

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Ταπεινός Ηλίας

Επιβλέπων: Σταύρος Κουρκουλής
Αναπληρωτής Καθηγητής Τομέα Μηχανικής

Ευχαριστίες

Μου δίνεται η ευκαιρία με την περάτωση της Διπλωματικής μου Εργασίας να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) Σ. Κουρκουλή για τις κατευθύνσεις που μου έδωσε όσον αφορά τη δομή και το περιεχόμενο της Διπλωματικής Εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Αιγαίου Π. Παπανίκο για τη συμβολή του, που ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της Διπλωματικής, καθώς η βοήθεια του στο κομμάτι της αριθμητικής ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία ήταν πολύτιμη. Οφείλω σε μεγάλο βαθμό τις γνώσεις που αποκόμισα στον τομέα της αριθμητικής ανάλυσης των συνθέτων υλικών στην καθημερινή συνεργασία μαζί του.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ν. Αλεξόπουλο για την επίβλεψη και τις κρίσιμες επεμβάσεις του στο περιεχόμενο της Διπλωματικής και για την μέχρι τώρα υποστηριξή του και τον προσανατολισμό μου στα σύνθετα υλικά και όχι μόνο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου τόσο για την υποστήριξη αλλά και την απεριόριστη συμπαράσταση τους καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Είναι πλέον αισθητή η ανάγκη ανάπτυξης νέων-πολυλειτουργικών υλικών με ευφυή χαρακτηριστικά (sensing capabilities) και ταυτόχρονα αυξημένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν αναπτυχθεί ολοκληρωμένα συστήματα για το συνεχή έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (structural health monitoring-SHM), δηλαδή την αναγνώριση, το χαρακτηρισμό και την αποτίμηση βλάβης.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να αποτελέσουν ένα ενισχυτικό μέσο, το οποίο θα προσδώσει πολυ-λειτουργικότητα (multi-functionability), η οποία είναι τόσο κρίσιμη σε αρκετούς τομείς χρήσης των υλικών (αεροδιαστημική, αυτοκινητο-βιομηχανία). Η αναγνώριση των εξαιρετικών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) ως δυναμικά ενισχυτικά μέσα, αλλά και η δυνατότητα χρήσης τους σε μη-αγώγιμα σύνθετα (π.χ. GFRP) οδήγησαν στην ανάπτυξη συνεχών ινών υψηλής απόδοσης που βασίζονται στους νανοσωλήνες άνθρακα και χρησιμοποιούνται ως ενσωματωμένοι μηχανικοί αισθητήρες βλάβης στα σύνθετα.

Ωστόσο, ζητήματα που αφορούν τη διεπιφάνεια ίνας-συνθέτου, όπως η επίδραση της διατμητικής αντοχής, το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας της διεπιφάνειας καθώς και η προέκταση της ίνας πρέπει να αναλυθούν. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν το φαινόμενο της μεταφοράς φορτίου από τη μήτρα στην νανοϊνα μέσω της διεπιφάνειας, σε μια ενδεχόμενη μηχανική φόρτιση. Συγκεκριμένα η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της νανοϊνας και της μήτρας χρήζει ακόμη διερεύνησης για την περίπτωση διαφορετικών μηχανικών φορτίσεων του νανοςυνθέτου.

Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ) για την περίπτωση της ενσωμάτωσης νανοϊνας άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT) που θα λειτουργήσει ως μηχανικός αισθητήρας στο μη αγώγιμο σύνθετο υλικό με σπλισμό από ίνες υάλου (GFRP). Για να διερευνηθεί το φαινόμενο της μεταφοράς φορτίου από τη μήτρα στην ίνα, ασκήθηκε στο σύνθετο μονοτονικός εφελκυσμός μέχρι την αστοχία του συνθέτου. Καθότι μας ενδιαφέρει η δυναμική συμπεριφορά της

διεπιφάνειας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Προοδευτικής Βλάβης (ΠΒ) για να διερευνηθεί η μηχανική πρόσφυση, η κατανομή του τασικού πεδίου στη διεπιφάνεια αλλά και οι διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας του συνθέτου, όπως η αποκόλληση της PVA-CNT ίνας από την πολυμερική μήτρα του. Η φόρτιση του συνθέτου χωρίστηκε σε διαφορετικά στάδια. Σε κάθε στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση αστοχίας του συνθέτου μέσω εφαρμογής κριτηρίων αστοχίας που αφορούν τη μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια και την παραμόρφωση θραύσης. Τέλος εφαρμόστηκε υποβάθμιση των ιδιοτήτων της δομής που αστοχούν σε κάθε στάδιο φόρτισης μέσω κανόνων υποβάθμισης ιδιοτήτων (material properties degradation).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων με αυτά που προκύπτουν από τα πειράματα εφελκυσμού δοκιμίου GFRP με ενσωματωμένη ίνα PVA-CNT. Η σύγκριση στηρίχθηκε στη συσχέτιση των πειραματικών τιμών παραμόρφωσης της ίνας και της μεθόδου των ΠΣ, και συσχέτιση με τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης στην επιφάνεια της ίνας.

Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η Διπλωματική Εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια. Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, τις εφαρμογές τους, τις ιδιότητές τους, τα συστήματα δομικής ακεραιότητας (structural health monitoring-SHM) καθώς και τους νανοσωλήνες (CNTs) και νανοϊνες άνθρακα (CNT fibers).

Στο 2^ο Κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της διεπιφάνειας μεταξύ μήτρας-οπλισμού του συνθέτου καθώς και μήτρας-νανοϊνας/νανοσωλήνα άνθρακα. Αρχικά πραγματοποιείται μια πρώτη εισαγωγή στα διεπιφανειακά φαινόμενα και το πώς επηρεάζει η κατανομή των τάσεων το φαινόμενο της πρόσφυσης αλλά και τη μεταφορά φορτίου από τη μήτρα στις ίνες. Έπειτα παρατίθεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία καλύπτει α) τα αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας και β) τα μοντέλα πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια νανοσωλήνων άνθρακα-νανοϊνας/ μήτρας συνθέτου.

Στο 3^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην αριθμητική ανάλυση σύνθετων δομών και συγκεκριμένα παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο ανάλυσης με

τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ). Επίσης γίνεται μια πρώτη περιγραφή της δομής της ανάλυσης του προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος ANSYS.

Στο 4^ο Κεφάλαιο αναλύεται η μοντελοποίηση με τη χρήση των ΠΣ της συνολικής δομής, δηλαδή του συνθέτου υλικού οπλισμένου με ίνες υάλου (GFRP) με ενσωματωμένη νανοϊνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης. Συγκεκριμένα αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς και εξετάζεται η επίδραση διαφορετικών παραμέτρων στη μοντελοποίηση. Οι παράμετροι αυτές είναι η διατμητική αντοχή, το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας της διεπιφάνειας καθώς και η προένταση της PVA-CNT ίνας και η πυκνότητα της διακριτοποίησης. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος Προοδευτικής Βλάβης (ΠΒ).

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύγκριση των μετρήσεων παραμόρφωσης της ενσωματωμένης PVA-CNT ίνας από τα πειράματα που έχουν εκπονηθεί στα δοκίμια του συνθέτου GFRP με τις αντίστοιχες τιμές της μεθόδου ΠΣ.

Τέλος στο 6^ο Κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της μοντελοποίησης του συνθέτου GFRP με ενσωματωμένη την PVA-CNT ίνα με τη χρήση της μεθόδου ΠΣ, αλλά και τα συμπεράσματα της σύγκρισης των πειραματικών τιμών με τις τιμές που προκύπτουν από τη χρήση της μεθόδου των ΠΣ.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά.....	13
1.1 Ορισμός.....	13
1.2 Μορφολογία	13
1.3 Ταξινόμηση συνθέτων υλικών	14
1.4 Εφαρμογές συνθέτων υλικών	19
1.5 Ιδιότητες συνθέτων υλικών	21
1.6 Συστήματα ελέγχου δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring) & Ενσωματωμένοι αισθητήρες στα σύνθετα.....	24
1.7 Μέθοδος μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του συνθέτου	29
1.8 Χρήση των νανοσωλήνων άνθρα (CNTs) ως αισθητήρες.....	30
1.9 Νανοϊνες άνθρακα	31
2. Διεπιφανειακά φαινόμενα	35
2.1 Εισαγωγή.....	35
2.2 Αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας.....	37
2.3 Μοντέλα πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια νανοσωλήνων άνθρακα-νανοϊνας/ μήτρας συνθέτου.....	38
2.4 Πρόταση μελέτης διεπιφάνειας νέας νανοϊνας άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT fiber)/ μήτρας συνθέτου.....	45
3. Αριθμητική Ανάλυση	47
3.1 Εισαγωγή στα σύγχρονα υπολογιστικά περιβάλλοντα υποβοηθούμενης ανάλυσης και σχεδιασμού CAD / CAE	47
3.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	47

3.3	Ανάλυση κατηγοριών προβλημάτων κατά τη χρήση του προγράμματος ANSYS	52
3.4	Διαδικασία μοντελοποίησης με τη χρήση του προγράμματος ANSYS	53
4.	Μοντελοποίηση με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων (FE) του συνθέτου υλικού οπλισμένου με ίνες υάλου (GFRP) με ενσωματωμένη νανοίνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης.....	55
4.1	Περιγραφή μοντέλου	55
4.2	Εφαρμογή Μοντέλου Προοδευτικής Βλαβής.....	56
4.3	Επίδραση διαφορετικών παραμέτρων στη μοντελοποίηση.....	65
5.	Αξιολόγηση υβριδικού συνθέτου υλικού μέσω πειραματικής διαδικασίας & μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	80
5.1	Δοκιμές μηχανικής καταπόνησης στα υβριδικά σύνθετα.....	80
5.2	Αποτελέσματα πειραματικών διαδικασιών	81
5.3	Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ)	84
6.	Συμπεράσματα	87
7.	Βιβλιογραφία.....	89
8.	Ονοματολογία	97

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Δομή του σύνθετου υλικού: (α) ίνες (ή κόκκοι κλπ.) και (β) μήτρα [1].....	14
Εικόνα 2: Σύνθετο με οπλισμό από κόκκους [WS1].....	15
Εικόνα 3: Σύνθετα με οπλισμό (α) κοντές ίνες τυχαίας διεύθυνσης και (β) συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης (UD) [WS1].....	16
Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση δομής σάντουιτς συνθέτου υλικού [WS4].....	18
Εικόνα 5: (α) Απεικόνιση του Boeing 787 Dreamliner και (β) τμήματα του ίδιου αεροσκάφους κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά [WS5], [WS6].....	20
Εικόνα 6: Εφαρμογή CFRP υλικών στο chassis του νέου υβριδικού μοντέλου BMWi8 sports sedan [WS7].....	21
Εικόνα 7: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή εφελκυσμού του συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με οπλισμό ίνες E-γυαλιού [WS8].....	22
Εικόνα 8: Κατασκευή συνθέτου σχεδόν-ισότροπου, με 8 στρώσεις νημάτων κατά διευθύνσεις 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° [WS3].....	23
Εικόνα 9: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σ - ϵ) για διαφορετικές κατηγορίες συνθέτων σε σύγκριση με αυτές του χαλυβδοσιδήρου [2].....	24
Εικόνα 10: Παρεμπόδιση διάδοσης ρωγμής στην περίπτωση ενός πολυσρωματικού μεταλλικού συνθέτου [WS9].....	24
Εικόνα 11: (α) Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα οπτικής ίνας Bragg (FBG-Fibre Bragg Grating), (β) διάγραμμα διάθλασης κατά μήκος της οπτικής ίνας και (γ) ανάλυση φασματικής απόκρισης του προσπίπτοντος κύματος σε μεταδιδόμενο (transmitted) και ανακλώμενο (reflected), ως συνάτηση του μήκους κύματος Bragg (λ) [WS10].....	27
Εικόνα 12: Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο [WS11].....	28
Εικόνα 13: Strain gage (α) σε κανονική διάταξη, (β) υπό επιβαλλόμενη εφελκυστική φόρτιση και (γ) επιβαλλόμενη θλιπτική φόρτιση [WS12].....	28
Εικόνα 14: Νανοσωλήνες άνθρακα (α) μονού τοιχώματος (single-walled CNTs) και (β) διπλού τοιχώματος [WS13].....	30
Εικόνα 15: Αναπαράσταση της παρασκευής PVA-CNT ινών [33].....	34

Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση (α) του συνθέτου ενισχυμένου με ομοιόμορφα κατανεμημένα CNTς μονού τοιχώματος υπό εφελκυσμό και (β) της κατανομής των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια CNT/πολυμερικής μήτρας [45].....	39
Εικόνα 17: Μοντελοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων νανοσυνθέτου με πολυμερική μήτρα με τη χρήση δομικού αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) [58].	42
Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση μιας δομής χωρισμένης σε στοιχεία (finite elements) και κόμβους [77].....	49
Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση (α) bar στοιχείου (2-D) και (β) spring στοιχείου (1-D) [78].	50
Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση των τριών τύπων στοιχείων: (α) 1-D, (β) 2-D και (γ) 3-D [80].	50
Εικόνα 21: Αναπαράσταση ενός truss στοιχείου.....	51
Εικόνα 22: Σχηματική παρουσίαση της (α) πλάκας GFRP με ίνα PVA-CNT ως ενισχυτικό μέσο και ενσωματωμένο αισθητήρα, (β) ενός δοκιμίου που προκύπτει από την πλάκα GFRP και (γ) του επιλεγμένου αξονο-συμμετρικού κομματιού (1/4) από την τομή του δοκιμίου εφελκυσμού GFRP.	56
Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση του 3-D στρωματικού στοιχείου <i>SOLID 45</i> του ANSYS.....	58
Εικόνα 24: Πλέγμα του (α) 3D αξονο-συμμετρικού μοντέλου, (β) της PVA-CNT ίνας, και (γ) της διεπιφάνειας.	59
Εικόνα 25: Συσχέτιση της υποβάθμισης του μέτρου ελαστικότητας στον άξονα x (E_x) με την εφαρμοζόμενη αξονική παραμόρφωση.	62
Εικόνα 26: Διάγραμμα ροής της μεθόδου Προοδευτικής Βλάβης (ΠΒ) που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση.	64
Εικόνα 27: Κατανομή των μέγιστων διατμητικών τάσεων (τ_{max}) στη διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας/μήτρας για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής (20, 30, 40 και 50MPa).	67
Εικόνα 28: Κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια κατά την πλήρη αποκόλληση της PVA-CNT ίνας για διατμητική τάση 20, 30, 40 και 50MPa.....	68

Εικόνα 29: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής.	69
Εικόνα 30: Απεικόνιση της διεπιφάνειας για διαφορετικά πάχη: (α) $DF/5$ και (β) $DF/40$	70
Εικόνα 31: Επίδραση του πάχους της διεπιφάνειας στις τιμές της μέγιστης διατμητικής τάσης για διατμητικές αντοχές 20, 30, 40 και 50MPa.	70
Εικόνα 32: Συσχέτιση της τάσης αποκόλλησης της PVA-CNT ίνας με το ανηγμένο E_{int}/E_{GFRP} για διατμητικές αντοχές 20, 30, 40 και 50MPa.	71
Εικόνα 33: Κατανομή της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια στα βήματα πλήρους αποκόλλησης της (26° - 27°) για 50% προένταση και 20MPa ISS.	73
Εικόνα 34: Συσχέτιση της μέγιστης διατμητικής τάσης (τ_{max}) με το ανηγμένο E_{fiber}/E_{GFRP} για διαφορετικά ποσοστά προέντασης, για 20MPa και 30MPa διατμητική αντοχή διεπιφάνειας.	73
Εικόνα 35: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής, για 50% προένταση της ίνας.	74
Εικόνα 36: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής, για 100% προένταση της ίνας.	75
Εικόνα 37: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής, για 50% προένταση της ίνας.	76
Εικόνα 38: Επίδραση της πυκνότητας διακριτοποίησης στην κατανομή διατμητικών τάσεων (τ_{max}) μεταξύ PVA-CNT ίνας και πολυμερικής μήτρας κατά την προένταση 100% της ίνας, για διατμητική αντοχή 20MPa.	78
Εικόνα 39: Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια, (α) πριν και (β) μετά την αποκόλληση της ίνας PVA-CNT.	79
Εικόνα 40: Συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης και της παραμόρφωσης του δοκιμίου GFRP κατά τον μονοτονικό εφελκυσμό μέχρι την αστοχία για ίνα χωρίς προένταση - με βάση τη πειραματική διάταξη [88].	82
Εικόνα 41: Μεταβολή της ηλεκτρικής απόκρισης και της παραμόρφωσης της PVA-CNT ίνας κατά τον μονοτονικό εφελκυσμό με αυξανόμενη φόρτιση για διαφορετικούς βαθμούς προέντασης της ίνας με βάση τη πειραματική διάταξη [88].	84

Εικόνα 42: Συσχέτιση της μέσης και μέγιστης παραμόρφωσης της ίνας PVA-CNT, όπως προκύπτει από τη μέθοδο των ΠΣ - με τις πειραματικές τιμές της παραμόρφωσης κατά τον μονοτονικό εφελκυσμό με αυξανόμενη φόρτιση για διαφορετικούς βαθμούς προέντασης της.
..... 85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες νημάτων και μετάλλων [WS2].	17
Πίνακας 2: Κλιμακωτές παράμετροι της ανάλυσης.	59
Πίνακας 3: Μηχανικές σταθερές του υφάσματος υαλονημάτων τύπου S2-Glass 6781 Woven[85].	60
Πίνακας 4: Μηχανικές ιδιότητες της PVA-CNT ίνας για διαφορετικές τιμές προεντάσεως (0, 50, 100, 200%) [88].	72
Πίνακας 5: Δεδομένα διακριτοποίησης.	77

1. Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά

1.1 Ορισμός

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα μέχρι σήμερα έχει επηρεάσει σημαντικά μεταξύ άλλων τη βιομηχανία των υλικών. Η ανάγκη για κατασκευές υψηλών προδιαγραφών σε συνδυασμό με την εξέλιξη της επιστήμης και τεχνολογίας των υλικών έχουν οδηγήσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών από τα σύνθετα. Αν και σύνθετα υλικά κατασκευασμένα από άνθρωπο προυπήρχαν εδώ και χιλιάδες έτη, η υψηλή τεχνολογία τους εξελίχθηκε στην αεροναυπηγική βιομηχανία μόνον τα τελευταία εικοσιπέντε έτη.

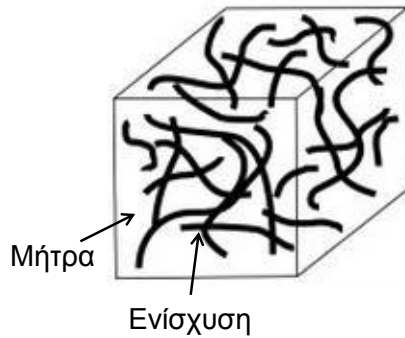
Σύνθετο υλικό ονομάζεται το υλικό εκείνο το οποίο προκύπτει από τη σύνθεση -σε μακροσκοπική ή μικροσκοπική κλίμακα- δύο ή περισσότερων υλικών με φυσικό ή μηχανικό τρόπο και παρουσιάζει τελικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές των υλικών που το αποτελούν.

1.2 Μορφολογία

Τα σύνθετα υλικά συνήθως αποτελούνται από δυο διαφορετικά συστατικά: το συστατικό ενίσχυσης (reinforcement) και τη μήτρα (matrix). Η ενίσχυση μπορεί να είναι είτε από ίνες (fibers), είτε από σωματίδια (particulates) κλπ. Ο ρόλος της ενίσχυσης είναι η ενδυνάμωση των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του συνθέτου και συγκεκριμένα η πρόσληψη του φορτίου από τη μήτρα κατά μια ενδεχόμενη μηχανική φόρτιση του συνθέτου. Ο ρόλος της μήτρας είναι πολλαπλός:

- Έχει συνδετικό ρόλο, ως συγκολλητική ουσία
- Συνεισφέρει στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου
- Μεταφέρει το φορτίο μέσω της διεπιφάνειας στην ενίσχυση

Σε κάθε περίπτωση η ενίσχυση -λέγεται και οπλισμός- είναι αυτή που ουσιαστικά συμβάλει στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου (μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμικές, κλπ.). Επιπρόσθετα καθορίζει τη θραυστομηχανική συμπεριφορά του συνθέτου. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η δομή ενός συνθέτου υλικού.



Εικόνα 1: Δομή του σύνθετου υλικού: (α) ίνες (ή κόκκοι κλπ.) και (β) μήτρα [1].

1.3 Ταξινόμηση συνθέτων υλικών

Ο διαχωρισμός των συνθέτων υλικών πραγματοποιείται κυρίως βάσει του τύπου της μήτρας (matrix), του τύπου του οπλισμού (reinforcement) καθώς και βάσει της τάξης μεγέθους του οπλισμού. Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότερες κατηγορίες συνθέτων υλικών.

A) Βάσει του τύπου της μήτρας

➤ **Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites, PMC's):** Η συγκεκριμένη κατηγορία υλικών είναι ίσως η δημοφιλέστερη στον τομέα συνθέτων υλικών. Ο τύπος της μήτρας είναι ένα πολυμερές με διαφορετικούς τύπους ενίσχυσης (ίνες, κόκκοι κλπ.). Τα σύνηθη χρησιμοποιούμενα μητρικά υλικά είναι τα θερμοσκληρυνόμενα (π.χ. εποξειδική ρητίνη) και τα θερμοπλαστικά πολυμερή (π.χ. PVC, PE), των οποίων η διαφορά έγκειται στην απόκριση σε υψηλές θερμοκρασίες.

➤ **Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMC's):** Τα υλικά αυτά αποτελούν μια σημαντική κατηγορία στον τομέα των συνθέτων υλικών, καθώς διαθέτουν την υψηλότερη ονομαστική εφελκυστική αντοχή και πολύ μεγάλη ολκιμότητα. Οι συνηθέστερες μεταλλικές μήτρες είναι από αλουμίνιο, νικέλιο και τιτάνιο. Οι οπλισμοί που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά μέσα για μεταλλικές μήτρες περιορίζονται κυρίως σε κεραμικά υλικά μορφής κόκκων ή ινών. Το βασικό πλεονέκτημα μιας μεταλλικής μήτρας έναντι μιας πολυμερικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα μεγαλύτερες από 300 °C, καθώς έχει πολύ υψηλό σημείο τήξεως. Τα δύο βασικά μειονεκτήματα των υλικών

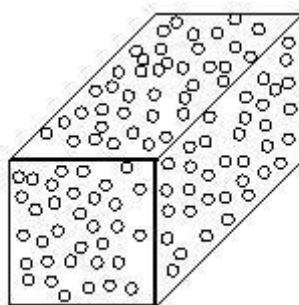
αυτών είναι η υψηλή πυκνότητά τους και η δυσκολία κατασκευής τους, που οδηγούν σε κατασκευές μεγάλου βάρους και υψηλού κόστους αντίστοιχα.

➤ **Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites, CMC's):**

Ως κεραμικά ορίζονται όλα τα ανόργανα μη μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000°C), είτε κατά το στάδιο επεξεργασίας, είτε κατά το στάδιο εφαρμογής. Οι κεραμικές μήτρες προσδίδουν στο σύνθετο δυσκαμψία, εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη, ενώ το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι προστατεύουν το ενισχυτικό μέσο από μηχανική ή οξειδωτική φθορά. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι η μικροδομή τους επηρεάζει σημαντικά τη μακρομηχανική συμπεριφορά τους. Συγκεκριμένα μια ενδεχόμενη εμφάνιση μικρορωγμής στο υλικό θα οδηγούσε σε ταχεία διάδοση της κατά την επιβολή μηχανικής φόρτισης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά μέσα ίνες ή κόκκοι. Τα πλέον διαδεδομένα κεραμικά υλικά είναι ο πυλός, το τσιμέντο και το γυαλί, υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως από την αρχαιότητα.

B) Βάσει του ενισχυτικού μέσου (οπλισμού)

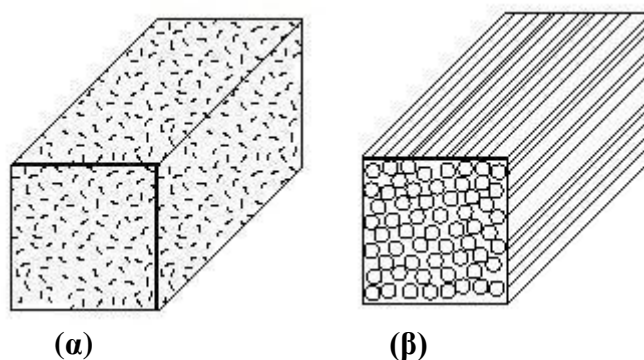
➤ **Κοκκώδη σύνθετα υλικά (particulate composites):** Είναι τα υλικά των οποίων οι ενισχύσεις αποτελούνται από κατανεμημένα σωματίδια, σε μορφή κόκκων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Το σχήμα και το υλικό του κόκκου ποικίλουν, αλλά η διάμετρος του κόκκου είναι πάντα μεγαλύτερη του 1μm. Στα υλικά αυτά το επιβαλλόμενο φορτίο μοιράζεται ανάμεσα στη μήτρα και τα σωματίδια.



Εικόνα 2: Σύνθετο με οπλισμό από κόκκους [WS1].

➤ **Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites):** Είναι τα υλικά που η προσθήκη μιας ινώδους φάσης από γυαλί, άνθρακα κ.α. βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες της μήτρας όπως η αντοχή σε κρούση και κόπωση. Οι παράγοντες που οφείλουν οι

ίνες την ενισχυμένη μηχανική τους συμπεριφορά είναι λόγω (α) απουσίας ατελειών από τη δομή τους και λόγω (β) υψηλής κρυσταλλικότητας. Η μήτρα ενός ινώδους συνθέτου υλικού μπορεί να είναι πολυμερική, μεταλλική ή κεραμική. Σε αντίθεση με τα κοκκώδη σύνθετα σε αυτή την κατηγορία υλικών ο ρόλος της μήτρας περιορίζεται στο να μεταφέρει το επιβαλλόμενο φορτίο στις ίνες (φαινόμενο load transfer) οι οποίες είναι και το κατεξοχήν υλικό που απορροφά τα φορτία. Οι ίνες διακρίνονται σε κοντές και μακριές ανάλογα με το λόγο μήκους-διαμέτρου l/d . Συγκεκριμένα για λόγο $l/d \leq 100$ οι ίνες χαρακτηρίζονται ως κοντές ή ασυνεχείς ενώ για λόγο $l/d \geq 100$ χαρακτηρίζονται ως μακριές ή συνεχείς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Η γεωμετρία, ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες των συνθέτων (αντοχή, διαπερατότητα κλπ.) και βάσει αυτών διακριτοποιούνται σε μονοδιευθυντικά (UD) και πολυδιευθυντικά. Τα πολυδιευθυντικά μπορεί να είναι σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης και με ίνες σε πλέξη ύφανσης δύο ή τριών διαστάσεων (π.χ. $0/45^\circ$, $0/90^\circ$). Οι πλέον διαδεδομένες είναι οι ίνες άνθρακα, γυαλιού και Kevlar.



Εικόνα 3: Σύνθετα με οπλισμό (α) κοντές ίνες τυχαίας διεύθυνσης και (β) συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης (UD) [WS1].

Ανάλογα με την εφαρμογή υπάρχουν, διαφορετικές ίνες του ίδιου υλικού αλλά διαφορετικού τύπου, που οι ιδιότητες τους συγκρίνονται με τις μηχανικές ιδιότητες διαφορετικών μετάλλων-Πίνακας 1. Πέρα από τις απόλυτες τιμές των ιδιοτήτων (π.χ. μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή), το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν οι ειδικές ιδιότητες τους. Ως ειδική ιδιότητα ορίζεται ο λόγος μιας ιδιότητας του υλικού προς την πυκνότητά του. Εδώ επιλέχθηκε το ειδικό μέτρο ελαστικότητας (specific modulus) που ορίζεται από το λόγο του μέτρου

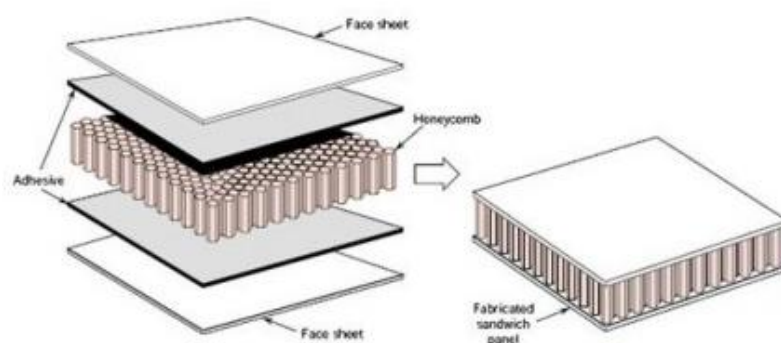
ελαστικότητας E ενός υλικού προς την πυκνότητα του, το οποίο απεικονίζει την ικανότητα ενός υλικού να είναι ‘ελαφρύ’ και ‘ελαστικό’.

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες νημάτων και μετάλλων [WS2].

Κατηγορία Υλικού	Υλικό	Ειδικό βάρος ρ (g/cm ³)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	Αντοχή εφελκυσμού (MPa)	Ειδικό μέτρο ελαστικότητας E/ρ (GPa/(g/cm ³))
Ίνες	Carbon HS	1.8	160 – 270	3500	90 - 150
	Carbon IM	1.8	270 – 325	5300	150 - 180
	Carbon HM	1.8	325 – 440	3500	180 - 240
	Aramid LM	1.45	60	3600	40
	Aramid HM	1.45	120	3100	80
	E-Glass	2.5	69	2400	27
	S-Glass	2.49	89	4750	36
	S2-Glass	2.5	86	3450	34
Μέταλλα	Aluminium Alloy (7020)	2.7	1069	400	26
	Titanium	4.5	110	950	24
	Stainless Steel (A5-80)	7.8	196	800	25

➤ **Σάντουιτς υλικά (sandwich composites):** Τα σάντουιτς υλικά αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία συνθέτων υλικών. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4 το εξωτερικό περίβλημα πάνω και κάτω καλείται επίστρωση (skin) και είναι από ισχυρότερο υλικό από τον πυρήνα για να αντέχει τις εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις. Το εσωτερικό του υλικού καλείται πυρήνας (core) και μπορεί να είναι πολυμερικός αφρός, μια κυψελωτή δομή ή μία δομή που μπορεί να μεταφέρει τις διατμητικές τάσεις μεταξύ των δυο επιστρώσεων και να αποσβέσει κρουστικά φορτία

- Εικόνα 4. Ο πυρήνας συνδέεται με τις επιστρώσεις με συγκολλητικά μέσα (adhesive) όπως εποξειδικές ρητίνες [WS3].



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση δομής σάντουιτς συνθέτου υλικού [WS4].

Λόγω της δομής τους, τα σύνθετα υλικά τύπου σάντουιτς παρουσιάζουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας με αποτέλεσμα να αποσβαίνουν τις μηχανικές ταλαντώσεις και γι' αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά. Χρησιμοποιούνται, επίσης, για βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από τη διατήρηση του σχήματός τους ακόμα και κάτω από την επιβολή υψηλών φορτίων.

➤ **Φυσικά σύνθετα (natural composites):** Τα φυσικά σύνθετα είναι αυτά που υπάρχουν στη φύση. Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται τα οστά, το ξύλο και άλλα υλικά που συναντάμε στη φύση. Τόσο η δομή όσο και η συμπεριφορά τους παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τα τεχνολογικά σύγχρονα σύνθετα υλικά.

➤ **Πράσινα σύνθετα (green composites):** Αυτή η κατηγορία συνθέτων υλικών έχει να κάνει με την αντικατάσταση των υλικών που αποτελούν τη μήτρα ή και το ενισχυτικό μέσο με υλικά που είναι φιλικά προς το περιβάλλον και προέρχονται από τη φύση. Ως μήτρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσική ρητίνη, η οποία αποτελείται από εστέρες, πολυμερισμένα οξέα κλπ., η οποία εκκρίνεται από τα δέντρα στο φλοιό τους. Από τις πλέον γνωστές φυσικές ρητίνες είναι το ρετσίνι, που εκκρίνεται από τα πεύκα και το κεχριμπάρι, το οποίο είναι και το πιο δύσκαμπτο. Το αν ένα υλικό είναι ανακυκλώσιμο καθορίζει το κατά πόσον ένα υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως «πράσινο».

Γ) Βάσει της τάξης μεγέθους της ενίσχυσης

➤ **Μάκρο-σύνθετα:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σύνθετα υλικά όπου το ενισχυτικό μέσο είναι τάξης μεγέθους που ξεκινά από μερικά χιλιοστά και φτάνει το μέτρο. Ένα παράδειγμα μακροσυνθέτου είναι το σιδηροπαγές σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κτηρίων, όπου το σκυρόδεμα θεωρείται η μήτρα και οι χαλύβδινες ράβδοι θεωρούνται η ενίσχυση.

➤ **Μίκρο-σύνθετα:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σύνθετα υλικά των οποίων το ενισχυτικό μέσο έχει τουλάχιστον μία εκ των διαστάσεων του σε μικροκλίμακα. Τα περισσότερα από τα κοκκώδη και τα ινώδη σύνθετα υλικά, για τα οποία έγινε αναφορά παραπάνω, κατατάσσονται στα μικρο-σύνθετα καθώς τόσο οι κόκκοι όσο και οι ίνες έχουν διάμετρο μερικών μικρόμετρων.

➤ **Νάνο-σύνθετα:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σύνθετα υλικά των οποίων το ενισχυτικό μέσο έχει τουλάχιστον μία εκ των διαστάσεων του σε νάνο-κλίμακα. Χρονολογικά είναι τα νεότερα υλικά και είναι μια κατηγορία υλικών στην οποία έχει στραφεί η ερευνητική δραστηριότητα. Ανάλογα με τον αριθμό των νανοσκοπικών διαστάσεων τα νανοςύνθετα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: (α) ενίσχυση με μία μόνο διάσταση στη νανοσκοπική κλίμακα, (β) ενίσχυση με δύο διαστάσεις στη νανοσκοπική κλίμακα (π.χ. νανοσωλήνες άνθρακα -carbon nanotubes (CNTs)) και (γ) ισοδιαστατικά ενισχυτικά μέσα όπου όλες οι ενισχύσεις αυτής της κατηγορίας έχουν τις διαστάσεις στη νανοσκοπική κλίμακα.

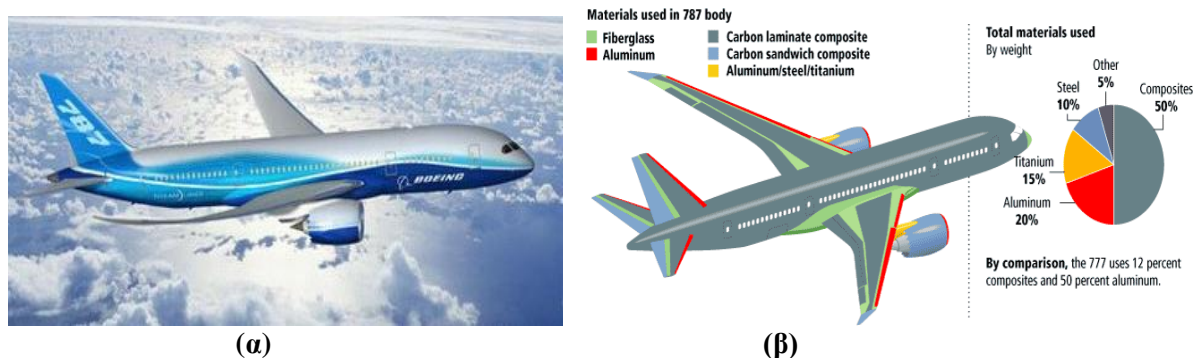
Η ιδιαίτερη δομή των νανοςύνθετων τους επιτρέπει να παρουσιάζουν εξαιρετικά βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα συμβατικά σύνθετα. Συγκεκριμένα, τα νανοςύνθετα εμφανίζουν ιδιαίτερα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, χαμηλή διαπερατότητα σε αέρια, και υψηλό σημείο ανάφλεξης.

1.4 Εφαρμογές συνθέτων υλικών

Ένα σύνθετο υλικό δεν είναι εφικτό να παρουσιάζει ταυτόχρονα όλες τις ιδιότητες στο βέλτιστο επίπεδο - άλλωστε κάτι τέτοιο δεν είναι το ζητούμενο. Εκείνο που είναι κρίσιμο είναι η σωστή επιλογή των καταλληλότερων συνθέτων υλικών με βάση τη συγκεκριμένη εφαρμογή του. Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η αεροδιαστημική-αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, όπως

επίσης και η κατασκευή τεχνικών έργων, καθώς προσφέρουν υψηλή δυσκαμψία, υψηλή αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και καλή θερμική σταθερότητα.

Αεροδιαστημική & αεροναυπηγική: Ο προσανατολισμός της αεροπορικής βιομηχανίας να αφομοιώσει τα σύνθετα υλικά ως κύρια δομικά στοιχεία οφείλεται πρωτίστως στο μειωμένο βάρος, τις καλές μηχανικές ιδιότητες και επιχειρησιακό κόστος που προσφέρει η χρήση τους. Εφαρμογές των συνθέτων υλικών σε ένα αεροπλάνο συναντάμε στους προωθητήρες ρουκετών, στα πτερύγια στροβιλοκινητήρων των αεροπλάνων κτλ. όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η χρήση του Glare -το οποίο είναι ένα μεταλλικό πολύστρωτο σύνθετο υλικό- σε διάφορα μέρη της ατράκτου (fuselage).



Εικόνα 5: (α) Απεικόνιση του Boeing 787 Dreamliner και (β) τμήματα του ίδιου αεροσκάφους κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά [WS5], [WS6].

Αυτοκινητοβιομηχανία: Η χρήση των συνθέτων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία οφείλεται στη μείωση κόστους κατασκευής και στη μείωση βάρους που επιφέρουν, δηλαδή στην εξοικονόμηση καυσίμων-ενέργειας.

Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν μεθόδους χύτευσης με συμπίεση (compression moulding) για την παραγωγή του πλαισίου (chassis), στο οποίο τα σύνθετα υλικά μετατρέπονται σε μια ένωση μορφοποίησης ελάσματος (sheet mould processing-SMC), δηλαδή σαν ένα πλαστικό φύλλο ενισχυμένο με συνεχείς ίνες. Οι πρόσφατες καινοτομίες στον τομέα των προηγμένων σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία έχουν οδηγήσει στη χρήση συνθέτων με οπλισμό από ίνες άνθρακα (CFRP), και μήτρα από διάφορες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, σε πολλαπλές εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπως αυτή της Φόρμουλα 1 και σε νέα υβριδικά αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Εφαρμογή CFRP υλικών στο chassis του νέου υβριδικού μοντέλου BMWi8 sports sedan [WS7].

Κατασκευή τεχνικών έργων: Η χρήση των σύνθετων υλικών με μήτρα πολυμερή στην κατασκευή των τεχνικών έργων αποτελεί σήμερα μια αποτελεσματική μέθοδο που προστέθηκε για την αντιμετώπιση πάσης φύσεως κατασκευαστικών ατελειών και βλαβών.

Σε αντίθεση με το παρελθόν που οι ίνες χάλυβα είχαν κοινή αποδοχή, σήμερα χρησιμοποιούνται και οι ίνες πολυμερών. Οι επεμβάσεις ενίσχυσης με σύνθετα υλικά αποτελούν σήμερα δοκιμασμένες εναλλακτικές λύσεις των παραδοσιακών μεθόδων έγχυτου σκυροδέματος, εκτοξευμένου σκυροδέματος και μεταλλικών ελασμάτων.

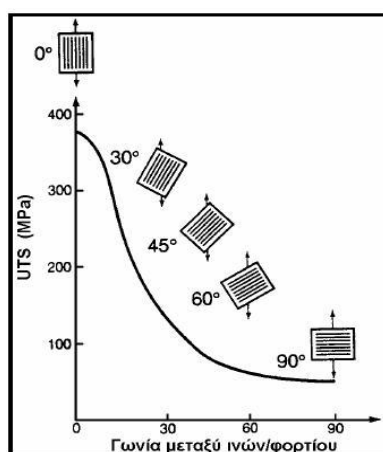
1.5 Ιδιότητες συνθέτων υλικών

Βασικό κριτήριο αξιολόγησης των υλικών είναι οι ειδικές ιδιότητές τους. Ένα σύνθετο υλικό μπορεί να συνδυάζει τις ιδιότητες ενός κοινού υλικού και χαμηλό βάρος, κάτι που συνεπάγεται ελαφριές κατασκευές. Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων ινών και μήτρας.

Οι ιδιότητες των συνθέτων υλικών διαχωρίζονται σε μηχανικές και φυσικές. Παραδείγματα μηχανικών ιδιοτήτων είναι η αντοχή σε εφελκυσμό ή θλίψη, η δυσκαμψία, η ολκιμότητα, η σκληρότητα καθώς και η αντοχή σε κρούση και κόπωση. Στις φυσικές ιδιότητες ανήκουν η πυκνότητα, η θερμική συμπεριφορά, η μονωτική συμπεριφορά και η αντίσταση σε διάβρωση.

Εάν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι σε μια κατεύθυνση, τότε είναι εύλογο να χρησιμοποιηθεί ύφασμα μίας κύριας διεύθυνσης (UD), έτσι ώστε η μέγιστη αντοχή του υφάσματος να είναι κατά τη διεύθυνση αυτή. Η Εικόνα 7 αποτυπώνει το ρόλο

του προσανατολισμού των ινών για την αντοχή του υλικού, και είναι φανερό ότι όταν το ζητούμενο είναι η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού σε μια διεύθυνση, ιδανική περίπτωση παρουσιάζεται το σύνθετο με 0° γωνία ινών. Ένα μέρος του αεροπλάνου από την άτρακτο, κατασκευασμένο από πολλές στρώσεις ινών άνθρακα μίας διεύθυνσης (UD) θα δώσει εξαιρετικό διαμήκες μέτρο ελαστικότητας E και υψηλή αντοχή θραύσης σε εφελκυσμό (fracture stress), από την άλλη όμως τα αντίστοιχα μεγέθη σε θλίψη θα είναι πολύ μικρότερα, κατά την οποία οι ίνες μπορεί να αστοχήσουν λόγω λυγισμού (bulk material formation).

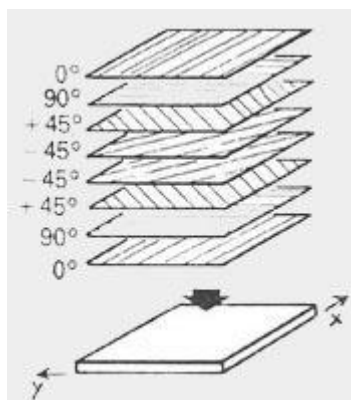


Εικόνα 7: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή εφελκυσμού του συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με οπλισμό ίνες E-γυαλιού [WS8].

Από την άλλη πλευρά αν το φορτίο είναι στο επίπεδο και κατά δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ύφασμα με κύρια νήματα (stitching) κατά δύο διευθύνσεις κάθετα μεταξύ τους. Στην προκειμένη περίπτωση η αντοχή του σύνθετου είναι ίδια και μέγιστη κατά τις δύο αυτές κάθετες διευθύνσεις. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάζεται κατά τη διεύθυνση $\theta = 45^\circ$ με τις κύριες διευθύνσεις που σχηματίζουν τα κύρια νήματα. Το σύνθετο που παρουσιάζει αυτές τις ιδιότητες ονομάζεται **ορθότροπο**.

Δισδιάστατο ισότροπο υλικό καλείται το σύνθετο υλικό που υπό οποιαδήποτε διεύθυνση στο επίπεδο του παρουσιάζει τις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες. Στον τριδιάστατο χώρο αυτό το υλικό είναι και ονομάζεται **σχεδόν ισότροπο**. Για την κατασκευή τέτοιου σύνθετου υλικού πρέπει να τοποθετηθούν πολλές στρώσεις υφάσματος με τις κύριες διευθύνσεις των νημάτων του κατάλληλα διευθετημένες έτσι ώστε το σύνθετο που θα προκύψει να συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο υπό

οποιαδήποτε διεύθυνση στο επίπεδο (xy) του εφαρμοστεί το φορτίο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

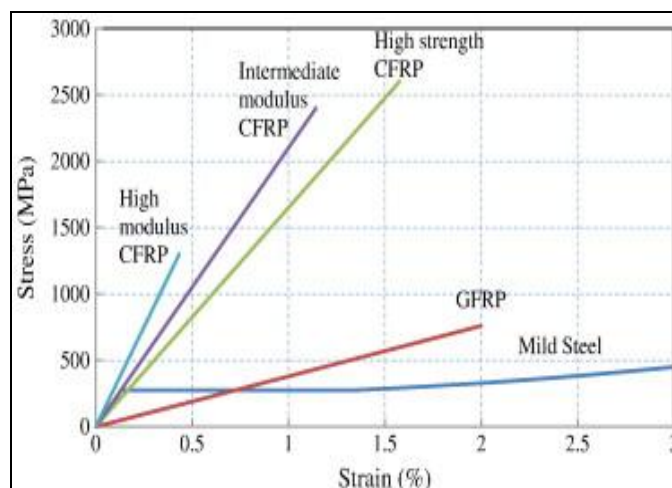


Εικόνα 8: Κατασκευή συνθέτου σχεδόν-ισότροπου, με 8 στρώσεις νημάτων κατά διευθύνσεις 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° [WS3].

Ένα υλικό που διαθέτει αυτές τις μηχανικές ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις στο χώρο, ονομάζεται **ισότροπο υλικό**. Συνήθως τα σύνθετα υλικά είναι γενικώς ανισότροπα υλικά, ενώ μπορούν να γίνουν με τον κατάλληλο αριθμό και διεύθυνση των διευθύνσεων των νημάτων, υλικά διδιάστατα ισότροπα ή αλλιώς υλικά τριδιάστατα σχεδόν ισότροπα.

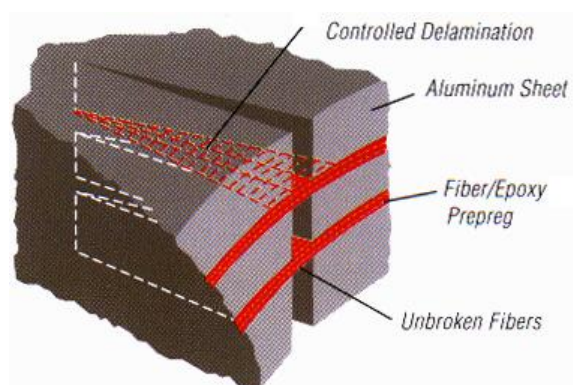
Το ποσοστό της ενίσχυσης παίζει σημαντικό ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου. Η ποσοστιαία αναλογία της περιεκτικότητας κατά βάρος (weight fraction) της ενίσχυσης προς το συνολικό βάρος του συνθέτου (μήτρα και ενίσχυση) επηρεάζει θετικά τη μηχανική απόδοση του υλικού κατά την επιβαλλόμενη φόρτιση. Κάτι τέτοιο εξηγείται από το γεγονός ότι στις ίνες μεταφέρεται το φορτίο από τη μήτρα και έτσι λειτουργούν ως ενισχυτικός μηχανισμός του συνθέτου. Συνήθως το ποσοστό του βάρους της ενίσχυσης κείμενεται από 25-50% του συνολικού βάρους του συνθέτου.

Στην περίπτωση που το ποσοστό βάρους του οπλισμού είναι υψηλό τότε η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σ - ϵ) του συνθέτου θα είναι πλησιέστερη προς την (σ - ϵ) των ινών. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σ - ϵ) για διαφορετικές κατηγορίες συνθέτων σε σύγκριση με αυτές του χαλυβδοσιδήρου.



Εικόνα 9: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σ - ϵ) για διαφορετικές κατηγορίες συνθέτων σε σύγκριση με αυτές του χαλβδοσιδήρου [2].

Επιπρόσθετα ο οπλισμός (ίνες κυρίως) μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στην παρεμπόδιση διάδοσης ρωγμής, η οποία ξεκινά από μια εγκοπή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Οι ίνες έχουν τη δυνατότητα να παραλαμβάνουν αρκετά μεγάλα φορτία μέχρι την πλήρη αστοχία του υλικού. Στις επόμενες ενότητες θα αναλυθούν οι μέθοδοι παρακολούθησης των βλαβών στο εσωτερικό τους αλλά και η πρόληψη της αστοχίας τους.



Εικόνα 10: Παρεμπόδιση διάδοσης ρωγμής στην περίπτωση ενός πολυσρωματικού μεταλλικού συνθέτου [WS9].

1.6 Συστήματα ελέγχου δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring) & Ενσωματωμένοι αισθητήρες στα σύνθετα

Τις τελευταίες δεκαετίες η αεροναυπηγική βιομηχανία ψάχνει για υλικά με πολλαπλές λειτουργίες/ρόλους (multifunctional systems). Είναι πλέον αισθητή η ανάγκη

ανάπτυξης νέων-πολυλειτουργικών υλικών με ευφυή χαρακτηριστικά (sensing capabilities) και ταυτόχρονα αυξημένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες.

Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν αναπτυχθεί ολοκληρωμένα συστήματα για το συνεχή έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (**structural health monitoring-SHM**), δηλαδή την αναγνώριση, το χαρακτηρισμό και την αποτίμηση βλάβης για την υποστήριξη αποφάσεων που αφορούν τον κύκλο ζωής του υλικού. Αποτελεί ένα σύστημα αρκετά ικανό ώστε να ανιχνεύσει τις αρνητικές μεταβολές στη συνολική δομή ενός υλικού, να βελτιωθεί η αξιοπιστία του καθώς και να μειωθεί το κόστος του κύκλου ζωής του.

Ένα τέτοιο σύστημα δε θα πρέπει το ίδιο να προσδίδει έμμεση βλάβη στο υλικό – αντιθέτως να ενισχύει τη μηχανική απόδοση του υλικού αλλά και να αποφέρει τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια κάτω από χαμηλά λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης. Καθώς η λογική της λειτουργίας των διαφόρων συστημάτων ελέγχου δομικής ακεραιότητας στηρίζεται στη μη-βλάβη του υλικού, αξιοποιούν διάφορες τεχνικές μη-καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ). Οι συγκεκριμένες τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση της βλάβης και σε συνδυασμό με τη χρήση ειδικών προγραμμάτων υπολογιστών όπου συλλέγονται οι πληροφορίες/μετρήσεις, αναλύονται οι βλάβες και γίνεται πρόγνωση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής του υλικού. Βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι κάθε συστήματος δομικής ακεραιότητας είναι η χρήση αισθητήρων (sensors).

Οι αισθητήρες καταγράφουν το φυσικό φαινόμενο που σχετίζεται με τη βλάβη ανάλογα με την τεχνική ΜΚΕ και η χρήση τους παρέχει έγκαιρη πληροφόρηση για μεταβολή της δομής λόγω κόπωσης, διάβρωσης, κρούσης.

Παρ'όλα αυτά, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες –που η χρήση τους έγκειται στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας αυτών των υλικών- θα πρέπει να (α) διακρίνονται από μικρό μέγεθος και μικρό βάρος, (β) να μην προκαλούν έμμεση βλάβη στο σύνθετο, (γ) να μπορούν να λειτουργούν συνεχώς και (δ) να επιστρέφουν τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο [3]. Αυτό φυσικά συνοδεύεται και από το γεγονός ότι οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι ανθεκτικοί σε κάποια τυχόν φόρτιση του υλικού και οι μετρήσεις θα πρέπει να καλύπτουν τη μεγαλύτερη δυνατή περιοχή στο υλικό.

State-of-the-art αισθητήρες

Οι αισθητήρες επιστρέφουν δεδομένα από συγκεκριμένες περιοχές του υλικού και συνεπώς πρέπει να τοποθετούνται στα σωστά σημεία για να ανιχνεύσουν το επιθυμητό συμβάν. Οι τρέχουσες προσεγγίσεις συστημάτων δομικής ακεραιότητας (SHM) χρησιμοποιούν συχνά strain gages, οπτικές ίνες, επιταχυνσιόμετρα και πιο πρόσφατα πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και παρουσιάζονται παρακάτω.

α) Αισθητήρες οπτικών ινών

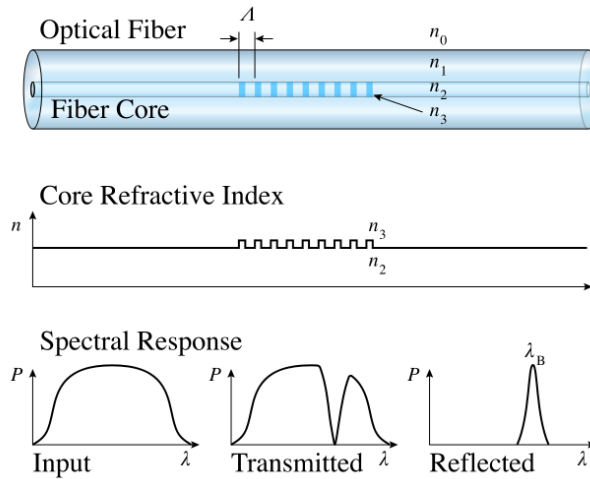
Η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών συνδέθηκε άμεσα με τις εξελίξεις στις βιομηχανίες της οπτικό-ηλεκτρονικής και των επικοινωνιών με οπτικές ίνες. Πρόσφατα βρήκαν εφαρμογές στην ανίχνευση μεταβολών σε φυσικά μεγέθη όπως τάση, δόνηση, θερμοκρασία, υπερηχητικά κύματα κλπ.

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών, σαν αισθητήρες, είναι το μικρό τους μέγεθος που επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση στο υλικό, χωρίς καταστροφή του υλικού προς παρακολούθηση καθώς και η μικρή τους μάζα, η οποία εξασφαλίζει ταχεία αντίδραση στις μεταβολές της δομής του υλικού. Επίσης καθώς η οπτική ίνα είναι ένα διηλεκτρικό μέσο, οι αισθητήρες οπτικών μέσων είναι τελείως απρόσβλητοι από οποιονδήποτε τύπο ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζονται εφαρμογές οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό παραμορφώσεων (optical fiber strain sensors) σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα.

β) Οπτικές ίνες Bragg grating

Υπάρχουν πολλοί αισθητήρες οπτικών ινών από τους οποίους οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι για τη μέτρηση και παρακολούθηση της ανάπτυξης των παραμενουσών τάσεων είναι οι αισθητήρες οπτικής ίνας Bragg (FBG-Fibre Bragg Grating). Ο αισθητήρας FBG ανακλά ένα τμήμα του εισερχόμενου σε αυτόν φωτός. Το ανακλώμενο αυτό τμήμα έχει συγκεκριμένο μήκος κύματος, που λέγεται μήκος κύματος Bragg. Το υπόλοιπο φως διέρχεται μέσω του αισθητήρα χωρίς αλλαγή των ιδιοτήτων του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



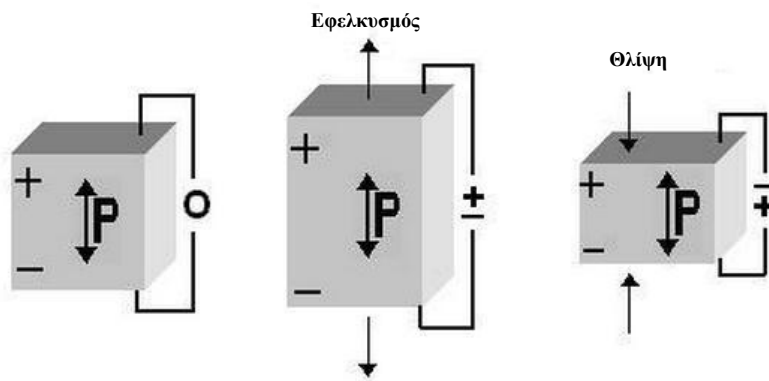
Εικόνα 11: (α) Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα οπτικής ίνας Bragg (FBG-Fibre Bragg Grating), (β) διάγραμμα διάθλασης κατά μήκος της οπτικής ίνας και (γ) ανάλυση φασματικής απόκρισης του προσπίπτοντος κύματος σε μεταδιδόμενο (transmitted) και ανακλώμενο (reflected), ως συνάρτηση του μήκους κύματος Bragg (λ) [WS10].

Το μήκος κύματος Bragg ορίζεται από τις ιδιότητες της οπτικής ίνας, οι οποίες μεταβάλλονται με την αλλαγή της θερμοκρασίας, επιβολή μηχανικής φόρτισης κλπ. Όλες αυτές οι αλλαγές αποτυπώνονται σε αλλαγές του μήκους κύματος Bragg. Παρακολουθώντας λοιπόν τις αλλαγές αυτές είναι εφικτή η παρακολούθηση της εξέλιξης των τάσεων και των παραμορφώσεων σε ένα υλικό.

Η δυνατότητα αυτή σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος, τη μικρή τους διάμετρο και την ακρίβεια των μετρήσεων κατέστησαν τους FBG τους σημαντικότερους οπτικούς αισθητήρες. Επίσης τα fiber bragg gratings μπορούν να εξασφαλίσουν την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας μιας κατάσκευής, καθώς μπορούν να επικοληθούν σε σύνθετα υλικά με την χρήση επιθέματος. Ταυτόχρονα ενισχύουν με αυτό τον τρόπο και την αντοχή της κατασκευής σε διάβρωση.

γ) Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες

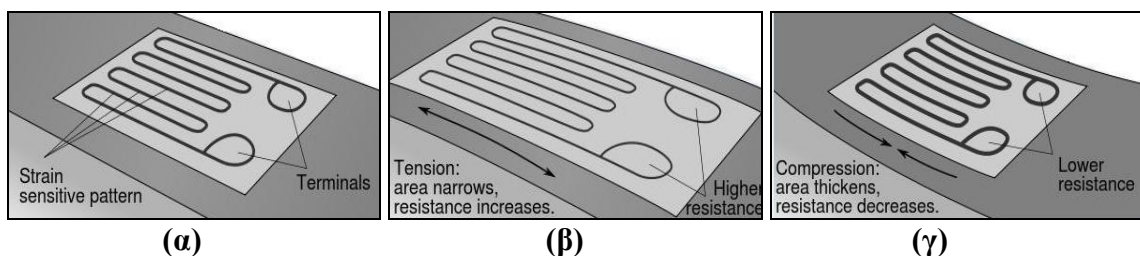
Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες και ως διεγέρτες ταυτόχρονα και η λειτουργία στηρίζεται στην αλληλεπίδραση του ηλεκτρομηχανικού πεδίου. Πιεζοηλεκτρισμός είναι το φαινόμενο εμφάνισης ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια ενός σώματος όταν αυτό συνθλίβεται, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 12. Συχνά συμβαίνει και το αντίστροφο, δηλαδή το ίδιο υλικό εμφανίζει μηχανικές τάσεις και μηχανική παραμόρφωση όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 12: Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο [WS11].

δ) Strain gages

Αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά. Το strain gage είναι ένας αισθητήρας του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται με το επιβαλλόμενο φορτίο. Μετατρέπει αυτό το εφαρμοζόμενο φορτίο σε μια αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση η οποία μπορεί στη συνέχεια να μετρηθεί. Συγκεκριμένα τα strain gages αποτελούνται από ένα εύκαμπτο λεπτό σύρμα που συγκολλάται στην επιφάνεια του συνθέτου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Τα χρησιμοποιούμενα σύρματα είναι συνήθως κράματα χαλκού – νικελίου και νικελίου – χρωμίου.



Εικόνα 13: Strain gage (α) σε κανονική διάταξη, (β) υπό επιβαλλόμενη εφελκυστική φόρτιση και (γ) επιβαλλόμενη θλιπτική φόρτιση [WS12].

Όπως παραμορφώνεται το σύνθετο κατά τη μηχανική φόρτιση η παραμόρφωση μεταφέρεται μέσω της μήτρας στο λεπτό σύρμα και έτσι μεταβάλλεται η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του. Αυτή η αλλαγή αντίστασης μετριέται χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone. Η μέθοδος της μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

1.7 Μέθοδος μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του συνθέτου

Η τεχνική που προβλέπει τη χρήση του ιδίου του υλικού ως αισθητήρα καταγραφής της δικιάς του βλάβης μέσω των μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης καλείται μέθοδος μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης (electric resistance method) και ανήκει στις μεθόδους ΜΚΕ. Το φαινόμενο αυτό στηρίζεται στο ότι η αναπτυσσόμενη βλάβη επηρεάζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εκάστοτε ηλεκτρικά αγωγίμου υλικού που υπάρχει στο σύνθετο. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει κυρίως εφαρμογή σε σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ίνες άνθρακα, ως οπλισμό. Η παράμετρος που εκμεταλλεύεται σε αυτή την περίπτωση είναι η αρκετά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του άνθρακα.

Η μέθοδος μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης είχε αρχικά χρησιμοποιηθεί από τους Schulte και Baron [4] για την ανίχνευση της βλάβης μεταξύ των στρώσεων συνθέτου υλικού ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP), κάτω από συνθήκες στατικής και δυναμικής φόρτισης.

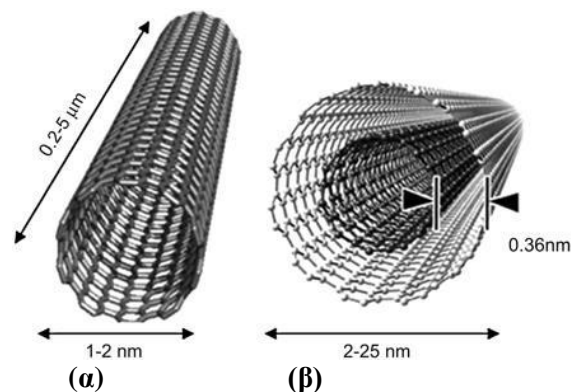
Έχει αποδειχθεί η εξαιρετική συνάφεια της ηλεκτρικής αντίστασης, των πολυμερών συνθέτων υλικών με ενισχυτικά μέσα τις ίνες άνθρακα, με τη μηχανική παραμόρφωση και την αναπτυσσόμενη βλάβη κατά τη διάρκεια διαφόρων τύπων φορτίσεων (ψευδό-στατική, κόπωση, κρούση, κ.λ.π). Γι'αυτό το λόγο πολλές ερευνητικές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης σε αντίστοιχες περιπτώσεις [5]-[7].

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για τη μελέτη διαφόρων μηχανισμών βλάβης στο εσωτερικό του συνθέτου. Συγκεκριμένα οι Seo και Lee θεώρησαν ότι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να είναι μια παράμετρος που αντιπροσωπεύει τη βλάβη ενός CFRP συνθέτου σε τέστ κοπώσεως, όπως δηλαδή και η υποβάθμιση δυσκαμψίας του [8]. Ο Todoroki θεώρησε ότι κατά την επιβολή της μηχανικής φόρτισης η έντονη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ των στρώσεων του συνθέτου οφείλεται στην εμφάνιση του φαινομένου της αποστρωμάτοποίησης [9]-[10]. Επίσης σε μια άλλη μελέτη προτάθηκε η χρήση της μεθόδου μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης για την ανίχνευση πιθανών ρωγμών στη μήτρα ενός CFRP υλικού κάτω από συνθήκες μηχανικής φόρτισης [11].

1.8 Χρήση των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) ως αισθητήρες

Ο προβληματισμός που προκύπτει κατά τη χρήση της μεθόδου μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του υλικού είναι ότι περιορίζεται μόνο στον εντοπισμό μηχανισμών αστοχίας των αγώγιμων ινών άνθρακα (υποβάθμιση ιδιοτήτων κατά την κόπωση, θραύση) και μηχανισμών αστοχίας της μήτρας και της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας. Το γεγονός αυτό δεν επιτρέπει στη συγκεκριμένη τεχνική έως τώρα να εστιαστεί σε πρώιμα στάδια αστοχίας στο υλικό.

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα θα δώσει η χρήση των νανοσωλήνων άνθρακα (carbon nanotubes-CNTs) στο εσωτερικό της μήτρας. Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να αποτελέσουν ένα επιπλέον ενισχυτικό μέσο, το οποίο θα προσδώσει πολυλειτουργικότητα (multi-functionability) που είναι τόσο κρίσιμη σε αρκετούς τομείς χρήσης των υλικών (αεροδιαστημική, αυτοκινητο βιομηχανία). Η Εικόνα 14 απεικονίζει τη δομή νανοσωλήνων άνθρακα (α) μονού τοιχώματος (single-walled CNTs) και (β) διπλού τοιχώματος (double-walled CNTs).



Εικόνα 14: Νανοσωλήνες άνθρακα (α) μονού τοιχώματος (single-walled CNTs) και (β) διπλού τοιχώματος [WS13].

Έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες που αναλύουν τη δυνατότητα των CNTs μέσω της πρόσθεσης τους στη μήτρα να λειτουργήσουν ως αισθητήρες που θα αναγνωρίσουν την εμφάνιση μιας ενδεχόμενης βλάβης στο εσωτερικό του συνθέτου [12]-[14]. Οι Thostenson και Chou έδειξαν ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της έναρξης και της εξέλιξης των μικροδομικής βλάβης στο εσωτερικό του συνθέτου [15]-[16]. Έτσι λοιπόν κατέστη δυνατή η παρακολούθηση σε πραγματικό

χρόνο της δομικής ακεραιότητας του συνθέτου, συνδυάζοντας τις τιμές ηλεκτρικής αντίστασης με αυτές του επιβαλλόμενου φορτίου και παραμόρφωσης.

Λόγω της πολύ υψηλής ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε μη-αγώγιμα σύνθετα υλικά με σκοπό να ενισχυθεί η δυνατότητα παρακολούθησης της δομικής τους ακεραιότητας, όπως για παράδειγμα στα GFRP υλικά [17]-[18]. Η χρήση ρητίνης ενισχυμένης με CNTs αποφέρει ηλεκτρική αγωγιμότητα στα σύνθετα των οποίων ο οπλισμός δε διαθέτει αυτή την ιδιότητα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των υλικών και η ανίχνευση οποιασδήποτε βλάβης μέσω της μεθόδου μεταβολής ηλεκτρικής αντίστασης.

Τέλος, ο συνδυασμός των καταπληκτικών μηχανικών ιδιοτήτων τους (υψηλό αξονικό μέτρο ελαστικότητας μέχρι 1,2TPa, αντοχή σε εφελκυσμό περίπου εκατό φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα και πολύ μεγάλη παραμόρφωση θραύσης) με τις αξιόλογες θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες (υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλή ειδική θερμική αντίσταση) καθιστά τα CNTs ως ιδανικό ενισχυτικό μέσο για κατασκευή νέων προηγμένων συνθέτων υλικών [19]-[21].

1.9 Νανοϊνες άνθρακα

Η αναγνώριση των εξαιρετικών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) ως δυναμικά ενισχυτικά μέσα, τα οποία προσδίδουν πολυ-λειτουργικότητα σε σύνθετα με πολυμερική μήτρα [22]-[24] αλλά και η δυνατότητα χρήσης τους σε μη-αγώγιμα σύνθετα (π.χ. GFRP) οδήγησαν στην ανάπτυξη συνεχών ινών υψηλής απόδοσης που βασίζονται στους νανοσωλήνες άνθρακα [25].

Έχει αποδειχθεί ότι οι νανοϊνες άνθρακα που περιέχουν αξονικά ευθυγραμμισμένα CNTs, διαθέτουν πολύ υψηλότερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας και αναλογία strength-to-weight από συμβατικές ίνες [26]-[27]. Επιπλέον, οι νανοϊνες άνθρακα έχουν παρουσιάσει ικανοποιητική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές τους ιδιότητες, οι νανοϊνες άνθρακα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικά μέσα σε σύνθετα και ως μηχανικοί αισθητήρες.

Τα νήματα CNT (CNT yarns) μπορούν να ενσωματωθούν στα σύνθετα υλικά ως αισθητήρες καθώς διαθέτουν σταθερή συμπεριφορά κατά τη μέτρηση αντίστασης- παραμόρφωσης και δεν επιβαρύνουν το σύνθετο, όσον αφορά το επιπλέον βάρος. Έτσι λοιπόν τα ενσωματωμένα νήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας αλλά και της διάδοσης ρωγμών σε σύνθετο σε πραγματικό χρόνο. Ο Zhao κ.α. χρησιμοποίησαν τη μέθοδο μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης για να συσχετίσουν τις τιμές ηλεκτρικής αντίστασης των CNT νημάτων με αυτές της παραμόρφωσης [28].

Παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των νανοϊνών άνθρακα

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στις μηχανικές ιδιότητες των νανοϊνών άνθρακα ποικίλουν ανάλογα με την κλίμακα μήκους που τους εξετάζουμε. Στη νανο-κλίμακα, επηρεάζονται άμεσα από τις μηχανικές ιδιότητες και τη γεωμετρία (μήκος, διάμετρος κλπ.) των CNTs. Στη μικρο-κλίμακα, οι παράγοντες που συμβάλλουν στις ιδιότητες των νανοϊνών άνθρακα είναι η διάταξη των νανοσωλήνων και η εσωτερική δυνατότητα μεταφοράς φορτίου μεταξύ των νανοσωλήνων. Τέλος, στη μακρο-κλίμακα οι σημαντικότεροι παράγοντες που συμβάλλουν είναι γωνία περιστροφής ινών, η διάμετρός τους και η δυνατότητα δημιουργίας δέσμες νημάτων (yarns).

Η υψηλότερη αντοχή που έχει καταγραφεί κατά την εφελκυστική φόρτιση των CNT ινών είναι 8,8GPa και το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας Young είναι 357GPa [27]. Παρ'όλα αυτά οι τιμές αυτές είναι πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των μεμονωμένων CNTs. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των νανοϊνών άνθρακα:

α) Μήκος νανοσωλήνων: Οι μεγαλύτεροι νανοσωλήνες συμβάλλουν περισσότερο στην ενίσχυση των ινών από ότι οι μικρότεροι. Μια ενδεχόμενη αύξηση του μήκους των CNTs ενισχύει τη μεταξύ τους επιφάνεια επαφής, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου που δύναται να μεταφέρουν μεταξύ τους οι νανοσωλήνες και έτσι αυξάνεται η συνολική δύναμη της ίνας [26], [29] .

β) Διάμετρος και πάχος νανοσωλήνων: Με μεγαλύτερη διάμετρο και πάχος συναντάμε περισσότερες επαφές μεταξύ διαφορετικών CNTs που οδηγεί στην αποτελεσματική μεταφορά του φορτίου μεταξύ τους.

γ) *Συστροφή των νανοϊνών*: Η μεταφορά φορτίου μεταξύ CNTs σε μια ίνα δεν επηρεάζεται μόνο από τις επιφάνειες επαφής, αλλά επίσης και από τους εσωτερικούς (ελεύθερους) χώρους των CNTs, οι οποίοι σχετίζονται με την πυκνότητα των CNTs. Η ίνα είναι σχετικά χαλαρή όταν υπάρχουν μεγάλοι χώροι στο εσωτερικό των δεσμών των CNTs (bundles), όταν δηλαδή η γωνία συστροφής της ίνας είναι μικρή. Από μια τέτοια χαλαρή δομή δεν προκύπτει υψηλή αντοχή στις νανοϊνες άνθρακα. Συνεπώς η αύξηση της γωνίας στρέψης είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για να φέρει τα CNTs σε στενότερη επαφή μεταξύ τους αλλά και να βελτιώσει το συντελεστή τριβής (μ) μεταξύ τους, και με αυτό τον τρόπο να ενισχυθεί η δύναμη της ίνας [30].

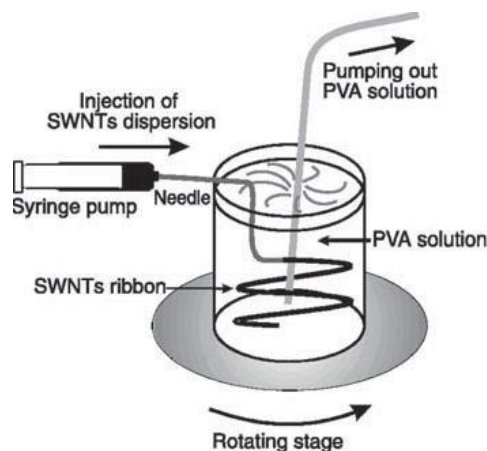
δ) *Εμποτισμός των ινών με πολυμερή*: Σε μια καθαρή ίνα CNT, τα CNTs αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των δυνάμεων van der Waals και συντελούν σε μία αποτελεσματική μεταφορά φορτίου μεταξύ των CNTs. Ο εμποτισμός με πολυμερές είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των νανοϊνών άνθρακα. Κάτι τέτοιο οφείλεται στην αυξημένη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου και την κρυσταλλικότητα του εμποτισμένου πολυμερούς.

Οι Khan και Young ανέπτυξαν νανοϊνες με μήτρα από πολυεστέρα και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και νανοσωλήνες διπλού τοιχώματος από άνθρακα και από γραφένιο και τις ενσωμάτωσαν σε σύνθετο υλικό. Παρατήρησαν ότι το μέτρο ελαστικότητας έφτασε μέχρι και 42GPa και η αντοχή σε εφελκυσμό 1.2GPa για 2% κ.β. περιεκτικότητα σε CNTs [31].

Σε μια άλλη μελέτη ο Naraghi ανέπτυξε μια πειραματική προσέγγιση για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση του πολυακρυλικού εμποτισμού στις μηχανικές ιδιοότητες των CNT ινών [32]. Τα CNTs που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διπλού τοιχώματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλή τιμή παραμόρφωσης θραύσης (elongation at fracture) - 20% καθώς και αντοχή εφελκυσμού της τάξεως του 1.4GPa.

Μια πολύ ελπιδοφόρα, αγωγίμη λύση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό μέσο σε σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας είναι η νανοίνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT fiber). Η PVA-CNT ίνα είναι μια μακρά ίνα αποτελούμενη από νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος άνθρακα που κατασκευάζονται μέσω της

της εισαγωγής μιας διασποράς νανοσωλήνων άνθρακα σε ένα διάλυμα PVA, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15 [33]-[34].



Εικόνα 15: Αναπαράσταση της παρασκευής PVA-CNT ιβών [33].

Ο Liu κ.α. ανέλυσε τις μηχανικές ιδιότητες των συγκεκριμένων ιβών [35]. Το σύνθετο με ενσωματωμένη PVA/CNT ίνα (PVA 19% κατά βάρος) διαθέτει αντοχή εφελκυσμού 1.95GPa, η οποία είναι 255% μεγαλύτερη από εκείνη του συνθέτου με συστραμμένη CNT ίνα (0,55 GPa). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη δύναμη του PVA-CNT ιβών αποδίδεται στην ενισχυμένη αποτελεσματικότητας μεταφοράς φορτίου μεταξύ CNTs μετά τον εμποτισμό PVA λύσης.

Η παρούσα μελέτη θα εστιάσει στην ανάλυση της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων ιβών ενσωματωμένων σε σύνθετο υλικό, με κύριο άξονα εστίασης το φαινόμενο της μεταφοράς φορτίου στη διεπιφάνεια μεταξύ PVA-CNT ίνας και πολυμερικής μήτρας.

2. Διεπιφανειακά φαινόμενα

2.1 Εισαγωγή

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών επηρεάζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη δομή και τις ιδιότητες της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας (ή κόκκων μήτρας. Ως διεπιφάνεια ή ενδιάμεση φάση (interface) ορίζεται η κοινή επιφάνεια μεταξύ ινών-μήτρας ή κόκκων-μήτρας αλλά και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Στην παρούσα ανάλυση θα επικεντρωθούμε στην περίπτωση διεπιφάνειας ίνας-μήτρας. Ο βασικός προβληματισμός είναι η αποτελεσματική μεταφορά φορτίου από τη μήτρα στο ενισχυτικό μέσο. Μια ενδεχόμενη αύξηση της κατανομής των τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και των ινών θεωρείται ως μειονέκτημα για τη μηχανική απόδοση του συνολικού συνθέτου. Το συγκεκριμένο φαινόμενο δυσκολεύει όταν η μήτρα και οι ίνες παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στις ελαστικές τους ιδιότητες, όπου σε αυτή την περίπτωση πρέπει οι τάσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα να μεταφέρονται στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας.

Το φαινόμενο της μεταφοράς των τάσεων από τη μήτρα στις ίνες στηρίζεται σε κάποιες υποθέσεις για την θεωρητική ανάλυση του. Αυτές είναι οι παρακάτω:

- Πολύ λεπτή διεπιφάνεια
- Ελαστική συμπεριφορά μήτρα και ίνας
- Τέλεια συνδεσιμότητα (perfect bonding) ίνας-μήτρας
- Ταύτιση ιδιοτήτων υλικού σε επαφή με ίνα / υλικού μακριά από την ίνα

Σε αυτές τις απλοποιητικές υποθέσεις στηρίχθηκε ο μαθηματικός υπολογισμός του τασικού πεδίου στη διεπιφάνεια. Όπως θα δούμε παρακάτω στις παραγράφους 2.2 και 2.3 κάποιες μελέτες στηρίχθηκαν σε νέες και πιο ορθολογικές υποθέσεις.

Μια αδύναμη διεπιφανειακή πρόσφυση ανάμεσα στη μήτρα του συνθέτου και στις ίνες θα οδηγήσει σε αναποτελεσματική μεταφορά της τάσης από το ένα μέσο στο άλλο που σίγουρα θα ελαττώσει την ενισχυτική ικανότητα του συνθέτου. Ως πρόσφυση ορίζεται το πόσο εύκολα ή δύσκολα διαχωρίζονται η ίνα με τη μήτρα στα

σημεία επαφής τους (διεπιφάνεια). Σε αυτό το σημείο θα αναλυθούν οι μέθοδοι πρόσφυσης.

I) Ενδοδιάχυση (interdiffusion)

Πρόκειται για το δεσμό μεταξύ δυο πολυμερικών επιφανειών από το μοριακό πλέγμα της μιας στην άλλη. Η διατήρηση ενός ισχυρού δεσμού εξαρτάται από (α) τη θερμοδυναμική ισορροπία ανάμεσα στα δυο συστατικά, (β) το ποσοστό διασταυρώσεων πλέγματος, (γ) τον αριθμό των μακρομοριακών αλυσίδων που διαχέονται από το ένα υλικό στο άλλο καθώς και (δ) από την αντοχή των δεσμών μέσα στα μόρια.

II) Προσρόφηση και διαβροχή

Όταν δύο ηλεκτρικά ουδέτερες επιφάνειες βρεθούν αρκετά κοντά μεταξύ τους δημιουργείται μια φυσική έλξη που μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα, έχοντας υπόψη τη διαβροχή στερεών επιφανειών από υγρά. Η διαβροχή σχετίζεται με την επιφανειακή ενέργεια του κάθε υλικού που βρίσκονται σε επαφή, τη διεπιφανειακή ενέργεια και το έργο συνάφειας. Στην περίπτωση δύο στερεών που έρχονται σε επαφή, οι επιφανειακές τραχύτητες σε μικροκλίμακα και σε ατομικό επίπεδο εμποδίζουν την πλήρη επαφή, εκτός από κάποια μεμονωμένα σημεία. Για την επίτευξη ικανοποιητικής διαβροχής της επιφάνειας ενός ενισχυτικού μέσου, πρέπει η μήτρα να καλύψει κάθε κενό ώστε να φύγει ο αέρας. Οι ελκτικές δυνάμεις που τελικά συντελούν στην καλή διαβροχή και άρα στην βελτίωση της πρόσφυσης είναι οι εξής:

- Δυνάμεις Coulomb μεταξύ αντίθετα φορτισμένων ιόντων.
- Δυνάμεις Van der Waals, οι οποίες είναι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ πολικών ή και μη πολικών μορίων.
- Δυνάμεις Ανταλλαγής, οι οποίες είναι ελκτικές δυνάμεις στις οποίες οφείλεται ο ομοιοπολικός δεσμός.

III) Ηλεκτροστατική Έλξη

Είναι ένας μηχανισμός πρόσφυσης που αναπτύσσεται μεταξύ δυο επιφανειών (πολυμερική μήτρα-ίνα) που φέρουν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Τότε εμφανίζονται

ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δύο επιφανειών. Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις δε συνεισφέρουν σημαντικά στην ισχύ του δεσμού ίνας-μήτρας, ενώ ταυτόχρονα η τιμή των είναι μεταβλητή. Η μόνη περίπτωση που οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι χρήσιμες είναι όταν χρειάζεται να επικαλυφθούν οι ίνες με διάλυμα που είναι φορτισμένο κατάλληλα.

IV) Χημική σύνδεση

Ο μηχανισμός της ηλεκτροστατικής έλξης ενισχύεται από την ανάπτυξη χημικού δεσμού μεταξύ μίας επιφάνειας της ίνας με μία συμβατή επιφάνεια της μήτρας. Αυτός ο δεσμός είναι που θα καθορίσει την πιθανή αστοχία της διεπιφάνειας. Η ισχύς του δεσμού εξαρτάται από τον αριθμό των επιφανειών που είναι συμβατές.

V) Μηχανική Πρόσφυση

Μερικοί δεσμοί μπορεί να δημιουργηθούν απλά από το μηχανικό αγκίστρωμα (interlocking) των δύο επιφανειών. Στην περίπτωση αυτή η μήτρα λόγω πλήρους διαβροχής του ινώδους υλικού, ακολουθεί τη δομή της επιφάνειας της ίνας στο σημείο επαφής και λόγω της τραχύτητας της ίνας να δημιουργηθεί μηχανική σύνδεση εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται. Η αντοχή της διεπιφάνειας είναι μικρή σε εφελκυσμό, παρ' όλα αυτά, αν η τραχύτητα της επιφάνειας είναι τέτοια ώστε να ευνοείται η ευρύτερη ανάπτυξη χημικού δεσμού, μπορεί να εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε διάτμηση.

2.2 Αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας

Τα τελευταία χρόνια προέκυψαν αρκετά αναλυτικά μοντέλα που προσπάθησαν να διερευνήσουν την κατανομή των τάσεων μεταξύ των ενισχυτικών ινών -για ένα δεδομένο μήκος ίνας- ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης εξωτερικής φόρτισης, των χαρακτηριστικών της ίνας και το μέτρου ελαστικότητας της πολυμερικής μήτρας. Ο Cox πρότεινε το πρώτο και πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο διαφορικής διατμητικής ανάλυσης (shear-lag analysis) για την περίπτωση μιας ενσωματωματωμένης ίνας σε ένα κύλινδρικό υλικό που απεικονίζει τη μήτρα, η οποία υπόκειται σε ομοιόμορφη μετατόπιση λόγω εξωτερικής φόρτισης κατά τη διεύθυνση της ίνας [36]. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί το πλέον χρησιμοποιημένο μοντέλο για την ανάλυση

των προβλημάτων μεταφοράς τάσης σε σύνθετα, όπως και στην περίπτωση συνθέτου με μακριές-συνεχείς και μη-συνεχείς ίνες ως ενίσχυση [37]. Ο Rosen προσέγγισε το πρόβλημα της διεπιφάνειας εισάγοντας ένα νέο μοντέλο, στο οποίο θεώρησε ότι μεταξύ της ίνας και της μήτρας υπάρχει ένα υλικό με ενδιάμεσες ιδιότητες. Η πρώτη υπόθεση που έκανε ήταν ότι οι δύο διεπιφάνειες που εμφανίζονται έχουν τέλεια πρόσφυση ενώ ως δεύτερη υπόθεση πρόσθεσε ότι η ίνα και το ενδιάμεσο υλικό επιδέχονται μόνο εφελκυστικές τάσεις ενώ η μήτρα φέρει μόνο διατμητικές τάσεις [38].

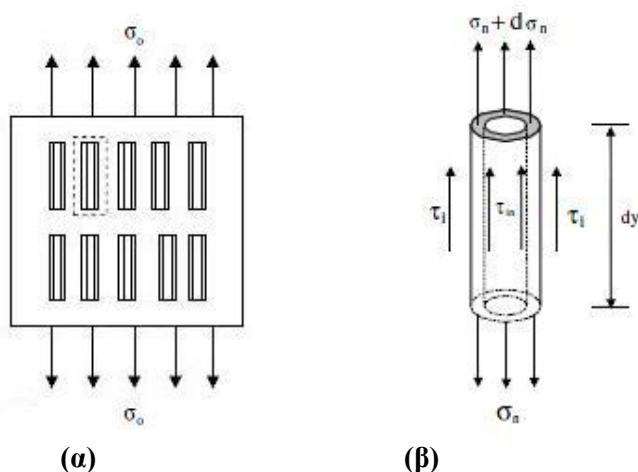
2.3 Μοντέλα πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια νανοσωλήνων άνθρακα-νανοϊνας/ μήτρας συνθέτου

Όσον αφορά την ενίσχυση του συνθέτου με νανοσωλήνες άνθρακα, έχουν υπάρξει αρκετές πειραματικές εργασίες και προσπάθειες που είχαν ως σκοπό να εκτιμήσουν την πρόσφυση αλλά και την ικανότητα μεταφοράς τάσεων στη διεπιφάνεια νανοσωλήνων-μήτρας [39]-[43]. Οι Gao και Li πρότειναν ένα μοντέλο διαφορικής διατμητικής ανάλυσης για τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με CNTs στην πολυμερική τους μήτρα, μόνο που αντικατέστησαν τα CNTs με μια ενιαία ίνα. Για την ανάλυση του φαινομένου της μεταφοράς φορτίων στη διεπιφάνεια, χρησιμοποίησαν ένα κυλινδρικό αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) με ενσωματωμένο έναν κύλινδρο που αντιπροσωπεύει την νανοίνα άνθρακα [44].

Καθώς όμως οι πειραματικές διαδικασίες στη νανοκλίμακα είναι ακόμα σε μια αναπτυσσόμενη κατάσταση, ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της μεταφοράς φορτίου από την μήτρα στο ενισχυτικό μέσο - με σκοπό τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του σύνθετου - είναι κατά κύριο λόγο μέσω υπολογιστικών μεθόδων μοντελοποίησης.

Οι Haque και Ramasetty παρουσίασαν δύο μοντέλα: ένα αναλυτικό και ένα μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων για τον υπολογισμό της αξονικής και διατμητικής τάσης, στη διεπιφάνεια νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχώματος (SWCNTs) / μήτρας αλλά και νανοϊνας/μήτρας. Επίσης εισήγαγαν την έννοια του ενεργού μήκους (effective length) της νανοϊνας, το οποίο ουσιαστικά φέρει το φορτίο και προσδιορίζει την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς φορτίου από τη μήτρα στο CNT. Επιπρόσθετα

ποσοτικοποίησαν την επίδραση του (α) αξονικού λόγου των CNTs (aspect ratio - l/d), (β) της περιεκτικότητας κατ'όγκο των CNTs (V_f) και (γ) του μέτρου ελαστικότητας Young στην αξονική τάση (σ_n) και ενδοστρωματική διατμητική τάση (τ_i) [45]. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται το συνθέτο υλικό ενισχυμένο με ομοιόμορφα καταναμημένα CNTs μονού τοιχώματος υπό εφελκυστική φόρτιση αλλά και η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια CNT/πολυμερικής μήτρας για ένα επιλεγμένο CNT.



Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση (α) του συνθέτου ενισχυμένου με ομοιόμορφα καταναμημένα CNTs μονού τοιχώματος υπό εφελκυσμό και (β) της κατανομής των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια CNT/πολυμερικής μήτρας [45].

Η επίδραση του μήκους των -εσωματωμένων στη μήτρα- νανοσωλήνων άνθρακα στη συμπεριφορά του συνθέτου κατά τη μηχανική φόρτιση (εφελκυσμός) καθώς και η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς φορτίου από την μήτρα προς τα CNT ερευνήθηκε περαιτέρω [46]. Αποδείχθηκε ότι μια τέτοια ενέργεια θα είχε ευεργετικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μεταφοράς φορτίου από τη μήτρα στα CNTs, και επιπλέον καθορίστηκε μέσω της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων το βέλτιστο μήκος του νανοσωλήνα άνθρακα για την πλήρη μεταφορά φορτίου μεταξύ του SWCNT και της μήτρας [47].

Η επίδραση της κατ'όγκο περιεκτικότητας των νανοσωλήνων άνθρακα και του αξονικού τους λόγου στις αξονικές ελαστικές ιδιότητες του νανοςύνθετου αναλύθηκε σε μια άλλη μελέτη [48]. Ο Montazeri ανέπτυξε ένα τριφασικό RVE που συμπεριλάμβανε τα CNTs, τη διεπιφάνεια και τη μήτρα, προκειμένου να αξιολογηθεί

η επίδραση της κατ'όγκου περιεκτικότητας των CNTs στο μέτρο ελαστικότητας του Young του CNT και του συνθέτου [49]. Η αύξηση της περιεκτικότητας των CNTs στο μοντέλο επέδειξε μια ισχυρή ενίσχυση στο μέτρο ελαστικότητας του Young. Η επίδραση του φαινομένου της ευθυγράμμισης των νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχώματος στο μέτρο διάτμησης του νανοσυνθέτου επίσης διερευνήθηκε [50]. Επιπλέον, διερευνήθηκε η κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος του άξονα των CNTs για να μελετηθεί η επίδραση του προσανατολισμού τους στο φαινόμενο της μεταφοράς φορτίου. Οι Tsai και Lu [51] ανέπτυξαν ένα κυλινδρικό RVE μοντέλο για να αναλύσουν ένα σύνθετο ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα τριών τοιχωμάτων ώστε να διερευνηθεί η μεταφορά φορτίου από τη μήτρα στα τρία εσωτερικά τοιχώματα των νανοσωλήνων άνθρακα. Χαρακτηριστικά όπως ο αξονικός λόγος των CNTs και ο χημικοί δεσμοί μεταξύ των τοιχωμάτων απομονώθηκαν για να εξεταστεί ο βαθμός που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς φορτίου.

Πολλές πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι, σε γενικές γραμμές, οι νανοσωλήνες άνθρακα υπάρχουν και σε καμπύλο σχήμα μέσα στην πολυμερική μήτρα του συνθέτου. Οι Yazdchi και Salehi με βάση τα πειράματα εξόλκευσης (pullout tests), ανέπτυξαν ένα νέο απλοποιημένο μοντέλο για τα CNTs κυματιστής γεωμετρίας, για να μελετηθούν τα αποτελέσματα της κυμάτωσης, του αξονικού τους λόγου (l/d), του V_f (volume fraction) τους και του μέτρου ελαστικότητας της μήτρας στις αξονικές και τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στα νανοσύνθετα [52]. Η μέγιστη διατμητική τάση στην επιφάνεια ενός CNT με κυματιστή γεωμετρία είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή του CNT με ευθεία γεωμετρία και αυξάνει με το βαθμό κυμάτωσης. Επίσης αποδείχθηκε ότι αυξάνεται απότομα και με την αυξανόμενη περιεκτικότητα των κατ'όγκο ενσωματωμένων νανοσωλήνων στη μήτρα. Τέλος, το αυξανόμενο μήκος και ο βαθμός κυμάτωσης των CNTs μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερη αποκόλληση τους από την πολυμερική μήτρα.

Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής για να αποκαλύψουν τον μηχανισμό ενίσχυσης σε νανοσύνθετων υλικών, έχουν κατά κύριο λόγο βάση στην παραδοσιακή μηχανική συνεχούς μέσου ή σε καθαρά ατομιστικές μεθόδους [53]. Ωστόσο, τα παραδοσιακά μοντέλα δεν είναι πάντα ικανά να περιγράψουν με ακρίβεια την

επίδραση της διασποράς των νανο-ενισχυτικών μέσων στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών.

Από την άλλη πλευρά οι πλήρως ατομιστικές περιγραφές είναι επίσης μη ρεαλιστικές και υψηλής υπολογιστικής έντασης. Επειδή διάφορες κλίμακες στο εκάστοτε πρόβλημα εξαρτώνται η μια από την άλλη, είναι αναγκαίο να διατυπωθεί από την άποψη της μοντελοποίησης πολλαπλών κλιμάκων. Ως εκ τούτου, η μοντελοποίηση πολλαπλών κλιμάκων (multi-scale modeling) των νανοσυνθέτων κρίνεται απαραίτητη για την προσομοίωση και την ακριβή εκτίμηση της πραγματικής απόκρισής τους.

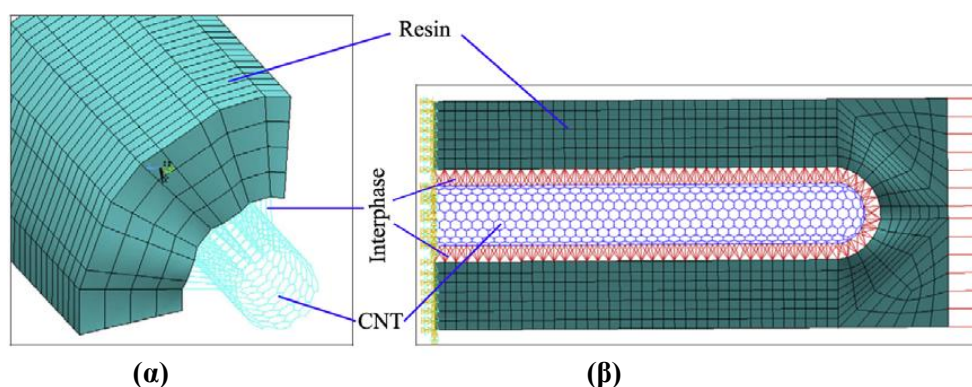
Οι Τσερπές και Παπανικός πρότειναν ένα RVE πολλαπλών κλιμάκων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ΠΣ, παρουσιάζοντας το CNT ως ένα απλοποιημένο κυλινδρικό στοιχείο ενσωματωμένο σε μια τρισδιάστατη μήτρα. Αναλύθηκε η συμπεριφορά του συνθέτου ενισχυμένου με νανοσωλήνες άνθρακα κάτω από συνθήκες εφελκυστικής φόρτισης με σκοπό την προσομοίωση της αποκόλλησης νανοσωλήνων / μήτρα [54]. Συνεπώς αναπτύχθηκε μια προσέγγιση διαφορικής διατμητικής ανάλυσης, για να μελετηθεί η επίδραση της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού σε εφελκυσμό σε σχέση με την περιεκτικότητα κατ'όγκο των νανοσωλήνων.

Ο Hu ανέπτυξε ένα RVE που περιελάμβανε την περιοχή της διεπιφάνειας CNT-πολυμερικής μήτρας [55]. Ωστόσο, η διεπιφάνεια διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας στερεά τρισδιάστατα στοιχεία των ΠΣ με σταθερές μηχανικές ιδιότητες, προκειμένου να περιγραφεί η παραμορφωσιακή συμπεριφορά των νανοσωλήνων υπό διάφορες μηχανικές φορτίσεις, που συνεπάγονται πάλι τη χρήση των παραδοσιακών εννοιών μηχανικής συνεχούς μέσου, αντί μιας ατομιστικής αναπαράστασης.

Από την άλλη, οι μετρήσεις του Schadler έδειξαν καλύτερη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά φορτίου όταν το νανοσύνθετο που υπόκειται σε θλίψη και όχι σε εφελκυσμό [56]. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Li και Chou παρουσίασαν μια μοντελοποίηση πολλών κλιμάκων της θλιπτικής συμπεριφοράς των νανοσυνθέτων με πολυμερική μήτρα [57]. Κατασκεύασαν ένα RVE χρησιμοποιώντας μια δομή space-frame για το CNT, στερεά στοιχεία για την πολυμερική μήτρα, και truss rods για τη διεπιφάνεια, θεωρώντας δυνάμεις Van der Waals μεταξύ των ατόμων άνθρακα και

των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων της μήτρας. Ανέλυσαν το νανοσωλήνα ως ατομιστική προσέγγιση και ανέλυσαν την παραμόρφωση της μήτρας μέσω ΠΣ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φανέρωσαν για την κατανομή των τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ νανοσωλήνων / μήτρας ότι οι μέγιστες διατμητικές τάσεις παρατηρούνται στα άκρα των νανοσωλήνων και όχι στο μέσον, όπως αναμενόταν.

Πιο πρόσφατα, ο Shokrieh επέκτεινε το μοντέλο των Li και Chou, ενσωματώνοντας μια μη-γραμμική διεπιφανειακή περιοχή [58], θεωρώντας ότι η πρόσφυση μεταξύ των νανοσωλήνων άνθρακα και της μήτρας που τα περιέβαλε στηρίζεται στις αλληλεπιδράσεις van der Waals. Παρατηρήθηκε ότι το μήκος του CNT παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα μεταφοράς φορτίου, και πιο συγκεκριμένα αποδείχθηκε ότι όσο μικρότερο ήταν, τόσο λιγότερο θα απέδιδε ως ενισχυτικό μέσο λόγω μειωμένων vdW αλληλεπιδράσεων. Στην Εικόνα 17 παρατηρείται η μοντελοποίηση της συνολικής δομής με τη χρήση RVE.



Εικόνα 17: Μοντελοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων νανოსυνθέτου με πολυμερική μήτρα με τη χρήση δομικού αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) [58].

Στην ίδια κατεύθυνση και ο Meguid χρησιμοποίησε ένα μη-γραμμικό στοιχείο RVE για να διαμορφώσει ένα νανοςύνθετο, το οποίο αποτελείται από την ενίσχυση των νανοσωλήνων άνθρακα, την πολυμερική μήτρα που το περιβάλλει και τη διεπιφάνεια [53]. Στο RVE ασκήθηκαν εφελκυσμός και στρέψη για να διερευνηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες. Μια ατομιστική προσέγγιση ενσωματώθηκε στο μοντέλο, θεωρώντας μόνο δυνάμεις van der Waals στη διεπιφάνεια, οι οποίες προσομοιώνονται με τη χρήση ενός μοντέλου truss rod- σύμφωνα με την οποία κάθε αλληλεπίδραση εκπροσωπείται από ένα μόνο truss rod.

Ο Γιαννόπουλος υλοποίησε ένα τρισδιάστατο ημι-συνεχές RVE βασιζόμενος στη μικρομηχανική θεωρία, όπου οι νανοσωλήνες προσομοιώνονται ως spring-based στοιχεία, ενώ η μήτρα θεωρήθηκε ως ένα συνεχές μέσο [59]. Στοιχεία συνδέσεως χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν τη διεπιφάνεια μεταξύ του οπλισμού και της μήτρας και τα αποτελέσματα αποκάλυψαν μεγάλη εξάρτηση της μηχανικής ελαστικής απόδοσης του νανοςυνθέτου από τη μικροδομή των CNTs, καθώς και από την ακαμψία της διεπιφάνειας. Σε μια άλλη μελέτη οι αλληλεπιδράσεις vdW μεταξύ ατόμων άνθρακα των νανοσωλήνων άνθρακα και των κόμβων της περιβάλλουσας μήτρας, προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας ένα 3-D μη-γραμμικό spring στοιχείο [60]. Στη συγκεκριμένη μελέτη ένας ευθύγραμμος νανοσωλήνας άνθρακα ενσωματωμένος στην πολυμερική μήτρα αντικαθίσταται από μια ισοδύναμη μακρά ίνα, προκειμένου να προβλεφθεί η μηχανική συμπεριφορά του νανοςυνθέτου και της ισοδύναμης ίνας που αποτελείται από το νανοσωλήνα και την περιοχή της διεπιφάνειας. Το μοντέλο φανέρωσε μια έντονη μη-γραμμική συμπεριφορά υπό εφελκυστική φόρτιση. Στοιχεία spring χρησιμοποιήθηκαν επίσης στη διεπιφάνεια νανοσωλήνων/μήτρας και σε μια άλλη μελέτη [61], ώστε να διερευνηθεί ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου στη συγκεκριμένη περιοχή για τον προσδιορισμό των βέλτιστων μηχανικών ιδιοτήτων νανοςύνθετων. Θεωρήθηκε τέλεια πρόσφυση και ελαστική διεπιφάνεια.

Μια ακόμα μελέτη αναδεικνύει το σημαντικό ρόλο της διεπιφάνειας για τον προσδιορισμό της συνολικής ικανότητας για μεταφορά φορτίου του συνθέτου ενισχυμένου με νανοίνα άνθρακα (CNT fiber) και πως ανακατανέμονται οι εσωτερικές τάσεις κατά την αποκόλληση της ίνας [62]. Η παρουσία τη διεπιφάνειας αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας Young του νανοςύνθετου αλλά οδηγεί σε πρόωρη αποκόλληση που μπορεί τελικά να μειώσει τη συνολική ικανότητα για μεταφορά φορτίου του συνθέτου.

Οι Hernandez και Avilés [63] ανέδειξαν το βαθμό επίδρασης των γεωμετρικών στοιχείων της διεπιφάνειας στα νανοςύνθετα, υπό τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μηχανικής φόρτωσης (αξονικός εφελκυσμός, θλίψη και στρέψη). Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι το πάχος της διεπιφάνειας επηρεάζει σημαντικά τις ελαστικές ιδιότητες και την κατανομή τάσεων των συνθέτων, των οποίων οι μήτρες έχουν

χαμηλό μέτρο ελαστικότητας. Τα αποτελέσματα φανέρωσαν ότι το πάχος της διεπιφάνειας CNT/μήτρας πρέπει να είναι τουλάχιστον της ίδιας τάξεως με το πάχος των CNTs. Ένα RVE πολλαπλών κλιμάκων προτάθηκε για τη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των νανοσύνθετων σε συνθήκες εφελκυσμού, κάμψης και στρέψης, προκειμένου να διερευνηθούν οι επιπτώσεις της διεπιφάνειας σε αυτό [64]. Αποδείχθηκε ότι η δυσκαμψία του νανοσύνθετου θα μπορούσε ενδεχομένως να επηρεαστεί θετικά από μια ισχυρή διεπιφάνεια. Επιπρόσθετα, αποδείχθηκε ότι η δυσκαμψία του συνθέτου επηρεάζεται στο μέγιστο βαθμό από τη διεπιφανειακή δυσκαμψία σε φόρτιση κάμψης. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η αναλογία μεταξύ του μήκους του RVE και του νανοσωλήνα που εμπεριέχεται στο RVE μπορεί να επηρεάσει δραματικά τη δυσκαμψία του νανοσύνθετου ειδικά σε συνθήκες αξονικής φόρτισης.

Η έρευνα για την ενσωμάτωση των CNTs έχει εστιαστεί μέχρι στιγμής κυρίως στη βελτίωση της μηχανικής τους απόδοσης, καθώς και την ικανότητα τους για μεταφορά φορτίου από τη μήτρα, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία νέων συνθέτων υλικών με βάση τα CNTs ως ενισχυτικά μέσα που είναι εξαιρετικά ισχυρά και ελαφριά. Εντούτοις, η ικανότητα των νανοσωλήνων άνθρακα να γεφυρώνουν τις ρωγμές δεν έχει ευρέως μελετηθεί και γι' αυτό η επίδραση τους στη συμπεριφορά του συνθέτου κατά την ανάπτυξη ρωγμών πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Ο Rafiee ανέπτυξε ένα 3-D RVE για να μοντελοποιήσει ένα σύνθετο ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος στην πολυμερική μήτρα, για να αναδείξει την επίδραση του CNT στις ιδιότητες θραύσης του συνθέτου [65]. Για τη μοντελοποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν στερεά στοιχεία (solid elements) που επέτρεψαν την προσομοίωση της περιβάλλουσας πολυμερικής μήτρας αλλά και τις αλληλεπιδράσεις Van der Waals στη διεπιφάνεια CNTs/μήτρας. Μια ημι-κυκλική επιφάνεια ρωγμής προστέθηκε στο μοντέλο καθώς και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του επικαμπύλιου ολοκληρώματος (J -integral) για την παρατήρηση της επίδρασης του CNT επί του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμορφώσεως (G -energy release rate). Στο στάδιο αυτό, ο νανοσωλήνας άνθρακα θεωρείται ως μια δομή πλέγματος και η μεταφορά φορτίου συμβαίνει με τη μορφή αλληλεπιδράσεων vdW. Στο επόμενο βήμα, το CNT και η διεπιφάνεια αντικαταστάθηκαν από μια τέλεια ίνα

τέλειας πρόσφυσης με μέτρο ελαστικότητας του Young της τάξεως του 1TPa, προκειμένου να διερευνηθεί η σημασία της προαναφερθείσας δομής πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για το CNT. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ΠΣ φανέρωσαν ότι το μοντέλο της ίνας με τέλεια πρόσφυση βοηθά περισσότερο στην παρεμπόδιση ανάπτυξης της ρωγμής από ό,τι το μοντέλο που ο νανοσωλήνας άνθρακα θεωρείται ως μια δομή πλέγματος.

Η θραύση των CNTs οφείλεται σε διάφορους λόγους και είναι πιθανόν ότι σε ένα σύνθετο ενισχυμένο με CNTs να συναντήσουμε κάποια σπασμένα. Επομένως είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η επίδραση αυτών των σπασμένων CNTs στην κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του συνθέτου αλλά και στην πιθανότητα αστοχίας του υλικού. Οι Kirtania και Chakraborty έκαναν ακριβώς αυτό: διερεύνησαν την κατανομή των τάσεων στους σπασμένους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), ως ενισχυτικό μέσο των συνθέτων υλικών [66]. Το τετράγωνο RVE που αναπτύχθηκε είχε ως σκοπό τη μελέτη της επίδρασης ενός σπασμένου CNT στα γειτονικά CNTs και στην περιβαλλόμενη εποξειδική μήτρα ή μήτρα τιτανίου. Αναλύθηκαν οι κατανομές των τάσεων στο σπασμένο CNT, στη διεπιφάνεια, καθώς και στα γειτονικά CNTs για διαφορετικά περιεκτικότητες κατ'όγκο των CNTs. Παρατηρήθηκε ότι η κατανομή των διατμητικών τάσεων και το μη ενεργό μήκος (ineffective length) του σπασμένου CNT εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νανοσωλήνες άνθρακα, καθώς και από τις ιδιότητες του υλικού της μήτρας.

2.4 Πρόταση μελέτης διεπιφάνειας νέας νανοϊνας άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT fiber)/ μήτρας συνθέτου

Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 1.9 μια αγωγήμη λύση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό μέσο σε σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας είναι η νανοίνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT fiber). Κατά τα τελευταία χρόνια, αρκετές μελέτες έχουν κυρίως επικεντρωθεί στο μοναδικό συνδυασμό των μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων αυτών των ινών που τις καθιστά ιδανικούς υποψηφίους για να προσδώσουν πολυ-λειτουργικότητα στα υλικά [67]-[71], και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα ενσωματωμένοι αισθητήρες σε ένα μη αγωγήμο υλικό.

Ωστόσο, η επίδραση διαφορετικών παραμέτρων, όπως η προένταση της ίνας στην κατανομή του τασικού πεδίου στη διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας/συνθέτου δεν έχει ακόμη διερευνηθεί για την περίπτωση διαφορετικών μηχανικών φορτίσεων. Έχει αποδειχθεί ότι η προένταση της ίνας ομαλοποιεί τις τιμές μεταβολής αντίστασης της PVA-CNT ίνα και δεν οδηγεί σε παραμένουσες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (residual resistance values) κατά τη μηχανική φόρτιση του σύνθετου [72]. Οι διατμητικές τάσεις οδηγούν στην αποκόλληση ίνας από τη μήτρα μετά από κάποια τιμή επιβαλλόμενου φορτίου, κάτι που επιφέρει λανθασμένες μετρήσεις παραμόρφωσης και ηλεκτρικής αντίστασης για την ίνα. Άλλες παράμετροι των οποίων η επίδραση στην πρόσφυση ίνας/μήτρας που δεν έχουν μελετηθεί αρκετά είναι το πάχος, το μέτρο της ελαστικότητας και η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας.

Στην παρούσα εργασία, θα αναπτυχθεί ένα μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων για την περίπτωση της ενσωμάτωσης ινών PVA-CNT που θα λειτουργήσει ως μηχανικός αισθητήρας στο μη αγώγιμο σύνθετο υλικό με σπλισμό από ίνες υάλου (GFRP). Συγκεκριμένα θα διερευνηθεί η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της πολυμερικής μήτρας του συνθέτου και της PVA-CNT ίνας, υπό την επίδραση των προαναφερθέντων παραγόντων και θα μελετηθεί η παραμορφωσιακή συμπεριφορά της ίνας υπό συνθήκες μηχανικής φόρτισης και κάτω από διαφορετικές παραμέτρους.

3. Αριθμητική Ανάλυση

Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί μια εισαγωγή στη θεωρία των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ), πριν αναλυθεί το μοντέλο ΠΣ, που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του GRFP με ενσωματωμένη την PVA-CNT ίνα.

3.1 Εισαγωγή στα σύγχρονα υπολογιστικά περιβάλλοντα υποβοηθούμενης ανάλυσης και σχεδιασμού CAD / CAE

Αναμφίβολα οι μηχανικοί οφείλουν πολλά στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών για την επίλυση προβλημάτων που επιφέρει σημαντική μείωση στον όγκο της δουλειάς τους. Η δυνατότητα απεικόνισης της γεωμετρίας μιας κατασκευής στον υπολογιστή και η υπολογιστική δυνατότητα "προσομοίωσης" των στατικών, δυναμικών, θερμικών της ιδιοτήτων είναι επιτεύγματα των πρόσφατων χρόνων. Ο σχεδιασμός χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τη δημιουργία, την τροποποίηση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας κατασκευής.

Τα σύγχρονα υπολογιστικά περιβάλλοντα υποβοηθούμενης ανάλυσης και σχεδιασμού (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με τη χρήση της υπολογιστικής γεωμετρίας να αναλύσει κάθε πτυχή της σχεδιασμένης κατασκευής, επιτρέποντας στο χρήστη να προσομοιώσει και να μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί δυνητικά κάτω από συνθήκες μηχανικής καταπόνησης κλπ.

3.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Για πολλά προβλήματα μηχανικής οι αναλυτικές λύσεις δεν είναι κατάλληλες, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος που οφείλεται στις διαφορετικές ιδιότητες που έχει το εκάστοτε υλικό, την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών αλλά και τη δημιουργία της συνολικής δομής. Η ανάγκη για την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών προσεγγιστικών αριθμητικών μεθόδων, οι οποίες όμως με τη σειρά τους δεν μπορούσαν να δώσουν λύση σε σύνθετα προβλήματα λόγω έλλειψης υπολογιστικών δυνατοτήτων. Για όλους τους παραπάνω λόγους οι ερευνητές έστρεψαν την προσοχή τους σε κατασκευές που η μορφή τους διευκολύνει την απλοποίηση του προβλήματος της ελαστικότητας.

Τέτοιες είναι οι ραβδωτές, όπου περιλαμβάνουν κατασκευές αποτελούμενες από ράβδους / δοκούς που συνδέονται μεταξύ τους στα άκρα τους με κόμβους και σχηματίζουν δικτυώματα, συνεχείς δοκούς, διδιάστατα ή τρισδιάστατα πλαίσια κ.α.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ - Finite Element Method) όπως γνωρίζουμε προήλθε από μια γενίκευση των μεθόδων επίλυσης των ραβδωτών φορέων, σε προβλήματα μηχανικής που αφορούν τα επίπεδα παραμορφώσιμα σώματα. Η βάση της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η αναπαράσταση του σώματος ή μιας δομής με ένα σύνολο από υποδιαιρέσεις στοιχείων που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Η Μέθοδος των ΠΣ μετατρέπει τα προβλήματα μερικών διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύνολο εξισώσεων γραμμικής άλγεβρας [73].

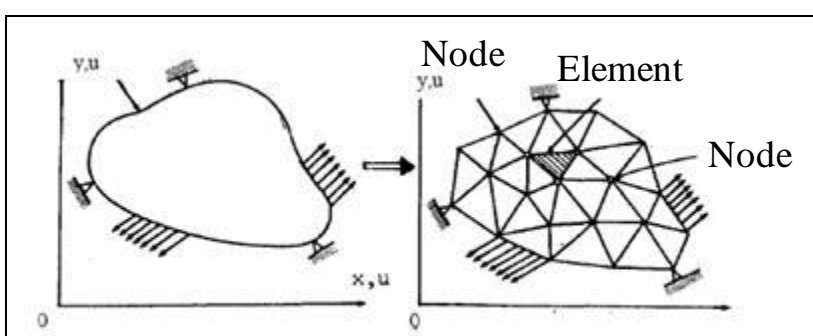
Η συγκεκριμένη μέθοδος είχε αρχικά εισαχθεί από τον Turner και τον Clough το 1956 [74], και είναι μια ισχυρή υπολογιστική τεχνική που δίνει τη δυνατότητα για ακριβείς προσεγγίσεις σε μια ποικιλία προβλημάτων μηχανικής, τα οποία έχουν πολύπλοκα πεδία (domains) που υποβάλλονται σε συνοριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες είναι οι προκαθορισμένες τιμές των μεταβλητών πεδίου που καθορίζουν βασικά τα όρια του πεδίου. Η ΠΣ έχει καθιερωθεί ως ένα απαραίτητο βήμα για το σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός φυσικού φαινομένου σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων μηχανικής [75].

Επιπρόσθετα η συγκεκριμένη υπολογιστική τεχνική επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση των τάσεων και των μετατοπίσεων, τη θερμική, αεροδυναμική και ακουστική ανάλυση καθώς και τη διανομή του μαγνητικού πεδίου κλπ. Η ΠΣ είναι χρήσιμη για προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες, σύνθετες μηχανικές φορτίσεις καθώς και για περιπτώσεις προσομοίωσης των ιδιοτήτων των υλικών, εκεί όπου οι αναλυτικές λύσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν [76].

Πολύ γνωστά εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για δομική ανάλυση (structural analysis) είναι τα: ABAQUS, ALGOR, ANSYS, Dytran, LS-Dyna-3D, NASTRAN, SOLVIA κλπ., τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, τη μέθοδο επίλυσης. Παρακάτω θα αναλυθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία μιας ανάλυσης ΠΣ.

3.2.1 Κόμβοι

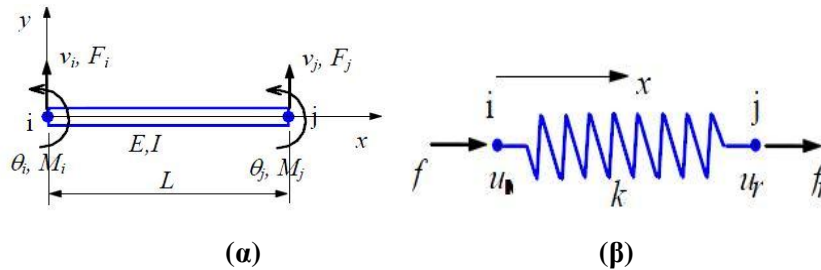
Όλα τα πεπερασμένα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς κόμβους. Ένας κόμβος προσδιορίζει τις συντεταγμένες στο χώρο, όπου εκχωρούνται οι κομβικές μεταβλητές σε ένα στοιχείο και ονομάζονται βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα οι βαθμοί ελευθερίας αποτελούν πιθανές μετατοπίσεις του εκάστοτε κόμβου. Στη δυσδιάστατη ανάλυση μιας δομής, κάθε κόμβος μπορεί να κινηθεί στους άξονες x, y ενώ στην περίπτωση μιας τρισδιάστατης δομής, κάθε κόμβος έχει την ικανότητα να κινηθεί στους άξονες x, y, z [75]. Στην Εικόνα 18 φαίνεται πως μια δομή χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία που ορίζονται στο χώρο από κόμβους.



Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση μιας δομής χωρισμένης σε στοιχεία (finite elements) και κόμβους [77].

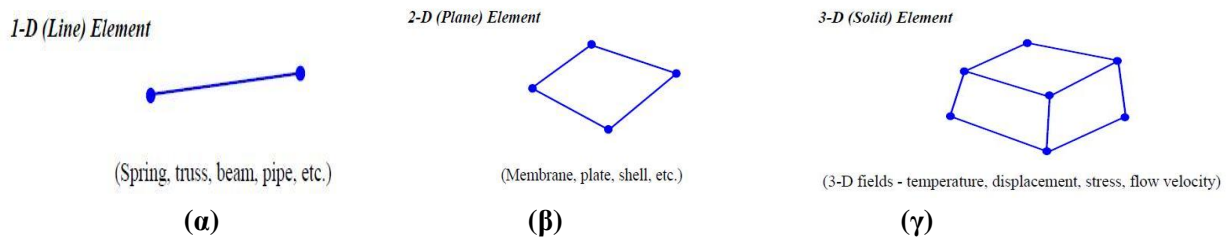
3.2.2 Στοιχεία

Ανάλογα με τη γεωμετρία και τη φύση του προβλήματος, η περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να διακριτοποιηθεί (δημιουργία πλέγματος) με την χρήση γραμμικών (line) στοιχείων, επιφανειακών (area) στοιχείων ή ακόμα και στοιχείων όγκου. Η κάθε μια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες στοιχείων περιέχει δικά της στοιχεία. Τα πιο κοινά από αυτά είναι τα εξής: truss, beam, plane stress, plane strain, shell καθώς και τα στερεά στοιχεία. Στην Εικόνα 19 παρατίθεται σχηματική αναπαράσταση ενός bar και ενός spring στοιχείου. Κάθε στοιχείο προσδιορίζεται από έναν αριθμό που καθορίζεται από μια συγκεκριμένη ακολουθία αριθμών στοιχείων του καθολικού συστήματος. Η ειδική αλληλουχία βασίζεται στην αρίθμηση των κόμβων σε κάθε στοιχείο.



Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση (α) bar στοιχείου (2-D) και (β) spring στοιχείου (1-D) [78].

Τα προαναφερθέντα στοιχεία ανήκουν σε κάποιον από τους παρακάτω τύπους στοιχείων όπως φαίνονται και στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση των τριών τύπων στοιχείων: (α) 1-D, (β) 2-D και (γ) 3-D [80].

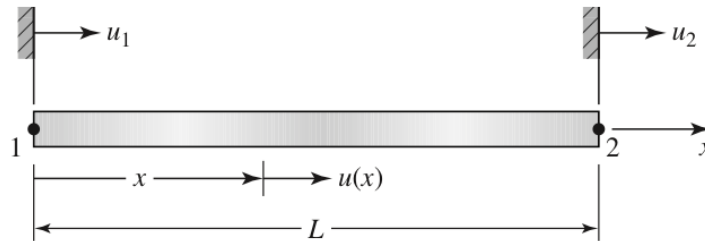
Μια από τις πιο κρίσιμες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλου αριθμού στοιχείων και κόμβων. Κατά γενικό κανόνα, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων, τόσο πιο ακριβής είναι η λύση που προκύπτει με τη μέθοδο των ΠΣ, από την πλευρά όμως είναι περισσότερο δαπανηρή η επίλυση λόγω του επιπλέον χρόνου που χρειάζεται.

3.2.3 Σχηματισμός καθολικού συστήματος εξισώσεων

Η μοντελοποίηση ενός προβλήματος με τη χρήση ΠΣ απαιτεί την κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας και του διανύσματος δυνάμεων για το κάθε στοιχείο, προκειμένου να σχηματιστούν μετά το καθολικό μητρώο δυσκαμψίας και το καθολικό διάνυσμα δυνάμεων. Ως μεταβλητές του προβλήματος μπορούν να επιλεγούν είτε οι κομβικές μετατοπίσεις (μοντέλο μετατοπίσεων), είτε οι κομβικές δυνάμεις (μοντέλο δυνάμεων), είτε και τα δύο (μεικτό μοντέλο).

Αρχικά καθορίζεται ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων στο οποίο τοποθετείται η προς μελέτη δομή. Στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός του σώματος σε πεπερασμένα στοιχεία (διακριτοποίηση). Ακολουθεί ο προσδιορισμός των κομβικών μετατοπίσεων

u κάθε στοιχείου με βάση ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται σε κάθε στοιχείο. Η εύρεση των κομβικών μετατοπίσεων γίνεται με τις συναρτήσεις μορφής. Ένα σύνθηες πρόβλημα αποτελεί η χρήση ενός truss στοιχείου όπως φαίνεται στην Εικόνα 21 παρακάτω:



Εικόνα 21: Αναπαράσταση ενός truss στοιχείου.

Θα έχουμε λοιπόν συναρτήσεις μορφής:

$$u(x) = N_1(x) \cdot u_1 + N_2(x) \cdot u_2 \quad (1)$$

όπου u_1 και u_2 είναι οι συνιστώσες της μετατόπισης και ως $N_1(x)$ και $N_2(x)$ συμβολίζονται οι συναρτήσεις σχήματος. Η εξίσωση (1) γράφεται σε μητρική μορφή:

$$u(x) = [N_1(x) \quad N_2(x)] \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [N] \cdot \{u\} \quad (2)$$

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (2), αυτές είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις και συνδέουν τις μετατοπίσεις ενός τυχαίου σημείου του στοιχείου με τις κομβικές. Γίνεται υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας του κάθε στοιχείου με την αρχή των δυνατών έργων. Το συγκεκριμένο μητρώο δίνεται από τον τύπο:

$$k^{(e)} = \int_{V^e} B^T \cdot E \cdot B dV \quad (3)$$

όπου B είναι το μητρώο αντιστοιχίας μεταξύ τοπικού και ολικού συστήματος συντεταγμένων, E είναι το μητρώο ελαστικότητας και B το κάθε στοιχείο. Για την περίπτωση του truss στοιχείου λαμβάνοντας υπόψη τα E και A (διατομή) σταθερά μεγέθη, παίρνουμε το μητρώο δυσκαμψίας σε μητρική μορφή:

$$k^{(e)} = \frac{A \cdot E}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Το καθολικό μητρώο δυσκαμψίας K αντιπροσωπεύει το άθροισμα όλων των μητρώων δυσκαμψίας k των στοιχείων $k^{(e)}$ [77]:

$$K = \sum_{e=1}^N k^{(e)} \quad (5)$$

όπου το N υποδηλώνει το συνολικό αριθμό των στοιχείων. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό του καθολικού διανύσματος φορτίων, το οποίο λαμβάνεται με από τις γενικευμένες κομβικές δυνάμεις των στοιχείων $f^{(e)}$:

$$F = \sum_{e=1}^N f^{(e)} \quad (6)$$

Άρα λοιπόν η λύση του προβλήματος σε μητρική μορφή θα είναι η ακόλουθη:

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (7)$$

όπου το $\{F\}$ είναι το καθολικό διάνυσμα φορτίων με όλα τα γνωστά φορτία που ασκούνται σε κάθε κόμβο, το $[K]$ συμβολίζει την assembly όλων των μητρώων δυσκαμψίας όλων των στοιχείων (καθολικό μητρώο δυσκαμψίας) και το $\{U\}$ είναι το διάνυσμα όλων των μετατοπίσεων που δρούν στους N μη πακτωμένους κόμβους της δομής. Οι διαστάσεις του μητρώου δυσκαμψίας του κάθε στοιχείου καθορίζονται από τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων.

3.3 Ανάλυση κατηγοριών προβλημάτων κατά τη χρήση του προγράμματος ANSYS

Όσον αφορά το υπολογιστικό κομμάτι της μοντελοποίησης, το πακέτο λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα Διπλωματική Εργασία για την ανάλυση της διεπιφάνειας πολυμερικής μήτρας / PVA-CNT ίνας με τη χρήση ΠΣ είναι το ANSYS 12. Το πρόγραμμα ANSYS προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης και ευκολία χειρισμού από την πλευρά του χρήστη. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο ΠΣ για την επίλυση των κυβερνώντων εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα και των σχετικών συνοριακών συνθηκών.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση είναι εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό ή μη-γραμμικό. Τα περισσότερα φυσικά φαινόμενα μηχανικής παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά και απαιτούν μια μη-γραμμική λύση. Η μη-γραμμική συμπεριφορά μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους; στη γεωμετρική μη- γραμμικότητα υλικού (geometric nonlinearity), καθώς και σε μια ενδεχόμενη αλλαγή στις συνοριακές συνθήκες. Ένα παραδείγμα γεωμετρικής μη-γραμμικότητας είναι το φαινόμενο stress stiffening που συμβαίνει όταν η τάση κατά τη μία διεύθυνση επηρεάζει τη δυσκαμψία στην άλλη κατεύθυνση. Μια άλλη περίπτωση μη-γραμμικότητας προβλήματος είναι όταν έχουμε μη-γραμμικότητα υλικού (material nonlinearity) που τη συναντάμε όταν υπάρχει μια μη-γραμμική σ - ϵ σχέση [79].

3.4 Διαδικασία μοντελοποίησης με τη χρήση του προγράμματος ANSYS

Γενικά η επίλυση του προβλήματος μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια [76]:

Προ-επεξεργασία (Preprocessing)

- Προσδιορισμός γεωμετρίας της δομής (keypoints, areas, volumes)
- Επιλογή κατάλληλου τύπου πεπερασμένων στοιχείων (2D ή 3D) στα οποία θα τμηματοδοτηθεί η δομή
- Προδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των στοιχείων (ισότροπο ή ανισότροπο & μέτρο ελαστικότητας, μέτρο διάτμησης, λόγος Poisson)
- Προδιορισμός των γεωμετρικών ιδιοτήτων των στοιχείων (μήκος, επιφάνεια, κλπ.)
- Διακριτοποίηση της δομής (αυτόματη ή προσαρμοσμένη)
- Επιβολή των συνοριακών συνθηκών και φορτίσεων (εφαρμογή σε σημεία, επιφάνειες κλπ.)

Επίλυση (Solution)

- Επιλογή τύπου ανάλυσης (στατική ή δυναμική & γραμμική ή μη-γραμμική)
- Κατασκευή και επίλυση του συστήματος των εξισώσεων

- Υπολογισμός αγνώστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεις, τάσεις κ.λ.π)

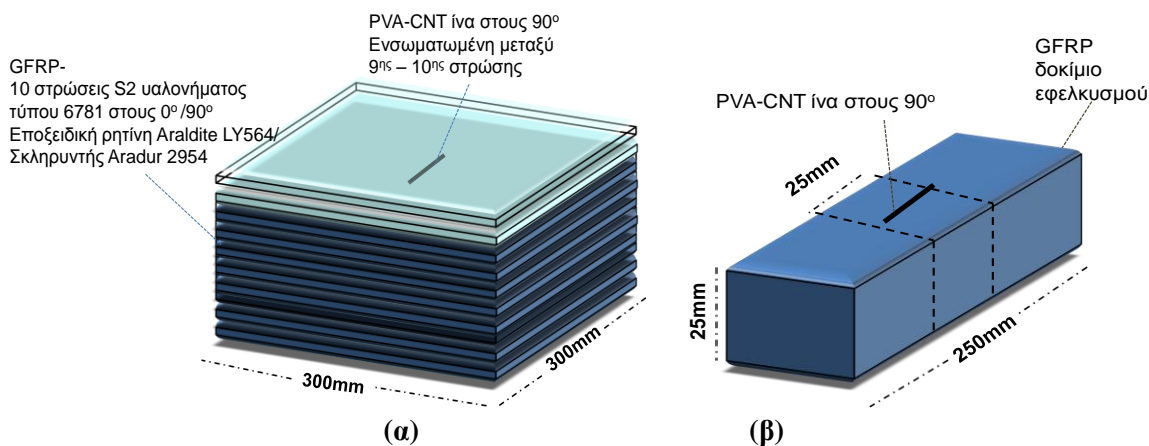
Μετα-επεξεργασία (Postprocessing)

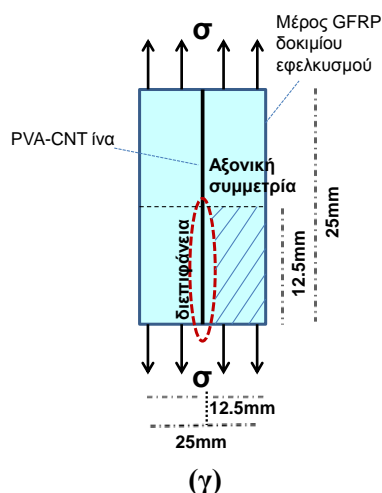
- Απεικόνιση ολοκληρωμένης προσομοίωσης (nodal solution, plotted nodes and elements)
- Ανάλυση αποτελεσμάτων (κατανομή τάσεων στη δομή, παραμόρφωση σε διαφορετικά σημεία της δομής)

4. Μοντελοποίηση με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων (FE) του συνθέτου υλικού οπλισμένου με ίνες υάλου (GFRP) με ενσωματωμένη νανοίνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης

4.1 Περιγραφή μοντέλου

Η παρούσα ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων αποσκοπεί στη μοντελοποίηση ενός ορθογωνίου παραλληλεπίδου δοκιμίου εφελκυσμού GFRP με ενσωματωμένη ίνα PVA-CNT σε κάθετη κατεύθυνση (90°) στο κέντρο του δοκιμίου, το οποίο υποβάλλεται σε προοδευτική συσσώρευση βλάβης με διαδοχικά αυξανόμενο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της πολυμερικής μήτρας του σύνθετου και της ίνας PVA-CNT -η οποία πιθανώς θα οδηγήσει σε πλήρη αποσύνδεση-μεταξύ της ίνας και του σύνθετου- θα διερευνηθεί. Η δομή που πρόκειται να μοντελοποιηθεί αποτελεί μέρος του δοκιμίου που προέρχεται από την πλάκα GFRP. Η Εικόνα 22 παρουσιάζει τη γεωμετρία της συνολικής δομής του συνθέτου με την ενσωματωμένη PVA-CNT ίνα αλλά και τη δομή που επιλέγεται προς μοντελοποίηση. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 22 (β) επιλέγεται ένα μέρος του δοκιμίου και λόγω συμμετρίας στη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες, καταλήγουμε σε ένα 3-D αξονοσυμμετρικό μοντέλο ενός κομματιού της επιλεγμένης δομής-Εικόνα 22 (γ).





Εικόνα 22: Σχηματική παρουσίαση της (α) πλάκας GFRP με ίνα PVA-CNT ως ενισχυτικό μέσο και ενσωματωμένο αισθητήρα, (β) ενός δοκιμίου που προκύπτει από την πλάκα GFRP και (γ) του επιλεγμένου αξονο-συμμετρικού κομματιού (1/4) από την τομή του δοκιμίου εφελκυσμού GFRP.

4.2 Εφαρμογή Μοντέλου Προοδευτικής Βλαβής

Στην παρούσα εργασία, τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας μεταξύ της ίνας PVA-CNT και του συνθέτου υλικού, υπό μονοτονική εφελκυστική φόρτιση θα προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας την ανάλυση ΠΣ.

Εξαιτίας του ότι μας ενδιαφέρει η δυναμική συμπεριφορά της διεπιφάνειας, της ίνας και του συνθέτου στον εφελκυσμό θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της Προοδευτικής Βλάβης (ΠΒ) – Progressive Damage Modeling (PDM). Το βασικό χαρακτηριστικό της ΠΒ είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της προοδευτικής εξέλιξης της βλάβης στο εσωτερικό του συνθέτου υλικού συναρτήσει της μηχανικής φόρτισης -εφελκυστικό φορτίο σε αυτή την περίπτωση- από την πρώτη αστοχία (first ply failure) ως την τελική.

Ένα μοντέλο ΠΒ αποτελείται από τις συνιστώσες της ανάλυσης τάσεων (stress analysis), της ανάλυσης αστοχίας (failure analysis) και της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού (material degradation). Οι τρεις αυτές συνιστώσες της μεθόδου ΠΒ συμπεριλαμβάνονται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος ολοκληρώνεται όταν ανιχνευτεί η τελική αστοχία της κατασκευής μέσω της επαλήθευσης των κριτηρίων τελικής αστοχίας. Ο αλγόριθμος της παρούσας ανάλυσης θα αναλυθεί παρακάτω.

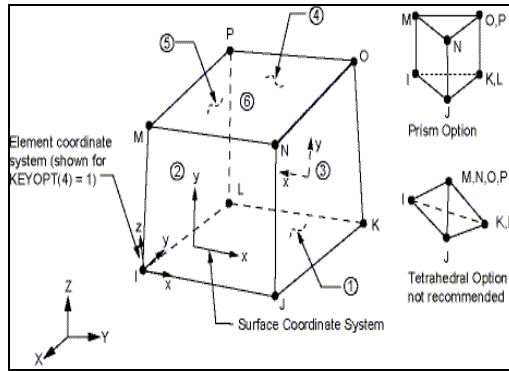
Ο Chou κ.α. ήταν οι οι πρώτοι που είχαν την ιδέα της δημιουργίας της μεθόδου ΠΒ [81]-[82]. Στη συνέχεια το πρώτο συστηματικό μοντέλο ΠΒ αναπτύχθηκε από τον Chang για πολύστρωτα σύνθετα με αφόρτιστες κυκλικές οπές σε εφελκυσμό [83]. Τέλος το πρώτο 3-D συστηματικό μοντέλο ΠΒ αναπτύχθηκε από τους Camanho & Matthews με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς μηχανικών συνδέσεων πολύστρωτων πλακών υπό εφελκυστικά φορτία [84].

Η μέθοδος ΠΒ είναι σε θέση να διαφωτίσει την έναρξη αλλά και την ολοκλήρωση της αποκόλλησης της PVA-CNT ίνας από το σύνθετο FRP κατά τον εφαρμογή αυξανόμενου εφελκυστικού φορτίου. Παρακάτω θα αναλυθούν όλες οι αναφερθείσες συνιστώσες της μεθόδου (ΠΒ).

4.2.1 Ανάλυση τάσεων

Παραδοσιακά η συνιστώσα της ανάλυσης των τάσεων της μεθόδου ΠΒ πραγματοποιείται αριθμητικά με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η ανάλυση τάσεων της δομής του συνθέτου ενισχυμένου με PVA-CNT ίνα μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα 3D FE αξονο-συμμετρικό μοντέλο. Λόγω αξονικής συμμετρίας της γεωμετρίας μοντελοποιείται και υπόκειται σε μηχανική φόρτιση μόνο το ένα τέταρτο της δομής.

Αναπτύχθηκε ένα 3-D μοντέλο ΠΣ καθώς η γεωμετρία του προβλήματος είναι τρισδιάστατη αλλά και πιο συγκεκριμένα γιατί η αποκόλληση της PVA-CNT ίνας, που είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός αστοχίας που θα μελετηθεί, προκαλείται από διατμητικές τάσεις, που αναπτύσσονται κατά το πάχος της διεπιφάνειας. Γι' αυτό το λόγο το στοιχείο SOLID 45 επιλέχθηκε για τη διακριτοποίηση της δομής. Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι ένα 8-κομβο στοιχείο όπου έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (στις x, y και z κατευθύνσεις) και ορθότροπες ιδιότητες, και προσομοιώνουν έτσι το σύνθετο. Μια σχηματική απεικόνιση του συγκεκριμένου στοιχείου παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.

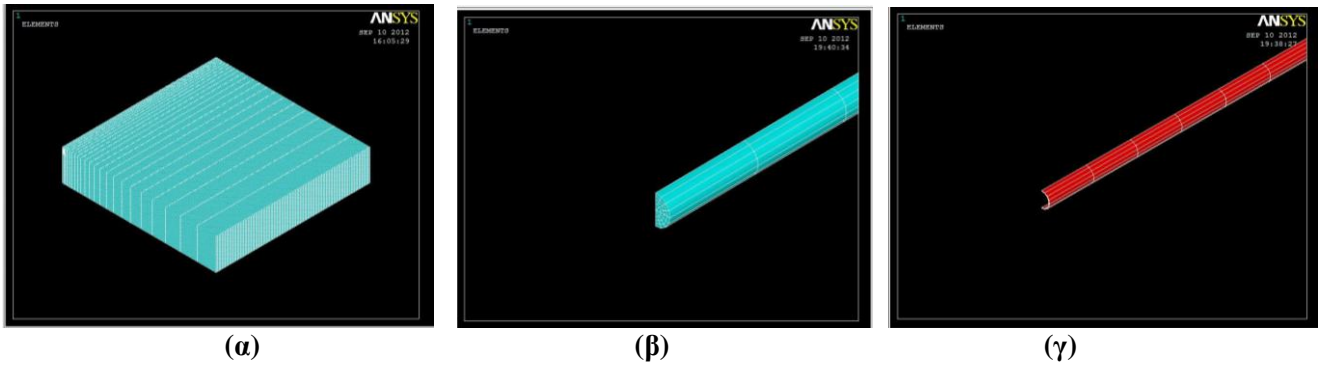


Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση του 3-D στρωματικού στοιχείου SOLID 45 του ANSYS.

Το στρωματικό στοιχείο (SOLID 45) υπολογίζει και αποθηκεύει σε κάθε στρώση του έξι συνιστώσες τάσεων ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$), υπολογισμένες ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της στρώσης (layer). Σε αυτό το σύστημα, η x-διεύθυνση συμπίπτει με τη διεύθυνση της ίνας PVA-CNT, η y-διεύθυνση με την διεύθυνση του οπλισμού και η z-διεύθυνση εγκάρσια προς τις ίνες του οπλισμού.

Πρέπει να δίνεται έμφαση στην πυκνότητα της διακριτοποίησης (meshing), με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό των τιμών των τάσεων και την ελαχιστοποίηση της εξαγωγής στοιχείων με υπερβολικά υψηλό λόγο δύο διαστάσεων l/d (aspect ratio) που έχει επίδραση στην ακρίβεια προσομοίωσης του δοκιμίου.

Η Εικόνα 24 απεικονίζει τα πλέγματα όπως προβάλλονται σε ΠΣ του 3-D αξονοσυμμετρικού σύνθετου, της PVA-CNT ίνας και της διεπιφάνειας. Η διακριτοποίηση έχει επιλεγεί να είναι αισθητά πιο πυκνή κοντά στο άκρο της ίνας, έτσι ώστε να προκύψει ικανοποιητική ακρίβεια για την ανάλυση των τάσεων στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, αφού άλλωστε από εκεί θα ξεκινήσει η αποκόλληση της ίνας σε προχωρημένο στάδιο φόρτισης. Μακριά από το άκρο ίνας, ένα πιο αραιό πλέγμα επιλέχθηκε προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός αριθμός των στοιχείων αλλά και ο χρόνος της επίλυσης του προβλήματος.



Εικόνα 24: Πλέγμα του (α) 3D αξονο-συμμετρικού μοντέλου, (β) της PVA-CNT ίνας, και (γ) της διεπιφάνειας.

Η διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας και της πολυμερικής μήτρας ορίζεται στην παρούσα μοντελοποίηση ως ένα τμήμα της ακτίνας της ίνας. Το πάχος της διεπιφάνειας ορίστηκε ως ένα στοιχείο, κάτι που μας γλυτώνει από την ύπαρξη αποκλίσεων στις τιμές των διατμητικών τάσεων που θα υπήρχαν αν το πάχος της διεπιφάνειας είχε οριστεί από $n \geq 2$ στοιχεία. Οι αποκλίσεις θα προέκυπταν από το λανθασμένο υπολογισμό της μέσης τιμής των διατμητικών τάσεων στην περίπτωση που κάποιο από τα στοιχεία αστοχούσε και τότε θα επηρέαζε την ανάλυση των τάσεων.

Παρακάτω αποδίδονται οι τιμές για το μήκος της ίνας αλλά και γενικά τα φυσικά χαρακτηριστικά του συνθέτου-Πίνακας 2.

Πίνακας 2: Κλιμακωτές παράμετροι της ανάλυσης.

Σύμβολα ΠΣ	Επεξήγηση
$DF=0.04$	Ακτίνα τομής PVA-CNT ίνας
$HL=0.03$	Πάχος στρώσης συνθέτου
$W=12.5$	Πλάτος δομής
$L=12.5$	Μήκος δομής
$NL=10$	Αριθμός στρώσεων συνθέτου

Για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του υβριδικού συνθέτου, απαιτούνται οι μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος με υαλονήματα τύπου S2-6781 που είναι άλλωστε και η ενίσχυση των πλακών GFRP. Καθώς το ύφασμα έχει πλέξη $0^\circ/90^\circ$

είναι ορθότροπο και ανάλογα διαμορφώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του-Πίνακας 3. Πιο συγκεκριμένα, αυτές θα είναι το μέτρο ελαστικότητας Young στους άξονες x,y,z (E_1, E_2, E_3), οι συνιστώσες του μέτρου διάτμησης (G_{12}, G_{13}, G_{23}) και οι λόγοι Poisson ($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$).

Πίνακας 3: Μηχανικές σταθερές του υφάσματος υαλονημάτων τύπου S2-Glass 6781 Woven[85].

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
25.00	21.54	10.61	3.02	2.68	2.69	0.13	0.41	0.41

Οι συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν σε όλους τους ενδιαφερόμενους κόμβους της αξονοσυμμετρικής δομής ως μηδενικές μετατοπίσεις. Εφαρμόστηκε φόρτιση της δομής στον άξονα x με εξήντα αυξητικά βήματα φορτίου εφελκυσμού της τάξεως των 10MPa το καθένα, σε όλες τις επιλεγμένες περιοχές του συνθέτου. Κατά την προσομοίωση θα εξεταστούν οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας/πολυμερική μήτρα συνθέτου αλλά και σε ποιά σημεία ξεκινάει και ολοκληρώνεται η αποκόλληση της ίνας από τη δομή.

4.2.2 Ανάλυση αστοχίας

Το κομμάτι της ανάλυσης αστοχίας πραγματοποιείται με την χρήση κριτηρίων αστοχίας. Οι μηχανισμοί αστοχίας στα ινώδη σύνθετα υλικά σε αντίθεση με τα μέταλλα ποικίλουν και είναι σύνθετοι. Οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας είναι: (α) η αστοχίας της μήτρας από εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία, (β) η αστοχία των ινών υπό εφελκυστικά (αποχωρισμός ινών-delamination) και θλιπτικά φορτία (λυγισμός των ινών-fiber buckling) καθώς και η (γ) διάτμηση στη διεπιφάνεια μήτρας και ινών. Ενδεικτικά, ορισμένα από τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς είναι τα κριτήρια Μέγιστης τάσης και Μέγιστης παραμόρφωσης, το κριτήριο Tsai-Hill, το κριτήριο Tsai-Wu και τα κριτήρια Hashin. Το πρόβλημα μας που είναι η διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας υπάγεται στην τελευταία κατηγορία μηχανισμών αστοχίας, μόνο που το ενισχυτικό μέσο που εξετάζεται είναι η PVA-CNT ίνα.

Προκειμένου να εξεταστεί η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ ίνας και μήτρας, η ίνα και η διεπιφάνεια πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά. Αρχικά αναλύεται η ιδιότητα stress integrity (σ_{INT}) κατά μήκος της επιφάνειας της διεπιφάνειας. Οι τιμές της προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων κύριων τάσεων (principal stresses). Έτσι λοιπόν η μέγιστη διατμητική τάση υπολογίζεται μέσω της stress integrity σύμφωνα με το κριτήριο Tresca:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} |\sigma_{max} - \sigma_{min}| = \frac{1}{2} (|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (8)$$

όπου ως τ_{max} συμβολίζεται η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια PVA-CNT ίνα/πολυμερικής μήτρας και ως σ_{max} και σ_{min} συμβολίζονται η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα.

Εφαρμόστηκαν συγκεκριμένα κριτήρια αστοχίας κατά τη μοντελοποίηση με τη χρήση ΠΣ. Το πρώτο κριτήριο αφορά την κατανομή των διατμητικών τάσεων στο υλικό:

$$\tau_{max} > \tau_{ISS} \quad (9)$$

όπου τ_{ISS} είναι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Επιλέχθηκαν οι τιμές 20, 30, 40 και 50MPa για τη διατμητική αντοχή κατά τη μοντελοποίηση για να διερευνηθεί η επίδραση της τιμής στο φαινόμενο της αποκόλλησης της ίνας PVA-CNT από τη μήτρα. Το επόμενο κριτήριο αφορούσε την κατανομή των παραμορφώσεων:

$$\varepsilon_{FEA} > \varepsilon_{fracture} \quad (10)$$

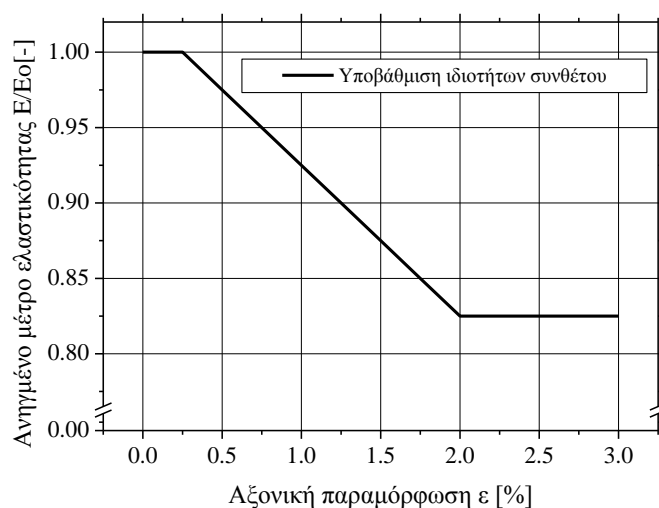
όπου ως ε_{FEA} συμβολίζεται η υπολογισμένη παραμόρφωση ορισμένου σημείου της δομής και για κάποιο συγκεκριμένο στάδιο φόρτισης και ως $\varepsilon_{fracture}$ συμβολίζεται η παραμόρφωσης θραύσης, τη οποίας η τιμή θεωρήθηκε δεδομένη στην προσομοίωση ως 3%.

4.2.3 Υποβάθμιση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού

Η υποβάθμιση των ιδιοτήτων του συνθέτου πραγματοποιείται με την χρήση κανόνων υποβάθμισης και του κριτηρίου τελικής αστοχίας. Η υποβάθμιση γίνεται με την εφαρμογή αυτών των κανόνων και έχει σαν σκοπό την αφαίρεση της ικανότητας

μεταφοράς συγκεκριμένου φορτίου από τα στοιχεία που έχουν αστοχήσει, με αποτελέσματα τα γειτονικά στοιχεία να επιβαρύνονται περισσότερο.

Στη μοντελοποίηση λοιπόν, από τη στιγμή που κάποιο από τα δύο κριτήρια που περιγράφονται στις εξισώσεις (9) και (10) παραβιαστεί σε κάποιο στάδιο φόρτισης, εφαρμόζεται η αστοχία του στοιχείου αυτού, μέσω του ορισμού της τιμής του αξονικού μέτρου ελαστικότητας x (E_x) και του λόγου Poisson σχεδόν μηδέν ($=0.001$ της αρχικής τιμής). Σε περίπτωση όμως που δεν παραβιαστεί κάποιο κριτήριο αστοχίας, υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του στοιχείου, και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης και ο λόγος Poisson. Στην Εικόνα 25, παρουσιάζεται η υποβάθμιση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την εφαρμοζόμενη αξονική παραμόρφωση σε στάδια 0.25% μέχρι μια μέγιστη τιμή της τάξεως του 2.5%. Κάτι τέτοιο συμβαίνει με σκοπό να προσομοιώσει η συσσωρευμένη βλάβη στο σύνθετο με το αυξανόμενο στάδιο φόρτισης, μέχρι την τελική αστοχία του.



Εικόνα 25: Συσχέτιση της υποβάθμισης του μέτρου ελαστικότητας στον άξονα x (E_x) με την εφαρμοζόμενη αξονική παραμόρφωση.

4.2.4 Διάγραμμα ροής της μεθόδου ΠΒ

Όλα τα βήματα της μεθόδου ΠΒ -ανάλυση τάσεων, ανάλυση αστοχίας και υποβάθμιση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού- εντάχθηκαν σε έναν αλγόριθμο [86]. Ο αλγόριθμος συμπεριέλαβε όλες τις συνιστώσες του μοντέλου ΠΒ και προγραμματίστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού του ANSYS (ANSYS Parametric Design Language-APDL). Τα βήματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 26. Πιο συγκεκριμένα τα βήματα στο διαγράμματος ροής είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1^ο: Δημιουργία του 3-D αξονο-συμμετρικού μοντέλου ΠΣ της δομής. Προκειμένου να αναπτυχθεί το μοντέλο χρειάζονται ως δεδομένα:

- η γεωμετρία της δομής,
- οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, της ίνας PVA-CNT και της διεπιφάνειας,
- η πυκνότητα της διακριτοποίησης,
- οι συνοριακές συνθήκες,
- το αρχικά υποβαλλόμενο φορτίο,
- το βήμα της φόρτισης (load step- $\Delta\sigma$)

Βήμα 2^ο: Ανάλυση τάσεων - Υπολογισμός του τασικού πεδίου που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια PVA-CNT/ ίνας, υπό την επιβολή μονοτονικού εφελκυσμού με αυξανόμενο εφελκιστικό φορτίο μέχρι την αστοχία του υλικού.

Βήμα 3^ο: Ανάλυση αστοχίας των στοιχείων της ίνας και της διεπιφάνειας με χρήση των κριτηρίων αστοχίας (εξισώσεις 9-10), χρησιμοποιώντας τις τάσεις που έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα.

3.1) Εάν δεν διαπιστωθεί καμιά αστοχία, το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται κατά το βήμα STEP1 σύμφωνα με την εξίσωση $\sigma_n = \sigma_{n-1} + \Delta\sigma$ (όπου σ_n το φορτίο της τρέχοντος βήματος και σ_{n-1} το φορτίο του προηγούμενου βήματος) και υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του στοιχείου (material properties degradation)-συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης και ο λόγος Poisson. Έπειτα επιστρέφουμε στο 3^ο Βήμα.

3.2) Εάν ανιχνευτεί αστοχία, ο αλγόριθμος συνεχίζει στο επόμενο βήμα (Βήμα 4).

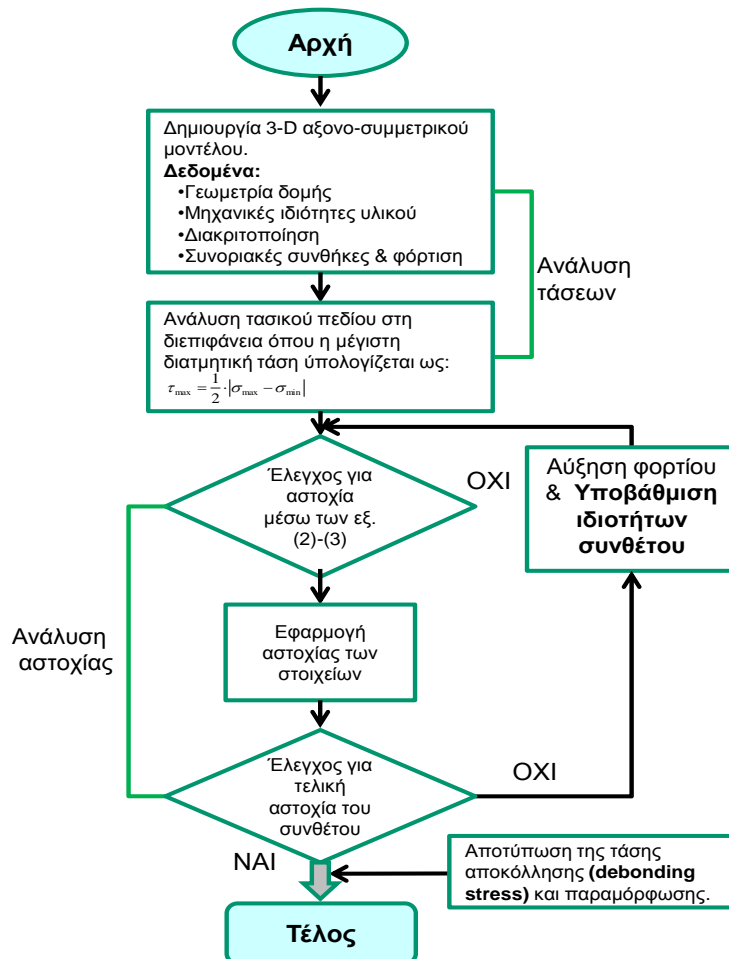
Βήμα 4^ο: Αστοχία των στοιχείων που έχουν παραβιάσει κάποιο από τα κριτήρια αστοχίας, μέσω του μηδενισμού του μέτρου ελαστικότητας τους και του λόγου Poisson.

Βήμα 5^ο: Έλεγχος για τελική αστοχία της δομής.

5.1) Ο αλγόριθμος σταματά όταν συμβεί η τελική αστοχία του δομικού στοιχείου. Σε εκείνο το σημείο μελετάται σε ποιο βήμα φόρτισης πραγματοποιήθηκε η πλήρης αποκόλληση PVA-CNT ίνας/μήτρας, η τάση αποκόλλησης (debonding stress) και οι παραμορφώσεις της ίνας.

5.2) Σε διαφορετική περίπτωση, αυξάνεται το στάδιο φόρτισης και ο πραγματοποιείται ανάλυση της νέας κατανομής των τάσεων (Βήμα 2^ο Αλγορίθμου), λόγω της υποβάθμισης των ιδιοτήτων των στοιχείων που έχουν αστοχήσει. Το συγκεκριμένο βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι την τελική αστοχία της δομής (συνθέτου).

5.3) Έπειτα από την αστοχία του υλικού μελετάται σε ποιο στάδιο φόρτισης συνέβη η πλήρης αποκόλληση της ίνας και μελετάται η τάση αποκόλλησης καθώς και οι παραμορφώσεις κατά μήκος της ίνας.



Εικόνα 26: Διάγραμμα ροής της μεθόδου Προοδευτικής Βλάβης (ΠΒ) που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση.

4.3 Επίδραση διαφορετικών παραμέτρων στη μοντελοποίηση

Προκειμένου η ανάλυση με τη χρήση ΠΣ να ‘διαφωτίσει’ καλύτερα την περιοχή της διεπιφάνειας ίνας PVA-CNT/μήτρας θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση διαφορετικών παραμέτρων στην προσομοίωση. Συγκεκριμένα αναλύθηκε η επίδραση πέντε διαφορετικών παραμέτρων: (α) της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας, (β) του πάχους της διεπιφάνειας, (γ) του μέτρου ελαστικότητας της διεπιφάνειας, (δ) της προέντασης ίνας και (ε) της πυκνότητας της διακριτοποίησης.

Αρχικά η τιμή της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής (ISS) διαδραματίζει έναν κυρίαρχο ρόλο στη μηχανική πρόσφυση της ίνας με την πολυμερική μήτρα. Συγκεκριμένα καθορίζει το στάδιο φόρτισης που θα πραγματοποιηθεί η έναρξη και ολοκλήρωση της αποκόλλησης της ίνας από το σύνθετο.

Στη συνέχεια, είναι αναμενόμενο ότι μια ενδεχόμενη αύξηση στο πάχος της διεπιφάνειας t_{int} ενισχυεί την αντοχή της. Αυτή η υπόθεση θα εξεταστεί και θα αναλυθεί. Επίσης θα διερευνηθεί αν η αύξηση στην τιμή του πάχους της διεπιφάνειας θα έχει κάποια αρνητική επίδραση στο φαινόμενο της αποκόλλησης της ίνας PVA-CNT.

Επιπρόσθετα, θα μελετηθεί αν το μέτρο ελαστικότητας της ισότροπης διεπιφάνειας E_{int} επηρεάζει την πρόσφυση της ναοΐνας στο σύνθετο, και στην περίπτωση που παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από το σύνθετο αν οδηγεί σε πρόωρη αποκόλληση της ίνας.

Ακόμα, καθώς ο πρωταρχικός σκοπός της ενσωμάτωσης της ίνας είναι η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του σύνθετου υλικού, θα πρέπει να λειτουργεί σαν αισθητήρας και έτσι να υιοθετεί τη μηχανική συμπεριφορά του συνθέτου. Γι’ αυτό το λόγο μελετάται το φαινόμενο της προέντασης της ίνας, το οποίο θα προσδώσει στην ίνα υψηλότερη τιμή μέτρου ελαστικότητας και θα πλησιάσει την αντίστοιχη τιμή της μήτρας.

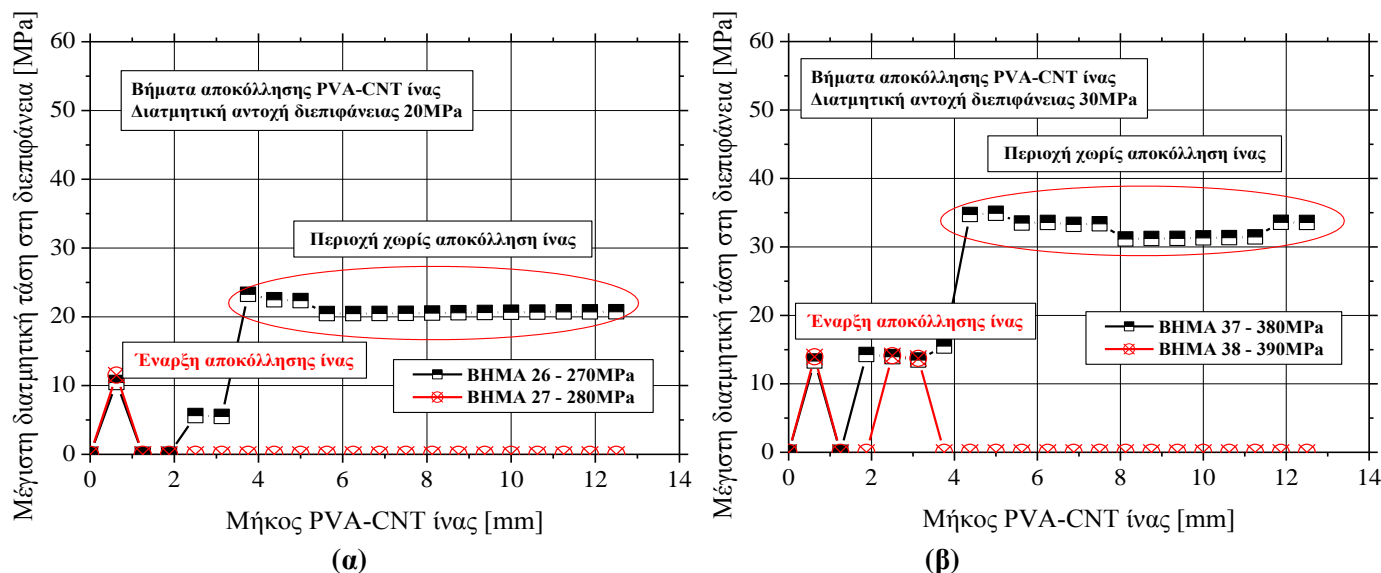
Τέλος, η πυκνότητα της διακριτοποίησης της συνολικής δομής καθορίζει πάντοτε το βαθμό ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Σε αυτή την κατεύθυνση θα διερευνηθεί αν το πυκνότερο πλέγμα θα αποτυπώσει καλύτερα το φαινόμενο της αποκόλλησης της ίνας.

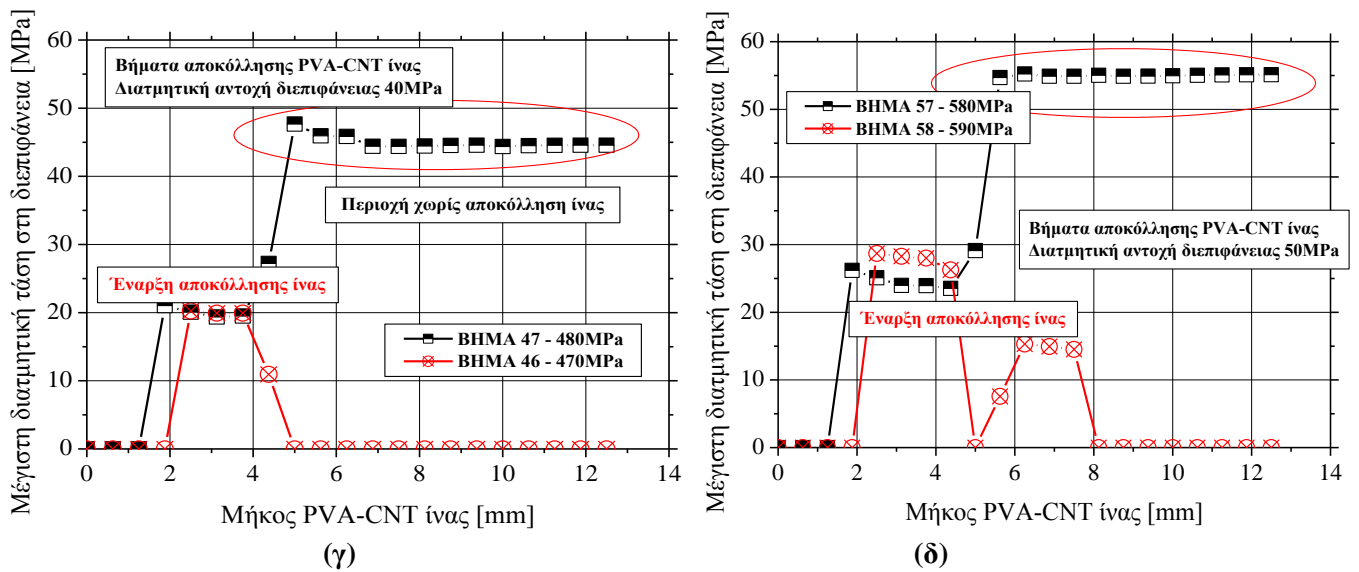
4.3.1 Διατμητική αντοχή διεπιφάνειας

Η ιδιότητα της διεπιφάνειας νανοσωλήνων / συνθέτου που έχει μελετηθεί περισσότερο είναι η διατμητική αντοχή (interfacial shear strength-ISS). Η συγκεκριμένη ιδιότητα καθορίζει πρακτικά την ικανότητα μεταφοράς φορτίου μεταξύ ίνας και μήτρας. Η επίδραση της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής στη μεταφορά φορτίου και την κατανομή των τάσεων κατά μήκος της ίνας CNT υπό μηχανική φόρτιση θα αναλυθεί παρακάτω.

Στην προσομοίωση διερευνήθηκε η περιοχή της διεπιφάνειας για την κατανομή των τάσεων και η περιοχή της ίνας για την κατανομή των παραμορφώσεων υπό τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Η Εικόνα 27 απεικονίζει την επίδραση της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής στις τιμές της μέγιστης διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια μεταξύ της ίνας και του σύνθετου και στην έναρξη της αποκόλλησης της ίνας από τη μήτρα. Είναι φανερό ότι η αποσύνδεση ξεκινά από το άκρο της ίνας και ότι η μέγιστη διατμητική τάση αποκτά τιμή μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας στα τελευταία στάδια φόρτισης πριν την αποκόλληση της ίνας. Επίσης σε όλες τις εικόνες διακρίνεται η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων, έπειτα από την πλήρη αποκόλληση της ίνας από τη μήτρα.

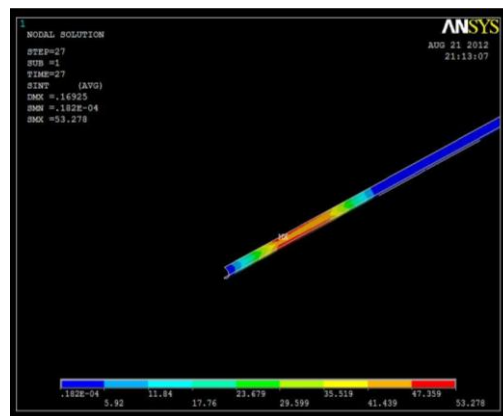
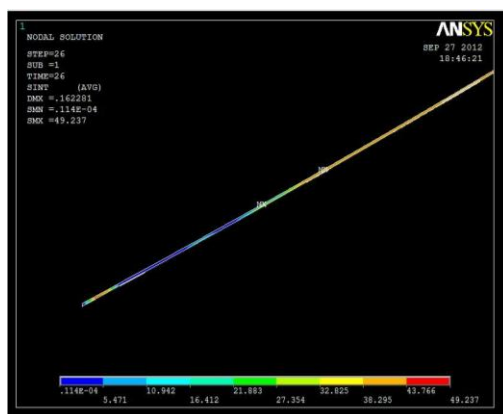




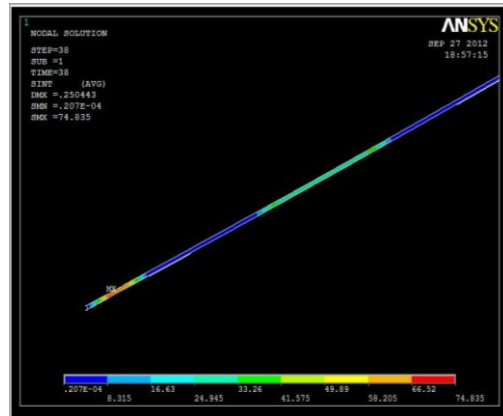
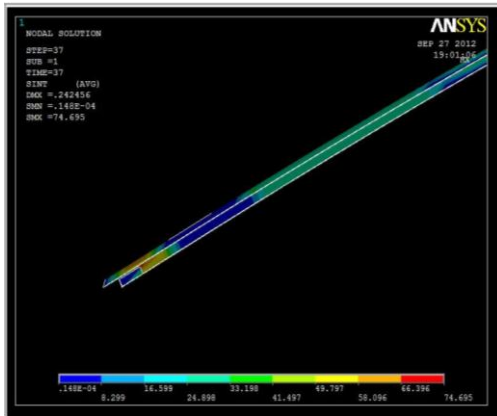
Εικόνα 27: Κατανομή των μέγιστων διατμητικών τάσεων (τ_{max}) στη διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας/μήτρας για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής (20, 30, 40 και 50MPa).

Στην Εικόνα 28 φαίνεται η κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια στα δύο βήματα φόρτισης (load steps), στα οποία συμβαίνει η πλήρης αποκόλληση της ίνας για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής. Όπως φαίνεται η αύξηση της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας συντελεί στην ενίσχυση του φαινομένου της μεταφοράς φορτίου από τη μήτρα στην ίνα και έτσι η αποκόλληση συμβαίνει σε μεγαλύτερα στάδια φόρτισης, απ'ότι στην Εικόνα 27 (α), (β), (γ) και (δ).

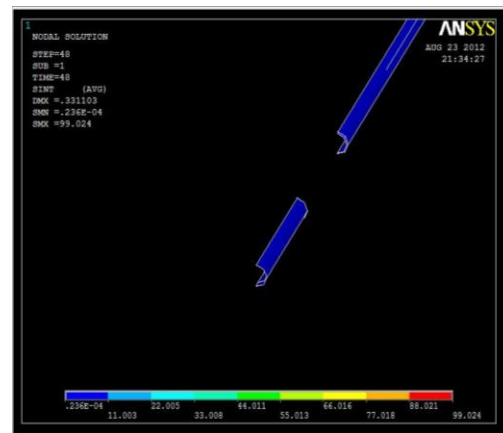
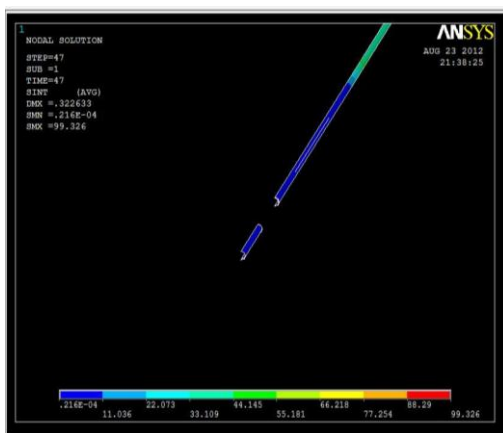
ISS-20MPa (Τάση αποκόλλησης - 280MPa)



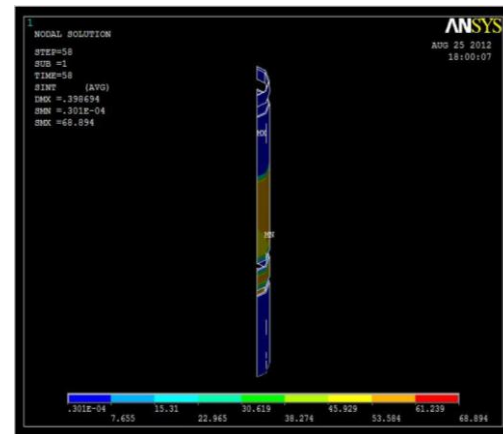
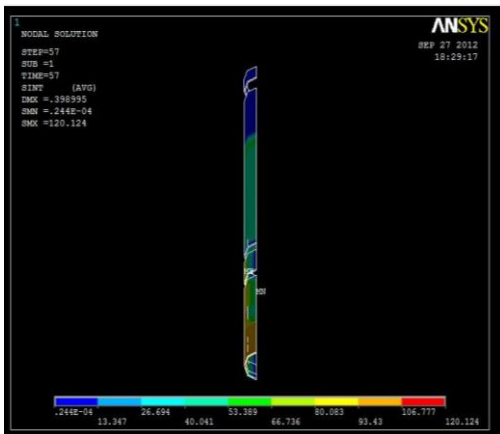
ISS-30MPa (Τάση αποκόλλησης - 390MPa)



ISS-40MPa (Τάση αποκόλλησης - 480MPa)



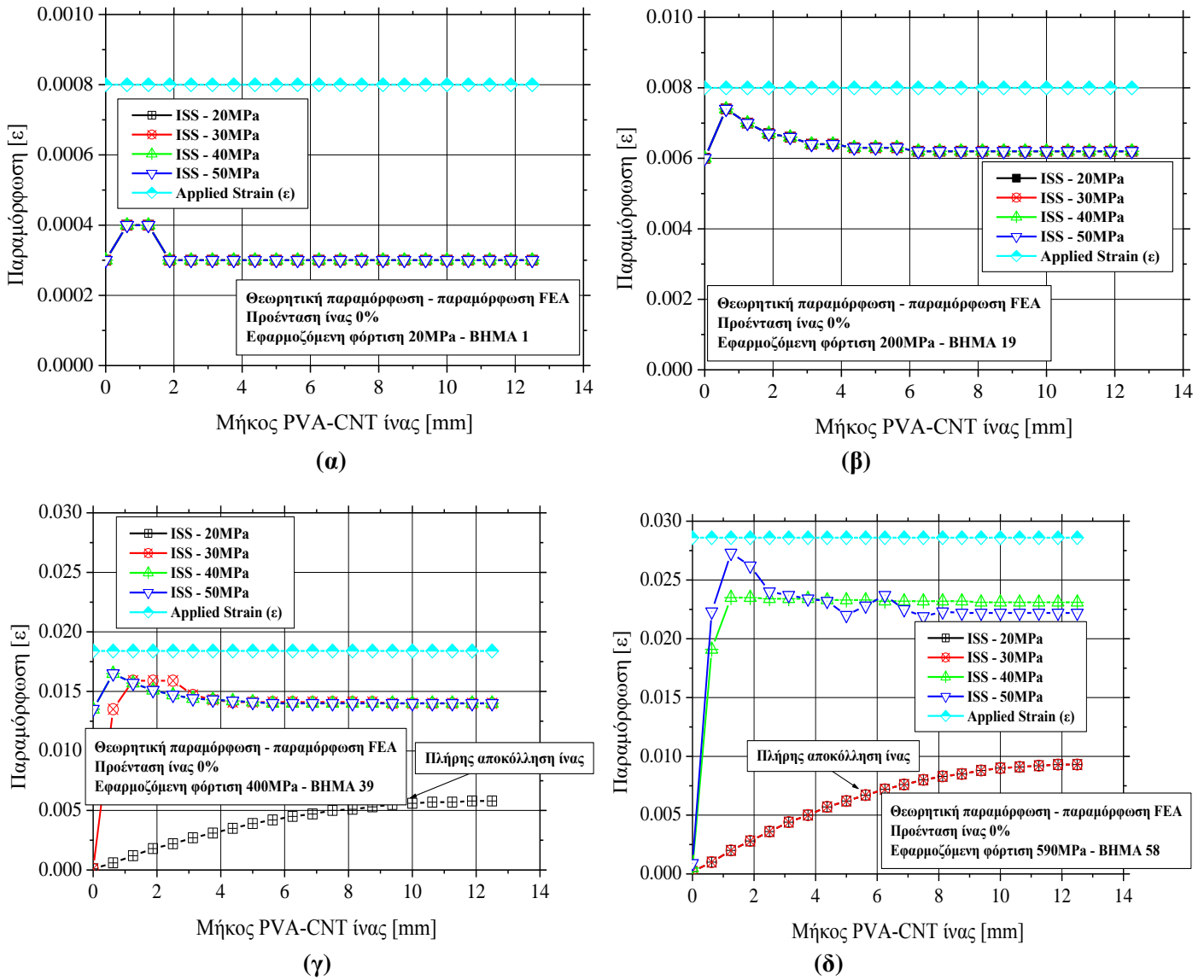
ISS-50MPa (Τάση αποκόλλησης - 580MPa)



Εικόνα 28: Κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια κατά την πλήρη αποκόλληση της PVA-CNT ίνας για διατμητική τάση 20, 30, 40 και 50MPa.

Η παραμόρφωση κατά μήκος της ίνας PVA-CNT όπως έχει υπολογιστεί από τη χρήση ΠΣ μπορεί να συσχετισθεί με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή της, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της υποβάθμισης του σύνθετου υλικού στο μέτρο

ελαστικότητάς του. Η Εικόνα 29 απεικονίζει μια συσχέτιση της θεωρητικής τιμής ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής. Οι θεωρητικές τιμές παραμένουν υψηλότερες σε όλα τα στάδια φόρτισης.

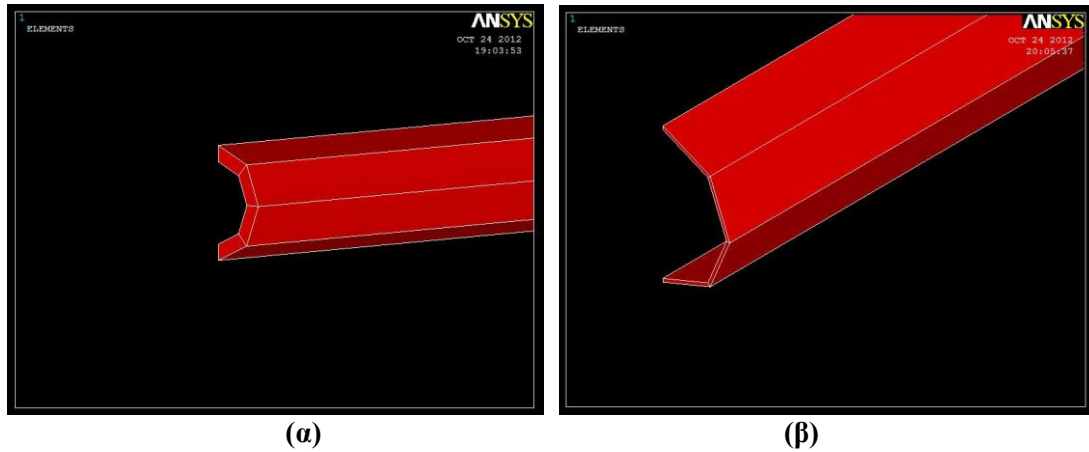


Εικόνα 29: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής.

4.3.2 Πάχος διεπιφάνειας

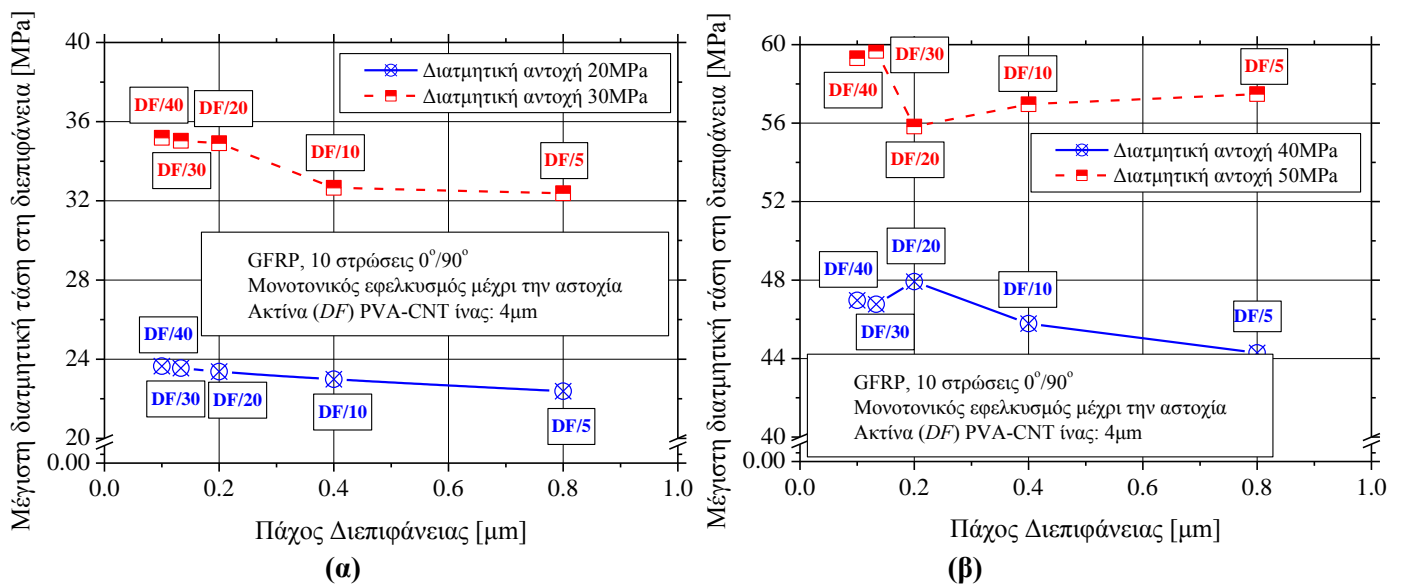
Σε αυτό το σημείο θα εξεταστεί η επίδραση του πάχους της διεπιφάνειας στην πρόσφυση μεταξύ PVA-CNT ίνας και μήτρας του συνθέτου υλικού. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί το φαινόμενο της κατανομής των διατμητικών τάσεων μεταξύ ίνας/μήτρας καθώς και τα στάδια φόρτισης που συνβαίνει η πλήρης αποκόλληση της από το

σύνθετο. Οι τιμές του πάχους της διεπιφάνειας κυμάνθηκαν από $DF/40$ μέχρι $DF/5$, όπου με DF συμβολίζεται η ακτίνα της ίνας PVA-CNT. Καθώς η τιμή της ακτίνας θεωρήθηκε $4\mu\text{m}$, οι τιμές του πάχους λοιπόν κυμάνθηκαν από $0.1\mu\text{m}$ μέχρι $0.8\mu\text{m}$. Η Εικόνα 30(α) και (β) απεικονίζει τα δύο αυτά άκρα.



Εικόνα 30: Απεικόνιση της διεπιφάνειας για διαφορετικά πάχη: (α) $DF/5$ και (β) $DF/40$.

Με βάση την Εικόνα 31(α) και (β) παρατηρείται ότι η αποκόλληση συμβαίνει στο ίδιο στάδιο φόρτισης. Από την άλλη πλευρά όμως, το μικρότερο πάχος διεπιφάνειας οδηγεί σε μικρή αύξηση των τιμών των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια. Είναι φανερό ότι μια ενδεχόμενη αύξηση στο πάχος της διεπιφάνειας t_{int} ενισχύει την αντοχή της.

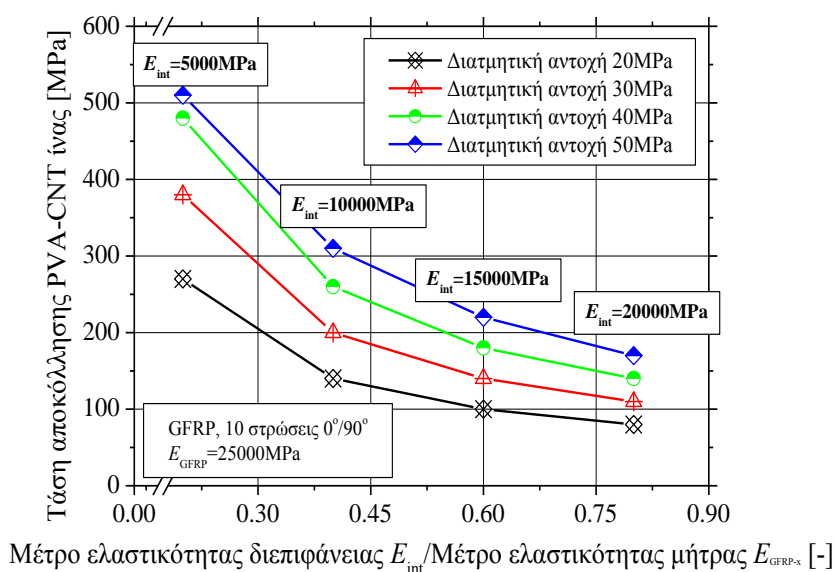


Εικόνα 31: Επίδραση του πάχους της διεπιφάνειας στις τιμές της μέγιστης διατμητικής τάσης για διατμητικές αντοχές 20, 30, 40 και 50MPa.

4.3.3 Μέτρο ελαστικότητας διεπιφάνειας

Μια ακόμη παράμετρος, της οποίας η επίδραση στην πρόσφυση PVA-CNT ίνας-μήτρας θα μελετηθεί είναι το μέτρο ελαστικότητας της διεπιφάνειας. Η διεπιφάνεια θεωρείται ως ένα ισότροπο υλικό και έτσι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_{int} είναι ίδια για τους άξονες x, y και z. Το μέτρο ελαστικότητας της διεπιφάνειας αναμένεται να έχει τιμή ανάμεσα σε αυτή της ίνας και του γειτονικού συνθέτου. Στη συγκεκριμένη ανάλυση η τιμή του κυμάνθηκε από 5000MPa μέχρι 20000MPa, ανάμεσα δηλαδή σε αυτή της PVA-CNT ίνας (ισότροπο υλικό-3800MPa στους άξονες x,y,z) και του συνθέτου στον x άξονα (κατά μήκος της ίνας - 25000MPa).

Η Εικόνα 32 απεικονίζει την επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της διεπιφάνειας E_{int} στο φαινόμενο της αποκόλλησης της ίνας PVA-CNT από το σύνθετο. Συγκεκριμένα παρατίθενται οι τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης εφελκυσμού στην οποία πραγματοποιείται η πλήρης αποκόλληση της ίνας. Εξετάζεται επίσης και η επίδραση της διατμητικής αντοχής σε συνδυασμό με το μέτρο ελαστικότητας της διεπιφάνειας.



Εικόνα 32: Συσχέτιση της τάσης αποκόλλησης της PVA-CNT ίνας με το ανηγμένο E_{int}/E_{GFRP-x} για διατμητικές αντοχές 20, 30, 40 και 50MPa.

Παρατηρείται λοιπόν ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της διεπιφάνειας οδηγεί στην πρόωρη αποκόλληση της ίνας κάτι που φαίνεται ειδικά στην περίπτωση της διατμητικής αντοχής 50MPa για E_{int} 5000MPa και 20000MPa, όπου συναντάμε

πτώση στην τιμή της τάσης αποκόλλησης της τάξεως του 66,7%. Επίσης είναι φανερό ότι η μεγαλύτερη διατμητική αντοχή σε συνδυασμό με το χαμηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας της διεπιφάνειας οδηγεί σε ενίσχυση της πρόσφυσης της PVA-CNT ίνας με το σύνθετο και όπως είναι φυσικό η αποκόλληση της ίνας πραγματοποιείται σε μεταγενέστερο στάδιο φόρτισης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 32 παραπάνω.

4.3.4 Προένταση των Ινών

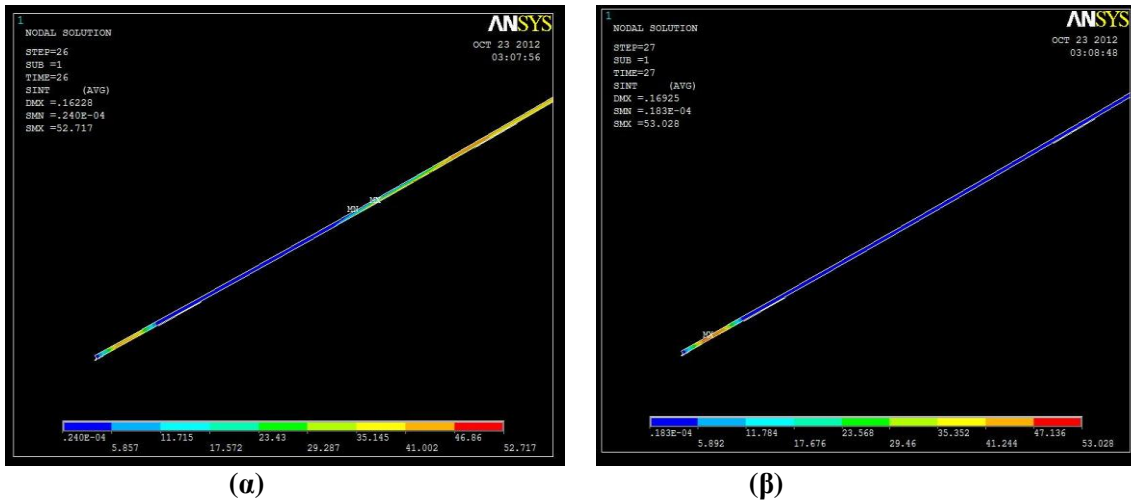
Προηγούμενες μελέτες έχουν αναδείξει τη σημαντική επίδραση της προέντασης της PVA-CNT ίνας, όταν χρησιμοποιείται ως ενσωματωμένος αισθητήρας στα σύνθετα υλικά [72]. Εκτός από αυτό, οι μηχανικές ιδιότητες της ίνας επηρεάζονται όταν υπόκειται σε προένταση. Γνωρίζοντας ότι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ατόμων άνθρακα είναι η ίδια, η δομή των νανοσωλήνων άνθρακα είναι ιστροπική και συνεπώς χρειάζονται μόνο δύο παραμέτροι (μέτρο ελαστικότητας του Young (E) κατά τη διεύθυνση των CNTs E_x και ο λόγος Poisson (ν) για τη δήλωση των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας [87]. Επομένως, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τη μηχανική συμπεριφορά της ίνας, γνωρίζοντας μόνο το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση x (E_x) καθώς και το λόγο Poisson (ν_{xy}) για διαφορετικές τιμές προέντασης της ίνας (0, 50, 100 και 200%)-Πίνακας 4.

Πίνακας 4: Μηχανικές ιδιότητες της PVA-CNT ίνας για διαφορετικές τιμές προεντάσεως (0, 50, 100, 200%) [88].

0% Προένταση Ινών		50% Προένταση Ινών		100% Προένταση Ινών		200% Προένταση Ινών	
E_x (GPa)	ν_{xy}	E_x (GPa)	ν_{xy}	E_x (GPa)	ν_{xy}	E_x (GPa)	ν_{xy}
3.8	0.25	4.2	0.25	6.2	0.25	10.00	0.25

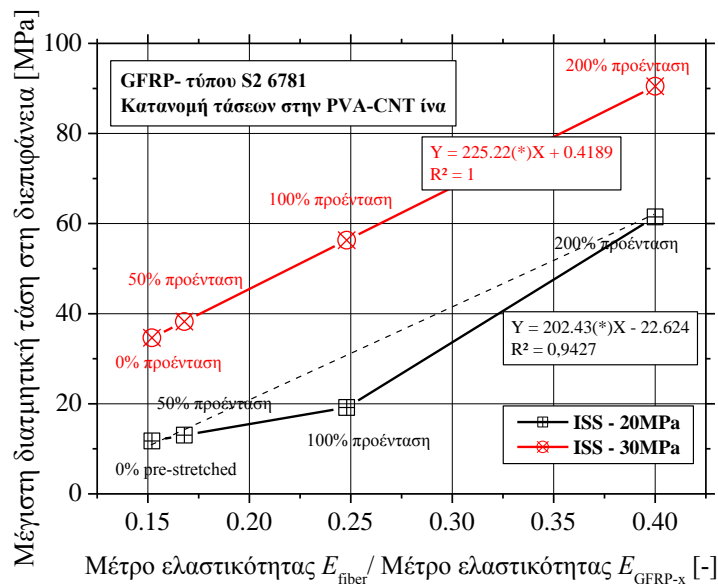
Τα σχήματα στην Εικόνα 33 (α) και (β) απεικονίζουν την κατανομή των διατμητικών τάσεων στην ίνα που έχει υποστεί προένταση 50% στα βήματα όπου πραγματοποιείται η αποκόλληση της από το σύνθετο δηλαδή ανάμεσα στο 26^ο και

27^ο βήμα σταδιακής φόρτισης (280MPa). Η απότομη μείωση της διατμητικής τάσης (σχεδόν 0) υποδηλώνει αποκόλληση της ίνας από τη μήτρα.



Εικόνα 33: Κατανομή της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια στα βήματα πλήρους αποκόλλησης της (26^ο-27^ο) για 50% προένταση και 20MPa ISS.

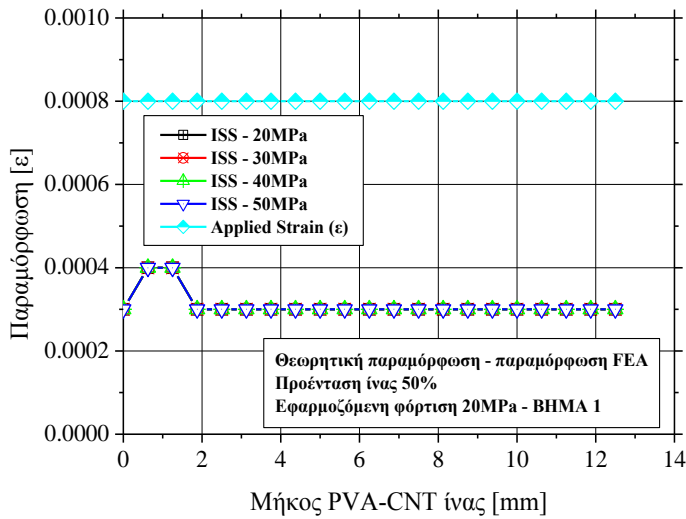
Στην Εικόνα 34 συσχετίζεται η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια με το ανηγμένο $E_{\text{fiber}}/E_{\text{GFRP-x}}$ για τις περιπτώσεις των 20MPa και 30MPa ως διεπιφανειακές αντοχές. Οι καμπύλες παρουσιάζουν πολύ υψηλές συσχετίσεις και συγκεκριμένα ($R^2 = 0.9427$) και ($R^2 = 1$) για 20MPa, 30MPa διατμητική αντοχή αντίστοιχα.



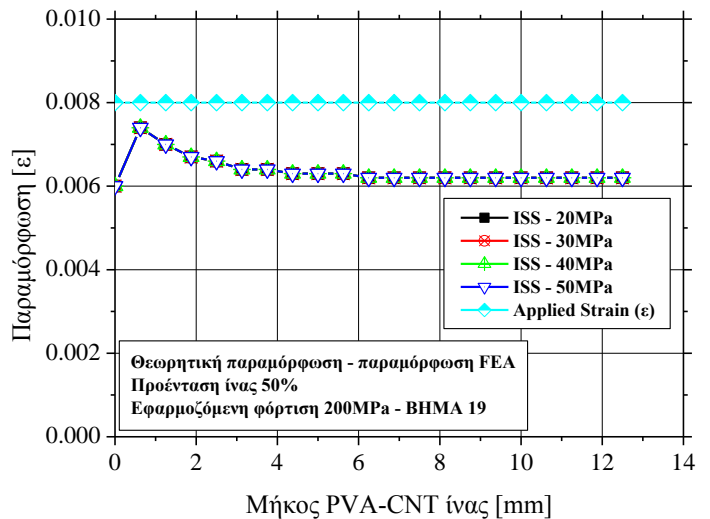
Εικόνα 34: Συσχέτιση της μέγιστης διατμητικής τάσης (τ_{max}) με το ανηγμένο $E_{\text{fiber}}/E_{\text{GFRP}}$ για διαφορετικά ποσοστά προέντασης, για 20MPa και 30MPa διατμητική αντοχή διεπιφάνειας.

Στην Εικόνα 35, Εικόνα 36 και Εικόνα 37 επεκτείνεται η ανάλυση από την Εικόνα 29, καθώς αποτυπώνεται η επίδραση της προέντασης της ίνας στις τιμές της παραμόρφωσης στον x άξονα, τον άξονα δηλαδή της φόρτισης και της ίνας.

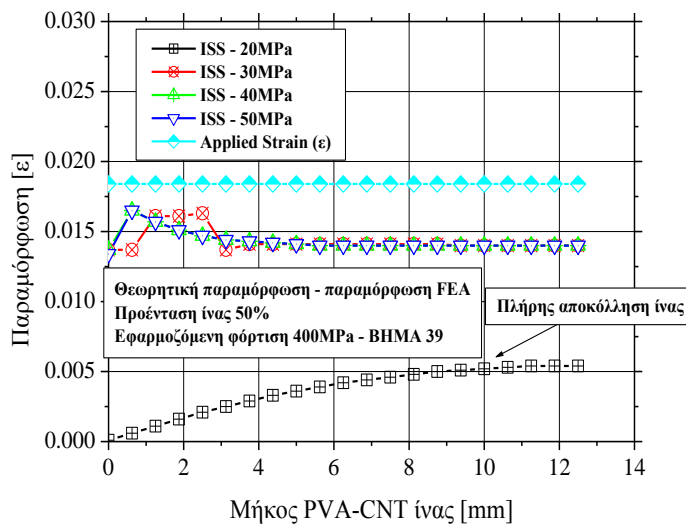
Προένταση 50%



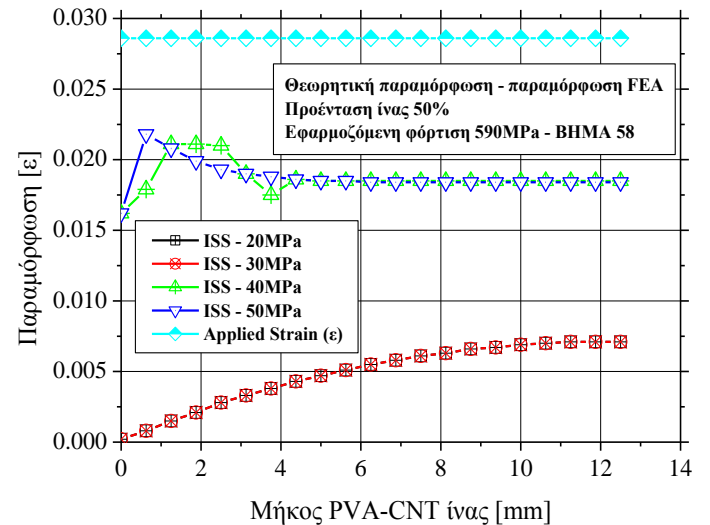
(α)



(β)



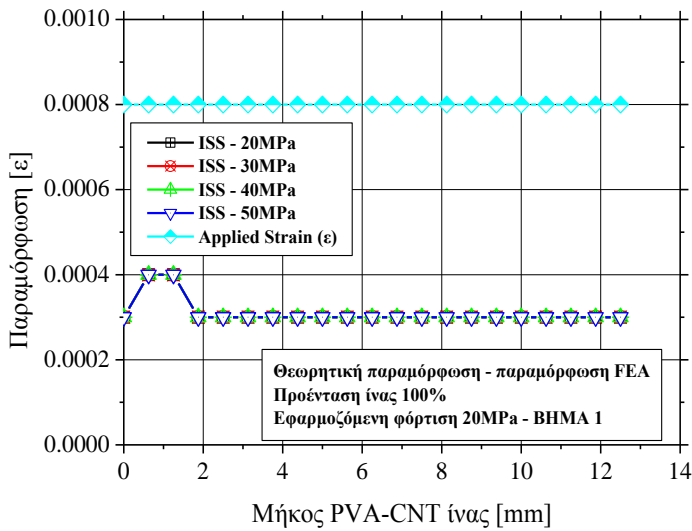
(γ)



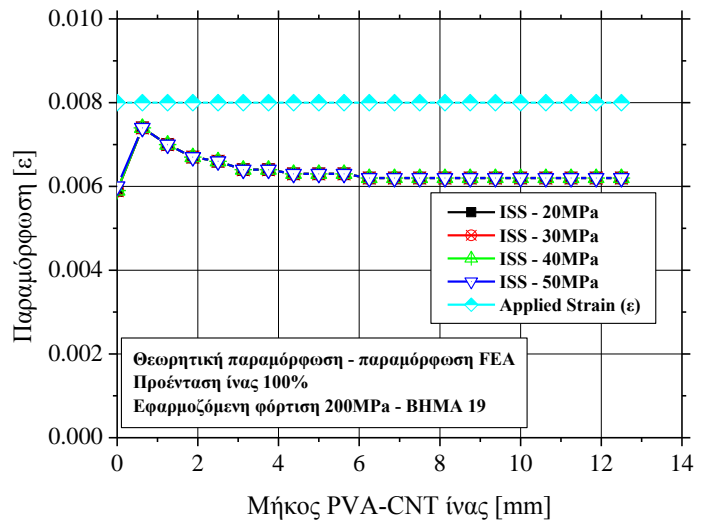
(δ)

Εικόνα 35: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής, για 50% προένταση της ίνας.

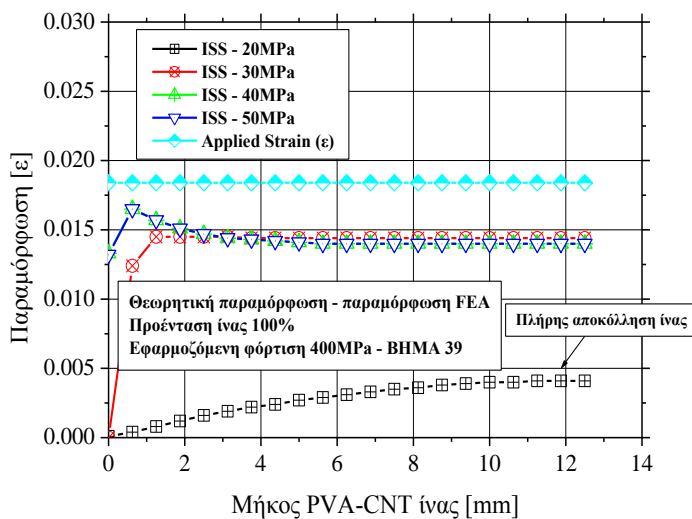
Προένταση 100%



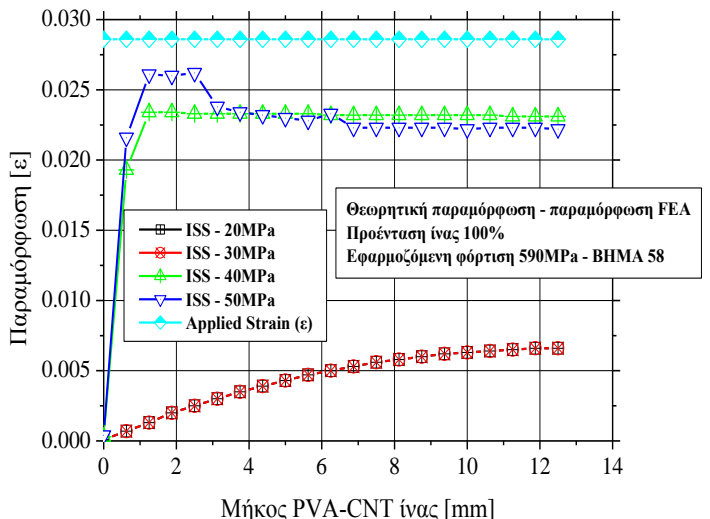
(α)



(β)



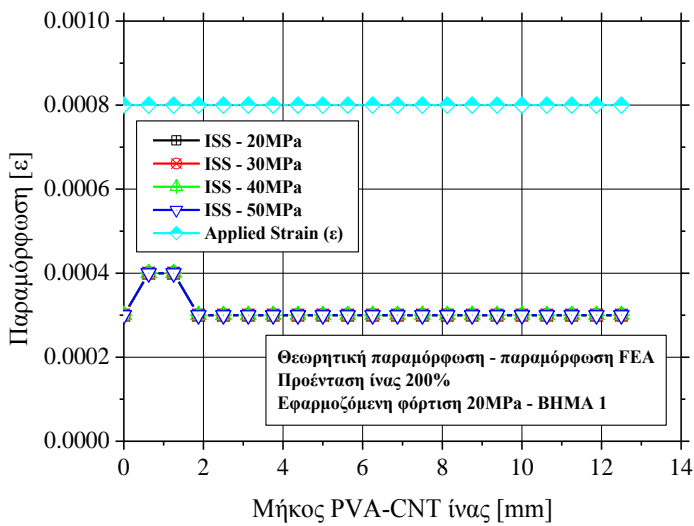
(γ)



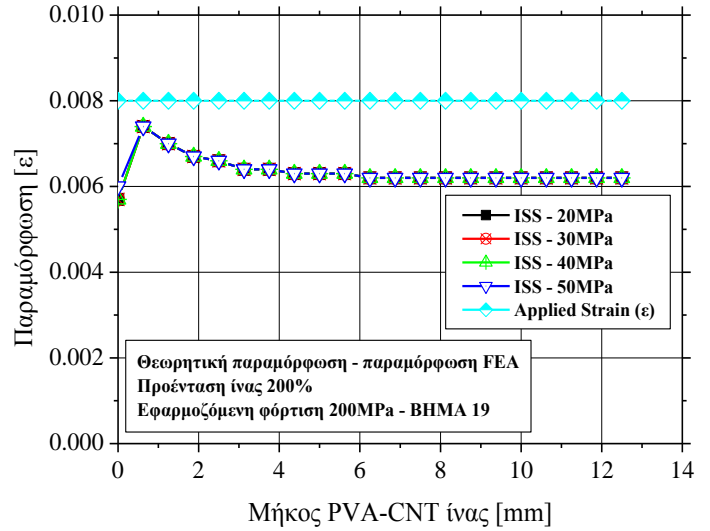
(δ)

Εικόνα 36: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής, για 100% προένταση της ίνας.

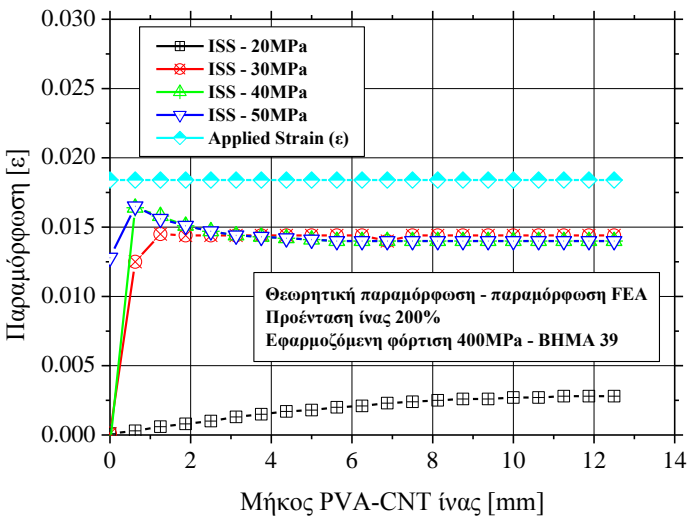
Προένταση 200%



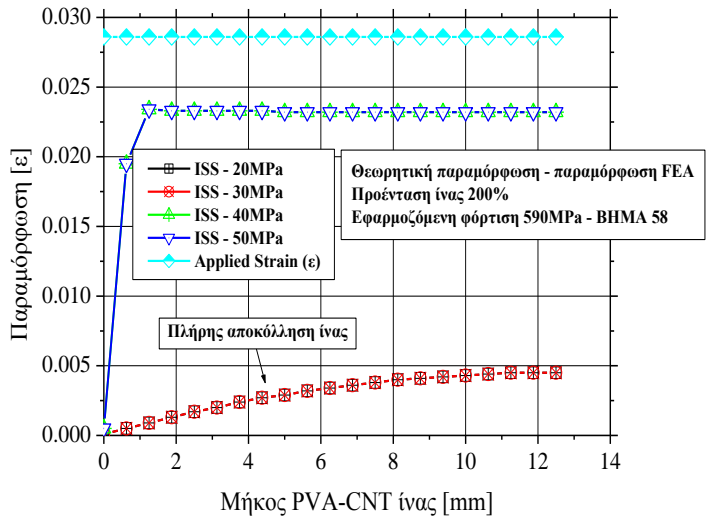
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 37: Συσχέτιση της θεωρητικής τιμής παραμόρφωσης ϵ με τις τιμές από την ανάλυση με ΠΣ για διαφορετικές τιμές διατμητικής αντοχής, για 50% προένταση της ίνας.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται πολύ μικρή αλλαγή στην παραμόρφωση της ίνας σε σχέση με την untreated ίνα. Επίσης οι τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης κατά μήκος της ίνας μετά την αποκόλληση της, παρατηρούνται ότι είναι σχεδόν ίδιες για τους τρεις διαφορετικούς λόγους προέντασης.

4.3.5 Ποκνότητα διακριτοποίησης

Για τη δημιουργία του πλέγματος της συνολικής δομής επιλέχθηκε ελεύθερη διακριτοποίηση (free mesh pattern). Η πυκνότητα της διακριτοποίησης όπως

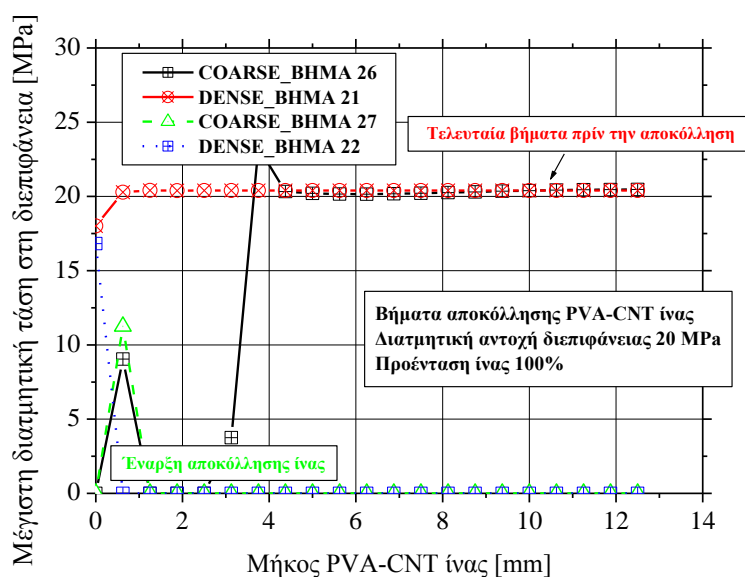
προαναφέρθηκε επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης της δομής καθώς και το χρόνο και την ακρίβεια της λύσης. Παρακάτω παρατίθεται για την περίπτωση 100% προέντασης των ιών και διατμητικής αντοχής 30MPa ο αριθμός των κόμβων και πεπερασμένων στοιχείων στα οποία χωρίστηκε η συνολική δομή κατά την προσομοίωση–Πίνακας 5.

Πίνακας 5: Δεδομένα διακριτοποίησης.

Πυκνότητα διακριτοποίησης	τ_{ISS}	Ποσοστό προέντασης ίνας	Αριθμός κόμβων	Αριθμός στοιχείων
Χαμηλή	30MPa	100%	12.603	6800

Η Εικόνα 38 απεικονίζει την κατανομή των μέγιστων διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια ίνας PVA-CNT/συνθέτου ακριβώς κατά την αποκόλληση της ίνας PVA-CNT από τη μήτρα για την περίπτωση ίνας με προ-ένταση 50% και διεπιφανειακή διατμητική αντοχή 20MPa υιοθετώντας δύο διαφορετικούς τύπους διακριτοποίησης: μια πυκνότερη και μια πιο αραιή. Με τον όρο coarse συμβολίζεται η πιο αραιή διακριτοποίηση και με τον όρο dense η πιο πυκνή.

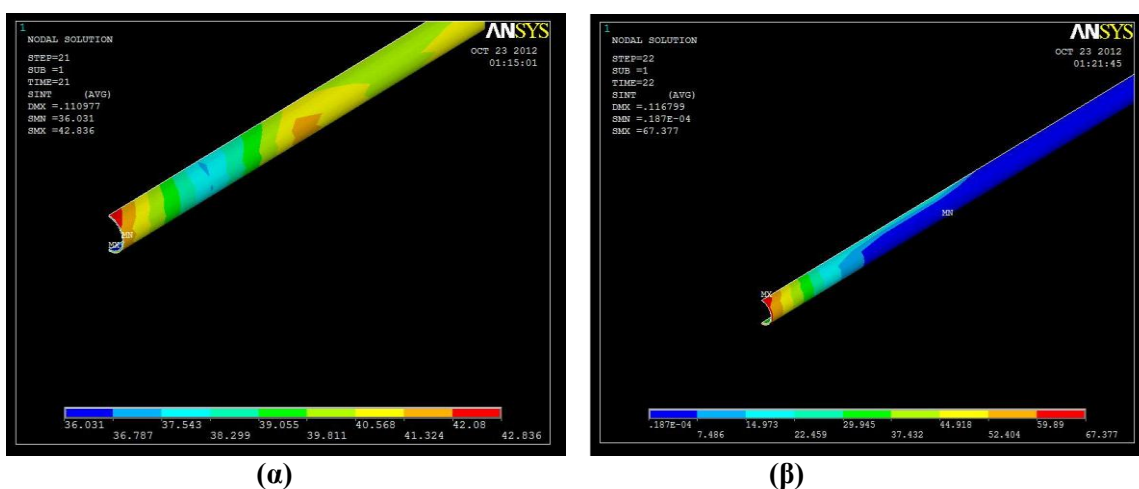
Είναι φανερό ότι η αποκόλληση της ίνας από το σύνθετο ξεκινάει σε νωρίτερο στάδιο φόρτισης, όταν χρησιμοποιούμε ένα πυκνότερο πλέγμα απ'ότι ένα αραιότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς προκύπτουν περισσότερα στοιχεία σε ένα πυκνότερο πλέγμα και τα κριτήρια αστοχίας αφορούν κάθε στοιχείο η κατανομή των τάσεων θα επιμερίζεται σε κάθε στοιχείο αναλυτικά. Έτσι οι τάσεις δε θα επιμερίζονται με τη μορφή μέσων τιμών σε μια περιοχή στοιχείων αλλά σε κάθε στοιχείο, οπότε και εύλογο είναι να παραβιαστεί πιο εύκολα και πιο γρήγορα κάποιο από τα κριτήρια αστοχίας των εξισώσεων (9), (10).



Εικόνα 38: Επίδραση της πυκνότητας διακριτοποίησης στην κατανομή διατμητικών τάσεων (τ_{max}) μεταξύ PVA-CNT ίνας και πολυμερικής μήτρας κατά την προένταση 100% της ίνας, για διατμητική αντοχή 20MPa.

Η περίπτωση του παραπάνω διαγράμματος απεικονίζεται και στην επιφάνεια της ίνας - Εικόνα 39. Είναι εμφανή τα δυο στάδια φόρτισης στα οποία ολοκληρώνεται η αποκόλληση της ίνας. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι οι τιμές της διατμητικής

τάσεις είναι μέγιστες στο άκρο της διεπιφάνειας και η αποκόλληση της ίνας ξεκινάει από εκεί. Επιπρόσθετα στο τελευταίο στάδιο φόρτισης στη διεπιφάνεια, οι αναπτύσσοντες τάσεις είναι λίγο μεγαλύτερες από τη διατμητική αντοχή. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 39 (α) η κόκκινη περιοχή έχει τιμή 42.08MPa που συμβολίζει την ιδιότητα stress integrity και σύμφωνα με την εξίσωση (8) η μέγιστη διατμητική τάση έχει ακριβώς την υποδιπλάσια τιμή, δηλαδή 21.08MPa. Αντίθετα στην Εικόνα 39 (β) η ίνα έχει ξεκολλήσει από το σύνθετο, κάτι που είναι ευδιάκριτο και από την κατανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια (μπλέ χρώμα) και έχουν μείνει κάποιες παραμένουσες τάσεις στο άκρο της διεπιφάνειας.



Εικόνα 39: Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια, (α) πριν και (β) μετά την αποκόλληση της ίνας PVA-CNT.

5. Αξιολόγηση υβριδικού συνθέτου υλικού μέσω πειραματικής διαδικασίας & μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μια ανάλυση των πειραμάτων που έχουν εκπονηθεί στα δοκίμια του συνθέτου GFRP με ενσωματωμένη τη νανοϊνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT fiber) ως αισθητήρα [88], καθώς και θα πραγματοποιηθεί και μια σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ).

5.1 Δοκιμές μηχανικής καταπόνησης στα υβριδικά σύνθετα

Σε προηγούμενη μελέτη, δοκίμια εφελκυσμού είχαν κοπεί από τις πλάκες GFRP σύμφωνα με την Προδιαγραφή ASTM D3039, για τις ανάγκες των πειραμάτων εφελκυσμού. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν: 250 mm μήκος και 25 mm πλάτος. Η ενσωματωμένη ίνα PVA-CNT είχε μήκος 25mm και είναι τοποθετημένη στους 90° στο κέντρο του δοκιμίου.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοτονικού εφελκυσμού με αυξανόμενο εφελκυστικό φορτίο μέχρι την αστοχία του συνθέτου υλικού [88]. Παρακάτω θα αναλυθούν τα επιμέρους στοιχεία των πειραμάτων του εφελκυσμού.

Μονοτονικός εφελκυσμός μέχρι την αστοχία του σύνθετου υλικού

Για τις ανάγκες του πειράματος εφελκυσμού είχε χρησιμοποιηθεί μια σερβο-υδραυλική μηχανή Instron MTS 100 KN. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης στο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ένα αξονικό επιμηκυσσιόμετρο τύπου Instron 2670 με μήκος μέτρησης (gauge length) τα 50mm. Το επιμηκυσσιόμετρο είχε τοποθετηθεί στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού και πολύ κοντά στην ενσωματωμένη PVA-CNT ίνα. Επίσης είχε προσκολληθεί στην αντίθετη επιφάνεια του δοκιμίου μια εξωτερική ροζέτα (strain gage) για την ακριβή μέτρηση της παραμόρφωσης.

Προκειμένου να αποκτήσουμε περαιτέρω πληροφορίες για τη δομική ακεραιότητα του δοκιμίου, χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μια διαμόρφωση που να παρακολουθεί την ηλεκτρική απόκριση του δοκιμίου σε ενδεχόμενη μηχανική καταπόνηση. Έτσι λοιπόν τοποθετήθηκαν δυο καλώδια στην επιφάνεια του δοκιμίου

και συγκεκριμένα στα δύο άκρα της ίνας. Τα δυο καλώδια συνδέθηκαν με ένα πολύμετρο τύπου Agilent και η αρχική ηλεκτρική αντίσταση μετρήθηκε στα δύο αυτά σημεία. Μια τάση DC της τάξεως των 10 V εφαρμόστηκε στα καλώδια έτσι ώστε να υπολογιστεί η ηλεκτρική αντίσταση μέσω των τιμών της ισχύος του ηλεκτρικού ρεύματος (εξίσωση 11) που θα επέστρεφε το πολύμετρο.

$$R = \frac{V}{I} \quad (11)$$

όπου ως R συμβολίζεται η αντίσταση που υπολογίζουμε ότι εμφανίζει η PVA-CNT ίνα, V η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού ή τάση στα καλώδια και I η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την PVA-CNT ίνα.

Αυτή λοιπόν η διαμόρφωση επιτρέπει τη συσχέτιση των τιμών της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης στην επιφάνεια του δοκιμίου με τις τιμές της παραμόρφωσης που θα παίρνουμε από τα επιμηκύνσιόμετρα.

Η μηχανική καταπόνηση πραγματοποιήθηκε με ένα σταθερό ρυθμό μετατόπισης από τις αρπάγες στα 0,5 mm/λεπτό. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν ήταν: (α) ο χρόνος, η μετατόπιση και το επιβαλλόμενο φορτίο, (β) η παραμόρφωση όπως καταγράφηκε από το επιμηκύνσιόμετρο, (γ) η παραμόρφωση όπως καταγράφηκε από την εξωτερική ροζέτα (strain gage) και τέλος (δ) η ηλεκτρική αντίσταση από το πολύμετρο τύπου Agilent.

5.2 Αποτελέσματα πειραματικών διαδικασιών

Μονοτονικός εφελκυσμός μέχρι την αστοχία του σύνθετου υλικού

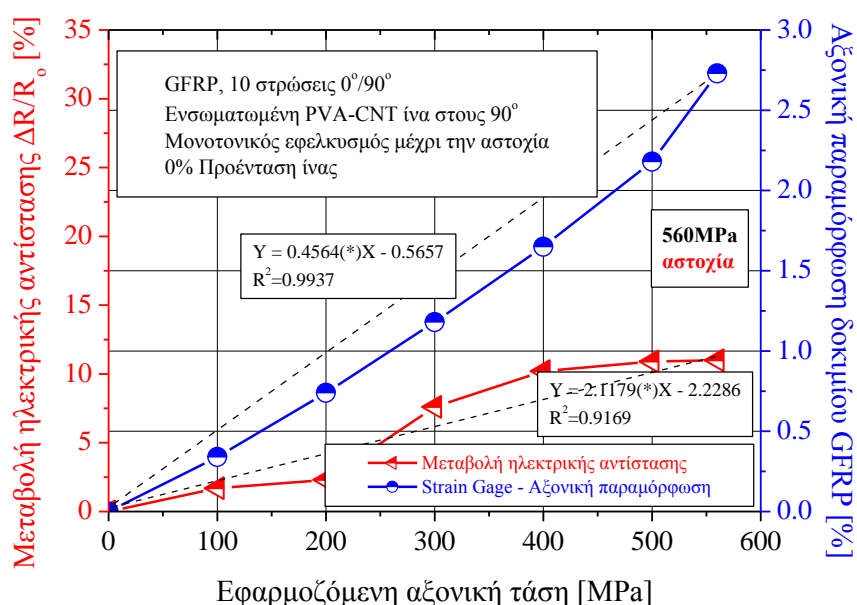
Τα αποτελέσματα της μονοτονικής εφελκυστικής καταπόνησης μέχρι την αστοχία του υβριδικού συνθέτου με ενσωματωμένη την PVA-CNT ίνα παρουσιάζονται στην Εικόνα 41[88]. Συγκεκριμένα απεικονίζεται η συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης με την παραμόρφωση του δοκιμίου GFRP. Στην ενσωματωμένη ίνα δεν έχει ασκηθεί προένταση και η μέτρηση της παραμόρφωσης - όπως προαναφέρθηκε- πραγματοποιήθηκε μέσω ενός strain gage.

Είναι φανερό ότι με την επιβολή σταδιακά αυξανόμενης μηχανικής φόρτισης, αυξάνεται ταυτόχρονα η παραμόρφωση αλλά και η μεταβολή της ηλεκτρικής

αντίστασης του συνθέτου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για 500MPa επιβαλλόμενης τάσης συναντάμε 9.2% αύξηση στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με την τιμή της στα 100MPa. Επίσης παρατηρείται ότι η παραμόρφωση θραύσης (elongation at fracture - $\varepsilon_{\text{fracture}}$) όπως προκύπτει από τα διαγράμματα προσεγγίζει το 3%, που θεωρήθηκε στη μοντελοποίηση.

Οι καμπύλες της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης και της αξονικής παραμόρφωσης παρουσιάζουν πολύ υψηλές συσχετίσεις (σχεδόν γραμμικές) με την εφαρμοζόμενη τάση και συγκεκριμένα ($R^2 = 0.9169$) και ($R^2 = 0.9937$) αντίστοιχα.

Συνεπώς επαληθεύεται η υπόθεση ότι η PVA-CNT ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας βλάβης στο εσωτερικό του συνθέτου, υπό επιβαλλόμενη μηχανική φόρτιση.



Εικόνα 40: Συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης και της παραμόρφωσης του δοκιμίου GFRP κατά τον μονοτονικό εφελκυσμό μέχρι την αστοχία για ίνα χωρίς προένταση - με βάση τη πειραματική διάταξη [88].

Εκτός από το σύνθετο υλικό, η περιοχή που μας ενδιαφέρει περισσότερο είναι η ενσωματωμένη ίνα. Έτσι λοιπόν είναι αρκετά σημαντικό να αποτυπωθεί η επίδραση της προέντασης της ίνας στις τιμές της παραμόρφωσης και ηλεκτρικής αντίστασης, όπως προέκυψαν από τα πειράματα.

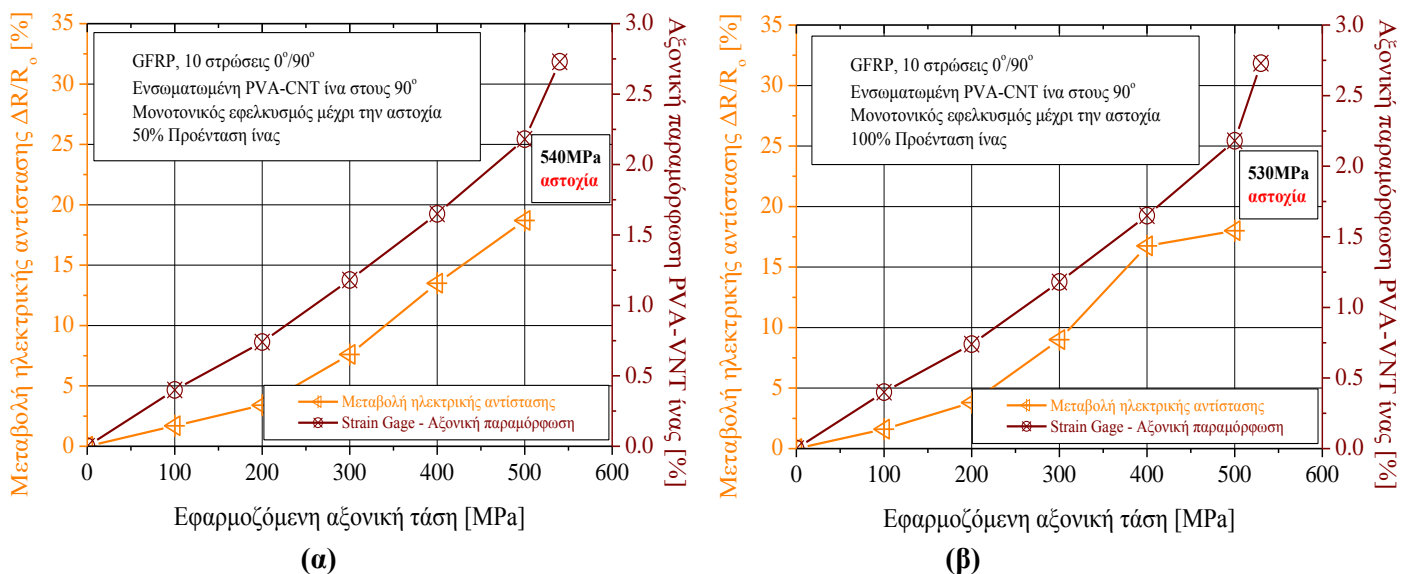
Επίδραση της Προέντασης της Ίνας

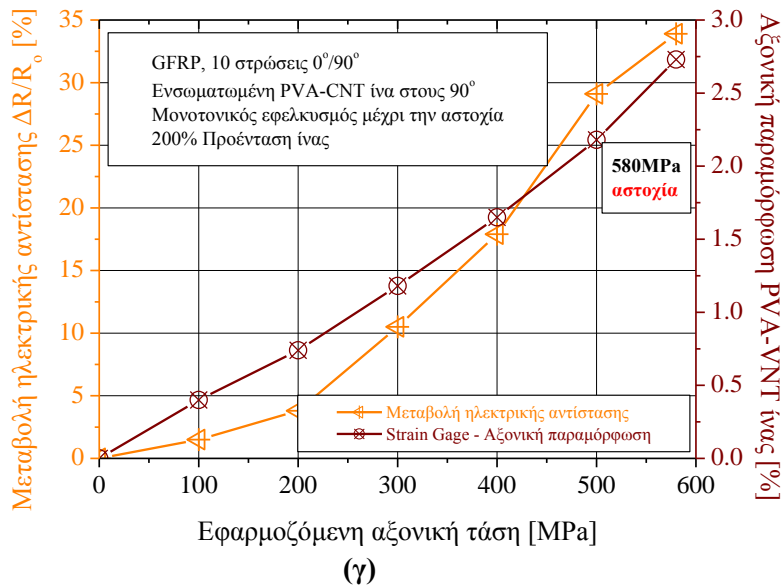
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της προέντασης της PVA-CNT ίνας, στις τιμές παραμόρφωσης και μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασής της, όπως προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες - Εικόνα 41.

Είναι εμφανές ότι ο αυξανόμενος λόγος προέντασης οδηγεί στην αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης. Συγκεκριμένα για την περίπτωση της 100% προέντασης της ίνας παρατηρείται 64% μεγαλύτερη μεταβολή της αντίστασης στα 400MPa από την αντίστοιχη τιμή τάσης για ίνα χωρίς προένταση.

Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι λόγω του εφελκυσμού οι νανοσωληνικές άνθρακα (carbon nanotubes) -που περιέχει η μήτρα της PVA-CNT ίνας- ευθυγραμμίζονται με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερα σημεία επαφής και έτσι τα αγώγιμα μονοπάτια -για να περάσει το ηλεκτρικό ρεύμα- λιγοστεύουν.

Από την άλλη πλευρά όμως, είναι φανερό ότι η προένταση έχει πολύ μικρή επίδραση στην παραμόρφωση της ίνας, όταν η τελευταία είναι ενσωματωμένη στο εσωτερικό του συνθέτου, όπως αποδείχθηκε και με τη χρήση ΠΣ στην παράγραφο 4.3.4.





Εικόνα 41: Μεταβολή της ηλεκτρικής απόκρισης και της παραμόρφωσης της PVA-CNT ίνας κατά τον μονοτονικό εφέλκυσμό με αυξανόμενη φόρτιση για διαφορετικούς βαθμούς προέντασης της ίνας με βάση τη πειραματική διάταξη [88].

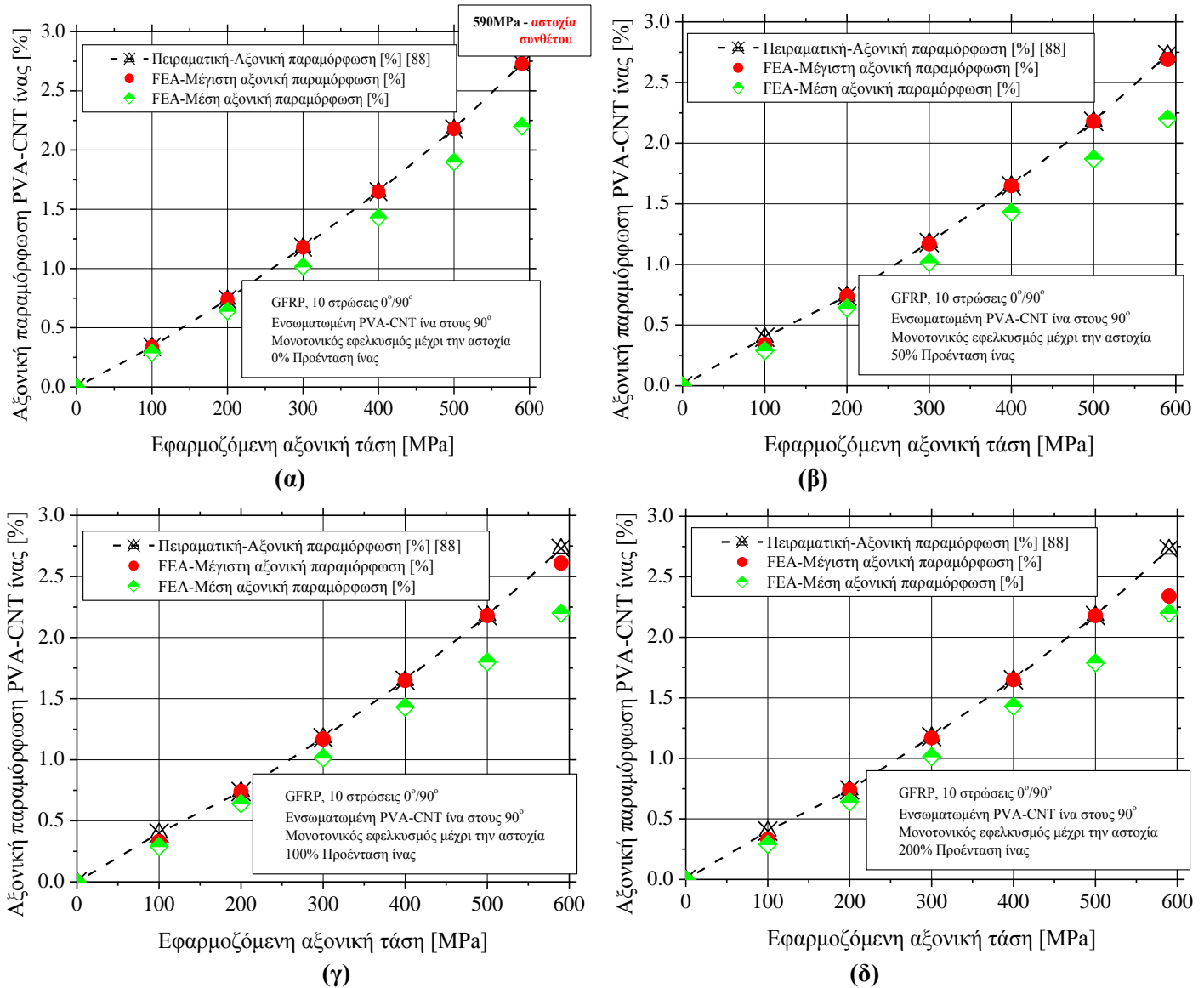
5.3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ)

Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί μια σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της μεθόδου των ΠΣ. Ο σκοπός είναι οι τιμές που παίρνουμε από την προσομοίωση με ΠΣ να προσεγγίσουν τις πειραματικές τιμές για την παραμόρφωση της ενσωματωμένης ίνας στο σύνθετο, αλλά και η ίνα να προσεγγίζει την παραμορφωσιακή συμπεριφορά του συνθέτου καθώς λειτουργεί ως αισθητήρας κατά τη μηχανική φόρτιση του συνθέτου.

Στην Εικόνα 42 παρατίθεται η συσχέτιση ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις της παραμόρφωσης της ενσωματωμένης PVA-CNT ίνας (Εικόνα 40 και Εικόνα 41) αλλά και τις τιμές που προκύπτουν από τα ΠΣ για τη μέση και μέγιστη παραμόρφωση κατά μήκος της ίνας. Η μέση τιμή παραμόρφωσης προκύπτει από το μέσο όρο των τιμών παραμόρφωσης κατά μήκος της ίνας, ενώ από την άλλη η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης προκύπτει από το σημείο της ίνας που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης.

Οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης κατά μήκος της ίνας προσομοιώνουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια την παραμορφωσιακή συμπεριφορά του συνθέτου, και σαφέστατα

με πιο επαρκή τρόπο απ'ότι οι μέσες τιμές παραμόρφωσης κατά μήκος της ίνας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης πρόκύπτει στο άκρο της ίνας, κάτι που είναι ορθό καθώς από εκεί ξεκινάει η αποκόλληση της ίνας PVA-CNT.



Εικόνα 42: Συσχέτιση της μέσης και μέγιστης παραμόρφωσης της ίνας PVA-CNT, όπως προκύπτει από τη μέθοδο των ΠΣ - με τις πειραματικές τιμές της παραμόρφωσης κατά τον μονοτονικό εφελκυσμό με αυξανόμενη φόρτιση για διαφορετικούς βαθμούς προέντασης της.

Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο ΠΣ επαλήθευσε με μεγάλη ακρίβεια τις πειραματικές μετρήσεις που αφορούν την παραμορφωσιακή συμπεριφορά της ενσωματωμένης PVA-CNT ίνας στο εσωτερικό του συνθέτου υλικού.

Επίσης αποδείχθηκε ότι οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης -όπως προκύπτουν από τη μέθοδο των ΠΣ- προσομοιώνουν καλύτερα την παραμορφωσιακή συμπεριφορά της ίνας και του συνθέτου απ'ότι οι τιμές της μέσης παραμόρφωσης.

6. Συμπεράσματα

- Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων για τη μοντελοποίηση συνθέτου υλικού οπλισμένου με ίνες υάλου (GFRP) με ενσωματωμένη νανοίνα άνθρακα/πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA-CNT) για τη μελέτη διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν την κατανομή των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια ίνας PVA-CNT και πολυμερικής μήτρας καθώς και το φαινόμενο αποκόλλησης της από το σύνθετο.
- Στη συνολική δομή εφαρμόστηκε μονοτονικός εφελκυσμός μέχρι την αστοχία του σύνθετου υλικού σε διαφορετικά στάδια φόρτισης, όπου το πρόβλημα προϋπέθεται δυναμική ανάλυση.
- Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Προοδευτικής Βλάβης με σκοπό την ανάλυση της επίλυσης σε τρεις συνιστώσες: (α) ανάλυση τάσεων, (β) ανάλυση αστοχίας και (γ) υποβάθμιση ιδιοτήτων του υλικού.
- Διερευνήθηκαν οι επιδράσεις πέντε παραμέτρων στο πρόβλημα: (1) της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας, (2) του πάχους της διεπιφάνειας, (3) του μέτρου ελαστικότητας της διεπιφάνειας, (4) του διαφορετικού βαθμού προέντασης της PVA-CNT ίνας και (5) της πυκνότητας διακριτοποίησης.
- Η μεγαλύτερη διατμητική αντοχή επιτρέπει την αποτελεσματικότερη μεταφορά φορτίων από τη μήτρα στο ενισχυτικό μέσο (PVA-CNT ίνα) και συντελεί στο να πραγματοποιείται η αποκόλληση της ίνας από το σύνθετο σε μεγαλύτερο στάδιο φόρτισης.
- Το μεγαλύτερο πάχος διεπιφάνειας δεν επηρεάζει το στάδιο φόρτισης στο οποίο συμβαίνει η αποκόλληση της ίνας. Από την άλλη πλευρά όμως, το μικρότερο πάχος διεπιφάνειας οδηγεί σε μικρή αύξηση των τιμών των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια.
- Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της διεπιφάνειας οδηγεί στην πρόωρη αποκόλληση της ίνας. Επίσης η μεγαλύτερη διατμητική αντοχή σε συνδυασμό με το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας της διεπιφάνειας οδηγεί σε ενίσχυση

της πρόσφυσης της PVA-CNT ίνας με το σύνθετο και όπως είναι φυσικό η αποκόλληση της ίνας να πραγματοποιείται σε μεταγενέστερο στάδιο φόρτισης.

- Το μεγαλύτερο ποσοστό προέντασης της ίνας ενισχύει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας, και πειραματικά έχει αποδειχθεί ο αυξανόμενος λόγος προέντασης οδηγεί στην αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης, κατά την επιβολή μηχανικής φόρτισης. Από την άλλη πλευρά η παραμόρφωση της ενσωματωμένης PVA-CNT ίνας δεν επηρεάζεται από το λόγο προέντασης.
- Η μοντελοποίηση με μεγαλύτερη πυκνότητα διακριτοποίησης φανέρωσε ότι η αποκόλληση της μήτρας συμβαίνει σε μικρότερο στάδιο φόρτισης απ'ότι στη μοντελοποίηση με πιο αραιή πυκνότητα πλέγματος.
- Τέλος, οι πειραματικές μετρήσεις που αφορούν την παραμορφωσιακή συμπεριφορά της ενσωματωμένης PVA-CNT ίνας στο εσωτερικό του συνθέτου υλικού επαληθεύονται με μεγάλη ακρίβεια από τις αντίστοιχες τιμές της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ). Συγκεκριμένα οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης κατά μήκος της PVA-CNT ίνας -από τη μέθοδο ΠΣ- είναι αυτές που προσομοιώνουν καλύτερα την παραμορφωσιακή συμπεριφορά της ίνας στο εσωτερικό του συνθέτου, καθώς η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης πρόκειται στο άκρο της ίνας.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Z. Gürdal, R.T. Haftka and P. Hajela, ‘Design and optimization of laminated composite materials’, John Wiley, 1999.
- [2] J.G. Teng, T. Yu and D. Fernando, ‘Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites’, *Journal of Constructional Steel Research*, **78**, 131–143, 2012.
- [3] J.C. Abry, Y.K. Choi, A. Chateauinois, B. Dalloz, G. Giraud and M. Salvia, ‘In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements’, *Composites Science and Technology*, **61**, 855-864, 2001.
- [4] K. Schulte and C. Baron, ‘Load and Failure Analyses of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistivity Measurements’, *Composites Science and Technology*, **36**, 349-356, 1989.
- [5] J.C. Abry, S. Bochara, A. Chateauinois, M. Salvia and G. Giraud, ‘In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements’, *Composites Science and Technology*, **59**, 925-935, 1999.
- [6] M. Kupke, K. Schulte and R. Schüller, ‘Non-destructive testing of FRP by d.c. and a.c. electrical methods’, *Composites Science and Technology*, **61**, 837-847, 2001.
- [7] X. Wang, S. Wang and D.D.L.Chung, ‘Sensing damage in carbon fiber and its polymer-matrix and carbon-matrix composites by electrical resistance measurement’, *Journal of Materials Science*, **34**, 2703 – 2713, 1999.
- [8] D.H. Seo, J.J. Lee, ‘Damage detection of CFRP laminates using electrical resistance measurement and neural network’, *Composite Structures*, **47**, 525-530, 1999.
- [9] A. Todoroki and Y. Tanaka, ‘Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method’, *Composites Science and Technology*, **62**, 629–639, 2002.
- [10] A. Todoroki, Y. Tanaka and Y. Shimamura, ‘Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method’, *Composites Science and Technology*, **62**, 619–628, 2002.
- [11] A. Todoroki, K. Omagari, Y. Shimamura and H. Kobayashi, ‘Matrix crack detection of CFRP using electrical resistance change with integrated surface probes’, *Composites Science and Technology*, **66**, 1539–1545, 2006.

- [12] M.H.G. Wichmann, S.T. Buschhorn, L. Böger, R. Adelung and K. Schulte, ‘Direction sensitive bending sensors based on multi-wall carbon nanotube/epoxy nanocomposites’, *Nanotechnology*, **19**, 475-503, 2008.
- [13] J. Rams, M. Sánchez, A. Ureña, A. Jiménez-Suárez, M. Campo and A. Güemes, ‘Use of carbon nanotubes for strain and damage sensing of epoxy-based composites’, *International Journal of Smart and Nano Materials*, **3**, 152–161, 2012.
- [14] L. Gao, E.T. Thostenson, Z. Zhang and T.W. Chou, ‘Sensing of Damage Mechanisms in Fiber-Reinforced Composites under Cyclic Loading using Carbon Nanotubes’, *Advanced Functional Materials*, **19**, 123–130, 2009.
- [15] E.T. Thostenson and T.W. Chou, ‘Carbon Nanotube Networks: Sensing of Distributed Strain and Damage for Life Prediction and Self Healing’, *Advanced Materials*, **18**, 2837–2841, 2006.
- [16] E.T. Thostenson and T.W. Chou, ‘Real-time in situ sensing of damage evolution in advanced fiber composites using carbon nanotube networks’, *Nanotechnology*, **19**, 2008.
- [17] J. Rausch and E. Mäder, ‘Health monitoring in continuous glass fibre reinforced thermoplastics: Manufacturing and application of interphase sensors based on carbon nanotubes’, *Composites Science and Technology*, **70**, 1589–1596, 2010.
- [18] L. Böger, M.H.G. Wichmann, L.O. Meyer and K. Schulte, ‘Load and health monitoring in glass fibre reinforced composites with an electrically conductive nanocomposite epoxy matrix’, *Composites Science and Technology*, **68**, 1886–1894, 2008.
- [19] J.N. Coleman, U. Khan, W.J. Blau and Y.K. Gun’ko, ‘Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites’, *Carbon*, **44**, 1624–1652, 2006.
- [20] E.T. Thostenson, Z. Ren and T.W. Chou, ‘Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review’, *Composites Science and Technology*, **61**, 1899-1912, 2001.
- [21] V.N. Popov, ‘Carbon nanotubes: properties and application’, *Materials Science and Engineering*, **43**, 61–102, 2004.
- [22] M.M.J. Treacy, T.W. Ebbesen and J.M. Gibson, ‘Exceptionally high Young’s modulus observed for individual carbon nanotubes’, *Nature*, **381**, 678–680, 1996.
- [23] O. Lourie and H.D. Wagner, ‘Evaluation of Young’s modulus of carbon nanotubes by micro-Raman spectroscopy’, *Journal of Materials Research*, **13**, 2418–22, 1998.
- [24] C. Li and T.W. Chou, ‘A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes’, *International Journal of Solids and Structures*, **40**, 2487–2499, 2003.

- [25] K. Koziol, J. Vilatela, A. Moisala, M. Motta, P. Cunniff, M. Sennett and A. Windle, ‘High-Performance Carbon Nanotube Fiber’, *Science*, **318**, 1892-1895, 2007.
- [26] X. Zhang, , Q. Li, T.G. Holesinger, P.N. Arendt, J. Huang, P.D. Kirven, T.G. Clapp, R.F. DePaula, X. Liao, Y. Zhao, L. Zheng, D.E. Peterson and Y. Zhu, ‘Ultrastrong, stiff, and lightweight carbon-nanotube fibers’, *Advanced Materials*, **19**, 4198-4201, 2007.
- [27] K. Koziol, J. Vilatela, A. Moisala, M. Motta, P. Cunniff, M. Sennett and A. Windle, ‘High-performance carbon nanotube fiber’, *Science*, **318**, 1892-1895, 2007.
- [28] H.B. Zhao, Y.Y. Zhang, P.D. Bradford, Q. Zhou, Q.X. Jia, F.G Yuan and Y.T. Zhu, ‘Carbon Nanotube Yarn Strain Sensors’, *Nanotechnology*, **21**, 305502, 2010.
- [29] S. Fang, M. Zhang, A.A. Zakhidov and R.H. Baughman, ‘Structure and process-dependent properties of solid-state spun carbon nanotube yarns’, *Journal of Physics Condensed Matter*, **22**, 334221, 2010.
- [30] X. Zhang, Q. Li, Y. Tu, Y. Li, J.Y. Coulter, L. Zheng, Y. Zhao, Q. Jia, D.E. Peterson, and Y. Zhu, ‘Strong carbon-nanotube fibers spun from long carbon-nanotube arrays’, *Small*, **3**, 244-248, 2007.
- [31] U. Khan, K. Young, A. O'Neill and J.N. Coleman, ‘High strength composite fibres from polyester filled with nanotubes and graphene’, *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 12907-12914, 2012.
- [32] M. Naraghi, T. Filleter, A. Moravsky, M. Locascio, R.O. Loutfy and H.D. Espinosa, ‘A Multiscale Study of High Performance Double-Walled Nanotube–Polymer Fibers’, *ACS Nano*, **4**, 6463–6476, 2010.
- [33] B. Vigolo, A. Pénicaud, C. Coulon, C. Sauder, R. Pailler, C. Journet, B. Patrick and P. Philippe, ‘Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes’, *Science*, **290**, 1331-1334, 2000.
- [34] P. Poulin, B. Vigolo and P. Launois, ‘Films and fibers of oriented single wall nanotubes’, *Carbon*, **40**, 1741-1749, 2002.
- [35] K. Liu, Y.H. Sun, X.Y. Lin, R.F. Zhou, J.P. Wang, S.S. Fan and K.L. Jiang, “Scratch-resistant, highly conductive, and high-strength carbon nanotube-based composite yarns”, *ACS Nano*, **4**, 5827–5834, 2010.
- [36] H.L. Cox, ‘The elasticity and strength of paper and other fibrous materials’, *British Journal of Applied Physics*, **3**, 72–79, 1952.
- [37] C. Galiotis, ‘A study of mechanisms of stress transfer in continuous- and discontinuous-fibre model composites by laser Raman spectroscopy’, *Composites Science and Technology*, **48**, 15-28, 1993.

- [38] B.W. Rosen, 'Tensile Failure of Fibrous Composites', *AIAA Journal*, **2**, 1985-1991, 1964.
- [39] J.P. Favre and M.C. Merienne, 'Characterization of fibre/resin bonding in composites using a pull-out test', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **1**, 311-316, 1981.
- [40] C. Marieta, E. Schulz, L. Irusta, N. Gabilondo, A. Tercjak and I. Mondragon, 'Evaluation of fiber surface treatment and toughening of thermoset matrix on the interfacial behaviour of carbon fiber-reinforced cyanate matrix composites', *Composites Science and Technology*, **65**, 2189-2197, 2005.
- [41] M.R. Piggot, 'Failure processes in the fibre-polymer interface', *Composites Science and Technology*, **42**, 57-76, 1991.
- [42] B. Miller, P. Muri and L. Rebenfeld, 'A microbond method for determination of the shear strength of a fiber/resin interface', *Composites Science and Technology*, **28**, 17-32, 1987.
- [43] E.J.H. Chen and J.C. Young, 'The microdebonding testing system: A method of quantifying adhesion in real composites', *Composites Science and Technology*, **42**, 189-206, 1991.
- [44] X.L. Gao and K. Li, 'A shear-lag model for carbon nanotube-reinforced polymer composites', *International Journal of Solids and Structures*, **42**, 1649-1667, 2005.
- [45] A. Haque and A. Ramasetty, 'Theoretical study of stress transfer in carbon nanotube-reinforced polymer matrix composites', *Composite Structures*, **71**, 68-77, 2005.
- [46] M.M. Shokrieh and R. Rafiee, 'Investigation of nanotube length effect on the reinforcement efficiency in carbon nanotube based composites', *Composite Structures*, **92**, 2415-2420, 2010.
- [47] H. Wan, F. Delale and L. Shen, 'Effect of CNT length and CNT-matrix interface in carbon nanotube (CNT) reinforced composites', *Mechanics Research Communications*, **32**, 481-489, 2005.
- [48] D. Luo, W-X. Wang and Y. Takao, 'Effects of the distribution and geometry of carbon nanotubes on the macroscopic stiffness and microscopic stresses of nanocomposites', *Composites Science and Technology*, **67**, 2947-2958, 2007.
- [49] A. Montazeri and R. Naghdabadi, 'Investigation of the Interface Effects on the Mechanical Behavior of Carbon Nanotube Polymer Composites by Multiscale Modeling', *Journal of Applied Polymer Science*, **117**, 361-367, 2010.
- [50] A. Montazeri, M. Sadeghia, R. Naghdabadi and H. Rafii-Tabar, 'Multiscale modeling of the effect of carbon nanotube orientation on the shear deformation properties of reinforced polymer-based composites', *Physics Letters A*, **375**, 1588-1597, 2011.

- [51] J. Tsai and T. Lu, ‘Investigating the load transfer efficiency in carbon nanotubes reinforced nanocomposites’, *Composite Structures*, **90**, 172–179, 2009.
- [52] K. Yazdchi and M. Salehi, ‘The effects of CNT waviness on interfacial stress transfer characteristics of CNT/polymer composites’, *Composites: Part A*, **42**, 1301–1309, 2011.
- [53] J. M. Wernik and S. A. Meguid, ‘Multiscale modeling of the nonlinear response of nano-reinforced polymers’, *Acta Mechanica*, **217**, 1–16, 2011.
- [54] K.I. Tserpes, P. Papanikos, G. Labeas and S.G. Pantelakis, ‘Multi-scale modeling of tensile behavior of carbon nanotube-reinforced composites’, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **49**, 51–60, 2008.
- [55] N Hu, H Fukunaga, C Lu, M Kameyama and B Yan, ‘Prediction of elastic properties of carbon nanotube reinforced composites’, *Proceedings of the Royal Society A*, **461**, 1685–1710, 2005.
- [56] L. S. Schadler, S. C. Giannaris, and P. M. Ajayan, ‘Load transfer in carbon nanotube epoxy composites’, *Applied Physics Letters*, **73**, 3842–3844, 1998.
- [57] C. Li and T.W. Chou, ‘Multiscale modeling of compressive behavior of carbon nanotube/polymer composites’, *Composites Science and Technology*, **66**, 2409–2414, 2006.
- [58] M. M. Shokrieh and R. Rafiee, ‘On the tensile behavior of an embedded carbon nanotube in polymer matrix with non-bonded interphase region’, *Composite Structures*, **92**, 647–652, 2010.
- [59] G.I. Giannopoulos, S.K. Georgantzinos and N.K. Anifantis, ‘A semi-continuum finite element approach to evaluate the Young’s modulus of single-walled carbon nanotube reinforced composites’, *Composites: Part B*, **41**, 594–601, 2010.
- [60] M. M. Shokrieh and R. Rafiee, ‘Prediction of mechanical properties of an embedded carbon nanotube in polymer matrix based on developing an equivalent long fiber’, *Mechanics Research Communications*, **37**, 235–240, 2010.
- [61] H. Golestanian and M. Shojaie, ‘Numerical characterization of CNT-based polymer composites considering interface effects’, *Computational Materials Science*, **50**, 731–736, 2010.
- [62] A. Needleman, T.L. Borders, L.C. Brinson, V.M. Flores and L.S. Schadler, ‘Effect of an interphase region on debonding of a CNT reinforced polymer composite’, *Composites Science and Technology*, **70**, 2207–2215, 2010.
- [63] A. Hernández-Pérez and F. Avilés, ‘Modeling the influence of interphase on the elastic properties of carbon nanotube composites’, *Computational Materials Science*, **47**, 926–933, 2010.

- [64] M.R. Ayatollahi, S. Shadlou and M.M. Shokrieh, 'Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading', *Composite Structures*, **93**, 2250–2259, 2011.
- [65] R. Rafiee, A. Fereidoon and M. Heidarhaei, 'Influence of non-bonded interphase on crack driving force in carbon nanotube reinforced polymer', *Computational Materials Science*, **56**, 25–28, 2012.
- [66] S. Kirtania and D. Chakraborty, 'Multi-scale modeling of carbon nanotube reinforced composites with a fiber break', *Materials and Design*, **35**, 498–504, 2012.
- [67] P. Miaudet, C. Bartholome, A. Derré, M. Maugey, G. Sigaud, C. Zakri and P. Poulin, 'Thermo-electrical properties of PVA–nanotube composite fibers', *Polymer*, **48**, 4068–4074, 2007.
- [68] P. Miaudet, S. Badaire, M. Maugey, A. Derré, V. Pichot, P. Launois, P. Poulin, and C. Zakri, 'Hot-Drawing of Single and Multiwall Carbon Nanotube Fibers for High Toughness and Alignment', *Nano Letters*, **5**, 2212–2215, 2005.
- [69] A.B. Dalton, S. Collins, E. Munoz, J.M. Razal, V.H. Ebron, J.P. Ferraris, J.N. Coleman and R.H. Baughman, 'Super-tough carbon-nanotube fibers', *Nature*, **423**, 703, 2010.
- [70] N. Behabtua, M.J. Greena and M. Pasquali, 'Carbon nanotube-based neat fibers', *Nano Today*, **3**, 24–34, 2008.
- [71] S. Badaire, V. Pichot, C. Zakri, P. Poulin, P. Launois, J. Vavro, C. Guthy, M. Chen and J. E. Fischer, 'Correlation of properties with preferred orientation in coagulated and stretch-aligned single-wall carbon nanotubes', *Journal of Applied Physics*, **96**, 7509–7513, 2004.
- [72] N.D. Alexopoulos, C. Bartholome, P. Poulin and Z. Marioli-Riga, 'Damage detection of glass fiber reinforced composites using embedded PVA–carbon nanotube (CNT) fibers', *Composites Science and Technology*, **70**, 1733–1741, 2010.
- [73] C.S. Desai and J.F. Abel, 'Introduction to the finite element method', *Van Nostrand Reinhold Company*, New York, 1972.
- [74] M. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin and L.J. Topp, 'Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures', *Journal of the Aeronautical Sciences*, **23**, 805–823, 1956.
- [75] E. Madenci, I. Guven, 'The Finite Element Method and applications in Engineering Using ANSYS', *Springer*, 2005.
- [76] J.P. Buckham, N. Dechev, 'Lecture Notes: Introduction to Finite Element Analysis (FEA) or Finite Element Method (FEM)' University of Victoria-Bradley, 2009.

- [77] Κ. Τσαμασφύρος, Ε.Ε. Θεοτόκογλου, 'Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων', *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ*, Αθήνα, 1994.
- [78] Y. Liu, 'Lecture Notes: Introduction to the Finite Element Method', University of Cincinnati, 2003.
- [79] P. McHugh, 'Non-Linear Finite Element Analysis: Finite Element Solution Schemes I & II, European Society of Biomechanics thematic workshop on Finite Element Modelling in Biomechanics and Mechanobiology', 2007.
- [80] ANSYS Manual, Version (12.0).
- [81] S.C. Chou, O. Orringer and J.H. Rainey, 'Post-failure behavior of laminates I-No stress concentration', *Journal of Composite Materials*, **10**, 371-381, 1976.
- [82] S.C. Chou, O. Orringer and J.H. Rainey, 'Post-failure behavior of laminates II-Stress concentration', *Journal of Composite Materials*, **11**, 71-78, 1976.
- [83] F.K. Chang and K.Y. Chang, 'A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations', *Journal of Composite Materials*, **21**, 834-855, 1987.
- [84] P.P. Camanho and F.L. Matthews, 'A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates', *Journal of Composite Materials*, **33**, 906-927, 2000.
- [85] J.M. Starbuck, C.R. Luttrell, and G. Aramayo, *Halliburton Composite Bridge Plug Assembly*, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL00-0601, 2005.
- [86] P. Papanikos, K.I. Tserpes and S. Pantelakis, 'Initiation and progression of composite patch debonding in adhesively repaired cracked metallic sheets', *Composite Structures*, **81** 303-311, 2007.
- [87] A. Selmia, C. Friebelb, I. Doghrib and H. Hassisa, 'Prediction of the elastic properties of single walled carbon nanotube reinforced polymers: A comparative study of several micromechanical models', *Composites Science and Technology*, **67**, 2071-2084, 2007.
- [88] N.D. Alexopoulos and P. Papanikos, 'Structural health monitoring of glass fiber reinforced composites using embedded fibers from PVA and carbon nanotubes', 2010.

Κατάσταση Διεθύνσεων Διαδικτύου

[WS1]- http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_intro.cfm

[WS2]- <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=978>

[WS3]- http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html

[WS4]- <http://www.lightweight.nl/>

- [WS5]- <http://materialdesigns.wordpress.com/2010/07/19/boeing-787-dreamliner-launched/>
- [WS6]- http://bintang.site11.com/Boeing_787/Boeing787_files/Specifications.html
- [WS7]- <http://www.inthehopper.org/energy/the-p-word-guess-which-material-shines-in-new-bmw-electric-hybrid-cars/>
- [WS8]- http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
- [WS9]- <http://www.ndt.net/article/remco/remco.htm>
- [WS10]- http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating
- [WS11]- <http://bostonpiezooptics.com/intro-to-transducer-crystals>
- [WS12]- http://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge
- [WS13]- <http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039/F1.expansion.html>

8. Ονοματολογία

Όλα τα σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση με Πεπερασμένα Στοιχεία και στη μέθοδο της Προοδευτικής Βλάβης παρουσιάζονται παρακάτω.

Μεταβλητές

μητρικής ανάλυσης

$\{F\} [-]$	Καθολικό διάνυσμα δυνάμεων
$[K] [-]$	Καθολικό μητρώο δυσκαμψίας
$\{U\} [-]$	Διάνυσμα κομβικών μετατοπίσεων
$k^{(e)} [-]$	Μητρώο δυσκαμψίας ενός στοιχείου
$f^{(e)} [-]$	Διάνυσμα δυνάμεων ενός στοιχείου

Μεταβλητές

προσομοίωσης ΠΣ

DF (μm)	Ακτίνα PVA-CNT ίνας
HL (μm)	Πάχος στρώσεως
W (mm)	Πλάτος δομής
L (mm)	Μήκος δομής
NL (-)	Αριθμός στρώσεων
t_{int} (μm)	Πάχος διεπιφάνειας
E_{int} (GPa)	Μέτρο ελαστικότητας Young της ισότροπης διεπιφάνειας
E_{fiber} (GPa)	Μέτρο ελαστικότητας Young της ισότροπης ίνας PVA-CNT

$E_{\text{GFRP-}i}$ (GPa)	Μέτρο ελαστικότητας Young του συνθέτου GFRP όπου i οι διευθύνσεις x, y ή z
G_i (GPa)	Μέτρο διάτμησης, όπου i οι διευθύνσεις x, y ή z
ν_{ij} (-)	Λόγος Poisson (εγκάρσια/διαμήκης παραμόρφωση), όπου i οι διευθύνσεις x, y ή z
τ_{max} (MPa)	Μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια PVA-CNT ίνας/συνθέτου
τ_{ISS} (MPa)	Διατμητική αντοχή διεπιφάνειας
σ_{max} (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση στη διεπιφάνεια
σ_{min} (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση στη διεπιφάνεια
ε_{FEA} (%)	Παραμόρφωση από μέθοδο ΠΣ για ένα συγκεκριμένο στάδιο φόρτισης
$\varepsilon_{\text{fracture}}$ (%)	Παραμόρφωση θραύσης