οξέα: υδροχλωρικό οξύ, θειικό οξύ και ούτω καθεξής,
2. Βάσεις: υδροξείδιο του νατρίου, υδροξείδιο του ασβεστίου, και ούτω καθεξής, και
3. Οργανικοί διαλύτες: ακετόνη, βενζόλιο και ούτω καθεξής με διαφορετικές συγκεντρώσεις που κυμαίνονται 37–100% σε θερμοκρασία 20–200°C

Ο χρόνος επεξεργασίας των χημικών ποικίλλει, σε σχέση με την τελική χρήση, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση, από 1 έως 10.000 ώρες.

Ο εξοπλισμός ατομικής προστασίας (PPE), το προστατευτικό σύστημα θωράκισης επιτρέπει στους

ατμούς υγρασίας από το σώμα να διαφεύγουν μέσα από τα προστατευτικά στρώματα ενδυμάτων, ενώ προστατεύουν τον χρήστη από τη διέλευση χημικών παραγόντων σε υγρά, ατμούς και αεροζόλ. Τα πρότυπα NFPA καθιέρωσαν την απόδοση για χημικά προστατευτικά ρούχα, όπως το NFPA 1991, το NFPA 1992, τα οποία παρέχουν ελάχιστα επίπεδα προστασίας για απόκριση έκτακτης ανάγκης των ΜΑΠ έναντι ατμών, πιτσιλίσματος υγρών και σωματιδίων.

Η προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία είναι απαραίτητη για τα προστατευτικά υφάσματα. Η αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία Ultraviolet (UV) του προστατευτικού υφάσματος είναι ένας βαθμός υποβάθμισης του υφάσματος όταν εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία. Τα υφάσματα με υψηλότερο βάρος, πάχος και συντελεστή κάλυψης απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα ακτίνων UV, επομένως, αυτά τα υφάσματα προσφέρουν καλύτερη προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία. Το φάσμα UV κυμαίνεται μεταξύ 200 και 400 nm και συνήθως χωρίζεται σε τρεις περιοχές: UV-A—320–400 nm, UV-B—280–320 nm και UV-C—200–280 nm. Οι περισσότερες από τις πολυμερικές ίνες υπόκεινται σε δομική υποβάθμιση λόγω θραύσης των χημικών δεσμών όταν εκτίθενται για μεγάλο χρονικό διάστημα στην υπεριώδη ακτινοβολία, ανάλογα και με το μήκος κύματος. Κάθε τύπος ίνας έχει την περιοχή κρίσιμου μήκους κύματος του, για παράδειγμα, το Kevlar UV μήκος κύματος 300–490 nm είναι πιο κρίσιμο. Τα δείγματα του υφάσματος θα ελέγχονται για αξιολόγηση UV, όπως εφελκυσμό, κρούση, τριβή και χρώμα. Η καμπύλη χρόνου-αποδόμησης θα πρέπει να σχεδιαστεί για να υπολογιστεί η υποβάθμιση των ιδιοτήτων με την πάροδο του χρόνου χρησιμοποιώντας μία από τις ακόλουθες μεθόδους:

1. Μετρητής καιρού (μέθοδος έκθεσης - AATCC 16E)
2. Επιταχυντής UV tester (επιταχυνόμενη διάβρωση), (ASTM 4329, ASTM G154-16)

Η ευφλεκτότητα του πυροπροστατευτικού υφάσματος – Flame Proof Fabric (FPF) υπαγορεύεται από τις ακόλουθες ιδιότητες: φυσικές ιδιότητες, χημικές ιδιότητες, θερμικές ιδιότητες και προδιαγραφές υφάσματος. Το σφιχτό ύφασμα μεγάλου βάρους έχει υψηλότερη αντοχή στη φλόγα. Το FPF ελέγχεται με εφαρμογή ASTM D4108-87. Η δοκιμή θερμικής προστατευτικής απόδοσης (TPP) μετρά την ποσότητα θερμικής προστασίας που θα προσέφερε ένα ύφασμα σε έναν χρήστη σε περίπτωση πυρκαγιάς (αντοχή στη φλόγα ή αναφλεξιμότητα). Για να μετρηθεί η σχετική ευφλεκτότητα ενός υφάσματος, κρατιέται άκαμπτα σε πλαίσιο τριών όψεων και ο καυστήρας μεθανίου παρέχει μια μικρή φλόγα ανάφλεξης που αφήνεται να προσκρούσει στην κάτω πλευρά του υφάσματος για 12 δευτερόλεπτα και μετρώνται τα ακόλουθα δεδομένα:

1. Το μήκος του καμένου υφάσματος, μετά τη φλόγα
2. Afterglow (ο χρόνος που το ύφασμα συνεχίζει να λάμπει μετά από την παύση της φλόγας).
3. Παρουσία σταγόνων
4. Χρόνος μετάκαυσης

Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής αποτελούν ποιοτικό δείκτη επιτυχίας/αποτυχίας της ευφλεκτότητας του υφάσματος. Για παράδειγμα, το Kevlar είναι εγγενώς ανθεκτικό στη φλόγα, αλλά μπορεί να αναφλεγεί και η καύση συνήθως σταματά όταν αφαιρεθεί ο καυστήρας, χωρίς να στάζει καθόλου και χωρίς χρόνο μετάκαυσης. Οι ίνες αντοχής στη φλόγα έχουν επιβραδυντικότητα φλόγας στις χημικές τους δομές (μη εύφλεκτες).

Η μέθοδος δοκιμής NFPA 701 (τυποποιημένες μέθοδοι δοκιμών πυρκαγιάς για διάδοση φλόγας υφασμάτων και μεμβρανών) χρησιμοποιεί την απώλεια βάρους ως κύριο κριτήριο του FPF. Η φλόγα από έναν καυστήρα αερίου εφαρμόζεται σε κάθε δείγμα για 45 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια αφαιρείται. Το δείγμα θα πέσει εάν: δεν σταματήσει να καίγεται μέσα σε δύο δευτερόλεπτα. Η απώλεια βάρους είναι περισσότερες από τρεις τυπικές αποκλίσεις από τον μέσο όρο για τα 10 δείγματα. Τα δείγματα κατά μέσο όρο δεν χάνουν περισσότερο από το 40% του βάρους τους κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Για προστασία από προσομοίωση πυρκαγιάς φλας της αντίστασης στη φλόγα των ρούχων, χρησιμοποιείται ένα ανδρείκελο με όργανα μέτρησης και η δοκιμή πραγματοποιείται σύμφωνα με τα πρότυπα.

Το ύφασμα NFPA 2112 υποβάλλεται σε πυρκαγιά 3 δευτερολέπτων στα 2 cal/cm^2 και υπολογίζεται για το συνολικό προβλεπόμενο έγκαυμα σώματος. Επίσης, δεν πρέπει να λιώνει ή να στάζει ή να έχει περισσότερο από 2 δευτερόλεπτα κάψιμο μετά από φλόγα ή μήκους 10 cm κάρβουνου κατά τη δοκιμή.

Κεφάλαιο 6ο Χρήση Αυξητικών Υλικών σε Πλάκες - Προβλήματα Κρούσης και Έκρηξης

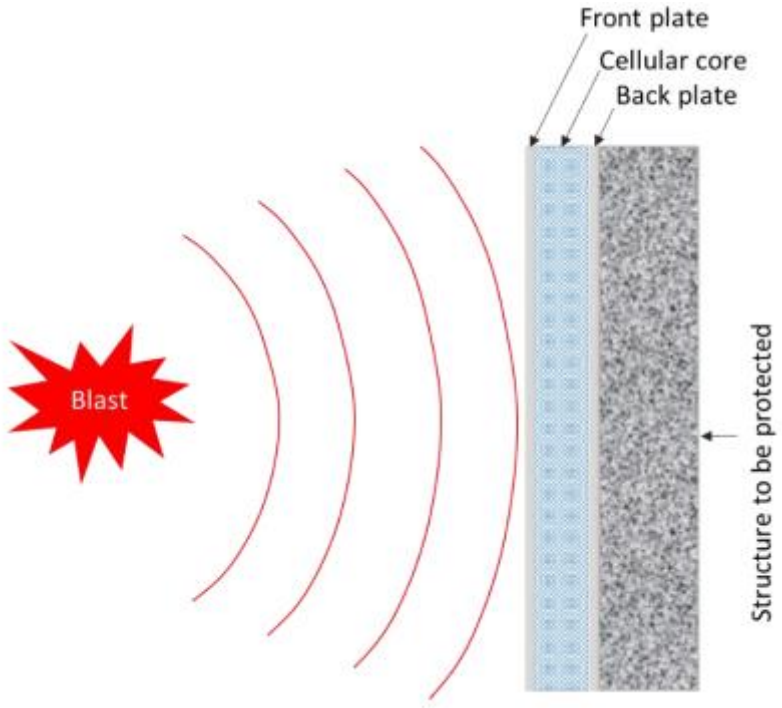
Τα αυξητικά υλικά είναι μια κατηγορία δομικών μεταϋλικών με αρνητικό λόγο Poisson. Σε σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευές, οι αυξητικές δομές έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν αρκετές ανώτερες ιδιότητες, όπως υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας, ενισχυμένη αντίσταση και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Ως αποτέλεσμα, οι αυξητικές κατασκευές κερδίζουν δημοτικότητα ως ελαφριές, υψηλής απόδοσης προστατευτικές κατασκευές ειδικά για προστασία έναντι σε φορτία έκρηξης και κρούσης. Το παρόν κεφάλαιο στοχεύει στην ανασκόπηση των πρόσφατων προόδων στις ελαφριές προστατευτικές δομές απορρόφησης υψηλής ενέργειας που βασίζονται σε αυξητικά υλικά. Διαφορετικοί σχεδιαστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των προστατευτικών δομών συζητούνται κριτικά. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια ταξινόμηση των σύγχρονων αυξητικών τοπολογιών, η κατάσταση της μεγάλης κλίμακας αυξητικής κατασκευής και οι μέθοδοι αξιολόγησης αντιβαλλιστικών επιδόσεων.

Λόγω σκόπιμων βομβαρδιστικών επιθέσεων και διαφόρων τυχαίων εκρήξεων [300-304], ο κίνδυνος έκθεσης πολιτικών και στρατιωτικών υποδομών και οχημάτων σε φορτία εκρήξεων και πρόσκρουσης αυξάνεται παγκοσμίως [305]. Όπως συζητήθηκε και στα προηγούμενα, ακραίες δυναμικές φορτίσεις προκαλούν καταστροφικές ζημιές και την κατάρρευση των υποδομών που οδηγούν σε σημαντικές οικονομικές απώλειες καθώς και απώλειες ανθρώπινων ζωών [306]. Επιπλέον, σε αντίθεση με άλλα δυναμικά φορτία όπως ο σεισμός και ο άνεμος σε μια κατασκευή, τα φορτία έκρηξης και πρόσκρουσης υψηλής ταχύτητας δημιουργούν ένα κρουστικό κύμα, το οποίο προκαλεί παραμόρφωση κοντά στο μέτωπο κρούσης αντί να παραμορφώνεται μέσα στο υλικό. Ως εκ τούτου, υπήρχε κρίσιμη ανάγκη να αναπτυχθούν ειδικές τεχνολογίες προστασίας για την προστασία των υποδομών, των οχημάτων και των ανθρώπων από φορτία εκρήξεων και κρούσεων.

Για την προστασία κρίσιμων υποδομών και οχημάτων από εκρήξεις και βαλλιστικές ενέργειες, έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν μια σειρά από μεθόδους και υλικά μετριασμού και δομικής ενίσχυσης [305-313]. Μερικές από τις κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές μετριασμού των εκρήξεων περιλαμβάνουν τοίχους φραγμού [314-316], εκτροπείς κύματος έκρηξης σε σχήμα V σε οχήματα [317-320] και αναντιστοιχία σύνθετης αντίστασης [321,322]. Αυτές οι τεχνικές μετριασμού έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν την ένταση ενός φορτίου έκρηξης στην κύρια κατασκευή. Ομοίως, η χρήση διαφόρων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες (FRPs) [323-326], η επένδυση [327-330] και τα κατασκευασμένα σύνθετα τσιμέντου [331-333] είναι οι κύριες συμβατικές μέθοδοι ενίσχυσης για

φορτία έκρηξης και κρούσης [306,334, 335]. Η ικανότητα δυναμικής αντίστασης φορτίου και η ολκιμότητα ενισχύονται έτσι με την ενίσχυση της δομής χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους. Αν και αυτές οι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στο παρελθόν, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί με καθεμία από αυτές [334]. Για παράδειγμα, το μεγάλο βάρος και η διάβρωση των χαλύβδινων μανδύων, η ρήξη ινών και η αποκόλληση των FRP υπό δυναμικό φορτίο, το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η μεγάλη απαίτηση χώρου των φραγμών, περιορίζουν τη χρήση τους [334].

Ως εκ τούτου, οι ελαφριές, υψηλής ενέργειας θωρακίσεις απορρόφησης για αντίσταση σε φορτία έκρηξης και κρούσης κερδίζουν την προσοχή ως σύγχρονες αμυντικές κατασκευές. Αυτά τα είδη προστατευτικών συστημάτων σχεδιάζονται συνήθως με τη μορφή δομών σάντουιτς υψηλής απόδοσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες μεθόδους, όπως θυσιαστικές επενδύσεις στην υποδομή, σε τοίχους φραγμού, ως δάπεδα οχημάτων κ.λπ. [336-340]. Ένα τυπικό σενάριο εφαρμογής ελαφρών προστατευτικών πλαισίων σάντουιτς υψηλής απορρόφησης ενέργειας για την προστασία της υποδομής από εκρήξεις αέρα απεικονίζεται στην εικόνα 6.1. Ένα τυπικό σύστημα προστασίας θυσιαζόμενης επένδυσης αποτελείται από έναν θρυμματιζόμενο πυρήνα χαμηλής πυκνότητας τοποθετημένο μεταξύ δύο πλακών που βρίσκονται σε την εξωτερική επιφάνεια του προς προστασία δομικού στοιχείου [341-343]. Το θυσιαζόμενο προστατευτικό στρώμα μετριάζει την έκρηξη και τις κρούσεις απορροφώντας ή διαχέοντας ενέργεια, και στην περίπτωση των βαλλιστικών, εκτρέποντας το βλήμα [344]. Ο θρυμματιζόμενος πυρήνας χαμηλής πυκνότητας του προστατευτικού συστήματος έχει σχεδιαστεί με διάφορες κυτταρικές δομές όπως honeycombs [345], πλέγματα [346], βιο-εμπνευσμένα κυτταρικά υλικά [347-349], αυξητικά μεταϋλικά [350-352], αφρούς [353 –356], και κυματοειδείς σωλήνες [357]. Ο θρυμματιζόμενος πυρήνας, σε τέτοιες δομές, είναι κυρίως υπεύθυνος για την απορρόφηση της ενέργειας που μεταδίδεται από εκρήξεις και κρούσεις χωρίς να μεταδίδει υψηλή τάση στην προστατευμένη κατασκευή [358]. Ως εκ τούτου, οι κυτταρικές δομές υψηλής απορρόφησης πλαστικής ενέργειας προτιμώνται ως ο πυρήνας των προστατευτικών δομών σάντουιτς.



Εικόνα 6.1 Θυσιαζόμενη επένδυση ως προστατευτική πανοπλία

Σε αντίθεση με άλλα συμβατικά υλικά, τα αυξητικά μεταϋλικά (υλικά και δομές με αρνητική αναλογία Poisson) συρρικνώνονται στην πλευρική κατεύθυνση υπό αξονική συμπίεση και αντίστροφα [352,3593,60]. Λόγω του εξωτικού αντιδιαισθητικού μηχανισμού παραμόρφωσης, τα αυξητικά μεταϋλικά παρουσιάζουν ανώτερες ιδιότητες όπως υψηλή απορρόφηση ενέργειας, καλύτερη αντίσταση, βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες κ.λπ. [352]. Ως αποτέλεσμα, ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών επικεντρώθηκε στη διερεύνηση των αυξητικών μεταϋλικών και στην εφαρμογή τους στην προστατευτική μηχανική και σε διάφορους άλλους τομείς.

Λόγω της ραγδαίας έρευνας για τα αυξητικά μεταϋλικά και τις εφαρμογές τους, έχουν επίσης πραγματοποιηθεί αρκετές ανασκοπήσεις τα τελευταία χρόνια. Η εξέταση τους οδήγησε στην διαπίστωση ότι η πλειονότητα των ερευνητών επικεντρώθηκε στην ανασκόπηση των ταξινομήσεων αυξητικών γεωμετρικών σχεδίων, των αυξητικών μηχανισμών και των μηχανικών ιδιοτήτων από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες αυξητικές δομές [352,361-363]. Ωστόσο, οι υπάρχουσες ταξινομήσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις προσφάτως ανακαλυφθείσες αυξητικές τοπολογίες. Εκτός από γεωμετρικές ταξινομήσεις, οι Duncan et al. [364] παρουσίασε μια ανασκόπηση σχετικά με τις εφαρμογές αυξητικών υλικών σε προστατευτικό εξοπλισμό στον αθλητισμό. Οι Zhang et al. [365] επανεξέτασαν τη συμπεριφορά πλαστικής παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας των αυξητικών δομών που κατασκευάζονται με πρόσθετο. Οι Wu et al. [366] επικεντρώθηκαν στο σχεδιασμό, τις ιδιότητες και την εφαρμογή των χειρόμορφων δομών. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και οι εφαρμογές αυξητικών

σωληνοειδών κατασκευών αναθεωρήθηκαν από τους Luo et al. [367]. Μια σύντομη ανασκόπηση σχετικά με την πιθανή εφαρμογή του αυξητικού μεταϋλικού σε μια αντιβαλλιστική ασπίδα παρουσιάστηκε από τους Naik et al. [368]. Ωστόσο, μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική έρευνα έδειξε έλλειψη λεπτομερούς ανασκόπησης σχετικά με την εκρηκτική και βαλλιστική απόδοση των αυξητικών δομών. Επιπλέον, αν και η κατασκευή μικρής κλίμακας με χρήση μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης αναφέρεται σε πολλές ανασκοπήσεις, η μεγάλης κλίμακας κατασκευή αυξητικών δομών για προστατευτικές εφαρμογές δεν έχει ποτέ ληφθεί υπόψη

6.1 Αυξητικά υλικά

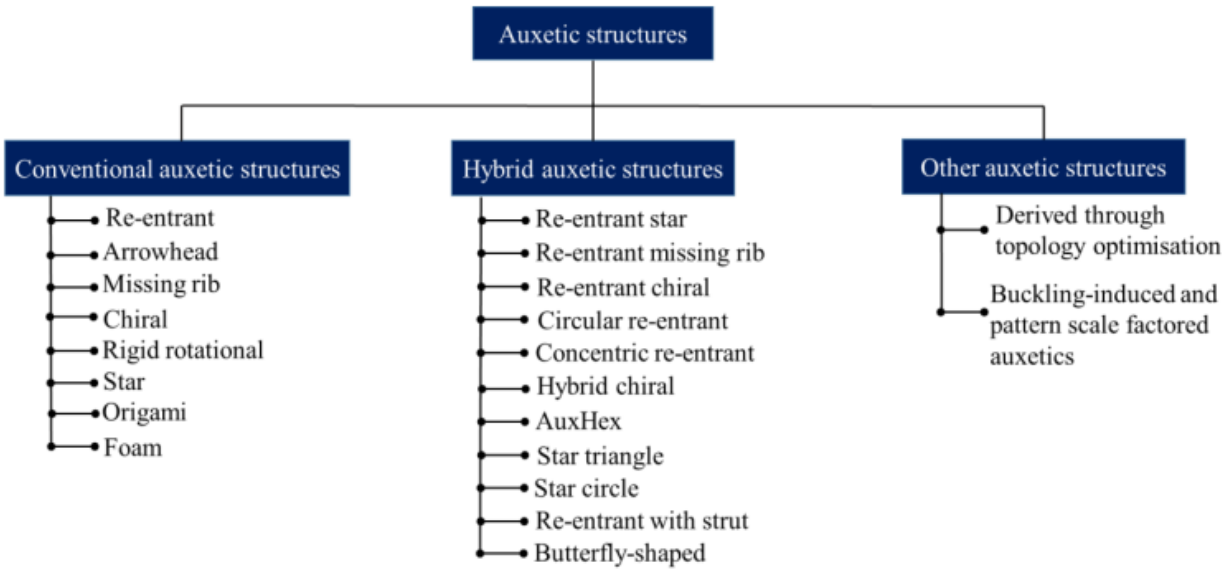
6.1.1 Αυξητικές δομές

Η έννοια των αυξητικών μεταϋλικών χρονολογείται από το 1987, όταν ο Lake [374] αναφέρθηκε σε έναν αφρό ανοιχτής κυψέλης (open cell foam) με αρνητική αναλογία Poisson. Ωστόσο, ο όρος «auxetic» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Evans et al. [375] το 1991, προερχόμενος από την ελληνική λέξη «αυξητικός», που σημαίνει «αυτός που τείνει να αυξάνεται» [376]. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί μια αξιοσημείωτη ανάπτυξη της αυξητικής δομικής μορφολογίας από το μίκρο σε μάκρο επίπεδο, η διερεύνηση ιδιοτήτων και η εφαρμογή του αυξητικού μεταϋλικού σε διάφορους τομείς.

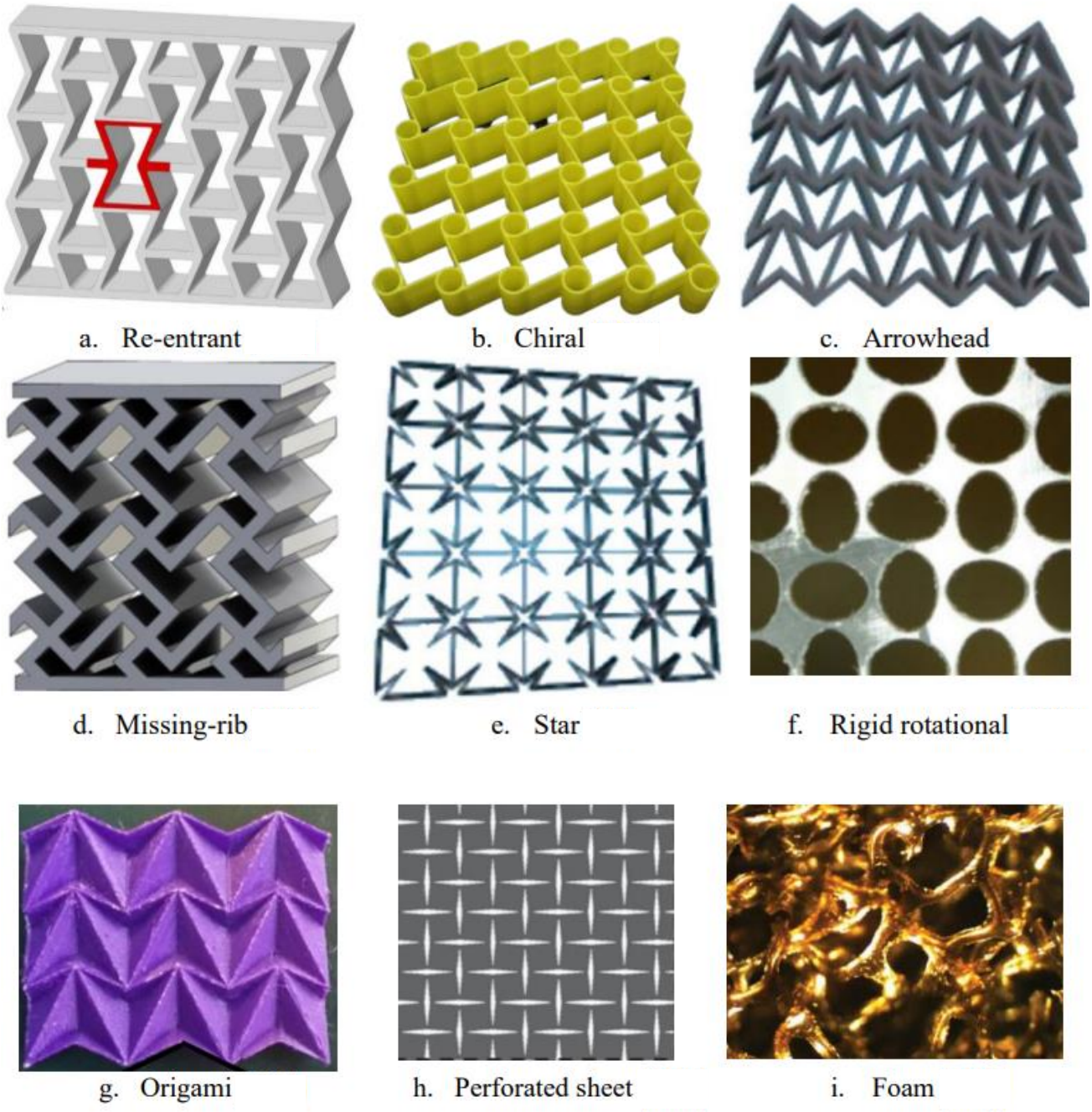
Οι μαζικές ιδιότητες των αυξητικών μεταϋλικών/κατασκευών διέπονται κυρίως από τις κυψελωτές αρχιτεκτονικές τους [377]. Όταν υποβάλλεται σε εξωτερική φόρτιση, η κυτταρική αρχιτεκτονική ενός αυξητικού υλικού αλλάζει το μοτίβο του για να εμφανίσει αρνητική αναλογία Poisson (αυξητική απόδοση). Επομένως, για να επιτευχθεί η αυξητική συμπεριφορά, πολλές κυψελωτές αρχιτεκτονικές έχουν σχεδιαστεί σκόπιμα από μηχανικούς. Εν τω μεταξύ, ορισμένα φυσικά υλικά όπως το δέρμα της γάτας [378], το δέρμα της θηλής αγελάδας [379] και ο κριστοβαλίτης [380] βρέθηκαν να υφίστανται αυξητική παραμόρφωση. Ωστόσο, το πεδίο εφαρμογής αυτής της ανασκόπησης περιορίζεται στις τεχνητές αυξητικές κατασκευές.

Στο κεφάλαιο αυτό, οι αυξητικές δομές ομαδοποιούνται σε τρεις ομάδες: συμβατικές αυξητικές δομές, υβριδικές αυξητικές δομές και άλλες νέες αυξητικές δομές που προέρχονται από διάφορες μεθόδους. Οι ομαδοποιημένες αυξητικές δομές φαίνονται στην εικ. 6.2. Τα συμβατικά αυξητικά σχέδια περιλαμβάνουν αυτά της επανεισόδου (re-entrant) [381,382], απουσίας νευρώσεων (missing rib) [383,384], χειρόμορφο (chiral) [385], άκαμπτο περιστροφικό (rigid rotational) [386,387], origami [388, 389] και αφρό (foam) [390–392]. Κάθε μία από αυτές τις αυξητικές δομές έχει έναν μοναδικό

μηχανισμό για να υφίσταται την αντίθετη συμπεριφορά παραμόρφωσης για να εμφανίσει αρνητική αναλογία Poisson, με βάση τον μηχανισμό παραμόρφωσής τους [393]. Τα τυπικά γεωμετρικά σχέδια των συμβατικών αυξητικών τοπολογιών παρουσιάζονται στην εικ. 6.3. Οι λεπτομερείς ανασκοπήσεις των κινητικών μηχανισμών και των ιδιοτήτων των συμβατικών αυξητικών σχεδίων αναφέρονται σε διάφορες βιβλιογραφίες [352,360,361,394,395].



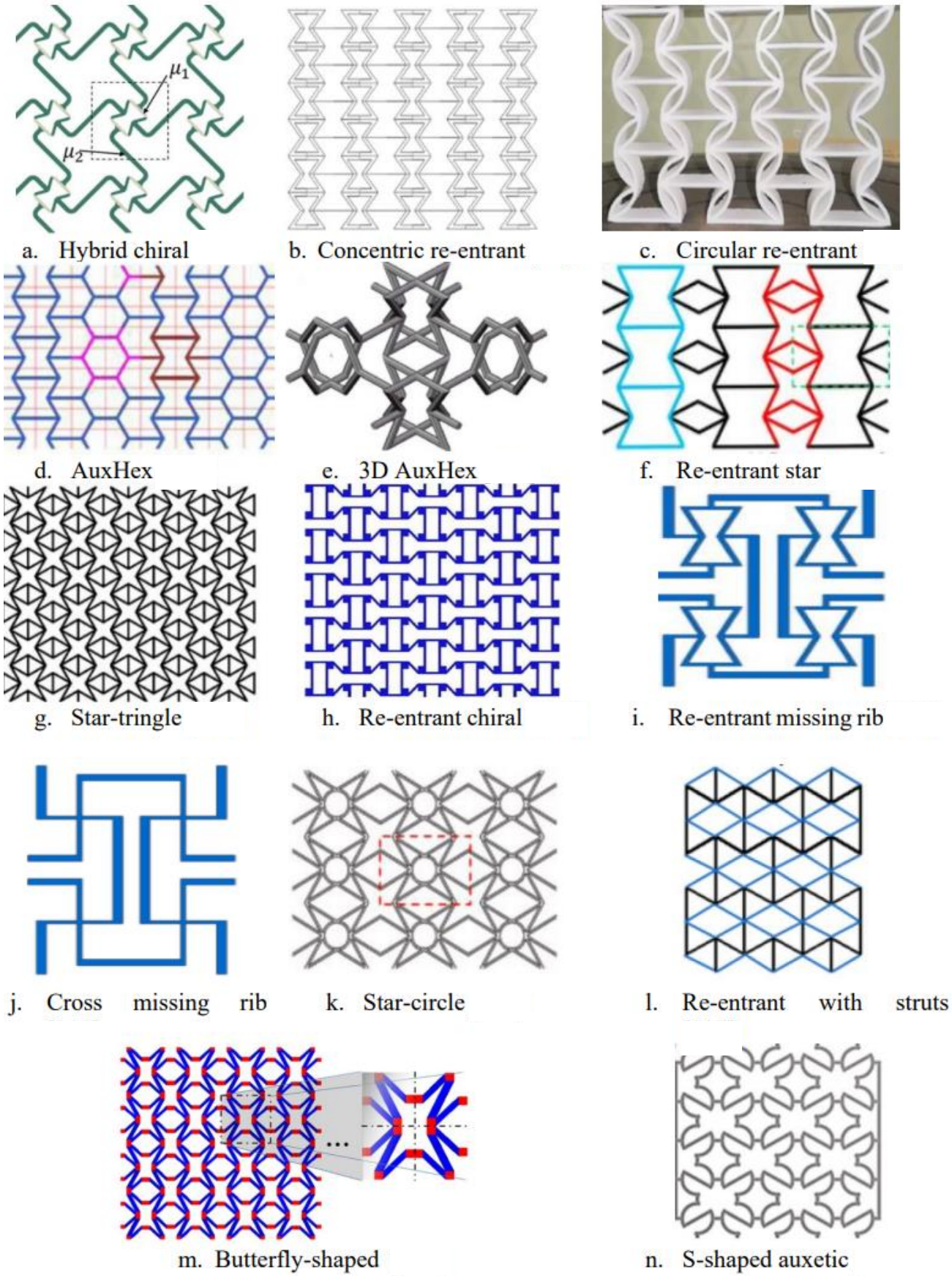
Εικόνα 6.2 Ταξινόμηση αυξητικών δομών



Εικόνα 6.3 Συμβατικές αυξητικές κατασκευές

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές έχουν εργαστεί για την ανάπτυξη νέων αυξητικών δομών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που βασίζονται στο συνδυασμό των τοπολογικών χαρακτηριστικών πολλαπλών συμβατικών σχεδίων. Οι πρόσφατα σχεδιασμένες αυξητικές δομές βασίζονται τοπολογικά επί των συμβατικών αυξητικών κατασκευών και ονομάστηκαν υβριδικές αυξητικές δομές. Οι υβριδικές αυξητικές δομές που αναπτύχθηκαν πρόσφατα παρουσιάζονται στην εικ. 6.4. Οι Jiang και Li [396] συνδύασαν τους μηχανισμούς παραμόρφωσης της γωνίας επανεισόδου και της χειρομορφίας

για να κατασκευάσουν ένα υβριδικό χειρόμορφο σχέδιο. Εμπνευσμένοι από τη δομή της καρύδας από κοκοφοίνικες, οι Jiang et al. [397] επανασχεδίασαν τη συμβατική δομή επανεισόδου αυξητικής κηρήθρας με δύο ομόκεντρα κυτταρικά τοιχώματα. Οι Qi et al. [398,399] ανέπτυξαν έναν κυκλικό αυξητικό σχεδιασμό επαναεισόδου με βάση τη συμβατική δομή επανεισόδου αντικαθιστώντας τα κεκλιμένα τοιχώματα κυψέλης με διπλά κυκλικά τοιχώματα κυψέλης. Τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της αυξητικής επανεισόδου και της συμβατικής εξαγωνικής κηρήθρας ενσωματώθηκαν από τους Xu et al. [400] για την παραγωγή ενός υβριδικού αυξητικού σχεδίου, που ονομάζεται AuxHex. Επιπλέον, οι Guo et al. [401] ανέπτυξαν μια τρισδιάστατη δομή πλέγματος του υβριδικού σχεδίου AuxHex. Οι Linforth et al. [402] σχεδίασαν μια υβριδική αυξητική δομή που βασίζεται σε μια άκαμπτη περιστροφική αυξητική κηρήθρα και επανεισόδου. Οι τοπολογίες των συμβατικών σχεδίων επανεισόδου και αστεριών συνδυάστηκαν από τους Wang et al. [409] για να αναπτύξουν ένα νέο αυξητικό σχέδιο σε σχήμα αστεριού. Οι Wei et al. [410] σχεδίασε ένα νέο αυξητικό με σχήμα τριγωνικό αστέρι ενσωματώνοντας τριγωνικά κυτταρικά τοιχώματα στο συμβατικό αυξητικό αστέρι. Οι Alomarah et al. [411,412] ενσωμάτωσαν τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των συμβατικών σχεδίων επανεισόδου και χειρόμορφων αυξητικών σχεδίων για να αναπτύξουν ένα νέο αυξητικό σχέδιο που ονομάζεται χειρόμορφο αυξητικό επανεισαγωγής. Ομοίως, μια δομή επανεισόδου και αντι-τριχιρικό αυξητικό ενσωματώθηκαν μαζί από τους Hu et al. [413] για τη λήψη νέας αυξητικής τοπολογίας. Και πάλι, εμπνευσμένοι από τον χειρικό αυξητικό σχεδιασμό, οι Nedoushan et al. [414] ανέπτυξαν μια νέα τριγωνική αυξητική κηρήθρα με ενισχυμένη ακαμψία. Οι Zhang et al. [415] σχεδίασαν υβριδικές αυξητικές δομές με βάση τα συμβατικά σχέδια επανεισόδου και απουσίας νεύρωσης. Με βάση το αυξητικό σχέδιο αστεριών, οι Lu et al. [416] ανέπτυξαν ένα νέο υβριδικό πλέγμα αστεριού. Τα στενά στηρίγματα εισήχθησαν στο συμβατικό σχέδιο αυξητικού πλέγματος από τους Xue et al. [417]. Με βάση την τροποποίηση του συμβατικού αυξητικού πλέγματος με αστέρι, προτάθηκε ένα αυξητικό σε σχήμα πεταλούδας από τους Zhang et al. [418]. Οι Meena και Singamneni [419,420] σχεδίασαν μια αυξητική δομή σε σχήμα S και την υβριδοποίησαν περαιτέρω με ένα αυξητικό πλέγμα αστεριού. Οι Zhang et al. Το [421] τροποποίησαν τα κελιά της μονάδας επανεισόδου προσθέτοντας ένα τμήμα σε σχήμα σφήνας. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια νέα αυξητική χειρόμορφη δομή από τους Zhang et al. [422] μέσω του σχεδιασμού αρμών κουφωμάτων.



Εικόνα 6.4 Υβριδικές αυξητικές δομές

Εκτός από τις συμβατικές αυξητικές δομές και τις υβριδικές δομές, η δομική βελτιστοποίηση για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης αρνητικής αναλογίας Poisson είναι μια άλλη προσέγγιση για την ανάπτυξη αυξητικών τοπολογιών. Αρκετές νέες αυξητικές αρχιτεκτονικές έχουν προκύψει μέσω αλγορίθμων βελτιστοποίησης τοπολογίας [423-427]. Επιπλέον, οι Ren et al. [428] σχεδίασαν ένα 3D auxetic με μηχανισμό που προκαλείται από λυγισμό. Ωστόσο, η αυξητική συμπεριφορά τέτοιων δομών εξαφανίστηκε όταν το βασικό υλικό άλλαξε από ελαστομερές σε μέταλλο. Ως εκ τούτου, μια μέθοδος συντελεστή κλίμακας προτύπου εισήχθη από τους Zhang και Ren [429] για την ανάκτηση της αυξητικής συμπεριφοράς των μεταλλικών κατασκευών. Επιπλέον, οι Zhang et al. [430] πρότειναν μια μεθοδολογία που βασίζεται στον συντονισμό του στελέχους συμπύκνωσης για τον σχεδιασμό αυξητικών μονάδων κυψελών με συντονισμένη ακαμψία.

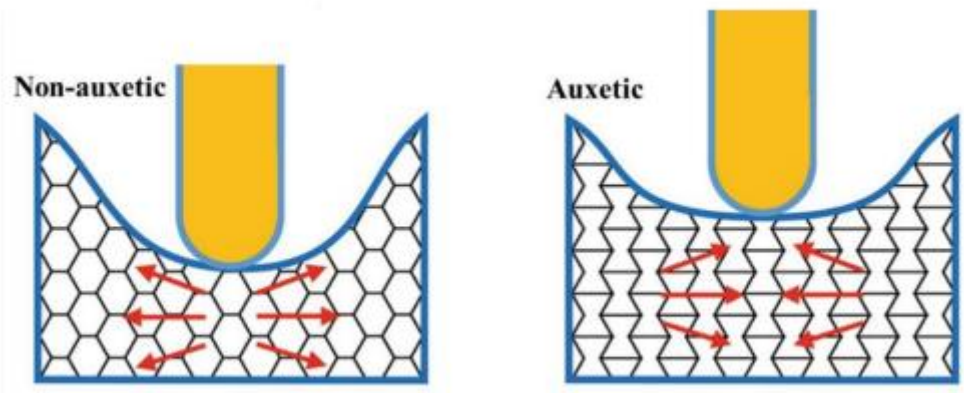
Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί δεκάδες νέα αυξητικά σχέδια. Αν και οι περισσότερες από τις αυξητικές δομές στο παρελθόν βασίζονταν στην εμπειρία των μηχανικών [352], ο συστηματικός υπολογισμός αυξητικής τοπολογίας με διάφορες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης και αναλυτικής μοντελοποίησης, έχει ξεκινήσει. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα μοντέλα βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό νέων αυξητικών σχεδίων και αναλυτικών μοντέλων [431-433] υποθέτουν ελαστικές/υπερελαστικές ιδιότητες συστατικού υλικού, χωρίς τις σημαντικές ιδιότητες πλαστικού υλικού που είναι απαραίτητες για την απορρόφηση ενέργειας. Επιπλέον, σπάνια δόθηκε προτεραιότητα στα σχέδια των υπολογιζόμενων αυξητικών τοπολογιών (που υπολογίζονται από έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης) για την αναπαραγωγή των αυξητικών δομών με ένα ορισμένο απαιτούμενο μέγεθος και ιδιότητες. Έτσι, απαιτείται περαιτέρω συντονισμός των μοντέλων βελτιστοποίησης με μη γραμμικούς ιδιοσυστατικούς νόμους και σενάρια μεγάλων παραμορφώσεων για την ανάπτυξη αυξητικών δομών για προβλήματα υψηλής απορρόφησης ενέργειας, όπως ο μετριασμός της δύναμης έκρηξης και κρούσης. Επιπλέον, μια ορθολογική διαδικασία σχεδιασμού για τον επανασχεδιασμό των νέων αυξητικών δομών με τις επιθυμητές ιδιότητες είναι σημαντική για την εφαρμογή των ανακαλυφθέντων δομών σε διαφορετικά πεδία.

6.1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Λόγω του αντιδιαισθητικού μηχανισμού παραμόρφωσής τους, οι αυξητικές δομές παρουσιάζουν αρκετές ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τις συμβατικές κυτταρικές δομές θετικής αναλογίας Poisson, όπως: ενισχυμένη ακαμψία διάτμησης, υψηλότερη αντοχή στη θραύση σε επίπεδο παραμόρφωσης και καλύτερη αντίσταση στην είσοδο ξένου σώματος [352,359,361,434]. Με βάση την κλασική θεωρία της ελαστικότητας για τρισδιάστατα ισότροπα στερεά, η συμπεριφορά ενός

φυσικού σώματος μπορεί να περιγραφεί με τρεις συντελεστές (μέτρο ελαστικότητας, E, μέτρο διάτμησης, G, μέτρο δυσκαμψίας K) και λόγο Poisson (ν) [434,435]. Μέσα στην ισοτροπία, είναι γνωστό ότι ένας αρνητικός λόγος Poisson (ν) οδηγεί σε υψηλότερο συντελεστή διάτμησης (G) [436]. Αντίθετα, το μέτρο δυσκαμψίας (K) μειώνεται από μια αρνητική αναλογία Poisson [352]. Από την άλλη πλευρά, υφίσταται ένα αριθμητικό όριο της αναλογίας του Poisson ($-1 \leq \nu \leq 0,5$) για ισοτροπικά υλικά. Ωστόσο, αυτό το όριο της αναλογίας του Poisson μπορεί να ξεπεραστεί μέσω του σχεδιασμού ανισότροπων υλικών. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι, σε αντίθεση με τα ισότροπα υλικά, η αναλογία Poisson δεν επαρκεί από μόνη της για να προσδιορίσει την αναλογία όγκου προς συντελεστές διάτμησης σε ανισότροπα υλικά [437].

Όταν μια συμβατική κατασκευή, όπως μια εξαγωνική κυψέλη, υποβάλλεται σε τοπική κρούση, το υλικό κάτω από τη ζώνη κρούσης ρέει προς τα έξω (μακριά από την κρούση). Ως αποτέλεσμα, η τοπική πυκνότητα του υλικού μειώνεται, οδηγώντας έτσι σε μείωση της αντίστασης στην εσοχή. Σε αντίθεση με τις συμβατικές κατασκευές, υπάρχει μια ροή του υλικού προς τα μέσα (προς τη ζώνη κρούσης) στις αυξητικές κατασκευές. Έτσι, η τοπική πύκνωση λόγω ροής προς τα μέσα του υλικού ενισχύει την αντίσταση εσοχής των αυξητικών [438-441]. Επιπλέον, η αντίσταση στην είσοδο ενός αυξητικού εξαρτάται από τη γεωμετρική σχεδίαση της μονάδας κυψέλης του [442]. Οι μηχανισμοί αντίστασης εσοχής σε αυξητικές και μη αυξητικές δομές παρουσιάζονται στην εικόνα 6.5.



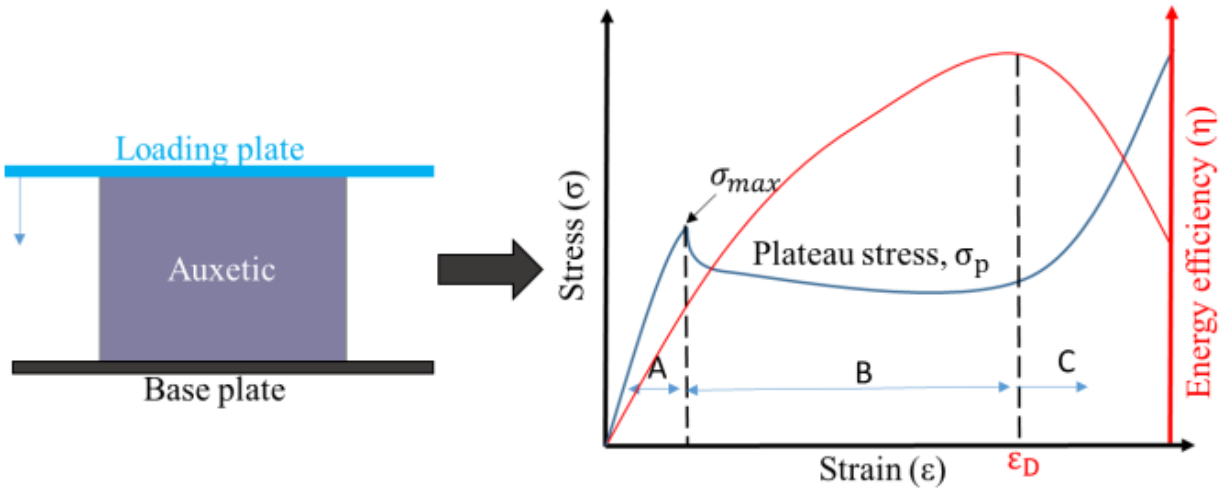
Εικόνα 6.5 Αντίσταση στην είσοδο ξένου σώματος αυξητικής και μη-αυξητικής δομής [443]

Η υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των αυξητικών μεταϋλικών είναι ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό [444,445], το οποίο έχει ύψιστη σημασία στην προστατευτική εφαρμογή. Επιπλέον, οι αυξητικές δομές είναι γνωστό ότι παρουσιάζουν ενισχυμένη αντοχή σε θραύση [374,446]. Παράλληλα, η εξασθένηση από υπερήχους [447], η τάση για συγκλαστικές επιφάνειες [438,439], η μεταβλητή διαπερατότητα [448] και ο έλεγχος των κραδασμών [449] είναι μερικά από

τα άλλα ευεργετικά χαρακτηριστικά των αυξητικών μεταϋλικών. Προσαρμόζοντας αυτές τις ιδιότητες μέσω διαφορετικών εσωτερικών αρχιτεκτονικών, τα αυξητικά μεταϋλικά έχουν αξιοποιηθεί σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των προστατευτικών συσκευών [450–453], αισθητήρων [454], υφασμάτων [455], συνδετήρων [456] και βιοϊατρικών συσκευών [457].

6.1.3 Προστατευτικά χαρακτηριστικά

Οι ημί- στατικές και δυναμικές δοκιμές συμπίεσης είναι απλές αλλά θεμελιώδεις μέθοδοι για την αξιολόγηση της προστατευτικής απόδοσης κυψελωτών υλικών, συμπεριλαμβανομένων των αυξητικών. Με βάση τη σχέση μηχανικής τάσης-παραμόρφωσης μιας αυξητικής δομής, μπορούν να αξιολογηθούν οι πιθανές εφαρμογές στην προστασία από εκρήξεις και κρούσεις. Μια τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μιας κυψελοειδούς δομής φαίνεται στην εικόνα 6.6. Γενικά, οι κυτταρικές δομές εμφανίζουν τρεις φάσεις, γραμμική (ζώνη A), οροπέδιού (ζώνη B) και συμπύκνωσης (ζώνη C), κάτω από μονοαξονικό συμπιεστικό φορτίο [458.459]. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απορροφάται από την κυτταρική δομή. Χάρη στον αντίθετο μηχανισμό παραμόρφωσης, οι αυξητικές δομές τραβούν υλικό από τις πλευρές προς το σημείο φόρτισης και χρησιμοποιούν περισσότερη παραμόρφωση υλικού, οδηγώντας σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας. Επιπλέον, η συγκέντρωση υλικού κάτω από τη ζώνη πρόσκρουσης ενισχύει την τοπική ακαμψία στην αυξητική δομή.



Εικόνα 6.6 Αξιολόγηση προστατευτικής απόδοσης με βάση τη δοκιμή συμπίεσης

Για να επιτευχθεί αποτελεσματική προστατευτική απόδοση, είναι επιθυμητό να διατηρηθεί μια χαμηλή τιμή μέγιστης ελαστικής τάσης (σ_{max}), έτσι ώστε ένα μικρό πρώιμο μέγεθος δύναμης να

μεταδίδεται στην προστατευμένη κατασκευή. Προτιμάται μια μακρύτερη ζώνη οροπεδίου με υψηλότερη τιμή έναρξης της παραμόρφωσης πυκνότητας (εD) για να επιτρέπει την απορρόφηση πλαστικής ενέργειας με σταθερό επίπεδο τάσης στο αυξητικό υλικό και στην προστατευμένη κατασκευή. Κατά την έναρξη του στελέχους συμπύκνωσης, η αλληλεπίδραση του κυτταρικού τοιχώματος ξεκινά στην κυτταρική δομή, η οποία αυξάνει τα επίπεδα τάσης γρήγορα. Ως εκ τούτου, η έναρξη της τάσης συμπύκνωσης θεωρείται ως το όριο για την πρακτική απορρόφηση ενέργειας. Επιπλέον, είναι κοινή πρακτική η ομαλοποίηση της απορρόφησης ενέργειας με μάζα για να επιτρέπεται η ίση σύγκριση άλλων σχεδίων ή υλικών διαφορετικής μάζας/σχετικής πυκνότητας. Η κανονικοποιημένη απορρόφηση ενέργειας σε σχέση με τη μάζα ονομάζεται ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific Energy Absorption - SEA).

Ένας αριθμός προσεγγίσεων έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της έναρξης του σημείου συμπύκνωσης των κυτταρικών δομών, συμπεριλαμβανομένων των αυξητικών. Οι Vural και Ravichandran [460] όρισαν την έναρξη της τάσης πυκνοποίησης ως την τάση στο τελευταίο τοπικό ελάχιστο της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης πριν η τάση αρχίσει να αυξάνεται απότομα. Οι Chan και Xie [461] θεώρησαν την παραμόρφωση στην οποία η κλίση της εφαπτομένης είναι ίση με αυτή της ελαστικής περιοχής ως έναρξη της τάσης πυκνοποίησης. Ομοίως, το σημείο τομής των εφαπτομένων στο καθεστώς τάσης και συμπύκνωσης του οροπεδίου λήφθηκε επίσης ως έναρξη της παραμόρφωσης συμπύκνωσης [462,463]. Ωστόσο, πολλές αβεβαιότητες, όπως ο προσδιορισμός της τέλειας εφαπτομένης, της κλίσης ή της τοπικής ελάχιστης τιμής, υπάρχουν με αυτές τις μεθόδους. Ως εκ τούτου, η έννοια της μεθόδου ενεργειακής απόδοσης, η οποία περιλαμβάνει λιγότερες αβεβαιότητες, χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της έναρξης της πύκνωσης των κυτταρικών δομών, συμπεριλαμβανομένων των αυξητικών.

Η έναρξη της τάσης συμπύκνωσης προσδιορίζεται με βάση την ενεργειακή απόδοση (η), η οποία είναι ο λόγος της απορρόφησης ενέργειας προς την αξονική τάση σε μια συγκεκριμένη αξονική τάση [464,465].

Η αξιολόγηση της προστατευτικής απόδοσης αυξητικών μεταϋλικών μέσω της συμπεριφοράς θλιπτικής τάσης-καταπόνησης δεν ισχύει μόνο για εφαρμογές προστασίας από εκρήξεις και κρούσεις, αλλά και σε άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής σε πρόσκρουση [466,467], του εξοπλισμού ασφαλείας στον αθλητισμό [364,468]

6.1.4 Απορρόφηση Ενέργειας

Παρόμοια με τα συμβατικά κυψελωτά υλικά και δομές, τα αυξητικά διαθέτουν ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο μονάδων κυψελών μέσα στη δομή του όγκου. Τα κελιά αυξητικής μονάδας έχουν σχεδιαστεί με διάφορες γεωμετρικές διαμορφώσεις των τοιχωμάτων των κυψελών. Κάτω από τη δράση ενός εξωτερικού φορτίου, τα τοιχώματα των κελιών υφίστανται παραμόρφωση μέσω διαφορετικών μηχανισμών (όπως λυγισμό [428,469,470], κάμψη και εφελκυσμό [403,471-474] και άκαμπτη περιστροφή [402,475,476]). Η απορρόφηση ενέργειας συμβαίνει σε αυξητικές δομές κυρίως λόγω του μηχανισμού παραμόρφωσης του τοιχώματος των κελιών και του επακόλουθου σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης στο τοίχωμα. Επομένως, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των αυξητικών δομών ποικίλλει ανάλογα με την αρχιτεκτονική της συστατικής μονάδας κυψέλης. Επιπλέον, λόγω του υψηλότερου πορώδους στην αυξητική δομή, οι αυξητικές δομές είναι χαμηλής μάζας που οδηγούν σε υψηλότερη ειδική απορρόφηση ενέργειας. Περαιτέρω, προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι οι ικανότητες απορρόφησης ενέργειας των αυξητικών δομών είναι υψηλότερες από τις ισοδύναμες συμβατικές κυτταρικές δομές [444,477].

Όταν λειτουργούν ως κατασκευές απορρόφησης ενέργειας (για παράδειγμα, θωράκιση κατά της έκρηξης [478], προφυλακτήρας οχήματος [479], ασπίδα κατά της πρόσκρουσης [480] και προστατευτικό κράνος [481]), απαιτούνται αυξητικές δομές για να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις. Έτσι, για να εκτιμηθεί η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, οι αυξητικές δομές υποβάλλονται σε ημί- στατική και δυναμική αξονική συμπίεση μέχρι μια μεγάλη αξονική τάση (γενικά, έως ότου η κυτταρική δομή συμπυκνωθεί σε στερεό). Μια πληθώρα μελετών σε διάφορα αυξητικά σχέδια έχει διερευνήσει τη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας διαφόρων αυξητικών δομών υπό μεγάλη παραμόρφωση μέσω πειραματικών, αριθμητικών και αναλυτικών μεθόδων [65,70]. Για παράδειγμα, οι Gao και Liao [482] διερεύνησαν τον μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας ενός σωλήνα λεπτού τοιχώματος γεμάτου με διπλή αιχμή βέλους μέσω πειραματικών, αριθμητικών και αναλυτικών μεθόδων. Οι Linforth et al. [402] μελέτησαν την απόδοση απορρόφησης ενέργειας ενός άκαμπτου περιστροφικού αυξητικού μέσω ημί- στατικών και δυναμικών πειραμάτων. Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας μιας τροποποιημένης αυξητικής κυψέλης επανεισόδου μελετήθηκαν από τους Choudhry et al. [483] μέσω πειραμάτων και αριθμητικών προσομοιώσεων. Οι Han et al. [484] διερεύνησαν τις ιδιότητες απορρόφησης ενέργειας ενός αυξητικού σχεδιασμού που βασίζεται στην ελλειπτική διάτρητη πλάκα μέσω πειραματικών και αριθμητικών προσεγγίσεων. Ομοίως, οι Teng et al. [485] μελέτησαν τη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας ενός τρισδιάστατου αυξητικού πλέγματος επανεισόδου χρησιμοποιώντας πειραματικές και αριθμητικές προσεγγίσεις. Οι

Bohara et al. [427] μελέτησαν τη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας τριών νέων αυξητικών δομών (που ονομάζονται δομή κλεψύδρας, δομή εγκάρσιου πετάλου και δομή εγκάρσιου πέταλου με οπές) μέσω αριθμητικής μοντελοποίησης. Μια λεπτομερής ανασκόπηση σχετικά με τις μεγάλες παραμορφώσεις και την απορρόφηση ενέργειας αυξητικών κατασκευών υπό ημί- στατικό και δυναμικό θλιπτικό φορτίο συζητείται από τους Zhang et al. [365] και Francisco et al. [370].

Καθώς η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ποσοτικοποιεί την απορρόφηση ενέργειας, έχουν επίσης αναπτυχθεί αυξητικές δομές με πολλαπλά επίπεδα τάσης οροπεδίου για να ενισχύσουν τις ικανότητες απορρόφησης ενέργειας [486-489]. Λαμβάνοντας υπόψη τις πολυλειτουργικές εφαρμογές, οι Jiang et al. [487] μελέτησαν τη συμπεριφορά δύο οροπέδων μιας επανεισόδου αυξητικής κυψέλης. Οι Hao et al. [486] ανέπτυξαν ελαφριά ελλειπτική διάτρητη δομή με τη διπλή πλατφόρμα. Οι An et al. [488] μελέτησαν την απόκριση σύνθλιψης στο επίπεδο και την απορρόφηση ενέργειας μιας αμφίδρομης κυψέλης επανεισόδου. Βελτίωση στην απορρόφηση ενέργειας αναφέρθηκε στις αυξητικές δομές με τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης διπλού οροπεδίου.

Εκτός από τις εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας σε σενάρια μεγάλων παραμορφώσεων, οι αυξητικές κατασκευές έχουν δείξει δυνατότητα για σεισμικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της απομόνωσης κραδασμών και της απόσβεσης [490-492]. Οι Zhang et al. [492] σχεδίασαν και δοκίμασαν ένα νέο στήριγμα που συγκρατείται με λυγισμό με έναν αυξητικό πυρήνα υπό κυκλική φόρτιση. Ένα σεισμικό αυξητικό μεταϋλικό για την εξασθένηση των σεισμικών κυμάτων διερευνήθηκε από τους Huang et al. [491]. Τέλος, οι αυξητικές κατασκευές βρέθηκαν να είναι ευεργετικές σε συσκευές απόσβεσης για τον μετριασμό των σεισμικών επιπτώσεων [491,492].

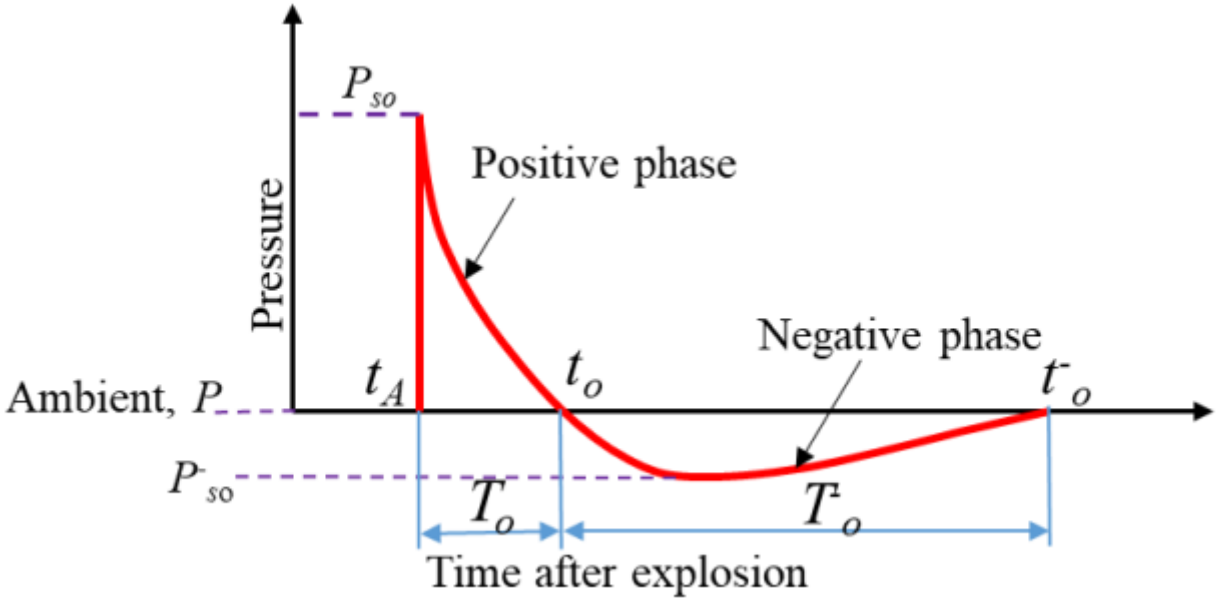
6.2 Επισκόπηση των εκρηκτικών και των βαλλιστικών φορτίων

Τα εκρηκτικά και τα βαλλιστικά φορτία είναι μικρής διάρκειας, φορτία ώθησης που εφαρμόζονται σε κατασκευές. Τα εκρηκτικά φορτία προκύπτουν από μια έκρηξη, η οποία μπορεί να είναι φυσική, χημική ή πυρηνική έκρηξη [493]. Από την άλλη πλευρά, τα βαλλιστικά φορτία αντιπροσωπεύουν υψηλής ταχύτητας, εντοπισμένη πρόσκρουση με μια προωστική πηγή, όπως η πρόσκρουση βλήματος [494]. Η μάζα πρόσκρουσης στις κατασκευές μπορεί επίσης να απελευθερωθεί σκόπιμα από τους τρομοκράτες με/χωρίς εκρηκτικά σχηματιζόμενα βλήματα [495] ή μερικές φορές φυσικά σχηματισμένα βλήματα, όπως πυραύλους που δημιουργούνται από ανεμοστρόβιλο [496]. Επιπλέον, τα συντρίμμια του διαδρόμου απογείωσης [497], τα θραύσματα που προκαλούνται από έκρηξη [498] και τα χτυπήματα πτηνών σε αεροσκάφη [499] είναι μερικές από τις λιγότερο συμβατικές πηγές φορτίων κρούσης. Τα αποτελέσματα της βαλλιστικής φόρτισης κρούσης σε μια κατασκευή

εξαρτώνται από τις ιδιότητες της κατασκευής (συμπεριλαμβανομένου του υλικού) και τις παραμέτρους του βλήματος (ακαμψία, σχήμα και μάζα) [500,501].

Όταν ένα ισχυρό εκρηκτικό εκρήγνυται ή με χαμηλή έκρηξη αναφλέγεται, μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας απελευθερώνεται αυθόρμητα με την παραγωγή θερμών αερίων, οδηγώντας σε συμπίεση στον περιβάλλοντα αέρα [502,503]. Αυτό το κύμα πεπιεσμένου αέρα, ή το κύμα έκρηξης, διαθέτει κρουστικό κύμα υψηλής πίεσης και άνεμο υψηλής ταχύτητας που κινείται πίσω από το μέτωπο κρούσης. Το κρουστικό κύμα ασκεί υψηλή πίεση και ώθηση στη δομή. Το μέγεθος του φορτίου έκρηξης εξαρτάται κυρίως από το βάρος φορτίου και την απόσταση μεταξύ φορτίου και κατασκευής. Έτσι, μια κλιμακούμενη απόσταση (Z), ο λόγος της απόστασης ακινητοποίησης προς την κυβική ρίζα του ισοδύναμου βάρους φορτίου TNT, χρησιμοποιείται ευρέως για τον καθορισμό των φορτίων εκτόξευσης [306,493].

Το φορτίο έκρηξης στη δομή είναι γρήγορο και στιγμιαίο, το οποίο διαρκεί εντός του εύρους χιλιοστών του δευτερολέπτου. Ένα τυπικό ιστορικό πίεσης-χρόνου έκρηξης σε μια κατασκευή σε απόσταση ακινητοποίησης φαίνεται στην εικόνα 6.7. Τη στιγμή t_A (χρόνος άφιξης) μετά την έκρηξη, το κύμα έκρηξης φτάνει στη δομή. Πρώτον, μια δομή υπόκειται στη θετική υπερπίεση κορυφής (P_{so}), η οποία διασπάται εκθετικά στην πίεση περιβάλλοντος σε χρόνο T_o (διάρκεια θετικής φάσης). Στη συνέχεια, η κατασκευή βιώνει αναρρόφηση για μια περίοδο T^-_o (διάρκεια αρνητικής φάσης) με την κορυφαία αρνητική υπερπίεση του P^-_{so}, η οποία είναι κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση. Μετά το χρόνο $T_o + T^-_o$, μόνο η πίεση περιβάλλοντος παραμένει στη δομή [504]. Δεδομένου ότι το P_{so} είναι πολύ υψηλότερο από το P^-_{so}, οι δομές σχεδιάζονται για το Pso και τα αποτελέσματα του P^-_{so} συνήθως αγνοούνται.



Εικόνα 6.7 Ιστορικό χρόνου πίεσης έκρηξης [505]

Ανάλογα με την απόσταση ακινητοποίησης και το βάρος φόρτισης, τα φορτία έκρηξης μπορούν να ταξινομηθούν ως εκρήξεις κοντινού ή μακρινού πεδίου. Είναι γνωστό ότι οι εκρήξεις σε κοντινό και μακρινό πεδίο ασκούν τοπικά και κατανεμημένα φορτία στη δομή, αντίστοιχα [335]. Όσον αφορά τον προσδιορισμό του τύπου φορτίου έκρηξης, το UFC 3-340-02 [506] θεωρεί τα φορτία εκτόξευσης με κλίμακα μεγαλύτερη από 0,4 m/kg$^{1/3}$ ως εκρήξεις σε μακρινό πεδίο.

6.3 Υλικό, κατασκευή και μέθοδος έρευνας για διερεύνηση εκρηκτικής και βαλλιστικής φόρτισης σε αυξητικά

6.3.1 Υλικό, μέθοδος και δομή

Καθώς οι αυξητικές δομές παρουσιάζουν αρκετές ανώτερες προστατευτικές ιδιότητες, όπως υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, βελτιωμένη αντίσταση εισόδου και ενισχυμένη αντοχή στη διάτμηση, αρκετοί ερευνητές έχουν διερευνήσει την απόδοση των αυξητικών μεταϋλικών υπό εκρηκτικές και βαλλιστικές φορτίσεις. Οι αυξητικές δομές χρησιμοποιούνται στον πυρήνα των δομών σάντουιτς υψηλής απόδοσης για δυναμική απορρόφηση ενέργειας. Σε τέτοιες προστατευτικές δομές, οι πλάκες σάντουιτς όχι μόνο ενισχύουν την καμπτική ακαμψία του πάνελ σάντουιτς αλλά επίσης αποτρέπουν την τοπική αστοχία του αυξητικού πυρήνα. Επιπλέον, η μπροστινή πλάκα βοηθά στην ομοιόμορφη κατανομή του εφαρμοζόμενου δυναμικού φορτίου στον πυρήνα, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας και μείωση της μετάδοσης δύναμης στην προστατευμένη κατασκευή. Η πλειονότητα της έρευνας βρέθηκε να διεξάγεται σε συμβατικές αυξητικές δομές

επανεισόδου και αιχμής βέλους ως τον πυρήνα των προστατευτικών πάνελ σάντουιτς [507-533].

Η υψηλή ολκιμότητα, η ανώτερη SEA και η ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης είναι τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των συστατικών υλικών για ελαφριές, υψηλής απόδοσης θυσιαζόμενες προστατευτικές δομές. Οι μηχανικές ιδιότητες, όπως η πυκνότητα, ο λόγος Poisson (PR), το μέτρο ελαστικότητας (E) και η αντοχή διαρροής, των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων βασικών υλικών για αυξητικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται σε αμυντικές κατασκευές παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Όντας ελαφρά, όλκιμα, εμφανίζοντας ένα τυπικό ελαστικό πλαστικό απόκρισης και ανθεκτικά στη διάβρωση, τα κράματα αλουμινίου βρέθηκε ότι είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά μήτρας για αυξητικές κατασκευές. Εκτός από τα κράματα αλουμινίου, ο χάλυβας και άλλα διαφορετικά κράματα υιοθετούνται επίσης ευρέως σε πυρήνες προστατευτικών πάνελ σάντουιτς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντοχή των μεταλλικών κραμάτων ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση (βλ. Πίνακα 6.1). Επιπλέον, οι αντοχές της πλειονότητας των κραμάτων χάλυβα και αλουμινίου είναι υψηλότερες υπό δυναμικό φορτίο από ότι υπό στατικό φορτίο, όπως υποδεικνύεται από την ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσής τους. Για να αξιοποιηθεί πλήρως η απόδοση του αυξητικού πυρήνα, οι πλάκες όψεων πρέπει να είναι αρκετά ισχυρές ώστε να κατανέμουν το φορτίο και να υποστηρίζουν τον πυρήνα από το πίσω μέρος. Έτσι, υλικά με υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος προτιμώνται ως φύλλα όψεως και η πλάκα κάλυψης. Επομένως, ποικιλίες χάλυβα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα υψηλής αντοχής (HSS) [513,524], του βαλλιστικού χάλυβα [514] και του ανοξείδωτου χάλυβα (SS) [510], βρέθηκε ότι χρησιμοποιούνται ευρέως. Επιπλέον, η χρήση του ίδιου υλικού (όπως στον πυρήνα) για τις πλάκες όψεως είναι επίσης κοινή λόγω της ευκολίας στην κατασκευή και τη μοντελοποίηση.

Περιορισμένη πειραματική έρευνα βρέθηκε να διεξαχθεί για να εξεταστεί η προστατευτική απόδοση των αυξητικών κατασκευών από εκρήξεις και βαλλιστικά φορτία. Οι μεγάλης κλίμακας περιορισμοί κατασκευής αυξητικών κατασκευών και η πολυπλοκότητα της διεξαγωγής πειραμάτων ανατινάξεων και βαλλιστικών κρούσεων είναι τα κύρια εμπόδια στις πειραματικές εργασίες. Ως εκ τούτου, οι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης, όπως LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN, ANSYS, κ.λπ. χρησιμοποιούνται συνήθως για την εξέταση της απόδοσης σε εκρήξεις και της βαλλιστικής απόδοσης αυξητικών κατασκευών. Οι επιτόπιες δοκιμές έκρηξης έχουν διεξαχθεί μόνο σε αυξητικές κατασκευές επανεισόδου και αιχμής βέλους. Επιπλέον, οι επιτόπιες δοκιμές έκρηξης περιορίζονται εντός του καθεστώτος φόρτισης εκρήξεων από κοντά.

Πίνακας 6.1 Μηχανικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυξητικές κατασκευές

	Υλικό	Πυκνότητα (kg/m^3)	Λόγος Poisson	E (GPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Αναφορές
Αλουμίνιο	AA6061	2710	0.33	40.3	114	[513]
	AL-2024	2680	0.33	72	75.8	[518,534]
	Al-3104-H19	2720	0.34	69	262	[518,534]
	Al-7075-T6	2810	0.33	71.7	546	[535,536]
	Al-6061-T6	2703	0.33	69	324	[535]
	Al-6063-T4	2703	0.33	68.9	89.6	[535]
	AA 5005-H34	2700	0.33	55	112	[529]
	AA 5083-H116	2750	0.3	70	215	[510,530]
Χάλυβας	SS	7900	0.3	200	10	[510,520,537,538]
	Κράμα SS	7850	0.35	161	400	[515,539]
	HSLA-65	7800	0.3	200	390	[509,540]
	HSS	7850	0.3	223	789	[513]

6.3.2 Κατασκευή αυξητικών δομών

Για την αποτελεσματική αξιολόγηση της προστατευτικής απόδοσης και την εφαρμογή των σχεδιασμένων αυξητικών κατασκευών ως προστατευτικής θωράκισης, είναι σημαντικό να κατασκευάζονται αποτελεσματικά. Ωστόσο, λόγω των πολύπλοκων αρχιτεκτονικών μονάδων κυψελών των αυξητικών σχεδίων, η κατασκευή είναι μια πρόκληση. Ως εκ τούτου, αυτή η ενότητα παρουσιάζει επισκόπηση των διαφόρων τεχνικών αυξητικής κατασκευής και τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τους περιορισμούς τους.

6.3.2.1 Προσθετική κατασκευή

Η πρόσφατη πρόοδος στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής οδήγησε σε αυξημένη ευελιξία στο σχεδιασμό λόγω της ικανότητάς της να κατασκευάζει πολύπλοκες δομές με ελάχιστη απώλεια υλικού [241]. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι πολύ κατάλληλη για χρήση για την κατασκευή σύνθετων αυξητικών τοπολογιών. Ένας αριθμός προσθετικής μεθόδων πρόσθετων έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια [542]. Οι κύριες μέθοδοι παραγωγής πρόσθετων είναι: μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM), σύντηξη κλίνης πούδρας (PBF), Εκτύπωση inkjet

και κατασκευή περιγράμματος, στερεοσκοπική λιθογραφία (SLA), άμεση εναπόθεση ενέργειας (DED), κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων (LOM) [541]. Ανάλογα με το υλικό και την επιθυμητή ανάλυση του δείγματος, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι προσθετικής κατασκευής για την κατασκευή αυξητικών δομών. Μια λεπτομερής ανασκόπηση σχετικά με την εφαρμογή τεχνικών παραγωγής πρόσθετων στην κατασκευή αυξητικής δομής αναφέρεται στους Joseph et al. [369].

Το FDM εφαρμόζεται σε θερμοπλαστικά υλικά [543]. Σε αυτή τη μέθοδο, το νήμα του θερμοπλαστικού υλικού θερμαίνεται στο ακροφύσιο του εκτυπωτή μέχρι ημι-λιωμένης κατάστασης. Το ημι-λιωμένο υλικό εξωθείται στην πλατφόρμα εκτύπωσης ή στις προηγουμένως εκτυπωμένες στρώσεις για να συγχωνευθούν μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος έχει ευρέως υιοθετηθεί για την κατασκευή μικρής κλίμακας αυξητικών δειγμάτων από θερμοπλαστικά υλικά όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) [398,544,545], το ABS [246,247] και το νάιλον [548,549]. Αν και οι μεταλλικές αυξητικές κατασκευές θεωρούνταν ως επί το πλείστον ότι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές προστασίας του πραγματικού κόσμου, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα κατασκευασμένα από FDM για την επαλήθευση του σχεδιασμένου αυξητικού μηχανισμού και την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Επιπλέον, μια δοκιμή κρούσης χαμηλής ταχύτητας σε τυπωμένο με FDM αυξητικό δείγμα βρέθηκε επίσης στους Usta et al. [550]

Στο PBF, λεπτές στρώσεις λεπτής σκόνης του υλικού απλώνονται και συσκευάζονται σε μια πλατφόρμα. Για τη σύντηξη των στρωμάτων σκόνης, χρησιμοποιείται δέσμη λέιζερ ή συνδετικό υλικό. Ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού, μπορούν να υιοθετηθούν επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση λέιζερ (SLS) και επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM). Το SLM εφαρμόζεται κυρίως σε μεταλλικά υλικά όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και τα κράματά τους [388,551,552]. Σε αντίθεση με το SLM, το SLS είναι κατάλληλο για διαφορετικά πολυμερή, μέταλλα και κράματα. Οι Xiao et al. [519] και οι Ying et al. [522] κατασκεύασαν επίπεδους και καμπυλωτούς επαναεισφερόμενους αυξητικούς πυρήνες με σκόνη κράματος αλουμινίου χρησιμοποιώντας SLM, αντίστοιχα. Τα κατασκευασμένα δείγματα υποβλήθηκαν σε βαλλιστική κρούση.

Η μέθοδος εκτύπωσης inkjet αντλεί και εναποθέτει το υγρό υλικό ή το εναιώρημα στρώμα-στρώμα, το οποίο στερεοποιείται μαζί, αποκτώντας επαρκή αντοχή για να στηρίζεται. Τα μελάνια με βάση το κερί και τα υγρά εναιωρήματα είναι οι κύριοι τύποι μελανιών που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την πρόσθετη κατασκευή πολύπλοκων και προηγμένων κεραμικών υλικών [553]. Η μέθοδος PolyJet έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αυξητικών δομών από διαφορετικά πολυμερή [554,555].

Το SLA, μια από τις παλαιότερες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, χρησιμοποιεί τη φωτοχημική διαδικασία για την εκτύπωση του υλικού [556]. Σε αυτή τη μέθοδο, το υπεριώδες φως ή μια δέσμη ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται για να προκαλέσει μια αλυσιδωτή αντίδραση στο στρώμα της ρητίνης ή του διαλύματος μονομερούς. Οι Pandini et al. [557] κατασκεύασαν μια αυξητική δομή με ελεγχόμενη αλλαγή σχήματος από ένα εμπορικό φωτοπολυμερές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SLA.

Στη μέθοδο DED, μια πηγή ενέργειας (δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων) εστιάζεται άμεσα σε ένα μικρό μέρος του υλικού του υποστρώματος [558]. Η πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για την τήξη ενός υλικού πρώτης ύλης, το οποίο συντήκεται στο λιωμένο υπόστρωμα και στερεοποιείται μετά την αφαίρεση της πηγής ενέργειας. Οι Novak et al. [516,517,559] κατασκεύασαν χειρόμορφες αυξητικές δομές από κράμα Ti-6Al-4V και σκόνη χαλκού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τήξης επιλεκτικής δέσμης ηλεκτρονίων (SEBM).

Έτσι, μπορεί να παρατηρηθεί ότι έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές τεχνικές κατασκευής πρόσθετων για την κατασκευή διαφορετικών αυξητικών δομών. Ωστόσο, ένας περιορισμένος αριθμός δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με μεθόδους προσθετικής κατασκευής [519,522,550,565] χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της προστατευτικής απόδοσης των αυξητικών δομών. Τα περισσότερα από τα αυξητικά δείγματα που κατασκευάστηκαν με αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση αυξητικών μηχανισμών και μηχανικών ιδιοτήτων μέσω δοκιμών μονοαξονικής συμπίεσης. Επιπλέον, τα πειραματικά αποτελέσματα των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με αυτή τη μέθοδο βρέθηκε ότι χρησιμοποιούνται ευρέως στην επικύρωση υπολογιστικών μοντέλων.

Συνολικά, η προσθετική κατασκευή είναι εξαιρετικά επωφελής για την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων των πολύπλοκων αυξητικών σχεδίων με καλή ακρίβεια διαστάσεων και ελάχιστη σπατάλη. Από την άλλη πλευρά, η τρέχουσα τεχνολογία προσθετικής κατασκευής χαρακτηρίζεται από αρκετούς περιορισμούς (όπως το μέγεθος και ο χρόνος εκτύπωσης, η ποιότητα του προϊόντος, τα υλικά εκτύπωσης), γεγονός που παρεμποδίζει την κατασκευή μεγάλης κλίμακας αυξητικών κατασκευών. Επιπλέον, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές κατασκευάζουν ένα αντικείμενο στο ελεγχόμενο περιβάλλον ενός μικρού θαλάμου εκτύπωσης, το οποίο χρειάζεται περαιτέρω μεγέθυνση για κατασκευή μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, οι επιπτώσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων (θερμοκρασία και υγρασία) στην ποιότητα των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών απαιτείται να ελαχιστοποιηθούν για να ξεκινήσει η μεγάλης κλίμακας κατασκευή με χρήση μεθόδων προσθετικής παραγωγής.

6.3.2.2 Αφαιρετική κατασκευή

Η αφαιρετική κατασκευή είναι μια παραδοσιακή μέθοδος κατασκευής για την κατασκευή μιας

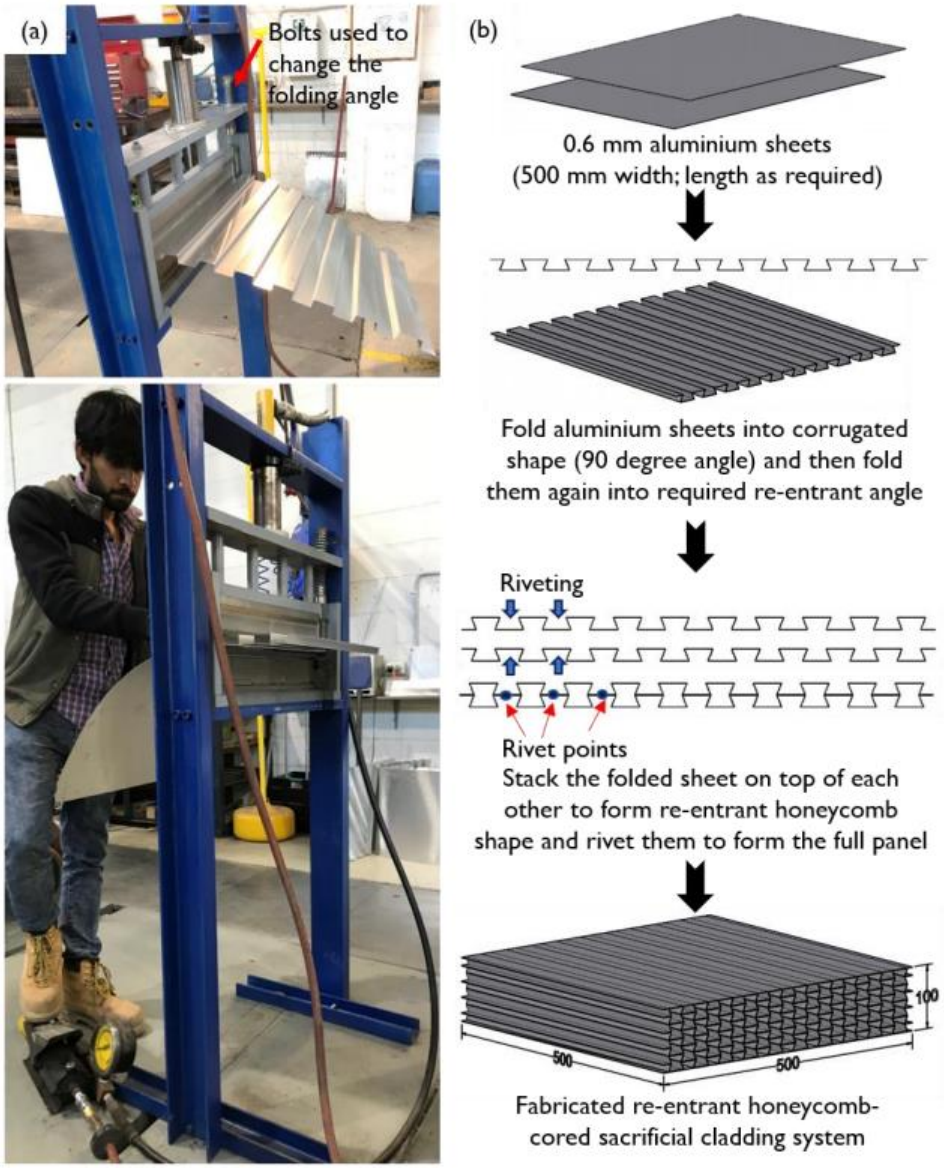
επιθυμητής τοπολογίας κόβοντας το υλικό χρησιμοποιώντας κοπή με λέιζερ, κοπή με πίδακα νερού ή δρομολόγηση CNC. Ως εκ τούτου, η αφαιρετική μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή διάτρητων αυξητικών κατασκευών. Οι Mizzi et al. [566] κατασκεύασαν δώδεκα διάτρητες αυξητικές γεωμετρίες χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κοπής με λέιζερ. Πρώτον, οι επαναλαμβανόμενες μονάδες στο επίπεδο παρήχθησαν από ένα φύλλο καουτσούκ 1 mm με την εισαγωγή κοπής λέιζερ 300 μm. Χρησιμοποιώντας τις ενδοεπίπεδες επαναλαμβανόμενες μονάδες, κατασκευάστηκαν διαφορετικές αυξητικές τοπολογίες με πάχος 6 έως 10 mm. Οι Taylor et al. [567] χρησιμοποίησαν μια μηχανή CNC μαζί με έναν μύλο καρβιδίου για να κατασκευάσουν μια διάτρητη αυξητική δομή από φύλλο αλουμινίου. Οι Carta et al. [568] κατασκεύασαν μια πορώδη αυξητική δομή από πολυανθρακικό φύλλο Lexan δημιουργώντας τους πόρους χρησιμοποιώντας μια αριθμητικά ελεγχόμενη μηχανή φρέζας 5 αξόνων. Η αφαιρετική προσέγγιση κατασκευής χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία από τους Linforth et al. [402] για την κατασκευή άκαμπτων περιστροφικών αυξητικών οβάλ δομών από υλικό αλουμινίου (Al6061-T651) με χρήση κοπής με λέιζερ. Όχι μόνο για τη διάτρητη αυξητική δομή, αλλά και η αφαιρετική μέθοδος κατασκευής έχει επίσης υιοθετηθεί για την κατασκευή άλλης γεωμετρίας. Για παράδειγμα, επαναεισερχόμενες αντι-χειρικές (μια υβριδική δομή) και αντι-χειρόμορφες αυξητικές κυψέλες κατασκευάστηκαν από πλάκα ABS με μεταγενέστερη τεχνολογία κοπής από τους Hu et al. [413.569].

Σε σύγκριση με την προσθετική κατασκευή, οι μέθοδοι κατασκευής με αφαίρεση μπορεί να απαιτούν περισσότερο υλικό και ενέργεια για την κατασκευή του ίδιου αντικειμένου [570]. Από τη θετική πλευρά, η αφαιρετική κατασκευή είναι γνωστό ότι παρουσιάζει καλύτερο έλεγχο διαστάσεων και φινίρισμα επιφάνειας. Επιπλέον, η αφαιρετική μέθοδος λειτουργεί με ένα ευρύ φάσμα υλικών και περιβαλλόντων. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της κατασκευής εξαρτάται σίγουρα από διαφορετικούς παράγοντες όπως η τοπολογία, το μέγεθος, το υλικό κ.λπ. του αντικειμένου που θα κατασκευαστεί. Για παράδειγμα, η μέθοδος κοπής με λέιζερ αναφέρθηκε ότι είναι μια αποτελεσματική, ταχεία και οικονομική μέθοδος κατασκευής για την κατασκευή ενός περιστρεφόμενου τετράγωνου αυξητικού στεντ [571]. Τέλος, η αφαιρετική κατασκευή είναι εξαιρετικά αποδοτική για την κατασκευή 2D διατρήσεων αυξητικών δομών.

6.3.2.3 Μέθοδοι δίπλωσης και κάμψης φύλλων

Οι αυξητικές κατασκευές επανεισόδου και αιχμής βέλους έχουν κατασκευαστεί σε μεγάλη κλίμακα με μεθόδους δίπλωσης και κάμψης φύλλων. Για την κατασκευή μιας δομής επανεισόδου, ένα μισό στρώμα της αυξητικής δομής με την επιθυμητή γωνία προετοιμάζεται πρώτα με το δίπλωμα ενός

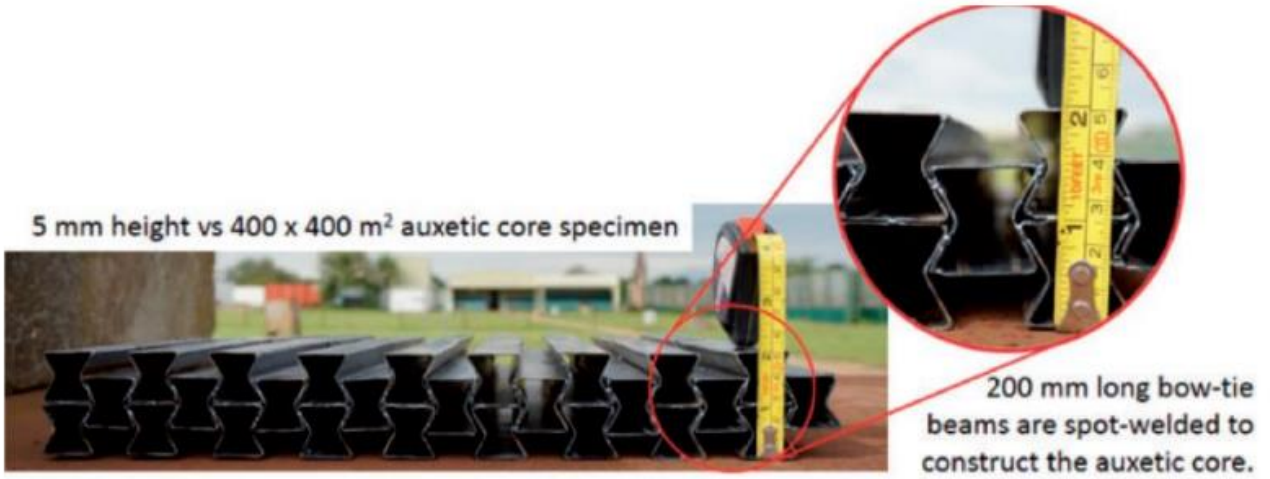
μεταλλικού φύλλου. Στη συνέχεια, τα διπλωμένα φύλλα συναρμολογούνται μεταξύ τους για να ληφθεί ένα πλήρες στρώμα κυψέλης μονάδας επανεισόδου. Για τη συναρμολόγηση των μισών στρώσεων, μπορούν να υιοθετηθούν διαφορετικές μέθοδοι (όπως κόλλες, πριτσίνια). Μια απεικόνιση της διαδικασίας χειροκίνητης κατασκευής μιας αυξητικής δομής επανεισόδου φαίνεται στην εικόνα 6.8.



Εικόνα 6.8 Διαδικασία χειροκίνητης κατασκευής αυξητικής δομής επανεισόδου [229]

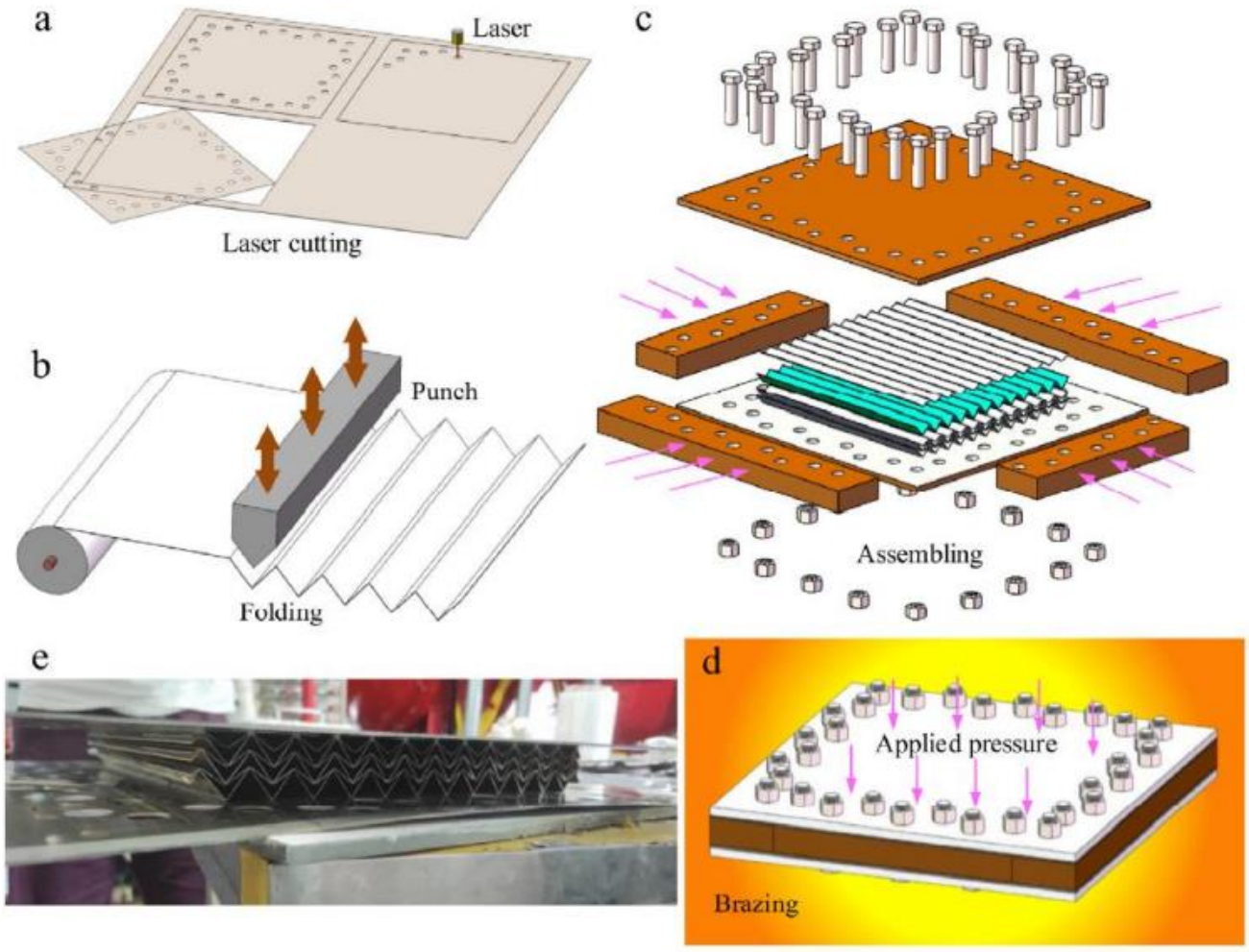
Μέθοδοι αναδίπλωσης και κάμψης φύλλων έχουν υιοθετηθεί σε όλες τις δοκιμές έκρηξης που πραγματοποιήθηκαν για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της αυξητικής δομής επανεισόδου ως προς την αντίσταση στην έκρηξη. Οι Qi et al. [513], Remennikov et al. [521], και Kalubadanage et al. [529] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο αναδίπλωσης φύλλων που εξηγήθηκε παραπάνω για να κατασκευάσουμε μεγάλης κλίμακας αυξητικές δομές επανεισόδου. Σε αντίθεση με τους

προαναφερθέντες ερευνητές, οι Arifurrahman et al. [523] λύγισαν ένα φύλλο χάλυβα σε μια δομή επανεισόδου (που ονομάζεται δοκός παπιγιόν). Στη συνέχεια, τα τεμάχια της δομής επανεισόδου συνδέθηκαν μεταξύ τους με συγκόλληση σημείου για να παραχθεί ένα πλήρες πάνελ. Ο αυξητικός πυρήνας επανεισόδου που κατασκευάστηκε από τους Arifurrahman et al. [523] φαίνεται στην εικ. 6.9.



Εικόνα 6.9 Αυξητικό πάνελ επανεισόδου που κατασκευάζεται με κάμψη και συγκόλληση φύλλου [523]

Οι Chen et al. [531] χρησιμοποίησαν μια συνδυασμένη τεχνική αναδίπλωσης φύλλου και συγκόλλησης υπό κενό για να κατασκευάσουν δεκατέσσερις μεγάλης κλίμακας αυξητικές δομές διπλής κεφαλής βέλους. Η διαδικασία που υιοθετήθηκε από τους Chen et al. Το [531] απεικονίζεται στην εικ. 6.10. Για την προετοιμασία του πυρήνα, πρώτα διπλώθηκαν φύλλα από ανοξείδωτο χάλυβα στις σχεδιασμένες γωνίες χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αναδίπλωσης CNC και κόπηκαν στο απαιτούμενο μέγεθος. Στη συνέχεια, τα πολυστρωματικά κυματοειδές φύλλα με δύο διαφορετικές γωνίες στοιβάχτηκαν μεταξύ τους για να ολοκληρωθεί ο αυξητικός πυρήνας. Κατά τη στοίβαξη του πυρήνα, οι κορυφογραμμές και οι κοιλάδες της αυλάκωσης επικαλύφθηκαν με πάστα μπρούντζο, Ni–Cr25-P10 (wt %). Μετά από αυτό, ο στοιβαγμένος πυρήνας τοποθετήθηκε ανάμεσα σε προετοιμασμένα φύλλα προσώπου με τρύπες μπουλονιών και προ-σφίχθηκε για να εξασφαλιστεί η στενή επαφή. Ολόκληρο το συγκρότημα συγκολλήθηκε σε κλίβανο σε θερμοκρασία και πίεση 1120 ℃ και 0,005 Pa, αντίστοιχα, για περίπου 2 ώρες



Εικόνα 6.10 Κατασκευή μεγάλης κλίμακας αυξητικής κεφαλής διπλού βέλους [531]

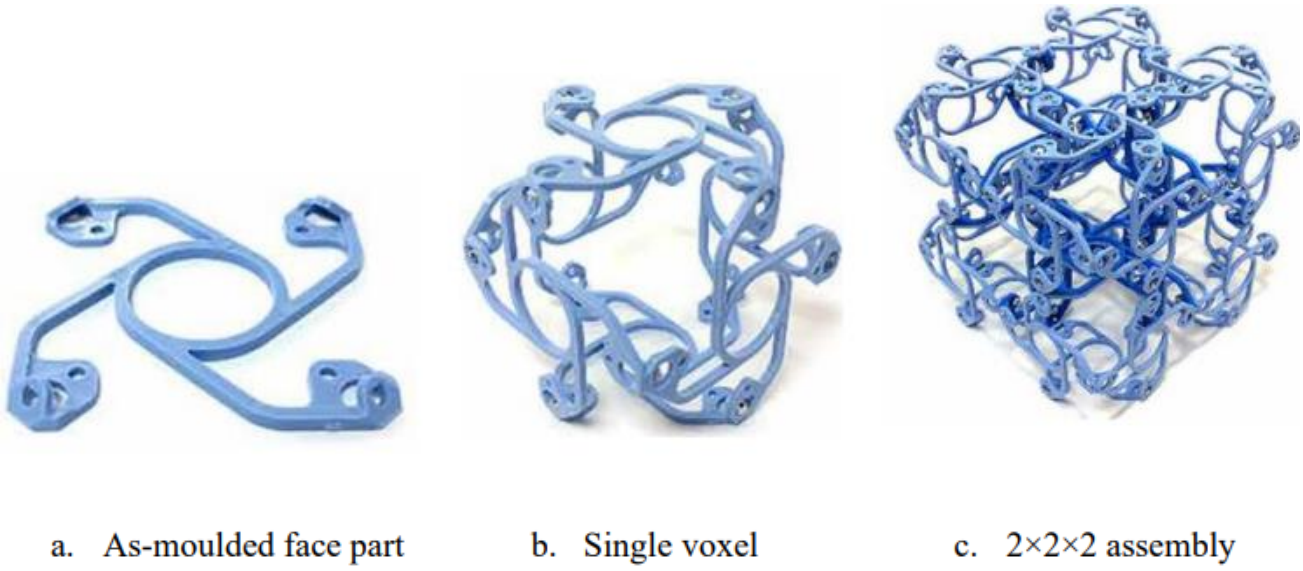
Αν και οι κατασκευασμένες αυξητικές δομές επανεισόδου που χρησιμοποιούν στρατηγικές δίπλωσης και κάμψης φύλλων μπόρεσαν να παρουσιάσουν αρνητική αναλογία Poisson, υπάρχουν περιορισμοί σχεδιασμού με αυτές τις μεθόδους. Κατά τη συναρμολόγηση του διπλωμένου μισού στρώματος των μοναδιαίων κυψελών, το πάχος του οριζόντιου τοιχώματος κυψέλης του επαναεισερχόμενου αυξητικού γίνεται διπλάσιο του πάχους του κεκλιμένου τοιχώματος κυψέλης. Ομοίως, η επικάλυψη των τοιχωμάτων κυψέλης για συγκόλληση για την παραγωγή πλήρους πλαισίου στην τεχνική κάμψης φύλλων διπλασιάζει το πάχος του τοιχώματος κυψέλης. Επιπλέον, οι Remennikov et al. [521] ανέφεραν ότι η επιλεγμένη κόλλα για να ενώσει τα δύο μισά στρώματα της μονάδας κυψέλης δεν μπόρεσε να γεμίσει σωστά τα κενά. Ως αποτέλεσμα, εκτός από τη δομική κόλλα, χρησιμοποιήθηκαν πριτσίνια για τη σύνδεση του μισού στρώματος των κυψελών αυξητικής μονάδας επανεισόδου από τους Remennikov et al. [521]. Από την άλλη πλευρά, για να επιτευχθεί καλύτερη σύνδεση μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων, οι Qi et al. [513] κράτησαν το δείγμα σφιχτά σε θερμοκρασία δωματίου για 12 ώρες.

Οι μέθοδοι συγκόλλησης υπό κενό εξάλειψαν την επικάλυψη και τον επακόλουθο διπλασιασμό του πάχους του τοιχώματος των κελιών στο αυξητικό αιχμής βέλους. Επιπλέον, ο αυξητικός πυρήνας διπλής αιχμής βέλους παρέμεινε σχεδόν άθικτος κάτω από την εφαρμοζόμενη φόρτιση έκρηξης. Ωστόσο, παρατηρήθηκε σημαντική αποκόλληση μεταξύ του πυρήνα και των φύλλων όψης στο δείγμα με συγκόλληση κενού [531]. Επιπλέον, καθώς η διαδικασία κατασκευής των κηρηθρών επηρεάζει τη μικροδομή των κόκκων των συστατικών φύλλων και την επακόλουθη υπολειμματική τάση, η απόδοση έκρηξης της αυξητικής δομής μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις μεθόδους κατασκευής [572]. Έτσι, η επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου κατασκευής είναι σημαντική για την πλήρη χρήση του αυξητικού μηχανισμού.

6.3.2.4 Διακριτή συναρμολόγηση

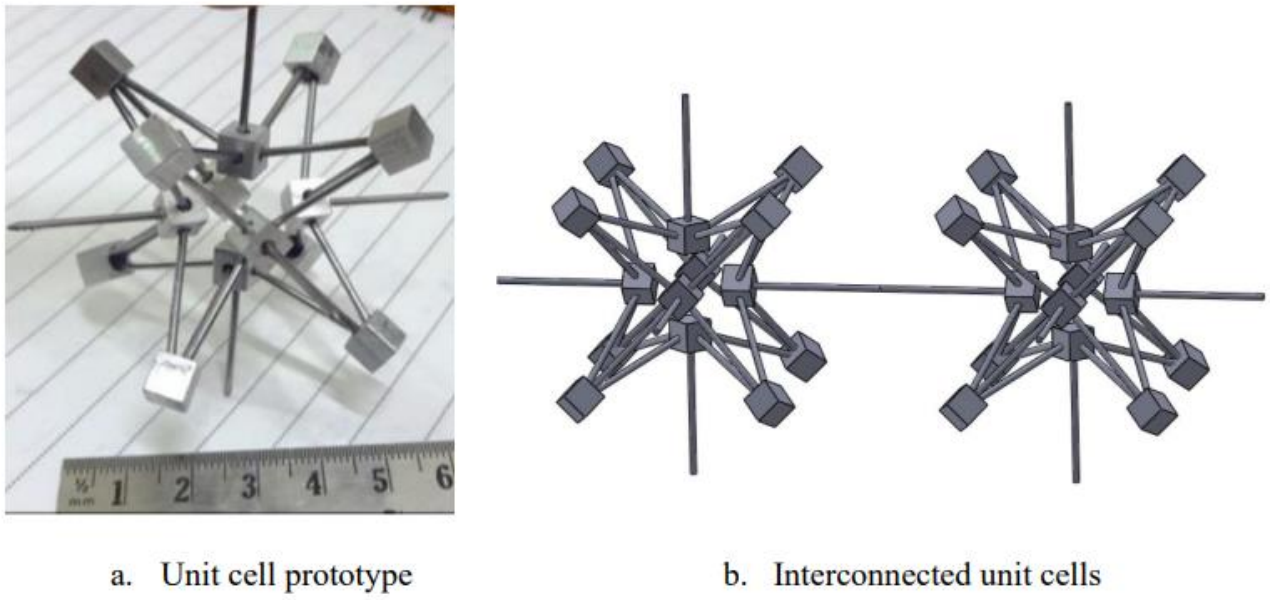
Οι Jenet et al. [573] πρότειναν μια μέθοδο για την κατασκευή μηχανικών μεταϋλικών μεγάλης κλίμακας, συμπεριλαμβανομένων των αυξητικών, με τη συναρμολόγηση ενός πεπερασμένου αριθμού διακριτών μερών. Δεδομένου ότι μεγαλύτερες κατασκευές μπορούν να κατασκευαστούν συναρμολογώντας μικρότερα διακριτά μέρη, αυτή η μέθοδος ξεπερνά σίγουρα τον περιορισμό κλίμακας των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Επιπλέον, η διακριτή μέθοδος συναρμολόγησης επιτρέπει επίσης την κατασκευή με υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος [573]. Αξίζει να αναφερθεί ότι μια παρόμοια μέθοδος αναστρέψιμης συναρμολόγησης αρθρωτών εξαρτημάτων βρέθηκε να υιοθετείται για την κατασκευή ενός κυψελωτού σύνθετου υλικού [574] και ενός υπερελαφρού πλέγματος [575]. Περαιτέρω, μια παρόμοια μέθοδος συναρμολόγησης αλληλασφάλισης χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μιας αυξητικής δομής επανεισόδου από τους Nasim et al. [576].

Στη μέθοδο της διακριτής συναρμολόγησης, τα μέρη της όψης, που διαθέτουν τις αρθρώσεις, χυτεύονται πρώτα. Στη συνέχεια, τα χυτευμένα μέρη συνδέονται στην ένωση για να σχηματίσουν ένα voxel, το οποίο τελικά συναρμολογείται σε μια μεγάλης κλίμακας δομή μεταϋλικού. Η διαδικασία σχηματισμού χειρόμορφων δομών απεικονίζεται στην εικ. 6.11. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το τμήμα της όψης που έχει καλουπωθεί έχει δύο τύπους αρμών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν μια δίνη και μια πλήρη δομή.



Εικόνα 6.11 Κατασκευή χειρόμορφης δομής χρησιμοποιώντας μέθοδο διακριτής συναρμολόγησης [573]

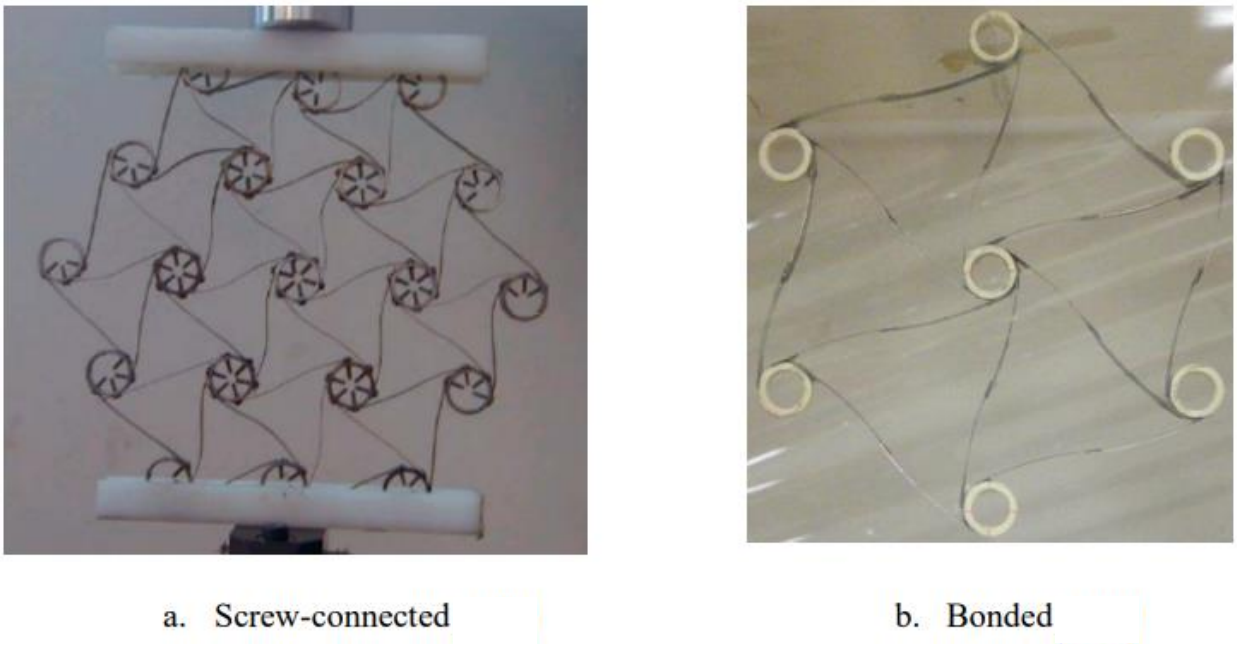
Οι Balaji et al. [577] πρότειναν μια μέθοδο συναρμολόγησης για τη μαζική κατασκευή τρισδιάστατων αυξητικών δομών χρησιμοποιώντας συμβατικές μηχανές. Οι χαλύβδινοι σύνδεσμοι συνδέθηκαν χρησιμοποιώντας κύβους αλουμινίου για να ληφθεί μια τρισδιάστατη δομή επανεισόδου. Το κατασκευασμένο φυσικό πρωτότυπο μιας μονάδας κυψέλης και διασυνδεδεμένων κυψελών μονάδας παρουσιάζονται στην εικ. 6.12. Αν και οι Balaji et al. [577] κατασκεύασαν με επιτυχία ένα φυσικό πρωτότυπο, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο κύβος αλουμινίου αύξησε τη μάζα και τη σχετική πυκνότητα της δομής. Επομένως, απαιτείται περαιτέρω βελτίωση του συστήματος σύνδεσης με αυτή τη μέθοδο.



Εικόνα 6.12 Απεικόνιση τρισδιάστατης αυξητικής μεθόδου κατασκευής [577]

Η μέθοδος συναρμολόγησης έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δισδιάστατων

χειρόμορφων αυξητικών δομών. Οι Hassan et al. [578] κατασκεύασαν μια χειρόμορφη κυψέλη χρησιμοποιώντας κορδέλα από κράμα μνήμης σχήματος ως σύνδεσμο και σωλήνα από μαλακό χάλυβα ως περιστρεφόμενο κόμβο. Χρησιμοποιήθηκαν μηχανικοί συνδετήρες (βίδες) για τη σύνδεση του συνδέσμου και του κόμβου εφαπτομενικά, όπως φαίνεται στην εικ. 6.13α. Παρομοίως, οι Ha et al. [579] χρησιμοποίησαν κολλημένους διμεταλλικούς ιμάντες σε πλαστικό σωλήνα από χλωριωμένο PVC για την κατασκευή της χειρόμορφης δομής κυψέλης (Εικ. 6.13β).



Εικόνα 6.13 Χειρικές κατασκευές κατασκευασμένες με μέθοδο συναρμολόγησης

Η διακριτή μέθοδος συναρμολόγησης εξάλειψε την απαίτηση μιας μεγάλης πλατφόρμας εκτύπωσης ή άλλων μηχανημάτων για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας αυξητικών κατασκευών. Ωστόσο, η επίτευξη συμπεριφοράς συνεχούς όγκου απαιτεί ένα στιβαρό σύστημα άρθρωσης. Η συγκέντρωση τάσεων κοντά στην περιοχή των αρμών μπορεί να είναι δυνατή σε μια διακριτά συναρμολογημένη αυξητική δομή.

6.3.2.5 Άλλες μέθοδοι

Η σύνθετη αρχιτεκτονική των αυξητικών μεταϋλικών μπορεί επίσης να κατασκευαστεί με την τεχνική χύτευσης καλουπιού. Σε αυτή τη μέθοδο, αρχικά παρασκευάζεται ένα καλούπι στο οποίο μια υγρή ή κολλοειδής κατάσταση υλικού (κυρίως ελαστομερή και σύνθετα υλικά) σκληρύνεται και στη συνέχεια ξεκαλουπώνεται για να ληφθεί η επιθυμητή αυξητική δομή. Οι Bertoldi et al. [580], Babaee et al. [581] και Lazarus et al. [582] υιοθέτησαν τη μέθοδο σχηματισμού καλουπιού για να κατασκευάσει διαφορετικές αυξητικές δομές με λάστιχα/ελαστομερή με βάση τη σιλικόνη. Ομοίως, οι Bettini et al.

[583], και Airoldi et al. [584] κατασκεύασαν χειρόμορφες αυξητικές δομές με σύνθετα υλικά χρησιμοποιώντας μεθόδους διαμόρφωσης καλουπιού. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν έχει βρεθεί ακόμη να χρησιμοποιείται για την κατασκευή αυξητικών κατασκευών σε μεγάλη κλίμακα για αμυντικές εφαρμογές.

Οι θερμομηχανικές διεργασίες (όπως η θερμή συμπίεση) είναι μια κοινή μέθοδος για την κατασκευή αυξητικών αφρού [374,585-587]. Ένα διαξονικά/τριαξονικά συμπιεσμένο αφρώδες υλικό σε ένα καλούπι θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία μαλακώματος και στη συνέχεια ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Με αυτόν τον τρόπο, οι αφροί ανοιχτής κυψέλης μετατρέπονται σε σχήμα επανεισόδου, οδηγώντας σε αυξητική συμπεριφορά. Η μέθοδος θερμής συμπίεσης έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αυξητικού αφρού διαφορετικών υλικών, συμπεριλαμβανομένης της πολυουρεθάνης [588], του χαλκού [589] και ούτω καθεξής. Η θερμομηχανική διαδικασία χρησιμοποιείται ευρέως στη μεγάλης κλίμακας κατασκευή συμβατικών αφρού. Η διαδικασία μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω για την κατασκευή αυξητικών αφρού.

6.3.2.6 Τρέχοντα θέματα και μελλοντικές κατευθύνσεις για μεγάλης κλίμακας κατασκευή αυξητικής κατασκευής

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής επέτρεψε την κατασκευή κάθε είδους πολύπλοκων κυψελωτών αρχιτεκτονικών. Ωστόσο, αρκετά ζητήματα, όπως τα ελαττώματα της επιφάνειας, η ανισοτροπία, η αποκόλληση των τυπωμένων στρωμάτων, ο σχηματισμός κενών και οι επιλογές υλικών, ωστόσο, παραμένουν στη διαδικασία της προσθετικής κατασκευής [541,590-592]. Επιπλέον, οι μεγάλοι χρόνοι εκτύπωσης και οι περιορισμοί μεγέθους εμπόδισαν τη χρήση της κατασκευής πρόσθετων στη μεγάλης κλίμακας προσθετική κατασκευή αυξητικών. Ως εκ τούτου, η προσθετική παραγωγή έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για την κατασκευή δειγμάτων αυξητικών μικρής κλίμακας ή απόδειξης της ιδέας. Έτσι, περαιτέρω βελτιώσεις στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι απαραίτητες για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας αυξητικές κατασκευές για εφαρμογές στην υποδομή και την προστασία των οχημάτων από εκρήξεις και κρουστικά φορτία. Επιπλέον, η αποκόλληση των πλακών πυρήνα και πρόσοψης εμφανίζεται σε μεγάλη παραμόρφωση [293], η οποία είναι ένα κοινό πρόβλημα με τις δομές σάντουιτς. Ως εκ τούτου, η απευθείας εκτύπωση πάνελ σάντουιτς (πλάκα πρόσοψης και πυρήνας) μπορεί να ενισχύσει τη σύνδεση μεταξύ του αυξητικού πυρήνα και των πλακών πρόσοψης.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν δοκιμές εκρήξεων πεδίου, έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία μέθοδοι αναδίπλωσης φύλλων για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας αυξητικών δομών επανεισόδου και

διπλών βελών. Ωστόσο, η χειροκίνητη μέθοδος αναδίπλωσης του φύλλου είναι επίπονη και χρονοβόρα. Επιπλέον, οι συμβατικοί τύποι συγκόλλησης με κόλλα και πριτσίνια μεταξύ διπλωμένων στρωμάτων απαιτούσαν μεγάλη επιφάνεια επαφής που οδηγεί σε διπλάσιο πάχος επικαλυπτόμενων τοιχωμάτων κυψέλης. Επιπλέον, πολύπλοκες κατασκευές δεν είναι εφικτό να κατασκευαστούν με τη μέθοδο της χειροκίνητης αναδίπλωσης φύλλου.

Ένας συνδυασμός μεθόδων προσθετικής κατασκευής και διακριτών μεθόδων συναρμολόγησης μπορεί να είναι μια μελλοντική εναλλακτική μέθοδος για μεγάλης κλίμακας κατασκευή σύνθετων αυξητικών κατασκευών. Οι μέθοδοι προσθετικής παραγωγής μπορούν να κατασκευάσουν μοναδιαίες κυψέλες πολύπλοκων αυξητικών δομών. Εάν τα κατάλληλα συστήματα σύνδεσης έχουν σχεδιαστεί για τη συναρμολόγηση ξεχωριστά κατασκευασμένων κυψελών μονάδας, οι διακριτές μέθοδοι συναρμολόγησης ενδέχεται να εξαλείψουν τον περιορισμό μεγέθους των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Επιπλέον, η μαζική παραγωγή μονάδων κυψελών θα μπορούσε να μειώσει το κόστος παραγωγής και να ελαχιστοποιήσει τα απόβλητα υλικών. Ως εκ τούτου, συνιστάται περαιτέρω έρευνα για διακριτές μεθόδους συναρμολόγησης και συστήματα αρμών σε διαφορετικές αυξητικές κατασκευές.

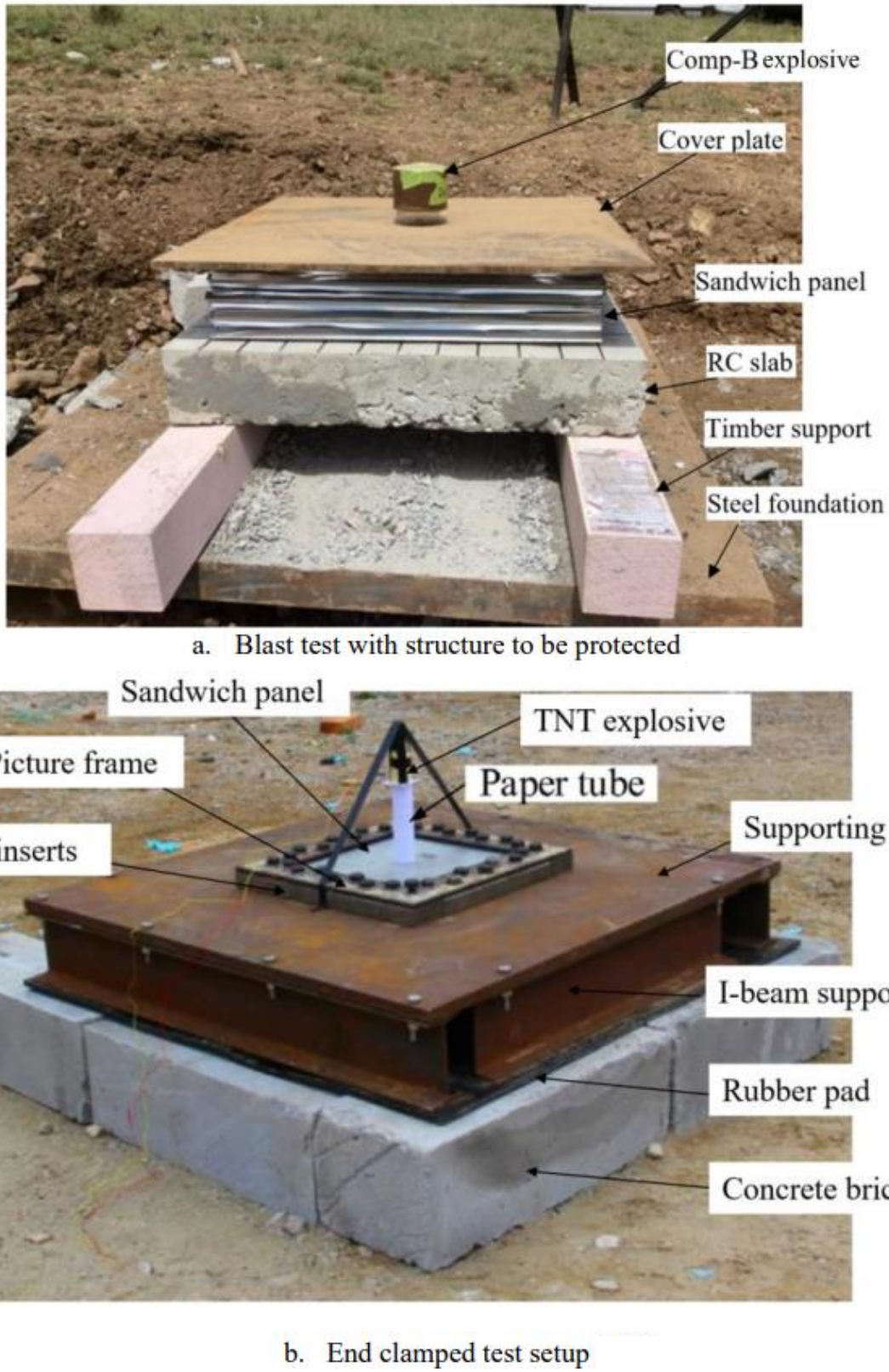
6.4 Μέθοδοι δοκιμής και προσομοίωσης

6.4.1 Δοκιμές έκρηξης

Έχουν πραγματοποιηθεί επιτόπιες δοκιμές εκρήξεων για να εξεταστεί πειραματικά η προστατευτική απόδοση των πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα. Γενικά, δύο τυπικοί τύποι σεναρίων δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν στις τεκμηριωμένες δοκιμές εκρήξεων αέρα πεδίου. Σε έναν τύπο δοκιμαστικής εγκατάστασης [513] (βλ. Εικ. 6.14α), το αυξητικό πάνελ σάντουιτς απλώς τοποθετήθηκε οριζόντια σε μια κατασκευή (η οποία αντιπροσώπευε τη δομή που έπρεπε να προστατευτεί) χωρίς κανένα περιορισμό. Καθώς η κάτω επιφάνεια του πάνελ σάντουιτς παρέμεινε πλήρως σε επαφή με την κάτω προς προστασία δομή, η αποτελεσματικότητα της αυξητικής δομής για την αποφυγή ζημιών και παραμόρφωσης μπορούσε να παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε αυτόν τον τύπο εγκατάστασης. Επιπλέον, αυτό το είδος εγκατάστασης μοιάζει με το προστατευτικό σύστημα θυσιαζόμενης επένδυσης σε υποδομές, όπως τοίχους και κολώνες κτιρίων. Από την άλλη πλευρά, στον άλλο τύπο εγκατάστασης [531] (Εικ. 6.14β), το πάνελ σάντουιτς συσφίχθηκε πλήρως κατά μήκος των εκτεταμένων εξωτερικών άκρων των πλακών πρόσοψης με τέτοιο τρόπο ώστε το δείγμα να υποστεί ασυγκράτητη παραμόρφωση. Δεδομένου ότι η προς προστασία δομή δεν χρησιμοποιείται στη δοκιμή, άλλες παράμετροι όπως η εκτροπή του πίνακα και ο μετριασμός της αντίδρασης στήριξης υιοθετήθηκαν ως πρακτικά κριτήρια για την αξιολόγηση της προστατευτικής απόδοσης της αυξητικής

δομής. Έτσι, η διάταξη με σύσφιξη είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσης των πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα ως μέρος ελαφριών κατασκευών (όπως δάπεδα οχημάτων ή αμάξωμα αεροσκαφών) υπό φόρτιση έκρηξης.

Οι Qi et al. [513] δοκίμασαν ένα πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα επανεισόδου πάνω από μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος (RC) κάτω από μια κοντινή έκρηξη εκρηκτικού Comp-B. Η πλάκα στηρίχθηκε από δύο ισχυρά ξύλινα στηρίγματα που στέκονταν πάνω από ένα χαλύβδινο θεμέλιο (βλ. Εικ. 6.14α). Οι Kalubadanage et al. [529] χρησιμοποίησαν ένα ισχυρό χαλύβδινο κουτί για να υποστηρίξει το πάνελ σάντουιτς κατά τη δοκιμή υπό εκρηκτική φόρτιση που παράγεται από την έκρηξη υγρού νιτρομεθανίου. Στη διάταξη με σύσφιξη από τους Chen et al. [531], τα πάνελ σάντουιτς δοκιμάστηκαν σε μια χαλύβδινη πλατφόρμα στήριξης με μια τετράγωνη οπή στο κέντρο, η οποία επέτρεψε την απεριόριστη εκτροπή του πάνελ σάντουιτς. Η χαλύβδινη πλατφόρμα στηρίχθηκε σε δοκούς Ι τοποθετημένους πάνω από τούβλα από σκυρόδεμα. Μεταξύ των δοκών Ι και των τούβλων από σκυρόδεμα, χρησιμοποιήθηκαν ελαστικά μαξιλαράκια ως αμορτισέρ (βλ. Εικ. 6.14β). Επιπλέον, τα φύλλα όψης κατασκευάστηκαν πιο μακριά από τον πυρήνα, έτσι ώστε το πάνελ σάντουιτς να μπορεί να βιδωθεί με την πλατφόρμα στήριξης. Για να εξασφαλιστεί σταθερό κράτημα, χρησιμοποιήθηκε πρόσθετη κορνίζα και μεταλλικά ένθετα.

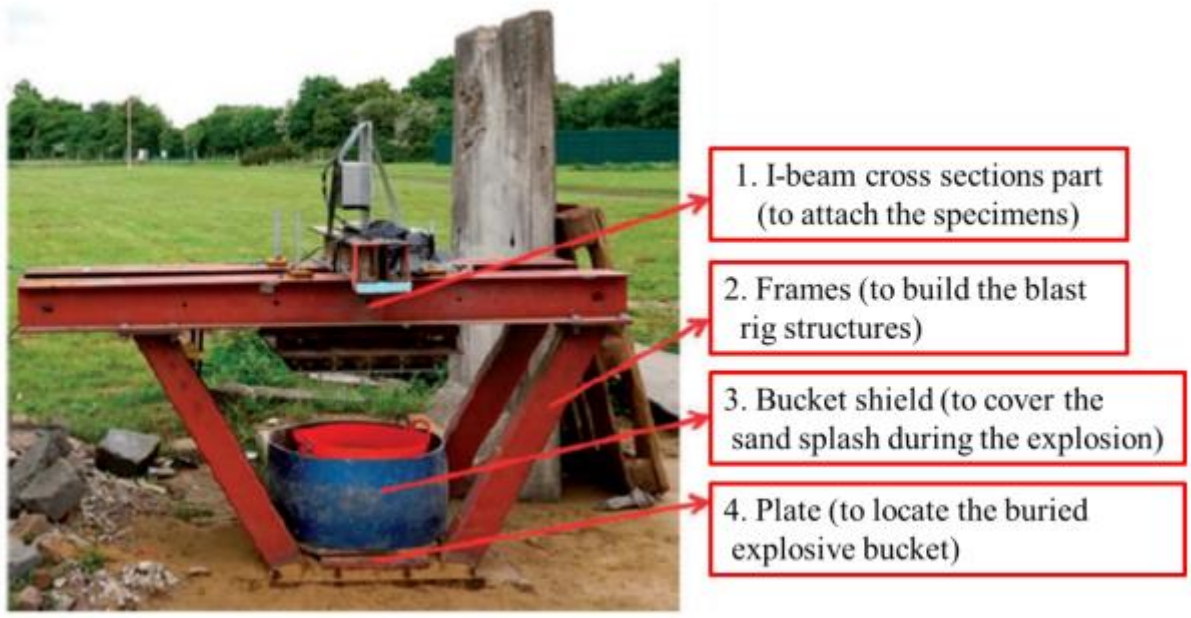


Εικόνα 6.14 Ρυθμίσεις δοκιμής έκρηξης αέρα

Τα εκρηκτικά σε δοκιμές εκτόξευσης αέρα πεδίου συγκρατήθηκαν στον αέρα με ανάρτηση χορδών [529] ή σωλήνες ασθενούς υλικού όπως το χαρτί [531]. Σε σύγκριση με την ανάρτηση χορδών, η

μέθοδος χάρτινου σωλήνα μπορεί να τοποθετήσει με ακρίβεια τη φόρτιση στην επιθυμητή θέση. Επιπλέον, ο χάρτινος σωλήνας βοήθησε πραγματικά στη συγκέντρωση της ενέργειας έκρηξης για την παραγωγή ενός εντοπισμένου φορτίου έκρηξης με την έκρηξη ενός κυλινδρικού φορτίου [531]

Για να εξεταστεί η προστατευτική απόδοση των αυξητικών κατασκευών έναντι απειλών όπως οι νάρκες κατά των οχημάτων και οι αυτοσχέδιοι εκρηκτικοί μηχανισμοί, διεξάγονται δοκιμές ανατινάξεων εδάφους. Μια διάταξη έκρηξης εδάφους υιοθετήθηκε από τους Arifurrahman et al. [523] για τη διερεύνηση της απόδοσης μιας επανεισόδου αυξητικής δομής έναντι μιας θαμμένης γόμωσης (PE4) φαίνεται στην εικ. 6.15. Η εξέδρα δοκιμής αποτελούνταν από τρία κύρια στοιχεία: δοκός I, πλαίσιο και εκρηκτική πλάκα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής έκρηξης, το πάνελ σάντουιτς προσαρτήθηκε στο I-beam. Το εκρηκτικό θάφτηκε κάτω από την άμμο σε έναν κουβά που βρισκόταν κάτω από το πάνελ σάντουιτς. Αισθητήρες λέιζερ και βιντεοκάμερα υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της εκτροπής και της έκρηξης, αντίστοιχα. Έτσι, ανάλογα με την επιδιωκόμενη εφαρμογή δομών σάντουιτς αυξητικού πυρήνα, μπορεί να υιοθετηθεί ένας κατάλληλος τύπος εγκατάστασης και οργάνων.



Εικόνα 6.15 Ρύθμιση έκρηξης εδάφους [523]

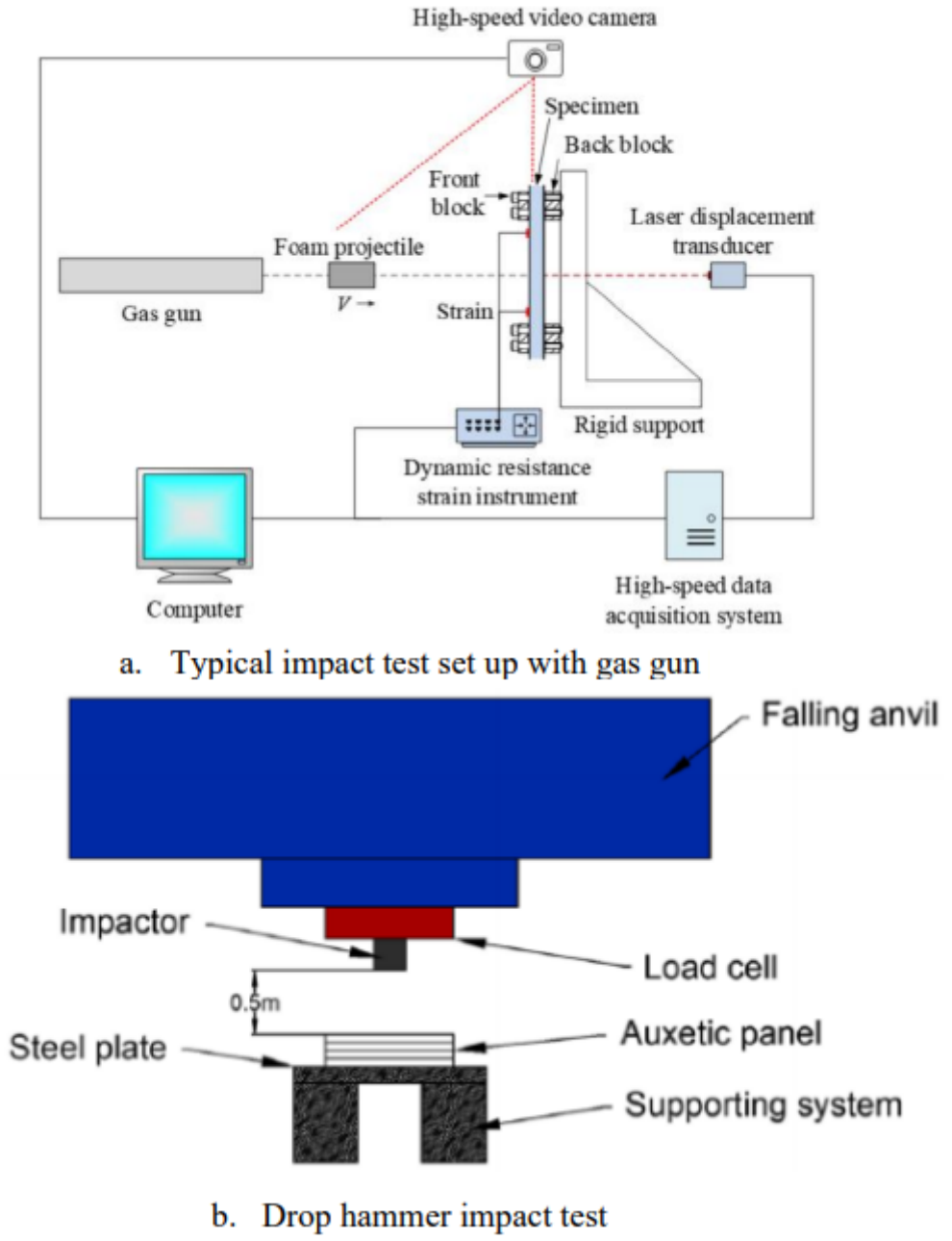
6.4.2 Βαλλιστικές δοκιμές κρούσης

Τα πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα έχουν σχεδιαστεί και δοκιμαστεί για την αξιολόγηση της απόδοσης προστασίας από βαλλιστική κρούση. Οι βαλλιστικές κρούσεις με διαφορετικές ταχύτητες μεταδίδονται χρησιμοποιώντας πιστόλι αερίου ή ρίχνοντας βάρη [594,595]. Επιπλέον, η μπάρα πίεσης

Split Hopkinson [596] και οι υδραυλικές δοκιμαστικές μηχανές [597] μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της αντοχής σε κρούση.

Παρόμοια με τις δοκιμές έκρηξης, τα πάνελ μπορούν είτε να στερεωθούν στο τέλος είτε να στηριχθούν σε μια κατασκευή (δοκιμή με σφυρί πτώσης). Η εικόνα 6.16 παρουσιάζει δύο τυπικές ρυθμίσεις δοκιμής που υιοθετήθηκαν στη βαλλιστική εξέταση απόδοσης μιας αυξητικής δομής επανεισόδου. Η εικόνα 6.16α αντιπροσωπεύει ένα πάνελ σάντουιτς με άκρο συσφίγγεται δοκιμασμένο από τους Xiao et al. [519]. Σε αυτή τη διάταξη πειράματος, το πάνελ αφέθηκε να εκτραπεί και η απόκλιση μετρήθηκε με έναν αισθητήρα λέιζερ. Ένα βλήμα αφρού απελευθερώθηκε από ένα πιστόλι αερίου για να προσκρούσει στο πάνελ σάντουιτς. Ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων υψηλής ταχύτητας με μορφοτροπέα μετατόπισης λέιζερ, κάμερα υψηλής ταχύτητας και μετρητές καταπόνησης χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής βαλλιστικής πρόσκρουσης. Οι Ying et al. [522] ακολούθησαν επίσης τη ρύθμιση του ακραίου σφιγκτήρα για να αξιολογήσουν τη βαλλιστική αντοχή σε κρούση των πάνελ σάντουιτς με κυρτό πυρήνα. Ο συσχετισμός 3D-ψηφιακής εικόνας (3D-DIC) χρησιμοποιήθηκε από τους Ying et al. [522] et al. για να μετρήσετε την απόκλιση.

Στη δοκιμή πτώσης με σφυρί, το πάνελ σάντουιτς τοποθετείται σε μια πλατφόρμα και προσκρούεται από ένα βάρος που πέφτει. Οι Remennikov et al. Το [521] τοποθέτησαν ένα πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα επανεισόδου στην κορυφή του συστήματος στήριξης από χάλυβα στερεωμένο σταθερά στο ισχυρό δάπεδο (βλ. Εικ. 6.16β). Ένα βάρος 580 κιλών απελευθερώθηκε από ύψος 0,5 m για να εφαρμόσει το φορτίο κρούσης στο πάνελ σάντουιτς. Χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμοκύτταρο μεταξύ του κρουστικού εκκρεμούς και του άκμονα που πέφτει για τη μέτρηση της δύναμης κρούσης. Το συμβάν πρόσκρουσης και η στιγμιαία παραμόρφωση του πίνακα καταγράφηκαν με κάμερα υψηλής ταχύτητας. Η ίδια ρύθμιση δοκιμής υιοθετήθηκε από τους Qi et al. [513] για να εξετάσουν την αντοχή σε κρούση μιας αυξητικής δομής επανεισόδου. Σε σύγκριση με την ταχύτητα του κρουστικού εκκρεμούς που απελευθερώνεται από το πιστόλι αερίου, η ταχύτητα ενός άκμονα που πέφτει είναι σημαντικά χαμηλότερη.



Εικόνα 6.16 Ρυθμίσεις δοκιμών κρούσης

Η προστατευτική απόδοση του πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα υπό φορτία έκρηξης και κρούσης αξιολογείται με βάση διάφορες παραμέτρους: απαγωγή πλαστικής ενέργειας, μετάδοση τάσης στην προστατευμένη κατασκευή, έλεγχος μετατόπισης, μετριασμός της δύναμης αντίδρασης και διείσδυση/διάτρηση της κατασκευής λόγω του βλήματος. .

6.5 Μέθοδοι αριθμητικής μοντελοποίησης

Οι δοκιμές έκρηξης και βαλλιστικής πρόσκρουσης δεν είναι πάντα εφικτές για διάφορους λόγους, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας κατά το πείραμα, των πολύπλοκων οργάνων, των περιορισμών κατασκευής, της απαίτησης ανθρώπινου δυναμικού υψηλής εξειδίκευσης, του προϋπολογισμού κ.λπ. Επιπλέον, ορισμένες παράμετροι (όπως η ενέργεια που απορροφάται από κάθε τμήμα και η παραμόρφωση μέσα στη δομή) δεν μπορούν να μετρηθούν σε πειράματα. Ως εκ τούτου, είναι κοινή πρακτική η διερεύνηση της συνολικής δυναμικής συμπεριφοράς υπό φορτία έκρηξης και κρούσης μέσω βαθμονομημένων αριθμητικών μοντέλων. Επειδή είναι βραχυπρόθεσμοι δυναμικοί τύποι φορτίσεων, τα προβλήματα έκρηξης και πρόσκρουσης προσομοιώνονται ευρέως με σαφείς κώδικες πεπερασμένων στοιχείων που βασίζονται σε χρονική ολοκλήρωση. Για την ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης της δομής, απαιτείται να αναπτυχθεί το αριθμητικό μοντέλο με κατάλληλες διατυπώσεις στοιχείων, μεγέθη πλέγματος, νόμους συστατικών υλικών, οριακές συνθήκες, αλγόριθμους επαφής, συνθήκες φόρτωσης και αριθμητικά σχήματα.

Οι αυξητικές δομές κυψελών αποτελούνται από λεπτά τοιχώματα κελιών, τα οποία διαμορφώνονται ευρέως με τη χρήση στοιχείων κελύφους. Για παράδειγμα, οι Jin et al. [511], Qi et al. [513], Remennikov et al. [519] και Chen et al. [520] χρησιμοποίησαν στοιχεία κελύφους τεσσάρων κόμβων Belyschko-Tasy στο LS-DYNA για να μοντελοποιήσουν τοιχώματα κυψελών και φύλλων προσώπου. Επιπλέον, ο αυξητικός πυρήνας της κυψέλης βρέθηκε επίσης να ορίζεται με γραμμικά εξαεδρικά στοιχεία 8 κόμβων με μειωμένη ενσωμάτωση (C3D8R) στο ABAQUS σε ορισμένες έρευνες [519,522]. Όσον αφορά τον χρόνο υπολογισμού, τα στοιχεία του κελύφους είναι πιο αποτελεσματικά από τα συμπαγή στοιχεία για τον πυρήνα της κυψέλης. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση τρισδιάστατων δικτυωτών αυξητικών δομών, τα στοιχεία δέσμης χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στη βιβλιογραφία [510,512,517].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όλκιμα μεταλλικά υλικά με ελαστική-πλαστική συμπεριφορά χρησιμοποιούνται κυρίως για τον σχεδιασμό αυξητικών πυρήνων και φύλλων πρόσοψης για να αντέχουν σε φορτία έκρηξης και βαλλιστικών κρούσεων. Επιπλέον, τα φαινόμενα ρυθμού παραμόρφωσης του ευαίσθητου σε ταχύτητα υλικού απαιτείται επίσης να λαμβάνονται υπόψη στα δυναμικά υπολογιστικά μοντέλα. Γενικά, τέτοιες συμπεριφορές υλικού, συμπεριλαμβανομένων των ρυθμών παραμόρφωσης, βρέθηκε ότι μοντελοποιήθηκαν κυρίως με το μοντέλο Johnson-Cook [510,514,515,520,535], το μοντέλο Γραμμικής πλαστικότητας Piecewise [513,516,517,521,524,529] και το μοντέλο Plastic Kinematic [511,523]. Επιπλέον, οι αυξητικοί αφροί μπορούν επίσης να μοντελοποιηθούν με το μοντέλο Crushable Foam Material [598].

Τα αντικείμενα πρόσκρουσης θεωρούνταν συνήθως ως ένα άκαμπτο σώμα σε αριθμητικά μοντέλα [507,599-601]. Μια αρχική ταχύτητα εκχωρείται στο κρουστικό εκκρεμές για να μεταδοθεί στο πάνελ σάντουιτς. Από την άλλη πλευρά, διαφορετικοί αλγόριθμοι φόρτισης έκρηξης χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του φορτίου έκρηξης. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι φόρτισης με έκρηξη είναι το συμβατικό όπλο [602] ή η μέθοδος ενισχυμένης έκρηξης φορτίου, η αυθαίρετη μέθοδος Lagrangian Eulerian (ALE) [603], η συζευγμένη ALE και το ενισχυμένο load blast (LBE) [604], η υδροδυναμική εξομάλυνση σωματιδίων (SPH) [605,606] και η έκρηξη σωματιδίων [607]. Επιπλέον, το μοντέλο παλμού έκρηξης που κατασκευάζεται από το χρήστη (BIIM) [608] αναπτύχθηκε για φορτίσεις εκρήξεων σε κοντινή απόσταση. Μεταξύ των μεθόδων φόρτισης με έκρηξη, λόγω της υπολογιστικής του αποτελεσματικότητας και της απλότητας στη μοντελοποίηση, το ConWep/LBE χρησιμοποιείται ευρύτερα στην ανάλυση της δομικής απόδοσης πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα υπό φόρτιση έκρηξης [510,514,515,518,530]. Ωστόσο, οι εμπειρικές εξισώσεις των μεθόδων φόρτισης εκρήξεων LBE ισχύουν μόνο σε ένα εύρος συγκεκριμένης κλίμακας απόστασης (0,147 m/kg$^{1/3}$ έως 40 m/kg$^{1/3}$ για σφαιρική έκρηξη αέρα και 0,178 m/kg$^{1/3}$ έως 40 m/kg$^{1/3}$ για έκρηξη ημισφαιρικής επιφάνειας [609]). Το BIIM είναι μια κατάλληλη επιλογή με χαμηλό κόστος υπολογισμού για τη μοντελοποίηση φορτίσεων εκρήξεων κοντά στο πεδίο στα πάνελ σάντουιτς [513,524,529]. Αν και το ALE χρησιμοποιεί περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από άλλες μεθόδους φόρτισης έκρηξης, προσομοιώνει όχι μόνο τη δομική απόδοση αλλά και την έκρηξη εκρηκτικών, τη συμπίεση αέρα, την αλληλεπίδραση ρευστού-δομής κ.λπ., και επιτρέπει τη μοντελοποίηση πιο περίπλοκων επιπτώσεων. Η μέθοδος ALE βρέθηκε ότι χρησιμοποιείται από τους Jin et al. [511] και Chen et al. [520,531] για την προσομοίωση της απόδοσης των πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα.

Οι Novak et al. [516] συνέκριναν την απόκριση ενός τρισδιάστατου χειρόμορφου πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα υπό φόρτιση με έκρηξη αέρα με τρεις διαφορετικές αριθμητικές προσεγγίσεις: ConWep, ALE και SPH. Στη μελέτη ελήφθησαν υπόψη τρία σενάρια φόρτισης με έκρηξη (1,094 kg TNT στα 0,065 m, 1,094 kg TNT στα 0,1 m και 0,468 kg TNT στα 0,1 m). Με βάση τη σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών κανονικοποιημένων μέγιστων παραμορφώσεων, επιλέχθηκε η μέθοδος SPH για περαιτέρω ανάλυση. Ωστόσο, η μέθοδος SPH δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλής μεταξύ άλλων ερευνητών για την εξέταση της απόκρισης έκρηξης αυξητικών δομών. Η επιβεβαίωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα είναι η πιο συχνά ακολουθούμενη προσέγγιση επικύρωσης αριθμητικών μοντέλων. Καθώς ήταν διαθέσιμες περιορισμένες πειραματικές εργασίες σε αυξητικές δομές που υπόκεινται σε φορτία έκρηξης και βαλλιστικής πρόσκρουσης, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά αποτελέσματα άλλων κυτταρικών προστατευτικών δομών με βάση στερεά, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών κηρηθρών και αφρού, για την επικύρωση αριθμητικών

μοντέλων. Για την επικύρωση του υπολογιστικού μοντέλου για πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα, βρέθηκε ότι χρησιμοποιούνται συνήθως πειραματικά αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα σε συμβατικά πάνελ σάντουιτς με πυρήνα κυψέλης [511,518]. Οι Novak et al. [517] ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο για την πρόβλεψη της βαλλιστικής απόκρισης ενός πάνελ σάντουιτς χειρόμορφου αυξητικού πυρήνα με βάση τις δοκιμές συμπίεσης των χειρόμορφων αυξητικών και βαλλιστικών δοκιμών των πλακών κάλυψης. Και πάλι, με βάση την επαλήθευση του φορτίου έκρηξης σε μια κυκλική πλάκα [610] και τη συμπίεση της χειρόμορφης αυξητικής δομής, κατασκευάστηκαν υπολογιστικά μοντέλα για την αξιολόγηση της αντίστασης έκρηξης ενός τρισδιάστατου χειρόμορφου πίνακα σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα από τους Novak et al. [516]. Οι Lan et al. [518] χρησιμοποίησαν πειραματικά αποτελέσματα διαθέσιμα σε συμβατικά πάνελ σάντουιτς με πυρήνα κυψέλης [534] και αφρώδους πυρήνα [611] υπό φορτίο εκτόξευσης για να επικυρώσουν την απόκριση έκρηξης των πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα επανεισόδου κατασκευασμένα σε ABAQUS/Explicit.

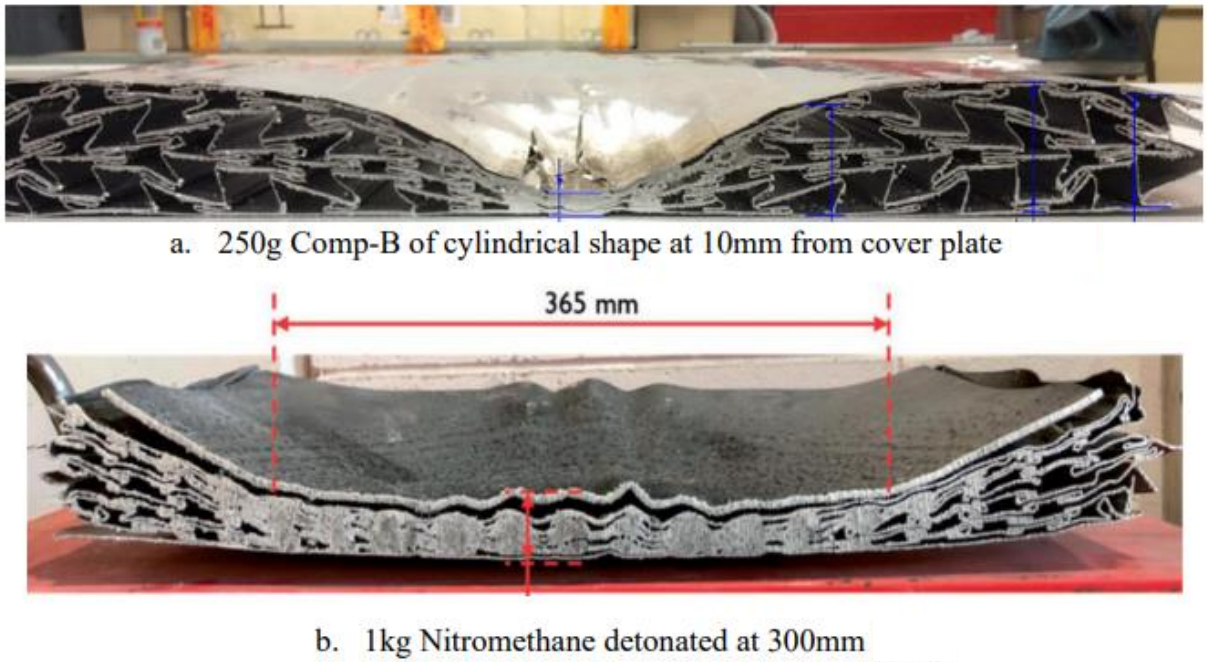
Τα υπολογιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν και επικυρώθηκαν μέχρι τώρα χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία για την αξιολόγηση της προστατευτικής απόδοσης των αυξητικών δομών. Επιπλέον, η αριθμητική ανάλυση παρείχε μια εις βάθος εικόνα των διαφορετικών φαινομένων κατά τη δυναμική φόρτιση, η οποία δεν μπορούσε να αποτυπωθεί σε πειραματική ανάλυση.

6.6 Απόδοση αυξητικών κατασκευών υπό έκρηξη και βαλλιστική φόρτιση

6.6.1 Μηχανισμός παραμόρφωσης

Όταν οι αυξητικές κατασκευές επηρεάζονται από ένα ωθητικό φορτίο, εμφανίζεται ο μηχανισμός της αυξητικής αντίθετης παραμόρφωσης, ο οποίος αναγκάζει το υλικό να ρέει προς τη ζώνη φόρτισης. Ως αποτέλεσμα, η περιοχή φόρτισης πυκνώνεται και οδηγεί σε τοπική βελτίωση της ακαμψίας [510]. Τα παραμορφωμένα σχήματα των πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα κάτω από διαφορετικά μεγέθη του φορτίου εκτόξευσης αέρα φαίνονται στην εικ. 6.17. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο δοκιμές έκρηξης, τα αυξητικά πάνελ τοποθετήθηκαν στις βάσεις με τέτοιο τρόπο ώστε η πίσω πλάκα όψης ήταν πλήρως σε επαφή με την κάτω πλατφόρμα υποστήριξης. Αν και παρατηρήθηκε συγκέντρωση υλικού προς το κέντρο και στα δύο σενάρια φόρτισης έκρηξης, παρατηρήθηκε διαφορά στη ζώνη πυκνότητας υλικού. Κάτω από μια έκρηξη ενός κυλινδρικού φορτίου 250 g Comp-B σε απόσταση 10 mm (μέχρι τη βάση γόμωσης), η κεντρική περιοχή του πάνελ σάντουιτς κυριαρχήθηκε πλήρως από τη συγκέντρωση υλικού με μια σχετικά μικρή ακτίνα καμπυλότητας. Από την άλλη πλευρά, ολόκληρο το πάνελ συμπυκνώθηκε πλήρως υπό την επίδραση 1 kg νιτρομεθανίου που πυροδοτήθηκε στα 300 mm. Η ακτίνα καμπυλότητας στην κοίλη κοιλότητα υπό την έκρηξη 1 kg νιτρομεθανίου στα 300 mm

ήταν μεγαλύτερη από αυτή στην περίπτωση της έκρηξης 250 g Comp-B σε απόσταση 10 mm. Με την αύξηση της απόστασης στάσης, η κατανομή του φορτίου έκρηξης γίνεται σχετικά λιγότερο εντοπισμένη. Έτσι, παρόλο που είχε χαμηλότερη ειδική ώθηση κορυφής, ολόκληρος ο πυρήνας παραμορφώθηκε υπό την έκρηξη 1 kg νιτρομεθανίου στα 300 mm.

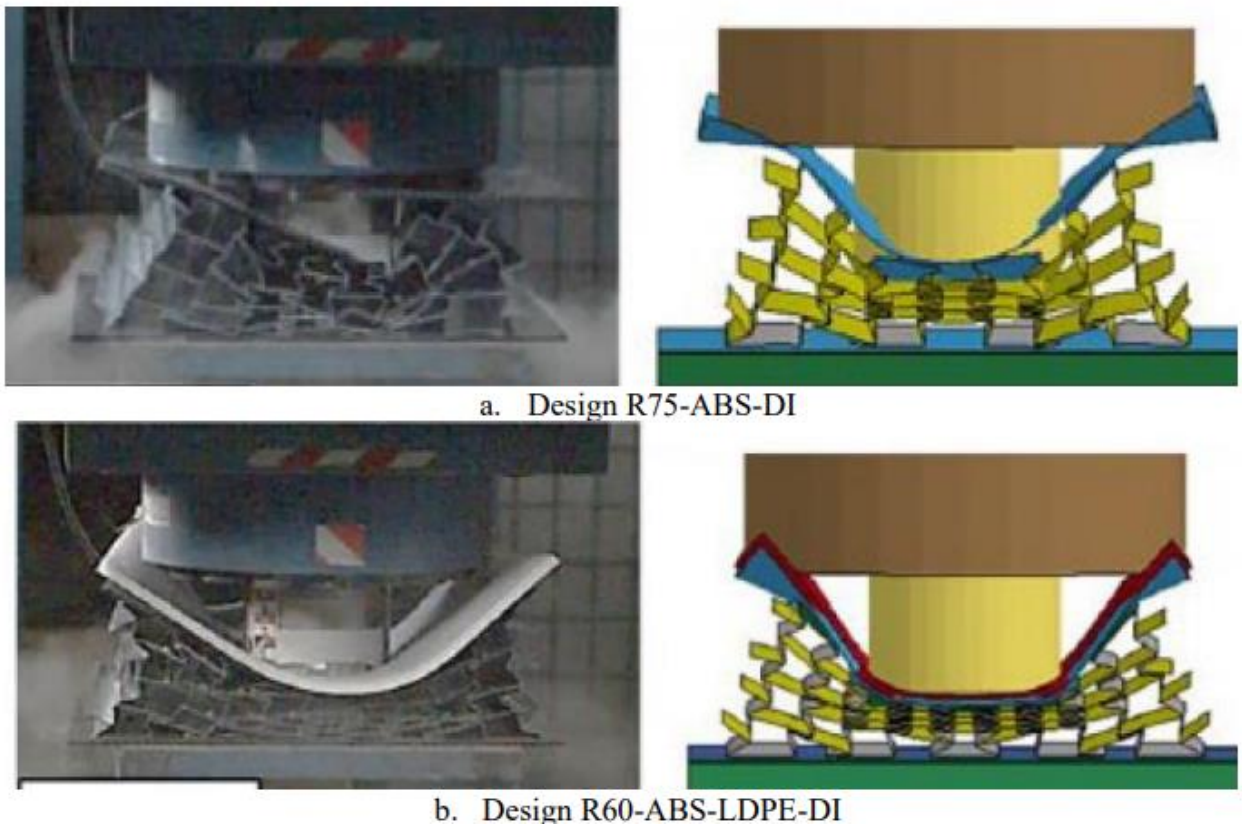


Εικόνα 6.17 Παραμόρφωση πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα κάτω από διαφορετικά εύρη φορτίσεων έκρηξης

Η αντίθετη παραμόρφωση του αυξητικού πυρήνα ενισχύει την απορρόφηση ενέργειας και την τοπική ακαμψία. Επιπλέον, ο αυξητικός πυρήνας ανακατανέμει το φορτίο στο πίσω φύλλο όψεως [512]. Η προς τα μέσα παραμόρφωση του αυξητικού στοιχείου μονάδας βρέθηκε ότι ανακατευθύνει το ενεργό δυναμικό φορτίο. Ως αποτέλεσμα, ένα μικρότερο μέγεθος τάσης μεταφέρθηκε στην πίσω πλάκα όψης κάτω από την εφαρμοζόμενη φόρτιση εκτόξευσης.

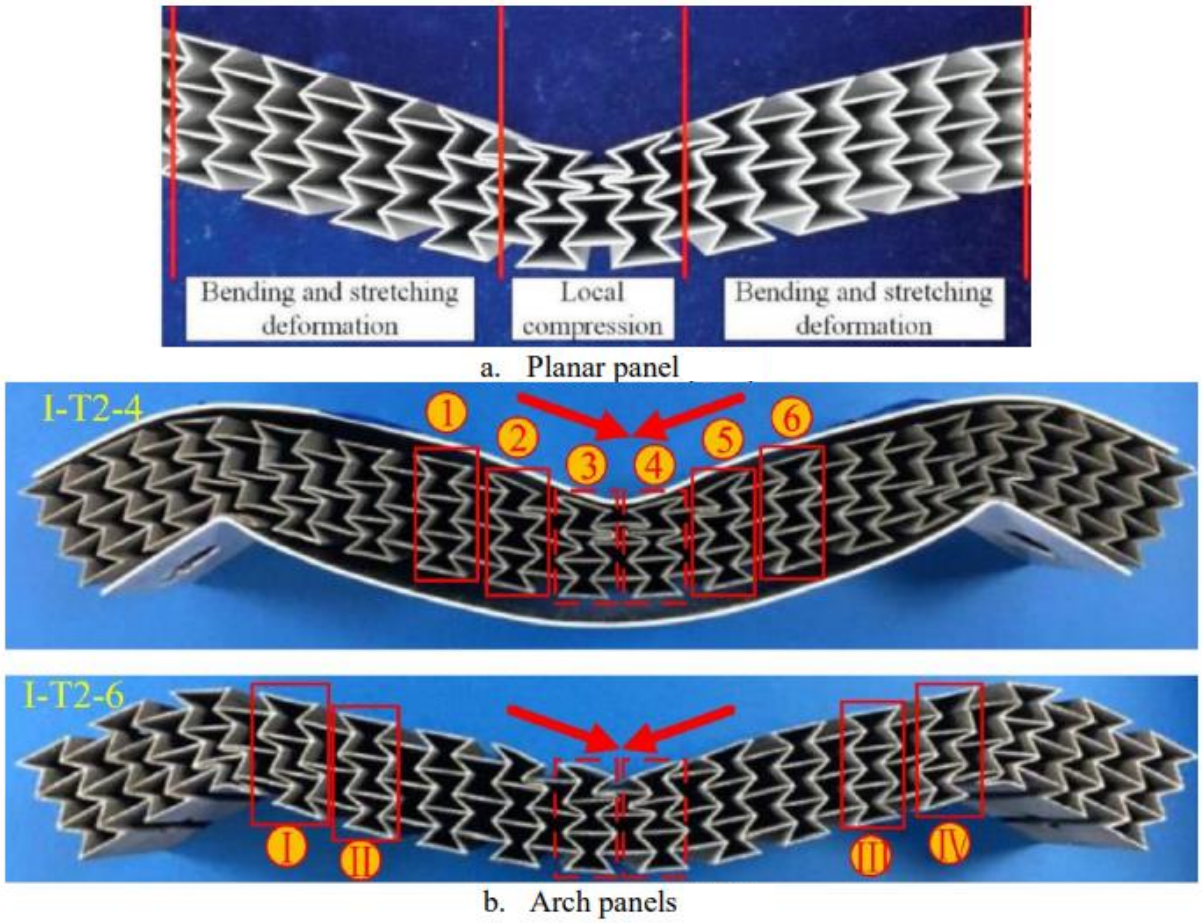
Οι πειραματικές και αριθμητικές παραμορφώσεις δύο δομών σάντουιτς αυξητικού πυρήνα υπό κρουστικό φορτίο που προκαλείται από κρουστικό σφυρί από τους Remennikov et al. [521] φαίνονται στην εικ. 6.18. Η σχεδίαση R75-ABS-DI αντιπροσωπεύει τον αυξητικό πυρήνα με εσωτερική γωνία 75˚ και πλάκες από ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS). Το δεύτερο σχέδιο, R60-ABS-LDPE-DI, έχει εσωτερική γωνία 60˚ και πλάκα πρόσοψης ABS καλυμμένη με πλάκα πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE) πάχους 7 mm. Στο πείραμα, χωρίς την πλάκα κάλυψης, ο αυξητικός πυρήνας παραμορφώθηκε και απέτυχε με ασύμμετρο τρόπο. Ωστόσο, στο αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε χωρίς να ληφθούν υπόψη τα κριτήρια αστοχίας της πλάκας, μπορεί να παρατηρηθεί μια συμμετρική παραμόρφωση, η οποία δείχνει ότι μια μικρή ανωμαλία στο

φύλλο όψης μπορεί να οδηγήσει σε ασύμμετρη παραμόρφωση. Έτσι, για να επιτευχθεί ένας απόλυτα συμμετρικός μηχανισμός αυξητικής παραμόρφωσης, είναι απαραίτητο ένα ισχυρό φύλλο προσώπου για ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου.



Εικόνα 6.18 Παραμόρφωση πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα υπό δυναμική κρουστική φόρτιση [521]

Όταν τα πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα με ακραία σύσφιξη κρούονται από ένα παλμικό φορτίο, εκτός από την αντίθετη παραμόρφωση του πυρήνα, παρουσιάζεται επίσης μια συνολική παραμόρφωση κάμψης από τα πάνελ [519,522,531].οι Xiao et al. [519] και Ying et al. [522] υπέβαλαν επίπεδες και καμπύλες δοκούς σάντουιτς αυξητικού πυρήνα σε βαλλιστική κρούση χρησιμοποιώντας ένα πιστόλι αέρα, αντίστοιχα. Οι παραμορφώσεις των επίπεδων και τοξωτών δοκών σάντουιτς παρουσιάζονται στην εικ. 6.19. Αναφέρθηκε ότι τόσο οι επίπεδες όσο και οι τοξωτές δοκοί σάντουιτς παρουσίασαν τοπική αυξητική συμπεριφορά καθώς και διαστολή στον πυρήνα πριν ολοκληρωθεί η κρούση. Επιπλέον, η τοπική εσοχή, η διατμητική παραμόρφωση και η θραύση του τοιχώματος ήταν οι κύριοι τρόποι αστοχίας στις δομές σάντουιτς [519,522].



Εικόνα 6.19 Παραμορφώσεις του πάνελ σάντουιτς με ενισχυτικό πυρήνα με άκρο σύσφιξη υπό βαλλιστική κρούση

Το υψηλό πορώδες των αυξητικών κατασκευών αναπόφευκτα μειώνει τη μηχανική ικανότητα μεταφοράς φορτίου [352]. Έτσι, οι αυξητικές κατασκευές μπορούν να υποστούν μεγάλη παραμόρφωση κάμψης εύκολα υπό τη δράση ενός εξωτερικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα, μια αρνητική απόκριση αναλογίας Poisson μπορεί να εμφανιστεί μόνο στο επηρεαζόμενο καθεστώς με μικρό μέγεθος. Επομένως, κάτω από τη διάταξη με ακραία σύσφιξη, και τα δύο φύλλα όψης απαιτείται να είναι προσεκτικά σχεδιασμένα ώστε να χρησιμοποιούν πλήρως την αυξητική συμπεριφορά επιτρέποντας σε ολόκληρο τον αυξητικό πυρήνα να υποστεί συμπίεση.

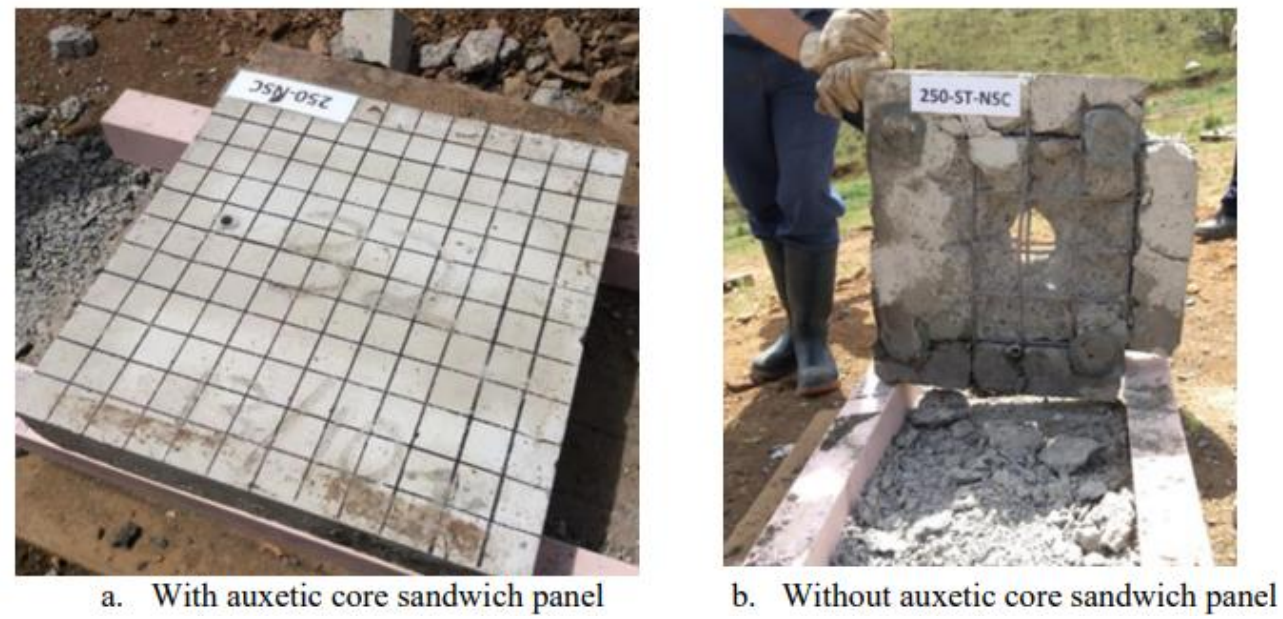
6.6.2 Ολική απόδοση προστασίας

6.6.2.1 Προστασία από έκρηξη

Η συμπεριφορά προστασίας από εκρήξεις αυξητικών κατασκευών αξιολογείται κυρίως με βάση την απορρόφηση ενέργειας, τη μετάδοση τάσεων, την ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης και τον μετριασμό της δύναμης αντίδρασης [511,513,530,612]. Ένα ιδανικό προστατευτικό σύστημα απορροφά τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας έκρηξης χωρίς να μεταδίδει υψηλότερα μεγέθη δύναμης

στις προστατευμένες δομές, στηρίγματα ή στην πίσω όψη. Ως αποτέλεσμα, διασφαλίζεται η ασφάλεια της υποδομής και των οχημάτων έναντι διαφόρων ειδών εκρήξεων.

Οι Qi et al. [513] διεξήγαγαν πειραματικές και αριθμητικές έρευνες για να εξετάσει την αποτελεσματικότητα ενός πάνελ σάντουιτς με μεταλλικό επανεισόδου με αυξητικό πυρήνα για την προστασία μιας πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) υπό εκτόξευση αέρα από κοντά. Σε σύγκριση με το συμβατικό κάλυμμα πλάκας από μονολιθικό χάλυβα, το πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα επανεισόδου ήταν εξαιρετικά αποδοτικό όσον αφορά τον μετριασμό της δύναμης και την απορρόφηση ενέργειας. Η ζημιά στην πλάκα RC μετά την υποβολή της στο κλειστό φορτίο εκτόξευσης με και χωρίς προστασία του πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα φαίνεται στην εικ. 6.20. Κάτω από την προστασία πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα, δεν παρατηρήθηκε ζημιά στην πλάκα RC. Ωστόσο, το συμβατικό κάλυμμα χαλύβδινων πλακών απέτυχε να αποτρέψει σημαντική ζημιά και θρυμματισμό του σκυροδέματος. Επιπλέον, η αριθμητική ανάλυση έδειξε ότι το πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα απορρόφησε 19,1% υψηλότερη ενέργεια από το συμβατικό σύστημα προστασίας του ίδιου μεγέθους, εμβαδικής πυκνότητας και υλικού με εξαγωνικό εξάγωνο κυψελοειδές σύστημα κυψελωτού πυρήνα Poisson's [513]. Ομοίως, οι Imbalzano et al. [514] αποκάλυψαν ότι ο αυξητικός πυρήνας μείωσε τη μετάδοση τάσης στην πίσω πλάκα όψης μέσω του μηχανισμού πύκνωσης υλικού.



Εικόνα 6.20 Πλάκα σκυροδέματος μετά από δοκιμή έκρηξης [513]

Οι Kalubadanage et al. [529] ερεύνησαν την προστατευτική απόδοση δύο θυσιαζόμενων επενδύσεων πυρήνα κυψέλης επανεισόδου σε χαλύβδινες κατασκευές υπό φόρτιση με εκτόξευση αέρα μέσω πειραματικών και αριθμητικών προσεγγίσεων. Το σύστημα θυσιαζόμενης επένδυσης με πυρήνα

κυψέλης επανεισόδου ήταν αποτελεσματικό για την προστασία των χαλύβδινων κατασκευών που υπόκεινται σε εκρηκτικά φορτία από κοντά, ελαχιστοποιώντας την υπολειπόμενη απόκλιση. Ωστόσο, προειδοποιήθηκε ότι μια γρήγορη συμπύκνωση του αυξητικού πυρήνα υπό εκρηκτικό φορτίο ($Z<0,3$ $m/kg^{1/3}$) μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό μάζας υψηλής ταχύτητας από τον συμπαγή πυρήνα που καταρρέει, η οποία μπορεί να επιδεινώσει ζημιά στην κύρια δομή αντί να μετριάσει τη ζημιά. Ως εκ τούτου, απαιτείται περαιτέρω μελέτη σχετικά με τη μέθοδο αποτροπής γρήγορης πύκνωσης του αυξητικού σε στερεή μάζα υπό εκτόξευση κλειστού τύπου για την αποτελεσματική χρήση του αυξητικού επανεισόδου στον μετριασμό των εκρήξεων. Ωστόσο, η ενίσχυση της μεταφερόμενης ώθησης στην προστατευμένη δομή δεν περιορίζεται σε αυξητικές δομές. παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε στον αφρό [513].

Οι Arifurrahman et al. [523] δοκίμασαν ένα σύστημα προστασίας του πυρήνα με επανεισαγωγή έναντι ενός θαμμένου φορτίου. Το προστατευτικό σύστημα που βασίζεται σε αυξητικό αναφέρθηκε ότι είναι αποτελεσματικό όσον αφορά τη μείωση του μέγιστου δομικού φορτίου και της ώθησης κατά 33%. Από την άλλη πλευρά, όταν κανονικοποιήθηκε έναντι της μάζας του πάνελ, η απόδοση του συστήματος προστασίας του αυξητικού πυρήνα ήταν χειρότερη από εκείνη των προστατευτικών πλαισίων πλήρωσης με αέρα σε σχέση με τη μείωση της εκτροπής της πλάκας της πίσω όψης. Ωστόσο, σε σύγκριση με τις ισοδύναμες συμβατικές κατασκευές, τα πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα συνήθως παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση. Για παράδειγμα, κάτω από τη φόρτιση με εκτόξευση αέρα, μια μείωση της μετατόπισης της οπίσθιας όψης κατά 30% σε σύγκριση με τη μονολιθική πλάκα αναφέρθηκε από τους Imbalzano et al. [510]. Παρομοίως, μεταξύ του κυματοειδούς τοιχώματος εμφύσησης, του συμβατικού τοιχώματος κυψελοειδούς φυσήματος και του επαναεισερχόμενου αυξητικού τοίχου εμφύσησης που διερευνήθηκε στους Luo et al. [614], το αυξητικό τοίχωμα παρουσίασε τη χαμηλότερη απόκλιση στο μέσο του ανοίγματος κάτω από το εφαρμοζόμενο παλμικό φορτίο.

Η πολλά υποσχόμενη αντίσταση έκρηξης των πάνελ σάντουιτς με διπλό βέλος με αυξητικό πυρήνα υπό φόρτιση με έκρηξη αέρα αποκαλύφθηκε από τους Wang et al. [515] και Chen et al. [520.531]. Σε σύγκριση με τη μονολιθική πλάκα ισοδύναμης μάζας, το πλαίσιο του αυξητικού πυρήνα απορρόφησε υψηλότερη ενέργεια έκρηξης κατά 74,1% [515]. Η μετατόπιση της πίσω όψης της πλάκας βρέθηκε να είναι σημαντικά χαμηλότερη (περίπου 27 έως 55%) από τη μονολιθική πλάκα [515]. Η απόδοση των χειρόμορφων αυξητικών δομών υπό φόρτιση με εκτόξευση αέρα διεξήχθη από τους Novak et al. [516]. Λόγω της υψηλής απορρόφησης ενέργειας του χειρόμορφου αυξητικού πυρήνα, το σχεδιασμένο πάνελ σάντουιτς μείωσε την εκτροπή της πλάκας της πίσω όψης κατά 10% σε σύγκριση με την

ισοδύναμη μονολιθική πλάκα. Η χαμηλότερη μείωση παραμόρφωσης του χειρόμορφου πίνακα σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα μπορεί να οφείλεται στο υψηλό πορώδες (χαμηλή σχετική πυκνότητα) των χειρόμορφων δομών.

Λαμβάνοντας υπόψη την υπεροχή στην αντοχή σε φορτίο του σχήματος του τόξου λόγω της χωρικής καμπυλότητας, οι Lan et al. [518,525] σχεδίασαν και ανέλυσαν τα πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα επανεισόδου και διπλού βέλους με κυλινδρικό σχήμα (καμάρα). Επιπλέον, οι κυλινδρικοί πίνακες προβλέφθηκαν να χρησιμοποιηθούν σε δομές κελύφους, συμπεριλαμβανομένων των κελυφών των αεροδιαστημικών οχημάτων και των δεξαμενών καυσίμων. Σε σύγκριση με το ισοδύναμο πάνελ σάντουιτς από αφρό και το συμβατικό πάνελ σάντουιτς με πυρήνα κηρήθρας, το πλαίσιο με αυξητικό πυρήνα επανεισόδου παρουσίασε καλύτερη αντίσταση στην έκρηξη σε σχέση με την απορρόφηση ενέργειας και τον έλεγχο παραμόρφωσης [518]. Ομοίως, το κυλινδρικό πλαίσιο με αυξητικό πυρήνα διπλού βέλους ξεπέρασε τις επιδόσεις του ισοδύναμου μονολιθικού πίνακα όσον αφορά την αντίσταση στην έκρηξη από τους Lan et al. [525].

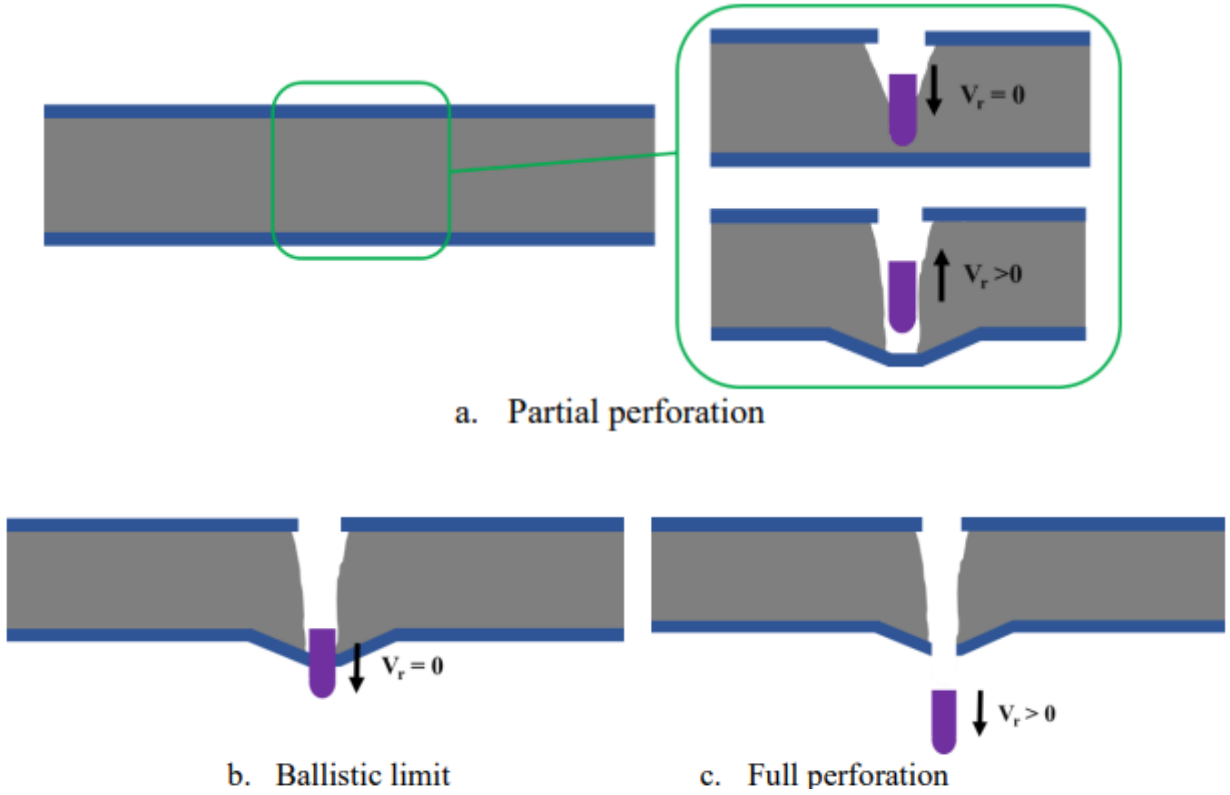
Εκτός από την απορρόφηση ενέργειας έκρηξης και τον έλεγχο απόκλισης από τη φόρτιση έκρηξης, οι Ma et al. [615] χρησιμοποίησαν ένα λειτουργικά διαβαθμισμένο αυξητικό υλικό σε εκτροπείς προστασίας από εκρήξεις στρατιωτικών οχημάτων. Ο προτεινόμενος εκτροπέας τράβηξε το υλικό στην περιοχή που χρειαζόταν περισσότερο χρησιμοποιώντας την προσπίπτουσα ενέργεια έκρηξης για να προσαρμόσει το σχήμα του. Έτσι, απορροφώντας την ενέργεια και εκτρέποντας το κύμα έκρηξης, τα μέλη του πληρώματος αναμενόταν να προστατεύονται από εκρήξεις. Από την άλλη πλευρά, η κοίλη παραμόρφωση των συμβατικών πάνελ σάντουιτς με πυρήνα αφρού αναφέρθηκε ότι περιορίζει το φορτίο έκρηξης και αυξάνει την εκπεμπόμενη ώθηση [355].

Συνολικά, όλες οι διερευνημένες αυξητικές δομές κάτω από διαφορετικά σενάρια φόρτισης έκρηξης έδειξαν καλύτερη συνολική αντίσταση εκρήξεων από τα εξεταζόμενα σημεία αναφοράς: μονολιθικές πλάκες, αφροί και συμβατικές εξαγωνικές κυψέλες.

6.6.2.2 Βαλλιστική προστασία

Όταν μια κατασκευή υποβάλλεται σε βαλλιστική κρούση, το εντοπισμένο παλμικό φορτίο όχι μόνο παραμορφώνει τη δομή αλλά και το βλήμα διεισδύει στη δομή. Ως εκ τούτου, εκτός από την υψηλή απορρόφηση ενέργειας, τη μείωση της δύναμης αντίδρασης και τη μετάδοση καταπόνησης, η αντίσταση διείσδυσης της προστατευτικής θωράκισης για την αποφυγή της διάτρησης της προστατευμένης δομής είναι επίσης σημαντική στον ανθεκτικό στη βαλλιστική κρούση σχεδιασμό. Ανάλογα με την κινητική ενέργεια του βλήματος, ένα πάνελ σάντουιτς παρουσιάζει τρία πιθανά

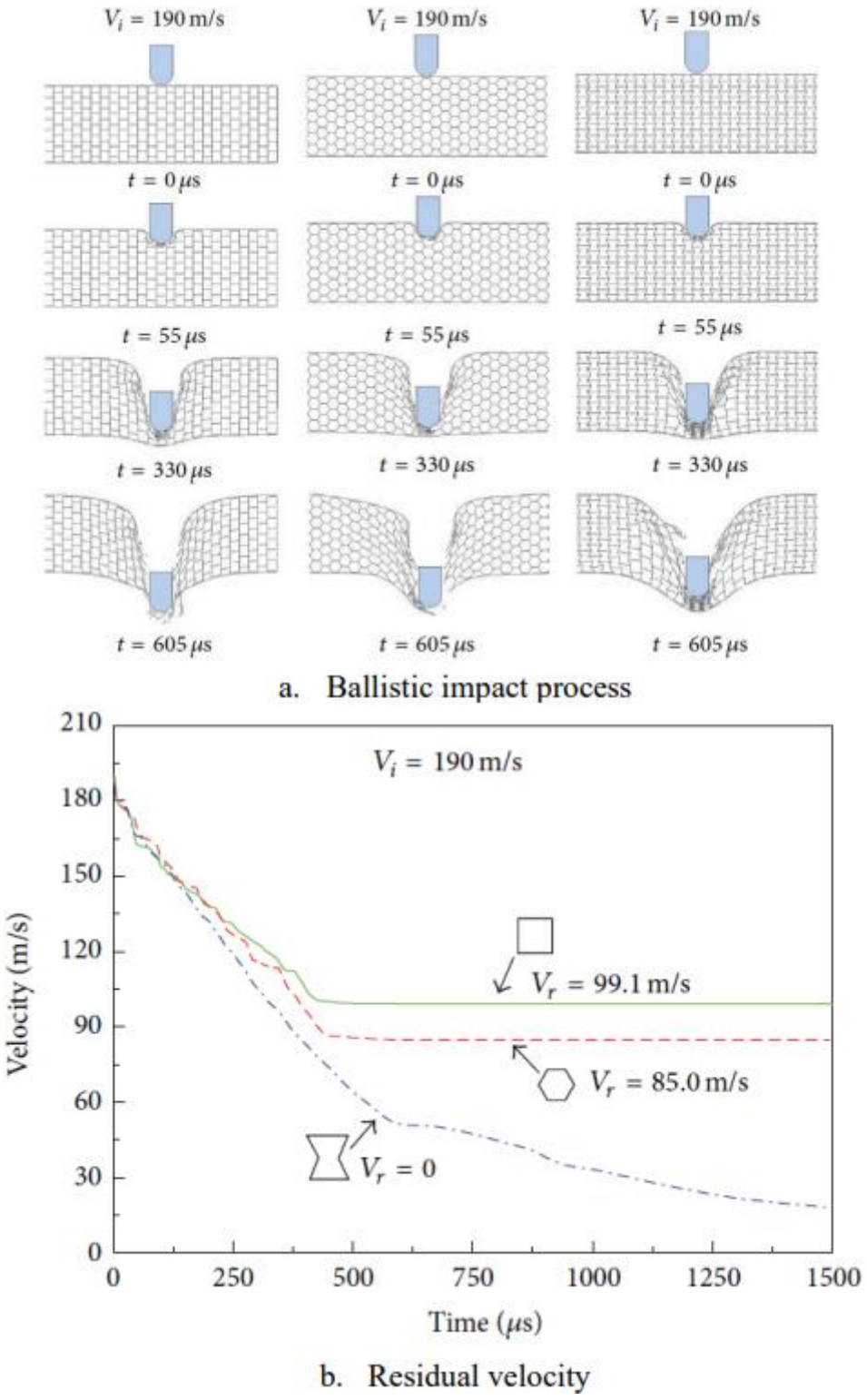
σχέδια διάτρησης: μερική διάτρηση, βαλλιστικό όριο και πλήρη διάτρηση. Σε περίπτωση μερικής διάτρησης, το βλήμα διεισδύει στην μπροστινή πλάκα αλλά όχι στην πίσω πλάκα. Έτσι, το βλήμα είτε παραμένει ενσωματωμένο στον πυρήνα είτε αναπηδά πίσω. Για το βαλλιστικό όριο, το βλήμα διεισδύει στην πίσω πλάκα και είτε κολλάει στην πίσω πλάκα είτε εξέρχεται με σχεδόν μηδενική ταχύτητα [616]. Τέλος, το βλήμα εξέρχεται από την πίσω πλάκα με σημαντική ταχύτητα σε πλήρη διάτρηση. Τα σενάρια μερικής διάτρησης, βαλλιστικού ορίου και πλήρους διάτρησης απεικονίζονται στην 6.21. Η μέγιστη ενέργεια που απορροφάται από το πάνελ σάντουιτς κατά τη διάρκεια της πλήρους διάτρησης είναι γνωστή ως ενέργεια διάτρησης (Ep) [532], η οποία μπορεί να προσδιοριστεί ως η διαφορά μεταξύ της αρχικής κινητικής ενέργειας και της υπολειπόμενης κινητικής ενέργειας.



Εικόνα 6.21 Διαφορετικά σενάρια διάτρησης ενός πάνελ σάντουιτς υπό βαλλιστική κρούση (αναπαράγεται από το [507])

Η συμπεριφορά συγκέντρωσης υλικού του αυξητικού πυρήνα κάτω από τη ζώνη πρόσκρουσης αναφέρθηκε ότι είναι η πιο ωφέλιμη για την επιβράδυνση του βλήματος και ως αποτέλεσμα χαμηλότερης υπολειμματικής ταχύτητας του βλήματος [507,508,617]. Επιπλέον, το βαλλιστικό όριο και η ειδική απορρόφηση ενέργειας του πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα βρέθηκαν να είναι υψηλότερα από εκείνα του συμβατικού πάνελ σάντουιτς με εξαγωνική κηρήθρα και αφρώδες πυρήνα [618]. Μια σύγκριση των μηχανισμών παραμόρφωσης και της μεταβατικής ταχύτητας του βλήματος

σε ορθογώνια, εξαγωνικά και επανεισερχόμενα πίνακες σάντουιτς με πυρήνα κηρήθρας παρουσιάζεται στην εικόνα 6.22. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα πλαίσια του ορθογώνιου και του εξαγωνικού πυρήνα παρουσίασαν πλήρη διάτρηση υπό τη δράση ενός βλήματος με αρχική ταχύτητα 190 m/s. Από την άλλη πλευρά, ο ενισχυτικός πυρήνας επανεισόδου τράβηξε το υλικό κάτω από τη ζώνη πρόσκρουσης του βλήματος οδηγώντας σε μερική διάτρηση της δομής σάντουιτς. Ομοίως, σε σύγκριση με το ισοδύναμο πάνελ σάντουιτς με πυρήνα αφρού ίδιας μάζας και διάστασης, η βαλλιστική αντίσταση του πάνελ σάντουιτς με πυρήνα αφρού ήταν ανώτερη από εκείνη του πάνελ σάντουιτς με πυρήνα αφρού σε σχέση με την απορρόφηση ενέργειας και την υπολειπόμενη ταχύτητα του βλήματος [507]. Ο αυξητικός πυρήνας δεν είναι μόνο ωφέλιμος στις κρούσεις υψηλής ταχύτητας, αλλά επίσης αποδείχθηκε αποτελεσματική συμπεριφορά μετριασμού της δύναμης και απορρόφησης ενέργειας κάτω από τις κρούσεις χαμηλής ταχύτητας που εφαρμόζονται από κρούσεις πτώσης [513,521]. Εν τω μεταξύ, όταν ο επανεισερχόμενος αυξητικός πυρήνας φορτώνεται στην κατεύθυνση εκτός επιπέδου, η συγκέντρωση υλικού κάτω από τη ζώνη φόρτωσης δεν επιτυγχάνεται αποτελεσματικά. Ως αποτέλεσμα, η επανεισαγωγή του αυξητικού έδειξε τη χειρότερη βαλλιστική αντίσταση μεταξύ των συμβατικών εξαγωνικών, τετράγωνων, τριγωνικών και κυκλικών κυψελών από τους Wang et al. [526].



Εικόνα 6.22 Βαλλιστική αντοχή σε κρούση διαφορετικών κυψελών [508]

Καθώς οι δομές ζευκτών είναι γνωστό ότι παρουσιάζουν υψηλότερη αναλογία αντοχής προς βάρος από τις δισδιάστατες δομές κυψέλης [619,620], οι Imbalzano et al. [512] μελέτησαν την τοπική αντίσταση κρούσης ενός πάνελ σάντουιτς με πυρήνα 3D αυξητικού πλέγματος υπό ταχύτητα κρούσης

έως 200 m/s με αριθμητική προσομοίωση. Σε σύγκριση με την ισοδύναμη μονολιθική πλάκα της ίδιας περιοχής και μάζας, το πάνελ σάντουιτς με πυρήνα 3D auxetic πλέγματος μείωσε τη μετατόπιση της πίσω όψης κατά 56%. Σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας, παρόμοια απορρόφηση πλαστικής ενέργειας έδειξε ο πίνακας αυξητικού πυρήνα και η ισοδύναμη μονολιθική πλάκα. Ομοίως, μια σημαντική μείωση στην αντίδραση και τη μετάδοση του στρες από ένα 3D πλέγμα σάντουιτς αυξητικού πυρήνα (που προτείνεται για φορητές προστατευτικές συσκευές) παρατηρήθηκε από τους Faraci et al. [403]. Όπως το αυξητικό με επανεισαγωγή, το πάνελ σάντουιτς με χειρόμορφο αυξητικό πυρήνα βρέθηκε ότι αυξάνει τη βαλλιστική οριακή ταχύτητα από τους Novak et al. [517]. Ωστόσο, σε σύγκριση με τη μονολιθική πλάκα, το χειρόμορφο πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα αύξησε τη βαλλιστική οριακή ταχύτητα μόνο κατά 5%. Η απόδοση του χειρόμορφου πυρήνα μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τη χρήση εξαιρετικά όλκιμου ή ευαίσθητου υλικού στην πλάκα κάλυψης καθώς και με την πλήρωση του κενού χώρου στον πυρήνα [517,621]

Με την ίδια πυκνότητα επιφάνειας των κατασκευών, το βάθος των πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα είναι υψηλότερο από τη μονολιθική πλάκα. Ως αποτέλεσμα, μεγαλύτερος χώρος καταλαμβάνεται από τα πάνελ σάντουιτς. Λαμβάνοντας υπόψη το ίδιο βάθος της μονολιθικής πλάκας και του πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα, η μονολιθική πλάκα (σε βάρος μιας μεγαλύτερης μάζας) μπορεί να έχει υψηλότερο βαλλιστικό όριο λόγω της στερεάς φύσης της. Επιπλέον, μετά από κάποια ταχύτητα, οι μονολιθικές πλάκες μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές για τον μετριασμό της διάτρησης από τις δομές σάντουιτς. Ως εκ τούτου, συνιστάται περαιτέρω διερεύνηση σε βάθος σχετικά με το αποτελεσματικό καθεστώς των πάνελ σάντουιτς με πυρήνα για αντοχή στη διάτρηση.

6.6.3 Επίδραση κρίσιμων παραγόντων σχεδιασμού στην απόδοση προστασίας

6.6.3.1 Υλικό βάσης

Η συμπεριφορά των αυξητικών μεταϋλικών εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρά από τις ιδιότητες του βασικού υλικού [527,622]. Ως αποτέλεσμα, με την ίδια μάζα αυξητικής δομής, η επιλογή υλικών (μεταξύ των όλκιμων υλικών όπως ο χάλυβας και το κράμα αλουμινίου) του αυξητικού πυρήνα αναφέρθηκε ότι έχει αμελητέα επίδραση στην απόδοση προστασίας από εκρήξεις και κρούσεις από τους Imbalzano et al. [510.512]. Ωστόσο, για να προσφέρει το ίδιο επίπεδο προστατευτικής απόδοσης, σε σύγκριση με τον χάλυβα, το αλουμίνιο απαιτούσε μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα λόγω της χαμηλότερης αντοχής του. Επιπλέον, ένα υλικό μήτρας με υψηλότερη αντοχή διαρροής μπορεί να διατηρήσει υψηλή τάση οροπεδίου, οδηγώντας σε υψηλότερη συνολική απορρόφηση ενέργειας. Έτσι, το βασικό υλικό επηρεάζει ασήμαντα τον μηχανισμό της αυξητικής

παραμόρφωσης αλλά συντονίζει την ακαμψία, την αντοχή και την ολκιμότητα της αυξητικής δομής. Επομένως, ανάλογα με το αναμενόμενο επίπεδο απειλής, μπορεί να επιλεγεί ένα κατάλληλο υλικό μήτρας για την πρόληψη της πρώιμης πύκνωσης και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Από την άλλη πλευρά, η χρήση μιας ισχυρής πλάκας πρόσοψης επέδειξε αξιοσημείωτη βελτίωση στην αντοχή σε έκρηξη και κρούση [510,512]. Μια σύγκριση του ABS και των συνδυασμένων επικαλύψεων ABS και LDPE με έναν επανεισερχόμενο αυξητικό πυρήνα υπό κρουστική φόρτιση παρουσιάζεται από τους Remennikov et al. [521]. Κάτω από την εφαρμοζόμενη κρουστική φόρτιση, η πλάκα ABS μόνη της απέτυχε με εύθραυστο τρόπο, οδηγώντας σε ασύμμετρη παραμόρφωση του αυξητικού πυρήνα. Όταν η επάνω πλάκα ABS καλύφθηκε με μια πρόσθετη πλάκα LDPE, παρατηρήθηκε συμμετρική παραμόρφωση και καλύτερη κατανομή του φορτίου κρούσης. Έτσι, αξίζει να σημειωθεί ότι ένα κατάλληλο υλικό για την πλάκα κάλυψης είναι σημαντικό για την πλήρη αξιοποίηση της προστατευτικής απόδοσης του αυξητικού πυρήνα.

6.6.3.2 Αποτελεσματικός αρνητικός λόγος Poisson

Ο αρνητικός λόγος Poisson είναι ένα ποσοτικό μέτρο της αντίθετης παραμόρφωσης των αυξητικών δομών. Έτσι, ένα μεγαλύτερο μέγεθος του αρνητικού λόγου Poisson υποδηλώνει υψηλότερη πλευρική συρρίκνωση υπό αξονική συμπίεση. Ένας υψηλότερος αρνητικός λόγος Poisson της αυξητικής κυψέλης επανεισαγωγής αναφέρθηκε ότι είναι ευεργετικός στην προστατευτική απόδοση έναντι της φόρτισης με έκρηξη αέρα [514]. Λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας συγκέντρωσης υλικού κάτω από τη ζώνη φόρτισης (λόγω του υψηλότερου μεγέθους της αρνητικής αναλογίας Poisson), η αυξητική κυψέλη έδειξε αύξηση στην καταπόνηση του οροπεδίου και στην απορρόφηση ενέργειας έκρηξης. Επιπλέον, ένας πιο αρνητικός λόγος Poisson ενισχύει την ικανότητα μεταφοράς φορτίου κρούσης των δομών σάντουιτς [533]. Ομοίως, η αντίσταση έκρηξης ενός ισότροπου πυρήνα αυξητικού αφρού ενισχύθηκε με έναν ελάχιστο αρνητικό λόγο Poisson (δηλαδή, υψηλότερο μέγεθος αρνητικού λόγου Poisson) [530]. Όχι μόνο οι κυψέλες και οι αφροί, αλλά και οι τρισδιάστατες αυξητικές δομές επανεισόδου με μικρότερη αποτελεσματική αναλογία Poisson επέδειξαν καλύτερη προστατευτική απόδοση έναντι εκρήξεων και κρουστικών φορτίων [475,477]. Στην περίπτωση των τρισδιάστατων αυξητικών δομών επανεισόδου [510,512], μια αύξηση στην ακτίνα της αντηρίδας μείωσε την αυξητική απόκριση λόγω του περιορισμένου χώρου για παραμόρφωση και ενίσχυση της ακαμψίας. Ως αποτέλεσμα, παρατηρήθηκε σχετικά κακή προστατευτική απόδοση. Συνολικά, μια ολοένα και πιο αρνητική αποτελεσματική αναλογία Poisson φαίνεται να ενισχύει την προστατευτική απόδοση των πάνελ σάντουιτς με πυρήνα από εκρήξεις και κρούσεις.

Ο αρνητικός λόγος Poisson της αυξητικής δομής ελέγχεται από τις παραμέτρους σχεδιασμού. Στις αυξητικές δομές επανεισόδου, ένας μικρότερος λόγος διαστάσεων και λόγος μήκους οδήγησε σε υψηλότερο μέγεθος του αρνητικού λόγου Poisson και καλύτερη απορρόφηση ενέργειας υπό φόρτιση έκρηξης [518]. Οι Hassanin et al. [528] και Imbalzano et al. [510,512], παρουσίασαν μελέτες όπου ένας αυξητικός σχεδιασμός επανεισόδου με εσωτερική γωνία 30º παρήγαγε το μέγιστο μέγεθος του αρνητικού λόγου Poisson.

6.6.3.3 Πάχος τοιχώματος και πλάκας

Το πάχος του τοιχώματος κελιών του πλέγματος των αυξητικών μεταϋλικών είναι μια εξαιρετικά ευαίσθητη παράμετρος για τη προστατευτική απόδοση [524,529]. Μια αύξηση στο πάχος αυξάνει την τάση του οροπεδίου οδηγώντας σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας [511]. Επιπλέον, μια υπερβολικά αυξημένη ακτίνα αντηρίδας σε ένα τρισδιάστατο αυξητικό πλέγμα βρέθηκε να περιορίζει τον μηχανισμό λυγισμού λόγω αύξησης της ελαστικής αντοχής, οδηγώντας σε μείωση της απαγωγής ενέργειας [510,512,525]. Ως εκ τούτου, το πάχος του τοιχώματος της κυψέλης απαιτείται να σχεδιαστεί προσεκτικά ώστε να επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή διασπορά ενέργειας χωρίς να αυξάνει πολύ την ελαστική αντοχή. Ανάλογα με τις αυξητικές κατασκευές, μπορεί να απαιτούνται διαφορετικές στρατηγικές σχεδιασμού πάχους για αποτελεσματική αντίσταση παλμικού φορτίου. Για παράδειγμα, σε μια αυξητική δομή διπλής κεφαλής βέλους που υποβάλλεται σε φόρτιση έκρηξης αέρα, οι Chen et al. [520] έδειξαν ότι ο λεπτότερος τένοντας αλλά τα παχύτερα τοιχώματα γεμίσματος ενίσχυσαν την απορρόφηση ενέργειας. Οι Qi et al. [524] διαπίστωσαν ότι μια αύξηση στο πάχος του κυτταρικού τοιχώματος ήταν αποτελεσματική για την ελαχιστοποίηση της εκτροπής του πάνελ.

Η αύξηση του πάχους των πλακών ενισχύει την ακαμψία της πλάκας. Έτσι, όπως και στο συμβατικό πάνελ σάντουιτς με πυρήνα κηρήθρας [623], μια αύξηση στο πάχος της πλάκας κάλυψης βρέθηκε να μειώνει τη μέγιστη μετατόπιση του πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα, ενώ υψηλότερη SEA επιτεύχθηκε με μια λεπτότερη πλάκα κάλυψης [516,524]. Ομοίως, μια παραμετρική μελέτη μεταξύ του πάχους του πυρήνα και της πλάκας υπό βαλλιστική φόρτιση πρότεινε ότι μια παχύτερη επιφάνεια πλάκας μειώνει τη συμβολή του πυρήνα [507]. Και πάλι, στην περίπτωση των κυρτών πάνελ σάντουιτς, μια παχύτερη πίσω πλάκα ήταν πιο ωφέλιμη για τη βελτίωση της αντίστασης στην έκρηξη από μια παχύτερη μπροστινή πλάκα, επειδή η ισχυρότερη πίσω πλάκα πρόσφερε καλύτερη στήριξη στον αυξητικό πυρήνα για τη συγκέντρωση του υλικού του πυρήνα [518]. Επομένως, το πάχος της πλάκας είναι μια σημαντική παράμετρος για την πλήρη αξιοποίηση της απόδοσης του αυξητικού πυρήνα.

6.6.3.4 Σχετική πυκνότητα πυρήνα

Η σχετική πυκνότητα έχει μεγάλη επίδραση στη μηχανική απόδοση μιας αυξητικής κυτταρικής δομής [624]. Έτσι, η σχετική πυκνότητα του πυρήνα διέπει την απόδοση της έκρηξης και τις στρατηγικές σχεδιασμού των προστατευτικών πάνελ σάντουιτς [520,531]. Η σχετική πυκνότητα της αυξητικής κατασκευής επηρεάζεται από όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους σχεδιασμού. Επομένως, αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η σχετική πυκνότητα είναι ένα ολοκληρωμένο μέτρο των παραμέτρων σχεδιασμού σε κυτταρικές δομές. Η αύξηση της σχετικής πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση της τάσης του οροπεδίου και της απορρόφησης ενέργειας [558]. Ωστόσο, λόγω της μείωσης του κενού χώρου εντός της κυτταρικής δομής, η πύκνωση ξεκινά νωρίτερα με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας. Καθώς οι αυξητικοί πυρήνες μεταδίδουν μεγάλο μέγεθος τάσης στην πίσω πλάκα μετά την έναρξη της συμπύκνωσης, η σχετική πυκνότητα απαιτείται να επιλέγεται σύμφωνα με το αναμενόμενο επίπεδο παλμικού φορτίου. Επιπλέον, ένας αυξητικός πυρήνας με υψηλότερη σχετική πυκνότητα διαθέτει περισσότερο υλικό με ισχυρά διασυνδεδεμένα τοιχώματα κυψέλης στη διαδρομή του βλήματος. Έτσι, μια αύξηση στη σχετική πυκνότητα του επανεισερχόμενου αυξητικού πυρήνα βρέθηκε να αυξάνει το βαλλιστικό όριο του πάνελ σάντουιτς [507].

6.6.3.5 Αριθμός επιπέδων αυξητικών κελιών

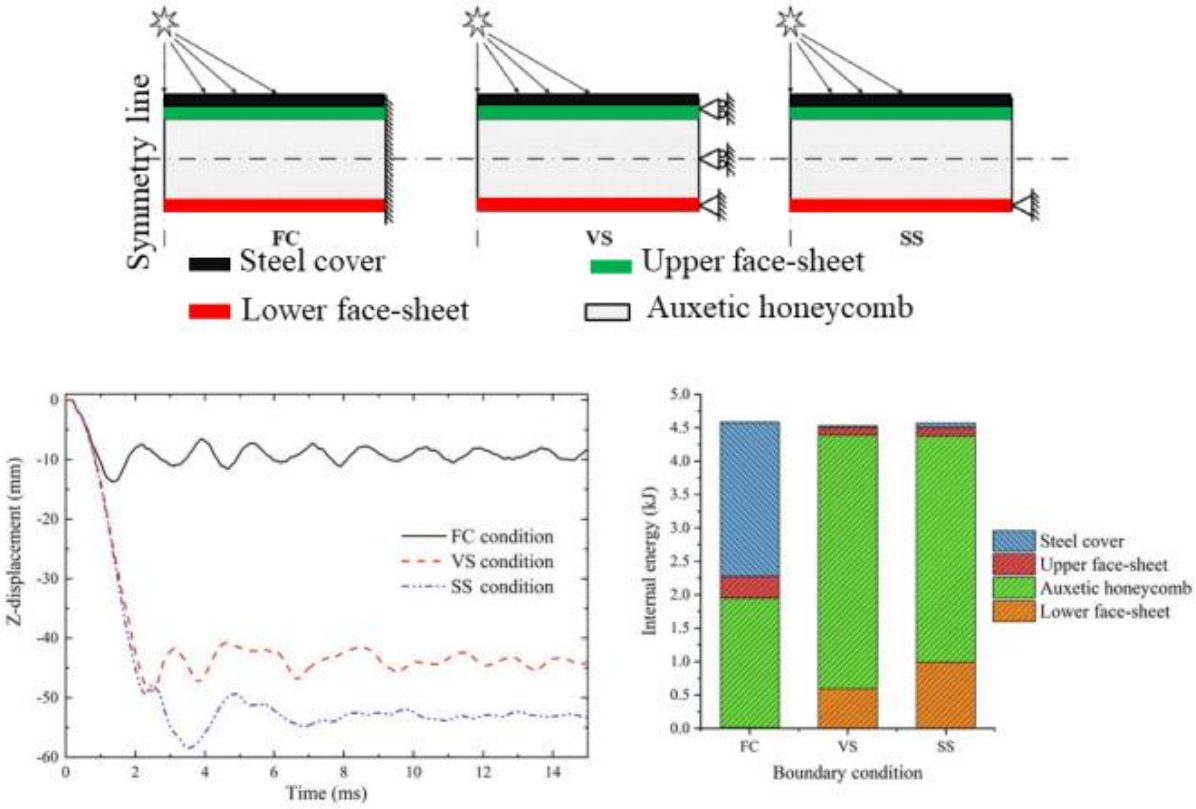
Προκειμένου να αποφευχθεί η πρώιμη πύκνωση του αυξητικού πυρήνα σε προστατευτικά πάνελ σάντουιτς, χρειάζεται να σχεδιαστεί ένας επαρκής αριθμός στρωμάτων αυξητικών μονάδων κυψελών [521]. Ομοίως, ο πυρήνας ενός πάνελ σάντουιτς απαιτείται να είναι αρκετά παχύς ώστε να αποτρέπεται η διάτρηση λόγω κρούσης βλήματος υψηλής ταχύτητας [507,508]. Οι Imbazano et al. [514] ανέφεραν ότι υπό φόρτιση με εκτόξευση αέρα, ένας υψηλότερος αριθμός στρωμάτων αυξητικής μονάδας κυψέλης επανεισόδου μείωσε αισθητά τη μέγιστη εντοπισμένη τάση στην πίσω πλάκα όψης. Στο Chen et al. [520,531], ένας υψηλότερος αριθμός αυξητικών στρωμάτων αιχμής βέλους οδήγησε σε αξιοσημείωτη μείωση της μόνιμης εκτροπής των πάνελ σάντουιτς υπό φόρτιση εκτόξευσης αέρα. Ομοίως, μια αύξηση στον αριθμό των στρωμάτων βρέθηκε να είναι ευεργετική για ένα αποτελεσματικό σύστημα προστασίας κατά των ναρκών [529]. Έτσι, μια αύξηση στον αριθμό των στρωμάτων αυξητικής κυψέλης ενισχύει την απόδοση των προστατευτικών πλαισίων θωράκισης. Ωστόσο, ένα μεγαλύτερο βάθος πάνελ σάντουιτς συνδέεται εγγενώς με μεγαλύτερο αριθμό στρωμάτων.

6.6.3.6 Διαβάθμιση κυτταρικού τοιχώματος πολλαπλών στρωμάτων

Η διαβάθμιση του πάχους του κυτταρικού τοιχώματος μπορεί να συντονίσει τον μηχανισμό παραμόρφωσης του πυρήνα που οδηγεί σε μια αλλαγή 1032 στην απόδοση [625-27]. Οι Jin et al. [511] έδειξαν ότι οι διαβαθμισμένες και διασταυρωμένες αυξητικές κυψέλες επανεισαγωγής ξεπέρασαν τις επιδόσεις της ομοιόμορφης αυξητικής κηρήθρας υπό φόρτιση με εκτόξευση αέρα. Αξιολογήθηκαν με βάση την απορρόφηση ενέργειας και τον έλεγχο εκτροπής, και φάνηκε ότι μια υψηλότερη πυκνότητα στο ανώτερο στρώμα (σχεδόν εκρηκτικό) της αυξητικής κυψέλης οδήγησε σε ενισχυμένη αντίσταση στην έκρηξη τόσο σε κανονική όσο και σε διασταυρούμενη ταξινόμηση [511]. Ομοίως, σε έναν τρισδιάστατο χειρόμορφο αυξητικό πυρήνα με τρία πάχη αντηρίδας, το μέγεθος των αντηρίδων στην πλευρά της εκρηκτικής έκρηξης βρέθηκε να διέπει την παγκόσμια παραμόρφωση των πάνελ σάντουιτς [516]. Εκτός από την ταξινόμηση του πάχους του κυτταρικού τοιχώματος, η ταξινόμηση γωνίας επανεισόδου αναφέρθηκε ότι είναι ευεργετική για την ενίσχυση της απορρόφησης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της μέγιστης ελαστικής καταπόνησης υπό κρούση σύνθλιψης [560]

6.6.3.7 Συνοριακές συνθήκες

Με βάση τη δοκιμή έκρηξης και επικυρωμένο αριθμητικό μοντέλο στο Qi et al. [513], οι Qi et al. [524] διεξήγαγαν περαιτέρω μια παραμετρική μελέτη σε πάνελ σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα για αξιολόγηση της προστατευτικής απόδοσης υπό φόρτιση εκρήξεων από κοντά. Ως παράμετροι για την αξιολόγηση της αντίστασης στην έκρηξη ελήφθησαν η μέγιστη εκτροπή και η επιφανειακή SEA. Αναφέρθηκε ότι οι επιδόσεις αντίστασης έκρηξης των πάνελ ήταν πιο ευαίσθητες στις παραμέτρους του πάχους παρά στις γεωμετρικές παραμέτρους. Αν και η μέγιστη απόκλιση επηρεάστηκε από τις διαφορετικές οριακές συνθήκες, η συνολική απορρόφηση ενέργειας δεν επηρεάστηκε από τη διακύμανση των οριακών συνθηκών. Ωστόσο, η κατανομή της απορρόφησης ενέργειας στο προστατευτικό σύστημα άλλαξε. Η απόκλιση και η απορρόφηση ενέργειας του συστήματος προστασίας κάτω από διαφορετικές οριακές συνθήκες φαίνονται στην εικ. 6.23. Αναφέρεται ότι τα FC, VS και SS αντιπροσωπεύουν συνθήκες σταθερής κατάστασης, κατακόρυφης ολίσθησης και απλής στήριξης της προστατευτικής δομής σάντουιτς στην εικ. 6.23, αντίστοιχα. Υπό τις σταθερές συνθήκες, ο αυξητικός πυρήνας απορρόφησε τη μικρότερη ποσότητα ενέργειας με ελάχιστη απόκλιση. Όταν ο πυρήνας είναι πλήρως συγκρατημένος, ενδέχεται να μην επιτευχθεί η αυξητική παραμόρφωση. Ως αποτέλεσμα, η συνεισφορά του αυξητικού πυρήνα στην απορρόφηση ενέργειας μπορεί να έχει μειωθεί κάτω από συνθήκες πλήρους περιορισμού.



Εικόνα 6.23 Επίδραση της οριακής συνθήκης στην απόκλιση του πίνακα και στην απορρόφηση ενέργειας [524]

6.6.3.8 Καμπυλότητα πάνελ

Μια μεγαλύτερη καμπυλότητα των πάνελ σάντουιτς ενισχύει την ακαμψία κάμψης τους. Ως αποτέλεσμα, η επίδραση της συγκέντρωσης υλικού του πυρήνα της αυξητικής κυψέλης βελτιώνεται οδηγώντας σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας [518]. Επιπλέον, η καμπυλότητα αλλάζει την ανακλαστική γωνία του ανακλώμενου κύματος έκρηξης, γεγονός που ελαχιστοποιεί την ώθηση στην μπροστινή πλάκα της δομής σάντουιτς [628]. Ως εκ τούτου, τα πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα σε σχήμα τόξου έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για να αντιστέκονται τόσο σε φορτίσεις έκρηξης [518,525] όσο και σε βαλλιστικές κρούσεις [522].

6.6.3.9 Υλικό πλήρωσης

Οι Chen et al. [531] γέμισαν αυξητική κυψέλη διπλής κεφαλής βέλους με ελαφρύ αφρό πολυουρεθάνης (PU) και την υπέβαλαν σε φόρτιση αέρα με εκτόξευση. Σε σύγκριση με το πλαίσιο του κοίλου κυψελωτού πυρήνα, το πλαίσιο γεμάτο με αφρό μείωσε τη μετατόπιση της πίσω όψης σχεδόν στο μισό. Επιπλέον, με βάση την απόδοση των πάνελ με ισοδύναμη μάζα, η πλήρωση με αφρό PU βρέθηκε να είναι πιο ωφέλιμη για την αντίσταση στο φορτίο έκρηξης από την αύξηση του πάχους

του τοιχώματος κυψέλης. Έτσι, αξίζει να σημειωθεί ότι οι αυξητικές κυψέλες γεμάτες με αφρό προσφέρουν καλύτερη προστασία από τους κραδασμούς. Η ενισχυμένη αντίσταση έκρηξης της γεμισμένης με αφρό αυξητικής κυψέλης επιβεβαιώνεται περαιτέρω από την παρατηρούμενη υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας και ολκιμότητα υπό μονοαξονική στατική και δυναμική συμπίεση των γεμισμένων αυξητικών κυψελών [559,596,629].

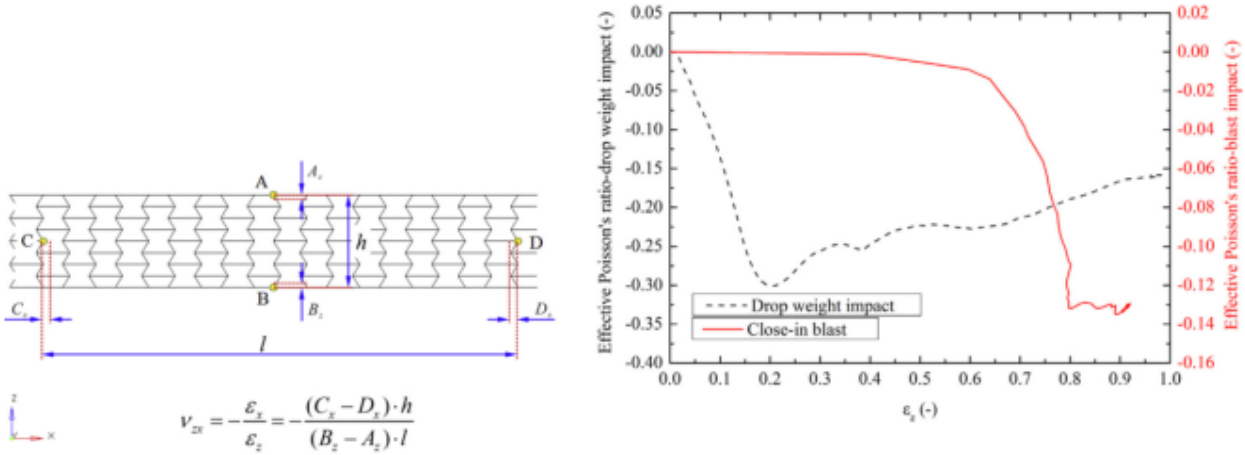
6.6.3.10 Ώθηση έκρηξης και ρυθμός καταπόνησης

Οι Imbazano et al. [510] μετέβαλαν το βάρος φόρτισης TNT από 50 g έως 300 g διατηρώντας σταθερή την απόσταση αναμονής (100 mm). Κάτω από τους υψηλότερους παλμούς, ένας τρισδιάστατος επανεισερχόμενος αυξητικός πυρήνας συμπιέστηκε γρήγορα οδηγώντας σε μια ταχεία τοπική συμπύκνωση στο κέντρο. Ως αποτέλεσμα, μετά την υπέρβαση της οριακής ώθησης των 4,8 MPa·ms, η μέγιστη απόκλιση του πλαισίου αυξητικού πυρήνα ήταν υψηλότερη από το ισοδύναμο συμπαγές πλαίσιο. Ωστόσο, κάτω από την κάτω ώθηση, ο πίνακας του αυξητικού πυρήνα ξεπέρασε την απόδοση της μονολιθικής πλάκας. Σε αντίθεση με τη σταθερή απόσταση αναμονής στο Imbalzano et al. [510], 1082 οι Kalubadanage et al. [529] μελέτησαν την απόκριση μιας δομής αυξητικής κυψέλης επανεισόδου μεταβάλλοντας την απόσταση ακινητοποίησης της έκρηξης μεταξύ 175 mm έως 700 mm υπό έκρηξη 1 kg υγρού νιτρομεθανίου. Μια αύξηση στην αποτελεσματική αρνητική αναλογία Poisson's παρατηρήθηκε με μια αύξηση στην απόσταση αναμονής. Όταν το φορτίο απομακρύνθηκε περισσότερο από τη δομή, η ένταση και ο εντοπισμός του φορτίου έκρηξης μειώθηκαν. Ως αποτέλεσμα, η αυξητική δομή έχει περισσότερο χρόνο για να ανταποκριθεί. Επιπλέον, η σχετικά ομοιόμορφη κατανομή φορτίου οδηγεί σε υψηλότερη αρνητική αναλογία Poisson φορτώνοντας μια μεγαλύτερη περιοχή της μπροστινής πλάκας. Επιπλέον, σε μια έκρηξη κοντινής εμβέλειας (Z= 0,30 $m/kg^{1/3}$), παρατηρήθηκε αμελητέα επίδραση της εσωτερικής γωνίας λόγω γρήγορης παραμόρφωσης. Έτσι, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η προστατευτική απόδοση ενός αυξητικού πυρήνα είναι πιο εντυπωσιακή υπό χαμηλότερη ώθηση λόγω του επαρκούς χρόνου για να ανταποκριθεί με μια αυξητική συμπεριφορά.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης έκρηξης και πρόσκρουσης, η αποτελεσματική αναλογία Poisson δεν παραμένει σταθερή. Μια γραφική παράσταση του λόγου του δυναμικού Poisson κατά τη διάρκεια φορτίσεων εκτόξευσης και κρούσης από κοντά φαίνεται στην εικ. 6.24. Ο αποτελεσματικός λόγος Poisson κατά τη δυναμική φόρτιση στο Qi et al. [513] εκτιμήθηκε με βάση τους Pastorino et al. [531]. Αν και ο επαναεισερχόμενος αυξητικός πυρήνας εμφάνισε αρνητικό λόγο Poisson και στις δύο δυναμικές φορτίσεις, το μέγεθος του αρνητικού λόγου Poisson ποικίλλει ανάλογα με τους ρυθμούς

παραμόρφωσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι ρυθμοί καταπόνησης για εφαρμοσμένα φορτία πρόσκρουσης με έκρηξη και πτώση βάρους στο Qi et al. [513] ήταν περίπου 1000 s^{-1} και 100 s^{-1}, αντίστοιχα. Κάτω από τον εντοπισμένο αντίκτυπο (ρυθμός παραμόρφωσης ~100 s^{-1}), ο αρνητικός λόγος Poisson έπεσε γραμμικά στην ελάχιστη τιμή και στη συνέχεια αυξήθηκε γραμμικά στη συνέχεια. Από την άλλη πλευρά, κάτω από τη στενή φόρτιση έκρηξης (ρυθμός καταπόνησης ~1000 s^{-1}), ο αποτελεσματικός λόγος Poisson's παρέμεινε σχεδόν μηδενικός μέχρι την αξονική τάση 0,6 και στη συνέχεια έπεσε απότομα. Κάτω από σχετικά χαμηλότερο ρυθμό παραμόρφωσης, η ταχύτητα του κύματος τάσης και η ταχύτητα φόρτωσης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, οδηγώντας σε γρήγορη απόκριση του αυξητικού πυρήνα. Όταν ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σχετικά υψηλότερος (φόρτιση έκρηξης), το κρουστικό κύμα διαδίδεται πολύ πιο γρήγορα από το κύμα τάσης. Ως αποτέλεσμα, ο αυξητικός πυρήνας δεν μπορούσε να ανταποκριθεί γρήγορα με αποτέλεσμα να εμφανίσει την αρνητική αναλογία Poisson σε υψηλότερη αξονική παραμόρφωση [513]. Καθώς η προστατευτική απόδοση είναι ανάλογη με το μέγεθος του αρνητικού λόγου Poisson, αξίζει να σημειωθεί ότι η ίδια δομή μπορεί να έχει διαφορετικές προστατευτικές επιδόσεις κάτω από διάφορα φορτία ρυθμού καταπόνησης

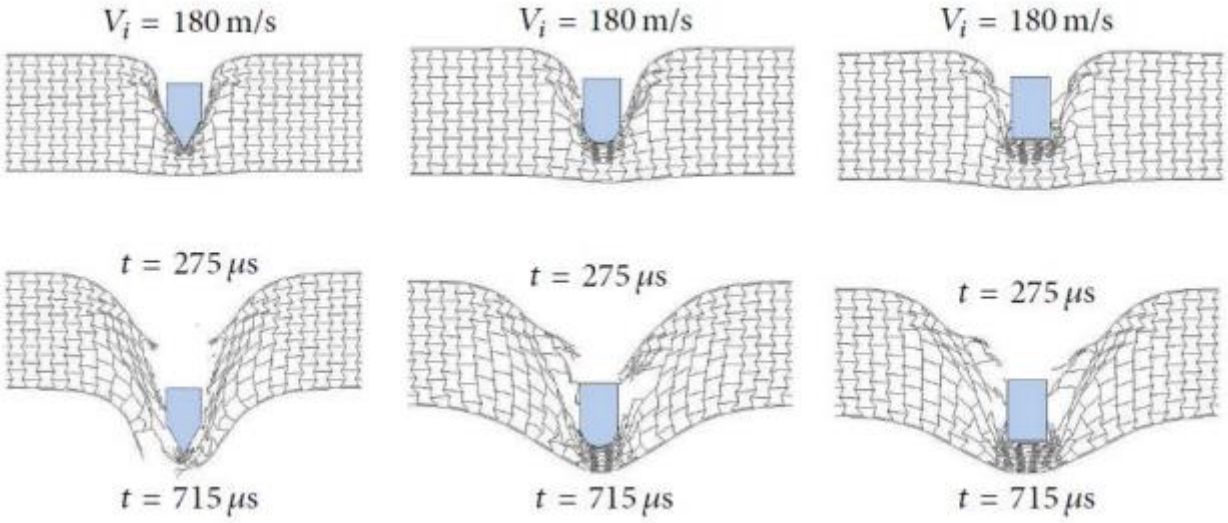
Ομοίως, ανάλογα με την ταχύτητα πρόσκρουσης, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η απόδοση βαλλιστικής προστασίας μιας δομής σάντουιτς με πυρήνα κηρήθρας [507]. Από την άλλη πλευρά, σε αντίθεση με τις αυξητικές κηρήθρες, η δομή του αυξητικού πλέγματος μπορεί να μην έχει αρκετό χρόνο για να παραμορφωθεί σε κρούση βλήματος υψηλής ταχύτητας που οδηγεί σε κατώτερη απόδοση [532]



Εικόνα 6.24 Ο αποτελεσματικός λόγος Poisson υπό έκρηξη και κρούση [513]

6.6.3.11 Γεωμετρία βλήματος

Η απόδοση των πάνελ σάντουιτς υπό βαλλιστική κρούση επηρεάζεται από το προφίλ της μύτης του βλήματος [508,516,533-535]. Οι διατρήσεις του επανεισερχόμενου αυξητικού πυρήνα υπό βαλλιστική κρούση με τρία διαφορετικά σχήματα μύτης (κωνικό, ημισφαιρικό και αμβλύ) φαίνονται στην εικ. 6.25. Παρά το γεγονός ότι έχει τον ίδιο γεωμετρικό σχεδιασμό και υλικό του αυξητικού πυρήνα καθώς και την ίδια αρχική κρούση ταχύτητα, σημαντικά διαφορετικά επίπεδα διάτρησης μπορούν να παρατηρηθούν με διάφορα βλήματα. Μεταξύ των δεικνυόμενων βλημάτων, το αμβλύ σχήμα είχε τη μέγιστη επιφάνεια επαφής με τον επαναεισερχόμενο αυξητικό πυρήνα. Ως αποτέλεσμα, μεγαλύτερη ποσότητα υλικού ρέει κάτω από την αμβλεία μύτη οδηγώντας σε σχετικά υψηλότερη αντίσταση στη διείσδυση από τα κωνικά και ημισφαιρικά σχήματα [508]. Ωστόσο, η αύξηση στις ταχύτητες των βλημάτων μειώνει την επίδραση του σχήματος του βλήματος στη βαλλιστική απόκριση των δομών της κηρήθρας λόγω της εξέλιξης των κυμάτων τάσης και της εντοπισμένης βλάβης [536].



Εικόνα 6.25 Επιδράσεις της γεωμετρίας της μύτης του βλήματος στη βαλλιστική αντίσταση της αυξητικής δομής [508]

Κεφάλαιο 7ο Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάστηκαν οι πρόσφατες πρόοδοι σε ελαφριές, υψηλής ενέργειας απορρόφησης αυξητικές δομές για να αντιστέκονται σε εκρήξεις και τοπικά φορτία κρούσης. Προσδιορίστηκαν κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού της ασπίδας προστασίας του αυξητικού πυρήνα και συζητήθηκαν οι επιδράσεις κάθε παραμέτρου στην προστατευτική απόδοση. Δόθηκε προσοχή στην ταξινόμηση των σύγχρονων αυξητικών τοπολογιών και στην μεγάλης κλίμακας κατασκευή αυξητικών κατασκευών για αμυντικές εφαρμογές. Επιπλέον, εξετάστηκαν οι ρυθμίσεις δοκιμών έκρηξης και πρόσκρουσης και οι στρατηγικές αριθμητικής μοντελοποίησης αυξητικών κατασκευών.

Οι αναθεωρημένες μελέτες είναι προφανές ότι οι δομές σάντουιτς με αυξητικό πυρήνα πρόσφεραν πολλά υποσχόμενη αντοχή σε έκρηξη και κρούση. Το επίπεδο της προστατευτικής απόδοσης ποικίλλει ανάλογα με τον μεμονωμένο σχεδιασμό και τον τύπο των αυξητικών κατασκευών. Καθώς η αρνητική αναλογία Poisson είναι ανάλογη με τον όγκο του υλικού που έλκεται κάτω από τη ζώνη κρούσης, το μεγαλύτερο μέγεθος της αρνητικής αναλογίας Poisson ήταν πιο ευεργετικό για τον μετριασμό των εντοπισμένων φορτίων έκρηξης και κρούσης. Ωστόσο, ένα μεγαλύτερο μέγεθος του αρνητικού λόγου Poisson μπορεί να μην έχει το ίδιο όφελος κάτω από επίπεδα φορτία όπως οι εκρήξεις σε μακρινό πεδίο. Έτσι, συνιστάται η περαιτέρω διερεύνηση της αποτελεσματικότητας προστασίας των αυξητικών κατασκευών κάτω από διαφορετικά μεγέθη εκρηκτικών φορτίων σε μακρινό πεδίο για να εμπλουτιστεί η γνώση σε αυτόν τον τομέα. Σε σύγκριση με τις ισοδύναμες συμβατικές προστατευτικές δομές, όλες οι προστατευτικές δομές με βάση την αυξητική διερεύνηση παρουσίασαν υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας και πιο αποτελεσματικό μετριασμό δυναμικής δύναμης. Επιπλέον, η συγκέντρωση υλικού και η ενισχυμένη αντίσταση εσοχής βελτίωσαν το βαλλιστικό όριο των δομών σάντουιτς. Επιπλέον, σε αντίθεση με την τοπική αστοχία (προκαλούμενη από διάτμηση) των συμβατικών κυψελωτών κατασκευών, οι αυξητικές δομές επέτρεψαν τη συνολική παραμόρφωση που οδηγεί σε μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού φορτίου στην προστατευμένη κατασκευή. Περαιτέρω, μελέτες αποκάλυψαν ότι ο αυξητικός πυρήνας γεμάτος με αφρό ήταν πιο αποτελεσματικός στον μετριασμό των φορτίων έκρηξης από την κοίλη αυξητική κυψέλη.

Κάτω από πολύ υψηλά φορτία παραμόρφωσης, το κρουστικό κύμα διαδίδεται πολύ πιο γρήγορα από το κύμα τάσης. Ως αποτέλεσμα, οι αυξητικές δομές μπορεί να μην παραμορφώνονται αρκετά γρήγορα ώστε να παρουσιάζουν αρνητικό λόγο Poisson υπό τη δράση ενός εξαιρετικά δυναμικού φορτίου. Συνεπώς, τα πλεονεκτήματα της αυξητικής παραμόρφωσης μπορεί να μην αξιοποιηθούν υπό τη δράση της φόρτισης πολύ υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης. Ως εκ τούτου, ενθαρρύνεται η έρευνα στον τομέα

των έξυπνων αυξητικών δομών που μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα για να μετριάσουν τις επιπτώσεις των κρουστικών κυμάτων. Επιπλέον, παρά την ανάπτυξη πολυάριθμων νέων αυξητικών σχεδίων με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και βελτιωμένη απορρόφηση ενέργειας, η αντοχή σε εκρήξεις και κρούση των νέων αυξητικών κατασκευών εξακολουθεί να λείπει στη βιβλιογραφία. Η αντοχή σε έκρηξη και κρούση υβριδικών και άλλων νέων δομών συνιστάται ιδιαίτερα να διερευνηθεί μέσω πειραματικών, αριθμητικών και θεωρητικών προσεγγίσεων.

Η χρήση συμβατικών μεταλλικών πλακών ως όψεων σε πάνελ σάντουιτς αυξητικού πυρήνα αυξάνει το συνολικό βάρος των προστατευτικών δομών. Η αντικατάσταση των συμβατικών βαρέων πλακών με ελαφριές, υψηλής απόδοσης, αυξητικές νανο-αρχιτεκτονικές πλάκες θα έχει σίγουρα ως αποτέλεσμα μια εξαιρετικά ελαφριά και αποτελεσματική προστατευτική δομή. Ως εκ τούτου, πρέπει να δοθεί προσοχή στην ανάπτυξη νανο-αρχιτεκτονικών πλακών με ρυθμιζόμενες ιδιότητες για προστατευτικές εφαρμογές.

Οι μέθοδοι προσθετικής παραγωγής επέτρεψαν την κατασκευή των πολύπλοκων αυξητικών δομών σε μικρή κλίμακα, οι οποίες ήταν εξαιρετικά χρήσιμες για την κατανόηση των θεμελιωδών φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των αναπτυγμένων αυξητικών δομών. Ωστόσο, η ίδια η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής περιλαμβάνει αρκετούς περιορισμούς, όπως το μέγεθος και ο χρόνος εκτύπωσης, η ποιότητα του προϊόντος, οι επιλογές υλικών και η υψηλή ευαισθησία σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Κατά συνέπεια, δεν έχει επιτευχθεί ακόμη μεγάλης κλίμακας κατασκευή και εμπορευματοποίηση αυξητικών κατασκευών με τεχνικές προσθετικής κατασκευής. Επομένως, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με βελτιώσεις της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας αυξητικών κατασκευών.

Ορισμένοι πρωτοπόροι ερευνητές χρησιμοποίησαν με επιτυχία τη χειροκίνητη τεχνική αναδίπλωσης φύλλων για να κατασκευάσουν πρωτότυπα μεγάλης κλίμακας των σχετικά απλούστερων αυξητικών τοπολογιών (re-entrant και αιχμή βέλους) για δοκιμές εκτόξευσης πεδίου. Ωστόσο, η επίπονη χειρωνακτική κατασκευή, η απαίτηση απλοποίησης του σχεδιασμού και η αποκόλληση παρέμειναν ως τα μειονεκτήματα της μεθόδου αναδίπλωσης του φύλλου. Αν και η αυτοματοποίηση της μεθόδου αναδίπλωσης των φύλλων με μηχανές CNC στα εργοστάσια μπορεί να μειώσει τις χειρωνακτικές ανθρώπινες προσπάθειες, μπορεί να μην είναι εφικτό να κατασκευαστεί πολύπλοκη auxetic αρχιτεκτονική με αυτή τη μέθοδο.

Ως μελλοντική προοπτική για μεγάλης κλίμακας αυξητική κατασκευή για τον μετριασμό των φορτίων έκρηξης και πρόσκρουσης σε υποδομές, η σπονδυλωτή κατασκευή αυξητικών κατασκευών μπορεί να

είναι μια εναλλακτική μέθοδος. Ο συνδυασμός μεθόδων προσθετικής κατασκευής και διακριτών μεθόδων συναρμολόγησης ξεπερνά τον περιορισμό μεγέθους των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Έτσι, η μέθοδος διακριτής συναρμολόγησης με κατάλληλα σχεδιασμένους αρμούς έχει μεγάλη δυνατότητα να κατασκευάζει με επιτυχία αυξητικές κατασκευές μεγάλης κλίμακας με πολύπλοκες γεωμετρίες.

Συνολικά, οι αυξητικές κατασκευές έχουν αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν ανώτερες αντιεκρηκτικές και κρουστικές επιδόσεις, γεγονός που τις καθιστά εξαιρετικά κατάλληλες για σύγχρονες ελαφριές αμυντικές δομές. Ωστόσο, η εμπορική χρήση των προστατευτικών δομών με βάση τα αυξητικά σε υποδομές βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο λόγω αρκετών περιορισμών, συμπεριλαμβανομένων των προκλήσεων κατασκευής μεγάλης κλίμακας.

Βιβλιογραφία

[63]. Stewart, I. B.; Stewart, K. L.; Worringham, C. J.; Costello, J. T. Physiological Tolerance Times While Wearing Explosive Ordnance Disposal Protective Clothing in Simulated Environmental Extremes. *PLoS ONE* **2014,** *9* (2), e83740.

[64]. Costello, T.; Stewart, K.; Stewart, I. Inside the 'Hurt Locker': The Combined Effects of Explosive Ordnance Disposal and Chemical Protective Clothing on Physi- ological Tolerance Time in Extreme Environments. *Ann. Occup. Hyg.* 2015, *59* (7), 922–931.

[65]. Foust, C. Industry Analysis for Body Armour Procurement. Theses. Naval Post- graduate School: Monterey, CA, 2006.

[67]. Yadav, R.; Naebe, M.; Wanga, X.; Kandasubramanian, B. Body Armour Materials: From Steel to Contemporary Biomimetic Systems. *RRSC Adv.* **2017,** 116–125.

[68]. Yuan,Q.; Liu, Y.; Gong, Z.; Qian, M. The Application of PA/CF in Stab Resistance Body Armour. In 2017 Global Conference on Polymer and Composite Materials

[69]. Hosur, V; Mayo J.; Wetzel, E.; Jeelani, S. Studies on the Fabrication and Stab Resistance Characterization of Novel Thermoplastic-Kevlar Composites. *Solid State Phenom.* **2008,** *136*, 83–92.

[70]. Fangyu, C.; Li, Z.; Yihao, T.; Xiaoming, Z. An Analytical Modeling for High-velocity Impacts on Woven Kevlar Composite Laminates. *JME.* December 2017, Vol. 5, Issue 4, 249–256.

[74]. Johnson, A. Establishing Design Characteristics for the Development of Stab Resistant Laser Sintered Body Armor. PhD Thesis, Loughborough University, UK, November, 2014.

[75]. Browning, A.; Ortiz, C.; Boyce, M. Mechanics of Composite Elasmoid Fish Scale Assemblies and Their Bioinspired Analogues. *J. Mech. Behav. Biomed.* **2013,** *19*, 75–86.

[76]. Nayak, R.; Crouch, I.; Kanesalingam, S.; Ding, J.; Tan, P.; Lee, B.; Miao, M.; Ganga, D.; Wang, L. Body Armor for Stab and Spike Protection, Part 1: Scientific Literature Review. *Text Res. J.* **2018,** *88* (7), 812–832.

[77]. Park. H.; Branson, D.; Petrova, A.; et al. Impact of Ballistic Body Armour and Load Carriage on Walking Patterns and Perceived Comfort. *Ergonomics* **2013,** *56*, 1167–1179.

[78]. Yoo, S.; Barker, R. Comfort Properties of Heat Resistant Protective Workwear in Varying Conditions of Physical Activity and Environment. Part II: Perceived Comfort Response to Garments and Its Relationship to Fabric Properties. *Text Res. J.* **2005,** *75*, 531–539.

[79]. Phillips, M.; Bazrgari, B.; Shapiro, R. The Effects of Military Body Armour on the Lower Back and Knee Mechanics During Toe-Touch and Two-Legged Squat Tasks. *Ergonomics* **2015,** *58,* 492–503.

[80]. Armstrong N.; Gay L. The Effect of Flexible Body Armour on Pulmonary Function. *Ergonomics* **2016,** *59* (5), 692–696.

[81]. Majumdar, D.; Srivastava, K.; Purkayastha, K.; Pichan, G.; Selvamurthy, W. Physiological Effects of Wearing Heavy Body Armour on Male Soldiers. *Int. J. Ind. Ergon*. **1997,** *20* (2), 155–161.

[82]. Carr, D.; Lankester, C.; Peare, A.; Fabri, N.; Gridley, N. Does Quilting Improve the Fragment Protective Performance of Body Armour? *Text Res. J.* **2012,** *82* (9) 883–888.

[83]. Bilisik, A.; Turhan, Y. Multidirectional Stitched Layered Aramid Woven Fabric Structures and Their Experimental Characterization of Ballistic Performance. *Text Res. J.* **2009,** *79* (14), 1331–1343.

[84]. El Messiry, M; El-Tarfawy, S. *Effect of Fabric Properties on Yarn Pulling Force for Stab Resistance Body Armour*. Sixth World Conference on 3D Fabrics and Their Applications. North Carolina State University (NCSU), Raleigh, NC, USA, May 26–28, 2015

[85]. El Messiry, M. Natural Fiber Textile Composite Engineering; Apple Academic Press Inc.: USA, 2017.

[92]. Grujicic, M.; Hariharan, A.; Pandurangan, B.; Yen,C.; Cheeseman, B.; Y. Wang, Y.; Y. Miao, Y.; Zheng, J. Fiber-Level Modeling of Dynamic Strength of Kevlar KM2 Ballistic Fabric. J. Mater Eng. Perform. 2012, 21, 1107–1119.

[93]. Ning, P. Theoretical Determination of the Optimal Fiber Volume Fraction and Fiber–Matrix Property Compatibility of Short Fiber Composites. Polym. Compos. 1993, 14 (2), 85–93.

[94]. El Messiry, M. Theoretical Analysis of Natural Fiber Volume Fraction of Reinforced Composites. AEJ. 2013, 52, (3), 301–306.

[95]. Matsudaira, M.; Tan, Y.; Kondo, Y. The Effect of Fiber Cross-sectional Shape on Fabric Mechanical Properties and Handle. J. Text. Inst. 1993, 84, (3), 376–386.

[96]. Karaca, E.; Omeroglu, S.; Becerir, B. Effects of Fiber Cross-Sectional Shapes on Tensile and Tearing Properties of Polyester Woven Fabrics. Text. Confect. 2015, 25(4), 313–318.

[97]. Karaca, E.; Kahraman, N.; Omeroglu, S.; Becerir, B. Effects of Fiber Cross Sectional Shape and Weave Pattern on Thermal Comfort Properties of Polyester Woven Fabrics. Fibres Text. East. Eur. 2012, 20, 3(92), 67–72.

[99]. Hearle, J. (Ed) High-performance fibers. Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, UK, 2001.

[100]. Zhu, D.; Mobasher, B.; Rajan, S. Dynamic Tensile Testing of Kevlar 49 Fabrics. J. Mater Civil Eng. 2011, 1–10.

[101]. Zupin, Z.; Dimitrovski, K. Mechanical Properties of Fabrics Made from Cotton and Biodegradable Yarns Bamboo, SPF, PLA in Weft. Woven Fabric Engineering, Polona Dobnik Dubrovski (Ed.),

[102]. Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications; National Research Council. Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications. National Academies Press; 2011. High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites.

[106]. Mayo, Jr.; Wetzel, E. Cut Resistance and Failure of High-Performance Single Fibers. Text. Res. J. 2014, 84 (12), 1233–1246.

[107]. Boron. The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, Zoghi, M., Ed.

[109]. Huang, X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers. Mater 2009, 2, 2369–2403;

[114]. Farced, A.; Schiroky, G. Microstructure and Properties of Nextel™ 610 Fiber Reinforced Ceramic and Metal Matrix Composites. Proceedings of the 18th Annual Confer- ence on Composites and Advanced Ceramic Materials—A: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 15, Editor(s): John B. Wachtman Jr. 1994, 344−352.

[119]. Ceramic Fibers and Coating. Advanced Materials for the Twenty-First Century. Committee on Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites, Commis- sion on Engineering and Technical Systems, National Research Council, Publication NMAB-494.

[121]. Kalebek, N.; Babaarslan, O. Fiber Selection for the Production of Nonwovens, Chapter 1, “Non-woven Fabrics,”Han-Yong Jeon (Ed.), IntechOpen, Yasuda, H.; Ban, K.; Ohta, Y. Advance Fiber Spinning Technology; Woodhead, N. (Ed.), Cambridge: UK, 1994.

[122]. El Messiry, M.; Eltahan, E. Stab Resistance of Triaxial Woven Fabrics for Soft Body Armor. J. Ind. Text. 2016, 45 (5), 1062–1082.

[123]. El Messiry, M.; Ibrahim, S. Investigation of Sonic Pulse Velocity in Evaluation of Knitted Fabrics. J. Ind. Text. 2016, 46 (2), 455–472.

[124]. Lafitte, M.; Bunsell, A. The Creep of Kevlar 29 Fibers. Polym. Eng. Sci. 1985, 25 (3),182–187.

[125]. Fette, R.; Marjorie F.; Sovinsk, M. Vectran Fiber Time- Dependent Behavior and Additional.

[128]. Yamanaka, A.; Takao, T. Thermal Conductivity of High-Strength Polyethylene Fiber and Applications for Cryogenic Use. ISRN Mater Sci. 2011, 2011, Article ID 718761, 1–10.

[129]. Wang, X.; Ho, V.; Segalman, R.; Cahill, D. Thermal Conductivity of High-Modulus Polymer Fibers. Macromolecules 2013, 46, 4937−4943.

[130]. Kawabata, S.; Rengasmy, R. Thermal Conductivity of Unidirectional Fiber Composites Made from Yarns and Computation of Thermal Conductivity of Yarns. IJFTR 2002, 27, 217–223.

[131]. Bogaty, H.; Norman. S.; Hollies, N.; Harris, M. Some Thermal Properties of Fabrics Part I: The Effect of Fiber Arrangement. Text. Res. J. 1957, 27, (6), 445–449.

[138]. Bourbigot, S.; Flambard, X. Heat Resistance and Flammability of High Performance Fibres: A Review. Fire Mater 2002, 26, 155–168.

[141]. Ozgen, B. Physical Properties of Kevlar and Nomex Plied and Covered Yarns. Text. Res. J. 2012, 83 (7), 752–760.

[142]. Dyneema® Heat Resistant of Fibers. Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber from DSM Dyneema UHMWPE Fiber Combines Excellent Mechanical Properties with Low Density, Resulting in High Performance-on-Weight Basis.

[144]. Liu, X; Yu, W. Degradation of PBO Fiber by Heat and Light. RJTA 2006, 10 (1), 26–32.

[146]. Liu, X.; Yu, W. Evaluation of the Tensile Properties and Thermal Stability of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Fibers. J. Appl.Polym. Sci. 2005, 97, 310–315.

[149]. Dempsey, P.; Handcocka, P.; Rehrer, N. Impact of Police Body Armor and Equipment on Mobility. Appl. Ergon 2013, 44 (6), 957–961.

[150]. Chu, Y. Surface Modification to Aramid and UHMWPE Fabrics to Increase Inter- yarn Friction for Improved Ballistic Performance. Ph.D. Thesis, School of Materials, University of Manchester, 2015.

[153]. Cybulska M. In Dynamic Loading and Tensile Behavior of Staple Yarns. The Fiber Society 2005 Spring Conference, Technical Textiles from Fiber to Composites, 25–27 May 2005.

[154]. Goetzendorf-Grabowska, B.; Karaszewska, A.; Vlasenko, V. et al. Bending Stiffness of Knitted Fabrics – Comparison of Test Methods. Fibres Text. East. Eur. 2014, 22, 43–50.

[155]. Hussain, G.; Iyer, K.; Patil, N. Sonic Modulus of Cotton Yarn and its Relationship with Recovery Parameters. Text. Res. J. 1984, 54–61.

[156]. Rousselle, M.; Nelson, M. Sonic Pulse Velocity in Fabrics: Is it Related to Abrasion Resistance. Text. Res. J. 1980, 50, 211.

[157]. El-Shiekh, A. The Dynamic Modulus and Some Other Properties of Viscose-polyester Blends. Text. Res. J. 1974, 44, 343–343.

[158]. ElMessiry, M; Ibrahim, S. Investigation of Sonic Pulse Velocity in Evaluation of Knitted Fabrics. J. Ind. Text. 2016, 46 (2) 455–472.

[159]. Subramaniam, V.; Muthukrishnan, P.; Nai, V. Sonic Modulus of Cotton Yarn and its Relationship to Abrasion Resistance, Friction, and Dynamic Loading Parameters. Text. Res. J. 1991, 61, 58.

[160]. Kremenakova, D.; Militky, J. In Acoustic Dynamic Modulus of Staple Yarns. The 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion, 3–4 July 2012, Bangkok, Thailand, 2012.

[161]. Kremenakova, D.; Militky, J.; Pivonkova, D. In Structure and Mechanical Behavior of Polypropylene Yarns. 7th International Conference – TEXSCI 2010, 6–8 September, Liberec, Czech Republic, 2010.

[162]. Yan, A.; Postle, R. Application of Sonic Wave Theory to the Measurement of the Dynamic Elastic Moduli of Woven and Knitted Fabrics. Text. Res. J. 1981, 51,732–740.

[163]. Blyth, G.; Postle, R. Measurement and Interpretation of Fabric Dynamic Modulus. Text. Res. J. 1979, 49, 601–608.

[164]. Charch, H.; Moseley, W. Structure-property Relationship Ships in Synthetic Fibers: Part I: Structure as Revealed by Sonic Observations. Text. Res. J. 1959, 29, 525.

[165]. Pandya, K. S.; Kumar, S.; Nair, N.; Patil, P.; Naik, N. Analytical and Experimental Studies on Ballistic Impact Behavior of 2D Woven Fabric Composites. Int. J. Damage Mech. 2015, 244, 471–511.

[166]. Wen, M. Predicting the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Bullets with Different Nose Shapes. Compos. Struct. 2000, 49, 321–329.

[167]. Wu, E.; Chang, L. Woven Glass/epoxy Laminates Subjected to Projectile Impact. Int.J. Impact Eng. 1995, 16 (4), 607–619.

[168]. Shaktivesh, S.; Nair, S.; Naik, K. Ballistic Impact Behavior of 2D Plain Weave Fabric Targets with Multiple Layers: Analytical Formulation. Int. J. Damage Mech. 2015, 24 (1), 116–150.

[169]. Shaktivesh, S.; Nair, S.; Kumar, S. et al. Ballistic Impact Performance of Composite Targets. Mater. Des. 2013, 51, 833–846.

[171]. Sun, D. Ballistic Performance Evaluation of Woven Fabrics Based on Experimental and Numerical Approaches. In Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection; Chen, X., Ed.; Woodhead Publishing, 2016; pp 409–435.

[172]. Porwal, P.; Phoenix, S. Modeling System Effects in Ballistic Impact into Multi-layered Fibrous Materials for Soft Body Armor. Int. J. Fract. 2005, 135, 217–249.

[173]. Phoenix, S.; Porwal, P. A New Membrane Model for the Ballistic Impact Response and V50 Performance of Multi-ply Fibrous System. Int. J. Solids Struct. 2003, 40, 6723–6765.

[174]. Phoenix, S.; Van der Werff, U.; Van der Jagt-Deutekom, M. Modeling and Experiments on Ballistic Impact into UHMWPE Yarns Using Flat and Saddle-Nosed Projectiles. Fibers 2017, 5 (1), 8, 1–41.

[176]. Morino, H.; M. Matsudaira, M. Furutani, Predicting Mechanical Properties and Hand Values from the Parameters of Weave Structures. Text. Res. J. 2005, 75 (3), 252–257.

[177]. Yang, C.; Ngo, T.; Tran, P. Influences of Weaving Architectures on the Impact Resistance of Multi-layer Fabrics. Mater. Des. 2015, 85, 282–295.

[178]. Chen, X.; Wang, Y.; Zhou, Y.; Sun, D. 2D/3D Woven Fabrics for Ballistic Protection. JEC Compos. Mag. 2013, 79, 89–96.

[179]. Wang, Y.; Chen, X.; Young, R.; Kinloch, I.; Garry, W. An Experimental Study of the Effect of Ply Orientation on Ballistic Impact Performance of Multi-ply Fabric Panels. Text. Res. J. 2016, 86 (1), 34–43.

[180]. Bazhenov. S. Dissipation of Energy by Bulletproof Aramid Fabric. J. Mater. Sci. 1997, 32, 4167–4173.

[181]. Wei, Li. Models for Projectile Impact into Hybrid Multi-Layer Armor Systems With Axisymmetric Or Biaxial Layers With Gaps. Ph.D. Thesis, Faculty of The Graduate School, 2011.

[182]. Cunniff, P. An Analysis of the System Effects in Woven Fabrics Under Ballistic Impact. Text. Res. J. 1992, 62 (9), 495–509.

[183]. Carr, D. J. Failure Mechanisms of Yarns Subjected to Ballistic Impact. J. Mater. Sci. Lett. 1999, 18, 585–588.

[184]. Cunniff, P. In Vs–Vr Relationships in Textile System Impact. Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics, San Antonio, TX, 1999.

[185]. Cunniff, P. In Dimensional Parameters for Optimization of Textile-Based Body Armor Systems. Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics, San Antonio, TX, 1999; 1303–1310. https://www.researchgate.net/publication/256816090

[186]. Hearle, J.; Leech, C.; Adeyefa, A.; Cork, C. Ballistic Impact Resistance of Multi- layer Textile Fabrics. Final Technical Report AD-A128064, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, England, 1981.

[187]. Heru-Utomo, B.; Ernst, L. In Detailed Modeling of Projectile Impact on Dyneema Composite Using Dynamic Properties. Proceedings of the ATEM'07, JSME-MMD, Fukuoka, Japan, 12–14 September 2007.

[188]. Cunniff, P. A Semiempirical Model for the Ballistic Impact Performance of Textile-Based Personnel Armor. Text. Res. J. 1996, 66 (1), 45–58.

[189]. Meng, Z.; Singh, A.; Qin, X.; Keten, S. Reduced Ballistic Limit Velocity of Graphene Membranes due to Cone Wave Reflection. Extr. Mech. Lett. 2017, 15, 70–77.

[190]. De Oliveira, F.; Lima Jr, E.; Lima, E.; Monteiro, S. The Effect of Thickness on Aramid Fabric Laminates Subjected to 7.62 mm Ammunition Ballistic Impact. Mater. Res. 2017, 20 (2), 676–680.

[191]. Pierson, M. Molding the Impact Behavior of Fiber Reinforced Composite Materials. M.Sc. Thesis, University of Waterloo, 1991.

[192]. Onyechi, P.; Edelugo, S.; Chukwumuanya, E.; Obuka, S. Ballistic Penetration Response of Glass Fibre Reinforced Polyester (Gfrp) Composites: Body Armor. IJSTR 2014, 3 (8), 226–237.

[193]. Khoda-rahmi, H.; Fallahi, A.; Liaghat, G. Incremental Deformation and Penetration Analysis of Deformable Projectile into Semi-infinite Target. Int. J. Solids Struct. 2006, 43, 569–582.

[194]. Montgomery, T.; Grady, L.; Tomasino, C. The Effects of Projectile Geometry on the Performance of Ballistic Fabrics. Text. Res. J. 1982, 52 (7), 442–450.

[195]. Tabiei, A.; Gaurav, N. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review. Trans. ASME 2008, 61, 1–10.

[196]. Tan, V.; Lim, C.; Cheong, C. Perforation of High Strength Fabric by Projectiles of Different Geometry. Int. J. Impact Eng. 2003, 28, 207–222.

[197]. Dimeski, D.; Srebrenkoska, V.; Mirceska, N. Ballistic Impact Resistance Mechanism of Woven Fabrics and their Composites. Int. J. Eng. Res. Tech. 2015, 4 (12), 107–111.

[198]. Naik, N; Doshi, A. Ballistic Impact Behavior of Thick Composites: Parametric Studies. Compos. Struct. 2008, 82 (3), 104–116.

[199]. Rajagopal, A.; Naik, N.; Naik, K. Oblique Ballistic Impact Behavior of Composites. Int. J. Damage Mech. 2014, 23 (4), 453–482.

[200]. Bartus, S. Simultaneous and Sequential Multi-site Impact Response of Composite Laminates. Ph.D. Thesis, University of Alabama at Birmingham, UK, 2006.

[201]. Gupta, B.; Davids, N. Penetration Experiments with Fiber-reinforced Plastics. Exp. Mech. 1966, 445–450.

[202]. Okun, N. Major Historical Naval Armor Penetration Formulae. http://www. combined-fleet.com/formula.htm (accessed Jun 25, 2018).

[203]. Caprino, G.; Lopresto, V. On the Penetration Energy for Fibre-reinforced Plastics Under Low Velocity Impact Conditions. Compos. Sci. Technol. 2001, 61 (1), 65–73, 38.

[204]. Caprino, G.; Langella, A.; Lopresto V. Indentation and Penetration of Carbon Fibre Reinforced Plastic Laminates. Compos. Part B Eng. 2003, 34 (4), 319–325.

[205]. Reid, S.; Wen, H. Perforation of FRP Laminates and Sandwich Panels Subjected to Missile Impact. In Impact Behavior of Fiber-reinforced Composite Materials and Structures; Reid, S.; Zhou, G., Eds.;Woodhead Publishers Ltd.: Cambridge, 2000.

[206]. Villanueva, G.; Cantwell, W. J. The High Velocity Impact Response of Composite and FML-reinforced Sandwich Structures Compos. Sci. Technol. 2004, 64, 35–54.

[207]. Hazell, P.; Appleby-Thomas, G. J. The Impact of Structural Composite Materials. Part 1: Ballistic Impact. J. Strain Anal. Eng. 2012, 47 (7), 396–405.

[208]. Walker, J. In Ballistic Limit of Fabrics with Resin. 19th International Symposium of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001.

[209]. Sorrentinoa, L.; Bellinia, C.; Corradoa, A.; Polinia, W.; Aricò, R. Ballistic Performance Evaluation of Composite Laminates in Kevlar 29. Proc. Eng. 2015, 88, 255–262.

[210]. Chen, F.; Hodgkinson, J. Impact Behavior of Composites with Different Fiber Architecture. J. Aerospace Eng. Proc. I Mech. E 2009, 223 (G), 1009–1017.

[211]. Kumar, S.; Gupta, D.; Singh, I.; Sharma, A. Behavior of Kevlar/Epoxy Composite Plates Under Ballistic Impact. J. Reinf. Plast. Compos. 2010, 29 (13), 2010.

[212]. Mitchell, C.; Post, C. Failure Examination of a New Body Armor Textile by Use of an Environmental Scanning Electron Microscope. Electr. Inst. Phys. Conf. Ser. 1999, 161 (103–106), 103–106.

[213]. Bogdanovich, A. In Advancements in Manufacturing and Applications of 3-d Woven Preforms and Composites. Proceedings of the 37th International SAMPE Fall Technological Conference, Seattle, WA, 2005.

[214]. Bogdanovich, A.; Mungalov, D.; Baughman, R.; Fang, S.; Zhang, M. In 3-D Braided Material Made of Carbon Nanotube. Proceedings of the 27th International SAMPE Europe Conference, Paris, France, 2006, 455–460

[215]. Chou, T.; Gao, L.; Thostenson, E.; Zhang, Z.; Byun, J. An Assessment of the Science and Technology of Carbon Nanotube-based Fibers and Composites. Compos. Sci. Technol.2010, 70 (1), 1–19.

[216]. Thostenson, E.; Rez, Z.; Chou, T. Advances in the Science and Technology of Carbon Nanotubes and Their Composites: A Review. Compos. Sci. Technol. 2001, 61, 1899–1912

[217]. Cheeseman, B.; Bogetti, T. Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates CompoS. Struct. 2003, 61, 161–173

[218]. Choi, H.; Hong, T.; Lee, E. et al. In Stab Resistance of Aramid Fabrics Reinforced with Silica STF, 18th International Conference on Composite materials, Jeju Island, South Korea, 21–26 August 2011; The Korean Society of Composite Materials.

[219]. Yang, D. Design, Performance and Fit of Fabric for Female Protective Armor. Ph.D. Thesis, School of Materials, University of Manchester, Manchester, UK, 2010.

[220]. El Messiry, M. In Study of Puncture Cut Resistance in Protective Fabrics, ICCE-21 Tenerife, Spain, 21–27 July 2013. www.academia.edu/ (accessed Sep 3, 2014).

[221]. Egres, Jr.; Decker, M.; Halbach, C. et al. In Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF)–Kevlar Composites for Protective Armor Applications, Proceedings of the 24th Army Science Conference, Orlando, FL, 29 November–2 December 2004.

[223]. Li, T.; Wang, R.; Wen, C. et al. Evaluation of High-modulus, Puncture-resistance Composite Nonwoven Fabrics by Response Surface Methodology. J. Ind. Text 2013, 43 (2), 247–263.

[224]. Hassim, N.; Ahmad, M.; Ahmad, W. et al. Puncture Resistance of Natural Rubber Latex Unidirectional Coated Fabrics. J. Ind. Text 2012, 42, 118–131.

[225]. Militky J. Cut Resistance of Textile Fabrics, Selected Topics of Textile and Material Science; Liberec: TUL, CZ, 2011.

[226]. Ulbricht, V.; Franeck, J.; Schirmacher, F. et al. Numerical Investigations for Cutting of Wires and Thread. AUTEX Res. J. 2003, 3, 9–15.

[227]. Lara, J. In The Effect of the Glove Material Stretch Deformation on Cut Resistance. 3rd European Conference on Protective Clothing (ECPC) and NOKOBETEF 8 (3rd), 10–12 May 2006; Gdynia, Poland.

[228]. Scardino, F. L.; Ko, F. Triaxial Woven Fabrics. Text Res. J. 1981, 51, 80–89.

[229]. El Messiry, M. Natural Fiber Polymer Composites Engineering; Apple Academic Press Inc: USA, 2017.

[230]. Miller, S.; Jonesb, M. Kinematics of Four Methods of Stabbing: A Preliminary Study. Forensic Sci. Int. 1996, 82, 183–190.

[231]. G.I. Taylor. Pressure and impulse of submarine explosion waves on plates. In G.K. Batchelor, editor, The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, Vol- ume III: Aero- dynamics and the Mechanics of Projectiles and Explosions, pages 287–303. Cambridge Uni- versity Press, Cambridge, UK, 1963.

[232]. N. Kambouchev, R. Radovitzky, and L. Noels. Fluid-structure interaction effects in the dynamic response of free-standing plates to uniform shock loading. Journal of Applied Me- chanics, 74(5):1042–1045, 2007.

[233]. . Kambouchev, L. Noels, and R. Radovitzky. Nonlinear compressibility effects in fluid-structure interaction and their implications on the air-blast loading of structures. Jour- nal of Applied Physics, 100(063519):1–12, 2006.

[234]. N. Kambouchev, L. Noels, and R. Radovitzky. Numerical simulation of the fluid- structure interaction between air blast waves and free-standing plates. Computers & Structures, 85(11-14):923–931, 2007.

[235]. P.D. Smith and J.G. Hetherington. Blast and Ballistic Loading of Structures. Butterworth Heinemann, Burlington, MA, USA, 1994.

[236]. M.M. Swisdak. Explosion effects and properties: Part II - Explosion effects in water. Technical Report NSWCIWOL TR 76-116, Naval Surface Weapons Center, White Oak, Silver Spring, MD 20910, USA, 1978.

[237]. M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, and H.N.G. Wadley. Metal Foams: A Design Guide. Butterworth Heinemann, Woburn, MA, USA, 2000.

[238]. Z. Xue and J.W. Hutchinson. A comparative study of impulse-resistant metal sand- wich plates. International Journal of Impact Engineering, 30(10):1283–1305, 2004.

[239]. A.J. Wang and H.G. Hopkins. On the plastic deformation of built-in circular plates under impulsive load. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 8:22–87, 1954.

[240]. A.L. Florence. Clamped circular rigid-plastic plates under central blast loading. International Journal of Solids Structures, 2:319–335, 1966.

[241]. P.S. Symonds and T. Wierzbicki. Membrane mode solutions for impulsively loaded circular plates. Journal of Applied Mechanics, 46(1):58–64, 1979.

[242]. N. Jones. A theoretical study of the dynamic plastic behaviour of beams and plates with finite-deflections. International Journal of Solids and Structures, 7(8):1007–1029, 1971.

[243]. N. Jones. Structural Impact. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd edition, 1989.

[244]. Z. Xue and J.W. Hutchinson. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads. International Journal of Mechanical Sciences, 45(4):687–705, 2003.

[245]. A.V. Amirkhizi, J. Isaacs, J. McGee, and S. Nemat-Nasser. An experimentally- based viscoelastic constitutive model for polyurea, including pressure and tem- perature effects. Philosophical Magazine, 86(36):5847–5866, 2006.

[246]. M.R. Amini, A.V. Amirkhizi, and S. Nemat-Nasser. Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. International Journal of Impact Engineering, 37(1):90–102, 2010.

[247]. M.R. Amini, J. Isaacs, and S. Nemat-Nasser. Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments. Mechanics of Materials, 42(6):628–639, 2010.

[248]. M.R. Amini, J. Isaacs, and S. Nemat-Nasser. Experimental investigation of re- sponse of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. International Journal of Impact Engineering, 37(1):82–89, 2010.

[249]. V.S. Deshpande, A. Heaver, and N.A. Fleck. An underwater shock simulator. Proceedings of the Royal Society A, 462(2067):1021–1041, 2006.

[250]. N.A. Fleck and V.S. Deshpande. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. Journal of Applied Mechanics, 71(3):1–16, 2004.

[251]. E. Ferri, E. Antinucci, M.Y. He, J.W. Hutchinson, F.W. Zok, and A.G. Evans. Dynamic buckling of impulsively loaded prismatic cores. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 1(8):1345–1365, 2006.

[252]. S. Lee, F. Barthelat, J.W. Hutchinson, and H.D. Espinosa. Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials: Experiments and modeling. Interna- tional Journal of Plasticity, 22(11):2118–2145, 2006.

[253]. D.D. Radford, G.J. McShane, V.S. Deshpande, and N.A. Fleck. Dynamic com- pressive response of stainless-steel square honeycombs. Journal of Applied Me- chanics, 74(4):658–667, 2007.

[254]. Z. Xue and J.W. Hutchinson. Crush dynamics of square honeycomb sandwich cores. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 65(13):2221–2245, 2006.

[255]. M.T. Tilbrook, D.D. Radford, V.S. Deshpande, and N.A. Fleck. Dynamic crush- ing of sandwich panels with prismatic lattice cores. International Journal of Solids and Structures, 44(18-19):6101–6123, 2007.

[256]. G.J. McShane, S.M. Pingle, V.S. Deshpande, and N.A. Fleck. Dynamic buckling of an inclined structure. International Journal of Solids and Structures, 49(19-

[257]. 20):2830–2838, 2012.

[258]. V.S. Deshpande and N.A. Fleck. High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams. International Journal of Impact Engineering, 24(3):277–298, 2000.

[259]. P.J. Tan, S.R. Reid, J.J. Harrigan, Z. Zou, and S. Li. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I: Experimental data and observa- tions. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53(10):2174–2205, 2005.

[260]. A. Vaziri and J.W. Hutchinson. Metal sandwich plates subject to intense air shocks. International Journal of Solids and Structures, 44(6):2021–2035, 2007.

[261]. F. Zhu, Z. Wang, G. Lu, and G. Nurick. Some theoretical considerations on the dy- namic response of sandwich structures under impulsive loading. International Journal of Im- pact Engineering, 37(6):625–637, 2010.

[262]. G.J. Dvorak and A.P. Suvorov. Protection of sandwich plates from low-velocity im- pact. Journal of Composite Materials, 40(15):1317–1331, 2005.

[263]. Y.A. Bahei-El-Din, G.J. Dvorak, and O.J. Fredricksen. A blast-tolerant sandwich plate design with a polyurea interlayer. International Journal of Solids and Structures, 43(25- 26):7644–7658, 2006.

[264]. Y.A. Bahei-El-Din and G.J. Dvorak. Wave propagation and dispersion in sand- wich plates subjected to blast loads. Mechanics of Advanced Materials and Struc- tures, 14(6):465–475, 2007.

[265]. A. Yehia, Y.A. Bahei-El-Din, and G.J. Dvorak. Enhancement of blast resistance of sandwich plates. Composites B, 39(1):120–127, 2008.

[266]. S. A. Tekalur, A. Shukla, and K. Shivakumar. Blast resistance of polyurea based lay- ered composite materials. Composite Structures, 84(3):271–281, 2008.

[267]. N. Gardner, E. Wang, P. Kumar, and A. Shukla. Blast mitigation in a sandwich composite using graded core and polyurea interlayer. Experimental Mechanics, 52(2):119–133, 2011.

[268]. M.Z. Hassan, Z.W. Guan, W.J. Cantwell, G.S. Langdon, and G.N. Nurick. The influence of core density on the blast resistance of foam-based sandwich struc- tures. International Journal of Impact Engineering, 50:9–16, 2012.

[269]. G.E. Morgan. US Patent 3609764 - Energy absoring and sizing means for helmets, 1971.

[270]. V. Ponomarev and I. Ponomaryova. US Patent 7017705 - Blast compression wave absorbing device, 2006.

[271]. S. Zhuang, G. Ravichandran, and D.E. Grady. An experimental investigation of shock wave propagation in periodically layered composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 51(2):245–265, 2003.

[272]. V.F. Nesterenko. Shock (blast) mitigation by "soft" condensed matter. In Mate- rials Research Society Symposium Proceedings, volume PROC-759-MM4.3, 2002.

[273]. W.F. Hartman, B.A. Boughton, and M.E. Larsen. Blast mitigation capabilities of aqueous foam. Technical Report SAND2006-0533, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, USA, 2006.

[274]. R.M. Allen, D.J. Kirkpatrick, A.W. Longbottom, A.M. Milne, and N.K. Bourne. Experimental and numerical study of free-field blast mitigation. AIP Conference Proceedings, 706(1):823–826, 2004.

[275]. B.E. Gelfand, M.V. Silnikov, A.I. Mikhailin, and A.V. Orlov. Attenuation of blast overpressures from liquid in an elastic shell. Combustion, Explosion and Shock Waves, 37(5):607–612, 2001.

[276]. A. Leonard and C. Daraio. Stress wave anisotropy in centered square highly nonlinear granular systems. Physical Review Letters, 108(21):1–4, 2012.

[277]. V.F. Nesterenko. Dynamics of Heterogeneous Materials. Springer-Verlag, New York, NY, USA, 2001.

[278]. C. Daraio, V.F. Nesterenko, E. Herbold, and S. Jin. Energy trapping and shock disintegration in a composite granular medium. Physical Review Letters, 96(5):1–4, 2006.

[279]. B.R. Schimizze, S.F. Son, R. Goel, A.P. Vechart, and L.R. Young. An experi- mental and numerical study of blast induced shock wave mitigation in sandwich structures. Applied Acoustics, 74(1):1–9, 2013.

[280]. H.N.G. Wadley, K.P. Dharmasena, M.Y. He, R.M. McMeeking, A.G. Evans, T. Bui-Thanh, and R. Radovitzky. An active concept for limiting injuries caused by air blasts. International Journal of Impact Engineering, 37(3):317–323, 2010.

[281]. M. Grujicic, G. Arakere, and T. He. Material-modeling and structural-mechanics aspects of the traumatic brain injury problem. Multidiscipline Modelling in Ma- terials and structures, 6:335–363, 2010.

[282]. M. Grujicic, W.C. Bell, B. Pandurangan, and T. He. Blast-wave impact- mitigation capability of polyurea when used as helmet suspension-pad material. Materials and Design, 31(9):4050–4065, 2010.

[283]. L. Zhang, R. Makwana, and S. Sharma. Brain response to primary blast wave us- ing validated finite element models of human head and advanced combat helmet. Frontiers in neurology, 4(88):1–12, 2013.

[284]. S.G. Ganpule, L. Gu, A.L. Alai, and N. Chandra. Role of helmet in the mechanics of shock wave propagation under blast loading conditions. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 15(11):1233–1244, 2012.

[285]. D. Stewart, L.R. Young, R. Goel, G. Christou, and M.D. Gilchrist. Evaluating the performance of helmet linings incorporating fluid channels. Journal of ASME International, 7(10):1–7, 2010.

[286]. J. Kimberley, J. Lambros, I. Chasiotis, J. Pulskamp, R. Polcawich, and M. Dubey. Mechanics of energy transfer and failure of ductile microscale beams subjected to dynamic loading. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 58(8):1125–1138, 2010.

[287]. S.J. Stritch. Shearing of nerve fibres as a cause of brain damage due to head injury: A pathological study of twenty cases. Lancet, 278:443–448, 1961.

[288]. N.C. Nevin. Neuropathological changes in the white matter following head injury. Journal of Neuropathology and Experimental Neurology, 26:77–84, 1967.

[289]. V.E. Johnson, W Stewart, and Smith D.H. Axonal pathology in traumatic brain injury. Experimental Neurology, 246:35–43, 2013.

[290]. A.H.S. Holbourn. Mechanics of head injuries. Lancet, 242:438–441, 1943.

[291]. E.S. Gurdjian, H.R. Lissner, F.R. Latimerr, B.F. Haddad, and J.E. Webster. Quantitative determination of acceleration and intercranial pressure in experi- mental head injury. Neurology, 3:417–423, 1953.

[292]. W.N. Hardy, T.B. Khalil, and A.I King. Literature review of head injury biome- chanics. International Journal of Impact Engineering, 15(4):561–586, 1994.

[293]. J. S. Ruan and P. Prasad. Coupling of a finite element human head model with a lumped parameter hybrid III dummy model: Preliminary results. Journal of Neurotrauma, 12(4):725–734, 2007.

[294]. L.E. Goldstein, A.M. Fisher, C.A. Tagge, X.L. Zhang, L. Velisek, J.A. Sullivan, C. Upreti, J.M. Kracht, M. Ericsson, M.W. Wojnarowicz, C.J. Goletiani, G.M. Maglakelidze, N. Casey, J.A. Moncaster, O. Minaeva, R.D. Moir, C.J. Nowinski, R.A. Stern, R.C. Cantu, J. Geiling, J.K. Blusztajn, B.L. Wolozin, T. Ikezu, T.D. Stein, A.E. Budson, N.W. Kowall, D. Chargin, A. Sharon, S. Sudad, G.F. Hall, W.C. Moss, R.O. Cleveland, R.E. Tanzi, P.K. Stanton, and A.C. McKee. Chronic traumatic encephalopathy in blast-exposed military veterans and a blast neurotrauma mouse model. Science Translational Medicine, 4(134):1–14, 2012.

[295]. J.M. Meythaler, J.D. Peduzzi, E. Eleftheriou, and T.A. Novack. Current concepts: Diffuse axonal injuryassociated traumatic brain injury. Archives of Phys- ical Medicine and Rehabilitation, 82(10):1461–1471, 2001.

[296]. H.W. Henn. Crash tests and head injury criteria. Teaching Mathematics and its Applications, 17(4):162–170, 1998.

[297]. S.P. Broglio, J.T. Eckner, T. Surma, and J.S. Kutcher. Post-concussion cognitive declines and symptomatology are not related to concussion biomechanics in high school football players. Journal of Neurotrauma, 28(10):1–8, 2011.

[298]. S.P. Broglio, B. Schnebel, J.J. Sosnoff, S. Shin, X. Fend, X. He, and J. Zimmer- man. Biomechanical properties of concussions in high school football. Medicine and Science in Sports and Exercise, 42(11):2064–2071, 2010.

[299]. R.M. Greenwald, J.T. Gwin, J.J. Chu, and J.J. Crisco. Head impact severity measures for evaluating mild Traumatic Brain Injury risk explosure. Neuro- surgery, 62(4):789–798, 2008.

[300]. Saloua B, Mounira R, Salah MM. Fire and Explosion Risks in Petrochemical Plant: 1197 Assessment, Modeling and Consequences Analysis. J Fail Anal Prev 19:903–16. https://doi.org/10.1007/s11668-019-00698-8.

[301]. Skob YA, Ugryumov ML, Granovskiy EA. Numerical assessment of hydrogen explosion consequences in a mine tunnel. Int J Hydrogen Energy 2021;46:12361–71. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.067. 1202

[302]. Pasman HJ, Fouchier C, Park S, Quddus N, Laboureur D. Beirut ammonium nitrate explosion: Are not we really learning anything? Process Saf Prog 2020;39.

[303]. Chamberlain G, Oran E, Pekalski A. Detonations in industrial vapour cloud explosions. J Loss Prev Process Ind 2019;62:103918. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103918.

[304]. Draganić H, Gazić G, Varevac D. Experimental investigation of design and retrofit methods for blast load mitigation – A state-of-the-art review. Eng Struct 2019;190:189–209. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.088.

[305]. Shirbhate PA, Goel MD. A Critical Review of Blast Wave Parameters and Approaches for Blast Load Mitigation. Arch Comput Methods Eng 2021;28:1713–30. https://doi.org/10.1007/s11831-020-09436-y.

[306]. Goel MD, Matsagar VA. Blast-Resistant Design of Structures. Pract Period Struct Des Constr 2014;19:04014007. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000188.

[307]. Taha AK, Zahran MS, Gao Z. Mitigation of the blast load effects on a building structure using newly composite structural configurations. Def Technol 2020. https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.002.

[308]. Stapleton JA. Forced Entry and Ballistics Protection for Buildings and Infrastructure Facilities. Symp. Homel. Secur. Public Saf. Res. Appl. Stand., 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International; 2019, p. 157–80. https://doi.org/10.1520/STP161420180054.

[309]. Rahimzadeh T, Arruda EM, Thouless MD. Design of armor for protection against blast and impact. J Mech Phys Solids 2015;85:98–111. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.09.009

[310]. Chaurasia A, Mulik RS, Parashar A. Polymer-based nanocomposites for impact loading: A review. Mech Adv Mater Struct 2021:1–26. https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1871688.

[311]. Lantz L, Maynez J, Cook W, Wilson CMD. Blast Protection of Unreinforced Masonry Walls: A State-of-the-Art Review. Adv Civ Eng 2016;2016:1–11. https://doi.org/10.1155/2016/8958429.

[312]. Pichandi S, Rana S, Oliveira D, Fangueiro R. Fibrous and composite materials for blast protection of structural elements—A state-of-the-art review. J Reinf Plast Compos 2013;32:1477–500. https://doi.org/10.1177/0731684413498297.

[313]. Zhou XQ, Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. Int J Impact Eng 2008;35:363–75. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003.

[314]. Taha AK, Gao Z, Huang D, Zahran MS. Numerical investigation of a new structural configuration of a concrete barrier wall under the effect of blast loads. Int J Adv Struct Eng 2019;11:19–34. https://doi.org/10.1007/s40091-019-00252-8.

[315]. Berger S, Ben-Dor G, Sadot O. Experimental and numerical investigations of shock-wave attenuation by geometrical means: A single barrier configuration. Eur J Mech - B/Fluids 1241 2015;50:60–70. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.11.006.

[316]. Markose A, Rao CL. Mechanical response of V shaped plates under blast loading. Thin-Walled Struct 2017;115:12–20. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.02.002.

[317]. Markose A, Jojo R, Rose A, Thomas T, Lakshmana Rao C. Finite element analysis of response of v-shaped hull plates under blast loading. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2021;1114:012065. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1114/1/012065.

[318]. Paykani A, Khosravi MI, Saeimi-Sadigh MA, Mahmoodi-Kaleibar M. Dynamic analysis and design of V-shape plates under blast loading. J Vibroengineering 2013;15:971–8.

[319]. Markose A, Rao CL. Failure Analysis of V-shaped Plates under Blast Loading. Procedia Eng 2017;173:519–25. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.080.

[320]. Langdon GS, Nurick GN, Balden VH, Timmis RB. Perforated plates as passive mitigation systems. Def Sci J 2008;58:238–47. https://doi.org/10.14429/dsj.58.1644.

[321]. Fernando PLN, Mohotti D, Remennikov A, Hazell PJ, Wang H, Amin A. Experimental, numerical and analytical study on the shock wave propagation through impedance-graded multi-metallic systems. Int J Mech Sci 2020;178:105621. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105621.

[322]. Abedini M, Zhang C. Dynamic performance of concrete columns retrofitted with FRP using segment pressure technique. Compos Struct 2021;260:113473. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113473.

[323]. Saloo M, Kabir MZ, Khedmati MR. Assessment of performance criteria of reinforced concrete beams retrofitted with FRP fabrics subjected to extreme impulsive loading. Adv Compos Mater 2021;30:1–23. https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1733302.

[324]. Siddika A, Mamun MA Al, Ferdous W, Alyousef R. Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of- the-art review. Eng Fail Anal 2020;111:104480. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480.

[325]. Li Z-X, Zhang X, Shi Y, Wu C, Li J. Finite element modeling of FRP retrofitted RC column against blast loading. Compos Struct 2021;263:113727. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113727.

[326]. Hanifehzadeh M, Aryan H, Gencturk B, Akyniyazov D. Structural Response of Steel Jacket-UHPC Retrofitted Reinforced Concrete Columns under Blast Loading. Materials (Basel) 2021;14:1521. https://doi.org/10.3390/ma14061521.

[327]. Osnes K, Dey S, Hopperstad OS, Børvik T. On the Dynamic Response of Laminated Glass Exposed to Impact Before Blast Loading. Exp Mech 2019;59:1033–46. https://doi.org/10.1007/s11340-019-00496-1.

[328]. Fouché P, Bruneau M, Chiarito VP. Modified Steel-Jacketed Columns for Combined Blast and Seismic Retrofit of Existing Bridge Columns. J Bridg Eng 2016;21:04016035. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000882.

[329]. Rodriguez-Nikl T, Lee C-S, Hegemier GA, Seible F. Experimental Performance of Concrete Columns with Composite Jackets under Blast Loading. J Struct Eng 2012;138:81–9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000444.

[330]. Soe KT, Zhang YX, Zhang LC. Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels. Compos Struct 2013;104:320–30. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.029.

[331]. Bell J, Zhang YX, Soe K, Hermes P. High Velocity Impact Behaviour of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composite Panels. Adv Mater Res 2012;450–451:563–7. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.563.

[332]. Adhikary S Das, Chandra LR, Christian A, Ong KCG. SHCC-strengthened RC panels under near-field explosions. Constr Build Mater 2018;183:675–92. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.199.

[333]. Goswami A, Adhikary S Das. Retrofitting materials for enhanced blast performance of Structures: Recent advancement and challenges ahead. Constr Build Mater 2019;204:224–43. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.188.

[334]. Zhang C, Gholipour G, Mousavi AA. Blast loads induced responses of RC structural members: State-of-the-art review. Compos Part B Eng 2020;195:108066. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108066.

[335]. Faidzi MK, Abdullah S, Abdullah MF, Azman AH, Hui D, Singh SSK. Review of current trends for metal-based sandwich panel: Failure mechanisms and their contribution factors. Eng Fail Anal 2021;123:105302. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105302.

[336]. Al-Rifaie H, Studziński R, Gajewski T, Malendowski M, Sumelka W, Sielicki PW. A New Blast Absorbing Sandwich Panel with Unconnected Corrugated Layers—Numerical Study. Energies 2021;14:214. https://doi.org/10.3390/en14010214.

[337]. Rahmani M, Oskouei AN, Petrudi AM. Experimental and numerical study of the blast wave decrease using sandwich panel by granular materials core. Def Technol 2020. https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.09.004.

[338]. Haq AU, Reddy NSK. A brief review on various high energy absorbing materials. Mater Today Proc 2021;38:3198–204. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.648.

[339]. Ma Q, Rejab M, Siregar J, Guan Z. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. J Compos Mater 2021;55:2513–55. https://doi.org/10.1177/0021998321990734.

[340]. Rebelo HB, Cismasiu C. Robustness assessment of a deterministically designed sacrificial cladding for structural protection. Eng Struct 2021;240:112279. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112279.

[341]. Alphonse M, Bupesh Raja VK, Gopala Krishna V, Kiran RSU, Subbaiah BV, Chandra LVR. Mechanical behavior of sandwich structures with varying core material – A review. Mater Today Proc 2021;44:3751–9. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.722.

[342]. Vo NH, Pham TM, Bi K, Chen W, Hao H. Stress Wave Mitigation Properties of Dual-meta Panels against Blast Loads. Int J Impact Eng 2021;154:103877. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103877.

[343]. Rajeev A, Mohotti D, Shelke A. Implications of impact experiments on honeycomb shielded exterior beam-column joint. Eng Struct 2020;212:110470. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110470.

[344]. Thomas T, Tiwari G. Crushing behavior of honeycomb structure: a review. Int J Crashworthiness 2019;24:555–79. https://doi.org/10.1080/13588265.2018.1480471.

[345]. Helou M, Kara S. Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview. Int J Comput Integr Manuf 2018;31:243–61. https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1407456.

[346]. Le T Van, Ghazlan A, Ngo T, Nguyen T, Remennikov A. A comprehensive review of selected biological armor systems – From structure-function to bio-mimetic techniques. Compos Struct 2019;225:111172. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111172.

[347]. Ha NS, Lu G. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications. Compos Part B Eng 2020;181:107496. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496.

[348]. Ghazlan A, Ngo T, Tan P, Xie YM, Tran P, Donough M. Inspiration from Nature's body armours – A review of biological and bioinspired composites. Compos Part B Eng 2021;205:108513. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108513.

[349]. Novak N, Vesenjak M, Ren Z. Auxetic cellular materials-a review. Strojniški Vestnik-Journal Mech Eng 2016;62:485–93.

[350]. Liu Y, Hu H. A review on auxetic structures and polymeric materials. Sci Res Essays 2010;5:1052–63.

[351]. Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic metamaterials and structures: A review. Smart Mater Struct 2018;27. https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c.

[352]. Jin FL, Zhao M, Park M, Park SJ. Recent trends of foaming in polymer processing: A review. Polymers (Basel) 2019;11. https://doi.org/10.3390/polym11060953.

[353]. Khan T, Acar V, Aydin MR, Hülagü B, Akbulut H, Seydibeyoğlu MÖ. A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores. Polym Compos 2020;41:2355–400. https://doi.org/10.1002/pc.25543.

[354]. Hanssen AG, Enstock L, Langseth M. Close-range blast loading of aluminium foam panels. Int J Impact Eng 2002;27:593–618. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00155-5.

[355]. Yun N-R, Shin D-H, Ji S-W, Shim C-S. Experiments on blast protective systems using aluminum foam panels. KSCE J Civ Eng 2014;18:2153–61. https://doi.org/10.1007/s12205-014-0092-3.

[356]. Ha NS, Lu G. Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics. Thin-Walled Struct 2020;157:106995. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106995.

[357]. Zhou H, Zhao Z, Ma G. Protection Against Blast Load with Cellular Materials and Structures. Int J Aerosp Light Struct - 2012;02:53. https://doi.org/10.3850/S2010428612000220.

[358]. Mir M, Ali MN, Sami J, Ansari U. Review of mechanics and applications of auxetic

[359]. 1361 structures. Adv Mater Sci Eng 2014;2014:1–18. https://doi.org/10.1155/2014/753496.

[360]. Saxena KK, Das R, Calius EP. Three Decades of Auxetics Research − Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review. Adv Eng Mater 2016;18:1847–70. https://doi.org/10.1002/adem.201600053.

[361]. Wang Z, Luan C, Liao G, Liu J, Yao X, Fu J. Progress in Auxetic Mechanical Metamaterials: Structures, Characteristics, Manufacturing Methods, and Applications. Adv Eng Mater 2020;2000312:1–23. https://doi.org/10.1002/adem.202000312.

[362]. Kelkar PU, Kim HS, Cho KH, Kwak JY, Kang CY, Song HC. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review. Sensors (Switzerland) 2020;20:1–26. https://doi.org/10.3390/s20113132.

[363]. Singh Gill H. Mechanical and structure properties of cellular auxetic materials. Mater Today Proc 2021;37:3320–3. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.123.

[364]. Duncan O, Shepherd T, Moroney C, Foster L, Venkatraman PD, Winwood K, et al. Review of auxetic materials for sports applications: Expanding options in comfort and protection. Appl Sci 2018;8. https://doi.org/10.3390/app8060941.

[365]. Zhang J, Lu G, You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. Compos Part B Eng 2020;201:108340. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108340.

[366]. Wu W, Hu W, Qian G, Liao H, Xu X, Berto F. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. Mater Des 2019;180:107950. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950.

[367]. Luo C, Han CZ, Zhang XY, Zhang XG, Ren X, Xie YM. Design, manufacturing and applications of auxetic tubular structures: A review. Thin-Walled Struct 2021;163:107682. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107682.

[368]. Naik S, Dandagwhal RD, Wani CN, Giri SK. A review on various aspects of auxetic materials, 2019, p. 020004. https://doi.org/10.1063/1.5100689.

[369]. Joseph A, Mahesh V, Harursampath D. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. Adv Manuf 2021;9:342–68. https://doi.org/10.1007/s40436-021-00357-y.

[370]. Francisco MB, Pereira JLJ, Oliver GA, Roque da Silva LR, Cunha SS, Gomes GF. A review on the energy absorption response and structural applications of auxetic structures. Mech Adv Mater Struct 2021:1–20. https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1966143.

[371]. Qi C, Jiang F, Yang S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review. Compos Part B Eng 2021;227:109393. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109393.

[372]. Jiang W, Ren X, Wang SL, Zhang XG, Zhang XY, Luo C, et al. Manufacturing, characteristics and applications of auxetic foams: A state-of-the-art review. Compos Part B Eng 2022;235:109733. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109733.

[373]. Shukla S, Behera BK. Auxetic fibrous structures and their composites: A review. Compos Struct 2022;290:115530. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115530.

[374]. LAKES R. Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. Science (80-) 1987;235:1038–40. https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038.

[375]. EVANS KE, NKANSAH MA, HUTCHINSON IJ, ROGERS SC. Molecular network design. Nature 1991;353:124–124. https://doi.org/10.1038/353124a0.

[376]. Prawoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. Comput Mater Sci 2012;58:140–53. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012.

[377]. Bossart A, Dykstra DMJ, van der Laan J, Coulais C. Oligomodal metamaterials with multifunctional mechanics. Proc Natl Acad Sci 2021;118:e2018610118. https://doi.org/10.1073/pnas.2018610118.

[378]. Veronda DR, Westmann RA. Mechanical characterization of skin—Finite deformations. J Biomech 1970;3:111–24. https://doi.org/10.1016/0021-9290(70)90055-2.

[379]. Lees C, Vincent JF V., Hillerton JE. Poisson's Ratio in Skin. Biomed Mater Eng 1991;1:19–23. https://doi.org/10.3233/BME-1991-1104.

[380]. Kimizuka H, Kaburaki H, Kogure Y. Mechanism for Negative Poisson Ratios over the α1416 β Transition of Cristobalite, SiO2: A Molecular-Dynamics Study. Phys Rev Lett 2000;84:5548–51. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.5548.

[381]. Gao Q, Liao W-H, Wang L. On the low-velocity impact responses of auxetic double arrowed honeycomb. Aerosp Sci Technol 2020;98:105698. https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105698.

[382]. Gao Q, Ge C, Zhuang W, Wang L, Ma Z. Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading. Mater Des 2019;161:22–34. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.013.

[383]. Tang C, Li L, Wang L, Herencia VZ, Ren J. Numerical and Experimental Studies on the Deformation of Missing-Rib and Mixed Structures under Compression. Phys Status Solidi 2020;257:2000150. https://doi.org/10.1002/pssb.202000150.

[384]. Kumar D, Poh LH, Quek ST. Isogeometric shape optimization of missing rib auxetics with prescribed negative Poisson's ratio over large strains using genetic algorithm. Int J Mech Sci 2021;193:106169. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106169.

[385]. Novak N, Vesenjak M, Tanaka S, Hokamoto K, Ren Z. Compressive behaviour of chiral auxetic cellular structures at different strain rates. Int J Impact Eng 2020;141:103566. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103566.

[386]. Rafsanjani A, Pasini D. Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs. Extrem Mech Lett 2016;9:291–6. https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.09.001.

[387]. Grima JN, Evans KE. Auxetic behavior from rotating squares. J Mater Sci Lett 2000;19:1563–5. https://doi.org/10.1023/A:1006781224002.

[388]. Harris JA, McShane GJ. Impact response of metallic stacked origami cellular materials. Int J Impact Eng 2021;147:103730. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103730.

[389]. Harris JA, McShane GJ. Metallic stacked origami cellular materials: Additive manufacturing, properties, and modelling. Int J Solids Struct 2020;185–186:448–66. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.09.007.

[390]. Critchley R, Corni I, Wharton JA, Walsh FC, Wood RJK, Stokes KR. A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams. Phys Status Solidi 2013;250:1963–82. https://doi.org/10.1002/pssb.201248550.

[391]. Critchley R, Smy V, Corni I, Wharton JA, Walsh FC, Wood RJK, et al. Experimental and computation assessment of thermomechanical effects during auxetic foam fabrication. Sci Rep 2020;10:18301. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75298-w.

[392]. Bianchi M, Scarpa FL, Smith CW. Stiffness and energy dissipation in polyurethane auxetic foams. J Mater Sci 2008;43:5851–60. https://doi.org/10.1007/s10853-008-2841-5.

[393]. Lim T-C. Analogies across auxetic models based on deformation mechanism (Phys. Status Solidi RRL 6/2017). Phys Status Solidi - Rapid Res Lett 2017;11:1770330. https://doi.org/10.1002/pssr.201770330.

[394]. Hou X, Silberschmidt V V. Metamaterials with Negative Poisson's Ratio: A Review of Mechanical Properties and Deformation Mechanisms, 2015, p. 155–79. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17118-0_7.

[395]. Kolken HMA, Zadpoor AA. Auxetic mechanical metamaterials. RSC Adv 2017;7:5111–29. https://doi.org/10.1039/C6RA27333E.

[396]. Jiang Y, Li Y. 3D Printed Auxetic Mechanical Metamaterial with Chiral Cells and Re1460 entrant Cores. Sci Rep 2018;8:2397. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20795-2.

[397]. Jiang H, Ren Y, Jin Q, Zhu G, Hu Y, Cheng F. Crashworthiness of novel concentric auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio biologically inspired by coconut palm. Thin-Walled Struct 2020;154:106911. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106911.

[398]. Qi, C., Jiang, F., Remennikov, A., Pei, L.Z., Liu, J., Wang, J.S., Liao XW, Yang S. Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs. Compos Part B Eng 2020;197:108117. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108117.

[399]. Qi C, Jiang F, Yang S, Remennikov A. Multi-scale characterization of novel re-entrant circular auxetic honeycombs under quasi-static crushing. Thin-Walled Struct 2021;169:108314. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108314.

[400]. Xu M, Xu Z, Zhang Z, Lei H, Bai Y, Fang D. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies. Int J Mech Sci 2019;159:43–57. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044.

[401]. Guo M-F, Yang H, Ma L. Design and characterization of 3D AuxHex lattice structures. Int J Mech Sci 2020;181:105700. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105700.

[402]. Linforth S, Ngo T, Tran P, Ruan D, Odish R. Investigation of the auxetic oval structure for energy absorption through quasi-static and dynamic experiments. Int J Impact Eng 2021;147:103741. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103741.

[403]. Faraci D, Driemeier L, Comi C. Bending-Dominated Auxetic Materials for Wearable Protective Devices Against Impact. J Dyn Behav Mater 2020. https://doi.org/10.1007/s40870-020-00284-2.

[404]. Auricchio F, Bacigalupo A, Gambarotta L, Lepidi M, Morganti S, Vadalà F. A novel layered topology of auxetic materials based on the tetrachiral honeycomb microstructure. Mater Des 2019;179:107883. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107883.

[405]. Falta J, Zlámal P, Adorna M. Instrumentation of split Hopkinson pressure bar for testing of cellular metallic materials. Acta Polytech CTU Proc 2018;18:10. https://doi.org/10.14311/APP.2018.18.0010.

[406]. Wickeler AL, Naguib HE. Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling. Mater Des 2020;186:108242. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108242.

[407]. Grima JN, Mizzi L, Azzopardi KM, Gatt R. Auxetic Perforated Mechanical Metamaterials with Randomly Oriented Cuts. Adv Mater 2016;28:385–9. https://doi.org/10.1002/adma.201503653.

[408]. Bhullar SK. Three decades of auxetic polymers: a review. E-Polymers 2015;15:205–15. https://doi.org/10.1515/epoly-2014-0193.

[409]. Wang H, Lu Z, Yang Z, Li X. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in plane impact resistance. Compos Struct 2019;208:758–70. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.024.

[410]. Wei L, Zhao X, Yu Q, Zhu G. A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength. Thin-Walled Struct 2020;149:106623. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106623.

[411]. Alomarah A, Masood SH, Sbarski I, Faisal B, Gao Z, Ruan D. Compressive properties of 3D printed auxetic structures: experimental and numerical studies. Virtual Phys Prototyp 2020;15:1–21. https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1644184.

[412]. Alomarah A, Ruan D, Masood S, Gao Z. Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure. Smart Mater Struct 2019;28:085019. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0dd6.

[413]. Hu LL, Luo ZR, Zhang ZY, Lian MK, Huang LS. Mechanical property of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation. Compos Part B Eng 2019;163:107–20. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.010.

[414]. Jafari Nedoushan R, An Y, Yu W-R, Abghary MJ. Novel triangular auxetic honeycombs with enhanced stiffness. Compos Struct 2021;277:114605. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114605.

[415]. Zhang W, Zhao S, Scarpa F, Wang J, Sun R. In-plane mechanical behavior of novel auxetic hybrid metamaterials. Thin-Walled Struct 2021;159:107191. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107191.

[416]. Lu H, Wang X, Chen T. In-plane dynamics crushing of a combined auxetic honeycomb with negative Poisson's ratio and enhanced energy absorption. Thin-Walled Struct 2021;160:107366. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107366.

[417]. Xue Y, Gao P, Zhou L, Han F. An enhanced three-dimensional auxetic lattice structure with improved property. Materials (Basel) 2020;13. https://doi.org/10.3390/ma13041008.

[418]. Zhang Z, Tian R, Zhang X, Wei F, Yang X. A novel butterfly-shaped auxetic structure with negative Poisson's ratio and enhanced stiffness. J Mater Sci 2021;56:14139–56. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06141-4.

[419]. Meena K, Singamneni S. A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. Mater Des 2019;173:107779. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107779.

[420]. Meena K, Singamneni S. Novel hybrid auxetic structures for improved in- plane mechanical properties via additive manufacturing. Mech Mater 2021;158:103890. 1531 https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103890.

[421]. Zhang XY, Ren X, Zhang Y, Xie YM. A novel auxetic metamaterial with enhanced mechanical properties and tunable auxeticity. Thin-Walled Struct 2022;174:109162. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109162.

[422]. Zhang XG, Ren X, Jiang W, Zhang XY, Luo C, Zhang Y, et al. A novel auxetic chiral lattice composite: Experimental and numerical study. Compos Struct 2022;282:115043. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115043.

[423]. Zheng Y, Wang Y, Lu X, Liao Z, Qu J. Evolutionary topology optimization for mechanical metamaterials with auxetic property. Int J Mech Sci 2020;179. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105638.

[424]. Nguyen C, Zhuang X, Chamoin L, Zhao X, Nguyen-Xuan H, Rabczuk T. Three- dimensional topology optimization of auxetic metamaterial using isogeometric analysis and model

order reduction. Comput Methods Appl Mech Eng 2020;371:113306. https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113306.

[425]. Zhang H, Luo Y, Kang Z. Bi-material microstructural design of chiral auxetic metamaterials using topology optimization. Compos Struct 2018;195:232–48. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.058.

[426]. Zhang G, Khandelwal K. Computational design of finite strain auxetic metamaterials via topology optimization and nonlinear homogenization. Comput Methods Appl Mech Eng 2019;356:490–527. https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.07.027.

[427]. Bohara RP, Linforth S, Nguyen T, Ghazlan A, Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimisation. Int J Mech Sci 2021;211:106793. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106793.

[428]. Ren X, Shen J, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Design and characterisation of a tuneable 3D buckling-induced auxetic metamaterial. Mater Des 2018;139:336–42. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.025.

[429]. Zhang XY, Ren X. A Simple Methodology to Generate Metamaterials and Structures with Negative Poisson's Ratio. Phys Status Solidi 2020;257:2000439. https://doi.org/10.1002/pssb.202000439.

[430]. Zhang Y, Ren X, Han D, Cheng X, Jiang W, Zhang XG, et al. Static and dynamic 4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3.

[431]. Evans KE, Alderson KL. Auxetic materials: the positive side of being negative. Eng Sci Educ J 2000;9:148–54. https://doi.org/10.1049/esej:20000402.

[432]. Argatov II, Guinovart-Díaz R, Sabina FJ. On local indentation and impact compliance of isotropic auxetic materials from the continuum mechanics viewpoint. Int J Eng Sci 2012;54:42–57. https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2012.01.010.

[433]. Coenen VL, Alderson KL. Mechanisms of failure in the static indentation resistance of auxetic carbon fibre laminates. Phys Status Solidi 2011;248:66–72. https://doi.org/10.1002/pssb.201083977.

[434]. Hu LL, Zhou MZ, Deng H. Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation. Compos Struct 2019;207:323–30. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.066.

[435]. Cho H, Seo D, Kim D-N. Mechanics of Auxetic Materials. Handb. Mech. Mater., Singapore: Springer Singapore; 2019, p. 733–57. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6884-3_25.

[436]. Shokri Rad M, Hatami H, Alipouri R, Farokhi Nejad A, Omidinasab F. Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures. Mech Ind 2019;20:302. https://doi.org/10.1051/meca/2019019.

[437]. Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh AH, Niknam H, Hermenean K. 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. Compos Struct 2018;200:886–909. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002.

[438]. Bezazi A, Boukharouba W, Scarpa F. Mechanical properties of auxetic carbon/epoxy composites: static and cyclic fatigue behaviour. Phys Status Solidi 2009;246:2102–10. https://doi.org/10.1002/pssb.200982042.

[439]. Alderson KL, Webber RS, Evans KE. Novel variations in the microstructure of auxetic ultra-high molecular weight polyethylene. Part 2: Mechanical properties. Polym Eng Sci 2000;40:1906–14. https://doi.org/10.1002/pen.11322.

[440]. Alderson A, Rasburn J, Evans KE, Grima JN. Auxetic polymeric filters display enhanced de-fouling and pressure compensation properties. Membr Technol 2001;2001:6–8. https://doi.org/10.1016/S0958-2118(01)80299-8.

[441]. Ji JC, Luo Q, Ye K. Vibration control based metamaterials and origami structures: A state-of-the-art review. Mech Syst Signal Process 2021;161:107945. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107945.

[442]. Sanami M, Ravirala N, Alderson K, Alderson A. Auxetic Materials for Sports Applications. Procedia Eng 2014;72:453–8. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.079.

[443]. Janus-Michalska M, Jasińska D, Smardzewski J. Comparison of Contact Stress Distribution for Foam Seat and Seat of Auxetic Spring Skeleton. Ijame 2013;18:55–72. https://doi.org/10.2478/ijame-2013-0004.

[444]. Li YQ, Li XG, Gao X-L. Modeling of Advanced Combat Helmet Under Ballistic Impact. J Appl Mech 2015;82. https://doi.org/10.1115/1.4031095.

[445]. Wang Y-C, Lakes R. Analytical parametric analysis of the contact problem of human buttocks and negative Poisson's ratio foam cushions. Int J Solids Struct 2002;39:4825–38. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00379-7.

[446]. Farhangdoust S, Aghaei SM, Amirahmadi M, Pala N, Mehrabi A. Auxetic MEMS sensor. In: Zonta D, Huang H, editors. Sensors Smart Struct. Technol. Civil, Mech. Aerosp. Syst. 2020, SPIE; 2020, p. 36. https://doi.org/10.1117/12.2559330.

[447]. Simkins VR, Alderson A, Davies PJ, Alderson KL. Single fibre pullout tests on auxetic polymeric fibres. J Mater Sci 2005;40:4355–64. https://doi.org/10.1007/s10853-005-2829-

[448]. Ren X, Shen J, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic nail: Design and experimental study. Compos Struct 2018;184:288–98. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.013.

[449]. Arjunan A, Zahid S, Baroutaji A, Robinson J. 3D printed auxetic nasopharyngeal swabs for COVID-19 sample collection. J Mech Behav Biomed Mater 2021;114:104175. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104175.

[450]. Ashby MF, Medalist RFM. The mechanical properties of cellular solids. Metall Trans A 1983;14:1755–69. https://doi.org/10.1007/BF02645546.

[451]. Li D, Liao W, Dai N, Xie YM. Comparison of Mechanical Properties and Energy Absorption of Sheet-Based and Strut-Based Gyroid Cellular Structures with Graded Densities. Materials (Basel) 2019;12:2183. https://doi.org/10.3390/ma12132183.

[452]. Vural M, Ravichandran G. Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites. Mech Mater 2003;35:523–36. https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00268-5.

[453]. Chan KC, Xie LS. Dependency of densification properties on cell topology of metal foams. Scr Mater 2003;48:1147–52. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00593-6.

[454]. Nieh TG, Higashi K, Wadsworth J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. Mater Sci Eng A 2000;283:105–10. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00623-7.

[455]. Paul A, Ramamurty U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. Mater Sci Eng A 2000;281:1–7. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00750-9.

[456]. Li QM, Magkiriadis I, Harrigan JJ. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids. J Cell Plast 2006;42:371–92. https://doi.org/10.1177/0021955X06063519.

[457]. Tan PJ, Harrigan JJ, Reid SR. Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam. Mater Sci Technol 2002;18:480–8. https://doi.org/10.1179/026708302225002092.

[458]. Isaac CW, Ezekwem C. A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability. Compos Struct 2021;257:113081. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113081.

[459]. Hou S, Liu T, Zhang Z, Han X, Li Q. How does negative Poisson's ratio of foam filler affect crashworthiness? Mater Des 2015;82:247–59. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.050.

[460]. Allen T, Duncan O, Foster L, Senior T, Zampieri D, Edeh V, et al. Auxetic Foam for Snow-Sport Safety Devices. Snow Sport. Trauma Saf., Cham: Springer International Publishing; 2017, p. 145–59. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52755-0_12 foams. Scr Mater 2003;48:1147–52. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00593-6.

[461]. Nieh TG, Higashi K, Wadsworth J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. Mater Sci Eng A 2000;283:105–10. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00623-7.

[462]. Paul A, Ramamurty U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. Mater Sci Eng A 2000;281:1–7. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00750-9.

[463]. Li QM, Magkiriadis I, Harrigan JJ. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids. J Cell Plast 2006;42:371–92. https://doi.org/10.1177/0021955X06063519.

[464]. Tan PJ, Harrigan JJ, Reid SR. Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam. Mater Sci Technol 2002;18:480–8. https://doi.org/10.1179/026708302225002092.

[465]. Isaac CW, Ezekwem C. A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability. Compos Struct 2021;257:113081. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113081.

[466]. Hou S, Liu T, Zhang Z, Han X, Li Q. How does negative Poisson's ratio of foam filler affect crashworthiness? Mater Des 2015;82:247–59. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.050.

[467]. Allen T, Duncan O, Foster L, Senior T, Zampieri D, Edeh V, et al. Auxetic Foam for Snow-Sport Safety Devices. Snow Sport. Trauma Saf., Cham: Springer International Publishing; 2017, p. 145–59. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52755-0_12

[468]. Plewa J, Płońska M, Lis P. Investigation of Modified Auxetic Structures from Rigid Rotating Squares. Materials (Basel) 2022;15:2848. https://doi.org/10.3390/ma15082848.

[469]. Bohara RP, Linforth S, Ghazlan A, Nguyen T, Remennikov A, Ngo T. Performance of an

[470]. auxetic honeycomb-core sandwich panel under close-in and far-field detonations of high explosive. Compos Struct 2021;280:114907. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114907.

[471]. Bohara RP, Linforth S, Nguyen T, Ghazlan A, Ngo T. Dual-mechanism auxetic-core protective sandwich structure under blast loading. Compos Struct 2022;299:116088. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116088.

[472]. Wang Y, Zhao W, Zhou G, Gao Q, Wang C. Optimization of an auxetic jounce bumper based on Gaussian process metamodel and series hybrid GA-SQP algorithm. Struct Multidiscip Optim 2018;57:2515–25. https://doi.org/10.1007/s00158-017-1869-z.

[473]. Wu S, Sikdar P, Bhat GS. Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches. Def Technol 2022. https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.06.007.

[474]. Foster L, Peketi P, Allen T, Senior T, Duncan O, Alderson A. Application of Auxetic Foam in Sports Helmets. Appl Sci 2018;8:354. https://doi.org/10.3390/app8030354.

[475]. Gao Q, Liao W-H. Energy absorption of thin walled tube filled with gradient auxetic structures-theory and simulation. Int J Mech Sci 2021;201:106475. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106475.

[476]. Choudhry NK, Panda B, Kumar S. In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing. Compos Part B Eng 2022;228:109437. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109437.

[477]. Han D, Ren X, Zhang Y, Yu Zhang X, Gang Zhang X, Luo C, et al. Lightweight auxetic metamaterials: Design and characteristic study. Compos Struct 2022;293:115706. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115706.

[478]. Teng XC, Ren X, Zhang Y, Jiang W, Pan Y, Zhang XG, et al. A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with enhanced energy absorption. Int J Mech Sci 2022;229:107524. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107524.

[479]. Hao J, Han D, Zhang XG, Zhang Y, Jiang W, Teng XC, et al. Novel dual-platform light-weight metamaterials with auxeticity. Eng Struct 2022;270:114891. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114891.

[480]. Jiang F, Yang S, Qi C, Liu H-T. Two plateau characteristics of re-entrant auxetic honeycomb along concave direction. Thin-Walled Struct 2022;179:109665. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109665.

[481]. An M-R, Wang L, Liu H-T, Ren F-G. In-plane crushing response of a novel bidirectional re-entrant honeycomb with two plateau stress regions. Thin-Walled Struct 2022;170:108530. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108530.

[482]. Wang H, Lu Z, Yang Z, Li X. In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions. Int J Mech Sci 2019;151:746–59. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.009.

[483]. Ungureanu B, Achaoui Y, Enoch S, Brûlé S, Guenneau S. Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections. EPJ Appl Metamaterials 2015;2:17. https://doi.org/10.1051/epjam/2016001.

[484]. Huang TT, Ren X, Zeng Y, Zhang Y, Luo C, Zhang XY, et al. Based on auxetic foam: A novel type of seismic metamaterial for Lamb waves. Eng Struct 2021;246:112976. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112976.

[485]. Zhang Y, Ren X, Zhang XY, Huang TT, Sun L, Xie YM. A novel buckling-restrained brace with auxetic perforated core: Experimental and numerical studies. Eng Struct 2021;249:113223. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113223.

[486]. T. Ngo, Mendis P, Gupta A, Ramsay J. Blast loading and blast effects on structures–an overview. Electron J Struct Eng 2007;7:76–91.

[487]. Pandya K, Kumar CVS, Nair N, Patil P, Naik N. Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of 2D woven fabric composites. Int J Damage Mech 2015;24:471–511. https://doi.org/10.1177/1056789514531440.

[488]. Remennikov A, Gan ECJ, Ngo T, Netherton MD. The development and ballistic performance of protective steel-concrete composite barriers against hypervelocity impacts by explosively formed projectiles. Compos Struct 2019;207:625–44. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.060.

[489]. McDonald JR. Impact resistance of common building materials to tornado missiles. J Wind Eng Ind Aerodyn 1990;36:717–24. https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90069-O.

[490]. Cantwell WJ, Morton J. The impact resistance of composite materials — a review. Composites 1991;22:347–62. https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-

[491]. V Ranwaha N, Chung Kim Yuen S. The effects of blast-induced fragments on cellular materials. Int J Impact Eng 2016;92:50–65. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.12.003.

[492]. Arachchige B, Ghasemnejad H, Yasaee M. Effect of bird-strike on sandwich composite aircraft wing leading edge. Adv Eng Softw 2020;148:102839. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102839.

[493]. Abtew MA, Boussu F, Bruniaux P, Loghin C, Cristian I. Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. Compos Struct 2019;223:110966. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110966.

[494]. Clifton S, Thimmappa BHS, Selvam R, Shivamurthy B. Polymer nanocomposites for high-velocity impact applications-A review. Compos Commun 2020;17:72–86. https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.11.013.

[495]. Smith P, Hetherington J. Blast and ballistic loading of structures. New York, USA: Routledge; 2011.

[496]. Sun W, Jiang Y, He W. An overview on the blast loading and blast effects on the RC structures. Appl Mech Mater 2011;94–96:77–80. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.94-96.77.

[497]. US Department of the Army. Fundamentals of protective design for conventional weapons (TM-5-855-1). Washington DC,: 1986.

[498]. Unified Facilities Criteria (UFC) Structures to resist the effects of accidental explosions 2014 US Department of Defense. Structures to resist the effects of accidental explosions. Report no. UFC 3-340-0. Washington, DC, USA: 2008.

[499]. Yang S, Qi C, Wang D, Gao R, Hu H, Shu J. A Comparative Study of Ballistic Resistance of Sandwich Panels with Aluminum Foam and Auxetic Honeycomb Cores. Adv Mech Eng 2013;5:589216. https://doi.org/10.1155/2013/589216.

[500]. Qi C, Yang S, Wang D, Yang L-J. Ballistic Resistance of Honeycomb Sandwich Panels under In-Plane High-Velocity Impact. Sci World J 2013;2013:1–20. https://doi.org/10.1155/2013/892781.

[501]. Schenk M, Guest SD, McShane GJ. Novel stacked folded cores for blast-resistant sandwich beams. Int J Solids Struct 2014;51:4196–214. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.07.027.

[502]. Imbalzano G, Tran P, Ngo TD, Lee PVS. A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings. Compos Struct 2016;135:339–52. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.038.

[503]. Jin X, Wang Z, Ning J, Xiao G, Liu E, Shu X. Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading. Compos Part B Eng 2016;106:206–17. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.037.

[504]. Imbalzano G, Tran P, Ngo TD, Lee PVS. Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance. J Sandw Struct Mater 2017;19:291–316. https://doi.org/10.1177/1099636215618539.

[505]. Qi C, Remennikov A, Pei LZ, Yang S, Yu ZH, Ngo TD. Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations. Compos Struct 2017;180:161–78. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.020.

[506]. Imbalzano G, Linforth S, Ngo TD, Lee PVS, Tran P. Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs. Compos Struct 2018;183:242–61. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.018.

[507]. Wang Y, Zhao W, Zhou G, Wang C. Analysis and parametric optimization of a novel sandwich panel with double-V auxetic structure core under air blast loading. Int J Mech Sci 2018;142–143:245–54. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.05.001.

[508]. Novak N, Starčevič L, Vesenjak M, Ren Z. Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core. Compos Struct 2019;210:167–78. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.050.

[509]. Novak N, Vesenjak M, Kennedy G, Thadhani N, Ren Z. Response of Chiral Auxetic Composite Sandwich Panel to Fragment Simulating Projectile Impact. Phys Status Solidi Basic Res 2020;257:6–11. https://doi.org/10.1002/pssb.201900099.

[510]. Lan X, Feng S, Huang Q, Zhou T. A comparative study of blast resistance of cylindrical sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. Aerosp Sci Technol 2019;87:37–47. https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.01.031.

[511]. Xiao D, Chen X, Li Y, Wu W, Fang D. The structure response of sandwich beams with metallic auxetic honeycomb cores under localized impulsive loading-experiments and finite element analysis. Mater Des 2019;176:107840. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107840

[512]. Chen G, Cheng Y, Zhang P, Liu J, Chen C, Cai S. Design and modelling of auxetic double arrowhead honeycomb core sandwich panels for performance improvement under air blast loading. J Sandw Struct Mater 2020. https://doi.org/10.1177/1099636220935563.

[513]. Remennikov A, Kalubadanage D, Ngo T, Mendis P, Alici G, Whittaker A. Development and performance evaluation of large-scale auxetic protective systems for localised impulsive loads. Int J Prot Struct 2019;10:390–417. https://doi.org/10.1177/2041419619858087.

[514]. Li Y, Chen Z, Xiao D, Wu W, Fang D. The Dynamic response of shallow sandwich arch with auxetic metallic honeycomb core under localized impulsive loading. Int J Impact Eng 2020;137:1–13. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103442.

[515]. Arifurrahman F, Critchley R, Horsfall I. Experimental and numerical study of auxetic sandwich panels on 160 grams of PE4 blast loading. J Sandw Struct Mater 2020:109963622096175. https://doi.org/10.1177/1099636220961756.

[516]. Qi C, Pei LZ, Remennikov A, Yang S, Liu J, Wang JS, et al. Parametric study and optimization of the protect system containing a re-entrant hexagon cored sandwich panel under blast impact. Compos Struct 2020;252:112711. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112711.

[517]. Lan X ke, Huang Q, Zhou T, Feng S shan. Optimal design of a novel cylindrical sandwich panel with double arrow auxetic core under air blast loading. Def Technol 2020;16:617–26. https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.09.010.

[518]. Wang Y, Yu Y, Wang C, Zhou G, Karamoozian A, Zhao W. On the out-of-plane ballistic performances of hexagonal, reentrant, square, triangular and circular honeycomb panels. Int J Mech Sci 2020;173:105402. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105402.

[519]. Madke RR, Chowdhury R. Anti-impact behavior of auxetic sandwich structure with braided face sheets and 3D re-entrant cores. Compos Struct 2020;236:111838. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111838.

[520].] Hassanin H, Abena A, Elsayed MA, Essa K. 4D Printing of NiTi Auxetic Structure with Improved Ballistic Performance. Micromachines 2020;11:745. https://doi.org/10.3390/mi11080745.

[521]. Kalubadanage D, Remennikov A, Ngo T, Qi C. Close-in blast resistance of large-scale auxetic re-entrant honeycomb sandwich panels. J Sandw Struct Mater 2020. https://doi.org/10.1177/1099636220975450.

[522]. Lv W, Li D, Dong L. Study on blast resistance of a composite sandwich panel with isotropic foam core with negative Poisson's ratio. Int J Mech Sci 2021;191:106105. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106105.

[523]. Chen G, Cheng Y, Zhang P, Cai S, Liu J. Blast resistance of metallic double arrowhead honeycomb sandwich panels with different core configurations under the paper tubeguided air blast loading. Int J Mech Sci 2021;201:106457. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106457.

[524]. Zhang J, Lu G, Zhang Y, You Z. A study on ballistic performance of origami sandwich panels. Int J Impact Eng 2021;156:103925. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103925.

[525]. Luo Y, Yuan K, Shen L, Liu J. Sandwich panel with in-plane honeycombs in different Poisson's ratio under low to medium impact loads. Rev Adv Mater Sci 2021;60:145–57. https://doi.org/10.1515/rams-2021-0020.

[526]. Zhu F, Zhao L, Lu G, Wang Z. Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels—Experimental investigations. Int J Impact Eng 2008;35:937–51. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.11.003.

[527]. Al-Rifaie H, Sumelka W. The development of a new shock absorbing uniaxial graded auxetic damper (UGAD). Materials (Basel) 2019;12. https://doi.org/10.3390/ma12162573.

[528]. Brar NS, Joshi VS, Harris BW, Elert M, Furnish MD, Anderson WW, et al. Constitutive model constants for Al7075-T651 and Al7075-T6. AIP Conf. Proc., 2009, p. 945–8. https://doi.org/10.1063/1.3295300.

[529]. Zhang P, Cheng Y, Liu J, Wang C, Hou H, Li Y. Experimental and numerical investigations on laser-welded corrugated-core sandwich panels subjected to air blast loading. Mar Struct 2015;40:225–46. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.11.007.

[530]. Lee S, Barthelat F, Hutchinson JW, Espinosa HD. Dynamic failure of metallic pyramidaltruss core materials – Experiments and modeling. Int J Plast 2006;22:2118–45. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.02.006.

[531]. Nahshon K, Pontin M, Evans A, Hutchinson J, Zok F. Dynamic shear rupture of steel plates. J Mech Mater Struct 2007;2:2049–66. https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.2049.

[532]. Nemat-Nasser S, Guo W-G. Thermomechanical response of HSLA-65 steel plates: experiments and modeling. Mech Mater 2005;37:379–405. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2003.08.017

[533]. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Compos Part B Eng 2018;143:172–96. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

[534]. Jamróz W, Szafraniec J, Kurek M, Jachowicz R. 3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications – Recent Achievements and Challenges. Pharm Res 2018;35:176. https://doi.org/10.1007/s11095-018-2454-x.

[535]. Kumar R, Singh R, Ahuja IS. Joining of 3D Printed Dissimilar Thermoplastics With Consumable Tool Through Friction Stir Spot Welding: A Case Study. Encycl. Renew. Sustain. Mater., Elsevier; 2020, p. 91–6. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11529-2.

[536]. Easey N, Chuprynyuk D, Musa WMSW, Bangs A, Dobah Y, Shterenlikht A, et al. Dome-Shape Auxetic Cellular Metamaterials: Manufacturing, Modeling, and Testing. Front Mater 2019;6. https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00086.

[537]. Attard D, Farrugia PS, Gatt R, Grima JN. Starchirals–A novel class of auxetic hierarchal structures. Int J Mech Sci 2020;179:105631. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105631.

[538]. Guo Y, Zhang J, Chen L, Du B, Liu H, Chen L, et al. Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load. Aerosp Sci Technol 2020;98:105662. https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105662.

[539].] Ingrole A, Hao A, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. Mater Des 2017;117:72–83. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.067

[540]. Bohara RP, Linforth S, Thai H-T, Nguyen T, Ghazlan A, Ngo T. Experimental, numerical, and theoretical crushing behaviour of an innovative auxetic structure fabricated through 3D printing. Thin-Walled Struct 2023;182:110209. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110209.

[541]. Ghazlan A, Nguyen T, Ngo T, Linforth S, Le VT. Performance of a 3D printed cellular structure inspired by bone. Thin-Walled Struct 2020;151:106713. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106713.

[542]. Usta F, Türkmen HS, Scarpa F. Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. Thin-Walled Struct 2021;163:107738. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107738.

[543]. Lee W, Jeong Y, Yoo J, Huh H, Park S-J, Park SH, et al. Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube. Compos Struct 2019;208:836–46. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.068.

[544]. Zhang L, Feih S, Daynes S, Chang S, Wang MY, Wei J, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. Addit Manuf 2018;23:505–15. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.007.

[545]. Zocca A, Colombo P, Gomes CM, Günster J. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. J Am Ceram Soc 2015;98:1983–2001. https://doi.org/10.1111/jace.13700.

[546]. Wang Q, Yang Z, Lu Z, Li X. Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression. Mater Des 2020;186:108226. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108226.

[547]. Bronder S, Adorna M, Fíla T, Koudelka P, Falta J, Jiroušek O, et al. Hybrid Auxetic Structures: Structural Optimization and Mechanical Characterization. Adv Eng Mater 2021;23:2001393. https://doi.org/10.1002/adem.202001393.

[548]. Saptarshi SM, Zhou DC. Basics of 3D Printing. 3D Print. Orthop. Surg., Elsevier; 2019, p. 17–30. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-58118-9.00002-6.

[549]. Pandini S, Inverardi N, Scalet G, Battini D, Bignotti F, Marconi S, et al. Shape memory response and hierarchical motion capabilities of 4D printed auxetic structures. Mech Res Commun 2020;103:103463. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2019.103463.

[550]. Shim D-S, Baek G-Y, Seo J-S, Shin G-Y, Kim K-P, Lee K-Y. Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process. Opt Laser Technol 2016;86:69–78. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.001.

[551]. Novak N, Krstulović-Opara L, Ren Z, Vesenjak M. Mechanical properties of hybrid metamaterial with auxetic chiral cellular structure and silicon filler. Compos Struct 2020;234. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111718.

[552]. Wu X, Su Y, Shi J. In-plane impact resistance enhancement with a graded cell-wall angle design for auxetic metamaterials. Compos Struct 2020;247:112451. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112451.

[553]. Mauko A, Fíla T, Falta J, Koudelka P, Rada V, Neuhäuserová M, et al. Dynamic Deformation Behaviour of Chiral Auxetic Lattices at Low and High Strain-Rates. Metals (Basel) 2020;11:52. https://doi.org/10.3390/met11010052.

[554]. Quan C, Han B, Hou Z, Zhang Q, Tian X, Lu TJ. 3d printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures. Compos Part B Eng 2020;187:107858. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107858.

[555]. Logakannan KP, Ramachandran V, Rengaswamy J, Gao Z, Ruan D. Quasi-static and dynamic compression behaviors of a novel auxetic structure. Compos Struct 2020;254:112853. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112853.

[556]. Alomarah A, Ruan D, Masood S, Gao Z. Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure. Smart Mater Struct 2019;28. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0dd6.

[557]. Yan Z, Liu Y, Yan J, Wang B, Bai F, Shi Z, et al. Anti-blast performance of 3D-printed sandwich panels with auxetic hexagonal and regular hexagonal honeycomb cores. Eng Struct 2022;272:114996. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114996.

[558]. Mizzi L, Salvati E, Spaggiari A, Tan J-C, Korsunsky AM. Highly stretchable two- dimensional auxetic metamaterial sheets fabricated via direct-laser cutting. Int J Mech Sci 2020;167:105242. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105242.

[559]. Taylor M, Francesconi L, Gerendás M, Shanian A, Carson C, Bertoldi K. Low Porosity Metallic Periodic Structures with Negative Poisson's Ratio. Adv Mater 2014;26:2365–70. https://doi.org/10.1002/adma.201304464.

[560]. Carta G, Brun M, Baldi A. Design of a porous material with isotropic negative Poisson's ratio. Mech Mater 2016;97:67–75. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.02.012.

[561]. Hu LL, Wu ZJ, Fu MH. Mechanical behavior of anti-trichiral honeycombs under lateral crushing. Int J Mech Sci 2018;140:537–46. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.039.

[562]. Siva Rama Krishna L, Srikanth PJ. Evaluation of environmental impact of additive and subtractive manufacturing processes for sustainable manufacturing. Mater Today Proc 2021;45:3054–60. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.060.

[563]. Ali MN, Rehman IU. Auxetic polyurethane stents and stent-grafts for the palliative treatment of squamous cell carcinomas of the proximal and mid oesophagus: A novel fabrication route. J Manuf Syst 2015;37:375–95. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.009.

[564]. Grujicic M, Galgalikar R, Snipes JS, Yavari R, Ramaswami S. Multi-physics modeling of

[565]. the fabrication and dynamic performance of all-metal auxetic-hexagonal sandwich-structures. Mater Des 2013;51:113–30. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.004.

[566]. Jenett B, Cameron C, Tourlomousis F, Rubio AP, Ochalek M, Gershenfeld N. Discretely assembled mechanical metamaterials. Sci Adv 2020;6. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc9943.

[567]. Cheung KC, Gershenfeld N. Reversibly Assembled Cellular Composite Materials. Science (80-) 2013;341:1219–21. https://doi.org/10.1126/science.1240889.

[568]. Gregg CE, Kim JH, Cheung KC. Ultra-Light and Scalable Composite Lattice Materials. Adv Eng Mater 2018;20:1800213. https://doi.org/10.1002/adem.201800213.

[569]. Safikhani Nasim M, Etemadi E. Three dimensional modeling of warp and woof periodic auxetic cellular structure. Int J Mech Sci 2018;136:475–81. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.002.

[570]. Balaji B, Gupta Burela R, Ponniah G. Mass production of re-entrant cubic auxetic structure. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2021;1070:012128. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012128.

[571]. Hassan MR, Scarpa F, Mohamed NA, Ruzzene M. Tensile properties of shape memory alloy chiral honeycombs. Phys Status Solidi 2008;245:2440–4. https://doi.org/10.1002/pssb.200880263.

[572]. Ha CS, Hestekin E, Li J, Plesha ME, Lakes RS. Controllable thermal expansion of large magnitude in chiral negative Poisson's ratio lattices. Phys Status Solidi 2015;252:1431–4. https://doi.org/10.1002/pssb.201552158.

[573]. Bertoldi K, Reis PM, Willshaw S, Mullin T. Negative Poisson's Ratio Behavior Induced by an Elastic Instability. Adv Mater 2010;22:361–6. https://doi.org/10.1002/adma.200901956.

[574]. Babaee S, Shim J, Weaver JC, Chen ER, Patel N, Bertoldi K. 3D Soft Metamaterials with Negative Poisson's Ratio. Adv Mater 2013;25:5044–9. https://doi.org/10.1002/adma.201301986.

[575]. Lazarus A, Reis PM. Soft Actuation of Structured Cylinders through Auxetic Behavior. Adv Eng Mater 2015;17:815–20. https://doi.org/10.1002/adem.201400433.

[576]. Bettini P, Airoldi A, Sala G, Landro L Di, Ruzzene M, Spadoni A. Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process. Compos Part B Eng 2010;41:133–47. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.10.005.

[577]. Airoldi A, Bettini P, Panichelli P, Sala G. Chiral topologies for composite morphing structures - Part II: Novel configurations and technological processes. Phys Status Solidi 2015;252:1446–54. https://doi.org/10.1002/pssb.201584263.

[578]. Li Y, Zeng C. On the successful fabrication of auxetic polyurethane foams: Materials requirement, processing strategy and conversion mechanism. Polymer (Guildf) 2016;87:98–107. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.01.076.

[579]. Bianchi M, Scarpa F, Banse M, Smith CW. Novel generation of auxetic open cell foams for curved and arbitrary shapes. Acta Mater 2011;59:686–91. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.006.

[580]. Alderson K, Alderson A, Ravirala N, Simkins V, Davies P. Manufacture and characterisation of thin flat and curved auxetic foam sheets. Phys Status Solidi 2012;249:1315–21. https://doi.org/10.1002/pssb.201084215.

[581]. Zhai X, Gao J, Liao H, Kirk CD, Balogun YA, Chen WW. Mechanical behaviors of auxetic polyurethane foam at quasi-static, intermediate and high strain rates. Int J Impact Eng 2019;129:112–8. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.03.002.

[582]. Li D, Dong L, Lakes RS. The properties of copper foams with negative Poisson's ratio via resonant ultrasound spectroscopy. Phys Status Solidi 2013;250:1983–7. https://doi.org/10.1002/pssb.201384229.

[583]. Chen L, He Y, Yang Y, Niu S, Ren H. The research status and development trend of additive manufacturing technology. Int J Adv Manuf Technol 2017;89:3651–60. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9335-4.

[584]. Zhou L, Fu J, He Y. A Review of 3D Printing Technologies for Soft Polymer Materials. Adv Funct Mater 2020;30:2000187. https://doi.org/10.1002/adfm.202000187.

[585]. Wickramasinghe S, Do T, Tran P. FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. Polymers (Basel) 2020;12:1529. https://doi.org/10.3390/polym12071529.

[586]. Hou Y, Tai YH, Lira C, Scarpa F, Yates JR, Gu B. The bending and failure of sandwichstructures with auxetic gradient cellular cores. Compos Part A Appl Sci Manuf 2013;49:119–31. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.007.

[587]. Beharic A, Rodriguez Egui R, Yang L. Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs. Mater Des 2018;145:122–34. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.066.

[588]. Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh AH, Mirbolghasemi A, Hermenean K. 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. Mater Des 2018;160:179–93. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.061.

[589]. Fíla T, Zlámal P, Jiroušek O, Falta J, Koudelka P, Kytýř D, et al. Impact Testing of Polymer-filled Auxetics Using Split Hopkinson Pressure Bar. Adv Eng Mater 2017;19:1700076. https://doi.org/10.1002/adem.201700076.

[590]. Wang J, Zhang J. Research on High-Power and High-Speed Hydraulic Impact Testing Machine for Mine Anti-Impact Support Equipment. Shock Vib 2019;2019:1–12. https://doi.org/10.1155/2019/6545980

[591]. Mohsenizadeh S, Ahmad Z. Auxeticity effect on crushing characteristics of auxetic foam- filled square tubes under axial loading. Thin-Walled Struct 2019;145:106379. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106379.

[592]. Dean J, Dunleavy CS, Brown PM, Clyne TW. Energy absorption during projectile perforation of thin steel plates and the kinetic energy of ejected fragments. Int J Impact Eng 2009;36:1250–8. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.002.

[593]. Gupta NK, Iqbal MA, Sekhon GS. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates. Int J Solids Struct 2007;44:3411–39. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.09.034.

[594]. Malekzadeh Fard K, Khalili SMR, Forooghy SH, Hosseini M. Low velocity transverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor. Compos Part B Eng 2014;63:111–22. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.011.

[595]. Hyde DW. CONWEP: Conventional weapons effects program 1991.

[596]. Chafi MS, Karami G, Ziejewski M. Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALEmulti-material formulations. Int J Impact Eng 2009;36:1269–75. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.03.007.

[597]. Minh Thanh V, Santosa SP, Widagdo D, Putra IS. Steel Plate Behavior under Blast Loading-Numerical Approach Using LS-DYNA. Appl Mech Mater 2016;842:200–7. 2067 https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.842.200.

[598]. Novak N, Vesenjak M, Ren Z. Crush behaviour of auxetic cellular structures. Sci Technol Mater 2018;30:4–7. https://doi.org/10.1016/j.stmat.2017.12.003.

[599]. Fan H, Bergel GL, Li S. A hybrid peridynamics–SPH simulation of soil fragmentation by blast loads of buried explosive. Int J Impact Eng 2016;87:14–27. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.08.006.

[600]. Olovsson L, Hanssen AG, Børvik T, Langseth M. A particle-based approach to close-range blast loading. Eur J Mech - A/Solids 2010;29:1–6. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2009.06.003.

[601]. Remennikov A, Ngo T, Mohotti D, Uy B, Netherton M. Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges. Int J Impact Eng 2017;101:78–89. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.11.013.

[602]. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA® Keyword User's Manual – Volume I – Key Words – R10.0. vol. I. Livermore, California, USA: 2017.

[603]. Neuberger A, Peles S, Rittel D. Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading. Int J Impact Eng 2007;34:859–73. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.04.001.

[604]. Jing L, Wang Z, Zhao L. Dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores under blast loading—Numerical simulations. Compos Struct 2013;99:213–23. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.013.

[605]. Walkowiak M, Reinicke U, Anders D. Numerical Investigation of Different Core Topologies in Sandwich-Structured Composites Subjected to Air-Blast Impact. Appl Sci 2022;12:9012. https://doi.org/10.3390/app12189012.

[606]. Liu T, Wadley HNG, Deshpande VS. Dynamic compression of foam supported plates impacted by high velocity soil. Int J Impact Eng 2014;63:88–105. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.08.004.

[607]. Luo F, Zhang S, Yang D. Anti-Explosion Performance of Composite Blast Wall with an Auxetic Re-Entrant Honeycomb Core for Offshore Platforms. J Mar Sci Eng 2020;8:182. https://doi.org/10.3390/jmse8030182.

[608]. Ma ZD, Bian H, Hulbert GM, Bishnoi K. Functionally-Graded Npr (Negative Poisson ' S Ratio) Material for a Blast-Protective Deflector. Proc. 2009 Gr. Veh. Syst. Eng. Technol. Symp. (GVSETS, 2010.

[609]. Hou W, Zhu F, Lu G, Fang D-N. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. Int J Impact Eng 2010;37:1045–55. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006.

[610]. Mohamed RA, Lawaty SM, El-Butch AM. Ballistic impact response of an aluminum sandwich panel with auxetic honeycomb core structure. 17th Int. Conf. Appl. Mech. Mech. Eng., Cairo, Egypt: 2016, p. 16–27.

[611]. Yan J, Liu Y, Yan Z, Bai F, Shi Z, Si P, et al. Ballistic characteristics of 3D-printed auxetic honeycomb sandwich panel using CFRP face sheet. Int J Impact Eng 2022;164:104186. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104186.

[612]. Evans AG, He MY, Deshpande VS, Hutchinson JW, Jacobsen AJ, Carter WB. Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices. Int J Impact Eng 2010;37:947–59. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.007.

[613]. Wicks N, Hutchinson JW. Optimal truss plates. Int J Solids Struct 2001;38:5165–83. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00315-2.

[614]. Duarte I, Vesenjak M, Krstulović-Opara L, Ren Z. Crush performance of multifunctional hybrid foams based on an aluminium alloy open-cell foam skeleton. Polym Test 2018;67:246–56. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.009.

[615]. Yang C, Vora HD, Chang Y. Behavior of auxetic structures under compression and impact forces. Smart Mater Struct 2018;27:25012. https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa3cf.

[616]. Chi Y, Langdon GS, Nurick GN. The influence of core height and face plate thickness on the response of honeycomb sandwich panels subjected to blast loading. Mater Des 2010;31:1887–99. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.058.

[617]. Novak N, Vesenjak M, Krstulović-Opara L, Ren Z. Mechanical characterisation of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods. Compos Struct 2018;196:96–107. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.024.

[618]. Qiao JX, Chen CQ. Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs. Int J Impact Eng 2015;83:47–58. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005.

[619]. Li S, Li X, Wang Z, Wu G, Lu G, Zhao L. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading. Compos Part A Appl Sci Manuf 2016;80:1–12. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.09.025.

[620]. Liu Z, Liu J, Liu J, Zeng W, Huang W. The impact responses and failure mechanism of composite gradient reentrant honeycomb structure. Thin-Walled Struct 2023;182:110228. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110228.

[621]. Shen J, Lu G, Wang Z, Zhao L. Experiments on curved sandwich panels under blast loading. Int J Impact Eng 2010;37:960–70. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.002.

[622]. Xue Y, Wang W, Han F. Enhanced compressive mechanical properties of aluminum based auxetic lattice structures filled with polymers. Compos Part B Eng 2019;171:183–91. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.002.

[623]. Yu R, Luo W, Yuan H, Liu J, He W, Yu Z. Experimental and numerical research on foam filled re-entrant cellular structure with negative Poisson's ratio. Thin-Walled Struct 2020;153:106679. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106679.

[624]. Pastorino P, Scarpa F, Patsias S, Yates JR, Haake SJ, Ruzzene M. Strain rate dependence of stiffness and Poisson's ratio of auxetic open cell PU foams. Phys Status Solidi 2007;244:955–65. https://doi.org/10.1002/pssb.200572714.

[625]. Huang X, Zhang Z, Wu J. An overview of impact resistance of auxetic lattice structure. J Phys Conf Ser 2020;1549:032077. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1549/3/032077.

[626]. Skvortsov V, Kepler J, Bozhevolnaya E. Energy partition for ballistic penetration of sandwich panels. Int J Impact Eng 2003;28:697–716. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00153-7.

[627]. Kepler J. Impact Penetration of Sandwich Panels at Different Velocities - An Experimental Parameter Study: Part I - Parameters and Results. J Sandw Struct Mater 2004;6:357–74. https://doi.org/10.1177/1099636204038217.

[628]. Kepler J. Impact Penetration of Sandwich Panels at Different Velocities – An Experimental Parameter Study: Part II – Interpretation of Results and Modeling. J Sandw Struct Mater 2004;6:379–97. https://doi.org/10.1177/1099636204038218.

[629]. Feli S, Namdari Pour MH. An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact. Compos Part B Eng 2012;43:2439–47. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.028

Άλλες πηγές

[1]. *History by Period*. https://en.wikipedia.org/wiki/History_by_period

[2]. *Ancient Near East*. https://en.wikipedia.org/wiki/Ancient_warfare#Ancient_Near_East

[3]. *Comparing the Rise and Fall of Empires*. https://www.khanacademy.org/humanities/world-history/ancient-medieval/classical-states-and-empires/a/rise-and-fall-of-empires

[4]. 4.*The Telegraph*, http://www.telegraph.co.uk/business/2017/12/12/1570000000000-much-world-spent-arms-year/

[5]. *Timeline: Weapons Technology*. https://www.newscientist.com/article/dn17423-time-line-weapons-technology/

[6]. *Who Is Spending the Most on Weapons?* https://www.weforum.org/agenda/2017/04/the-world-is-spending-more-on-weapons/

[7]. Marshall, M. *Timeline: Weapons Technology*. https://www.newscientist.com/article/dn17423-timeline-weapons-technology/

[8]. *Modern Warfare*. https://en.wikipedia.org/wiki/Modern_warfare

[9]. *Military of Ancient Egypt*. https://en.wikipedia.org/wiki/Military_of_ancient_Egypt

[10]. Dunn, J. *The Equipment of Pharaoh's Military*. http://www.touregypt.net/featurestories/weapons.htm

[11]. Blyth, P. *Ballistic Properties in Ancient Egyptian Arrows*. http://margo.student. utwente.nl/sagi/artikel/egyptian/egyptian.html

[12]. *Bow and Arrow*. https://en.wikipedia.org/wiki/Bow_and_arrow

[13]. Ramsey, S. *Tools of War: History of Weapons in Ancient Times*

[14]. *History of Archery*. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_archery

[15]. *Military of Ancient Egypt*. https://en.wikipedia.org/wiki/Military_of_ancient_Egypt, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C%2BB-Egypt-Fig4-RamsesAttacksHit-tite-Dapur.PNG

[16]. *Weapons*. http://www.reshafim.org.il/ad/egypt/weapons/missiles.htm

[17]. *Terracotta_Army*. https://en.wikipedia.org/wiki/Terracotta_Army

[18]. *Coat of Plates*. https://en.wikipedia.org/wiki/Coat_of_plates

[19]. *Pre-Columbian Cotton Armour: Better than Steel*. https://pintsofhistory.com/2011/08/10/mesoamerican-cotton-armour-better-than-steel/

[20]. *Mail Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Mail_(armour)

[21]. *Mail and Plate Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Mail_and_plate_armour#Types

[22]. *Laminar Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Laminar_armour

[23]. *Lamellar Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Lamellar_armour

[24]. *Scale Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Scale_armour

[25]. *Lame Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Lame_(armour)

[26]. *Brigandine Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Brigandine

[27]. *Karuta Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Karuta_(armour)

[28]. *Kikko Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Kikko_(Japanese_armour)

[29]. *Kusari Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Kusari_(Japanese_mail_armour).

[30]. *Boiled Leather Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Boiled_leather

[31]. *Ring Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Ring_armour

[32]. *Splint Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Splint_armour

[33]. *Mirror Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror_armour

[34]. *Plat Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Plate_armour

[35]. *Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Armour

[36]. *Elements of a Light-Cavalry Armour*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elements_of_a_Light-Cavalry_Armour_MET_DT780.jpg

[37]. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3741921

[38]. *Mail and Plate Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Plated_mail#/media/File:Bechter_Diagramm.jpg

[39]. *Bronze Cuirass*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bronze_cuirass_BM_GR1873.8-20.223.jpg

[40]. *World War II Casualties*. http://fathersforlife.org/hist/wwiicas.htm

[41]. *World War II Death*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/WorldWarIICasualties.svg

[42]. *Modern Warfare*. https://en.wikipedia.org/wiki/Modern_warfare

[43]. *Bulletproof Vest*. https://en.wikipedia.org/wiki/Bulletproof_vest

[44]. *Doron Plate*. https://en.wikipedia.org/wiki/Doron_Plate

[45]. *A History of Bullet Proof Vests and Body Armour*. http://thetravelinsider.info/defense/historyofbodyarmour.htm

[46]. *New Options in Personal Ballistic Protection*. https://www.compositesworld.com/articles/new-options-in-personal-ballistic-protection

[47]. Burton, S. *Honeywell's Spectra Shield® Ballistic Material to Provide Ballistic Protection for Next-Generation Law Enforcement and Military Body Armour*. http:// www.bodyarmournews.com/honeywells-spectra-shield-ballistic-material-provide-ballistic-protection-next-generation-law-enforcement-military-body-armour/

[48]. Military Soft Body Armour—Protecting the Protectors. http://www.dupont.com/products-and-services/personal-protective-equipment/body-armour/uses-and-applications/military-body-armour.html

[49]. *Ballistic Materials for High-Performance Body Armour Protecting the Protectors*. https://www.honeywell-spectra.com/?document=body-armour-overview&download=1

[50]. *Honeywell Advanced Fibers and Composites*. http://www.honeywell-advancedfibersandcomposites.com/product/gold-shield-2017/

[51]. *Aramid Shield Material for Hard Armour Applications*. http://www51.honeywell.com/sm/afc/common/documents/PP_AFC_Honeywell_gold_shield_gv_2017_Product_information_sheet.pdf

[52]. *Understanding Armour Plates*. http://www.policemag.com/channel/patrol/articles/2013/01/understanding-armour-plates.aspx

[53]. Floccare. M.; Forman, C.; Hochuli, I.; Lopez, K.; Shyu, D. R.; Urban, D. *Polyurethane-Graphene Laminar Composite as Transparent Armour*. http://www.mse.umd.edu/sites/default/files/documents/undergrad/enma490/Graphene%20PU%20Bullet-proof%20Shield-Report.pdf

[54]. *Ballistic Resistance of Body Armour NIJ Standard-0101.06. NIJ Standards*. United States Department of Justice, July 2008. https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/223054.pdf

[55]. *HOSDB Body Armour Standards for UK Police*. http://pedcast.homeoffice.gov.uk/standards/39-07_A_HOSDB_BodyArmourStandards_%282007%29_Part1_GeneralRequirements.pdf

[56]. *German Schutzklasse Standard Edition 2008, Level SK1-SK2*. http://www. bodyarmournews.com/wp-content/uploads/2013/10/VPAM__Ballistische__Schutzwesten_2006_14_05_2009_1.pdf

[57]. National Institute of Justice. *Body Armour Performance Standards*. https://www.nij.gov/topics/technology/body-armour/Pages/standards.aspx

[58]. *Caliber*. https://en.wikipedia.org/wiki/Muzzle_energy

[59]. *NIJ and Cast Body Armour Levels and Standards*. https://www.safeguardarmour.com/uk/support/body-armour-protection-levels/

[60]. *Understanding NIJ 0101.06 Armor Protection Levels*. https://justnet.org/pdf/Understanding-Armor-Protection.pdf .

[61]. *Ceramic Armour for Ballistic Protection of Personnel, Vehicles and Assets*. https://www.ceramtec.com/ballistic-protection/

[62]. *Knights Templar's Guide to Ballistic Armour/Body Armour, Sewing Including a Step-by-Step Guide to Construct "Loki's Armour".* https://sites.google.com/site/breivikmanifesto/2083/book-3/032

[66]. Bomb_suit. https://en.wikipedia.org/wiki/Bomb_suit

[71]. Payne, T.; Rourke, O.; Malbon, C.Body Armour Standard (2017). https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/634517/Home_Office_Body_Armour_Standard.pdf

[72]. Stab Vest. https://en.wikipedia.org/wiki/Stab_vest

[73]. Pangolin, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pangolin_(Gir_Forest,_Gujarat,_India).jpg

[86]. Wisniowski, T.Natural versus Synthetic Fibers and Dyes Opinion Piece. Marie. http://artquill.blogspot.com.eg/2014/12/natural-versus-synthetic-fibers-and.html

[87]. European Man-Made Fiber Association. http://www.cirfs.org/KeyStatistics/World-ManMadeFibresProduction.aspx

[88]. Carmichael, A. Man-made fibers continue to grow. Text World January/February 2015. http://www.textileworld.com/textile-world/fiber-world/2015/02/man-made-fibers-continue-to-grow/

[89]. Spinning (Polymers). https://en.wikipedia.org/wiki/Spinning_(polymers)

[90]. Natural and Man-Made Fiber Overview. https://ihsmarkit.com/products/fibers- chemical-economics-handbook.html

[91]. Wisniowski, T. Natural versus Synthetic Fibers and Dyes Opinion Piece. Marie. http://artquill.blogspot.com.eg/2014/12/natural-versus-synthetic-fibers-and.html

[98]. Technical Guide for Kevlar®. Aramid Fiber DuPont™ Kevlar® Aramid Fiber, http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/Kevlar_Technical_Guide.pdf

[103]. High Performance and High Temperature Resistant Fibers—Emphasis on Protective Clothing. http://www.intexa.com/downloads/hightemp.pdf

[104]. Vectran™ Fiber, Kuraray America, INC. http://imattec.com/linked/vectran%20-%20technical%20data.pdf

[105]. Dupen, B. Applied Strength of Materials for Engineering Technology; 6th ed.; 2014. http://opus.ipfw.edu/mcetid_facpubs/35

[108]. PYROFIL™—Typical Properties of Carbon Fiber. http://www.mitsubishi-rayon. de http://mrcfac.com/wp-content/uploads/2013/09/Pyrofil-Typical_Properties_of_ Car-bon_Fi-ber_03_2010.pdf

[110]. Walsh, P. Carbon Fibers. ASM Handbook, Composite; Vol. 21. http://an-satte.hin.no/ra/MatLinks/carbonfiber_overview.pdf

[111]. Kevlar, Teijin-Aramid Ballistics Material Handbook, TwaronBallistic Yarns. http://www.teijinaramid.com

[112]. Nextel Ceramic Fibers. Nextel, Ceramic Textile Technical Notebook. http:// solu-tions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lo-cale=de_DE&lmd=1270717655000&assetId=1258565166920&assetType=MMM_Im-age&blobAttribute=ImageFile

[113]. 3M™, Nextel™ Ceramic Structural Fabrics 610 and 720. http://multimedia.3m.com/mws/media/1242134O/3m-nextel-ceramic-structural-fabrics-610-720.pdf

[115]. Nomex. Technical Guide for NOMEX® Brand Fiber. Technical Information. http://www.nakedwhiz.com/gasketsafety/nomextechnicalguide.pdf

[116]. Polyethylene Low Density. http://www.plasticmoulding.ca/polymers/polypropylene.html

[117]. Ko, F.; Kawabata, S.; Inoue, M.; Niwa, M.; Fossey, S.; Song, J. Engineering Proper-ties of Spider Silk. http://web.mit.edu/course/3/3.064/www/slides/Ko_spider_silk.pdf

[118]. Vectran™ Fiber, Kuraray America, INC. Kuraray America, Inc. Is a Subsidiary of Kuraray Co., Ltd. Kuraray America's Product Lines Include Vectran™ Liquid Crystal Poly-mer (LCP) Fiber. http://www.kuraray.us.com/products/fibers/vectran/

[120]. 3M™ Nextel™ Ceramic Fibers and Textiles: Technical Reference Guide. http:// mul-timedia.3m.com/mws/media/1327055O/3m-nextel-technical-reference-guide.pdf

[126]. Different Fibers, Different Characteristics, Different Result. http://www.alpha-ropes.com/uploads/files/alpharopes_technical_info.pdf

[127]. Vectran® 12 Strand and 12x12 tech sheet. https://www.cortlandcom-pany.com/sites/default/files/downloads/media/product-data-sheets-vectran-12-strand.pdf

[132]. MatWeb. http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?mat-guid=22515cfc3a9a4f2f88a1a3f8086e94e2&ckck=1

[133]. EmcoIndustrial Plastics INC. http://www.emcoplastics.com/uhmw-faqs/

[134]. Vectra Liquid Crystal Polymer (LCP) http://www.nakedwhiz.com/gas-ketsafety/nomextechnicalguide.pdf

[135]. DuPont™ Kevlar® 29 Aramid Fiberhttp://www.dupont.com/products-and-ser-vices/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar.html

[136]. Toyobo Dyneema® SK60 High Strength Polyethylene Fiber. http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=4481722d60e54cc3b3c112eb3d4b9d02

[137]. Excellent Properties of Nomex® 410 Enable Long-term Reliability. http://www.dupont. com/products-and-services/electronic-electrical-materials/electrical-insulation/ brands/nomex-electrical-insulation/articles/nomex-410.html

[139]. Vectran data sheet. http://imattec.com/linked/vectran%20-%20technical%20data.pdf

[140]. PBO fiber Zylon. http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/zylon-p/bussei-p/technical.pdf

[143]. Honeywell Spectra® Fiber: Lightweight Strength. https://www.honeywell-spectra.com/?document=fiber-capability-guide&download=1

[145]. Vectran. http://imattec.com/linked/vectran%20-%20technical%20data.pdf

[147]. Polybenzimidazole fiber. https://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazole_fiber#Thermal_Properties

[148]. KleenGuard. Chemical Resistance Information Guide. http://www.kcproductselector.com/~/media/RelatedMedia/PDFs/Apparel/ChemK0001_08_01.ashx

[151]. Muzzle Velocity. https://en.wikipedia.org/wiki/Muzzle_velocity

[152]. Handgun-caliber-guide. https://gunnewsdaily.com/handgun-caliber-guide/

[170]. Song, B.; Yang, W. Effect of Twist on Transverse Impact Response of Ballistic Fiber Yarns. Technical Brief, Luhttps://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1236223

[175]. Cunniff, P. Decoupled Response of Textile Body Armor. https://www.researchgate.net/profile/Philip_Cunniff/publication/

[222]. Thang, C.; Vu-Khanh, T. A Study on the Cutting Resistance Characterization of Protec- tive Clothing Materials. https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubScientifique/ Affiches-posters/Nguyen-puncture-protective-clothing.pdf

[630]. Tairidis, G. K., Ntintakis, I., Drosopoulos, G. A., Koutsianitis, P., & Stavroulakis, G. E. (2022). Auxetic metamaterials subjected to dynamic loadings. Theoretical and Applied Mechanics, 49(1), 1-14.