



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική Διερεύνηση Πανέλων ΜΟΜΑΤ και  
Προτάσεις Βελτίωσης των Ιδιοτήτων τους  
Κατόπιν Φθοράς



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Δ. Παπαβασιλείου-Διονύσιος Κ. Τσακαλάκης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012/24

Παπαβασιλείου Β.Δ –Τσακαλάκης Δ.Κ (2012).  
Πειραματική διερεύνηση πανέλων MoMAT και προτάσεις βελτίωσης των ιδιοτήτων τους  
κατόπιν φθοράς  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/24  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Papavasileiou V.D –Tsakalakis D.K(2012).  
Experimental investigation of MoMAT panels and suggestions for improvement their  
properties following wear.  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2012/24  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece





# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Ευχαριστίες .....	6
1 Εισαγωγή .....	7
1.1 Γενικά .....	7
1.2 Αντικειμενικός σκοπός και στόχοι της εργασίας .....	7
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας .....	8
2 Θεωρητικό μέρος .....	9
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία σύνθετων υλικών .....	9
2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	9
2.1.2 Επιμέρους υλικά .....	10
2.2 Διαδικασία σχεδιασμού σύνθετων υλικών .....	12
2.3 Διαδικασίες Παραγωγής .....	12
2.3.1 Χειρονακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης «hand lay up» .....	12
2.3.2 Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις Prepreg Lay Up .....	13
2.3.3 Μόρφωση σύνθετου υλικού μέσω περιβλήματος –«Bag-Molding» .....	13
2.3.4 Διαδικασία μέσω κλιβάνου .....	13
2.3.5 Εκμαγείο συμπίεσης- Compression Molding .....	14
2.3.6 Καλούπι ρητινένεσης- Resin transfer molding (RTM) .....	14
2.3.7 Διαδικασία παραγωγής με έλξη-Pultrusion .....	15
2.3.8 Διαδικασία περιέλιξης-filament winding .....	15
2.4 Ελαστικότητα σύνθετων υλικών .....	16
2.4.1 Γενικά .....	16
2.4.2 Τάσεις και παραμορφώσεις .....	17
2.4.3 Γενικευμένος νόμος Hooke .....	17
2.4.4 Προσδιορισμός μηχανικών σταθερών .....	18
2.5 Επίπεδη εντατική κατάσταση .....	19
2.5.1 Ορθότροπο υλικό .....	19
2.5.2 Τετραγωνικώς συμμετρικό υλικό .....	20
2.6 Νόμος σύνθεσης .....	20
2.7 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων .....	21
2.7.1 Μηχανικές ιδιότητες .....	21
2.7.2 Μηχανική Προσέγγιση .....	21
2.8 Μετασχηματισμός τάσεων – παραμορφώσεων .....	23
2.8.1 Γενικά .....	23
2.8.2 Μετασχηματισμός τάσεων .....	23
2.8.3 Μετασχηματισμός παραμορφώσεων .....	25
2.9 Μετασχηματισμός όρων ακαμψίας $Q_{ij}$ .....	26
2.10 Μετασχηματισμός όρων ευκαμψίας $S_{ij}$ .....	27
2.11 Μηχανικές σταθερές υλικού .....	28
2.12 Κριτήρια αστοχίας .....	29
2.12.1 Γενικά .....	29
2.12.2 Κριτήριο μέγιστης τάσης .....	30
2.12.3 Κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης .....	30
2.12.4 Κριτήριο Tsai-Hill .....	31
2.12.5 Κριτήριο Tsai-Wu .....	32
2.13 Διεπιφανειακές τάσεις – αποκολλήσεις .....	34
2.13.1 Γενικά .....	34

2.13.2	Αποκόλληση Στρώσεων-Κριτήρια .....	35
2.14	Μεμβρανική και καμπτική καταπόνηση.....	36
2.14.1	Γενικά .....	36
2.14.2	Μεμβρανική ακαμψία.....	36
2.14.3	Ενεργά μέρα ελαστικότητας.....	37
2.15	Πειραματική αντοχή σύνθετων υλικών. ....	38
2.15.1	Γενικά .....	38
2.15.2	Μετρήσεις βασικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών .....	38
3	Πειραματικό Μέρος.....	41
3.1	Γενικά .....	41
3.2	Μεθοδολογία προσδιορισμού δοκιμών ελέγχου .....	42
3.2.1	Γενικά .....	42
3.2.2	Καμπυλόμορφα τετραγωνικά δοκίμια διαστάσεων 30x30 cm.....	42
3.2.3	Καμπυλόμορφα ορθογωνικά δοκίμια διαστάσεων 30x15 cm.....	43
3.2.4	Δοκίμια ελέγχου εφελκυσμού ορθογωνικά (coupons).....	44
3.3	Διαδικασία παραγωγής δοκιμών .....	45
3.3.1	Χρησιμοποιούμενα υλικά .....	45
3.3.2	Περιγραφή παραγωγής τετραγωνικών καμπυλόμορφων δοκιμών .....	47
3.3.3	Περιγραφή παραγωγής καμπυλόμορφων ορθογωνικών δοκιμών .....	50
3.3.4	Περιγραφή παραγωγής ορθογωνικών δοκιμών για έλεγχο εφελκυσμού .....	51
3.4	Εκτέλεση των πειραματικών ελέγχων .....	54
3.4.1	Όργανα και χρησιμοποιούμενες συσκευές.....	54
3.5	Πειραματικός έλεγχος τετραγωνικών δοκιμών .....	55
3.5.1	Τεχνικά στοιχεία δοκιμών προς έλεγχο .....	55
3.5.2	Δοκίμιο Δ1(6/200gr/m <sup>2</sup> ).....	56
3.5.3	Δοκίμιο Δ3(7/200gr/m <sup>2</sup> ).....	57
3.5.4	Δοκίμιο Δ2(8/200gr/m <sup>2</sup> ).....	58
3.5.5	Δοκίμιο Δ4 (3/500gr/m <sup>2</sup> ).....	59
3.5.6	Δοκίμιο Δ5(4/500 gr/m <sup>2</sup> ).....	59
3.5.7	Δοκίμιο Δ6(5/500gr/m <sup>2</sup> ).....	60
3.5.8	Δοκίμιο Δ7 (ενισχυμένο μόνο με πολυεστερική ρητίνη) .....	61
3.5.9	Δοκίμιο Δ8 .....	61
3.5.10	Δοκίμιο Δ9 .....	62
3.5.11	Δοκίμιο Δ21(12/200gr/m <sup>2</sup> ).....	63
3.5.12	Δοκίμιο Δ22 (12/200 gr/m <sup>2</sup> με εποξεική ρητίνη).....	64
3.6	Πειραματικός έλεγχος καμπυλόμορφων ορθογωνικών δοκιμών .....	64
3.6.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά δοκιμών .....	64
3.6.2	Δοκίμιο Δ10 (τμήμα μητρικού υλικού) .....	65
3.6.3	Δοκίμιο Δ11 .....	67
3.6.4	Δοκίμιο Δ12 .....	67
3.6.5	Δοκίμιο Δ17 .....	68
3.6.6	Δοκίμιο Δ18 .....	68
3.6.7	Δοκίμιο Δ19 .....	70
3.6.8	Δοκίμιο Δ16 .....	70
3.6.9	Δοκίμιο Δ20 .....	71
3.6.10	Δοκίμιο Δ15 .....	71
3.6.11	Δοκίμιο ΔΡ2.....	71
3.6.12	Δοκίμιο ΔS2.....	72
3.6.13	Δοκίμιο Δ21 ορθογωνικό.....	73
3.6.14	Δοκίμιο Δ22 ορθογωνικό.....	73
3.7	Πειραματικός Έλεγχος Αντοχής Ορθογωνικών Δοκιμών (coupons) .....	74
3.7.1	Δοκίμια σύνθεσης 6/200.....	74
3.7.2	Δοκίμια σύνθεσης 7/200.....	75
3.7.3	Δοκίμια σύνθεσης 8/200.....	76

3.7.4	Δοκίμια σύνθεσης 3/500 .....	77
3.7.5	Δοκίμια σύνθεσης 4/500 .....	77
3.7.6	Δοκίμιο 5/500 .....	78
4	Συμπεράσματα-Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	80
4.1	Γενικά .....	80
4.2	Αξιολόγηση Φέρουσας Ικανότητας Υλικού στην εκτός Επιπέδου Φόρτιση .....	80
4.2.1	Αξιολόγηση ενίσχυσης τετραγωνικών δοκιμίων .....	80
4.2.2	Αξιολόγηση ενίσχυσης ορθογωνικών δοκιμίων .....	83
4.3	Σύνοψης-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	84
5	Ανάλυση προβλήματος με τη χρήση λογισμικού .....	85
5.1	Γενικά .....	85
5.2	Προσομοίωση της προς έλεγχο επιφάνειας .....	85
5.3	Μετατροπή του σχεδιαστικού μοντέλου σε αναγνώσιμο από το Abaqus αρχείο .....	86
5.4	Η τριαξιακή απεικόνιση της επιφάνειας του MoMAT στο Abaqus .....	86
5.4.1	Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού .....	86
5.4.2	Συνθήκες στήριξης .....	87
5.4.3	Φορτίσεις .....	87
5.4.4	Διαμέριση της επιφάνειας σε τετραπλευρικά πεπρασμένα στοιχεία (S4R) .....	88
5.5	Αποτελέσματα και Αξιολόγηση της ανάλυσης .....	89
6	Βιβλιογραφία .....	92
7	Κατάλογος σχημάτων .....	93
8	Κατάλογος πινάκων .....	97

## **Πειραματική διερεύνηση πανέλων MOMAT και προτάσεις βελτίωσης των ιδιοτήτων του κατόπιν φθοράς**

Παπαβασιλείου Β.Δ.-Τσακαλάκης Δ.Κ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

### **Περίληψη**

Η χρήση ασταθών εδαφών σε εκτακτες ανάγκες από τις εταιρίες Logistics αποτελούσε ανέκαθεν ένα πρόβλημα. Επίλυση μερικώς του προβλήματος αυτού έγινε με την ανάπτυξη διατάξεων σταθεροποίησης των εδαφών. Τα υλικά αυτών των διατάξεων ήταν άλλοτε ξύλινα και άλλες φορές μεταλλικά. Το βάρος μεταφοράς και οι δυσκολίες σύνδεσης τους οδήγησαν τις εταιρίες στην ανάπτυξη νέων κατασκευών με σύνθετα υλικά. Μείωση του βάρους με ταυτόχρονη επίτευξη υψηλών αντοχών καθιέρωσαν τα υλικά αυτά επί δεκαετίες.

Η συχνή χρήση αυτών μείωσε τη φέρουσα ικανότητα των υλικών και η ταυτόχρονη έκθεση στον ήλιο και τη βροχή ενίσχυσαν την απομείωση. Σκοπός λοιπόν αυτής της εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της κατάστασης και πιθανότητες ενίσχυσης ενός τύπου τέτοιου υλικού το οποίο ονομάζεται MO.MAT.

Αναγνωρίστηκε μακροσκοπικά η σύνθεση του πανέλου και καθορίστηκε ο τρόπος αντιμετώπισης της πειραματικής διαδικασίας. Από το μητρικό υλικό επευτεύχθει η αποκοπή 3 τετραγωνικών δοκιμίων τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή συμπίεσης.

Ταυτόχρονα κατασκευάστηκαν και δοκίμια νέων συνθέσεων για να διαπιστωθεί, τόσο ο τρόπος απορρόφησης ενέργειας, όσο και ο τρόπος με τον οποίο αστοχούν, με στόχο να αναζητηθεί κατάλληλος τρόπος ενίσχυσης.

Οι οποιοσδήποτε επεμβάσεις επιδρούν στην καμπυλότητα του υλικού και με δεδομένο ότι τα υλικά αυτά για να μεταφερθούν και να αποθηκευτούν συλλέγονται σε ρολλούς απαιτήθηκε και ο έλεγχος της καμπυλότητας των ενισχυμένων δοκιμίων. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν νέα ορθογωνικά καμπυλόμορφα δοκίμια και μαζί με τα δοκίμια του μητρικού υλικού ελέγχθηκαν σε κάμψη τριών σημείων.

Διαπιστώθηκε ότι η επέμβαση είναι εφικτή αλλά απαιτείται να μελετηθεί ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ παλιού και νέου τμήματος.



**Experimental investigation of MoMAT panels and suggestions for improvement their properties following wear**

Papavasileiou V.D.-Tsakalakis D.K. (supervised by Raftoyiannis, I.G.)

**Abstract**

The necessity of transportation over unstable soils in emergency situations from Logistics Companies has always been a problem. This problem was partially solved with the development and use of several types of elements for stabilizing soils.

The materials of these structures, were sometimes wood, sometimes metal. Due to the heavy weight on transferring and connecting these materials, the companies were led to develop new structures with composite materials. Low weight combined with high mechanical characteristics of these materials established them in the construction field for decades.

The frequent use of these materials during last decades along with exposure to sun and rain reduced their flexibility and load carrying capacity and increased their deformation. Aim of this work is the experimental research of such a material's failure statement and the capability of reinforcing them. The type of material used in this diploma thesis, is called MO.MAT.

The experimental procedure consisted of the following steps. Identification of the synthesis of the composite material MO.MAT. Abscission from the parent material of 3 square specimens which were tested in compression. Construction and testing of several new specimens with different number of layers applied (glass fibres) in order to determine energy absorption needed, failure statement and methods of reinforcement.

Finally it was determined that any kind of interventions to the parent material affected on the curvature, a factor that should be taken in consideration due to the fact that MO-MAT is to be stored and transported in rolls not exceeding a specific angle of curvature. For this reason the parent material, the reinforced parent specimens along with several new formed rectangular specimens were tested in three point bending.

In conclusion it is found that reinforcement of MO-MAT can be accomplished but the methods of bonding between the old and new layers should be studied thoroughly.

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους όσους, οι οποίοι εκτός αυτής της διπλωματικής εργασίας, μας βοήθησαν να ολοκληρώσουμε τις σπουδές μας στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού. Κατ' αρχάς θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Επίκουρο καθηγητή κύριο Ιωάννη Ραυτογιάννη, επιβλέποντα της εργασίας μας, ο οποίος μας εμπιστεύτηκε, αφούγκράστηκε τις ανησυχίες μας, αξιολόγησε τις ιδέες μας και με το προσωπικό και ακαδημαϊκό ήθος και ύφος που τον διέπουν μας κατεύθυνε σε κάθε βήμα της. Η εμπιστοσύνη του, μας δεσμεύει τόσο προσωπικά όσο και επαγγελματικά, να του υποσχεθούμε ότι θα φανούμε αντάξιοι της.

Ευχαριστούμε όλο το προσωπικό του εργαστηρίου των μεταλλικών κατασκευών για την απρόσκοπτη ολοκλήρωση της εργασίας μας και την αμέριστη συμπαράσταση ψυχική και υλική που μας παρείχαν. Από την έναρξη αυτής της εργασίας ο υπεύθυνος του εργαστηρίου κ. Ξενοφώντας Λιγνός σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή μας παρείχε τεχνικές γνώσεις αλλά μας και έφερε σε επαφή με συνεργάτες του εργαστηρίου οι οποίοι ειδικεύονται στα σύνθετα υλικά. Τα πειράματα δεν θα ήταν δυνατό να παραγματοποιηθούν χωρίς την βοήθεια και τις τεχνικές γνώσεις του κυρίου Στέλιου Κατσατζίδη, ο οποίος χωρίς την οποιαδήποτε ευθύνη και υποχρέωση, προγραμματίζε πειράματα ακόμα και τις ημέρες εργασιακού φόρτου του εργαστηρίου.

Ευχαριστούμε επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες Δασίου Μαρία Ελένη, Δημακογιάννη Δανάη, Δούγκα Γεωργία για την παροχή τεχνικών και θεωρητικών συμβουλών επί της εργασίας μας στη φάση ανάλυσης του μοντέλου μας με το λογισμικό Abaqus. Οι στοχευμένες απαντήσεις τους, σε ασαφείς πολλές φορές από μέρους μας ερωτήσεις, μας έδωσαν ώθηση να ολοκληρώσουμε την αναλυτική προσέγγιση του μοντέλου μας.

Ευχαριστούμε όλους όσους, σε προσωπικό επίπεδο, μας συμπαράσταθηκαν στη πορεία των σπουδών μας με τη στήριξη των οικογενειών μας σε οποιαδήποτε δύσκολη στιγμή εμείς απουσιάζαμε για την απρόσκοπτη ολοκλήρωση των σπουδών μας.

Ευχαριστούμε τους γονείς μας γιατί ακόμα και τώρα μετά από τόσα χρόνια σπουδών είναι αρωγοί των προσπαθειών μας και έχουν τις ίδιες ανησυχίες που είχαν και όταν βρισκόμασταν στα πρώτα στάδια των μαθητικών μας χρόνων. Ελπίζουμε να τους έχουμε κάνει υπερήφανους για μια ακόμα φορά.

Αφιερώνουμε τους κόπους και τα αποτελέσματα των σπουδών μας στις οικογένειες μας. Όσα έχουμε καταφέρει θα ήταν αδύνατα χωρίς την ανοχή, την υπομονή και την κατανόηση τους. Ελπίζουμε μέσα από αυτό το δύσκολο ταξίδι των γνώσεων, πέρα από τη λογική της επιστημονικής κατάρτισης, να αποτελέσουμε παράδειγμα για τα παιδιά μας. Να αναζητούν σε κάθε φάση της ζωής τους το κάτι παραπάνω όχι εκείνο που θα τους καταξιώνει στα μάτια των άλλων αλλά εκείνο που θα τους γεμίζει με σιγουριά και αυτοπεποίθηση.

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Το υπό πειραματική διερεύνηση των ιδιοτήτων του πανέλο της εταιρίας Air Logistics Corporation, μπορεί να χαρακτηριστεί ως καμπυλόμορφη (“waffle” pattern) λεπτότοιχη πλάκα κατανομής τάσεων κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά, η οποία τοποθετούμενη επί εδάφους (επιδιώκεται συνήθως να είναι μετά από διαμόρφωση οριζόντιο) κατανέμει τα φορτία τροχοφόρων οχημάτων.



Σχήμα 1: Τμήμα υλικού MOMAT για έλεγχο

Το υλικό το οποίο διατέθηκε για διερεύνηση είχε υποστεί εκτεταμένη φθορά. Οι μηχανισμοί οι οποίοι καθορίζουν την αντοχή των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν τόσο φυσικές όσο και χημικές διεργασίες στη πολυεστερική μήτρα, μειώσεις στην αντοχή των ινών.

Αναλογιζόμενοι λοιπόν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες το υλικό μας εκτίθεται διαπιστώνουμε ότι τόσο η πολυεστερική μήτρα (resin matrix) όσο και οι ίνες (fibers) μπορούν να προσβληθούν από την υγρασία, τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία (UV radiation). Σε όλα αυτά μπορούμε να προσθέσουμε και τις συνθήκες έδρασης και τον τρόπο επιβολής των φορτίων.

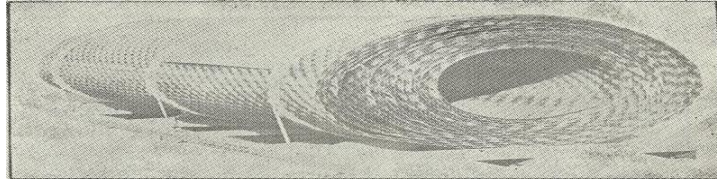
Η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών έχει μελετηθεί κατά καιρούς από πολλούς ερευνητές και έχουν προταθεί εξισώσεις προσδιορισμού των μέτρων ελαστικότητας  $E[11]$ .

## 1.2 Αντικειμενικός σκοπός και στόχοι της εργασίας

Αντικειμενικός σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ενίσχυσης του υπάρχοντος φθαρμένου υλικού με νέα επένδυση υαλοϋφάσματος ή απλά με τη επικάλυψη στρώματος πολυεστέρα, κατευθυνόμενοι σε μια απλή διαδικασία επέμβασης και ενίσχυσης των ιδιοτήτων του υλικού.

Στη προσπάθεια αυτή παρατηρήσαμε ότι το υλικό μας κατά τη φάση κατασκευής παρήχθει σε επαναλαμβανόμενα στοιχεία (modules) διαστάσεων 30x30 cm. Πέρα λοιπόν από τη επαναληψιμότητα διαπίστωσαμε ότι αυτή η διάσταση μπορεί να καθορίσει, για τον έλεγχό μας, την επιφάνεια φόρτισης τόσο από τροχοφόρα όσο και από ερπυστριοφόρα οχήματα.

Το υλικό το οποίο ελέγχεται πειραματικά πριν και μετά τη χρήση αποθηκεύεται και προστατεύεται σε ρολλούς σχήμα 2.



Σχήμα 2: Το υλικό MOMAT σε ρολλούς αποθήκευσης

Οποιαδήποτε επέμβαση για την αποκατάσταση και ενίσχυση του υλικού είναι σίγουρο ότι θα δημιουργούσε πρόβλημα στην καμπυλότητα του υλικού και κατά συνέπεια στο τρόπο αποθήκευσης και μεταφοράς του. Όλα αυτά έπρεπε να προβλεφθούν προκειμένου να γίνει και ο ανάλογος σχεδιασμός σε περίπτωση ενίσχυσης. Αυτό μπορούσε να γίνει μόνο με προσομοίωση καμπύλωσης του υλικού σε συνθήκες ανάλογες της χρήσης. Ωστόσο λόγω του ότι δεν μπορούσαν να εξεταστούν όλες οι δυνατές επιλογές προσομοίωσης αποφασίστηκε ο έλεγχος με κάμψη τριών σημείων σε δοκίμια μήκους 30cm και πλάτους 15 cm. Εκτός των δοκιμίων του μητρικού υλικού κατασκευάστηκαν και νέα δοκίμια καθώς ενισχύθηκαν και ορισμένα από τα παλιά.

### 1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο (1ο κεφάλαιο) γίνεται μια γενική αναφορά στο υλικό το οποίο υποβάλλεται σε έλεγχο και τους λόγους οι οποίοι προκαλούν τη φθορά του. Στο 2ο κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο και μόνο σε έκταση που αφορά την εργασία αλλά και τα θεωρητικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων. Στο 3ο κεφάλαιο περιγράφεται το πειραματικό μέρος της εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στο τρόπο με το οποίο προσεγγίστηκε το πρόβλημα της διερεύνησης αξιοποιώντας τμήμα φθαρμένου υλικού με ταυτόχρονη κατασκευή και νέων δοκιμίων. Τα νέα δοκίμια κατασκευάστηκαν στη λογική της διερεύνησης του τρόπου αντίδρασης και αστοχίας του υλικού. Ταυτόχρονα έγινε προσπάθεια να εκτιμηθεί κατά πόσο είναι δυνατό να επιτευχθεί μια νέα σύνθεση με βελτιωμένες ιδιότητες. Στο 4ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα της εργασίας και συνδυάζοντας τα, προτείνεται τρόπος αποδοτικής επέμβασης και προτείνονται θέματα προς περαιτέρω έρευνα. Στο 5ο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια αριθμητικής ανάλυσης του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό Abaqus 6.10. Η επιφάνεια αναπαρήχθη σε σχεδιαστικό πρόγραμμα (AutoCad 2013-student version) και έγινε προσπάθεια ανάλυσης σε μία εκ των νέων συνθέσεων με 12 τεμάχια υαλοφάσματος επιφανειακού βάρους  $200\text{gr/m}^2$ .

## 2 Θεωρητικό μέρος

### 2.1 Εισαγωγικά στοιχεία σύνθετων υλικών.

#### 2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Διάφοροι τύποι σύνθετων υλικών με μεγάλα πλεονεκτήματα είναι σε χρήση στις εφαρμογές της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού. Ο συνδυασμός μικρού βάρους και αυξημένων αντοχών ενισχυμένα με την αυξημένη αντίσταση στις περιβαλλοντικές επιδράσεις καθιστούν τα υλικά αυτά ελκυστικά προς χρήση. Είναι δυνατή η μορφοποίηση τους σε διάφορους σχηματισμούς η οποία δυνατότητα συνδυασμένη με την ανάπτυξη νέων μεθόδων παραγωγής καθιστούν τη χρήση τους ολοένα αυξανόμενη. Μέσα από τις διαδικασίες σχεδιασμού μόλις ο ερευνητής καταλήξει μετά τη θεωρητική προσέγγιση στη σύνθεση είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες της. Απαραίτητη όμως είναι σχεδίαση βάση των θεωρητικών υπολογισμών.

Ο όρος σύνθετα υλικά σημαίνει συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων υλικών υπό διακριτή μορφή των οποίων η ανάμιξη, με διάφορες μεθόδους, δημιουργεί ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες και δημιουργουν ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες. Παρά το γεγονός ότι οι μηχανικές ιδιότητες ενός εκάστου υλικού απομειώνονται μετά τη συνένωση η μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού κρίνονται εξαιρετικώς ικανοποιητικές για την χρήση σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού.

Η ιστορία των σύνθετων υλικών μπορεί να διακριθεί σε φυσική αλλά και σε τεχνητή. Το ξύλο περιέχει ίνες κυτταρίνης (*cellulose*) σε ένα συνδετικό υλικό από ξύλο (*lignin*). Οι ανθρώπινες κατασκευές σύνθετων υλικών πάνε πίσω χρονικά στη χρήση αργίλου ενισχυμένης με άχυρο για τούβλο καθώς και κεραμικά είδη. Η εκτεταμένη όμως ιστορική χρήση των σύνθετων υλικών με τη βιομηχανική τους μορφή είναι σχετικά μικρή. Συνοπτικά αναφέρουμε [4]:

1907: Παρασκευή βακελίτη (φαινόλη)

1916: Κατασκευή του πρώτου αεροσκάφους από ίνες ενισχυμένου πλαστικού (R. Kemp).

1935: Κατασκευή από την Owens-Corning Fiberglass Corporation των πρώτων ινών γιαλιού.

1938: Παρασκευή της πρώτης εποξεικής ρητίνης (P. Castan)

1943: Κατασκευή πανέλου από ίνες γυαλιού και πολυεστέρα με πυρήνα balsa wood για κατασκευή τμημάτων αεροσκαφών.

1957: Η US corporation Union Carbide ξεκινά την παραγωγή ινών carbon

1967: Κατασκευή του πρώτου αεροσκάφους σχεδόν εξ ολοκλήρου από GFRP (Windecker Research Inc.)

1971: Παρασκευή πρώτων ινών αραμιδίου με με εμπορική ονομασία Kevlar από την εταιρία (DuPont)

## 2.1.2 Επιμέρους υλικά

Τα επιμέρους υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στα σύνθετα είναι κατα κύριο λόγο ίνες σε διάφορες μορφές και το συνδετικό υλικό. Οι ίνες χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά γιατί έχουν μικρό βάρος, είναι πιο δύσκαμπτες και έχουν μεγάλη αντοχή. Οι ίνες είναι πιο ισχυρές από το συμπαγές ακατέργαστο υλικό απ' το οποίο αποτελούνται. Αυτό οφείλεται στην προνομιακή κατεύθυνση των μορίων κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών και λόγω του μειωμένου πλήθους ατελειών που παρουσιάζονται σε μια ίνα, πράγμα αντίθετο με αυτό που συμβαίνει στο ακατέργαστο υλικό.

Το συνδετικό υλικό συγκρατεί τις ίνες μαζί και επιπλέον μεταφέρει το φορτίο μεταξύ των ινών, του συνδετικού υλικού και των στηρίξεων. Επίσης προστατεύει τις ίνες από το περιβάλλον και τις μηχανικές τριβές και παραλαμβάνει μέρος του φορτίου, κυρίως τις εγκάρσιες τάσεις και την ενδοστρωματική (εντός του επιπέδου) διατμητική τάση.[2]

### 2.1.2.1 Ίνες

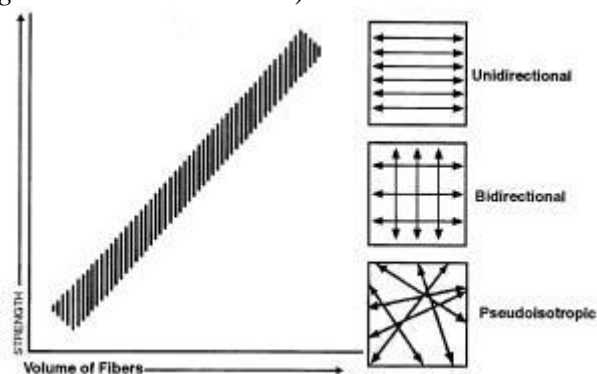
Οι ίνες χρησιμοποιούνται ως οπλισμός στα σύνθετα υλικά με ενιαίο προσανατολισμό, όπου ένας μεγάλος αριθμός ινών ευθυγραμμίζονται μέσα στο μικρό πάχος ενός μικρού κελύφους ή πλάκας που ονομάζεται στρώση ή φύλλο. Μία στρώση με ίνες ενιαίου προσανατολισμού έχει τη μέγιστη αντοχή και δυσκαμψία κατά τη διεύθυνση των ινών και την ελάχιστη για διεύθυνση κάθετη στις ίνες. Όταν είναι επιθυμητές ίδιες ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση του επιπέδου της στρώσης χρησιμοποιούνται ίνες με τυχαίο προσανατολισμό. Μια διαστρωμάτωση αποτελείται από δύο ή περισσότερες επάλληλες στρώσεις συνεργαζόμενες μεταξύ τους. Το τελικό προϊόν έχει τις διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση στο επίπεδο της στρώσης.

Οι ιδιότητες ερπυσμού των σύνθετων υλικών οφείλονται κυρίως στο συνδετικό υλικό. Τα σύνθετα υλικά που ενισχύονται με κοντές ίνες (*chopped fibers, whiskers*) ή σωματίδια μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις ακόμα και σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας. Αυτός είναι ο κύριος λόγος της χρήσης των συνεχών ινών στις εφαρμογές των κατασκευών. Επιλέγοντας ίνες (από άνθρακα ή γυαλί), με πολύ μικρές παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού, τα σύνθετα υλικά με πολυμερή συνδετικά (PMC) μπορούν να καταστούν αρκετά ανθεκτικά έναντι ερπυσμού.

Οι ίνες αναλόγως του τρόπου με τον οποίο ενισχύουν τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε:

1. Απλές ενισχύσεις με χαρακτηριστικά ινών.
  - α. Συνεχείς επιμήκεις ίνες
    - (1) Ίνες ενιαίου προσανατολισμού
    - (2) Ίνες διπλού προσανατολισμού (π.χ. πλεκτές (*woven*), *stitched mat* κ.α.)
    - (3) Τυχαίου προσανατολισμού (συνεχείς δέσμες ινών *continuous strand mat-CSM*)
  - β. Ασυνεχείς ίνες
    - (1) τυχαίου προσανατολισμού (π.χ. κοντές δέσμες ινών (*chopped strand mat*))
    - (2) συγκεκριμένου προσανατολισμού (π.χ. *oriented strand mat.*)
  - γ. Κοντές ίνες και σωματίδια
    - (1) τυχαίου προσανατολισμού
    - (2) συγκεκριμένου προσανατολισμού

2. Διαμόρφωση ινών ως διαστρωμάτωση.
  - α. Ενιαίου προσανατολισμού, συμπεριλαμβανομένων πολλών στρώσεων, με το ίδιο υλικό και προσανατολισμό σε όλες τις στρώσεις.
  - β. Συνήθης διαστρωμάτωση, όπου τουλάχιστον κάποιες στρώσεις έχουν διαφορετικό προσανατολισμό ή υλικό.
3. Υβριδική κατασκευή.
  - α. Διαφορετικά υλικά σε διάφορες στρώσεις (π.χ. διμεταλλικά).
  - β. Διαφορετική ενίσχυση στη στρώση (π.χ. αναμιγμένες ίνες βόριου και άνθρακα (*intermingled borion και carbon*))



Σχήμα 3: Σχέση αντοχής και κατεύθυνσης των ινών

Οι πλέον συνήθεις ίνες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι από γυαλί, άνθρακα, οργανικές (*Kevlar*), βόριο, Silicon Carbide (SiC), αλουμίνιο και άλλα υλικά σε πλέον εξειδικευμένες εφαρμογές. Η επιλογή του τύπου της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις επιθυμητές μηχανικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες καθώς και το κόστος αυτής. Για τις ίνες γυαλιού τις οποίες και χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία ανάλογα με τη χημική τους σύσταση χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S.

**E-glass (E=electrical):** Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

**C-glass (C=corrosion):** Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

**S-glass (S=stiffness):** Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.[2]

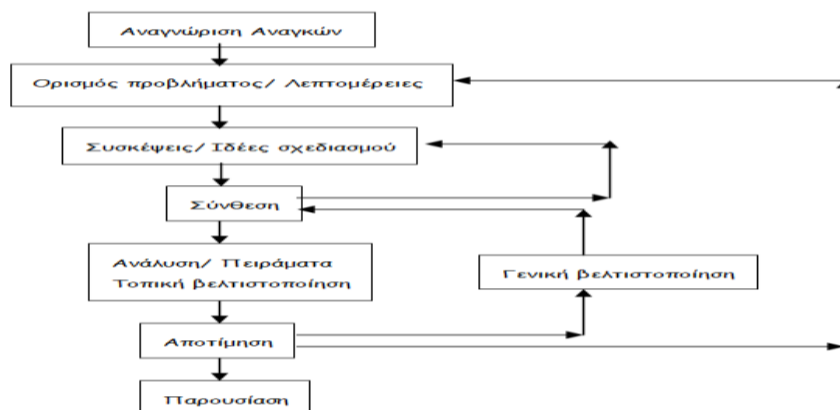
### 2.1.2.2 Συνδετικό υλικό

Τα συνδετικά υλικά μπορούν να είναι πολυμερή(Ρητίνες), μεταλλικά ή κεραμικά.

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα συνδετικά υλικά είναι κυρίως οι *θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες* (thermosetting resins) που σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού και σκλήρυνσής τους (curing). Τέτοιες είναι οι φαινολικές (phenolic), οι εποξειδικές (epoxy), οι βινυλεστερικές (vinylester) και οι πολυεστερικές (polyester) ρητίνες, οι οποίες αποτελούν και τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες. Επίσης, χρησιμοποιούνται και οι *θερμοπλαστικές ρητίνες* (thermoplastic resins), αλλά για εξειδικευμένα τμήματα σκαφών.

## 2.2 Διαδικασία σχεδιασμού σύνθετων υλικών

Ο σχεδιασμός είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες αποφάσεις για την κατασκευή, τον χειρισμό, τη συντήρηση και τη διάθεση ενός προϊόντος. Ο σχεδιασμός ξεκινάει με την αναγνώριση των αναγκών. Ορίζονται επίσης κριτήρια απόδοσης υπό την έννοια ότι κάθε λύση που θα προταθεί αργότερα θα πρέπει να ικανοποιεί αυτά τα κριτήρια έτσι ώστε να θεωρείται αποδεκτή. Ο σχεδιασμός στηρίζεται στην ανάλυση της συμπεριφοράς ενός προϊόντος πριν αυτό κατασκευαστεί πραγματικά. Η βέλτιστη λύση στη συνέχεια αποτιμάται σε σχέση με τα κριτήρια απόδοσης που διατυπώθηκαν στον ορισμό του προβλήματος. Τα κριτήρια απόδοσης γίνονται το μέτρο βαθμονόμησης, με το οποίο η απόδοση ή η επιλογή υπέρ οποιασδήποτε προτεινόμενης λύσης μετρώνται. Διαγραμματικά παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα[2]:

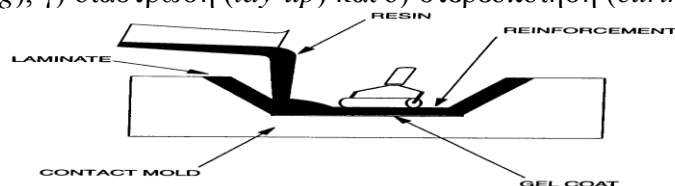


Σχήμα 4: Διάγραμμα διαδικασίας σχεδιασμού

## 2.3 Διαδικασίες Παραγωγής

### 2.3.1 Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης «hand lay up»

Η τεχνική της χειρωνακτικής διαδικασίας μόρφωσης μιας διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*), ονομάζεται και *wet hand lay-up*, είναι η πιο απλή και διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής. Περιλαμβάνει την χειρωνακτική τοποθέτηση των ξηρών ενισχύσεων στο εκμαγείο και τον εμποτισμό με ρητίνη. Στη συνέχεια, το υπό υγρή μορφή σύνθετο υλικό διαμορφώνεται με χειροκίνητα ρολά ώστε να διευκολυνθεί η ομοιόμορφη διάστρωση και η απομάκρυνση των θυλάκων αέρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Έτσι προκύπτει μία κατασκευή με διαδοχικές στρώσεις. Τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου είναι: α) προετοιμασία εκμαγείου, β) επικάλυψη με ζελατίνη (*gel coating*), γ) διάστρωση (*lay-up*) και δ) στερεοποίηση (*curing*).



Σχήμα 5: Χειρωνακτική διαδικασία διαστρωμάτωσης



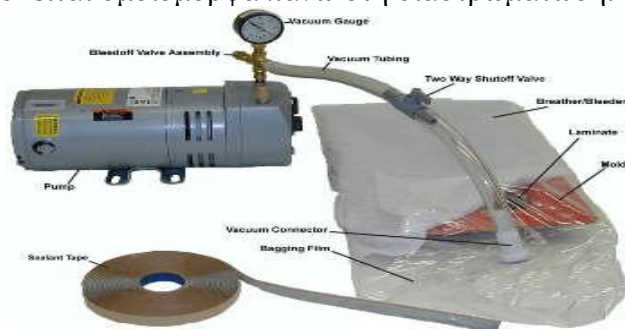
### 2.3.2 Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις Prepreg Lay Up

Η προκατασκευασμένη στρώση (*prepreg*) είναι προ-εμποτισμένο υλικό ενισχυμένο με ίνες (*pre-impregnated fiber reinforced material*) όπου η ρητίνη έχει μερικώς στερεοποιηθεί ή είναι πύο παχύρρευστη. Οι ίνες είναι τακτοποιημένες σε μία ταινία μονού προσανατολισμού (*unidirectional tape*), ένα πλεκτό ύφασμα (*woven fabric*) ή σε φύλλα με κοντές ίνες τυχαίου προσανατολισμού (*random chopped fiber sheets*). Η βασική διαφορά μεταξύ της μεθόδου διαστρωμάτωσης με προκατασκευασμένες στρώσεις (*prepreg lay-up*) και της συμβατικής μεθόδου χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*) είναι ότι χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες στρώσεις (*prepreg*) ο εμποτισμός (*impregnation*) των ινών γίνεται πριν το καλούπωμα.

### 2.3.3 Μόρφωση σύνθετου υλικού μέσω περιβλήματος –«Bag-Molding»

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι στην εφαρμογή της πίεσης στη διαστρωμάτωση: α) *pressure bag* β) *vacuum bag* και γ) διαδικασία με κλίβανο (*autoclave processing*), με τις δύο τελευταίες να είναι οι πιο δημοφιλείς.

Στη διαστρωμάτωση, και πριν αυτή στερεοποιηθεί, εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη πίεση βελτιώνοντας την σταθεροποίηση των ινών και την απομάκρυνση της περιττής ρητίνης, του αέρα και των πτητικών ουσιών από το συνδετικό υλικό. Η πίεση εφαρμόζεται με τη βοήθεια ενός εύκαμπτου διαφράγματος ή ενός περιβλήματος (*bag*). Οι στρώσεις απλώνονται πρώτα στο καλούπι και ακολουθεί η ρητίνη. Μια απελευθερωτική μεμβράνη ή μέσο (*release film* ή *agent*) χρησιμοποιείται και στις δύο πλευρές της διαστρωμάτωσης για να την αποτρέψει να κολλήσει στο καλούπι ή στο *breather*. Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένα *peel-ply* για να αφήσει σημάδι (*imprint*) ή ένα σχέδιο/πατρόν (*pattern*) στην επιφάνεια ώστε να δυναμώσει ο συγκολλητικός δεσμός (δευτερεύων δεσμός) αργότερα. Ο συνδυασμός *breather-bleeder* βοηθά στην διάδοση της αναρρόφησης (*vacuum*) ή των διόδων (*channels*) των πτητικών ουσιών και της περιττής ρητίνης στην έξοδο αναρρόφησης (*vacuum port*). Η διαστρωμάτωση μετά καλύπτεται με ένα εύκαμπτο περίβλημα (*flexible bag*), το οποίο είναι τέλεια σφραγισμένο στο εργαλείο. Στη συνέχεια εφαρμόζεται αναρρόφηση (*vacuum*) και το τμήμα στερεοποιείται με θέρμανση και πίεση. Με την εφαρμογή της αναρρόφησης (*vacuum*) κάτω από το περίβλημα (*bag*), η ατμοσφαιρική πίεση ασκείται ομοιόμορφα πάνω στη διαστρωμάτωση.

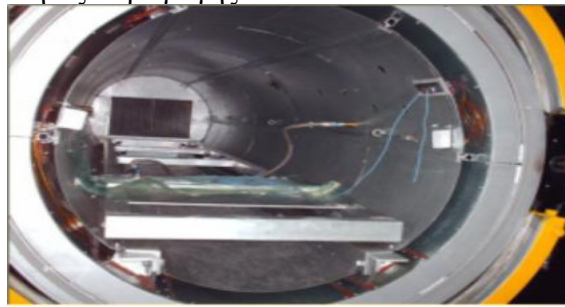


Σχήμα 6: Διαδικασία μέσω περιβλήματος

### 2.3.4 Διαδικασία μέσω κλιβάνου

Οι κλίβανοι (*autoclaves*) είναι δοχεία υπό πίεση που περιέχουν πεπιεσμένο αέρα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του σύνθετου υλικού. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή

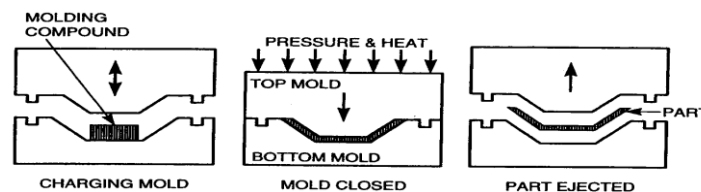
υψηλής ποιότητας πολύπλοκων τμημάτων. Η μέθοδος είναι πολύ καλή για μεγάλα τμήματα και μέτριες ποσότητες παραγωγής.



Σχήμα 7:Κλίβανος επεξεργασίας σύνθετων υλικών

### 2.3.5 Εκμαγείο συμπίεσης- Compression Molding

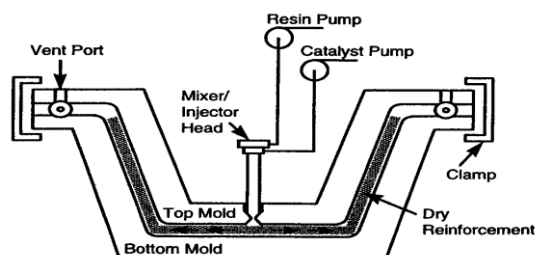
Η διαδικασία μέσω ενός εκμαγείου συμπίεσης (*compression molding*) χρησιμοποιεί εφαρμογές αρσενικού- θηλυκού τύπου και μεταλλικές μήτρες για το σχηματισμό του καλούπι. Μια προμετρημένη ποσότητα του μίγματος (ίνες και ρητίνες) γεμίζει αρχικά το καλούπι. Κατόπιν χρησιμοποιείται μία υδραυλική πρέσα με θερμότητα και σχετικά υψηλή πίεση για τη στερεοποίηση των ινών και ρητινών κλείνοντας το αρσενικό και θηλυκό τμήμα του καλούπιού. Αφού το υλικό έχει στερεοποιηθεί, χαλαρώνει η πίεση και το τμήμα βγαίνει από το καλούπι.



Σχήμα 8:Compression molding process

### 2.3.6 Καλούπι ρητινένεσης- Resin transfer molding (RTM)

Η διαδικασία με το καλούπι ρητινένεσεως - Resin Transfer Molding (RTM) χρησιμοποιεί ένα καλούπι με εισόδους για την εισαγωγή της ρητίνης και εξόδους που επιτρέπουν τη διαφυγή του αέρα. Οι ίνες ενίσχυσης τοποθετούνται ξηρές στο καλούπι και αυτό κλείνεται. Από την είσοδο αντλείται υγρή ρητίνη μέσα στο καλούπι, εμποτίζοντας τις ίνες και γεμίζοντας την κοιλότητα του καλουπιού. Όταν αυτό γεμίσει, η παροχή ρητίνης σταματά, οι εισοδοί και εξοδοί σφραγίζονται και εφαρμόζεται θέρμανση ώστε να στερεοποιηθεί η ρητίνη. Στη συνέχεια, το καλούπι ανοίγεται και το τελικό τμήμα του σύνθετου υλικού απομακρύνεται.

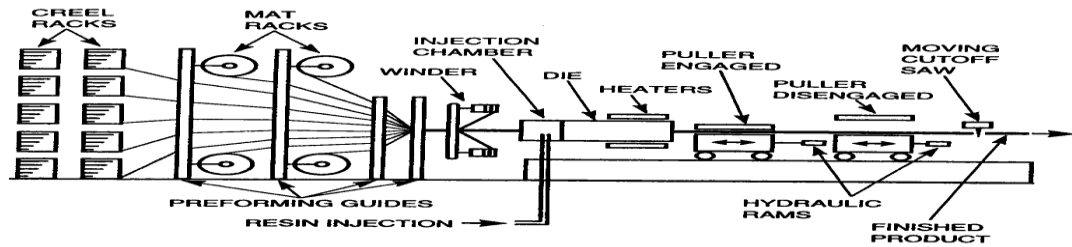


Σχήμα 9:Καλούπι ρητινένεσης

### 2.3.7 Διαδικασία παραγωγής με έλξη-Pultrusion

Η διαδικασία παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) είναι μία συνεχής διαδικασία που χρησιμοποιείται για να κατασκευάζει σταθερές πρότυπες διατομές οιοδήποτε μήκους. Οι ίνες είναι εμποτισμένες με ρητίνη και έλκονται μέσω μιας θερμαινόμενης μήτρας, από όπου περνώντας σχηματίζεται και στερεοποιείται το τελικό προϊόν.

Στην απλούστερη γραμμή παραγωγής με έλξη (*pultrusion*), οι δέσμες των ινών τεντώνονται και οδηγούνται σε καλούπια προσηματισμού. Τα *performing guides* θέτουν τις ίνες με κατάλληλη διάταξη μέσα στη διατομή (*cross-section*) του προϊόντος, όπως ορίζεται από τον σχεδιαστή. Οι ενισχύσεις εισέρχονται ξηρές στο θάλαμο έγχυσης (*injection chamber*), όπου εμποτίζονται με παροχετευόμενη ρητίνη υπό πίεση. Η διατομή (*cross-section*) της μήτρας δίνει το τελικό σχήμα του προϊόντος.

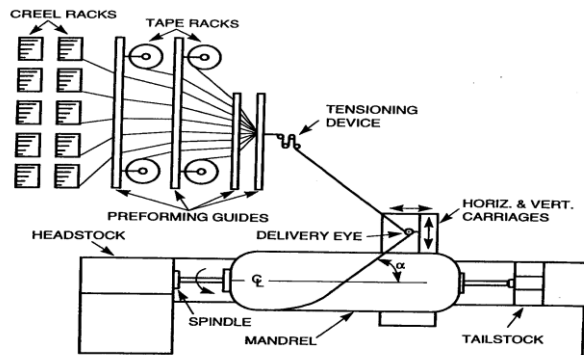


Σχήμα 10: Διαδικασία παραγωγής με έλξη

### 2.3.8 Διαδικασία περιέλιξης-filament winding

Τα περισσότερα σχήματα που μορφώνονται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι επιφάνειες κυλινδρικών ή σφαιρικών κελυφών, όπως σωλήνες, κύλινδροι και σφαίρες. Στη διαδικασία της περιέλιξης (*filament winding*), συνεχείς ενισχύσεις όπως δέσμες ινών (*roving*) περιτυλίγονται γύρω από έναν περιστρεφόμενο καλούπι/άξονα (*mandrel*) μέχρι η επιφάνεια να καλυφθεί και να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται ακατέργαστα υλικά, ίνες και ρητίνες, σε μια σχεδόν αυτοματοποιημένη μορφή με μικρό κόστος εργασίας που συνεισφέρει στο μικρό κόστος παραγωγής. Η εκ των προτέρων προγραμματισμένη περιστροφή του άξονα και η οριζόντια μετακίνηση του στομίου παροχής (*delivery eye*) παράγει ένα ελικοειδές σχήμα, που είναι η απλούστερη μέθοδος λειτουργίας της ελικοειδούς μηχανής περιέλιξης (*helical winding machine*).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι των μηχανών περιέλιξης: η ελικοειδής και η πολική ως προς σημείο (*polar*).



Σχήμα 11: Διαδικασία περιέλιξης

## 2.4 Ελαστικότητα σύνθετων υλικών

### 2.4.1 Γενικά

Στη μηχανική του παραμορφώσιμου στερεού εξετάζονται τα ακόλουθα τέσσερα πεδία:

- α. το πεδίο μετατοπίσεων  $u$ ,
- β. το πεδίο παραμορφώσεων  $\epsilon$ ,
- γ. το πεδίο τάσεων  $\sigma$ , και
- δ. το πεδίο δυνάμεων  $f$ .

Ενα παραμορφώσιμο σώμα που υποβάλλεται σε δεδομένο πεδίο εξωτερικών δυνάμεων  $f$  θα αναπτύξει εσωτερικές τάσεις  $\sigma$  και παραμορφώσεις  $\epsilon$ , και θα μετατοπιστεί κατά  $u$ . Τα πεδία μετατοπίσεων, παραμορφώσεων, τάσεων και δυνάμεων εκφράζονται σε ένα τρισδιάστατο κύριο σύστημα 1-2-3 υπό διανυσματική μορφή ως ακολούθως:

- ε. Μετατοπίσεις  $u_i$
  - στ. Παραμορφώσεις  $\epsilon_{ij}$
  - ζ. Τάσεις  $\sigma_{ij}$
  - η. Δυνάμεις  $f_{ij}$
- όπου οι δείκτες παίρνουν τιμές  $i, j = 1, 2, 3$ .

Τα πεδία αυτά συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων ελαστικότητας.

Οι τάσεις συνδέονται με τις δυνάμεις μέσω των εξισώσεων ισορροπίας, οι παραμορφώσεις με τις τάσεις μέσω του νόμου ελαστικότητας και οι μετατοπίσεις με τις παραμορφώσεις μέσω των κινηματικών σχέσεων και των εξισώσεων συμβιβαστού.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad \text{εξισώσεις ισορροπίας} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad \text{νόμος ελαστικότητας} \quad (2.2)$$

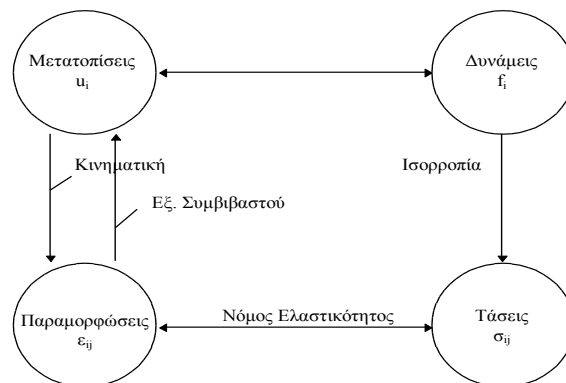
$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right] \quad \text{κινηματική σχέση} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial x_k \partial x_\ell} + \frac{\partial^2 \epsilon_{k\ell}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \epsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_\ell} + \frac{\partial^2 \epsilon_{j\ell}}{\partial x_i \partial x_k} \quad \text{εξισώσεις συμβιβαστού} \quad (2.4)$$

όπου  $i, j, k, \ell = 1, 2, 3$ .

Με βάση την θεωρία μικρών παραμορφώσεων, η κινηματική σχέση (2.3) απλοποιείται στην ακόλουθη:

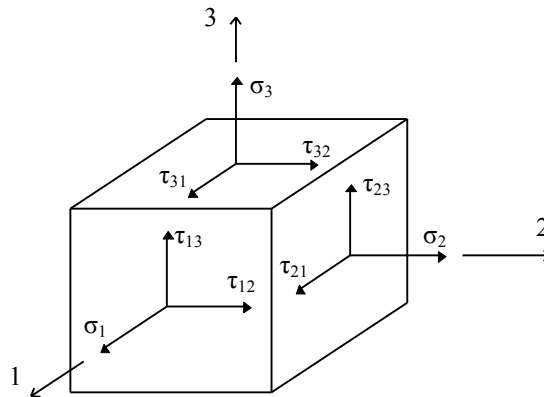
$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$



Σχήμα 12: Τα τέσσερα πεδία της μηχανικής

## 2.4.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

Θεωρώντας το κύριο σύστημα αξόνων 1-2-3 έχουμε:



Σχήμα 13: Τάσεις στο κύριο σύστημα αξόνων

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \tau_{23} \ \tau_{31} \ \tau_{12}\} \quad (2.6)$$

Ομοίως, οι αντίστοιχες παραμορφώσεις συμβολίζονται με  $\varepsilon_i$  (ορθές) και  $\gamma_{ij}$  (διατμητικές). Ισχύει όμως ότι:

$$\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

Το διάνυσμα των παραμορφώσεων είναι

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3 \ \gamma_{23} \ \gamma_{31} \ \gamma_{12}\} \quad (2.8)$$

Ακριβώς ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για ένα τυχόν σύστημα x-y-z, όπου οι δείκτες λαμβάνουν τιμές  $i, j = x, y, z$ .

## 2.4.3 Γενικευμένος νόμος Hooke

Ο νόμος ελαστικότητας, συνδέει τάσεις και παραμορφώσεις με 81 ελαστικές σταθερές  $C_{ijk\ell}$  ( $i, j, k, \ell = 1, 2, 3$ ). Επειδή όμως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι συμμετρικές ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  και  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ ), ο νόμος γίνεται:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Αυτή αποτελεί μια γενική έκφραση η οποία εξηγεί τη συμπεριφορά ενός ανισότροπου γραμμικώς ελαστικού υλικού. Οι 36 ελαστικές σταθερές όμως δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αν θεωρήσουμε την ενέργεια παραμορφώσεως  $W$

$$W = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (2.10)$$

και παραγωγίσουμε ως προς τις παραμορφώσεις, έχουμε

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} = C_{ij} \varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ji}} = C_{ji} \varepsilon_{ji} = \sigma_{ji} \quad (2.11\beta)$$

Ισχύει  $\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$ , όπερ σημαίνει ότι και για τις ελαστικές σταθερές ισχύει  $C_{ij}=C_{ji}$ . Άρα, οι ανεξάρτητες σταθερές είναι 21. Το υλικό στην περίπτωση καλείται τρικλινικό.

Αν υπάρχει ένα επίπεδο συμμετρίας (π.χ. το 1-2), τότε το υλικό λέγεται μονοκλινικό, και ο νόμος ελαστικότητας απλοποιείται σε:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

Οι ανεξάρτητες σταθερές στην περίπτωση αυτή είναι 13.

Αν υπάρχει συμμετρία ως προς 3 ορθογωνικά επίπεδα, το υλικό λέγεται ορθότροπο. Ο νόμος ελαστικότητας γίνεται:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

και περιέχει 9 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές.

Υλικό	Ανεξάρτητες	1-2-3	x-y-z	Μη μηδενικές
Τρικλινικό	21	36	36	36
Μονοκλινικό	13	20	36	36
Ορθότροπο	9	12	20	36
Εγκ.	5	12	20	36
Ισότροπο	2	12	12	12

Πίνακας 1: Πίνακας ελαστικών σταθερών

Αντιστρέφοντας την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων εξ.(2.9) έχουμε

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

όπου  $S_{ij}$  είναι ο όροι ευκαμψίας.

#### 2.4.4 Προσδιορισμός μηχανικών σταθερών

Οι μηχανικές σταθερές προσδιορίζονται με απλά πειράματα.

Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση  $\sigma_1$  όπου ( $\sigma_2=\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{31}=\tau_{12}=0$ ), έχουμε

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \quad \varepsilon_2 = -\nu_{12}\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}\sigma_1 \quad \varepsilon_3 = -\nu_{13}\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{13}}{E_1}\sigma_1$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0 \quad (2.14\alpha)$$

Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση  $\sigma_2$  όπου ( $\sigma_1=\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{31}=\tau_{12}=0$ ), έχουμε

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad \varepsilon_1 = -\nu_{21}\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{21}}{E_2}\sigma_2 \quad \varepsilon_3 = -\nu_{23}\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{23}}{E_2}\sigma_2$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0 \quad (2.14\beta)$$

Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση  $\sigma_3$  όπου ( $\sigma_1=\sigma_2=\tau_{23}=\tau_{31}=\tau_{12}=0$ ), έχουμε

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_3} \quad \varepsilon_1 = -\nu_{31}\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}\sigma_3 \quad \varepsilon_2 = -\nu_{32}\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{32}}{E_3}\sigma_3$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0 \quad (2.14\gamma)$$

Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση  $\tau_{23}$  όπου ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\tau_{31}=\tau_{12}=0$ ), έχουμε

$$\gamma_{23} = \tau_{23}/G_{23} \quad (2.14\delta)$$

Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση  $\tau_{31}$  όπου ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{12}=0$ ), έχουμε

$$\gamma_{31} = \tau_{31}/G_{13} \quad (2.14\epsilon)$$

Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση  $\tau_{12}$  όπου ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{31}=0$ ), έχουμε

$$\gamma_{12} = \tau_{12}/G_{12} \quad (2.14\sigma\tau)$$

Έτσι, το αντίστροφο του νόμου ελαστικότητας συναρτήσει των μηχανικών σταθερών είναι:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

Οι λόγοι Poisson ορίζονται:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}, \text{ όπου } i,j=1,2,3.$$

Επειδή το μητρώο ελαστικότητας είναι συμμετρικό, θα ισχύει

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad \text{με } i,j=1,2,3 \quad (2.16)$$

Για εγκάρσια-ισότροπα υλικά ισχύει:

$$G_{13} = G_{12}, E_2 = E_3, \nu_{21} = \nu_{31}, \nu_{23} = \nu_{32} \text{ και } G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{32})} \quad (2.17)$$

Για ισότροπα υλικά είναι:

$$G = G_{ij}, E = E_{ij}, \nu = \nu_{ij} \text{ και } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.18)$$

## 2.5 Επίπεδη εντατική κατάσταση

### 2.5.1 Ορθότροπο υλικό

Έστω ένα ορθότροπο υλικό σε επίπεδη εντατική κατάσταση δηλ.  $\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{31}=0$ . Τότε η σχέση (2.15) απλοποιείται ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

Οι ανεξάρτητες σταθερές είναι πλέον τέσσερις, δηλ.  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$  και ισχύει

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.20)$$

## 2.5.2 Τετραγωνικώς συμμετρικό υλικό

Στην περίπτωση αυτή είναι  $E_1=E_2$  και κατ' επέκταση  $\nu_{12}=\nu_{21}$ . Η εξ.(2.19) απλοποιείται περαιτέρω στην ακόλουθη:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

Το υλικό έχει τρεις ανεξάρτητες σταθερές  $E_1$ ,  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι στα τετραγωνικώς συμμετρικά υλικά :

$$G_{12} \neq \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})} \quad (2.22)$$

## 2.6 Νόμος σύνθεσης

Ο νόμος της σύνθεσης (rule of mixtures) εκφράζει τα ποσοστά συμμετοχής ινών και μητρώου στο τελικό προϊόν. Χρησιμοποιείται δε στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Έστω σύνθετο υλικό για το οποίο ορίζονται:

$V$ : συνολικός όγκος

$V_f$ : όγκος ινών

$V_m$ : όγκος μητρώου

$V_v$ : όγκος κενών

όπου προφανώς  $V=V_f+V_m+V_v$ .

Ορίζονται οι λόγοι  $\nu_f$ ,  $\nu_m$ , και  $\nu_v$  ως εξής:

$$\nu_f: \text{λόγος όγκου ινών (fiber volume fraction)} \quad \nu_f = \frac{V_f}{V} \quad (2.23)$$

$$\nu_m: \text{λόγος όγκου μητρώου (matrix volume fraction)} \quad \nu_m = \frac{V_m}{V} \quad (2.24)$$

$$\nu_v: \text{λόγος όγκου κενών (void volume fraction)} \quad \nu_v = \frac{V_v}{V} \quad (2.25)$$

για τα οποία ισχύει  $\nu_f + \nu_m + \nu_v = 1$ .

Αν  $W$  είναι το συνολικό βάρος ενός κομματιού υλικού,  $W_f$  το βάρος ινών και  $W_m$  το βάρος του μητρώου, τότε ορίζονται οι ακόλουθοι λόγοι

$$w_f: \text{λόγος βάρους ινών} \quad w_f = \frac{W_f}{W} \quad (2.26)$$

$$w_m: \text{λόγος βάρους μητρώου} \quad w_m = \frac{W_m}{W} \quad (2.27)$$

και είναι  $w_f + w_m = 1$ .



Έστω  $\rho_f$  η πυκνότητα των ινών και  $\rho_m$  η πυκνότητα του μητρώου, τότε η συνολική πυκνότητα  $\rho$  του σύνθετου υλικού ορίζεται ως εξής :

$$\rho = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (2.28)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο λόγος όγκου κενών  $v_v$  υπολογίζεται από

$$v_v = 1 - v_f - v_m = 1 - \frac{W_f/\rho_f}{V} - \frac{W_m/\rho_m}{V} \quad (2.29)$$

## 2.7 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

### 2.7.1 Μηχανικές ιδιότητες

Με τον όρο μηχανικές ιδιότητες εννοούμε τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού σαν ομογενές σώμα. Για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

- α. Εμπειρικές και ημιαναλυτικές μέθοδοι
- β. Στηρίζονται σε απλές αρχές και πειραματική επαλήθευση.
- γ. Ενεργειακές μέθοδοι
- δ. Λεπτομερειακή ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

### 2.7.2 Μηχανική Προσέγγιση

Η μηχανική προσέγγιση ανήκει στην κατηγορία των ημιαναλυτικών μεθόδων και στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- α. Οι ίνες είναι ομογενές (όχι ακριβής παραδοχή) ισότροπο, γραμμικώς ελαστικό με κανονική διάταξη και προσανατολισμένες.
- β. Το μητρώο είναι ομογενές ισότροπο γραμμικώς ελαστικό (όχι ακριβής παραδοχή).

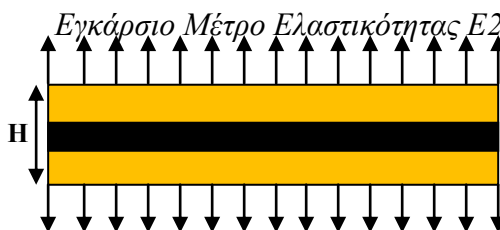
*Διάμηκες Μέτρο Ελαστικότητας  $E_1$*



Είναι:  $\sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \rightarrow \sigma_1 = \sigma_f \frac{A_f}{A} + \sigma_m \frac{A_m}{A}$

δηλαδή  $E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A}$  και

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m \quad (2.30)$$



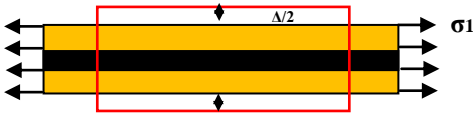
$\sigma_2$

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= v_f \epsilon_f + v_m \epsilon_m \\ &= v_f \frac{\sigma_2}{E_f} + v_m \frac{\sigma_2}{E_m} \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = E_2 \epsilon_2 = E_2 \left( v_f \frac{\sigma_2}{E_f} + v_m \frac{\sigma_2}{E_m} \right)$$

Άρα  $\frac{1}{E_2} = \frac{\nu_f}{E_f} + \frac{\nu_m}{E_m}$  η'  $E_2 = \frac{E_f E_m}{\nu_m E_f + \nu_f E_m}$  (2.31)

Λόγος Poisson  $\nu_{12}$  (εξ' ορισμού  $\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ )



Εφαρμόζουμε ορθή τάση  $\sigma_1$  οπότε η εγκάρσια βράχυνση είναι  $\Delta$

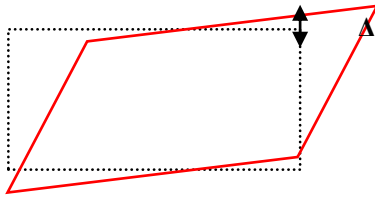
$$\Delta = -H\varepsilon_2 = H\nu_{12}\varepsilon_1 \text{ και}$$

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_f$$

$$\Delta_m = H\nu_m \nu_m \varepsilon_1 \text{ και } \Delta_f = H\nu_f \nu_f \varepsilon_1$$

Άρα:  $\nu_{12} = \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m$  (2.32)

Μέτρο Διάτμησης  $G_{12}$



$$\begin{aligned} \Delta_m &= H\nu_m \gamma \\ \Delta &= \gamma_{12} H \quad \Delta_f = H\nu_f \gamma_f \\ \Delta &= \Delta_m + \Delta_f \end{aligned}$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \gamma_m = \frac{\tau_{12}}{G_m}, \gamma_f = \frac{\tau_{12}}{G_f} \text{ και } \gamma_{12} = \nu_m \gamma_m + \nu_f \gamma_f$$

Άρα  $\frac{\tau_{12}}{G_{12}} = \nu_m \frac{\tau_{12}}{G_m} + \nu_f \frac{\tau_{12}}{G_f}$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\nu_m}{G_m} + \frac{\nu_f}{G_f} \quad (2.33)$$

Η μηχανική προσέγγιση είναι ακριβής για τα  $E_1$  και  $\nu_{12}$ , αλλά όχι και για τα  $E_2$  και  $G_{12}$ . Για το λόγο αυτό προτάθηκαν βελτιώσεις βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα.

### Βελτίωση κατά Halpin & Tsai

Χρησιμοποιείται ο διορθωτικός όρος  $\eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi}$ , όπου  $\xi$  μια παράμετρος προσδιοριζόμενη από πειραματικά δεδομένα. Τότε τα μέτρα  $E_2$  και  $G_{12}$  υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1 + \xi \nu_f}{1 - \eta \nu_f} \quad (2.34\alpha)$$

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{1 + \xi \nu_f}{1 - \eta \nu_f} \quad (2.34\beta)$$

Παρατηρήθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου  $\xi=2$  υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

### Βελτίωση κατά Tsai & Hahn

Εισάγεται η παράμετρος διαχωρισμού τάσεων  $\eta_2$  και με βάση αυτήν υπολογίζονται τα μέτρα  $E_2$  και  $G_{12}$  από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[ \frac{v_f}{E_f} + \frac{\eta_2 v_m}{E_m} \right] \quad (2.35a)$$

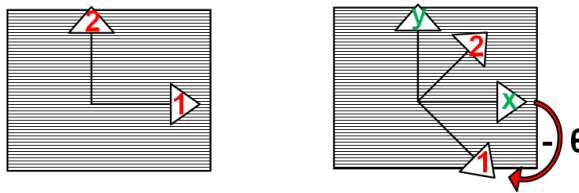
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[ \frac{v_f}{G_f} + \frac{\eta_2 v_m}{G_m} \right] \quad (2.35b)$$

Παρατηρήθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου διαχωρισμού τάσεων  $\eta_2=0.50$  υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

## 2.8 Μετασχηματισμός τάσεων – παραμορφώσεων

### 2.8.1 Γενικά

Με δεδομένη τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2 (διεύθυνση ινών και κάθετος αυτής), θέλουμε να προσδιορίσουμε την ανάλογη σχέση σε ένα άλλο σύστημα x-y υπό γωνία  $\theta$  ως προς το σύστημα 1-2. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων μετασχηματισμού για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις από το σύστημα 1-2 στο σύστημα x-y. Η θετική φορά για την γωνία  $\theta$  καθορίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



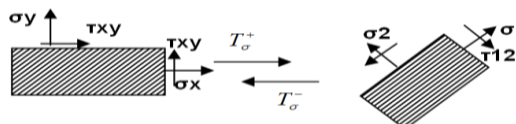
Σχήμα 14: Σύστημα υλικού 1-2 και τυχόν σύστημα x-y με γωνία μετασχηματισμού  $\theta$

Ο μετασχηματισμός των τάσεων παραμορφώσεων είναι απαραίτητος διότι:

- Οι ιδιότητες υλικού επηρεάζονται από τον προσανατολισμό των ινών.
- Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2.
- Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των όρων ακαμψίας και ευκαμψίας καθώς και των ισοδυνάμων μέτρων ελαστικότητας.

### 2.8.2 Μετασχηματισμός τάσεων

Η διαδικασία για το προσδιορισμό των μητρώων μετασχηματισμού  $[T_\sigma^+]$  και  $[T_\sigma^-]$  είναι η εξής:



Σχήμα 15: Διάγραμμα μετασχηματισμού τάσεων

- Κάνουμε μια τομή α-α κάθετα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου. Θέτουμε χάριν απλούστευσης  $s=\sin\theta$  και  $c=\cos\theta$ .

(1) Ισορροπία κατά τον άξονα x ( $\Sigma f_x = 0$ ) δίνει:

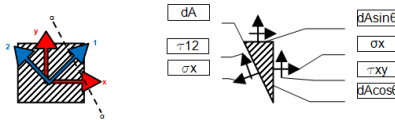
$$c\sigma_x + s\tau_{xy} = c\sigma_1 - s\tau_{12} \quad (2.36)$$

(2) Ισορροπία κατά τον άξονα y ( $\Sigma f_y = 0$ ) δίνει:

$$s\sigma_y + c\tau_{xy} = s\sigma_1 - c\tau_{12} \quad (2.37)$$

(3) Λύνοντας τις παραπάνω δύο εξισώσεις ως προς τις τάσεις  $\sigma_1$  και  $\tau_{12}$  προκύπτει:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= c^2\sigma_x + s^2\sigma_y + 2cs\tau_{xy} \\ \tau_{12} &= -cs\sigma_x + cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.38)$$



Σχήμα 16: Τομή α-α και ισορροπία δράσεων

β. Κάνουμε μια τομή β-β παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου.

(1) Ισορροπία κατά τον άξονα x ( $\Sigma f_x = 0$ ) δίνει:

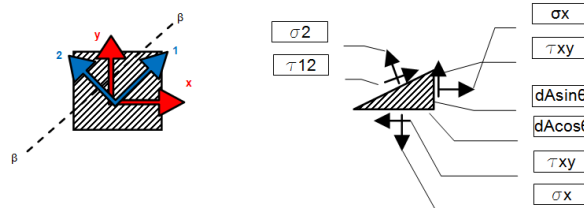
$$s\sigma_x - c\tau_{xy} = s\sigma_2 - c\tau_{12} \quad (2.39)$$

(2) Ισορροπία κατά τον άξονα y ( $\Sigma f_y = 0$ ) δίνει:

$$c\sigma_y - s\tau_{xy} = c\sigma_2 + s\tau_{12} \quad (2.40)$$

(3) Λύνοντας τις παραπάνω δύο εξισώσεις ως προς τις τάσεις  $\sigma_2$  και  $\tau_{12}$  παίρνουμε την ήδη γνωστή έκφραση για την  $\tau_{12}$  και

$$\sigma_2 = s^2\sigma_x + c^2\sigma_y - 2cs\tau_{xy} \quad (2.41)$$



Σχήμα 17: Τομή β-β και ισορροπία δράσεων

Οι εξισώσεις (2.38) και (2.41) μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^+] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

όπου  $[T_\sigma^+]$  είναι το μητρώο μετασχηματισμού των τάσεων  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  και  $\tau_{xy}$  από το στραμμένο σύστημα x-y στο σύστημα υλικού 1-2. Έτσι προσδιορίζονται οι τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\tau_{12}$  (η γωνία στροφής  $\theta$  είναι θετικά ορισμένη).

Το μητρώο αντίστροφου μετασχηματισμού  $[T_\sigma^-]$  προσδιορίζεται είτε με αντιστροφή του μητρώου  $[T_\sigma^+]$ , είτε θέτοντας αρνητική την γωνία στροφής  $\theta$  στην σχέση (2.42).

Χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό, οι τάσεις  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  και  $\tau_{xy}$  υπολογίζονται από τις τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\tau_{12}$ . Έτσι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^-] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

### 2.8.3 Μετασχηματισμός παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις ορίζονται βάσει των μετατοπίσεων ως ακολούθως:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad \text{και} \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \quad (2.44)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \text{και} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.45)$$

Για τα συστήματα συντεταγμένων ισχύει:

$$\begin{aligned} x_1 &= x \cos \theta + y \sin \theta = cx + sy \\ x_2 &= -x \sin \theta + y \cos \theta = -sx + cy \end{aligned} \quad (2.46)$$

και αντιστρόφως

$$\begin{aligned} x &= cx_1 - sx_2 \\ y &= sx_1 + cx_2 \end{aligned} \quad (2.43)$$

Ομοίως και για τις μετατοπίσεις ισχύει

$$\begin{aligned} u_1 &= cu + sv \\ u_2 &= -su + cv \end{aligned} \quad (2.47)$$

και αντιστρόφως

$$\begin{aligned} u &= cu_1 - su_2 \\ v &= su_1 + cu_2 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Συνεπώς, για την παραμόρφωση  $\varepsilon_1$  είναι:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial (cu + sv)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial (cu + sv)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} c^2 + \frac{\partial v}{\partial x} sc + \frac{\partial u}{\partial y} cs + \frac{\partial v}{\partial y} s^2 = \varepsilon_x c^2 + cs \gamma_{xy} + s^2 \varepsilon_y \end{aligned} \quad (2.49)$$

Καθ' όμοιο τρόπο προσδιορίζονται οι εκφράσεις των παραμορφώσεων  $\varepsilon_2$  και  $\gamma_{12}$ . Επομένως έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T_\varepsilon^+] \{\varepsilon\} \quad (2.50)$$

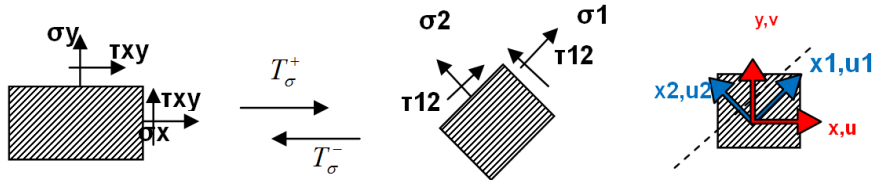
Ο μετασχηματισμός αυτός των παραμορφώσεων είναι επίσης ένας καθαρά γεωμετρικός μετασχηματισμός και το μητρώο  $[T_\varepsilon^-]$  του αντίστροφου μετασχηματισμού υπολογίζεται θέτοντας αρνητική γωνία στο  $[T_\varepsilon^+]$ , δηλαδή

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -cs \\ s^2 & c^2 & cs \\ 2cs & -2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T_\varepsilon^-] \{\varepsilon\} \quad (2.51)$$

Η διαφορά μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού  $[T_\sigma]$  και  $[T_\varepsilon]$  έγκειται στον ορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma_{12}=2\varepsilon_{12}$ . Γενικά ισχύει

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^+] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.52)$$

Εισάγοντας τον συντελεστή 1/2, ο οποίος πολλαπλασιάζει τις παραμορφώσεις  $\gamma$ , στους όρους του μητρώου μετασχηματισμού των τάσεων  $[T_\sigma^+]$  παίρνουμε το μητρώο μετασχηματισμού των παραμορφώσεων  $[T_\varepsilon^+]$ .



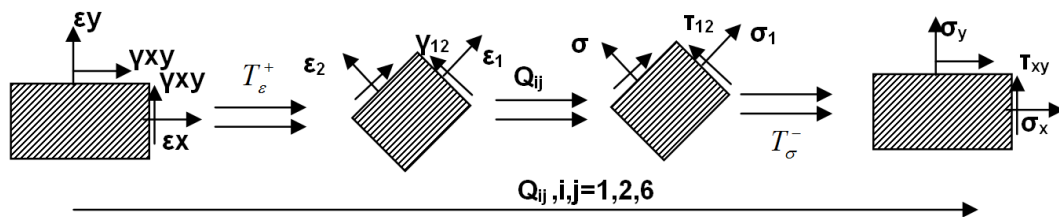
Σχήμα 18: Διάγραμμα μετασχηματισμού παραμορφώσεων

## 2.9 Μετασχηματισμός όρων ακαμψίας $Q_{ij}$

Η σχέση η οποία συνδέει τις τάσεις – παραμορφώσεις στο σύστημα 1-2 είναι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.53)$$

Θεωρούμε σύστημα x-y στραμμένο κατά γωνία  $\theta$  σε σχέση με το σύστημα υλικού. Θα προσδιορίσουμε τη σχέση που συνδέει τις τάσεις  $\sigma_x, \sigma_y$ , και  $\tau_{xy}$  με τις παραμορφώσεις  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ , και  $\gamma_{xy}$  στο στραμμένο σύστημα x-y. Αυτό συνίσταται στο πως εκφράζονται οι όροι ακαμψίας  $Q_{ij}$  στο σύστημα x-y.



Σχήμα 19: Διάγραμμα μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας  $[Q]$

Ο προσδιορισμός αυτός συνίσταται από 3 βήματα:

**α.** Εκφράζουμε τις παραμορφώσεις  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ , και  $\gamma_{12}$  ως προς τις παραμορφώσεις  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ , και  $\gamma_{xy}$  στο σύστημα x-y μέσω του θετικού μετασχηματισμού τάσεων  $[T_\varepsilon^+]$ .

$$\varepsilon_1 = c^2\varepsilon_x + s^2\varepsilon_y + cs\gamma_{xy}$$

$$\varepsilon_2 = s^2\varepsilon_x + c^2\varepsilon_y - cs\gamma_{xy}$$

$$\gamma_{12} = -2cs\varepsilon_x + 2cs\varepsilon_y + (c^2 - s^2)\gamma_{xy}$$

**β.** Εκφράζουμε τις  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  ως προς τις  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ .

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= (c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12})\varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12})\varepsilon_y + (Q_{11} - Q_{12})cs\gamma_{xy} \\ \sigma_2 &= (c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22})\varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22})\varepsilon_y + (Q_{12} - Q_{22})cs\gamma_{xy} \\ \tau_{12} &= -2csQ_{66}\varepsilon_x + 2csQ_{66}\varepsilon_y + (c^2 - s^2)Q_{66}\gamma_{xy}\end{aligned}$$

**γ.** Εκφράζουμε τα  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  ως προς τις  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  (αρνητικό [ $T_\sigma^-$ ])

$$\begin{aligned}\sigma_x &= c^2\sigma_1 + s^2\sigma_2 - 2cs\tau_{12} = \\ &= c^2[(c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12})\varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12})\varepsilon_y + cs(Q_{11} - Q_{12})\gamma_{xy}] + \\ &+ s^2[(c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22})\varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22})\varepsilon_y + cs(Q_{12} - Q_{22})\gamma_{xy}] - \\ &- 2cs[-2csQ_{66}\varepsilon_x + 2csQ_{66}\varepsilon_y + (c^2 - s^2)Q_{66}\gamma_{xy}]\end{aligned}$$

και ανακατατάσσοντας έχουμε:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= [c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 Q_{12} + 4c^2 s^2 Q_{66}]\varepsilon_x + \\ &+ [c^2 s^2 Q_{11} + c^2 s^2 Q_{22} + (c^4 + s^4)Q_{12} - 4c^2 s^2 Q_{66}]\varepsilon_y + \\ &+ [c^3 s Q_{11} - cs^3 Q_{22} + (cs^3 - c^3 s)Q_{12} + 2(cs^3 - c^3 s)Q_{66}]\gamma_{xy} = \\ &= \bar{Q}_{11}\varepsilon_x + \bar{Q}_{12}\varepsilon_y + \bar{Q}_{16}\gamma_{xy}\end{aligned}$$

Ομοίως, αναπτύσσουμε τα  $\sigma_y$  και  $\tau_{xy}$  και προσδιορίζουμε τις εκφράσεις:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \bar{Q}_{12}\varepsilon_x + \bar{Q}_{22}\varepsilon_y + \bar{Q}_{26}\gamma_{xy} \\ \tau_{xy} &= \bar{Q}_{16}\varepsilon_x + \bar{Q}_{26}\varepsilon_y + \bar{Q}_{66}\gamma_{xy}\end{aligned}$$

Οι μετασχηματισμένοι όροι ακαμψίας  $\bar{Q}_{ij}$  υπολογίζονται συναρτήσει των  $Q_{ij}$  ως ακολούθως:

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2 s^2 & 4c^2 s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2 s^2 & 4c^2 s^2 \\ c^2 s^2 & c^2 s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2 s^2 \\ c^2 s^2 & c^2 s^2 & -2c^2 s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3 s & -cs^3 & cs^3 - c^3 s & 2(cs^3 - c^3 s) \\ cs^3 & -c^3 s & c^3 s - cs^3 & 2(c^3 s - cs^3) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{Bmatrix} \quad (2.54)$$

Η σχέση μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας γράφεται υπό συμβολική μορφή:  
 $\bar{Q}_{ij} = [T_Q]Q_{ij}$ , όπου το  $[T_Q]$  είναι ένα μητρώο  $6 \times 4$ .

## 2.10 Μετασχηματισμός όρων ευκαμψίας $S_{ij}$

Η σχέση η οποία συνδέει τις παραμορφώσεις με τις τάσεις είναι:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.55)$$

Με ανάλογη διαδικασία με αυτή της παραγράφου 2.9 προκύπτει η σχέση μετασχηματισμού από τις τάσεις σε παραμορφώσεις:

Αναπτύσσοντας και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει η ακόλουθη σχέση μετασχηματισμού για τους όρους ευκαμψίας

$$\begin{Bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3 - c^3s) & cs^3 - c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s - cs^3) & c^3s - cs^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} \quad (2.54)$$

ή υπό συμβολική μορφή  $\bar{S}_{ij} = [T_s] S_{ij}$ , όπου  $T_s$  είναι ένα μητρώο  $6 \times 4$ .

Οι παρατηρήσεις για τους όρους ακαμψίας  $\bar{Q}_{ij}$  ισχύουν επίσης και για τους όρους ευκαμψίας  $\bar{S}_{ij}$ . Οι διαφορές μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού  $[T_s]$  και  $[T_Q]$  οφείλονται στον ορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$ . Τελικά, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων με όρους ευκαμψίας γίνεται στο στραμμένο σύστημα x-y:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.56)$$

## 2.11 Μηχανικές σταθερές υλικού

Για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού οι ίνες του οποίου σχηματίζουν γωνία  $\theta$  με το σύστημα x-y, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τα μέτρα ελαστικότητας, τους λόγους Poisson και το μέτρο διάτμησης που αντιστοιχούν στο στραμμένο σύστημα x-y. Οι ιδιότητες αυτές στο στραμμένο σύστημα x-y ονομάζονται μηχανικές σταθερές του υλικού και ορίζονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{61} & \bar{S}_{62} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & \nu_{sx}/G_{xy} \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & \nu_{sy}/G_{xy} \\ \nu_{xs}/E_x & \nu_{ys}/E_y & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Εμφανίζονται οι όροι  $\nu_{xs}$  και  $\nu_{ys}$  που εμπλέκουν κύριες και διατμητικές παραμορφώσεις. Οι όροι αυτοί δεν υπάρχουν στα ισότροπα υλικά. Επίσης αξίζει να παρατηρηθεί ότι το παραπάνω μητρώο είναι συμμετρικό, αλλά οι λόγοι του Poisson είναι διαφορετικοί.

Πειραματικά, οι μηχανικές σταθερές μπορούν να προσδιοριστούν ως εξής:

-Με μονοαξονικό εφελκυσμό κατά x

Ορίζεται:

$$\varepsilon_x = \bar{S}_{11}\sigma_x$$

$$\varepsilon_y = \bar{S}_{21}\sigma_x$$

$$\gamma_{xy} = \bar{S}_{61}\sigma_x \quad (2.58)$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\bar{S}_{21}}{\bar{S}_{11}}$$

$$\nu_{xs} = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x} = \frac{\bar{S}_{61}}{\bar{S}_{11}} \quad (2.59)$$

Προκύπτει:

$$\bar{S}_{21} = -\nu_{xy}\bar{S}_{11} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x}$$

$$\bar{S}_{61} = \nu_{xs}\bar{S}_{11} = \frac{\nu_{xs}}{E_x} \quad (2.60)$$

-Με μονοαξονικό εφελκυσμό κατά y

Ορίζεται:



$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \bar{S}_{12} \sigma_y \\ \varepsilon_y &= \bar{S}_{22} \sigma_y \\ \gamma_{xy} &= \bar{S}_{62} \sigma_y \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \nu_{yx} &= -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{22}} \\ \nu_{ys} &= \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_y} = \frac{\bar{S}_{62}}{\bar{S}_{22}} \end{aligned} \quad (2.62)$$

Προκύπτει:

$$\bar{S}_{12} = -\nu_{yx} \bar{S}_{22} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}$$

$$\bar{S}_{62} = \nu_{ys} \bar{S}_{22} = \frac{\nu_{ys}}{E_y} \quad (2.63)$$

- Με καθαρή διάτμηση

Ορίζεται:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \bar{S}_{16} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \bar{S}_{26} \tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= \bar{S}_{66} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \nu_{sx} &= \frac{\varepsilon_x}{\gamma_{xy}} = \frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{66}} \\ \nu_{sy} &= \frac{\varepsilon_y}{\gamma_{xy}} = \frac{\bar{S}_{26}}{\bar{S}_{66}} \end{aligned} \quad (2.65)$$

Προκύπτει:

$$\bar{S}_{16} = \nu_{sx} \bar{S}_{66} = \frac{\nu_{sx}}{G_{xy}}$$

$$\bar{S}_{26} = \nu_{sy} \bar{S}_{66} = \frac{\nu_{sy}}{G_{xy}} \quad (2.66)$$

## 2.12 Κριτήρια αστοχίας

### 2.12.1 Γενικά

Από μια απλή σύγκριση μεταξύ των συνήθων υλικών (ισότροπα) και των συνθέτων υλικών (ορθότροπα ή ανισότροπα) ως προς τις μηχανικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά τους, προκύπτει η ανάγκη καθορισμού νέων κριτηρίων αστοχίας για τα σύνθετα υλικά.

1. Τι ισχύει στα συνήθη υλικά (ισότροπα).
  - α. Ίδιες ιδιότητες προς κάθε κατεύθυνση.
  - β. Δεδομένου ότι ο λόγος Poisson είναι συνήθως  $\nu=0.3$ , χρειαζόμαστε μόνο την τιμή του μέτρου ελαστικότητας  $E$ .
  - γ. Επίσης, αρκεί να γνωρίζουμε την  $\sigma_y$  διότι  $\tau_y=0.50 \sigma_y$  έως  $0.60 \sigma_y$  (όπου η τάση διαρροής  $\sigma_y$  αντιστοιχεί σε μονοαξονικό εφελκυσμό).
  - δ. Εκτιμάται η τάση σε κάποια θέση αστοχίας του υλικού και γίνεται ο έλεγχος.
2. Τι ισχύει στα σύνθετα υλικά (ορθότροπα ή ανισότροπα).
  - α. Οι ιδιότητες είναι συνάρτηση του προσανατολισμού στο γενικό σύστημα  $x-y$ .
  - β. Απαιτούνται 4 ελαστικές σταθερές για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς.
  - γ. Επίσης, απαιτούνται 6 σταθερές για τον έλεγχο αστοχίας.
  - δ. Τα κριτήρια αστοχίας ισότροπων υλικών δεν μπορούν να εφαρμοστούν απ' ευθείας στα σύνθετα υλικά.

Ορίζονται οι ακόλουθες κρίσιμες τάσεις αστοχίας:

X τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά x.

X' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά x.

Y τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά y.

Y' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά y.

S τάση αστοχίας σε καθαρή διάτμηση.

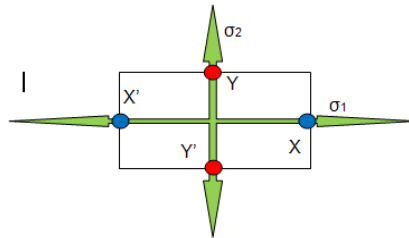
Οι κρίσιμες τάσεις X, X', Y, Y', και S προσδιορίζονται με πειράματα αναλόγως του τρόπου αστοχίας.

### 2.12.2 Κριτήριο μέγιστης τάσης

Διατυπώθηκε υπό του Jenkins (1920) για τα ορθότροπα υλικά και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου Rankine για τα ισότροπα. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται έστω μία από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X' < \sigma_1 < X \quad Y' < \sigma_2 < Y \quad |\tau_{12}| < S \quad (2.67)$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης μπορεί να παρασταθεί γραφικά στο επίπεδο  $(\sigma_1, \sigma_2)$  με  $\tau_{12}=0$  ως εξής:



Σχήμα 20: Γραφική παράσταση του κριτηρίου μέγιστης τάσης

### 2.12.3 Κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης

Διατυπώθηκε υπό του Waddoups (1967) και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου St. Venant για τα ισότροπα υλικά. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία του υλικού επέρχεται όταν δεν ικανοποιείται έστω μία από τις ακόλουθες σχέσεις:

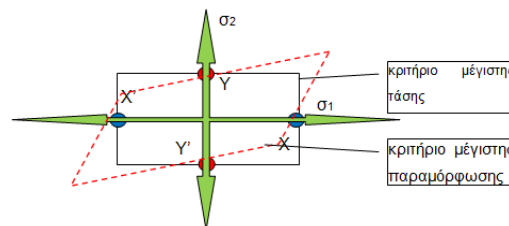
$$e'_x < \varepsilon_1 < e_x \quad e'_y < \varepsilon_2 < e_y \quad |\gamma_{12}| < \gamma_s \quad (2.68)$$

Μια άλλη διατύπωση του κριτηρίου αυτού συναρτήσει των κρίσιμων τάσεων είναι:

$$\frac{X'}{E_1} < \varepsilon_1 < \frac{X}{E_1} \quad \frac{Y'}{E_2} < \varepsilon_2 < \frac{Y}{E_2} \quad |\gamma_{12}| < \frac{S}{G_{12}} \quad (2.69)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\nu_{12}\sigma_2}{E_1} = \frac{X}{E_1} \Rightarrow \sigma_2 = \frac{\sigma_1 - X}{\nu_{12}} \quad (\text{κλίση } 1/\nu_{12})$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\nu_{21}\sigma_1}{E_2} = \frac{Y}{E_2} \Rightarrow \sigma_2 = Y + \nu_{21}\sigma_1 \quad (\text{κλίση } \nu_{21})$$



Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση του κριτηρίου μέγιστης παραμόρφωσης

### 2.12.4 Κριτήριο Tsai-Hill

Ο Hill (1950) παρουσίασε μια θεωρία αστοχίας για ανισότροπα υλικά:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 \leq 1 \quad (2.70)$$

όπου οι G, H, F, L, M, και N είναι σταθερές του υλικού.

Το κριτήριο αυτό είναι:

α. Τετραγωνικό κριτήριο και παρόμοιο με το κριτήριο von-Mises για ισότροπα. Το von-Mises συνδέεται με την ενέργεια στρεβλώσεως.

β. Στα ανισότροπα υλικά, η ενέργεια στρεβλώσεως και η ενέργεια μεταβολής όγκου δεν μπορούν να απομονωθούν διότι υπάρχει αλληλεπίδραση.

γ. Οι έξι σταθερές υλικού G, H, F, L, M, N μπορούν να αντιστοιχισθούν με τις τάσεις αστοχίας.

δ. Το κριτήριο αυτό είναι γενικό για τρισδιάστατη καταπόνηση.

Στη συνέχεια, ο Tsai (1968) συνέδεσε τις σταθερές υλικού στο κριτήριο Hill με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας. Εφαρμόζοντας μόνο τάση  $\sigma_1$  έχουμε  $(G + H)X^2 = 1$  οπότε

$$G + H = \frac{1}{X^2} \quad (2.71)$$

Εφαρμόζοντας μόνο τάση  $\sigma_2$  προκύπτει

$$F + H = \frac{1}{Y^2} \quad (2.72)$$

και, εφαρμόζοντας μόνο τάση  $\sigma_3$  προκύπτει

$$F + G = \frac{1}{Z^2} \quad (2.73)$$

όπου Z είναι η τάση αστοχίας κατά τη διεύθυνση 3. Επιλύοντας τις (2.71), (2.72) και (2.73) ως προς τις σταθερές H, G και F προκύπτει

$$\begin{aligned} 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \\ 2G &= \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \end{aligned} \quad (2.74)$$

Τέλος, εφαρμόζοντας μόνο τάσεις  $\tau_{23}$ ,  $\tau_{31}$  και  $\tau_{12}$  προκύπτουν αντίστοιχα

$$2L = \frac{1}{S_{YZ}^2} \quad (2.75)$$

$$2M = \frac{1}{S_{ZX}^2} \quad (2.76)$$

και

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (2.77)$$

Για ένα σύνθετο υλικό με προσανατολισμένες ίνες κατά τη διεύθυνση x, οι ιδιότητες κατά y είναι ίδιες με αυτές κατά z, και συνεπώς

$$2H = \frac{1}{X^2} \quad 2G = \frac{1}{X^2} \quad 2F = \frac{2}{Y^2} - \frac{1}{X^2} \quad (2.78)$$

Το κριτήριο Tsai-Hill εκφρασμένο στο επίπεδο απλοποιείται στη μορφή

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N\tau_{12}^2 \leq 1 \quad (2.79)$$

και αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.78) στην (2.79) γίνεται:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \leq 1 \quad (2.80)$$

Αστοχία υλικού λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται η ανωτέρω σχέση.

### 2.12.5 Κριτήριο Tsai-Wu

Το κριτήριο αυτό παρουσιάστηκε από τους Tsai και Wu (1971) ως μια πλέον γενικευμένη μορφή του κριτηρίου Tsai-Hill. Εκφράζεται με τη μορφή τάσεων και παραμορφώσεων ως εξής:

$$\begin{aligned} F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i &\leq 1 \\ G_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j + G_i\varepsilon_i &\leq 1 \end{aligned} \quad (2.81)$$

Θεωρώντας την πρώτη έκφραση ως προς τις τάσεις και αναπτύσσοντας προκύπτει

$$\begin{aligned} F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{16}\sigma_1\tau_{12} + \\ + 2F_{26}\sigma_2\tau_{12} + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} \leq 1 \end{aligned} \quad (2.82)$$

Η αλλαγή προσήμου της διατμητικής τάσης  $\tau_{12}$  δεν πρέπει να επηρεάζει το κριτήριο, άρα οι όροι  $F_{16}=F_{26}=F_6=0$ .

Έτσι η σχέση (2.82) απλοποιείται στην

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 \leq 1 \quad (2.83)$$

Οι έξι παράμετροι που περιέχονται στη σχέση (2.83) συσχετίζονται με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας του υλικού μέσω απλών πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού, θλίψης και καθαρής διάτμησης.

Εφαρμόζοντας μόνο  $\sigma_1=X$  ή  $\sigma_1=X'$  έπεται

$$F_{11}X^2 + F_1X = 1$$

$$F_{11}X'^2 + F_1X' = 1$$

απ' όπου προκύπτει

$$F_{11} = \frac{1}{XX'} \quad (2.84)$$

$$F_1 = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \quad (2.85)$$

Ομοίως, εφαρμόζοντας μόνο  $\sigma_2=Y$  ή  $\sigma_2=Y'$  έπεται

$$F_{22}Y^2 + F_2Y = 1$$

$$F_{22}Y'^2 + F_2Y' = 1$$

απ' όπου προκύπτει

$$F_{22} = \frac{1}{YY'} \quad (2.86)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \quad (2.87)$$

Τέλος, εφαρμόζοντας μόνο  $\tau_{12}=S$  έπεται  $F_{66}S^2=1$  απ' όπου προκύπτει

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (2.88)$$

Παραμένει ακόμα προς υπολογισμό η σταθερά  $F_{12}$  για την οποία απαιτείται ένα διαξονικό πείραμα. Μπορούμε όμως να εκτιμήσουμε θεωρητικά την  $F_{12}$  με τον ακόλουθο τρόπο. Η εξίσωση  $F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i = 1$  είναι μια κωνική επιφάνεια. Θεωρώντας την τομή της με το επίπεδο  $\tau_{12}=0$  έχουμε μια καμπύλη της μορφής

$$a \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \dots = 0$$

$$|\Delta| = b^2 - 4ac$$

Το πρόσημο της διακρίνουσας  $|\Delta| = 4F_{12}^2 - 4F_{11}F_{22}$  χαρακτηρίζει την μορφή της καμπύλης, η οποία είναι έλλειψη για  $|\Delta| < 0$ , υπερβολή για  $|\Delta| > 0$  και παραβολή για  $|\Delta| = 0$ . Οι μορφές της παραβολής και της υπερβολής αντιστοιχούν θεωρητικά σε υλικό με άπειρη αντοχή. Συνεπώς η μόνη αποδεκτή μορφή καμπύλης είναι η έλλειψη με  $|\Delta| < 0$ .

Αδιαστατοποιώντας την σταθερά  $F_{12}$  ως εξής

$$F_{12}^* = \frac{F_{12}}{\sqrt{F_{11}F_{22}}}$$

προκύπτει ότι για να είναι η μορφή της καμπύλης έλλειψη θα πρέπει

$$-1 < F_{12}^* < 1$$

Έχουμε λοιπόν προσδιορίσει ένα άνω και ένα κάτω όριο για την σταθερά  $F_{12}$ . Ορίζοντας επίσης  $x = \sigma_1 \sqrt{F_{11}}$ ,  $y = \sigma_2 \sqrt{F_{22}}$ ,  $z = \tau_{12} \sqrt{F_{66}}$ , το κριτήριο γίνεται:

$$x^2 + 2F_{12}^*xy + y^2 + z^2 + F_1^*x + F_2^*y \leq 1$$

όπου

$$F_1^* = \frac{F_1}{\sqrt{F_{11}}} = \frac{X' - X}{\sqrt{XX'}} \quad F_2^* = \frac{F_2}{\sqrt{F_{22}}} = \frac{Y' - Y}{\sqrt{YY'}}$$

Στο επίπεδο  $z=0$  (δηλαδή για  $\tau_{12}=0$ ) έχουμε

$$x^2 + 2F_{12}^*xy + y^2 + F_1^*x + F_2^*y = 1$$

και συγκρίνοντας με το κριτήριο von-Mises για ισότροπα υλικά που είναι

$$x^2 - xy + y^2 = 1$$

παρατηρούμε ότι για τα ισότροπα υλικά είναι  $F_{12}^* = -\frac{1}{2}$ . Άρα η τιμή  $F_{12}^* = -\frac{1}{2}$  είναι επίσης μια αποδεκτή τιμή και για τα σύνθετα υλικά.

Θεωρώντας την έκφραση του κριτηρίου Tsai-Wu ως προς τις παραμορφώσεις (εξ.2.81), μπορούμε να προσδιορίσουμε τις σταθερές  $G_{ij}$  και  $G_i$  αντικαθιστώντας τις εκφράσεις  $\sigma_1 = Q_{11}\varepsilon_1 + Q_{12}\varepsilon_2$ ,  $\sigma_2 = Q_{12}\varepsilon_1 + Q_{22}\varepsilon_2$ , και  $\tau_{12} = Q_{66}\gamma_{12}$  στην αρχική μορφή (2.82). Από αυτήν προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για τις σταθερές  $G_{ij}$  και  $G_i$

$$\begin{aligned} G_{11} &= F_{11}Q_{11}^2 + 2F_{12}Q_{11}Q_{12} + F_{22}Q_{12}^2 \\ G_{22} &= F_{11}Q_{12}^2 + 2F_{12}Q_{12}Q_{22} + F_{22}Q_{22}^2 \\ G_{12} &= F_{11}Q_{11}Q_{12} + 2F_{12}(Q_{11}Q_{22} + Q_{12}^2) + F_{22}Q_{12}Q_{22} \\ G_{66} &= F_{66}Q_{66}^2 \\ G_1 &= F_1Q_{11} + F_2Q_{12} \\ G_2 &= F_1Q_{12} + F_2Q_{22} \end{aligned} \quad (3.23)$$

και η αντίστοιχη έκφραση της (6.17) είναι

$$G_{11}\varepsilon_1^2 + 2G_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2 + G_{22}\varepsilon_2^2 + G_{66}\gamma_{12}^2 + G_1\varepsilon_1 + G_2\varepsilon_2 \leq 1 \quad (2.89)$$

Τα πλεονεκτήματα της έκφρασης του κριτηρίου Tsai-Wu ως προς τις παραμορφώσεις είναι

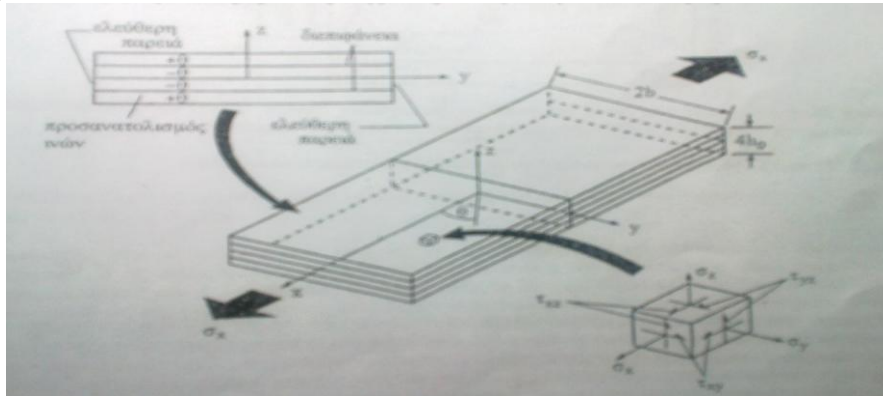
- α. Οι σταθερές  $G_{ij}$  και  $G_i$  είναι αδιάστατες.
- β. Οι παραμορφώσεις είναι σταθερές ή μεταβάλλονται γραμμικά σε μια διαστρωμάτωση και συνεπώς ο έλεγχος των παραμορφώσεων είναι πιο ευχερής από τον έλεγχο των τάσεων σε κάθε στρώση.

## 2.13 Διεπιφανειακές τάσεις – αποκολλήσεις

### 2.13.1 Γενικά

Σε μια πλάκα από σύνθετα υλικά με δεδομένη διαστρωμάτωση όπου ενεργούν τέμνουσες  $V_x$  και  $V_y$  αναπτύσσονται διεπιφανειακές τάσεις  $\tau_{zx}$  και  $\tau_{zy}$ . Διεπιφανειακές τάσεις όμως μπορούν να αναπτυχθούν κοντά στις άκρες διαστρωματώσεων χωρίς την ύπαρξη τεμνουσών δυνάμεων αλλά μόνον μεμβρανικών.

Εστω για παράδειγμα μια διαστρωμάτωση πάχους  $h$  και πλάτους  $2b$  που υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό  $\sigma_x$ . Στα ελεύθερα άκρα της υπάρχει μια ζώνη με πλάτος περίπου όσο και το πάχος της διαστρωμάτωσης, η οποία ουσιαστικά τελεί υπό τριαξονική καταπόνηση.



Σχήμα 22: Μοντέλο ανάλυσης διεπιφανειακών τάσεων σε διαστρωμάτωση υπό μονοαξονικό εφελκυσμό[1]

Από τη Θεωρία Ελαστικότητας έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.90)$$

Κοντά στις ελεύθερες άκρες της διαστρωμάτωσης όπου  $y = \pm b$  και  $\sigma'$  ένα στοιχείο όπου  $\partial \sigma_x / \partial x = 0$  (αμετάβλητες), από την πρώτη προκύπτει

$$\tau_{xz} = - \int_{-h/2}^z \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dz \quad (2.91)$$

Θεωρούμε ότι η τάση  $\tau_{xy}$  έχει σταθερή τιμή στο εσωτερικό του πλάτους  $2b$  της διαστρωμάτωσης, αλλά κοντά στα ελεύθερα άκρα της θα πρέπει να μηδενίζεται. Συνεπώς, καθώς η τάση  $\tau_{xy}$  για  $y \rightarrow \pm b$ , η μεταβολή  $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$  θα πρέπει να μεγαλώνει. Αρα η τάση  $\tau_{xz}$  αυξάνει από μηδέν που είναι στο εσωτερικό του πλάτους  $2b$  σε μια πολύ μεγάλη τιμή στα άκρα  $y = \pm b$ .

Οι λοιπές δύο διεπιφανειακές τάσεις  $\tau_{yz}$ ,  $\sigma_z$  είναι

$$\begin{aligned}\tau_{yz} &= - \int_{-h/2}^z \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dz \\ \sigma_z &= - \int_{-h/2}^z \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dz\end{aligned}\quad (2.92)$$

### 2.13.2 Αποκόλληση Στρώσεων-Κριτήρια

#### 2.13.2.1 Κριτήριο Kim-Soni

Όταν η εφελκυστική εγκάρσια τάση  $\bar{\sigma}_z$  κοντά στα ελεύθερα άκρα ή άλλες ασυνέχειες μιας διαστρωμάτωσης φθάσει και υπερβεί την εφελκυστική αντοχή  $Z$  τότε έχουμε αποκόλληση στρώσεων. Το κριτήριο διατυπώνεται ως εξής

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{b_o} \int_{b-b_o}^b \sigma_z(y,0) dy \leq Z \quad (2.93)$$

όπου  $b_o$  είναι το πάχος μιας στρώσης και  $Z$  είναι η αντοχή κατά  $z$ . Η αντοχή  $Z$  συνήθως λαμβάνεται ίση με την αντοχή  $Y$ .

#### 2.13.2.2 Γενικό Κριτήριο Brewer-Lagace

Το κριτήριο διατυπώνεται ως εξής

$$\left( \frac{\bar{\tau}_{xz}}{X_z} \right)^2 + \left( \frac{\bar{\tau}_{yz}}{Y_z} \right)^2 + \left( \frac{\bar{\sigma}_z}{Z} \right)^2 + \left( \frac{\bar{\sigma}'_z}{Z'} \right)^2 \leq 1 \quad (2.94)$$

όπου:  $\bar{\tau}_{xz}, \bar{\tau}_{yz}$ : μέσες διεπιφανειακές τάσεις

$\bar{\sigma}_z, \bar{\sigma}'_z$ : μέσες εφελκυστικές-θλιπτικές τάσεις

$X_z, Y_z$ : διατμητικές αντοχές

$Z, Z'$ : εφελκυστική και θλιπτική αντοχή κατά  $z$ .

και

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{\lambda_{\mu\epsilon\sigma\omicron}} \int_0^{\lambda_{\mu\epsilon\sigma\omicron}} \sigma_{ij} d\lambda$$

$\lambda$ : απόσταση από ένα σημείο αναφοράς

$\lambda_{\mu\epsilon\sigma\omicron}$ : μέση απόσταση

#### 2.13.2.3 Τροποποιημένο Κριτήριο Brewer-Lagace

Σε αυτό εξετάζονται μόνο οι διεπιφανειακές τάσεις  $\sigma_z$  και  $\tau_{xz}$ . Είναι

$$\left(\frac{\bar{\tau}_{xz}}{X_z}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\sigma}_z}{Z}\right)^2 \leq 1 \quad (2.95)$$

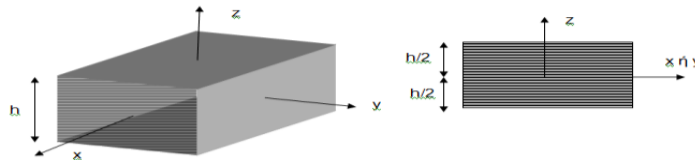
όπου  $\bar{\sigma}_{ij}$ ,  $X_z$ ,  $Z$  ως ανωτέρω.

## 2.14 Μεμβρανική και καμπτική καταπόνηση

### 2.14.1 Γενικά

Μορφώνουμε μια διαστρωμάτωση θέτοντας πολλές στρώσεις μαζί σε συνεργασία κάθε μία εκ των οποίων έχει τις δικές της ιδιότητες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως πάχος, κατεύθυνση ινών, συνδετικό υλικό - ίνες και λόγο συμμετοχής όγκου ινών. Κάθε διαστρωμάτωση χαρακτηρίζεται από τον κώδικα αλληλουχίας που περιγράφει την θέση κάθε στρώσης μέσα στο συνολικό πάχος  $h$  της διαστρωμάτωσης. Λαμβάνεται ως επίπεδο αναφοράς το μέσο επίπεδο της διαστρωμάτωσης που βρίσκεται στην θέση  $h/2$ . Έστω ότι κάθε στρώση αποτελείται από το ίδιο υλικό και πάχος. Αν έχουμε ζυγό αριθμό στρώσεων διατεταγμένων συμμετρικά ως προς το μέσο επίπεδο [ $\theta(z)=\theta(-z)$ ] τότε η διαστρωμάτωση λέγεται συμμετρική.

Η αρίθμηση αρχίζει από τα αρνητικά  $z$  προς τα θετικά (κάτω προς τα επάνω). Ο δείκτης  $S$  σημαίνει συμμετρία ως προς το μέσο επίπεδο, ενώ ο δείκτης  $T$  αναφέρεται στο συνολικό πάχος  $h$ . Αν έχουμε δίπλα δύο ή περισσότερες στρώσεις με την ίδια γωνία κατεύθυνσης  $\theta$ , τότε αυτές αποτελούν ομάδα και ο αριθμός των στρώσεων της ομάδας μπαίνει σαν δείκτης, π.χ. [ $0_3/90_2/45_2/-45_2$ ]<sub>s</sub>. Συνήθως στο μέσο επίπεδο τοποθετείται πυρήνας πάχους  $2z_c$  από ασθενές υλικό.



Σχήμα 23: Σύστημα αξόνων υλικού διαστρωμάτωσης

### 2.14.2 Μεμβρανική ακαμψία

Δεχόμαστε σταθερή παραμόρφωση κατά το πάχος της διαστρωμάτωσης, δηλαδή είναι

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(z) &= \varepsilon_x(0) = \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y(z) &= \varepsilon_y(0) = \varepsilon_y^0 \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$\gamma_{xy}(z) = \gamma_{xy}(0) = \gamma_{xy}^0$$

Επίσης ορίζουμε βοηθητικά την μέση τάση  $\bar{\sigma}$ , οπότε έχουμε:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \\ \bar{\sigma}_y &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \\ \bar{\tau}_{xy} &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \end{aligned} \quad (2.97)$$

και αντικαθιστώντας την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων  $\{\sigma\}=[Q]\{\varepsilon\}$ , πχ. στην πρώτη εκ των (2.97) προκύπτει



$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_x &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{11}\varepsilon_x + \bar{Q}_{12}\varepsilon_y + \bar{Q}_{16}\gamma_{xy}) dz = \\ &= \frac{1}{h} \left[ \int \bar{Q}_{11} dz \varepsilon_x + \int \bar{Q}_{12} dz \varepsilon_y + \int \bar{Q}_{16} dz \gamma_{xy} \right] = \\ &= \frac{1}{h} (A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy})\end{aligned}$$

Μεταθέτοντας στο αριστερό μέλος της παραπάνω σχέσεως το πάχος  $h$  και ορίζοντας την μεμβρανική δύναμη  $N_x$  ως το γινόμενο  $\bar{\sigma}_x h$  έχουμε την έκφραση

$$N_x = \bar{\sigma}_x h = A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy} \quad (2.98)$$

Η μεμβρανική δράση  $N_x$  είναι αξονική δύναμη ανά μονάδα μήκους που εφαρμόζεται στο μέσο επίπεδο της διαστρωμάτωσης και ουσιαστικά αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση. Καθ' όμοιο τρόπο ορίζονται οι μεμβρανικές δυνάμεις  $N_y$  και  $N_{xy}$ .

Ορίζοντας λοιπόν τους όρους μεμβρανικής ακαμψίας

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} dz, \quad i,j=1,2,6 \quad (2.99)$$

μπορούμε να γράψουμε την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση των τάσεων ως προς το πάχος της διαστρωμάτωσης ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (2.100)$$

όπου οι όροι  $A_{ij}$  λέγονται μεμβρανικές ακαμψίες της διαστρωμάτωσης και έχουν μονάδες κατανεμημένης δύναμης.

Αντιστρέφοντας την παραπάνω σχέση παίρνουμε

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.101)$$

όπου οι όροι  $a_{ij}$  είναι οι μεμβρανικοί όροι ευκαμψίας της διαστρωμάτωσης.

Αν κάθε στρώση  $k$  έχει πάχος  $t_k$  τότε η σχέση (2.99) γίνεται:

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} dz = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \quad (2.102)$$

### 2.14.3 Ενεργά μέτρα ελαστικότητας

Μία διαστρωμάτωση συμπεριφέρεται σαν ένα νέο υλικό με καινούριες ιδιότητες και μπορούμε να ορίσουμε τα ενεργά μέτρα ελαστικότητας ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}E_1^\alpha &= \frac{1}{\alpha_{11}h}, & E_2^\alpha &= \frac{1}{\alpha_{22}h}, & G_{12}^\alpha &= \frac{1}{\alpha_{66}h} \\ v_{12}^\alpha &= \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{11}}, & v_{16}^\alpha &= \frac{\alpha_{16}}{\alpha_{66}}, & v_{26}^\alpha &= \frac{\alpha_{26}}{\alpha_{66}}\end{aligned} \quad (2.103)$$

Η έννοια του ενεργού μέτρου ελαστικότητας εμπεριέχει όλες τις πληροφορίες για το σύνθετο υλικό, όπως τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών, τους λόγους συμμετοχής τους, καθώς και τον προσανατολισμό και τα πάχη κάθε στρώσεως.

## **2.15 Πειραματική αντοχή σύνθετων υλικών.**

### **2.15.1 Γενικά**

Λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών των σύνθετων υλικών , όπως η ανισοτροπία, είναι απαραίτητο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών αυτών να πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις. Εδώ θα αναφέρουμε συνοπτικά τις μεθόδους οι οποίες εφαρμόζονται στις πειραματικές μετρήσεις.

#### **2.15.1.1 Δοκιμές ινών**

Η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας  $E$  των ινών υπό στατική μονοαξονική καταπόνηση κατά τη διαμήκη τους έννοια μπορεί να καθοριστεί βάση του προτύπου ASTM D 3379.

#### **2.15.1.2 Δοκιμές μητρώων καθαρής ρητίνης**

Η τάση διαρροής σε εφελκυσμό , η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και η επιμήκυνση των δοκιμίων μητρώων καθαρής ρητίνης μπορούν να καθοριστούν με βάση τη μέθοδο που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM D 638-90 για τις μηχανικές ιδιότητες των πλαστικών σε εφελκυσμό.

### **2.15.2 Μετρήσεις βασικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών**

#### **2.15.2.1 Δοκιμές εφελκυσμού**

Οι εφελκυστικές αντοχές στρώσεων  $X$  και  $Y$  , τα μέτρα ελαστικότητας  $E_1$  και  $E_2$  και οι συντελεστές Poisson  $\nu_{12}$  και  $\nu_{21}$  μπορούν να προσδιοριστούν από δοκίμια σε διαμήκη ( $0^\circ$ ) και εγκάρσιο ( $90^\circ$ ) προσανατολισμό ινών σύμφωνα με τη τυποποιημένη μέθοδο δοκιμής ASTM 3039-00.

#### **2.15.2.2 Δοκιμές θλίψης**

Η πρότυπη μέθοδος δοκιμής ASTM D3410 εφαρμόζεται για το υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής και το μέτρο ελαστικότητας.

#### **2.15.2.3 Δοκιμές διάτμησης εντός επιπέδου**

Οι εντός επιπέδου ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού δεν είναι απαραίτητως ίσες με τις διατμητικές ιδιότητες κατά την έννοια του πάχους. Κατα συνέπεια απαιτούνται μέθοδοι δοκιμής που εφαρμόζουν καθαρή διάτμητική φόρτιση και κατά τις δύο έννοιες. Σύμφωνα με τον Whitney , οι τέσσερις ευρύτατα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι δοκιμών για τη μέτρηση των εντός επιπέδου διατμητικών ιδιοτήτων ενός σύνθετου υλικού με ενιαίο προσανατολισμό ινών είναι: ο μονοαξονικός εφελκυσμός διαστρωμάτωσης υπό γωνία  $[\pm 45^\circ]_{s,0}$  μονοαξονικός εφελκυσμός στρώσης υπό γωνία, η δοκιμή σε διάτμηση με κύλιτρα και η δοκιμή σε καθαρή στρέψη.

#### **2.15.2.4** Δοκιμές διάτμησης σε διεπιφάνειες στρώσεων

Εκτός από τη δοκιμή Iosipescu υπάρχει και μια άλλη δοκιμή που χρησιμοποιείται για τη διεπιφανειακή διατμητική αντοχή και η οποία ονομάζεται «δοκιμή διάτμησης βραχείας δοκού». Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αυτού του τύπου δοκιμής δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση των σύνθετων υλικών. Η δοκιμή γίνεται κατά το πρότυπο ASTM D-2344.

#### **2.15.2.5** Δοκιμές απλής κάμψης

Αντίθετα με ότι συμβαίνει στα ομοιογενή και ισότροπα υλικά, τα σύνθετα με διαστρωμάτωση δεν έχουν τις ίδιες καμπτικές ιδιότητες με τις αντίστοιχες αξονικές. Η μέθοδος δοκιμής ASTM D 790 προβλέπει δοκιμή κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων και μπορεί να χρησιμοποιείται και στα σύνθετα με διαστρωμάτωση.

#### **2.15.2.6** Δοκιμές διεπιφανειακής θραύσης

Οι δοκιμές διεπιφανειακής θραύσης είναι πολύ σημαντικές καθώς έχει μεγάλη σημασία σε συνδυασμό με το ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης για το χαρακτηρισμό της ανθεκτικότητας σε διεπιφανειακή θραύση.

#### **2.15.2.7** Δοκιμές συνάφειας ινών μητρώου

Η όσο το δυνατόν καλή συνάφεια μεταξύ ινών και μητρώου αποτελεί θεμελιώδη απαίτηση εάν ένα σύνθετο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό και η βελτιστοποίηση της συνάφειας μπορεί να λάβει χώρα μόνο αν έχουμε αξιόπιστες μεθόδους για τη μέτρηση αυτής. Ένα δοκίμιο που αποτελείται από μια ίνα ενσωματωμένη σε ένα δοκίμιο μητρώου υποβάλλεται σε εφελκυσμό και παρατηρείται σε μικροσκόπιο έως ότου η ίνα σπάσει σε τμήματα που αντιστοιχούν σε κρίσιμο μήκος  $L_c$ .



## 3 Πειραματικό Μέρος

### 3.1 Γενικά

Το υπό πειραματική διερεύνηση των ιδιοτήτων του πανέλο της εταιρίας Air Logistics Corporation, μπορεί να χαρακτηριστεί ως καμπυλόμορφη (“waffle” pattern) λεπτότοιχη πλάκα κατανομής τάσεων κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά, η οποία τοποθετούμενη επί εδάφους (επιδιώκεται συνήθως να είναι μετά από διαμόρφωση οριζόντιο) κατανέμει τα φορτία τροχοφόρων οχημάτων.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας στα προς χρήση τεμάχια είναι 14,80 m μήκος και 3,70m πλάτος. Φέρουν κολοροκωνικές εσοχές και εξοχές με διαστάσεις διάμετρος μεγάλου κύκλου 70,5 mm διάμετρος μικρού κύκλου 30mm ύψος 12mm σε επαναλαμβανόμενα στοιχεία(modules) διαστάσεων 30x30 cm. Προκειμένου να αναπαράξουμε αυτή σε σχεδιαστικά μοντέλα (cad), πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με μικρόμετρο και παχύμετρο.

Διαπιστώθηκε όμως μετά από παρατήρηση της επιφάνειας και με επιβεβαίωση από τις μετρούμενες διαστάσεις ότι όλη η κατασκευή στηρίζεται στο απλό σχήμα του κόλορου κώνου όπως φαίνεται στο σχήμα 25.



Σχήμα 24: Διαπιστευμένα όργανα μετρήσεων



Σχήμα 25: Μορφολογία επιφάνειας MOMAT

Τα υλικά τα οποία συνθέτουν την πλάκα είναι πιθανώς 6 υαλοϋφάσματα μονής κατεύθυνσης (unidirectional) με πιθανή πολυεστερική μήτρα. Αναφέρεται ως πιθανή πολυεστερική μητρα (matrix) καθώς δεν υπήρχαν στοιχεία για τις ιδιότητες και τον τύπο της μήτρας. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών κατέστη σχετικά αδύνατος καθώς δεν μπορούσε να προσδιοριστεί τόσο το αρχικό υλικό στη φάση κατασκευής όσο και οι ιδιοτητές του μετά την πολυετή χρήση του. Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε, καθώς υπήρχαν πολλές αβεβαιότητες, ήταν να κατασκευαστούν νέες συνθέσεις σε συγκεκριμένες διαστάσεις, προκειμένου να επιτευχθεί μια προσέγγιση των αρχικών ιδιοτήτων, με σκοπό να είμαστε σε θέση στη συνέχεια να πραγματοποιούμε αριθμητικές αναλύσεις για την αύξηση των ιδιοτήτων μέσω επεμβάσεων.

## 3.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού δοκιμίων ελέγχου

### 3.2.1 Γενικά

Ο προσδιορισμός των απαραίτητων δοκιμίων για τη πειραματική διερεύνηση βασίστηκε στις απαιτήσεις του προβλήματος. Οι απαιτήσεις για έλεγχο φέρουσας ικανότητας του μητρικού υλικού (ενισχυμένου και μη) σε επιφάνεια φόρτισης ίση με το μοτίβο κατασκευής και ταυτόχρονα διαστάσεων των μεταλλικών πλακών της μηχανής συμπίεσης 30x30 cm μας οδήγησε προφανώς στη κοπή τετράγωνων καμπυλόμορφων δοκιμίων σε αυτές τις διαστάσεις. Μετά τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας έπρεπε να ελεγχθεί η επίδραση των επεμβάσεων στην καμπυλότητα του υλικού καθώς επιδρά στην αποθήκευση και μεταφορά της συλλογής. Αντίστοιχα κατασκευάστηκαν και νέα δοκίμια διαφόρων συνθέσεων από πλευράς πάχους ενώ τα επιμέρους υλικά παρέμειναν τα ίδια.

### 3.2.2 Καμπυλόμορφα τετραγωνικά δοκίμια διαστάσεων 30x30 cm

Καμπυλόμορφα δοκίμια τετραγωνικών διαστάσεων 30X30cm αποκόπηκαν από το διατιθέμενο προς πειραματική διερεύνηση τμήμα και ταυτόχρονα κατασκευάστηκαν νέα δοκίμια με αριθμό υαλοϋφασμάτων. Από το διατιθέμενο προς διερεύνηση υλικό αποκόπηκαν 3 δοκίμια διαστάσεων 30x30 cm όπως φαίνεται στο εικονιζόμενο σχήμα.

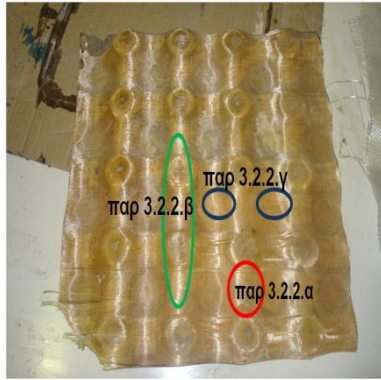


Σχήμα 26:Τετραγωνικά δοκίμια του μητρικού υλικού

Τα δοκίμια αυτά επιλέγησαν να υποβληθούν σε δοκιμή θλίψης προκειμένου να διαπιστωθεί η φέρουσα ικανότητα σε φορτίο και υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες έδρασης (ακλόνητες μεταξύ τους μεταλλικές πλάκες). Σε συνθήκες χρήσης η πλάκα MOMAT εδράζεται στο έδαφος, συνηθέστερα σε μεγάλης ενδοσιμότητας εδάφη και σπανιότερα σε σκληρά και μη προετοιμασμένα εδάφη. Σε δύο εξ αυτών πραγματοποιήθηκε ενίσχυση με απλή επικάλυψη με στρώμα πολυεστέρα και στο άλλο τοποθετήθηκαν 2 υαλοϋφάσματα τύπου roving 200gr/m<sup>2</sup> έκαστο.

Η λογική των ενισχύσεων ακολούθησε την αρχή της απλότητας, δηλαδή προσπαθήσαμε να ενισχύσουμε με τον πιο απλό, σε διαδικασία, τρόπο το υλικό μας προκειμένου να αρθούν οι παθογένειες (σχ.27) του οι οποίες συνοψίζονται σε:

- α. Διακοπή συνέχειας ινών λόγω θραύσης του υλικού.
- β. Αποκάλυψη ινών και ίσως και ολόκληρου υαλοϋφάσματος λόγω φθοράς του υλικού της μήτρας(resin matrix).
- γ. Αποκολλήσεις επιφανειακών στρωμάτων υαλοϋφάσματος.



Σχήμα 27: Παθογένειες φθαρμένου υλικού



Σχήμα 28: Δοκίμιο νέας σύνθεσης

Ταυτόχρονα αποφασίστηκε να κατασκευαστούν και νέα δοκίμια (σχ.28) ίδιων διαστάσεων και διαμόρφωσης. Η κατασκευή των νέων δοκιμίων στηρίχθηκε στην ιδέα να προσομοιώσουμε το μητρικό υλικό σε αντοχές με τη ακόλουθη λογική:

δ. Χρησιμοποιώντας τον ίδιο αριθμό υαλοϋφασμάτων με τα μετρούμενα στο μητρικό υλικό (υπολογίστηκαν σε 6).

ε. Χρησιμοποιώντας αριθμό υαλοϋφασμάτων για να επιτευχθεί το μετρούμενο στο μητρικό υλικό πάχος των 2,54 mm. Κατασκευάστηκαν δοκίμια λοιπόν με 7,8 και 12 υαλοϋφάσματα των 200gr/m<sup>2</sup> καθώς και με 3,4,5 υαλοϋφάσματα των 500gr/m<sup>2</sup> και υλικό μήτρας τον πολυεστέρα. Κατασκευάστηκε και ένα δοκίμιο με 12 υαλοϋφάσματα και εποξεική ρητίνη.

Τα νέα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης με σκοπό να διαπιστωθεί τόσο η φέρουσα ικανότητα όσο και οι μηχανισμοί αστοχίας.

### 3.2.3 Καμπυλόμορφα ορθογωνικά δοκίμια διαστάσεων 30x15 cm

Καμπυλόμορφα δοκίμια ορθογωνικών διαστάσεων 30X15 cm αποκόπηκαν από το διατιθέμενο προς πειραματική διερεύνηση τμήμα και ταυτόχρονα κατασκευάστηκαν νέα δοκίμια με αριθμό υαλοϋφασμάτων. Από το διατιθέμενο προς διερεύνηση υλικό αποκόπηκαν δοκίμια διαστάσεων 30x15 cm όπως φαίνεται στο εικονιζόμενο σχήμα.



Σχήμα 29: Δοκίμιο ορθογωνικών διαστάσεων

Τα δοκίμια αυτά επιλέγησαν να υποβληθούν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζεται η καμπυλότητα του δοκιμίου μετά από επεμβάσεις ενίσχυσης και κατά πόσο αυτές οι ενισχύσεις είναι αποτελεσματικές.

Ενισχύσεις πραγματοποιήθηκαν ως εξής :

- α. Ένα δοκίμιο με ενίσχυση ενός υαλοϋφάσματος 200gr/m<sup>2</sup>.
- β. Ένα δοκίμιο με ενίσχυση δύο υαλοϋφασμάτων 200gr/m<sup>2</sup>.
- γ. Ένα δοκίμιο με ενίσχυση ενός υαλοϋφάσματος 500gr/m<sup>2</sup>.

δ. Ένα δοκίμιο με ενίσχυση δύο υαλοϋφασμάτων  $200\text{gr/m}^2$  και εποξεική ρητίνη ανοίγοντας ταυτόχρονα διαμπερείς οπές στο μητρικό υλικό προκειμένου να δημιουργηθεί «μια τύπου κοχλίωση».

ε. Ένα δοκίμιο με ενίσχυση δύο υαλοϋφασμάτων  $200\text{gr/m}^2$  σε μορφή λωρίδων (strips) και εποξεική ρητίνη ανοίγοντας ταυτόχρονα διαμπερείς οπές στο μητρικό υλικό προκειμένου να δημιουργηθεί υποτυπώδης «κοχλίωση».

Η μεθοδολογία των ενισχύσεων στη περίπτωση αυτή στηρίχτηκε στη λογική να διαπιστώσουμε την επίδραση που έχει μια ενίσχυση στη καμπυλότητα του υλικού μας και κατά πόσο είναι αποδοτική. Η απλότητα και στη περίπτωση αυτή ήταν το ζητούμενο και για το λόγο αυτό αρχικά οι ενισχύσεις απλά επικολλήθηκαν επί του μητρικού υλικού και συνέχεια έγινε διάνοιξη οπών όπως εμφανίζεται στο σχήμα 30.



Σχήμα 30: Ενίσχυση δοκίμιου με λωρίδες υαλοϋφάσματος και εποξεική ρητίνη

Οι τακτική στη διάνοιξη των οπών είναι διαφορετική στα δύο δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με εποξεική ρητίνη και υαλοϋφάσματα. Στη περίπτωση της πλήρους κάλυψης με δύο (2) υαλοϋφάσματα οπές διανοήθηκαν μόνο στα κέντρα των κέντρα των μικρών κύκλων του κόλλορου κώνου (πράσινοι κύκλοι στο σχήμα 30). Ενώ στη περίπτωση ενίσχυσης με εποξεική ρητίνη και λωρίδες υαλοϋφάσματος διανοίχθηκαν οπές και στα καμπύλα τμήματα σημεία (πράσινοι και κόκκινοι κύκλοι στο σχήμα 30).

### 3.2.4 Δοκίμια ελέγχου εφελκυσμού ορθογωνικά (coupons)

Κατασκευάστηκαν δοκίμια ορθογωνικών διαστάσεων  $250 \times 25\text{mm}$  προκειμένου να ελεγχούν σε εφελκυσμό και με σκοπό να υπολογιστούν τα μέτρα ελαστικότητας και οι μέγιστη τάση εφελκυσμού. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε συνθέσεις ίδιες με τις συνθέσεις των καμπυλόμορφων δοκιμίων και συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν από 7 δοκίμια όλων των συνθέσεων 6,7,8 υαλοϋφασμάτων των  $200\text{gr/m}^2$  και 3,4,5 υαλοϋφασμάτων των  $500\text{gr/m}^2$ . Από τα 7 αυτά δοκίμια 5 ελέγχθηκαν σε εφελκυσμό χωρίς οποιαδήποτε μεταβολή στα χαρακτηριστικά τους ενώ τα υπόλοιπα 2 τοποθετήθηκαν σε νερό για 15 ημέρες. Επίσης 1 από τα τελευταία τοποθετήθηκε σε κατάψυξη μετά την 15ηήμερη παραμονή του στο νερό.



Σχήμα 31: Δοκίμια ελέγχου εφελκυσμού



### 3.3 Διαδικασία παραγωγής δοκιμίων

#### 3.3.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν καθόλη την εργασία αφορούν τόσο στη κατασκευή των δοκιμίων όσο και στη διαδικασία των πειραματικών διατάξεων. Είναι σκόπιμο να τα αναφέρουμε εξ αρχής καθώς θα γίνεται συχνά αναφορά στη συνέχεια. Για τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν υλικά μήτρας (matrix) ρητίνες τόσο πολυεστερικές όσο και εποξεικές καθώς και υαλοϋφάσματα 2 τύπων βάρους.

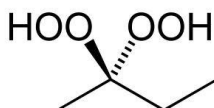
##### 3.3.1.1 Πολυεστερική ρητίνη

Χρησιμοποιήθηκε η ρητίνη Reversol P-9509 NW της εταιρίας Revertex με χαρακτηριστικά όπως στο σχήμα 32.

Η ρητίνη Reversol P-9509 NW χαρακτηρίζεται ως προεπιταχυνόμενη και για την σκλήρυνση της απαιτείται η προσθήκη καταλύτη του υπεροξειδίου της Μεθυλο Αιθυλικής Κετόνης (Methyl Ethyl Ketone Peroxide-MEKP) σε αναλογία 1% έως 2% ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

SPECIFICATIONS		TYPICAL PROPERTIES	
Resin Colour	Pinkish Opaque	Acid Value, mgKOH/g solid resin	30
Non-Volatile, %	56 – 59	Specific Gravity	1.12
Viscosity @ 25°C, cps - Brookfield, #3/60	450 – 600	Volumetric Shrinkage, %	7.6
Thixotropic Index @ 25°C - #3/6 and 60 rpm	1.8 – 3.5		
Geltime @ 25°C, minutes - 1% MEKP	25-35		

Σχήμα 32:Χαρακτηριστικά πολυεστερικής ρητίνης



Σχήμα 33: Methyl Ethyl Ketone Peroxide 2D

##### 3.3.1.2 Εποξεική ρητίνη

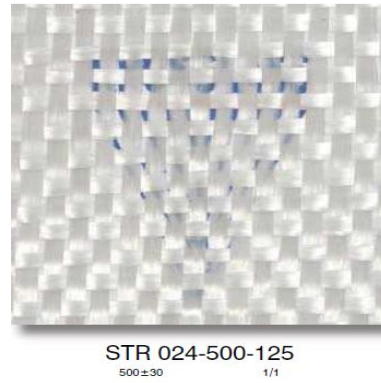
Χρησιμοποιήθηκε η εποξεική ρητίνη Lexotil PR 102 και ως σκληρυντής της το προϊόν Lexotil EM 402 της εταιρίας 5M. Η αναλογία ανάμιξης είναι 100:40 κατά βάρος ρητίνη/καταλύτη.

##### 3.3.1.3 Υαλούφασμα

Χρησιμοποιήθηκε της εταιρίας KROSSLASS με κωδικούς περιγραφής STR 015-200-110(200 gr/m<sup>2</sup>) και STR 024-500-110 (500gr/m<sup>2</sup>).



Σχήμα 34: Απεικόνιση υαλοϋφάσματος woven roving 200gr/m<sup>2</sup>



Σχήμα 35: Απεικόνιση υαλοϋφάσματος woven roving 500 gr/m<sup>2</sup>

### 3.3.1.4 Υλικό παραγωγής καλουπιού

Για την παραγωγή καλουπιού αναπαραγωγής της επιφάνειας και στη συνέχεια κατασκευής των καμπυλόμορφων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε εποξειδικό κονίαμα δύο συστατικών SINPAST P/A της εταιρίας SINTECNO. Το συγκεκριμένο κονίαμα επιλέχθηκε καθώς μετά την σκλήρυνση του αποκτά υψηλή αντοχή σε θλίψη και κρούση, ιδιότητες που απαιτήθηκαν κατά τη φάση παραγωγής των δοκιμίων.



Σχήμα 36: Εποξειδικό Κονίαμα 2 συστατικών της SINTECNO

### 3.3.1.5 Αποκολλητικό κερί

Χρησιμοποιήθηκε αποκολλητικό κερί για την εύκολη και απρόσκοπτη απόσπαση των δοκιμίων από το καλούπι παραγωγής. Το προϊόν το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας GRIGNARD με ονομασία Mold Magic.



Σχήμα 37: Αποκολλητικό κερί Magic Mold

### 3.3.1.6 Εποξική κόλλα 2 συστατικών

Στη φάση του πειραματικού ελέγχου των δοκιμίων τύπου coupons παρά το γεγονός ότι από το πρότυπο ανάφοράς ASTM 3039 δεν καθορίζεται η χρησιμοποίηση πρόσθετων τεμαχίων στα άκρα των δοκιμίων “Tabs” λόγω προδιαγραφών τοποθετήθηκαν απλά τεμάχια υαλοχάρτου τα οποία μετά από επανειλημμένες εφαρμογές διαφόρων κολλητικών μέσων καταλήψαμε στη χρήση της εποξικής κόλλας σύο συστατικών Epoxy Universal της εταιρίας BISON. Η κόλλα αυτή παρουσιάζει μεγάλη πρόσφυση στα δοκίμια και δεν παρατηρείται ολίσθηση μεταξύ δοκιμίου και υαλοχάρτου ακόμα και αν η θέση αστοχίας είναι πολύ κοντά στο άκρο του.



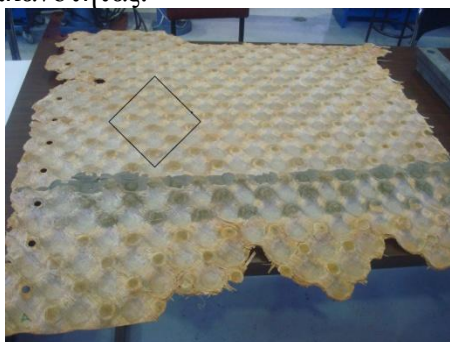
Σχήμα 38: Εποξική Κόλλα 2 Συστατικών



Σχήμα 39: Δοκίμιο μετά από την δοκιμή Εφελκυσμού με τεμάχια υαλόχαρτου

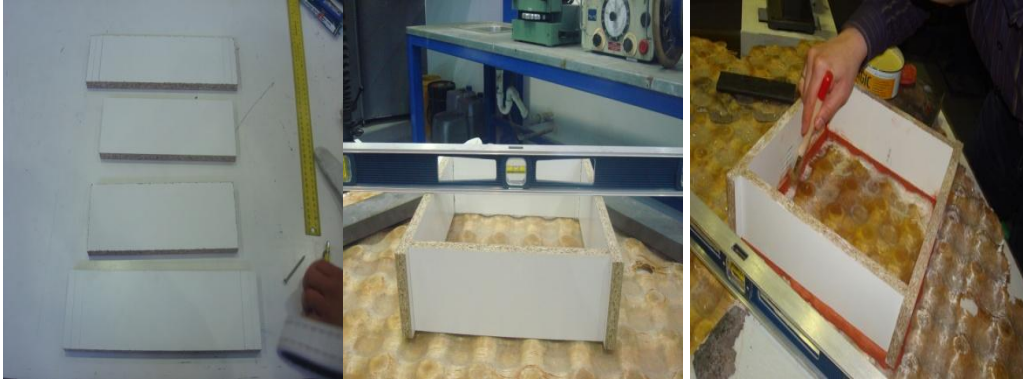
### 3.3.2 Περιγραφή παραγωγής τετραγωνικών καμπυλόμορφων δοκιμίων

Απο το προσδιορισμό των απαιτήσεων σε αντοχές θλίψης και κρούσης αποφασίστηκε να κατασκευαστεί καλούπι από το εποξειδικό κονίαμα SINPAST J/A. Αρχικά επιλέγει στο μητρικό υλικό μια περιοχή η οποία και παρουσίαζε τις λιγότερες από άποψη εμφάνισης φθορές. Δηλαδή δεν είχε μεγάλες αποκολλήσεις και ασυνέχειες ινών. Η προσπάθεια εύρεσης μιας «καθαρής» επιφάνειας χωρίς επέμβαση για την αποκατάσταση των ανωμαλιών οφείλεται στο γεγονός ότι στη συνέχεια από αυτή την επιφάνεια θα αποκόπτονταν τετραγωνικό δοκίμιο και δεν θέλαμε να έχουμε επέμβει σε αυτό πριν το προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας.



Σχήμα 40:Μαρκάρισμα περιοχής αποκοπής δοκιμίου

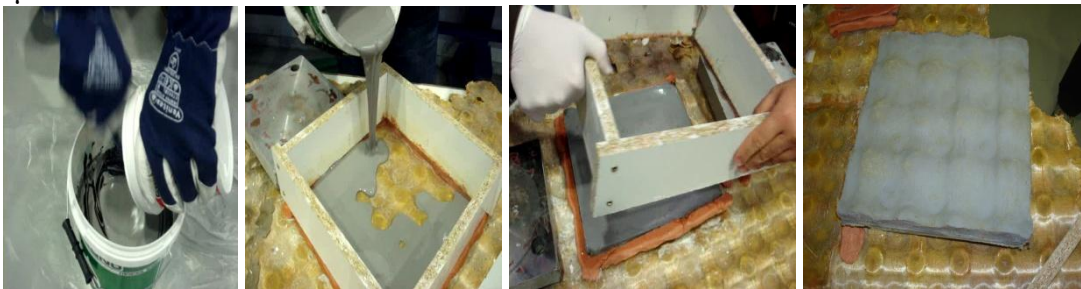
Στη συνέχεια κατασκευάστηκε τετράγωνο πλαίσιο από ινόπλακες μέσης πυκνότητας (MDF) διαστάσεων 30x30 cm το οποίο τοποθετήθηκε στη θέση που υποδεικνύεται στο σχήμα 41.



Σχήμα 41: Κατασκευή-τοποθέτηση-στεγάνωση ξύλινου πλαισίου και αδιαβροχοποίηση επιφάνειας

Η στεγάνωση του πλαισίου έγινε με πηλό καθώς στα σημεία επαφής με την επιφάνεια υπήρχαν κενά τα οποία έπρεπε να καλυφθούν. Στη συνέχεια η επιφάνεια χωρίς οποιαδήποτε άλλη επέμβαση καλύφθηκε με αποκολλητικό κερί.

Μετά τις απαραίτητες διαδικασίες αδιαβροχοποίησης και στεγνώματος του αποκολλητικού κεριού έγινε η αναμιξη του εποξειδικού κονιάματος δύο συστατικών σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρίας και το περιεχόμενο της ανάμιξης τοποθετήθηκε στο ξύλινο πλαίσιο για τη κατασκευή της μίας πλάκας του καλουπιού κατασκευής των δοκιμίων.



Σχήμα 42: Ανάμιξη κονιάματος τοποθέτηση στο καλούπι και αφαίρεση ξυλότυπου

Μετά παρέλευση μιας ημέρας αφαιρέθηκε ο ξυλότυπος και αποσπάστηκε το καλούπι με σχετική ευκολία καθώς είχε επέλθει μερική συρρίκνωση.

Για τη κατασκευή του αντιγράφου της επιφάνειας ο ξυλότυπος προσαρμόστηκε εκ νέου στην αρχική επιφάνεια και επαναλήθηκε η ίδια διαδικασία για τη παραγωγή του δευτέρου τμήματος του καλουπιού.

### 3.3.2.1 Περιγραφή παραγωγής δοκιμίων

Μετα τη κατασκευή των δύο τεμαχίων του καλουπιού άρχισε η χειρονακτική (hand-lay up) παραγωγή των δοκιμίων η οποία είναι η ίδια για όλα τα δοκίμια και μπορούμε να τη συνοψίσουμε στα εξής στάδια:

α. Κέρωμα της επιφάνειας των δύο πλακών. Αναμονή λίγων λεπτών για να στεγνώσει το αποκολλητικό κερί και στη συνέχεια με σκληρό πανί γυαλίζουμε την επιφάνεια.



Σχήμα 43: Κέρωμα επιφάνειας με αποκολλητικό κερί και επίστρωση με PVA

β. Αφού έχει στεγνώσει το κερί και έχει στιλβωθεί η επιφάνεια, με ένα πινέλο καλής ποιότητας αλλά μαλακής τρίχας επιστρώνεται ένα λεπτό στρώμα Πολυβινυλικής Αλκοόλης (Polyvinyl Alcohol –PVA) ένα χημικό υγρό το οποίο όταν στεγνώσει έχει πολύ λεπτό πάχος είναι σχεδόν αδιάρατο αλλά με τη χρήση του επιτυγχάνεται λεία επιφάνεια του παραγόμενου δοκιμίου.

γ. Κοπή των υαλοφασμάτων στο μέγεθος του καλουπιού με διεύθυνση των ινών σε  $0^\circ, 90^\circ$ . Η διεύθυνση αυτή επιδιώχθηκε με τη κατασκευή του δοκιμίου στραμμένου κατά  $45^\circ$  ως προς το μήκος της πλάκας του μητρικού υλικού προκειμένου να είναι πιο εύκολη η τοποθέτηση των υαλοφασμάτων.

δ. Ζύγιση των τμημάτων υαλοφάσματος με ζυγό προκειμένου να επιτευχθεί αναλογία 70:30 υαλοφάσματος και ρητίνης. Φυσικά τις περισσότερες των εφαρμογών απαιτήθηκε η ανάμιξη και νέας ποσότητας καταλύτη-ρητίνης (πέραν αυτής που αναλογούσε στο 30% του δοκιμίου) καθώς δεν μπορούσε να προβλεφθεί η απώλεια στο πινέλο εμποτισμού καθώς και ο βαθμός εμποτισμού σε κάθε σημείο του καλουπιού με αποτέλεσμα να γίνεται υπερκατανάλωση της ρητίνης. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε κατα μια έννοια με την «υβριδική» μέθοδο hand lay-up που εφαρμόστηκε καθώς μετά την τοποθέτηση των υαλοφασμάτων και εμποτισμό αυτών τα καλούπια συμπίεζονταν ελεγχόμενα με τη τοποθέτηση μεταλλικών πλακών εφαρμόζοντας ένα είδος compress molding. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η περιττή ποσότητα ρητίνης να αφαιρείται και να επιτυγχάνεται το επιθυμητό πάχος δοκιμίου το οποίο καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από το πάχος των υαλοφασμάτων.



Σχήμα 44: Προετοιμασία υλικών για κατασκευή δοκιμίου

στ. Μετά την ανάμιξη της ρητίνης και του καταλύτη επιστρώνεται επί του καλουπιού ποσότητα ρητίνης και τοποθετείται το πρώτο κομμάτι υαλοφάσματος το οποίο εμποτίζεται με τη βοήθεια του πινέλου. Μόλις εμποτιστεί συνεχίζεται η ίδια διαδικασία μέχρι να τοποθετηθούν όλα τα κομμάτια υαλοφάσματος. Με το πέρας της διαδικασίας τοποθετείται το άνω τμήμα του καλουπιού και στη συνέχεια τοποθετούνται οι πλάκες συμπίεσης.



Σχήμα 45: Διαδικασία εμποτισμού υαλοϋφασμάτων

ζ. Τέλος με τη παρέλευση ενός τουλάχιστο 24ώρου το δοκίμιο αφαιρείται από τη μήτρα.

η. Επανάληψη της διαδικασίας απο 7.3.2.2.1 έως 7.3.2.2.6 για κάθε δοκίμιο. Τα δοκίμια τα οποία παρήχθησαν είναι με αριθμό τεμαχίων υαλοϋφάσματος 6,7,8,12 των 200gr/m<sup>2</sup> με πολυεστερική ρητίνη 12 των 200gr/m<sup>2</sup> με εποξεική ρητίνη και 3,4,5 των 500gr/m<sup>2</sup>.

### 3.3.2.2 Περιγραφή Κοπής και Διαμόρφωσης των Δοκιμίων

Τα δοκίμια τα οποία κατασκευάστηκαν, λόγω του τρόπου κατασκευής (hand lay-up) και της αδυναμίας να επιτευχθεί μια ακριβής εξαρχής κοπή των υαλοϋφασμάτων στις διαστάσεις που απαιτούνταν, λόγω έλλειψης κατάλληλων εργαλείων κοπής, διαμορφώθηκαν σε ύστερο χρόνο. Η διαμόρφωση έγινε με μηχάνημα κοπής (σέγα) με μεταλλική λεπίδα. Διαπιστώθηκε από δοκιμαστική κοπή ότι απαιτούνταν λεπίδα με πολύ πυκνή διάταξη οδόντων και επιλέχθηκε η λεπίδα κοπής μεταλλικών ελασμάτων.



Σχήμα 46: Κοπή και διαμόρφωση δοκιμίων

### 3.3.3 Περιγραφή παραγωγής καμπυλόμορφων ορθογωνικών δοκιμίων

Η παραγωγή των καμπυλόμορφων με νέα σύνθεση δοκιμίων προήλθε από την απαίτηση να επιτευχθεί μια προσομοίωση ως προς το μητρικό υλικό με επιδίωξη να διαπιστωθεί η καμπυλότητα των νέων συνθέσεων σε σχέση με το μητρικό υλικό, ο αποδοτικότερος τρόπος σύνδεσης παλιού και νέου υλικού ενίσχυσης και κατά πόσο επιδρά η ενίσχυση στη καμπυλότητα.

#### 3.3.3.1 Περιγραφή παραγωγής καλουπιών για τη παραγωγή δοκιμίων

Στη περίπτωση αυτή λόγω του γεγονότος ότι η επιφάνεια των καλουπιών και τα τεμάχια υαλοϋφάσματος είναι σχετικά μικρά επιλέχθηκε να κατασκευαστούν καλούπια από γύψο κοινό με ενίσχυση από υαλόπλεγμα. Κατασκευάστηκε τετράγωνο πλαίσιο από ινόπλακες μέσης πυκνότητας (MDF) διαστάσεων 30x15 cm.

Η στεγάνωση του πλαισίου έγινε με πηλό καθώς στα σημεία επαφής με την επιφάνεια υπήρχαν κενά τα οποία έπρεπε να καλυφθούν. Στη συνέχεια η επιφάνεια χωρίς οποιαδήποτε άλλη επέμβαση καλύφθηκε με αποκολλητικό κερί.

Μετά τις απαραίτητες διαδικασίες αδιαβροχοποίησης και στεγνώματος του αποκολλητικού κεριού έγινε η αναμιξη του κοινού οικοδομικού γύψου και το περιεχόμενο της ανάμιξης τοποθετήθηκε στο ξύλινο πλαίσιο για τη κατασκευή της μίας πλάκας του καλουπιού κατασκευής των δοκιμίων.



Σχήμα 47: Παραγωγή καλουπιών από κοινό οικοδομικό γύψο

### 3.3.3.2 Περιγραφή παραγωγής δοκιμίων

Τα νέα δοκίμια τα οποία παρήχθησαν σε αυτή τη περίπτωση ήταν μόνο δύο με 12 τεμάχια υαλοϋφάσματος  $200\text{gr}/\text{m}^2$  και συνδετικό υλικό πολυεστερική ρητίνη στο ένα και εποξεική στο άλλο. Η λογική της κατασκευής μόνο αυτών των δύο νέων δοκιμίων στηρίχτηκε στο γεγονός των αποτελεσμάτων τα οποία εξηγήθηκαν από τις δοκιμές συμπίεσης των τετραγωνικών καμπυλόμορφων δοκιμίων. Απο εκεί λοιπόν διαπιστώσαμε ότι σε καμία άλλη περίπτωση δοκιμίων μεταξύ των αυτών με 6,7,8 τεμάχια υαλοϋφάσματος  $200\text{gr}/\text{m}^2$  και 3,4,5 τεμάχια υαλοϋφάσματος  $500\text{gr}/\text{m}^2$  δεν επετεύχθησαν αντοχές μεγαλύτερες από αυτές του μητρικού υλικού και μια τυχόν επίτευξη θα προερχόταν από δοκίμιο με συνθεση  $12/200\text{gr}/\text{m}^2$ .

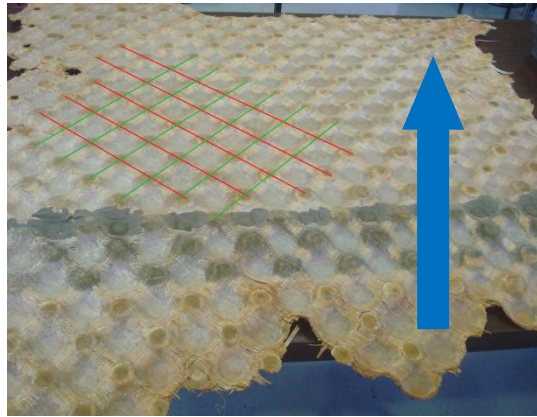
Η διαδικασία παραγωγής είναι ίδια με αυτή που προαναφέρθηκε στη περίπτωση των τετραγωνικών καμπυλόμορφων δοκιμίων στις παραγράφους 7.3.2.2.1 έως 7.3.2.2.6 με τη μόνη διαφορά ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν και η δύο πλάκες από γύψο και απλά εδώ η διαδικασία λόγω της μικρής επιφάνειας ήταν χειρονακτική (hand lay-up).

### 3.3.3.3 Περιγραφή κοπής και διαμόρφωσης των δοκιμίων

Η διαδικασία και τα εργαλεία κοπής και διαμόρφωσης των δοκιμίων είναι τα ίδια με αυτά της παραγράφου 3.3.2.2.

### 3.3.4 Περιγραφή παραγωγής ορθογωνικών δοκιμίων για έλεγχο εφελκυσμού

Κατά την αναγνώριση των αναγκών απαιτήθηκε η γνώση του μέτρου ελαστικότητας και της μέγιστης τάσης εφελκυσμού κάθε δοκιμίου το οποίο παρήχθει. Δηλαδή αναφερόμαστε στα δοκίμια με 3,4,5,6,7,8 τεμάχια υαλοϋφάσματος. Τα δοκίμια τα οποία παρήχθησαν για έλεγχο σε εφελκυσμό είχαν διάταξη ινών  $\pm 45^\circ$  σε κάθε στρώση. Αυτή η διάταξη ελέγχου προέκυψε από την διάταξη των ινών μέσα στο υλικό. Η διαφορά των ινών με το μητρικό υλικό είναι ότι στο τελευταίο αξιολογήθηκε η ύπαρξη ινών ενιαίας κατεύθυνσης (unidirectional) σε σχέση με τα νέα υαλοϋφάσματα τύπου roving. Στο σχήμα 7.27 φαίνεται με πράσινες και κόκκινες γραμμές η διάταξη των ινών και με μπλέ βέλος η κατεύθυνση χρήσης της πλάκας MOMAT μετά την τοποθέτησής της.



Σχήμα 48: Κατεύθυνση ινών στο μητρικό υλικό και διάταξη χρήσης αυτού

#### 3.3.4.1 Περιγραφή παραγωγής των δοκιμίων τύπου coupon

Η παραγωγή αυτού του τύπου δοκιμίων ήταν η πιο εύκολη καθώς δεν απαιτήθηκε κανένας ιδιαίτερος εξοπλισμός ή καλούπι. Πάνω σε ένα τραπέζι τοποθετήθηκε ένα κοινό τζάμι. Εκεί αρχικά τοποθετούνταν ποσότητα ρητίνης και στη συνέχεια ένα ένα τα τεμάχια υαλοϋφάσματος σε κατεύθυνση ινών  $0^\circ, 90^\circ$  τα οποία εμποτίζονταν με πινέλο πιέζοντας ταυτόχρονα με απλό ρολό τον αέρα ο οποίος τυχόν είχε εγκλωβιστεί μεταξύ των πανιών. Με την παρέλευση ενός 24ώρου το τεμάχιο αφαιρούνταν με σχετική ευκολία. Κατασκευάστηκαν με τη διαδικασία αυτή 6 τεμάχια με συνθέσεις 3,4,5,6,7,8 υαλουφάσματα.

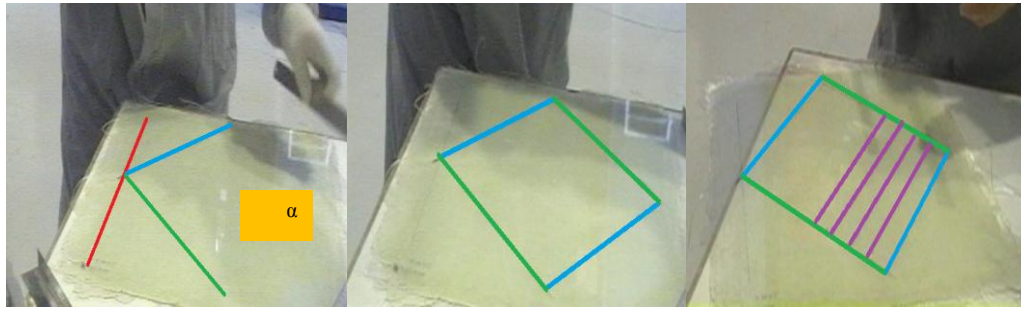


Σχήμα 49: Τεμάχιο κατασκευής coupons

#### 3.3.4.2 Περιγραφή κοπής και διαμόρφωσης των δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων έγινε με διάταξη των υαλουφασμάτων σε κατευθύνσεις  $0^\circ, 90^\circ$ . Προκειμένου να διαμορφωθούν coupons με διάταξη  $\pm 45^\circ$  έγινε η εξής απλή διαδικασία: Εντοπίσαμε μια ίνα του τεμαχίου. Σημειώσαμε αυτή με μολύβι και στη συνέχεια με μοιρογνωμόνιο σχεσιάσαμε την γωνία των  $45^\circ$ . Ακολουθώντας με ένα κανόνα και παράλληλη μεταφορά του ανα  $25\text{ mm}$  σχεδιάσαμε τα δοκίμια στις διαστάσεις που όριζε το πρότυπο ASTM D 3039-00 δηλαδή  $250\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ . Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε για όλα τα τεμάχια η ίδια. Στο σχήμα 7.29α φαίνεται με κόκκινη γραμμή η ίνα αναφοράς με μπλέ γραμμή ο σχεδιασμός των  $45^\circ$  και με πράσινη γραμμή ορίζεται το μήκος των δοκιμίων.





Σχήμα 50: Στάδια κοπής coupons

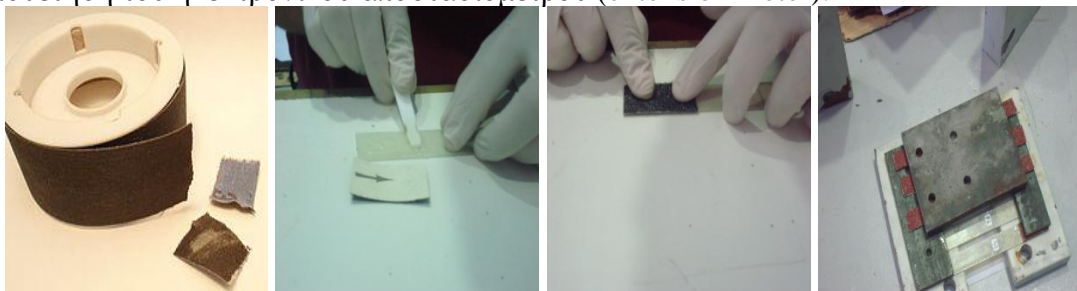
Για τη κοπή των δοκιμίων αρχικά έγινε δοκιμή με πολυεργαλείο χάραξης της εταιρίας dremel προκειμένου να αποφύγουμε αποκολλήσεις των ινών ή καταστροφή της ρητίνης. Διαπιστώσαμε όμως ότι η κοπή ήταν ευκολότερη με σέγα και δεν προκαλούσε ουσιαστικές φθορές. Έχοντας κόψει αρχικά τα δοκίμια με κάποιες ανοχές ως προς το πλάτος των 25 mm προκειμένου στη συνέχεια να διορθώσουμε τυχόν ατέλειες, στη συνέχεια για να διαμορφώσουμε παράλληλες πλευρές τα τοποθετήσαμε ένα ένα σε μέγγενη όπου έγινε και η τελική επεξεργασία.



Σχήμα 51: Κοπή και διαμόρφωση coupons

### 3.3.4.3 Προετοιμασία των δοκιμίων για έλεγχο

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 3039M-00, τα δοκίμια λόγω του πάχους, πρέπει να έχουν διαστάσεις 250mmx25mm και στα άκρα τους για προστασία από τις λαβές της μηχανής εφελκυσμού δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν τεμάχια (tabs) από το ίδιο υλικό, αλλά από υαλόχαρτο (Emery Cloth - 40 Grit). Για το λόγο αυτό τοποθετήσαμε τεμάχια υαλοχάρτου διαστάσεων 50mmx25mm στα άκρα των δοκιμίων, κολλήθηκαν με εποξειδική κόλλα 2 συστατικών και συμπίεστηκαν μεταξύ μελλικών πλακών για 24 ώρες για σκλήρυνση της κόλλας. Επίσης σημειώθηκε το μέσο των δοκιμίων και στη συνέχεια σημειώθηκε απόσταση 25 mm εκατέρωθεν του μέσου προκειμένου να διευκολύνεται η τοποθέτηση του ηλεκτρονικού αποστασιομέτρου (extension meter).



Σχήμα 52: Τοποθέτηση των "Tabs"

## 3.4 Εκτέλεση των πειραματικών ελέγχων

### 3.4.1 Όργανα και χρησιμοποιούμενες συσκευές

#### 3.4.1.1 Instron LX 300

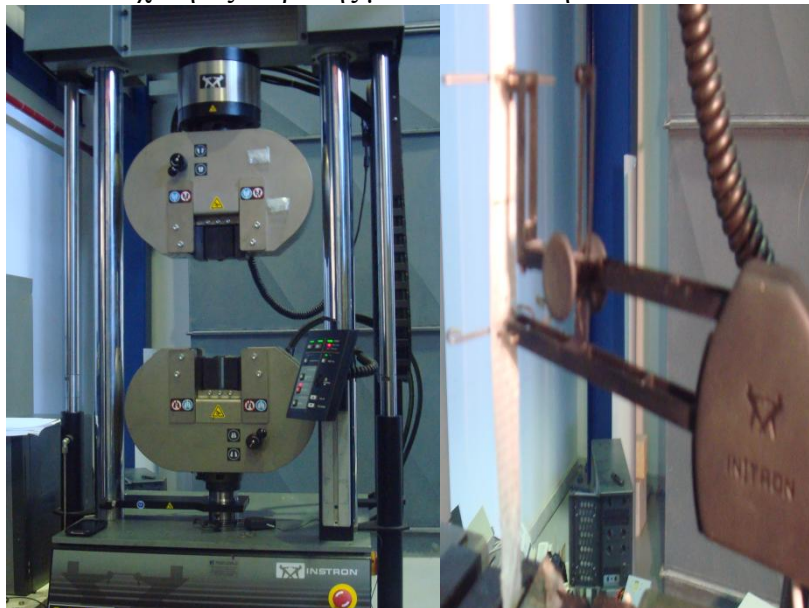
Για τη πραγματοποίηση όλων των τύπων των ελέγχων συμπίεσης, εφελκυσμού, κάμψης χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Instron 300 LX του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Τομέα Δομοστατικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η μηχανή αυτή έχει δυνατότητες εφαρμογής φορτίου εφελκυσμού 300kN ενώ 100kN σε συμπίεση. Έχει το πλεονέκτημα της υδραυλικής ρύθμισης ύψους μεταξύ των δύο της στελεχών.

#### 3.4.1.2 Λογισμικό συλλογής αποτελεσμάτων Bluehill® 3

Bluehill ® 3 είναι η πιο πρόσφατη έκδοση του δημοφιλούς λογισμικού Bluehill Instron, περιέχουν βελτιώσεις και χαρακτηριστικά που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για τις απαιτήσεις των χρήστη.

#### 3.4.1.3 Instron Extensometer

Η μέτρηση των παραμορφώσεων πραγματοποιήθηκε με το ηλεκτρονικό μηχανημα μέτρησης της Instron όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1. Η απόσταση αναφοράς για το όργανο μας ήταν 50mm ενώ οι ταχύτητες επιβολής μετατοπίσεων ήταν 1mm/min.



Σχήμα 53: Μηχανή Instron 300 LX και Extensometer

#### 3.4.1.4 Θερμόμετρο- υγρόμετρο

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας έγιναν από ένα όργανο μη διαπιστευμένο, αλλά δεν ήταν και το ζητούμενο στην εργασία καθώς μια τυπική καταγραφή αυτών ήταν ικανοποιητική.

### 3.5 Πειραματικός έλεγχος τετραγωνικών δοκιμίων

Η μέθοδος προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας του υλικού καθορίστηκε από τη λογική με την οποία χρησιμοποιείτε το υλικό στη τελική του μορφή ως λεπτότοιχη πλάκα κατανομής φορτίου και κατ' επέκταση κατανομής τάσεων. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να ελεγχεί η φέρουσα ικανότητα με δοκιμή συμπίεσης. Η δοκιμή συμπίεσης πραγματοποιήθηκε μεταξύ ασυμπίεστων μεταξύ τους πλακών, δηλαδή οι συνθήκες στήριξης και επιβολής φορτίου εφαρμόστηκαν με τη δυσμενέστερη για το υλικό μορφή τους. Η ενδοσιμότητα του εδάφους στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής του υλικού επιτρέπει την παραμόρφωση του υλικού και τάσεις αναπτύσσονται σε όλη την επιφάνεια του. Στη περίπτωση μας όμως το φορτίο επιβάλεται σε μέρος του υλικού (άνω και κάτω τμήμα κόλρων κώνων).

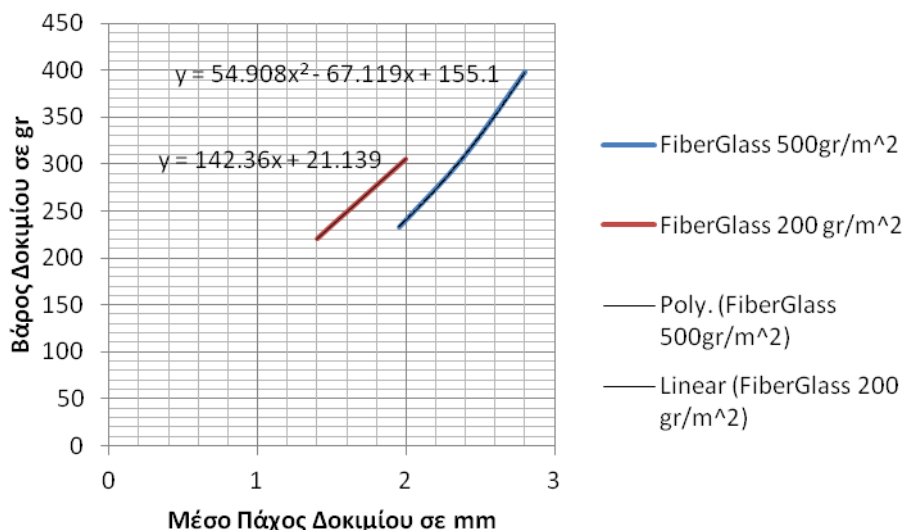
#### 3.5.1 Τεχνικά στοιχεία δοκιμίων προς έλεγχο

Τα δοκίμια στη περίπτωση αυτή διακρίνονται σε αυτά τα οποία διαμορφώθηκαν από το μητρικό και φθαρμένο υλικό και σε αυτά τα οποία κατασκευάστηκαν στη λογική του προσδιορισμού των μηχανισμών φθοράς του υλικού με την επίτευξη παρόμοιας το δυνατόν αντοχής.

A/A	Δοκίμιο	Σύνθεση	thickness (mm)	weight (gr)
1	Δ1	6/200gr	1.4	220.31
2	Δ2	8/200gr	2	305.84
3	Δ3	7/200gr	1.49	233.42
4	Δ4	3/500gr	1.95	233.01
5	Δ5	4/500gr	2.39	308.33
6	Δ6	5/500gr	2.8	397.65
7	Δ7	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης τετραγωνικής διατομής ενισχυμένο μόνο με πολυεστερική ρητίνη	2.54	394.64
8	Δ8	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης τετραγωνικής διατομής	2.54	364.7
9	Δ8R	Το Δοκίμιο Δ8 ενισχυμένο με εποξεική ρητίνη	2.56	390
10	Δ9	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης τετραγωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλοφάσματα 200gr/m <sup>2</sup>	2.6	499.7
11	Δ21	12/200 gr polyester	2.6	360
12	Δ22	12/200 gr epoxy	2.65	313

Πίνακας 2: Πίνακας τεχνικών στοιχείων τετραγωνικών δοκιμίων

Τα δοκίμια Δ1 έως Δ6 είναι αυτά τα οποία κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο hand lay-up και τα βάρη τους προσδιορίστηκαν με ζυγό ακριβείας. Τα δοκίμια από α/α 1-3 ανήκουν στην ίδια ομάδα από άποψη επιφανειακού βάρους υαλοφάσματος και παρουσιάζουν μια γραμμικότητα στην αύξηση του βάρους σε σχέση με τον αριθμό των υαλοφασμάτων όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 54. Τα δοκίμια από α/α 4-6 ανήκουν στην ομάδα των 500 gr/m<sup>2</sup> και παρουσιάζουν μια σχέση βάρους-πάχους πολυωνυμική 2<sup>00</sup> βαθμού.



Σχήμα 54: Διάγραμμα Πάχους-Βάρους δοκιμίων των 200 και 500gr/m<sup>2</sup>

Η πολυωνυμική αυτή σχέση στη περίπτωση των 500 gr/m<sup>2</sup> μπορεί να οφείλεται σε κατασκευαστικές ατέλειες όπως για παράδειγμα μεγαλύτερη ποσότητα ρητίνης στο δοκίμιο. Δεν αξιολογείται λοιπόν άμεσα μια τέτοια σχέση καθώς οι συνθήκες και μεν ήταν ίδιες στη κατασκευή όλων των δοκιμίων παρόλα αυτά αδύνατο να προβλεφθούν τυχόν αποκλίσεις.

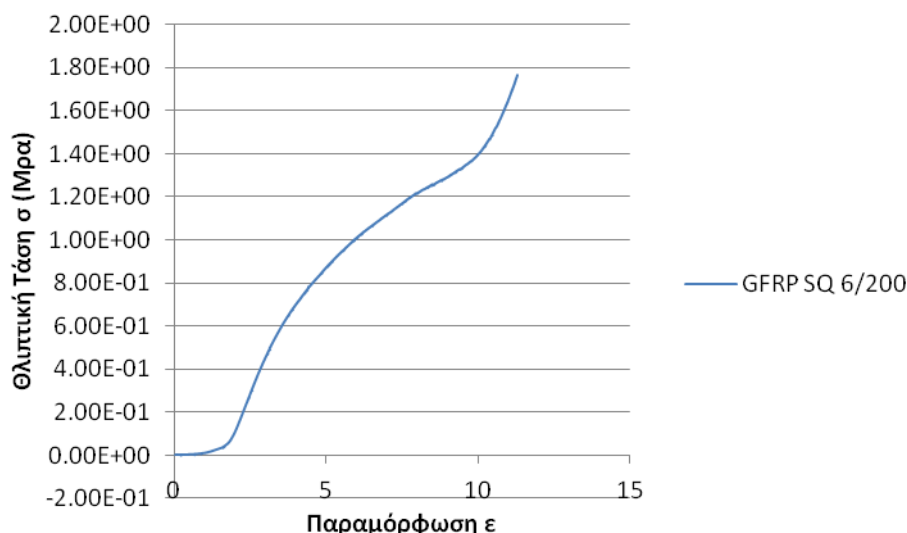
### 3.5.2 Δοκίμιο Δ1(6/200gr/m<sup>2</sup>)

Το δοκίμιο Δ1 αποτελείται από 6 τεμάχια υαλοφάσματος των 200 gr/m<sup>2</sup> συνολικού βάρους 220,31 gr.



Σχήμα 55: Δοκίμιο Δ1 200gr/m<sup>2</sup>

Το διάγραμμα το οποίο προέκυψε από την συλλογή στοιχείων με το λογισμικό Bluehill 3 και την επεξεργασία των δεδομένων στο Excel φαίνεται στο σχήμα 56. Από την αξιολόγηση του διαγράμματος θα πρέπει να τονίσουμε ότι μια αρχική περιοχή δεδομένων όπου εμφανίζονται αρνητικές τιμές παραμόρφωσης προκύπτει από το γεγονός ότι οι εικονιζόμενες στο σχήμα 55 πλάκες δεν έχουν έρθει σε επαφή πλήρη με το δοκίμιο.

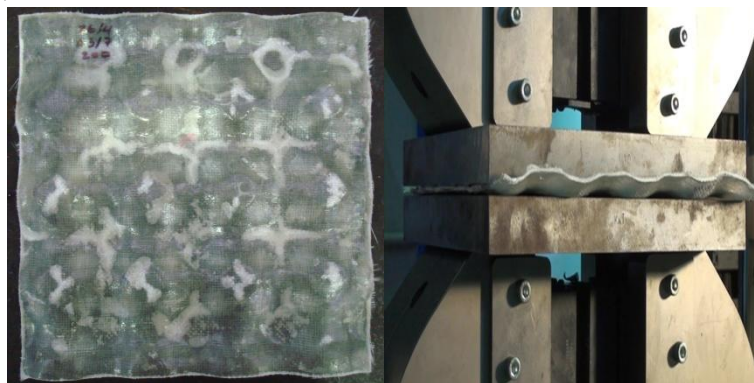


Σχήμα 56: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου Δ1

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τεθούν και τα όρια αποδοχής των δεδομένων. Το ύψος των δοκιμίων σε μέσες αποστάσεις άνω και κάτω κορυφών των κώνων είναι 12 mm. Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι τα δεδομένα κάνουν δύο αλλαγές στις κλίσεις τους, μια αρχικά μέχρι την συλλογή πραγματικών δεδομένων θλίψης του υλικού και μία στη περιοχή μεταξύ 10 και 11 mm παραμόρφωσης, όπου οι πλακές ουσιαστικά βρίσκονται σε εγγύτητα μεταξύ τους και «δίνουν» πλασματικά πλέον στοιχεία περί της αντοχής. Μιλάμε λοιπόν για μια περιοχή την οποία λαμβανουμε υπόψη στα δεδομένα μας μεταξύ τάσεων από 0 MPa και αλλαγής κλίσης του διαγράμματος (σχ 56). Με αυτή τη λογική στη παραμόρφωση των 10 mm έχουμε τάση 1,393 MPa.

### 3.5.3 Δοκίμιο Δ3(7/200gr/m<sup>2</sup>)

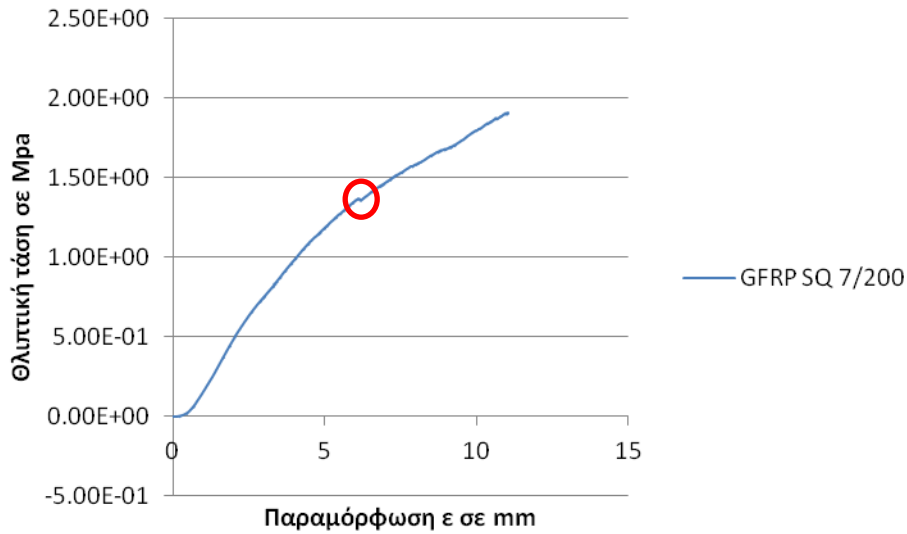
Το δοκίμιο Δ3 αποτελείται από 7 τεμάχια υαλουφάσματος των 200 gr/m<sup>2</sup> συνολικού βάρους 233,42 gr.



Σχήμα 57: Δοκίμιο Δ3 200 gr/m<sup>2</sup>

Στη περίπτωση αυτή διαπιστώνουμε ότι τα στοιχεία του διαγράμματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξ' ολοκλήρου και να μας δώσουν μέγιστη θλιπτική τάση 1,90 MPa. Μια διαπίστωση σχετικά με τις φθορές και τις αποκολλήσεις είναι ότι ενώ δεν υπήρχε δυνατοτητα εντοπισμού τους στη φάση διεξαγωγής ,μπορούμε μέσα από τα διαγράμματα

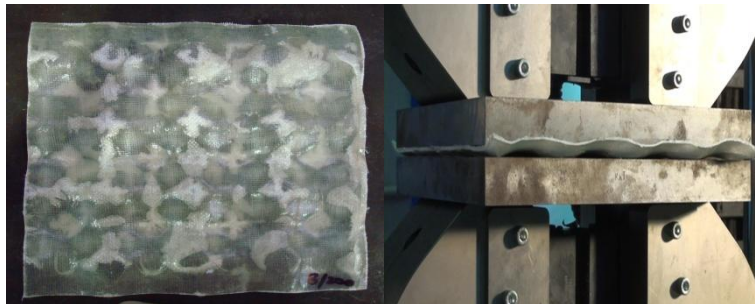
να διαπιστώσουμε σε ποιά σημεία είχαμε τις τις φθορές και στη συνέχεια να εντοπίσουμε το είδος τους μετά το πέρας του πειράματος. Τέτοιες αποδείξεις είναι τα σημεία με καμπές η ανάλογα με τα σημεία που φαίνονται στο κόκκινο πλαίσιο του σχήματος 58.



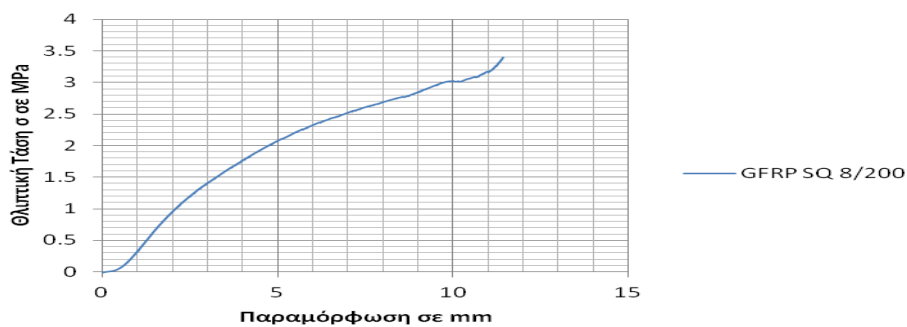
Σχήμα 58: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ3

### 3.5.4 Δοκίμιο Δ2(8/200gr/m<sup>2</sup>)

Το δοκίμιο Δ2 αποτελείται από 8 τεμάχια υαλοφάσματος των 200 gr/m<sup>2</sup> συνολικού βάρους 305,84 gr. Με μια μικρή κράτνυση στη παραμόρφωση των 10 mm υπολογίζεται τάση 3,02 MPa.



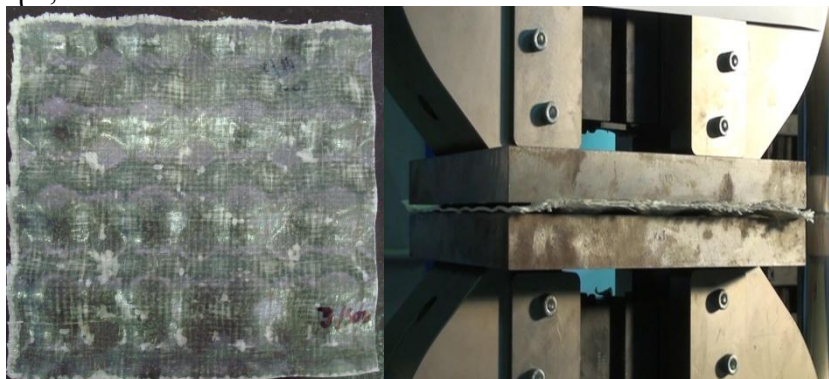
Σχήμα 59: Δοκίμιο Δ2 8/200 gr/m<sup>2</sup>



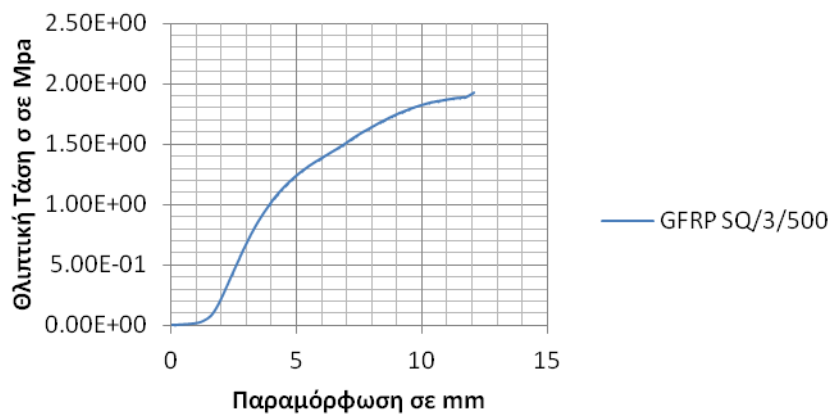
Σχήμα 60: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ2

### 3.5.5 Δοκίμιο Δ4 (3/500gr/m<sup>2</sup>)

Το δοκίμιο Δ4 αποτελείται από 3 τεμάχια υαλουφάσματος των 500 gr/m<sup>2</sup> συνολικού βάρους 233,01 gr. Στη περίπτωση αυτή η παραμόρφωση ανέρχεται στη τιμή των 11 mm με μέγιστη τάση 1,89 MPa.



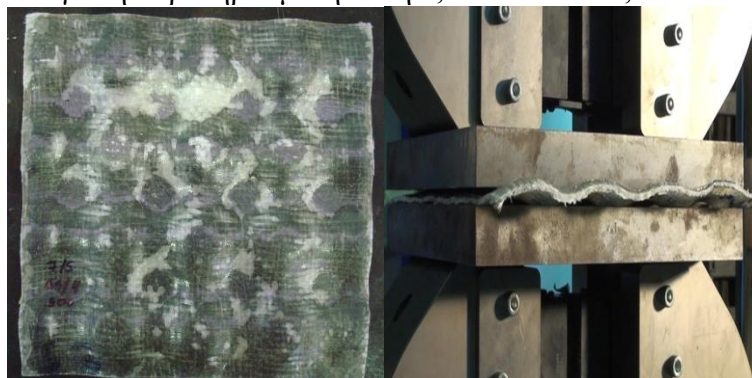
Σχήμα 61: Δοκίμιο Δ4 3/500 gr/m<sup>2</sup>



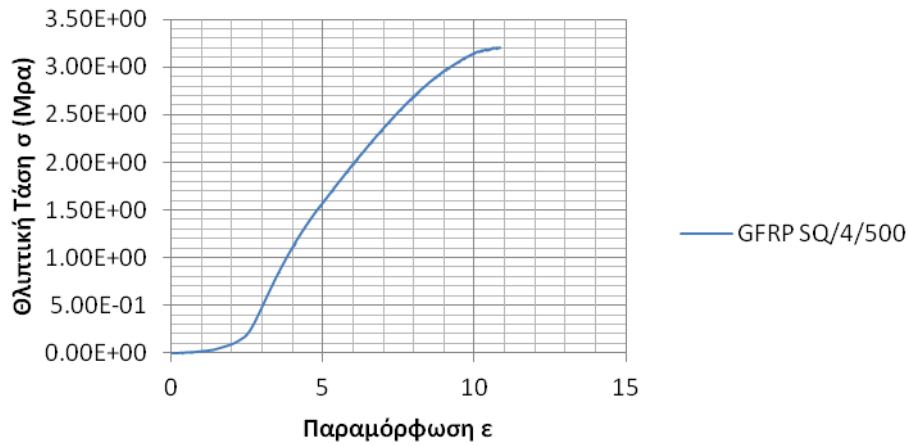
Σχήμα 62: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου Δ4

### 3.5.6 Δοκίμιο Δ5(4/500 gr/m<sup>2</sup>)

Το δοκίμιο Δ5 αποτελείται από 4 τεμάχια υαλουφάσματος των 500 gr/m<sup>2</sup> συνολικού βάρους 308,33 gr. Μέγιστη παρατηρούμενη τάση 3,12 MPa σε 11,47 mm παραμόρφωση.



Σχήμα 63: Δοκίμιο Δ5 4/500 gr/m<sup>2</sup>



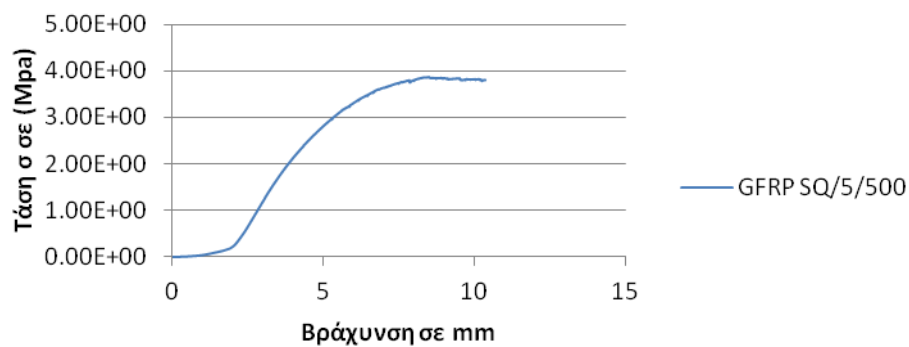
Σχήμα 64: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ5

### 3.5.7 Δοκίμιο Δ6(5/500gr/m<sup>2</sup>)

Το δοκίμιο Δ6 αποτελείται από 5 τεμάχια υαλουφάσματος των 500 gr/m<sup>2</sup> συνολικού βάρους 397,65 gr. Μέγιστη παρατηρούμενη τάση 3,87 MPa σε παραμόρφωση μεταξύ 8 και 9 mm.



Σχήμα 65: Δοκίμιο Δ6 5/500 gr/m<sup>2</sup>

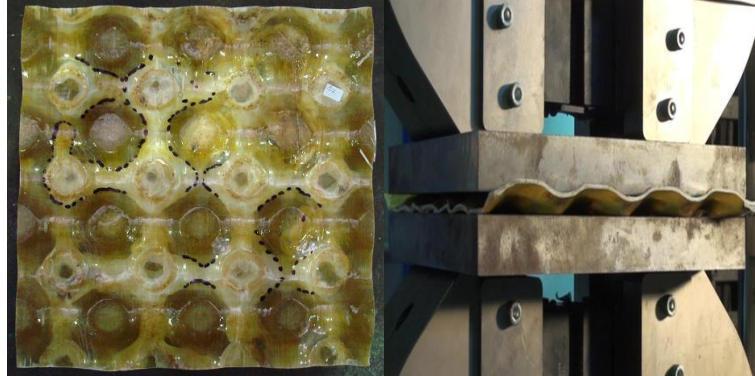


Σχήμα 66: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκίου Δ6 5/500 gr/m<sup>2</sup>

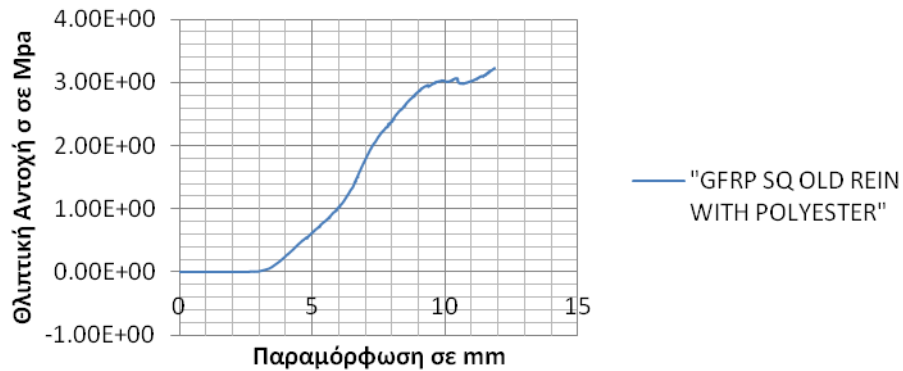


### 3.5.8 Δοκίμιο Δ7 (ενισχυμένο μόνο με πολυεστερική ρητίνη)

Το δοκίμιο αυτό έχει αποκοπεί από το μητρικό υλικό και έχει επιστρωθεί απλά και μόνο με ένα στρώμα πολυεστερικής ρητίνης συνολικού βάρους 394,64 gr. Μέγιστη παρατηρούμενη τάση σε παραμόρφωση 10,3 mm και είναι 3,04 MPa.



Σχήμα 67: Δοκίμιο Δ7 (τεμάχιο μητρικού υλικού)



Σχήμα 68: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου Δ7

### 3.5.9 Δοκίμιο Δ8

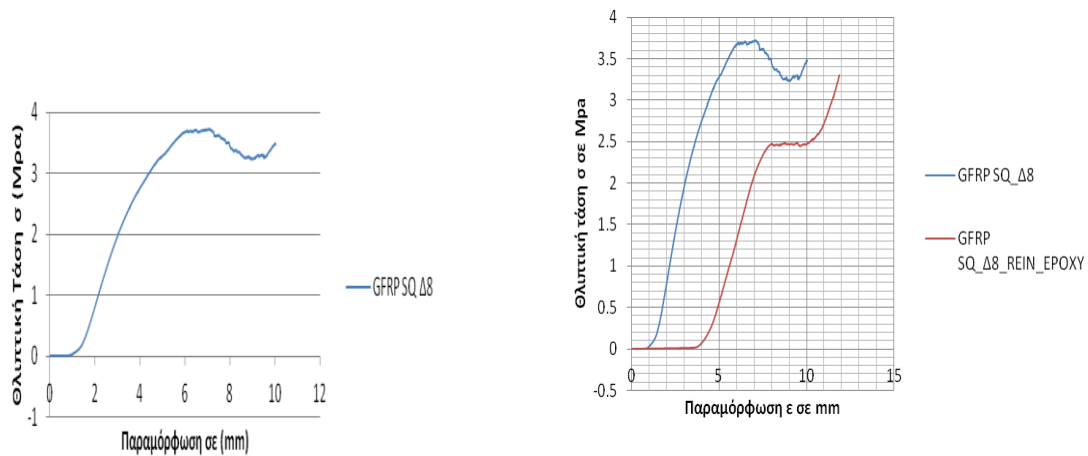
Το δοκίμιο αυτό έχει αποκοπεί από το αρχικό υλικό και υποβάλλεται σε θλίψη για να πάρουμε στοιχεία αναγωγής. Έχει συνολικό βάρος 364,70 gr.



Σχήμα 69: Δοκίμιο Δ8

Η μέγιστη θλιπτική τάση είναι 3,72 MPa σε παραμόρφωση 7,042 mm.

Το ίδιο όμως δοκίμιο αφού έχει υποστεί όλη αυτή τη καταπόνηση το ενισχύσαμε με εποξεική ρητίνη και το υποβάλλαμε εκ νέου σε φόρτιση(σχ 71). Στη περίπτωση αυτή η μέγιστη τάση ήταν 2,47 MPa σε παραμόρφωση κοντά στα 9,5 mm.



Σχήμα 70:Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου Δ8

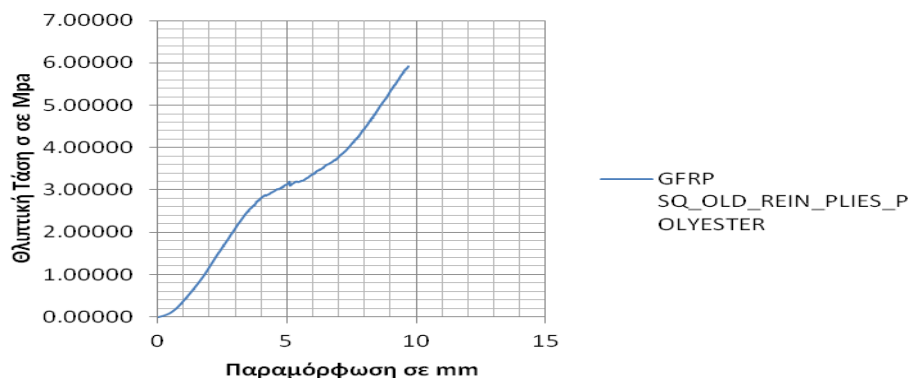
Σχήμα 71:Σύγκριση διαγραμμάτων σ-ε δοκιμίου Δ8 μετά από 2 ελέγχους

### 3.5.10 Δοκίμιο Δ9

Πρόκειται για ένα δοκίμιο το οποίο είχε αποκοπεί από το μητρικό υλικό και έγινε μια προσπάθεια να ενισχυθεί με 1 τεμαχίο ναλοϋφάσματος 200 gr/m<sup>2</sup> εκατέρωθεν των όψεων. Στη προσπάθεια αυτή χρησιμοποιήθηκε το καλούπι της εποξειδικής κόλλας. Το δοκίμιο όμως λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων στο επίπεδο της πλάκας δεν ταίριαζε απόλυτα στο καλούπι με αποτέλεσμα ενώ στη μία όψη επιτευχθεί απόλυτη επαφή με το υλικό στην άλλη λόγω κακών χειρισμών εισήλθε αέρα μεταξύ πανιού και υλικού. Παρά το γεγονός ότι ασκήθηκε πίεση στο υλικό με μεταλλικές πλάκες το αποτέλεσμα δεν ήταν το αναμενόμενο. Ακόμα όμως και με αυτές τις συνθήκες αποφασίστηκε να ελεγχει σε θλίψη. Η μέγιστη θλιπτική τάση η οποία παρατηρήθηκε 5,92 MPa και σε παραμόρφωση 9,705 mm μικρότερη από την αρχική ορισμένη ως όριο αποδοχής.



Σχήμα 72:Δοκίμιο Δ9



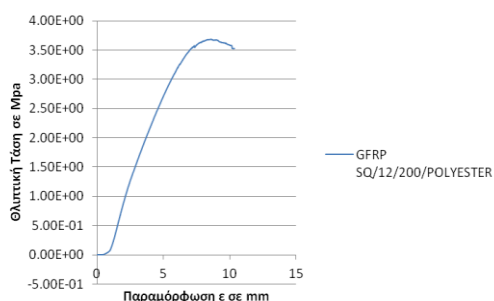
Σχήμα 73: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ9

### 3.5.11 Δοκίμιο Δ21(12/200gr/m<sup>2</sup>)

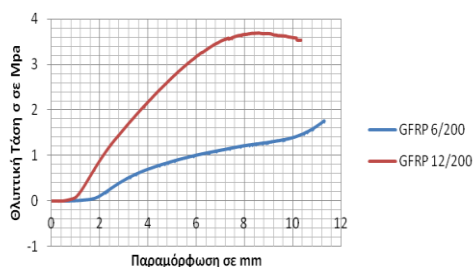
Το δοκίμιο αυτό αποτελείτε από 12 τεμάχια υαλοϋφάσματος 200gr/m<sup>2</sup> και κατασκευάστηκε στη λογική του να ελεγχεί η φέρουσα ικανότητα σε σχέση με το αντίστοιχο των 6 πανιών. Έχει συνολικό βάρος 360 gr. Μέγιστη τάση παρατηρείται σε παραμόρφωση 8,599 mm και είναι 3,69 MPa. Η τάση αυτή ενδέχεται να μην ανταποκρίνεται στην ικανότητα του δοκιμίου καθώς αυτό ελέγχθηκε 4 ημέρες από την κατασκευή του ενώ τα υπόλοιπα ξεπεράσαν το όριο των 7 ημερών. Βέβαια θα πρέπει να αξιολογήσουμε και το σημείο το οποίο παρουσιάζει τις πρώτες βλάβες και αυτό είναι αρκετά υψηλά στα 3,20 MPa τάσης. Για την επιλογή αυτού του σημείου δεν έχει καθοριστεί κριτήριο επιλογής και γι αυτό γίνεται οπτικά από τις μεταβολές του διαγράμματος. Μπορεί βέβαια από τα δεδομένα να εντοπιστούν οι θέσεις αστοχίας αλλά είναι χρονοβόρος διαδικασία και χωρίς ουσιαστικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 74: Δοκίμιο Δ21 12/200gr/m<sup>2</sup>



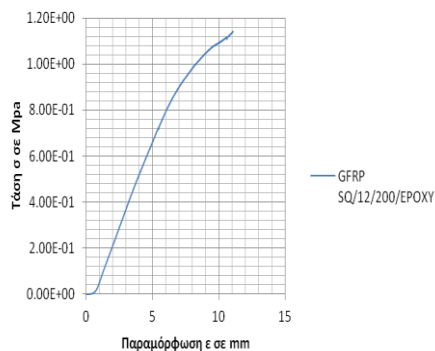
Σχήμα 75: Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου Δ9



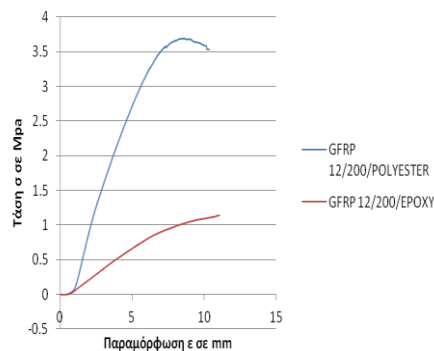
Σχήμα 76: Σύγκριση διαγραμμάτων σ-ε δοκιμίων Δ1 και Δ21

### 3.5.12 Δοκίμιο Δ22 (12/200 gr/m<sup>2</sup> με εποξεική ρητίνη)

Το δοκίμιο αυτό κατασκευάστηκε στη προσπάθεια να εντοπίσουμε τυχόν διαφορετική συμπεριφορά με άλλου είδους συνδετικό υλικό. Έχει βάρος 313gr. Τα αποτελέσματα θα πρέπει να αξιολογηθούν λαμβανοντας υπόψη το γεγονός ότι το δοκίμιο ελέγχθηκε μια ημέρα μετά την παραγωγή λόγω χρονικού περιορισμού.



Σχήμα 77: Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου Δ22



Σχήμα 78: Σύγκριση διαγραμμάτων δοκιμίων Δ21-Δ22

## 3.6 Πειραματικός έλεγχος καμπυλόμορφων ορθογωνικών δοκιμίων

### 3.6.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

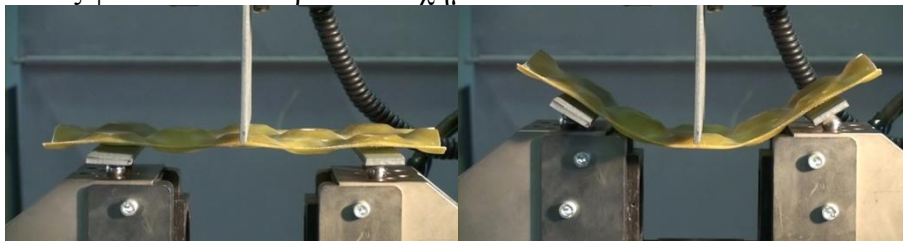
Στο πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα τεχνικά στοιχεία των δοκιμίων τα οποία υποβλήθηκαν σε έλεγχο κάμψης τριών σημείων.

A/A	Δοκίμιο	Σύνθεση Δοκιμίου	Βάρος mm
1	Δ10	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής	218.46
2	Δ11	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής	209.54
3	Δ12	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής	224.72
4	ΔS2	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλοϋφάσματα τύπου λωρίδων και εποξεική ρητίνη	212.31
5	ΔP2	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλοϋφάσματα 200 gr/m <sup>2</sup> και εποξεική ρητίνη	213.81
6	Δ15	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 1 υαλούφασμα 500 gr/m <sup>2</sup> και πολυεστέρα	288.35
7	Δ17	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο μόνο με πολυεστέρα	210.57
8	Δ18	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 1 υαλούφασμα 200 gr/m <sup>2</sup> και πολυεστέρα	236.89
9	Δ16	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλούφασμα 200 gr/m <sup>2</sup> και πολυεστέρα	265.09
10	Δ19	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 1 υαλούφασμα 200 gr/m <sup>2</sup> και πολυεστέρα	238.46
11	Δ20	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλούφασμα 200 gr/m <sup>2</sup> και πολυεστέρα	268.61
12	Δ21	Δοκίμιο νέας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής 12 υαλοφασμάτων 200gr/m <sup>2</sup> έκαστο και πολυεστέρα	213
13	Δ22	Δοκίμιο νέας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής 12 υαλοφασμάτων 200gr/m <sup>2</sup> έκαστο και εποξεική ρητίνη	182

Πίνακας 3: Πίνακας τεχνικών στοιχείων καμπυλόμορφων ορθογωνικών δοκιμίων

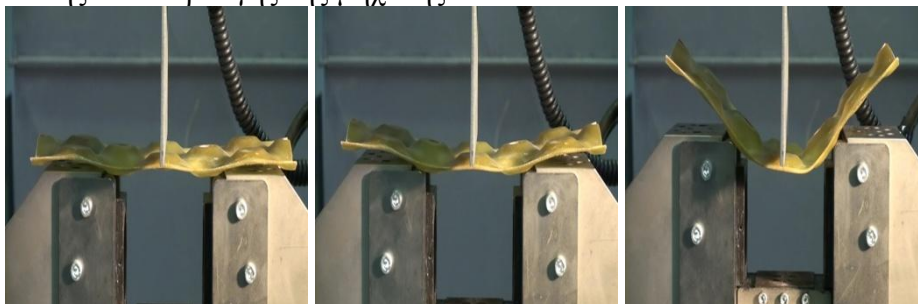
### 3.6.2 Δοκίμιο Δ10 (τμήμα μητρικού υλικού)

Το δοκίμιο αυτό είναι τμήμα του παλιού μητρικού υλικού σε διαστάσεις 300x150 mm. Έχει βάρος 218,46 gr και πάχος δοκιμίου 2,54 mm κατά μέσο όρο. Το δοκίμιο αυτό αρχικά επελέγη να ελεγχθεί σε κάμψη τριών σημείων με συνθήκες στήριξης αρθρώσεις σε ένα μήκος δοκιμίου περί τα 200 mm. Αυτό κρίθηκε αναποτελεσματικό καθώς η καμπυλότητα την οποία ανέπτυξε το υλικό ήταν τετοια που κινδύνευαν οι αρθρώσεις να αστοχήσουν όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 79: Δοκίμιο Δ10 με αρθρώσεις σε μήκος 200mm

Για τον παραπάνω λόγο και ελλείψη των πειραματικών διατάξεων της εταιρίας Instron αποφασίστηκε να εφαρμοστεί η αρχή της απλότητας. Στη περίπτωση μας η αρχή αυτή μεταφράζεται σε μείωση του μήκους έδρασης με απλή παράθεση του δοκιμίου μεταξύ του κενού της κάτω αρπάγης της μηχανής.



Σχήμα 80: Δοκίμιο Δ10 με απλή παράθεση του δοκιμίου μεταξύ των σιαγόνων της μηχανής

Έτσι επετεύχθει μήκος δοκιμίου 128 mm και το υλικό έφθανε μέχρι την κατάρρευση. Το μόνο το οποίο παρατηρείται στα δεδομένα είναι αλλαγή κλίσης του διαγράμματος η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι άλλαξε το μήκος έδρασης λόγω της μορφολογίας των σιαγόνων.

Στόχος μας είναι μέσα από μια τέτοια πειραματική διάταξη να υπολογίσουμε την ακτίνα καμπυλότητας για να ορίσουμε την  $\rho_{ultimate}$  του υλικού. Στη περίπτωση μας είναι ότι εφαρμόζουμε μια διαδικασία η οποία σε οποιαδήποτε άλλη μορφή διατομής και σε ιδιότητες υλικό θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε έμμεσα την ακτίνα καμπυλότητας. Εδώ λόγω της ιδιαιτερότητας του προς έλεγχο δοκιμίου για τον προσδιορισμό της ακτίνας καμπυλότητας κινήθηκαμε ανορθόδοξα και ελλείψη άλλων μετρήσεων εκτός των ασκούμενων δυνάμεων και βυθίσεων εφαρμόσαμε την εξής διαδικασία:

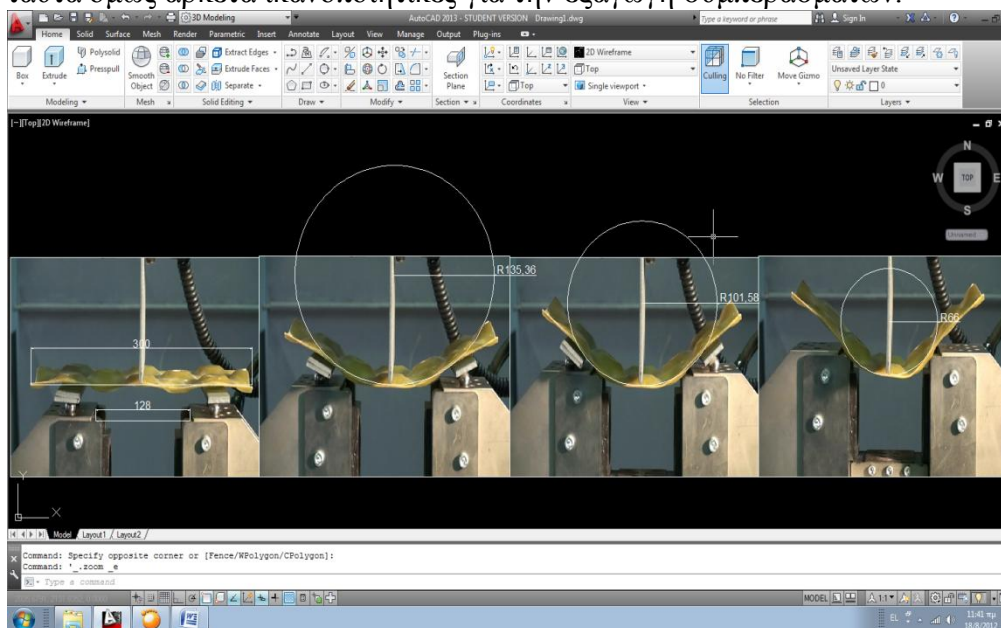
α. Από τα videos των πειραματικών ελέγχων αποκόψαμε τμήματα φωτογραφίας στην αρχική κατάσταση και στη τελική (ή λίγο πριν τη κατάρρευση).

β. Μεταφέραμε ανές τις εικόνες στο σχεδιαστικό λογισμικό AutoCad 2013 (student version).

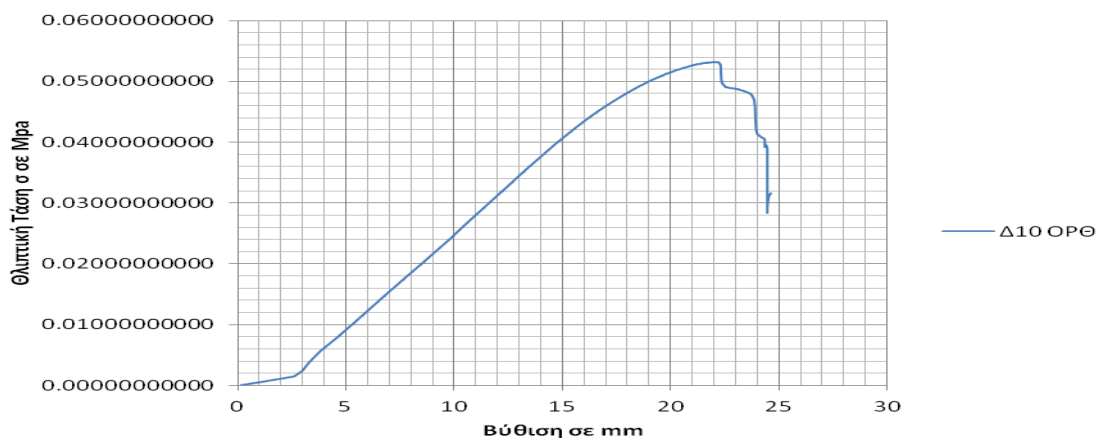
γ. Πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες μετατροπές διαστάσεων μετατρέποντας την κλίμακα τους έχοντας γνωστό το μήκος των δοκιμίων 300mm.

δ. Στη συνέχεια κατασκευάσαμε κύκλους οι οποίοι ορίστηκαν μεταξύ των σημείων έδρασης και του μεσαίου σημείου. Μετρήθηκε η ακτίνα καμπυλότητας και σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις για το δοκίμιο Δ10 με κατασκευασμένες αρθρώσεις και με απλή παράθεση του δοκιμίου στη μηχανή είχαμε μια απόκλιση 3 mm. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε πολλές αιτίες όπως λάθος τοποθέτηση της κινηματογραφικής μηχανής, λάθος εκτίμηση των αποστάσεων στο σχεδιαστικό περιβάλλον λόγω ικανότητας του χρήστη ή ακόμα και στην αδυναμία προσδιορισμού του σημείου κατάρρευσης μέσα από τις φωτογραφικές λήψεις. Γεγονός όμως είναι ότι πρόκειται για μια ελάχιστη διαφορά και το αποτέλεσμα άκρως ικανοποιητικό.

Στο σχήμα 81 το τρίτο δοκίμιο είναι το Δ10 πάνω σε αρθρώσεις έχει ακτίνα καμπυλότητας  $R=101,58$  mm και με μια απλή αναγωγή σε 128 mm που αντιστοιχεί στο μήκος παράθεσης του δοκιμίου δίνει  $R=65$  mm το οποίο έχει διαφορά μόνο 1 mm από το τέταρτο δοκίμιο Δ10 πριν τη κατάρρευση με  $R=66$  mm. Με το τρόπο αυτό μπορούμε πλέον να κάνουμε αναγωγές σε σχέση με τα άλλα δοκίμια αν και όχι τόσο ακριβείς παρόλα ταύτα όμως αρκετά ικανοποιητικές για την εξαγωγή συμπερασμάτων.



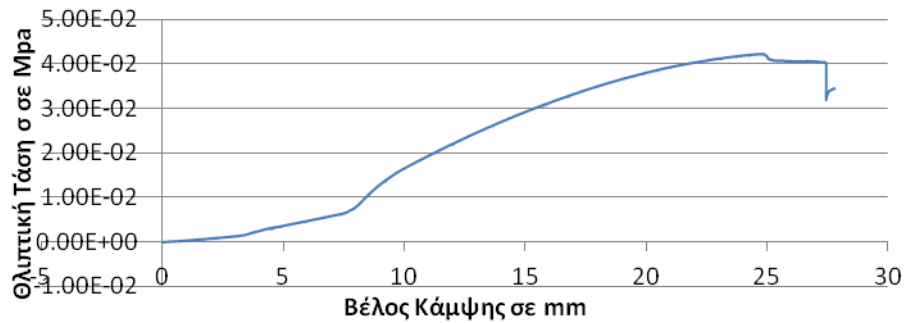
Σχήμα 81: Διαδικασία Προσδιορισμού Ακτίνας Καμπυλότητας



Σχήμα 82: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ10

### 3.6.3 Δοκίμιο Δ11

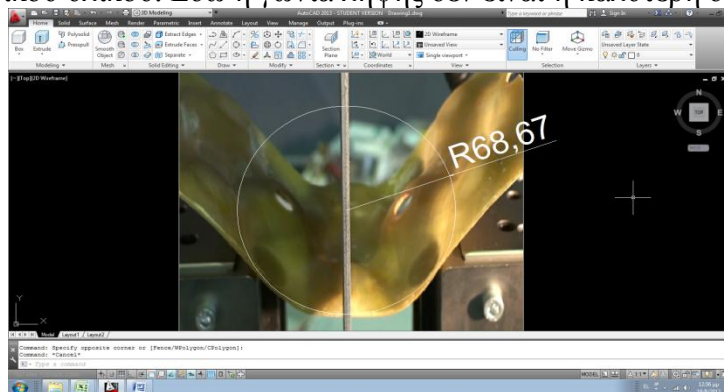
Το δοκίμιο αυτό είναι επίσης ένα τμήμα του παλαιού μητρικού υλικού με βάρος 209,54 gr.



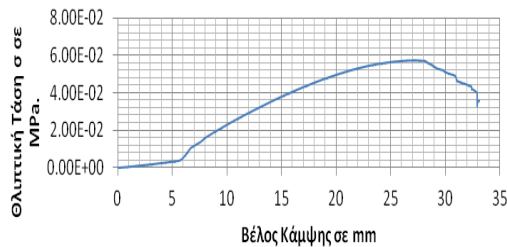
Σχήμα 83: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης δοκιμίου Δ11

### 3.6.4 Δοκίμιο Δ12

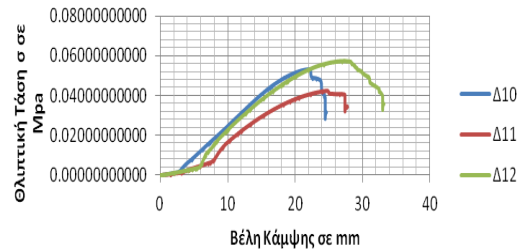
Το δοκίμιο αυτό είναι επίσης ένα τμήμα του παλαιού μητρικού υλικού με βάρος 224,72 gr. Διαπιστώνουμε και στη περίπτωση αυτή τη προσέγγιση της καμπυλότητας των δοκιμίων του μητρικού υλικού. Εδώ η γωνία λήψης δεν είναι η καλύτερη δυνατή.



Σχήμα 84: Προσδιορισμός Καμπυλότητας Δοκιμίου Δ12



Σχήμα 85: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου Δ12

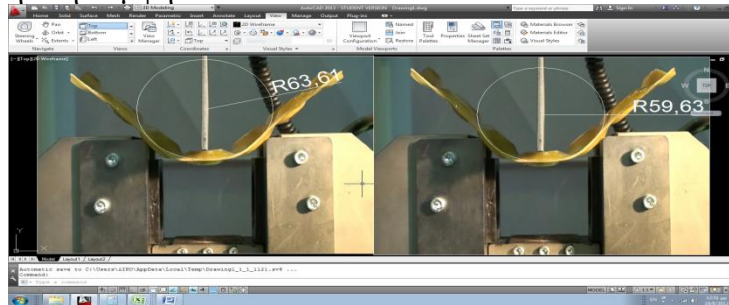


Σχήμα 86: Συγκριτικό Διάγραμμα Δοκιμίων Δ10 11 και 12

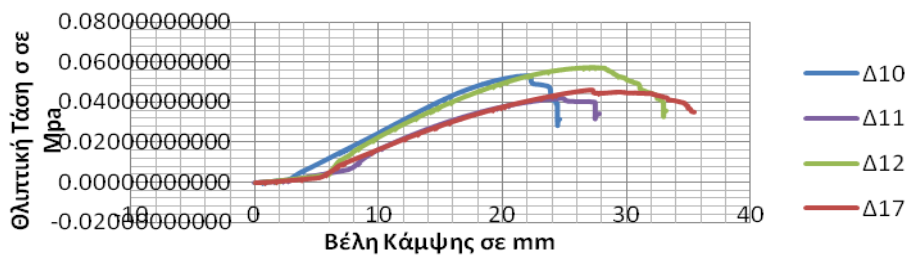
Από το σχήμα 86 μπορούμε να συμπεράνουμε τα δοκίμια Δ10 και Δ12 πράγματι έχουν την ίδια συμπεριφορά και λογικό είναι η ακτίνες καμπυλότητας τους να είναι περίπου ίδιες ενώ το δοκίμιο Δ11 έχει ολισθήσει 2 φορές ως προς τη θέση έδρασης.

### 3.6.5 Δοκίμιο Δ17

Το δοκίμιο αυτό είναι τμήμα του παλαιού και φθαρμένου υλικού το οποίο ενισχύθηκε μόνο με ρητίνη και έχει βάρος 210,57 gr. Η ακτίνα καμπυλότητας φαίνεται να παραμένει η ίδια λίγο πριν τη κατάρρευση όμως η αντοχή λόγω της επέμβασης με ρητίνη δεν φαίνεται να έχει αποτέλεσμα ως προς την κάμψη σε σχέση με τα δοκίμια Δ10, Δ12. Αυτό φαίνεται να είναι λογικό καθώς μια επικάλυψη με ρητίνη η οποία έχει αντοχή σε εφελκυσμό πολύ μικρότερη του υλικού και ταυτόχρονα είναι τέτοιο το πάχος επικάλυψης που δεν επιδρά σε καμία περίπτωση στη κάμψη.



Σχήμα 87: Προσδιορισμός ακτίνας καμπυλότητας δοκιμίου Δ17

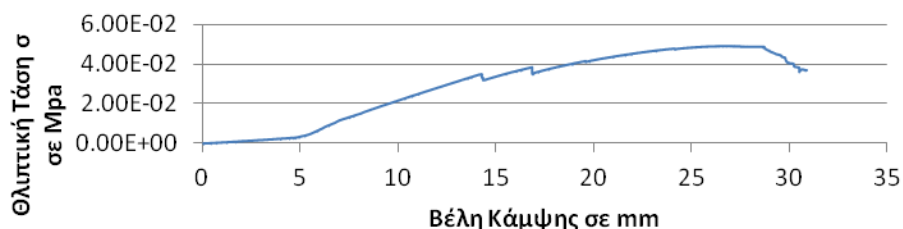


Σχήμα 88: Συγκριτικό διάγραμμα δοκιμίων Δ10 11 12 και 17

### 3.6.6 Δοκίμιο Δ18

Είναι ένα δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 1 υαλούφασμα 200 gr/m<sup>2</sup> και πολυεστέρα. Σε αυτό το δοκίμιο εφαρμόστηκε ενίσχυση με 1 τεμάχιο υαλοφάσματος των 200gr/m<sup>2</sup> προκειμένου να διαπιστωθεί το κατά πόσο είναι δυνατό να υπάρξει βελτίωση των ιδιοτήτων σε κάμψη του υλικού. Έχει βάρος 236,89 gr.

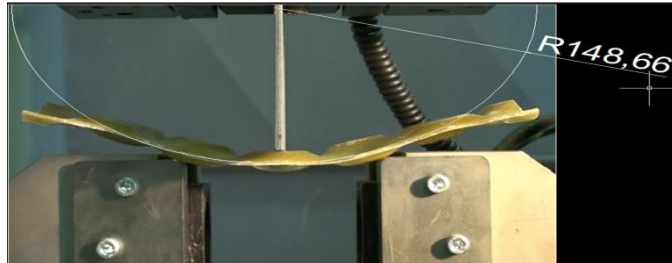
Στη περίπτωση αυτή θα παραθέσουμε αρχικά το διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης προκειμένου να κάνουμε μερικές παρατηρήσεις.



Σχήμα 89: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης δοκιμίου Δ18

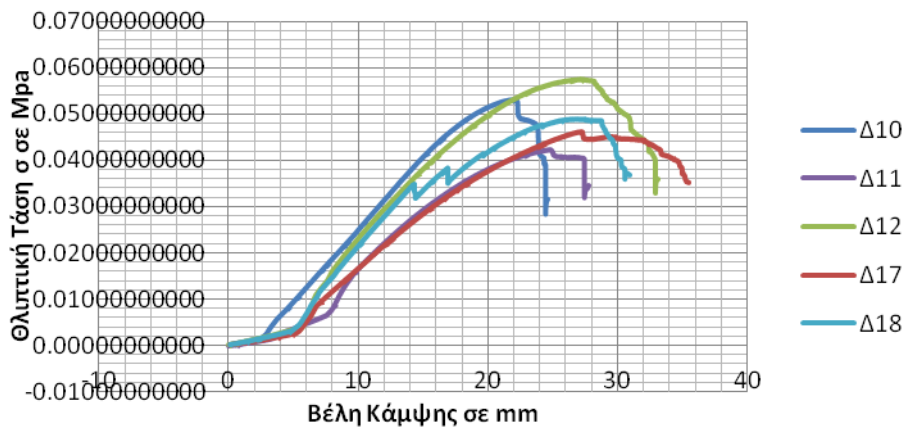


Εδώ παρατηρούμε αναπηδήσεις στο διάγραμμα οι οποίες και από την παρακολούθηση του πειράματος οφείλονται στις αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης. Έγινε ο εντοπισμός του σημείου αυτού και βρέθηκε από το διάγραμμα ότι έγινε σε τάση 0,03411 MPa και βέλος κάμψης 14,121 mm. Από τα δεδομένα ανάλυσης η τάση αυτή επετεύχθει σε χρόνο περι τα 841,2 sec από την έναρξη του πειράματος. Η εικόνα του δοκιμίου σε αυτή τη χρονική στιγμή είναι αυτή του σχήματος 90.



Σχήμα 90: Απεικόνιση δοκιμίου Δ18 στη πρώτη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης

Εδώ είναι επιβεβλημένη μια σύγκριση της κατάστασης του δοκιμίου αυτού με τα αντίστοιχα των αρχικών διαγραμμάτων.



Σχήμα 91: Σύγκριση διαγραμμάτος σ-ε του Δ18 δοκιμίου με τα δοκίμια βάσης



Σχήμα 92: Απεικόνιση Δοκιμίων Δ12 και Δ18 σε αντιπαραβολή βέλους κάμψης 14,121 mm

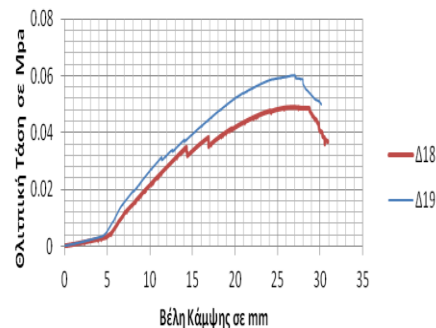
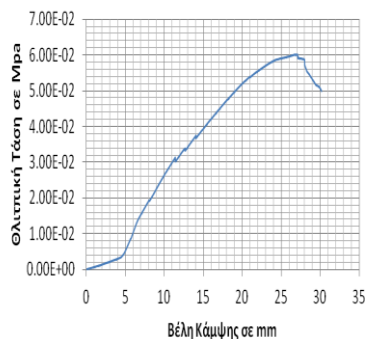
Στο σχήμα 92 φαίνεται η απεικόνιση των δοκιμίων Δ12 και Δ18 σε χρονικό σημείο όπου έχουν το ίδιο βέλος κάμψης 14,121 mm, καθώς παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά σε κάμψη, και παρατηρούμε ότι η καμπυλότητα τους παρουσιάζει μια μικρή διαφορά. Δεν μπορούμε ωστόσο να ισχυριστούμε ότι στη παρούσα φάση είναι αξιολογήσιμη.

Το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν μπορούμε να το κατατάξουμε στην ομάδα των δοκιμίων Δ10-12 η Δ11-17 καθώς δεν γνωρίζουμε τη αρχική του πριν την ενίσχυση συμπεριφορά και έτσι δεν προσδιορίζεται αν οι ιδιότητες βελτιώθηκαν ή όχι. Παρά όμως αυτή την αδυναμία μας γνωρίζουμε ότι σε βέλος κάμψης 14,121 mm αστοχεί η ενίσχυση.

### 3.6.7 Δοκίμιο Δ19

Είναι ένα δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 1 υαλούφασμα 200 gr/m<sup>2</sup> και πολυεστέρα. Έχει βάρος 238,46 gr.

Παρατηρούνται και εδώ αναπηδήσεις στο διάγραμμα (σχ.93) τις ίδιας μορφής με του δοκιμίου Δ18. Αποκολλήσεις του υλικού ενίσχυσης και μάλιστα μέσα από τη συνεχή παρακολούθηση του πειράματος οι αποκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν αρχικά στα κοίλα τμήματα των κόλρων κώνων στις κορυφές των οποίων ασκούνταν το φορτίο. Παρόλα αυτά εμφανώς υπάρχει βελτίωση των ιδιοτήτων αλλά σε χαμηλές τιμές βελών κάμψης έχουμε αποκολλήσεις άρα μόνιμες βλάβες της ενίσχυσης.

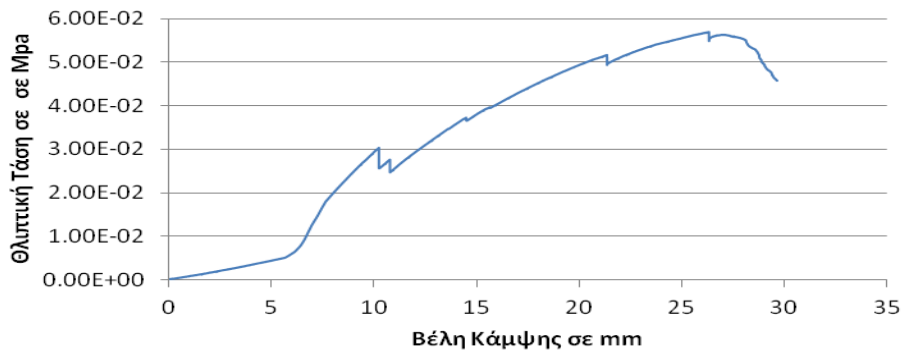


Σχήμα 93: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου Δ19

Σχήμα 94: Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων Δ18 και Δ19

### 3.6.8 Δοκίμιο Δ16

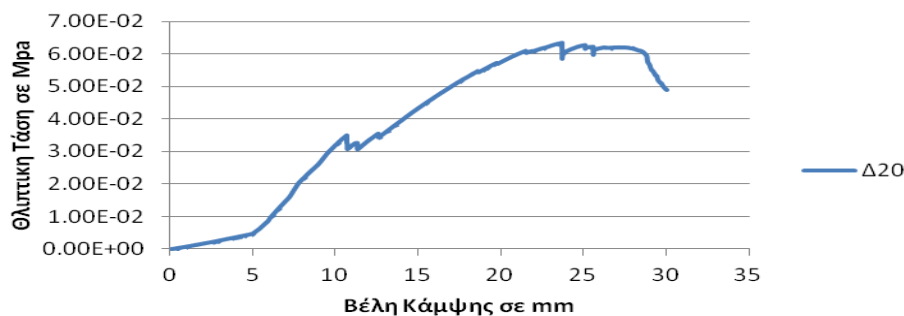
Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλούφασμα 200 gr/m<sup>2</sup> και πολυεστέρα συνολικού βάρους 265,09 gr. Και εδώ είναι εμφανής οι βλάβες στο υλικό ενίσχυσης και παρατηρείται μεγαλύτερη «ψαθυρότητα» στη συμπεριφορά, φαινόμενο που εξηγείται λογικά καθώς το υλικό ενίσχυσης αποκτά μεγαλύτερη δυσκαμψία και αποκολλάται ευκολότερα.



Σχήμα 95: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ16

### 3.6.9 Δοκίμιο Δ20

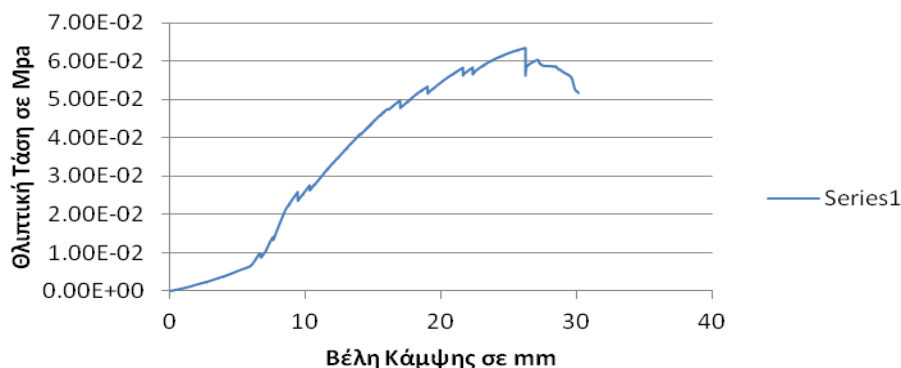
Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλούφασμα 200 gr/m<sup>2</sup> και πολυεστέρα συνολικού βάρους 268,61 gr. Παρά το γεγονός ότι υπάρχει βελτίωση των ιδιοτήτων δε μπορεί να χαρακτηριστεί ως αποδοτική καθώς έχουμε βλάβες στο υλικό ενίσχυσης σε μικρά βέλη κάμψης.



Σχήμα 96: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ20

### 3.6.10 Δοκίμιο Δ15

Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 1 υαλούφασμα 500 gr/m<sup>2</sup> και πολυεστέρα συνολικού βάρους 288,35 gr. Στο δοκίμιο αυτό παρατηρούνται αποκολλήσεις σε ακόμα μικρότερα βέλη κάμψης γεγονός που δικαιολογείται από την μεγαλύτερη δυσκαμψία του υλικού από τα προηγούμενα δοκίμια ελέγχου.



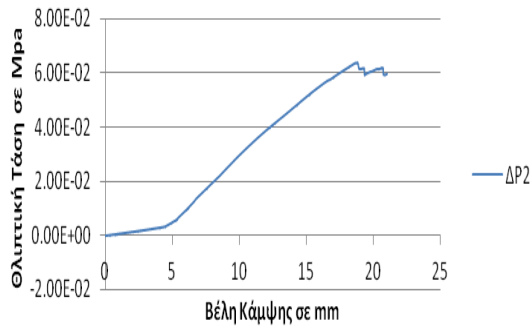
Σχήμα 97: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ15

### 3.6.11 Δοκίμιο ΔΡ2

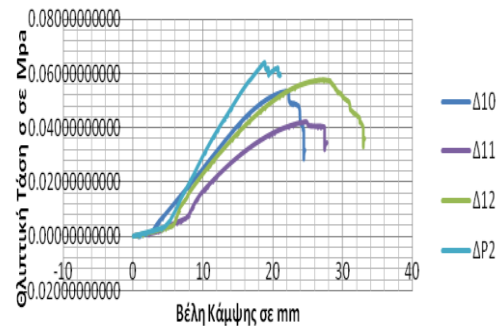
Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλοϋφάσματα 200 gr/m<sup>2</sup> και εποξεική ρητίνη. Διαπιστώνοντας σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις δοκιμίων ότι είχαμε σε αρκετές εξ αυτών βελτίωση των ιδιοτήτων τους έστω και ελάχιστη, παρά ταύτα η βλάβες σε επίπεδο αποκολλήσεων του υλικού ενίσχυσης καθιστούσε μη αποδοτική τη χρήση τέτοιων τρόπων επέμβασης. Αποφασίστηκε στη συνέχεια να προκαλέσουμε τεχνητά διακοπή της συνέχειας των ινών του μητρικού υλικού και να ενισχύσουμε στο δοκίμιο ΔΡ2 με υλικό ενίσχυσης 1 τεμάχιο υαλοϋφάματος και εποξεική πλέον ρητίνη. Αυτή η λογική ενίσχυσης προεκλήθει από τις παρατηρήσεις ότι οι αποκολλήσεις στα υπόλοιπα δοκίμια ήταν «ψαθυρές» λόγω μεγάλης δυσκαμψίας του

συνδετικού υλικού (πολυεστερική ρητίνη) και λόγω του ότι δεν υπήρχε σύνδεση μεταξύ παλιού και νέου υλικού. Γι αυτό στη περίπτωση αυτού του δοκιμίου διανοίχθηκαν οπές με ηλεκτρικό δρέπανο  $\varnothing 3\text{mm}$  στα σημεία τα οποία έχουν υποδειχθεί στο σχήμα 30.

Η ενίσχυση στο δοκίμιο ΔΡ2 είναι σαφώς αποτελεσματικότερη των υπολοίπων με πολυεστερική ρητίνη και οι οποιεσδήποτε βλάβες αποκολλήσεων γίνονται κοντά στην αστοχία του δοκιμίου. Για να καταστεί σαφές το γεγονός της αποτελεσματικότητας παραθέτουμε το συγκριτικό διάγραμμα των δοκιμίων Δ10-11-12 και ΔΡ2. Στο διάγραμμα φαίνεται σαφώς η βελτίωση των ιδιοτήτων με μια βέβαια μείωση του βέλους κάμψης αστοχίας.

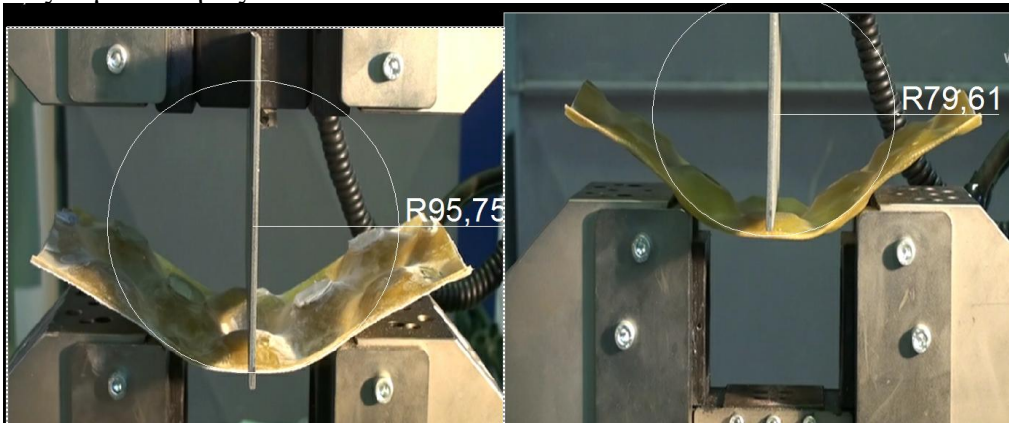


Σχήμα 98: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου ΔΡ2



Σχήμα 99: Συγκριτικό Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης δοκιμίων Δ10-11-12-Ρ2

Αυτό το οποίο επηρεάζεται εμφανώς είναι η ακτίνα καμυλότητας όπου στο δοκίμιο ΔΡ2 στη πρώτη αποκόλληση είναι  $\rho=95,75$  mm ενώ στις αντίστοιχες συνθήκες του δοκιμίου Δ10 είναι  $\rho=79,61$  mm. Εδώ πρέπει να γίνει υπενθύμιση ότι όλες αυτές οι μετρήσεις έγιναν γραφικά με αναγωγή αλλά παρόλα αυτά είναι εμφανής η διαφορά στις ακτίνες καμυλότητας.

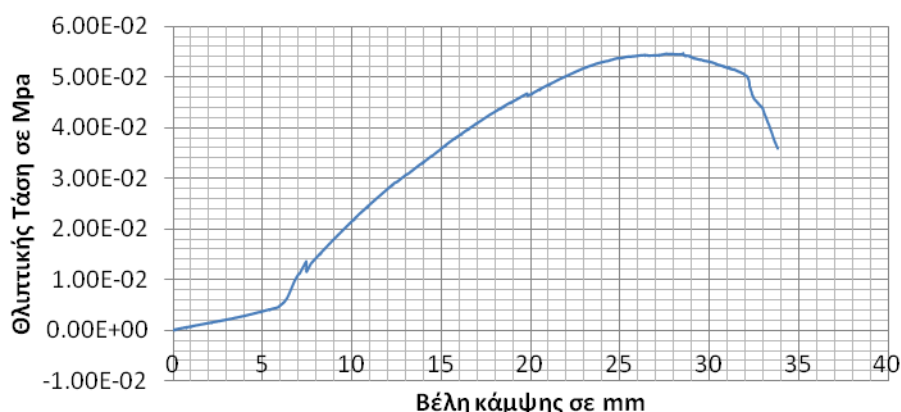


Σχήμα 100: Απεικόνιση ακτίνων καμυλότητας δοκιμίων Ρ2 (αρ) και Δ10 στις ίδιες συνθήκες

### 3.6.12 Δοκίμιο ΔS2

Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής ενισχυμένο με 2 υαλοϋφάσματα τύπου λωρίδων και εποξεική ρητίνη. Μια διαφορετική τεχνική η οποία επιλέγει είναι ανάλογης λογικής με αυτή του δοκιμίου ΔΡ2 μόνο που σε αυτή τη περίπτωση η ενίσχυση τοποθετήθηκε σε λωρίδες όπως φαίνεται στο σχήμα 30. Το βάρος του δοκιμίου ανέρχεται στα 212,31 gr και οι διανοιχθήσες οπές διατάσσονται μόνο κατα μήκος των λωρίδων. Από

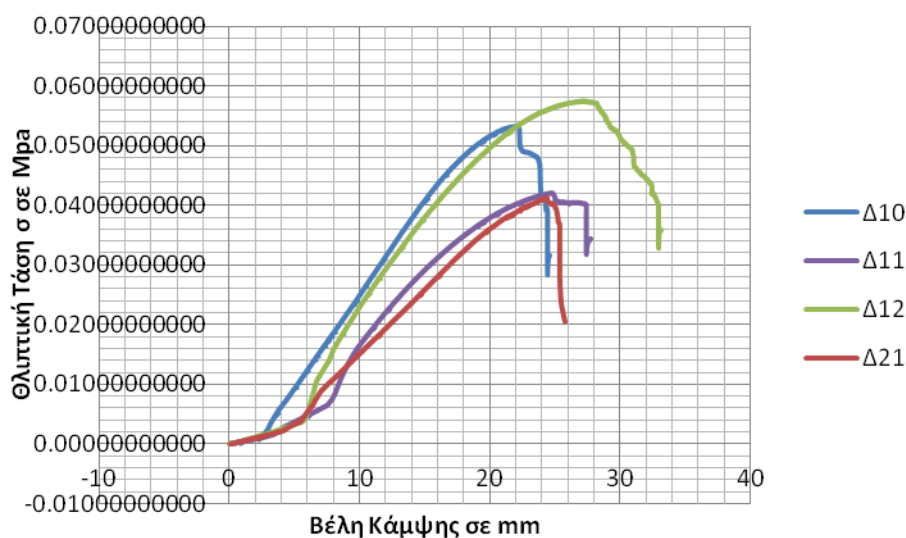
το διάγραμμα του σχήματος 101 φαίνεται ότι ναι μεν η ενίσχυση αστόχησε αλλά επέτρεψε την ανάπτυξη μεγάλων βελών κάμψης μέχρι του σημείου της κατάρρευσης.



Σχήμα 101: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου ΔΣ2

### 3.6.13 Δοκίμιο Δ21 ορθογωνικό

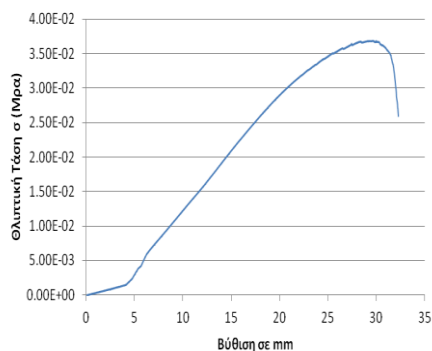
Δοκίμιο νέας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής 12 υαλουφασμάτων 200gr/m<sup>2</sup> έκαστο και πολυεστέρα συνολικού βάρους 213 gr. Το δοκίμιο αυτό κατασκευάστηκε στη λογική να ελεγχθεί η καμπυλότητα η οποία επιτυγχάνεται με τη σύνθεση 12/200gr/m<sup>2</sup>. Από το συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των δοκιμών Δ10,11,12 και Δ21 βλέπουμε ότι «κινείται» στη περιοχή δεδομένων των αρχικών δοκιμών. Αυτό το οποίο μειώνεται είναι η ακτίνα καμπυλότητας αλλά όπως προκύπτει από τα δεδομένα πρόκειται για μικρή διαφορά με τις ακτίνες καμπυλότητας των αρχικών δοκιμών.



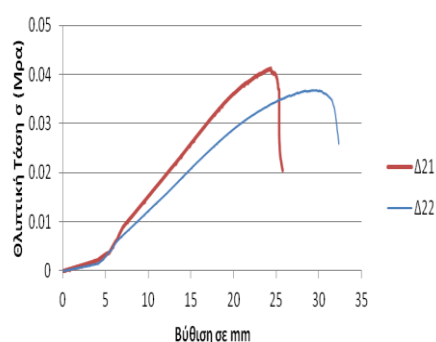
Σχήμα 102: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμών Δ10-11-12-21

### 3.6.14 Δοκίμιο Δ22 ορθογωνικό

Δοκίμιο νέας σύνθεσης ορθογωνικής διατομής 12 υαλουφασμάτων 200gr/m<sup>2</sup> έκαστο και εποξεική ρητίνη το οποίο κατασκευάστηκε στη λογική του δοκιμίου Δ21.

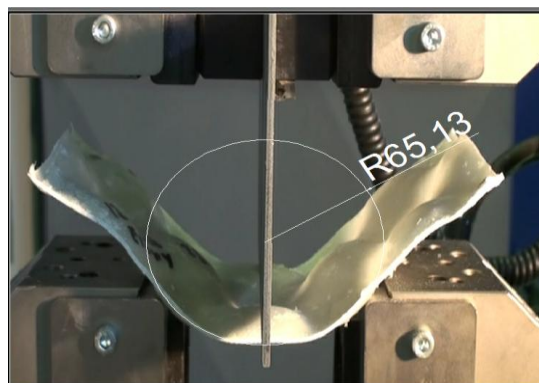


Σχήμα 103: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου Δ22



Σχήμα 104: Συγκριτικό Διάγραμμα Δοκιμίων Δ21 και Δ22

Η ακτίνα καμπυλότητας λίγο πριν τη κατάρρευση είναι περίπου η ίδια με αυτή του μητρικού υλικού.



Σχήμα 105: Υπολογισμός Καμπυλότητας Δοκιμίου Δ22

### 3.7 Πειραματικός Έλεγχος Αντοχής Ορθογωνικών Δοκιμίων (coupons)

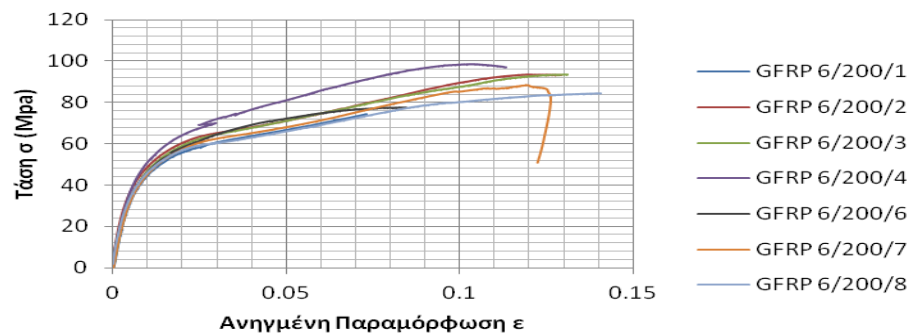
Ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των καμπυλόμορφων δοκιμίων αποφασίστηκε να γίνει με τον έλεγχο σε εφελκυσμό δοκιμίων τύπου coupons κατά το πρότυπο ASTM D3039-00. Το πλήθος των δοκιμίων καθορίστηκε από την ελάχιστη απαίτηση του προτύπου για 5 δοκίμια και επιπλέον αποφασίστηκε ο έλεγχος και από ένα δοκίμιο το οποίο βυθίστηκε στο νερό και ένα το οποίο υποβλήθηκε σε υγρό περιβάλλον και ψύξη. Λόγω του μεγάλου όγκου πληροφοριών τα αποτελέσματα για κάθε ομάδα δοκιμίων θα δίνονται σε ένα διάγραμμα.

#### 3.7.1 Δοκίμια σύνθεσης 6/200

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας  $E_{chord}$  έγινε σύμφωνα με αυτά που ορίζει το πρότυπο ASTM D3039-00. Υπολογίζεται αρχικά η διαφορά  $\Delta\sigma$  και  $\Delta\epsilon$  στις περιοχές τιμών  $0,001 < \epsilon < 0,003$  και προκύπτει έτσι το  $E_{chord} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$ . Όσο αφορά το δευτερεύον μέτρο ελαστικότητας αυτό υπολογίστηκε κατά τις αρχές του προτύπου και στη συνέχεια λαμβάνοντας μια μικρή περιοχή στα δεδομένα που προσεγγίζουν το μέγιστο υπολογίσαμε από το Excel την ευθεία η οποία εφάπτεται σε μια περιορισμένη περιοχή δεδομένων.

coupon index	thickness (mm)	weight (gr)	temperature °C	humidity %	max stress	max stress mean	Echord (Mpa)	sec Echord (Mpa)
C1	1.24	12.43	26	35	83.77627		7728	254
C2	1.23	12.4	27.5	32.5	93.76292		7051	129
C3	1.23	12.13	28	32.5	93.60236	88.840332	7615	60
C7	1.23	12.55	28.5	33	88.43522		7384	296
C8	1.25	12.75	29	32	84.62489		6515	188
C4w	1.25	12.1	28	32.5	98.57143	98.57143	8383	252
C6w,c	1.49	13.02	28	32.5	77.60416	77.60416	6368	270

Πίνακας 4: Πίνακας τεχνικών στοιχείων δοκιμών σύνθεσης 6/200gr/m<sup>2</sup>

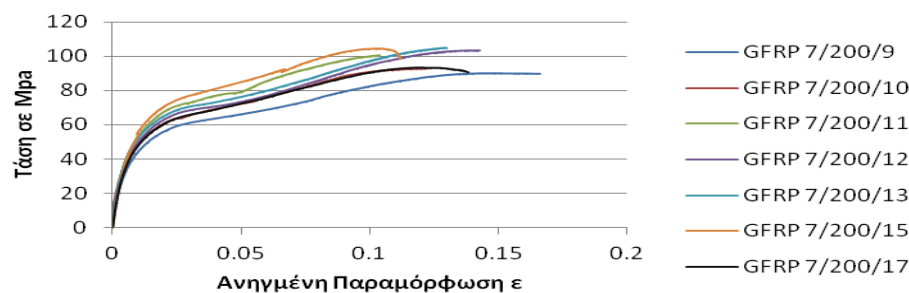


Σχήμα 106: Συγκριτικό Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων συνθέσεων 6/200

### 3.7.2 Δοκίμα σύνθεσης 7/200

coupon index	thickness (mm)	weight (gr)	temperature °C	humidity %	max stress	max stress mean	Echord (Mpa)	sec Echord (Mpa)
C9	1.44	12.4	26	41.5	90.21708		6025	222
C10	1.48	14.78	26.5	37.5	93.15514		5930	288
C11	1.45	14.61	25	48	100.7756	98.618224	8917	354
C12	1.45	14.81	23.5	53.5	103.4303		6430	326
C13	1.4	14.55	24	51	105.513		7723	356
C15w	1.39	14.26	23.5	40.5	104.7748	104.7748	8339	354
C17wc	1.43	14.31	22.5	41.5	93.41412	93.41412	7462	237

Πίνακας 5: Τεχνικά στοιχεία δοκιμών σύνθεσης 7/200gr/m<sup>2</sup>

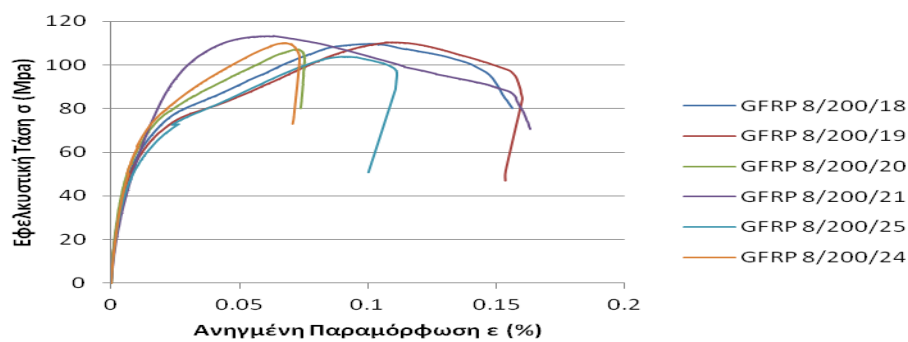


Σχήμα 107: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων Δοκιμών Σύνθεσης 7/200gr/m<sup>2</sup>

### 3.7.3 Δοκίμια σύνθεσης 8/200

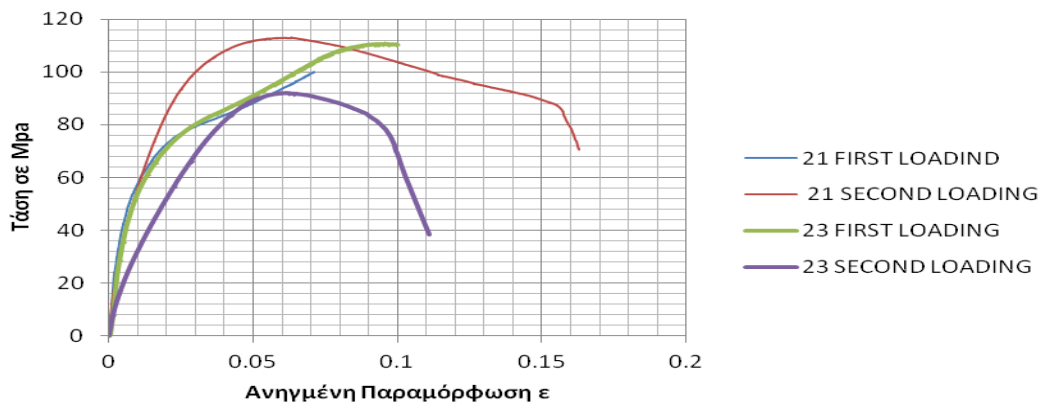
coupon index	thickness (mm)	weight (gr)	temperature °c	humidity %	max stress	Echord (Mpa)	sec Echord (Mpa)
C18	1.53	15.85	23.5	48	109.6247	8307	207
C19	1.5	15.92	25	52	110.4622	7605	300
C20	1.54	15.98	23.5	51	107.0613	8950	353
C21a	1.51	15.87	24.5	49	99.9374	9723	595
c21b	1.51	15.87	24.5	49	113.286	7093	20
C23a	1.5	15.94	25.5	49	110.6694	9822	162
c23b	1.5	15.94	25.5	49	92.00248	3985	116
C24wc	1.44	15.9	22.5	41.5	110.1247	8552	223
C25w	1.57	15.88	22.5	41.5	103.8389	7565	200

Πίνακας 6: Τεχνικά στοιχεία δοκιμίων σύνθεσης 8/200gr/m<sup>2</sup>



Σχήμα 108: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων δοκιμίων συνθέσεως 8/200gr/m<sup>2</sup>

Στο διάγραμμα του σχήματος 109 έχουμε τοποθετήσει τα αποτελέσματα των δοκιμίων της σύνθεσης 8/200gr/m<sup>2</sup> τα οποία πραγματοποιήθηκαν χωρίς διακοπή στη διάρκεια υλοποίησής τους. Στα δοκίμια 21 και 23 διεκόπη η φόρτιση πριν τη κατάρρευση και λίγο μετά αντίστοιχα.



Σχήμα 109: Συγκριτικό διάγραμμα δοκιμίων C21 και C23 πρωτεύουσας και δευτερεύουσας φορτίσης

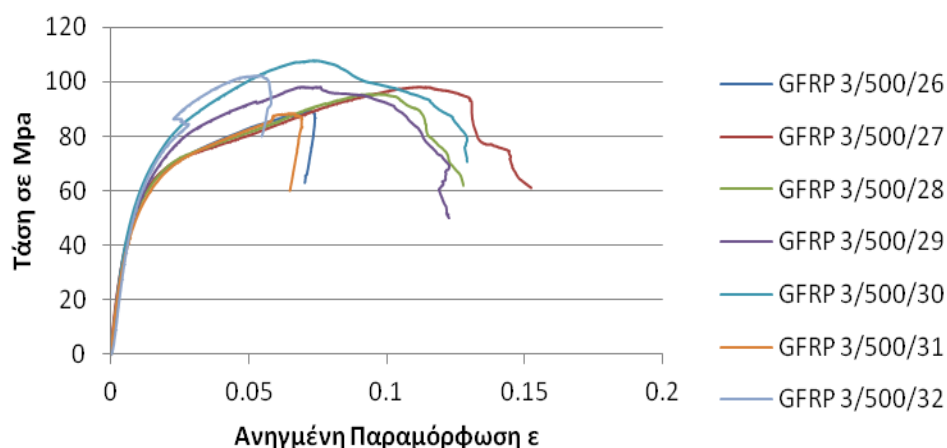
Διαπιστώνουμε ότι και τα δύο δοκίμια στην αρχική τους φόρτιση ακολουθούν την ίδια διαδρομή. Αυτό που προκαλεί έκπληξη είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου 21 στη δεύτερη φόρτιση.



### 3.7.4 Δοκίμια σύνθεσης 3/500

coupon index	thickness (mm)	weight (gr)	temperature °C	humidity %	max stress	Echord (Mpa)	sec Echord (Mpa)
C26	1.7	17.01	24.5	49.5	89.38535	7909	250
C27	1.71	16.98	23	55	97.97716	7580	191
C28	1.74	17.18	54.5	23.5	95.7031	8200	177
C29	1.72	16.82	24	54.5	98.15529	7678	350
C30	1.67	16.77	54.5	23.5	107.8826	8438	380
C31w	1.77	17.17	54.5	23.5	86.00095	7253	400
C32wc	1.6	16.67	54.5	23.5	102.1932	8122	113

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά δοκιμών σύνθεσης 3/500gr/m<sup>2</sup>



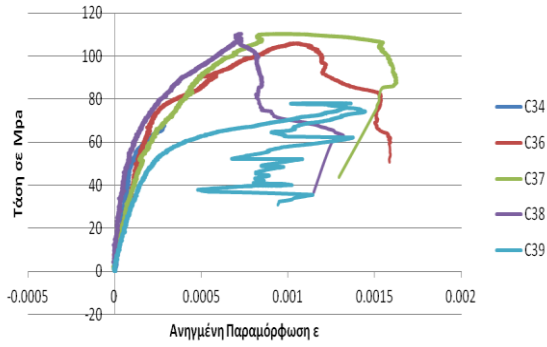
Σχήμα 110: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων δοκιμών σύνθεσης 3/500gr/m<sup>2</sup>

### 3.7.5 Δοκίμια σύνθεσης 4/500

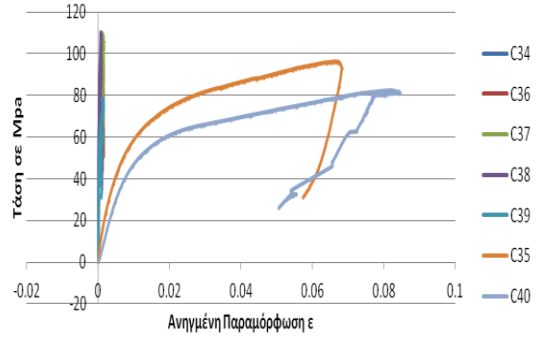
coupon index	thickness (mm)	weight (gr)	temperature °C	humidity %	max stress	Echord (Mpa)	sec Echord (Mpa)
C34	2.24	22.84	23	31	68.02404	551162	37074
C36	2.24	22.82	23	30	105.8667	302312	15969
C37	2.21	22.53	23	30	105.9939	324178	30886
C38	2.3	22.34	23	30	106.0341	545402	51375
C39	2.36	22.97	23	30	76.02385	256170	21746
C35w	2.22	23.25	22.5	31.5	96.54005	8121	298
C40wc	2.34	23.27	23	30	82.19906	6703	175

Πίνακας 8: Τεχνικά στοιχεία δοκιμών σύνθεσης 4/500gr/m<sup>2</sup>

Παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα ένα με τα δοκίμια 34,36,37,38,39 από τα οποία κάνουμε τη περιγραφική στατιστική και ένα με όλα μαζί συμπεριλαμβανομένου και αυτών τα οποία τοποθετήθηκαν στο νερό και στη ψύξη. Παρατηρείται ότι τα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε προηγούμενη καταπόνηση έχουν πολύ μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τα υπόλοιπα τα οποία χαρακτηρίζονται σαφώς ως ψαθυρά.



Σχήμα 111: Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 4/500gr/m<sup>2</sup>

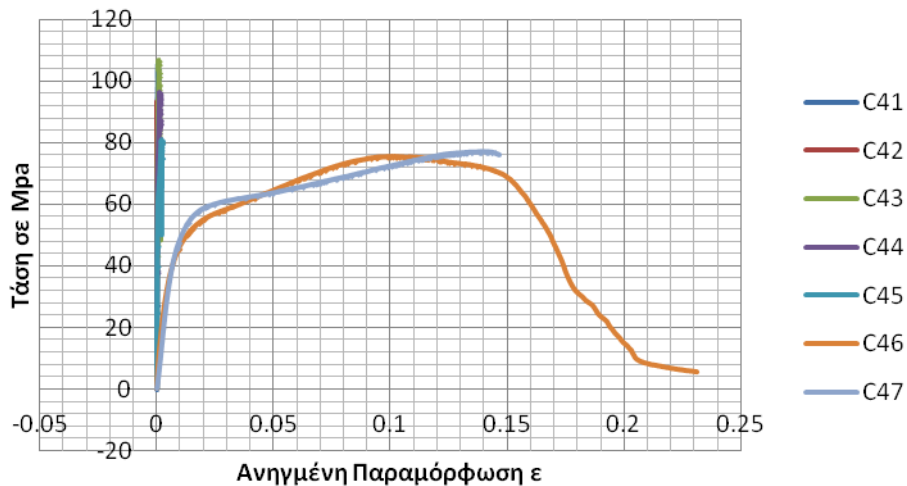


Σχήμα 112: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων παραμορφώσεων όλων των δοκιμίων της σύνθεσης 4/500gr/m<sup>2</sup>

### 3.7.6 Δοκίμιο 5/500

coupon index	thickness (mm)	weight (gr)	temperature °c	humidity %	max stress	Echord (Mpa)	sec Echord (Mpa)
C41	2.57	26.35	23.5	30	76.98599	159417	
C42	2.57	26.21	23.5	30	85.99773	238398	
C43	2.55	26.68	24	29	101.9923	418360	40556
C44	2.59	26.75	24	30.5	94.03285	178223	22830
C45	2.57	26.16	24.5	31	81.102	357743	5316
C46wc	2.96	27.07	45	23.5	75.60045	6909	53
C47w	2.57	25.43	50	23.5	77.28484	7280	56

Σχήμα 113: Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 5/500gr/m<sup>2</sup>



Σχήμα 114: Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 5/500gr/m<sup>2</sup>

Και σε αυτή τη περίπτωση των δοκιμών διαπιστώνουμε ότι η προηγούμενη καταπόνηση των δοκιμών μειώνει τη φέρουσα ικανότητα και ταυτόχρονα δίνει μεγαλύτερη ολκιμότητα στο υλικό.

## 4 Συμπεράσματα-Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

### 4.1 Γενικά

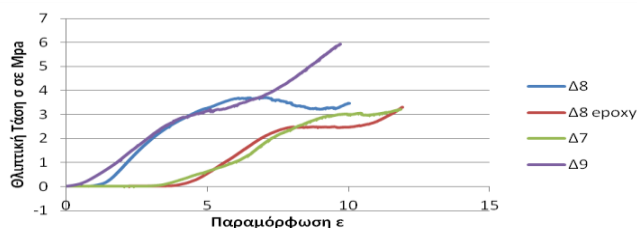
Μέσα από τη πειραματική διαδικασία προέκυψαν αποτελέσματα τα οποία παρά το μικρό πλήθος τους σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ικανά παρά ταύτα να μας δώσουν συμπεράσματα σε επίπεδο πτυχιακής εργασίας. Οι έλεγχοι οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια, τα οποία ήταν ένας συνδυασμός παλαιών και νέων, έγινε προσπάθεια να μας δώσουν ουσιαστικά αποτελέσματα.

### 4.2 Αξιολόγηση Φέρουσας Ικανότητας Υλικού στην εκτός Επιπέδου Φόρτιση

Η κεντρική ιδέα της πειραματικής διερεύνησης του υλικού MO.MAT ήταν να ελεγχθεί η δυνατότητα επέμβασης, με υλικά ενίσχυσης για αποκατάσταση των βλαβών, με σκοπό την επέκταση της χρήσης και αξιοποίησης του. Το διατιθέμενο προς έλεγχο τμήμα βρισκόταν από πλευράς βλαβών στο επιθυμητό επίπεδο προκειμένου να δοκιμάσουμε τρόπους επέμβασης. Αυτό το οποίο δεν μπορούσαμε μακροσκοπικά να διαπιστώσουμε ήταν η σύνθεση της κατασκευής του καθώς και τα υλικά της. Για να διαπιστώσουμε κάτι τέτοιο ή καλύτερα για να προσομοιάσουμε στις ιδιότητες κατασκευάσαμε και νέα δοκίμια. Τα δοκίμια τα οποία καθορίζουν την πολιτική επέμβασης είναι κυρίως τα καμπυλόμορφα τετραγωνικά και ορθογωνικά ως προς τη συμπεριφορά τους.

#### 4.2.1 Αξιολόγηση ενίσχυσης τετραγωνικών δοκιμίων

Η μεγάλη δυσκολία σε αυτή την εργασία ήταν εξεύρεση παλαιού υλικού για έλεγχο. Αυτό αποτέλεσε πρόβλημα καθώς δεν υπήρχε αντιπροσωπευτικό δείγμα τόσο από πλευράς χρήσης σε διαφορετικής ενδοσιμότητας εδάφη όσο και από πλευράς παλαιότητας διαφόρων τμημάτων. Γι αυτό το λόγο αποφασίστηκε να τεθεί σαν δοκίμιο βάσης το δοκίμιο 8 του οποίου η κατάσταση μπορεί να χαρακτηριστεί αντιπροσωπευτική από πλευράς βλαβών και χρήσης. Στη προσπάθεια να άρουμε μεγάλο μέρος των παραδοχών, ως προς το δοκίμιο βάσης, αποφασίστηκε οι έλεγχοι να πραγματοποιηθούν με την θεώρηση ανένδοτου εδάφους με τα δοκίμια να συμπίεζονται μεταξύ ανενδότην μεταλλικών πλακών επιτυγχάνοντας έτσι τις δυσμενέστερες των συνθηκών. Στο δοκίμιο 8 πραγματοποιήθηκαν 2 πειραματικοί έλεγχοι ένας χωρίς την οποιαδήποτε επέμβαση και ένας σε δευτερο χρόνο με την επικάλυψη του με εποξεική ρητίνη.



Σχήμα 115: Συγκριτικό διάγραμμα παλαιών δοκιμίων και δοκιμίου βάσης.

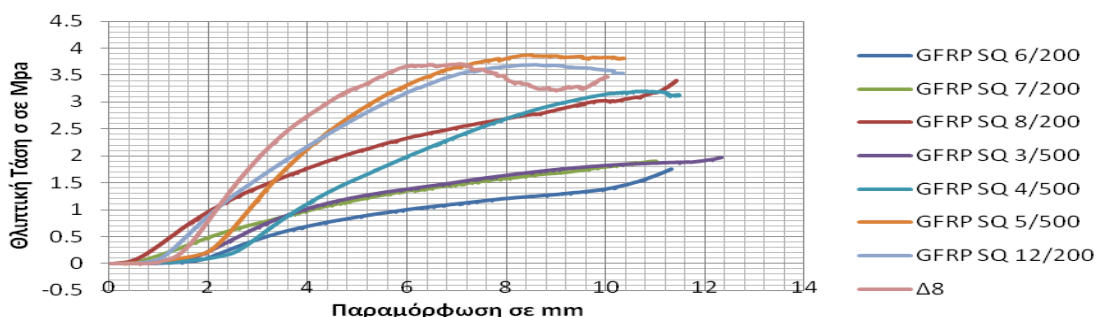
Είναι φανερό ότι η αποδοτικότερη επέμβαση είναι η εφαρμογή υαλοφασμάτων στην άνω και κάτω επιφάνεια του υλικού, η οποία εαν εφαρμοστεί σε προβληματικές περιοχές παρουσιάζει καλύτερη πρόσφυση και αυξάνει τις ιδιότητες του υλικού. Το δοκίμιο 9 έφερε εκτεταμένες βλάβες τόσο σε επίπεδο αποκολλήσεων όσο και σε επίπεδο διακοπής της συνέχειας.

Εκείνο για το οποίο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι εαν οι συγκεκριμένες επεμβάσεις προκαλούν μείωση της ικανότητας του υλικού σε καμπύλωση προκειμένου να αποθηκεύεται και στη συνέχεια να μεταφέρεται προς χρήση.

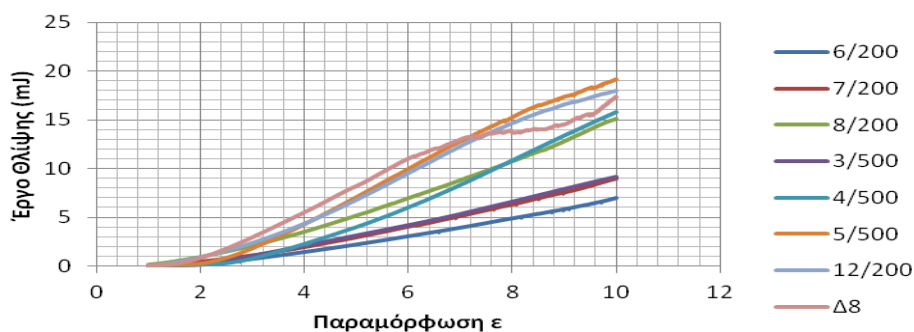
Διαπιστώσαμε ότι με μια απλή ενίσχυση επάλειψης ουδεμία μεταβολή παρατηρείται στο υλικό μας σε ότι αφορά τη καμπυλότητα του. Στη περίπτωση των ενισχύσεων με υαλοφάσματα όμως παρατηρείται μεταβολή της καμπυλότητας παρόλα αυτά η ενίσχυση στη περίπτωση αυτή αστοχεί αποκολλούμενη πριν την κατάρρευση οποιουδήποτε από τα δυο υλικά, παλιού και νέου. Αυτή η αστοχία μπορεί να προληφθεί με τη διάνοιξη οπών στο παλιό υλικό για τη δημιουργία μίας ιδιότυπης κοχλίωσης η οποία σχηματίζεται κατά τη φάση σκλήρυνσης (curing) της ρητίνης, τόσο πολυεστέρα όσο και εποξεικής, αποτέλεσμα το οποίο παρατηρήθηκε στο δοκίμιο ΔΡ2 αλλά με αποτέλεσμα αύξησης της ακτίνας καμπυλότητας.

Αυτό το οποίο θα πρέπει να αξιολογήσουμε στη φάση αυτή είναι το εαν η αύξηση της φέρουσας ικανότητας είναι αποδεκτή σε σχέση με την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας.

Το γεγονός ότι στα δοκίμια του σχήματος 115 δεν εμφανίζονται άλματα στα διαγράμματα δε σημαίνει ότι μέχρι την επίτευξη της μέγιστης τάσης δεν έχουμε βλάβες στο εσωτερικό του υλικού. Δεν μπορούν να εντοπιστούν μέσα από ένα πείραμα θλίψης σε μια τέτοια επιφάνεια βλάβες καθώς λόγω της μορφολογίας τμήματα του υλικού θλίβονται και τμήματα εφελκούνται. Ο τοπικές αστοχίες του υλικού καθορίζονται από την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας στο εσωτερικό του και είναι αυτές που καθορίζουν και τη παραπέρα συμπεριφορά του.



Σχήμα 116: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων νέων δοκιμίων με το δοκίμιο βάσης



Σχήμα 117: Διάγραμμα έργων Παραμόρφωσης νέων δοκιμίων και δοκιμίου βάσης

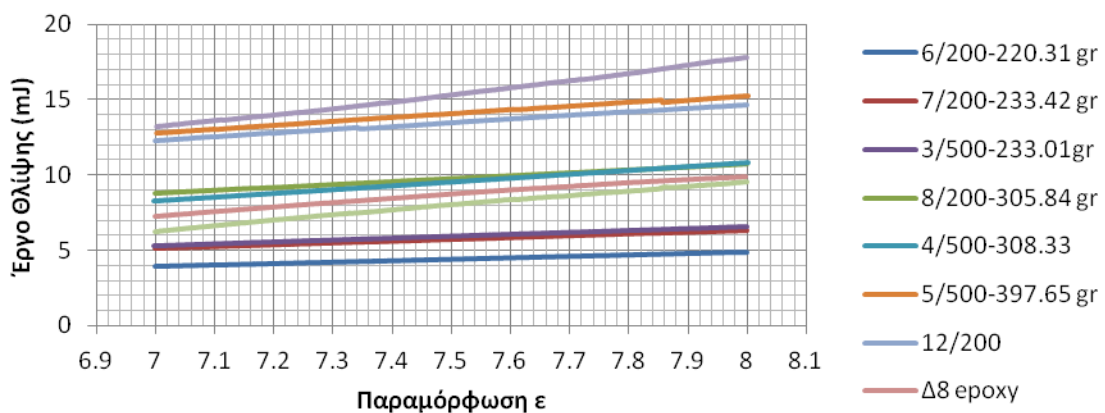
Αυτό το οποίο γίνεται αντιληπτό είναι μια ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων και αυτό θα μπορούσαμε να το εξηγήσουμε σε συνδυασμό με τα πάχη των δοκιμίων. Διαπιστώνουμε από το παρακάτω πίνακα ότι η απορρόφηση ενέργειας εξαρτάται από το πάχος του δοκιμίου και φαίνεται τόσο από την ομαδοποίηση όσο και από τα αποτελέσματα. Αυτό που παρατηρείται επίσης είναι το γεγονός ότι η σύνθεση των δοκιμίων δεν αποτελεί παραγοντα διαφοροποίησης κρίνοντας τα αποτελέσματα.

Διαφοροποίηση όμως παρατηρείται ως προς τον τρόπο ανάπτυξης των βλαβών όπου στα δοκίμια σύνθεσης 500gr/m<sup>2</sup> οι παρατηρηθείσες βλάβες και αστοχίες είναι ψαθυρές και σε σημεία υψηλής απορρόφησης ενέργειας μη αναστρέψιμες σε αντιδιαστολή με αυτές των υπολοίπων δοκιμίων σύνθεσης 200gr/m<sup>2</sup>.

A/A	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΠΛΑΤΟΣ mm	ΜΗΚΟΣ mm	ΠΑΧΟΣ mm	ΒΑΡΟΣ gr
1	Δ1	6/200gr	300	300	1.4	220.31
2	Δ2	8/200gr	300	300	2	305.84
5	Δ5	4/500gr	300	300	2.39	308.33
3	Δ3	7/200gr	300	300	1.49	233.42
4	Δ4	3/500gr	300	300	1.95	233.01
6	Δ6	5/500gr	300	300	2.8	397.65
7	Δ21	12/200gr	300	300	2.60	360
8	Δ8	Δοκίμιο υπάρχουσας σύνθεσης τετραγωνικής διατομής	300	300	2.54	364.7

Πίνακας 9: Πίνακας ομαδοποίησης δοκιμίων βάση του βάρους τους

Στη περιοχή παραμόρφωσης των 7 έως 8 mm παρατηρούμε ότι σε όλα τα δοκίμια βάση της ομαδοποίησης την οποία κάναμε οι γραμμές απορροφούμενη ενέργειας σχεδόν συμπίπτουν. Για το λόγο αυτό θα θέσουμε ένα κριτήριο προσδιορισμού της βελτίωσης η μη των ιδιοτήτων ενισχυμένου υλικού ανάλογα με το βάρος του και κατα πόσο ξεπερνά την αντίστοιχη γραμμή απορρόφησης ενέργειας. Προκειμένου να έχουμε εποπτεία των παραπάνω θα τροποποιήσουμε το διάγραμμα του σχήματος 116 και θα διατηρήσουμε τα αποτελέσματα στις παραμορφώσεις μεταξύ 7 και 8 mm όπως φαίνεται στο σχήμα 118.



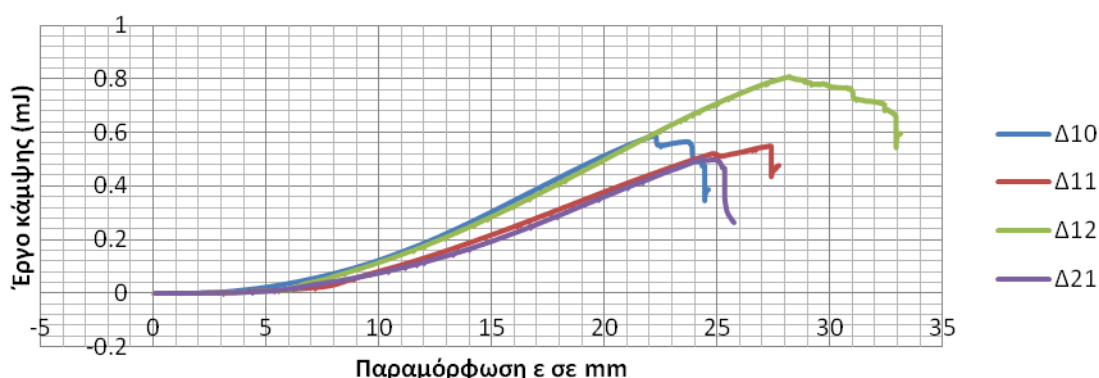
Σχήμα 118: Διάγραμμα αξιολόγησης απόδοσης ενισχύσεων

Από τις ενισχύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν αποδοτικότερη αποδεικνύεται η ενίσχυση με ένα τεμάχιο υαλοϋφάσματος σε κάθε επιφάνεια του δοκιμίου. Η απορρόφηση ενέργειας αυξήθηκε από 3,73% στη παραμόρφωση των 7mm έως 17% στη παραμόρφωση των 8 mm. Η ενίσχυση του δοκιμίου με επάλειψη ρητίνης δεν παρουσιάζει κάποια βελτίωση των ιδιοτήτων σε αντιδιαστολή με την ενίσχυση του ήδη θραυόμενου δοκιμίου με εποξεική ρητίνη του οποίου η γραμμή ενέργειας βρίσκεται υψηλότερα από την αντίστοιχη του δοκιμίου 7 .

Το γεγονός αυτό πιθανώς οφείλεται στην ελαστικότητα την οποία έχει η εποξεική ρητίνη σε σχέση με την πολυεστερική ρητίνη και επιτέπει στις φθαρμένες περιοχές του δοκιμίου να παραλάβουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας.

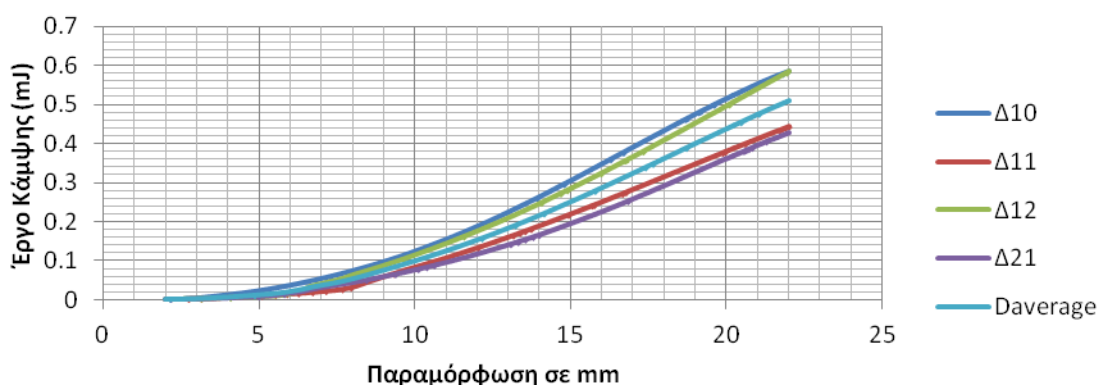
#### 4.2.2 Αξιολόγηση ενίσχυσης ορθογωνικών δοκιμίων

Στα ορθογωνικά δοκίμια τα δοκίμια τα οποία ελέγχθηκαν από το μητρικό υλικό ήταν συνολικά 3 και ένα νέο δοκίμιο σύνθεσης 12/200 gr/m<sup>2</sup>.

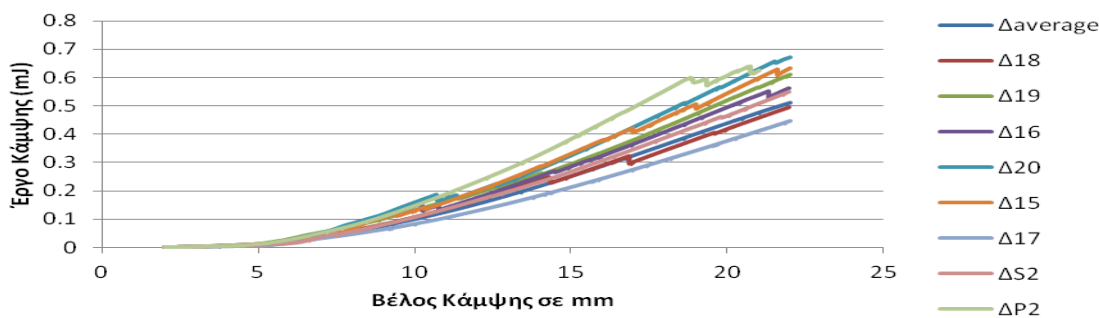


Σχήμα 119: Διάγραμμα απορρόφησης ενέργειας σε κάμψη μητρικών και νέων δοκιμίων

Οι γραμμές ενέργειας των μητρικών δοκιμίων παρουσιάζουν απόκλιση και για το λόγο αυτό θα τροποποιήσουμε αυτό με σκοπό να έχουμε μία αντιπροσωπευτική γραμμή ενέργειας υπολογίζοντας τον μέσο όρο των απορροφηθεισών ενεργειών από τα παραπάνω δοκίμια σε παραμόρφωση από 2mm έως 22 mm. Η γραμμή ενέργειας η οποία προκύπτει θα αποτελέσει και το όριο αξιολόγησης των ενισχυμένων δοκιμίων.



Σχήμα 120: Διάγραμμα μέσης γραμμής απορρόφησης ενέργειας



Σχήμα 121: Διάγραμμα σύγκρισης γραμμών ενέργειας ενισχυμένων δοκιμίων με τη μέση γραμμή

Από το διάγραμμα του σχήματος 121 διαπιστώνουμε ότι όλες οι ενισχύσεις, πλὴν της επάλειψης με πολυεστερική ρητίνη και ενός δοκιμίου με ενίσχυση ενός υαλοϋφάσματος  $200 \text{ gr/m}^2$ , απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από τα αρχικά δοκίμια αλλά η αποδοτικότερη όλων είναι η ενίσχυση με 2 υαλοϋφάσματα  $200 \text{ gr/m}^2$  εμποτισμένα με εποξεική ρητίνη και οπές στην επιφάνεια του δοκιμίου. Μέσα από τις γραμμές γίνεται φανερό ότι και η ενίσχυση με 2 υαλοϋφάσματα των  $200 \text{ gr/m}^2$  μέχρι και τη παραμόρφωση των 10 mm ακολουθεί το «δρόμο» ενέργειας του δοκιμίου ΔP2 αλλά λόγω της απουσίας οπών, οι οποίες δημιουργούν μια υποτυπώδη κοχλίωση, η γραμμή ενέργειας μεταπίπτει σε μικρότερα ποσά ενέργειας.

### 4.3 Σύνοψης-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Συνοψίζοντας την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα μπορούσαμε να διαπιστώσουμε ότι ενίσχυση του μητρικού υλικού είναι εφικτή. Η απόδοση της κάθε μορφής ενίσχυσης όμως ποικίλλει αναλόγως του τρόπου εφαρμογής της. Αυτό το οποίο δεν επετεύχθει με τη κατασκευή νέων δοκιμίων ήταν η ξεπεραστεί η φέρουσα ικανότητα του υλικού και αυτό μπορεί να αποδοθεί σε δύο παράγοντες:

α. Στις μηχανικές ιδιότητες της πολυεστερικής ρητίνης.

β. Στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε τύπος υαλοϋφάσματος woven roving γεγονός το οποίο σημαίνει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από το αντίστοιχο του μητρικού υλικού όπου διαπιστώθηκε ενιαία κατεύθυνση ινών.

Το βάρος του δοκιμίου είναι χαρακτηριστικό και είναι αυτό το οποίο καθορίζει και τη συμπεριφορά από άποψη απορρόφησης ενέργειας καθώς έτσι αυξάνεται το ποσοστό των ινών. Αυτή η παραδοχή μπορεί να γίνει αποδεκτή μόνο όταν η κατασκευή των δοκιμίων ακολουθεί σε κάθε ένα από αυτά την ίδια εφαρμοζόμενη διαδικασία και τα σφάλματα εφαρμογής ελαχιστοποιούνται.

Η ενίσχυση των δοκιμίων για επίτευξη βελτίωσης των ιδιοτήτων τους διαπιστώθηκε ότι μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Η αποδοτικότερη όλων είναι όμως η τοποθέτηση 2 υαλοϋφασμάτων ένα σε κάθε όψη του υλικού με ταυτόχρονη διάνοιξη οπών στην επιφάνεια. Οι οπές οι οποίες έγιναν στο υλικό έχουν διάμετρο 3mm.

Ο σημαντικότερος παράγοντας ο οποίος επιδρά στις ενισχύσεις είναι η σύνδεση των δύο διαφορετικών συνθέσεων και μέσα από αυτές τις ενισχύσεις στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μόνο επαναφορά του φθαρμένου υλικού στην αρχική φέρουσα ικανότητα του επετεύχθει.

Στο σημείο αυτό θα προτείνουμε για την περαιτέρω έρευνα:

γ. Η πειραματική διερεύνηση της απόδοσης στη σύνδεση σύνθετων υλικών με «αυτοκοχλίωση» σε επίπεδο διαμέτρου οπών και συνδετικού υλικού.

δ. Η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση νέας μορφολογίας πλάκας MOMAT.



## 5 Ανάλυση προβλήματος με τη χρήση λογισμικού

### 5.1 Γενικά

Η δυνατότητα ανάλυσης φορών με πεπερασμένα στοιχεία έχει δώσει την δυνατότητα στον μελετητή να σχεδιάζει αλλά και ταυτόχρονα να ελέγχει την απόκριση του μοντέλου του στα διάφορα είδη φορτίσεων. Η χρήση της ανάλυσης φορέων με επεπερασμένα στοιχεία εκτός του ελέγχου έχει δώσει και την ώθηση έτσι ώστε με ελάχιστο κόστος να γίνεται βελτιστοποίηση του φορέα. Σε αυτή τη λογική αποφασίστηκε η ανάλυση του υλικού μας με τη χρήση του λογισμικού Abaqus 6.10.1 της εταιρίας Simulia Corp.

Αντικειμενικός σκοπός της ανάλυσης ήταν ο έλεγχος και τυχόν ταυτοποίηση του πειραματικού αποτελέσματος με το μοντέλο του λογισμικού. Σε αυτή τη βάση έγινε προσομοίωση της επιφάνεια στο γραφικό περιβάλλον του AutoCad 2013 (Student Version) και ανάλυση με το λογισμικό Abaqus.

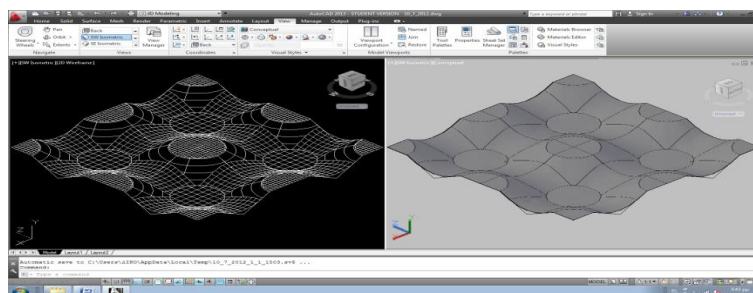
### 5.2 Προσομοίωση της προς έλεγχο επιφάνειας

Ξεκινώντας την εργασία μας προσπαθήσαμε να αναπαράγουμε τη τοπολογία της επιφάνειας κάνοντας μετρήσεις με μικρόμετρο και παχύμετρο (σχ.24). Στόχος η δημιουργία βάσης δεδομένων μετρήσεων σε ένα από τα επαναλαμβανόμενα μοτίβα της επιφάνειας (σχ.25) και στη συνέχεια εισάγοντας αυτά σε σχεδιαστικό περιβάλλον η αναπαραγωγή τους με επανάληψη.

Η προσπάθεια είχε αποτέλεσμα αλλά όχι το αναμενόμενο καθώς σε πολλές μετρήσεις λόγω του ότι δεν μπορούσαμε να προσδιορίσουμε επακριβώς το σημείο μέτρησης και υπήρχαν αποκλίσεις.

Παρατηρώντας ωστόσο την επιφάνεια διαπιστώσαμε ότι δεν ήταν τίποτα άλλο από μια απλή παράθεση κλώνων κώνων. Η παράθεση των κώνων ακολουθούσε τη λογική :μια σειρά κώνων με τη βάση κάτω μια σειρά με την βάση επάνω με επίπεδο συμμετρίας το μέσο του ύψους του κώνου. Η παρατήρηση αυτή δεν αποτελούσε ανακάλυψη καθώς είχαμε το προφίλ της διατομής. Το πρόβλημα ήταν στη σύζευξη των κώνων μεταξύ τους καθώς δεν μπορούσαμε να παράξουμε μια εξίσωση που να ικανοποιεί το καμπύλο τμήμα της επιφάνειας. Κατασκευάστηκε καμπύλη γραμμή και δημιουργήσαμε δίχωνο υπερβολοειδές εκ περιστροφής με προβλήματα ωστόσο στη σύνδεση των κώνων και πάλι.

Τελικά η λύση δόθηκε μέσω της εντολής \*fillet του σχεδιαστικού προγράμματος η οποία με μια γωνία μορφοποίησης στις 25° μας έδωσε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

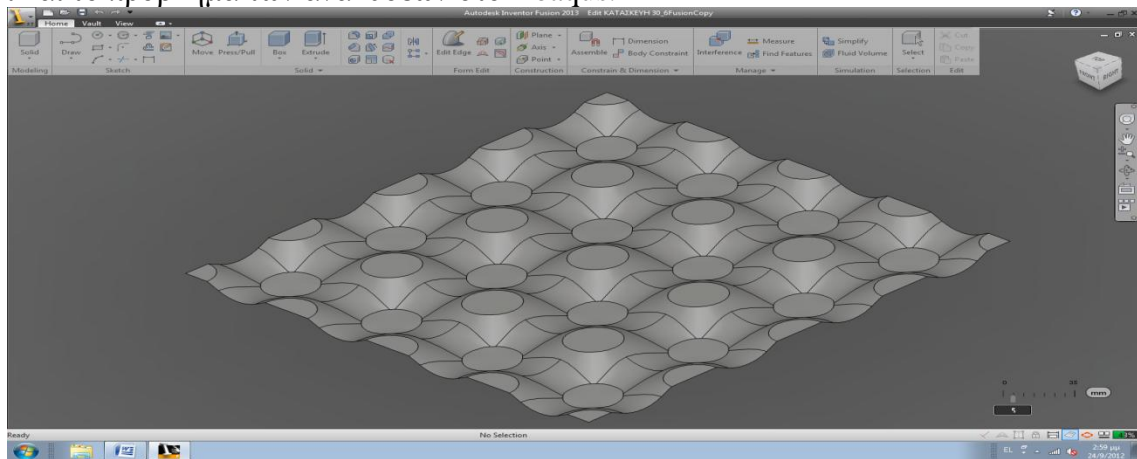


Σχήμα 122:Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας MOMAT

### 5.3 Μετατροπή του σχεδιαστικού μοντέλου σε αναγνώσιμο από το Abaqus αρχείο.

Η κατασκευή της τρισδιάστατης απεικόνισης της επιφάνειας στο σχεδιαστικό περιβάλλον του AutoCad 2013 δυστυχώς δεν σημαίνει ότι το αρχείο αυτό είναι αναγνώσιμο άμεσα και από το λογισμικό ανάλυσης Abaqus. Το αρχείο τύπου \*.dwg ή \*.dxf στο οποίο μπορούσαμε να αποθηκεύσουμε το δισδιάστατο σχέδιο δεν αναγνωρίζεται για 3D απεικονίσεις από το Abaqus παρά μόνο για 2D απεικονίσεις ως «σκίτσο» (sketch). Μια λύση ήταν να προσπαθήσουμε να κατασκευάσουμε εξ αρχής την επιφάνεια σχεδιαστικό περιβάλλον του Abaqus πράγμα εξαιρετικά δύσκολο καθώς τα εργαλεία και η χρήση τους δεν προσφέρονται για την τρισδιάστατη απεικόνιση μιας τέτοιου τύπου επιφάνειας. Η λύση που επιλέγει ήταν τελικά να γίνει ανάλυση του \*.dxf αρχείου στο ειδικό σχεδιαστικό λογισμικό της Autodesk Inventor Fusion 2013 το οποίο βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με το AutoCad.

Μέσω το προγράμματος Inventor Fusion 2013 παρέχεται η δυνατότητα περιορισμού των σχεδιαστικών ατελειών στα όρια των επαφών των διαφόρων τμημάτων αποφεύγοντας έτσι και το πρόβλημα των αναλύσεων στο Abaqus.



Σχήμα 123:Ανάλυση dxf αρχείου στο Inventor Fusion 2013 και μετατροπή σε αρχείο\*.sat

### 5.4 Η τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του MOMAT στο Abaqus

Η μεταφορά και το άνοιγμα του αναγνώσιμου αρχείου τύπου \*.sat με το λογισμικό ανάλυσης Abaqus δέχεται την επιφάνεια ως «part». Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση απαιτήθηκε να προσδιοριστούν οι συνθήκες στήριξης, το φορτίο, ο χρόνος επιβολής του φορτίου, η κατανομή των υαλουφασμάτων και οι ιδιότητες αυτών. Ο χρόνος επιβολής απαιτείται για τη κατασκευή καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων από τα δεδομένα που παράγονται από την ανάλυση.

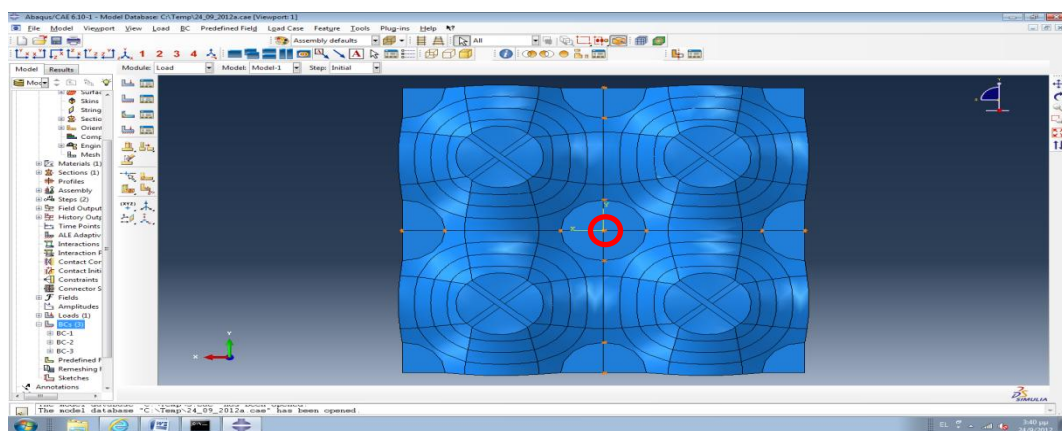
#### 5.4.1 Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού

Το δοκίμιο το οποίο αποφασίστηκε να ελεγχθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι το δοκίμιο σύνθεσης 12 /200 gr/m<sup>2</sup> με συνδετικό υλικό πολυεστέρα. Ο λόγος είναι ότι για το δοκίμιο αυτό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις ιδιότητες της σύνθεσης 6/200gr/m<sup>2</sup> με συνδετικό υλικό πολυεστέρα. Οι μηχανικές ιδιότητες της σύνθεσης 6/200 υπολογίστηκαν με το νόμο της σύνθεσης, όπως αναλύθηκε και στο

θεωρητικό μέρος, λαμβάνοντας υπόψη ότι το υλικό μας στον έλεγχο εφελκυσμού είναι τετραγωνικώς συμμετρικό με υπόθεση λόγου poisson  $\nu=0.26$  (τιμή για σύνθετα με πολυεστέρα και υαλοφάσματα) βρήκαμε  $E_1=E_2=29$  Gpa ,  $G_{12}=2$  Gra. Η τοποθέτηση των στρωμάτων υλικού έγινε ως εξής: όλα τα πανιά με κατεύθυνση  $0^\circ$  θεωρήθηκαν ένα στρώμα με πάχος 1,40 mm και όλα τα πανιά με κατεύθυνση  $90^\circ$  επίσης ένα στρώμα με πάχος 1,40mm[5]. Το πάχος ορίστηκε στο διπλάσιο του δοκιμίου σύνθεσης 6/200 το οποίο δεν απέχει και πολύ από την πραγματική μέτρηση των 2,72 mm του δοκιμίου σύνθεσης 12/200.

#### 5.4.2 Συνθήκες στήριξης

Στην ανάλυση λόγω συμμετρίας μελετήθηκε μόνο το  $\frac{1}{4}$  της αντίστοιχης επιφάνειας των πειραματικών δοκιμίων λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων και αυξημένων απαιτήσεων σε υπολογιστική μνήμη. Οι στηρίξεις έγιναν ως εξής:



Σχήμα 124: Απεικόνιση των συνθηκών στήριξης

Στη διεύθυνση x δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις στους άξονες y,z (εκτός των ακραίων δεσμεύσεων που έγιναν μόνο κατά y) και ειδικότερα στο σημείο που σημειώνεται με κόκκινο κύκλο έγινε δέσμευση και στους τρεις άξονες.

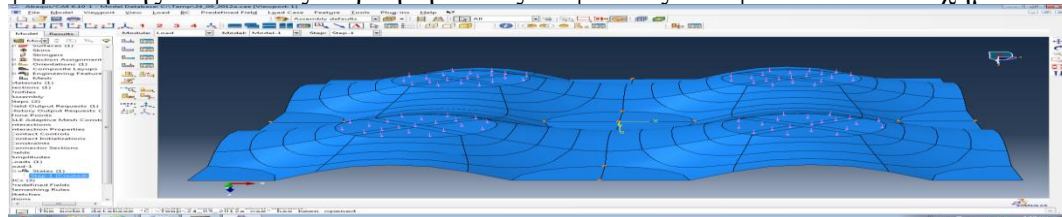
Στη διεύθυνση y δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις στους άξονες x,z(εκτός των ακραίων δεσμεύσεων που έγιναν μόνο κατά x).

Στη διεύθυνση z δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις στους άξονες x,y.

Τα σημεία δεσμεύσεων απεικονίζονται με πορτοκαλί χρώμα στο σχήμα 124.

#### 5.4.3 Φορτίσεις

Η φόρτιση της επιφάνειας επιβλήθηκε στις επιφάνειες που φαίνονται στο σχήμα 125.



Σχήμα 125: Επιφάνειες επιβολής ομοιόμορφης φόρτισης

Στη περίπτωση των φορτίσεων ακολουθήθηκε η λογική της συμμετρίας. Από τα πειραματικά δεδομένα διαπιστώθηκε ότι η μηχανή κατά τη φάση της μέγιστης τάσης στο δοκίμιο Δ21 ανέπτυξε υδραυλική δύναμη 62768,42 N. Αυτή διαιρούμενη με την επιφάνεια φόρτισης στη πειραματική διάταξη απέδωσε τάση 3,69 MPa. Με αναγωγή κάθε τμήμα επιφάνεια παραλαμβάνει 0,346 MPa. Αυτή θα είναι και η επιβαλλόμενη πίεση σε καθε επιφάνεια καθώς στο Abaqus η φόρτιση «pressure» σε ομοιόμορφη κατανομή είναι δύναμη σε N ανα μονάδα επιφάνειας.

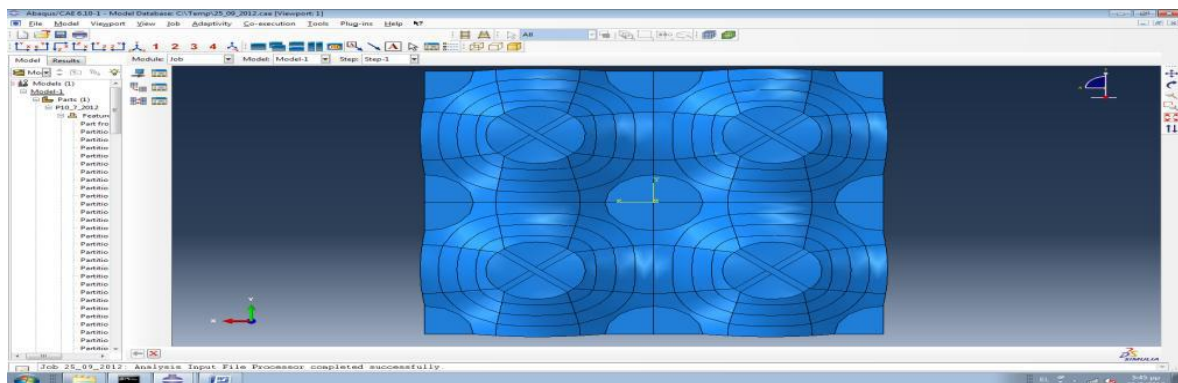
#### 5.4.4 Διαμέριση της επιφάνειας σε τετραπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία (S4R)

Η επιφάνεια μετά την επεξεργασία της όπως αναφέρθηκε στη παρ.5.3 για να επιλυθεί έπρεπε να διαμεριστεί (meshing). Αρχικά έγινε επιλογή να γίνει η διαμέριση με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία καθώς με το τρόπο αυτό γινόταν μια ομαλή κατανομή στην επιφάνεια.

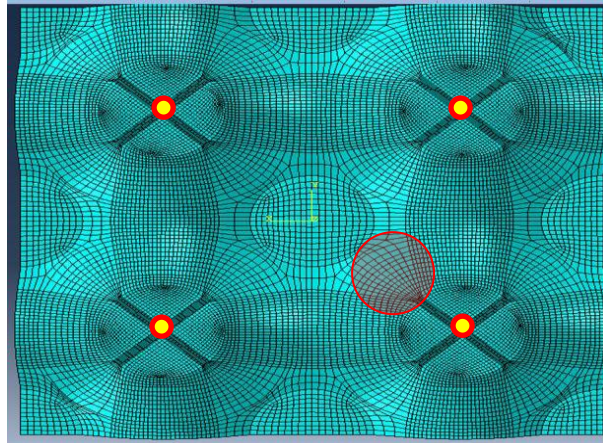
Επίπεδα τριγωνικά στοιχεία έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση κελυφών με επιτυχία. Η προσομοίωση με τέτοια στοιχεία είναι η καταλληλότερη καθώς έχουν το πλεονέκτημα ότι η διατύπωση των χαρακτηριστικών εξισώσεων που τα διέπει είναι σχετικά απλή, ικανοποιούν τον έλεγχο συρραφής και δεν εμφανίζουν παραμορφώσεις όταν μετατοπίζονται ως στερεά σώματα. Το μειονέκτημα τους όμως είναι ότι αδυνατούν να προσομοιώσουν τη σύζευξη των καμπτικών και μεμβρανικών παραμορφώσεων που ενυπάρχει σε όλα τα σημεία του κελύφους.[1]

Για επιτευχθεί μια καλύτερη ανάλυση από άποψως αποτελεσμάτων εφαρμόστηκαν πεπερασμένα τετραγωνικά στοιχεία. Η επιφάνεια στη περίπτωση αυτή έπρεπε να διαχωριστεί με “partitions” σε περισσότερα τμήματα. Με τη διαδικασία αυτή από το αρχικό 1 τμήμα-«part» κατασκευάστηκαν 135 νέα τμήματα (faces) όπως εικονίζεται στο σχήμα 126. Έτσι προέκυψε με αυτόματο τρόπο η διαμέριση των πεπερασμένων στοιχείων του σχήματος 127.

Παρατηρώντας τη φωτογραφία του σχήματος 127 μπορεί ο μελετητής να διαπιστώσει ότι υπάρχουν περιοχές με άνισα σε διαστάσεις τετραγωνικά στοιχεία. Πράγματι ήταν δύσκολο να έχουμε επακριβώς μια τέλεια διαμέριση αλλά εκείνο το οποίο προσπαθήσαμε ήταν να προσομοιάσουμε τις περιοχές των αστοχιών κυρίως της πειραματικής διαδικασίας με την αυτή διαμέριση σε όλα τα σημεία. Έτσι θα διαπιστώσουμε μια ομοιομορφία στα καμπύλα τμήματα. Ένα άλλο σημείο το οποίο θέλαμε να προσέξουμε και να επιβάλλουμε τη διαμέριση ήταν το προβαλλόμενο σημείο στο σχήμα 127 όπου απαιτήσαμε μια συνέχεια των διαμερίσεων του καμπύλου και του κωνικού τμήματος καθώς η ανάπτυξη τάσεων της πειραματικής διαδικασίας μας απέδειξε την έναρξη αστοχίας στα καμπύλα τμήματα και συνέχεια στην επιφάνεια του κώνου.



Σχήμα 126:Απεικόνιση της διαμέρισης με "partitions"

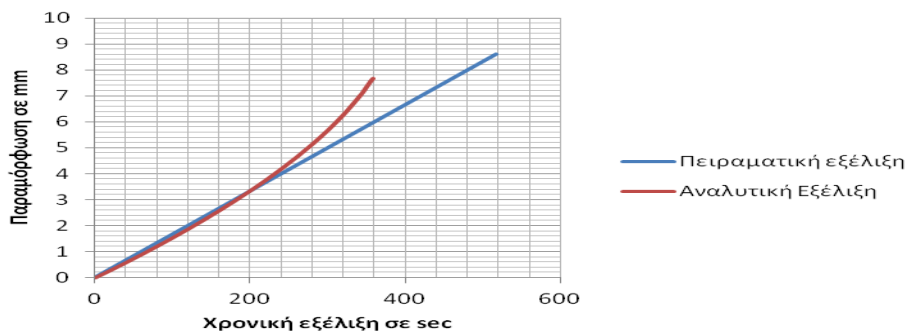


Σχήμα 127: Διαμέριση της επιφάνειας με πεπερασμένα στοιχεία τύπου S4R

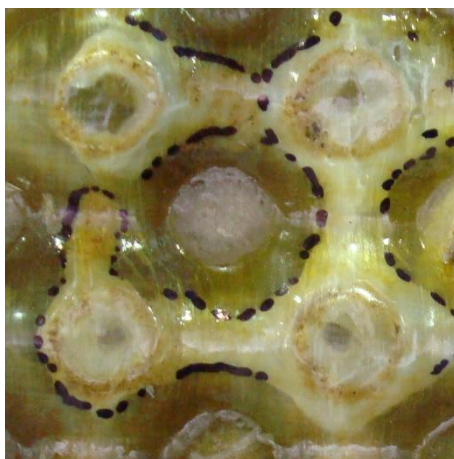
## 5.5 Αποτελέσματα και Αξιολόγηση της ανάλυσης

Στη φάση της ανάλυσης καθορίστηκαν τόσο ο χρόνος επιβολής του φορτίου όσο και το βήμα επιβολής έτσι καταλήξαμε αναζητώντας το χρόνο της πειραματικής διαδικασίας στον οποίο επετεύχθει η μέγιστη τάση και βρήκαμε ότι αυτό έγινε σε χρόνο 516 sec επιβολής φορτίου.

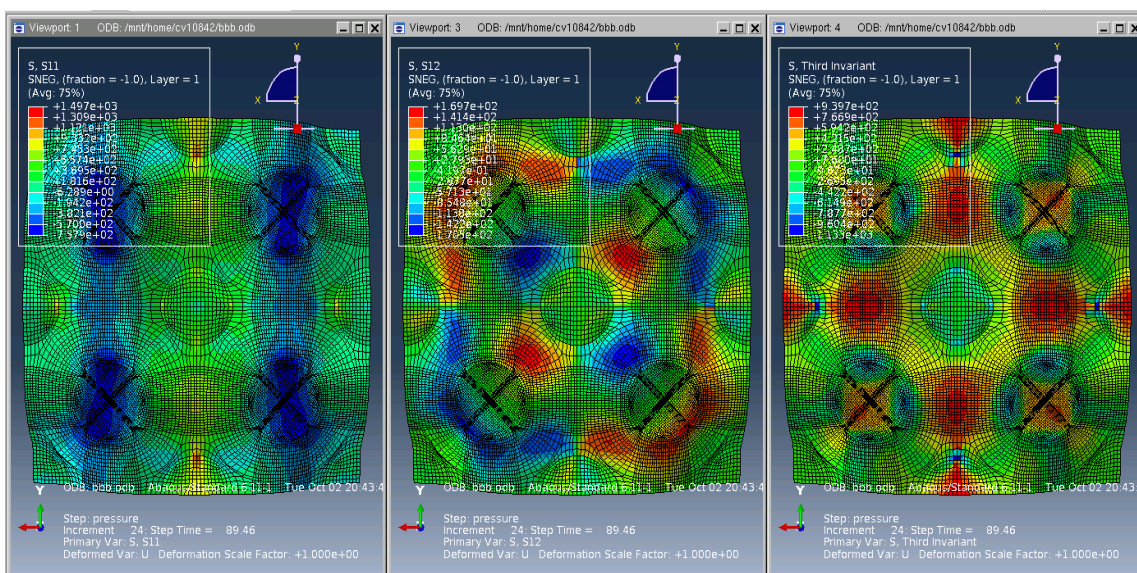
Εκείνο το οποίο θέλαμε αρχικά να διαπιστώσουμε ήταν εάν το αναλυτικό μας μοντέλο είχε την ίδια απόκριση στη φόρτιση η οποία πειραματικά επετεύχθει. Για το λόγο αυτό μετά από αρκετές επιλύσεις καταλήξαμε λόγω της έλλειψης υπολογιστικής δύναμης σε επίλυση χρονικής περιόδου 130 sec με increment size 5 sec προκειμένου να διαπιστώσουμε εάν η εξέλιξη των παραμορφώσεων είναι η ίδια με τα πειραματικά αποτελέσματα και ταυτόχρονα να κατασκευάσουμε animation για την οπτική αξιολόγηση της ανάπτυξης των τάσεων. Κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων διαπιστώσαμε ότι η επιβαλλόμενη φόρτιση των 5,5 N/mm<sup>2</sup> της παραγράφου 5.4.3 απαιτούσε μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης των δεδομένων και για το λόγο αυτό τετραπλασιάσαμε την επιβαλλόμενη φόρτιση σε 22 N/mm<sup>2</sup> μειώνοντας τον χρόνο της ανάλυσης. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τον χρόνο, στον οποίο επετεύχθησαν οι παραμορφώσεις της αναλυτικής μεθόδου, τον πολλαπλασιάσαμε με το 4 με σκοπό να άρουμε την παραδοχή του τετραπλάσιου επιβαλλόμενου φορτίου. Αν και αυτό δεν είναι επιστημονικά ακριβές διότι το φορτίο με το ρυθμό ανάλυσης που του ορίσαμε και το γεγονός ότι εφαρμόζεται σε επιφάνεια τετάρτου της αρχικής ωστόσο για τα πρώτα δευτερόλεπτα φόρτισης ο ρυθμός είναι ο ίδιος. Αποκλίσεις στην εξέλιξη οφείλονται τόσο στη στήριξη της πλάκας όσο και στο φορτίο.



Σχήμα 128: Διάγραμμα σύγκρισης ρυθμού παραμόρφωσης



Σχήμα 129: Τέταρτο επιφάνειας μητρικού υλικού



Σχήμα 130: Απεικόνιση των τάσεων S11-S12-S Third Invariant

Στα δύο παραπάνω σχήματα παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται οι τάσεις στην επιφάνεια μας τόσο στη πειραματική όσο και στην αναλυτική διαδικασία. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και διαπιστώνουμε ότι η πραγματική εικόνα είναι σχεδόν ταυτόσημη με του αναλυτικού μοντέλου.

Ο αντικειμενικός σκοπός όλης αυτής της διαδικασίας είναι να διαπιστώσουμε ότι τόσο το μοντέλο μας όσο και οι παράμετροι, όπως ο τρόπος εισαγωγής του υλικού οι συνθήκες στήριξης κ.α, οι οποίοι καθορίζουν τη συμπεριφορά του, είναι τέτοια ώστε να προσομοιάζουν το δυνατό καλύτερα τη πραγματική συμπεριφορά. Φυσικά υπάρχει και άλλο έργο το οποίο μπορεί να γίνει όπως για παράδειγμα η διαμέριση με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία παρά τις όποιες παθογένειες παρουσιάζουν στην ανάπτυξη των εξισώσεων.

Η διαδικασία αυτή πλέον μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγχουμε νέες συνθέσεις πως αντιδρούν στα διάφορα φορτία και να κάνουμε τις ανάλογες βελτιώσεις. Αυτό το οποίο δεν έγινε λόγω του επιπέδου έρευνας ήταν μετά την αρχική φόρτιση και την εξαγωγή των

αποτελεσμάτων τοποθέτηση νέου υλικού και επαναπροσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας.

Αυτό μπορεί και να αποτελέσει και ένα αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

## 6 Βιβλιογραφία

1. Παπαδρακάκης Μ.,(2001).«Ανάλυση Φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων». Εκδόσεις Παπασωτηρίου.Αθήνα.
2. Ραυτογιάννης Ι.Γ, (2009). «Σύνθετα Υλικά». Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
3. Κατσάνος Χ.,Αβούρης Ν. «Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Πειραματικών Δεδομένων Συνεργασίας». Πανεπιστήμιο Πατρών.
4. Carl Hanser Verlag. (2009). «Faserverbundwerkstoffe Handbuch». R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH.Munich.
5. Dassault Systemes Simulia Corp. (2010). “Abaqus 6.10 Example Problems Manual, Volume I:Static and Dyanamic Analyses, *Using a composite layup to model a yacht hull*” Providence, RI, USA.
6. Rudd C.D.,(1990).”Mechanical Properties of Weft Knit Glass Fibre /Polyester Laminates”.Composite science and Technology 39 (1990) 261-277.
7. Zhou G. Davies G. A. O.,(1994). «Characterization of Thick Woven Glass Roving/Polyester Laminates: Flexural and statistical considerations”.Composites 26 (1995) 587-596.
8. Kuo Wei Wu et al.,(1996).”Compressive strength of delaminated and repaired composite plate”.Materials chemistry and Physics 43 (1996) 173-177.
9. Ala Tabiei, Weitao Yi.,(2002). “Comparative study of predictive methods for woven fabric composite elastic properties”. Composite Structures 58 (2002) 149–164
10. X.Q. Penga et al.,(2004). “Experimental and numerical analysis on normalization of picture frame tests for composite materials”. Composites Science and Technology 64 (2004) 11–21
11. Oliveira B.F.Creus G.J.,(2004). “An analytical-numerical framework for the study of ageing in fibre reinforced polymer composites”.Composite Structures 65 (2004) 443-457.
12. Fredrik S., Stefan H.,(2012).” Spatial modelling of 3D-woven textiles”. Composite Structures 94 (2012) 1495–1502.



## 7 Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Τμήμα υλικού MOMAT για έλεγχο .....	7
Σχήμα 2: Το υλικό MOMAT σε ρολλούς αποθήκευσης .....	8
Σχήμα 3: Σχέση αντοχής και κατεύθυνσης των ινών .....	11
Σχήμα 4: Διάγραμμα διαδικασίας σχεδιασμού .....	12
Σχήμα 5: Χειρονακτική διαδικασία διαστρωμάτωσης .....	12
Σχήμα 6: Διαδικασία μέσω περιβλήματος .....	13
Σχήμα 7: Κλίβανος επεξεργασίας σύνθετων υλικών .....	14
Σχήμα 8: Compression molding process .....	14
Σχήμα 9: Καλούπι ρητινένεσης .....	14
Σχήμα 10: Διαδικασία παραγωγής με έλξη .....	15
Σχήμα 11: Διαδικασία περιέλιξης .....	15
Σχήμα 12: Τα τέσσερα πεδία της μηχανικής .....	16
Σχήμα 13: Τάσεις στο κύριο σύστημα αξόνων .....	17
Σχήμα 14: Σύστημα υλικού 1-2 και τυχόν σύστημα x-y με γωνία μετασχηματισμού $\theta$ .....	23
Σχήμα 15: Διάγραμμα μετασχηματισμού τάσεων .....	23
Σχήμα 16: Τομή α-α και ισορροπία δράσεων .....	24
Σχήμα 17: Τομή β-β και ισορροπία δράσεων .....	24
Σχήμα 18: Διάγραμμα μετασχηματισμού παραμορφώσεων .....	26
Σχήμα 19: Διάγραμμα μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας [Q] .....	26
Σχήμα 20: Γραφική παράσταση του κριτηρίου μέγιστης τάσης .....	30
Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση του κριτηρίου μέγιστης παραμόρφωσης .....	30
Σχήμα 22: Μοντέλο ανάλυσης διεπιφανειακών τάσεων σε διαστρωματώση υπό μονοαξονικό εφελκυσμό [1] .....	34
Σχήμα 23: Σύστημα αξόνων υλικού διαστρωμάτωσης .....	36
Σχήμα 24: Διαπιστευμένα όργανα μετρήσεων .....	41
Σχήμα 25: Μορφολογία επιφάνειας MOMAT .....	41
Σχήμα 26: Τετραγωνικά δοκίμια του μητρικού υλικού .....	42
Σχήμα 27: Παθογένειες φθαρμένου υλικού .....	43
Σχήμα 28: Δοκίμιο νέας σύνθεσης .....	43
Σχήμα 29: Δοκίμιο ορθογωνικών διαστάσεων .....	43
Σχήμα 30: Ενίσχυση δοκιμίου με λωρίδες υαλοφάσματος και εποξεική ρητίνη .....	44
Σχήμα 31: Δοκίμια ελέγχου εφελκυσμού .....	44
Σχήμα 32: Χαρακτηριστικά πολυεστερικής ρητίνης .....	45
Σχήμα 33: Methyl Ethyl Ketone Peroxide 2D .....	45
Σχήμα 34: Απεικόνιση υαλοφάσματος woven roving 200gr/m <sup>2</sup> .....	46
Σχήμα 35: Απεικόνιση υαλοφάσματος woven roving 500 gr/m <sup>2</sup> .....	46
Σχήμα 36: Εποξειδικό Κονίαμα 2 συστατικών της SINTECNO .....	46
Σχήμα 37: Αποκολλητικό κερί Magic Mold .....	46
Σχήμα 38: Εποξεική Κόλλα 2 Συστατικών .....	47
Σχήμα 39: Δοκίμιο μετά από την δοκιμή Εφελκυσμού με τεμάχια υαλόχαρτου .....	47
Σχήμα 40: Μαρκαρισμα περιοχής αποκοπής δοκιμίου .....	47
Σχήμα 41: Κατασκευή-τοποθέτηση-στεγάνωση ξύλινου πλαισίου και αδιαβροχοποίηση επιφάνειας .....	48
Σχήμα 42: Ανάμιξη κονιάματος τοποθέτηση στο καλούπι και αφαίρεση ξυλότυπου ...	48

Σχήμα 43: Κέρωμα επιφάνειας με αποκολλητικό κερί και επίστρωση με PVA .....	49
Σχήμα 44: Προετοιμασία υλικών για κατασκευή δοκιμίου .....	49
Σχήμα 45: Διαδικασία εμποτισμού υαλοϋφασμάτων .....	50
Σχήμα 46: Κοπή και διαμόρφωση δοκιμίων .....	50
Σχήμα 47: Παραγωγή καλουπιών από κοινό οικοδομικό γύψο .....	51
Σχήμα 48: Κατεύθυνση ινών στο μητρικό υλικό και διάταξη χρήσης αυτού .....	52
Σχήμα 49: Τεμάχιο κατασκευής coupons .....	52
Σχήμα 50: Στάδια κοπής coupons.....	53
Σχήμα 51: Κοπή και διαμόρφωση coupons.....	53
Σχήμα 52: Τοποθέτηση των "Tabs" .....	53
Σχήμα 53: Μηχανή Instron 300 LX και Extensometer .....	54
Σχήμα 54: Διάγραμμα Πάχους-Βάρους δοκιμίων των 200 και 500gr/m <sup>2</sup> .....	56
Σχήμα 55: Δοκίμιο Δ1 200gr/m <sup>2</sup> .....	56
Σχήμα 56:Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου Δ1 .....	57
Σχήμα 57: Δοκίμιο Δ3 200 gr/m <sup>2</sup> .....	57
Σχήμα 58: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ3 .....	58
Σχήμα 59: Δοκίμιο Δ2 8/200 gr/m <sup>2</sup> .....	58
Σχήμα 60: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ2 .....	58
Σχήμα 61: Δοκίμιο Δ4 3/500 gr/m <sup>2</sup> .....	59
Σχήμα 62: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου Δ4 .....	59
Σχήμα 63: Δοκίμιο Δ5 4/500 gr/m <sup>2</sup> .....	59
Σχήμα 64: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ5 .....	60
Σχήμα 65: Δοκίμιο Δ6 5/500 gr/m <sup>2</sup> .....	60
Σχήμα 66:Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκίου Δ6 5/500 gr/m <sup>2</sup> .....	60
Σχήμα 67: Δοκίμιο Δ7 (τεμάχιο μητρικού υλικού).....	61
Σχήμα 68: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου Δ7 .....	61
Σχήμα 69: Δοκίμιο Δ8.....	61
Σχήμα 70:Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου Δ8 .....	62
Σχήμα 71:Σύγκριση διαγραμμάτων σ-ε δοκιμίου Δ8 μετά από 2 ελέγχους.....	62
Σχήμα 72:Δοκίμιο Δ9.....	62
Σχήμα 73: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου Δ9 .....	63
Σχήμα 74: Δοκίμιο Δ21 12/200gr/m <sup>2</sup> .....	63
Σχήμα 75:Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου Δ9 .....	63
Σχήμα 76:Σύγκριση διαγραμμάτων σ-ε δοκιμίων Δ1 και Δ21.....	63
Σχήμα 77:Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου Δ22 .....	64
Σχήμα 78:Σύγκριση διαγραμμάτων δοκιμίων Δ21-Δ22 .....	64
Σχήμα 79: Δοκίμιο Δ10 με αρθρώσεις σε μήκος 200mm .....	65
Σχήμα 80: Δοκίμιο Δ10 με απλή παράθεση του δοκιμίου μεταξύ των σιαγόνων της μηχανής.....	65
Σχήμα 81: Διαδικασία Προσδιορισμού Ακτίνας Καμπυλότητας .....	66
Σχήμα 82:Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ10 .....	66
Σχήμα 83: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης δοκιμίου Δ11 .....	67
Σχήμα 84: Προσδιορισμός Καμπυλότητας Δοκιμίου Δ12.....	67
Σχήμα 85: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου Δ12 .....	67
Σχήμα 86: Συγκριτικό Διάγραμμα Δοκιμίων Δ10 11 και 12.....	67
Σχήμα 87: Προσδιορισμός ακτίνας καμπυλότητας δοκιμίου Δ17.....	68
Σχήμα 88: Συγκριτικό διάγραμμα δοκιμίων Δ10 11 12 και 17 .....	68
Σχήμα 89: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης δοκιμίου Δ18 .....	68
Σχήμα 90: Απεικόνιση δοκιμίου Δ18 στη πρώτη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης .	69
Σχήμα 91:Σύγκριση διαγραμμάτων σ-ε του Δ18 δοκιμίου με τα δοκίμια βάσης .....	69

Σχήμα 92: Απεικόνιση Δοκιμίων Δ12 και Δ18 σε αντιπαραβολή βέλους κάμψης 14,121 mm .....	69
Σχήμα 93: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου Δ19.....	70
Σχήμα 94: Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων Δ18 και Δ19 .....	70
Σχήμα 95: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ16.....	70
Σχήμα 96: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ20.....	71
Σχήμα 97: Διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίου Δ15.....	71
Σχήμα 98: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου ΔΡ2.....	72
Σχήμα 99: Συγκριτικό Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης δοκιμίων Δ10-11-12-Ρ2 ..	72
Σχήμα 100: Απεικόνιση ακτίνων καμπυλότητας δοκιμίων Ρ2 (αρ) και Δ10 στις ίδιες συνθήκες.....	72
Σχήμα 101: Διάγραμμα Τάσεων Παραμορφώσεων Δοκιμίου ΔS2 .....	73
Σχήμα 102: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων βελών κάμψης δοκιμίων Δ10-11-12-21 ...	73
Σχήμα 103: Διάγραμμα Τάσεων Βελών Κάμψης Δοκιμίου Δ22.....	74
Σχήμα 104: Συγκριτικό Διάγραμμα Δοκιμίων Δ21 και Δ22 .....	74
Σχήμα 105: Υπολογισμός Καμπυλότητας Δοκιμίου Δ22.....	74
Σχήμα 106: Συγκριτικό Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων συνθέσεων 6/200 .....	75
Σχήμα 107: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων Δοκιμίων Σύνθεσης 7/200gr/m <sup>2</sup> .....	75
Σχήμα 108: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων δοκιμίων συνθέσεως 8/200gr/m <sup>2</sup> .....	76
Σχήμα 109: Συγκριτικό διάγραμμα δοκιμίων C21 και C23 πρωτεύουσας και δευτερευούσης φορτίσης.....	76
Σχήμα 110: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων Παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 3/500gr/m <sup>2</sup> .....	77
Σχήμα 111: Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 4/500gr/m <sup>2</sup> .....	78
Σχήμα 112: Διάγραμμα Τάσεων Ανηγμένων παραμορφώσεων όλων των δοκιμίων της σύνθεσης 4/500gr/m <sup>2</sup> .....	78
Σχήμα 113: Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 5/500gr/m <sup>2</sup> .....	78
Σχήμα 114: Διάγραμμα τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων σύνθεσης 5/500gr/m <sup>2</sup> .....	78
Σχήμα 115: Συγκριτικό διάγραμμα παλαιών δοκιμίων και δοκιμίου βάσης .....	80
Σχήμα 116: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων νέων δοκιμίων με το δοκίμιο βάσης.....	81
Σχήμα 117: Διάγραμμα έργων Παραμόρφωσης νέων δοκιμίων και δοκιμίου βάσης....	81
Σχήμα 118: Διάγραμμα αξιολόγησης απόδοσης ενισχύσεων.....	82
Σχήμα 119: Διάγραμμα απορρόφησης ενέργειας σε κάμψη μητρικών και νέων δοκιμίων .....	83
Σχήμα 120: Διάγραμμα μέσης γραμμής απορρόφησης ενέργειας .....	83
Σχήμα 121: Διάγραμμα σύγκρισης γραμμών ενέργειας ενισχυμένων δοκιμίων με τη μέση γραμμή.....	84
Σχήμα 122: Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας MOMAT.....	85
Σχήμα 123: Ανάλυση dxf αρχείου στο Inventor Fusion 2013 και μετατροπή σε αρχείο*.sat.....	86
Σχήμα 124: Απεικόνιση των συνθηκών στήριξης.....	87
Σχήμα 125: Επιφάνειες επιβολής ομοιόμορφης φόρτισης .....	87
Σχήμα 126: Απεικόνιση της διαμέρισης με "partitions" .....	88

Σχήμα 127: Διαμέριση της επιφάνειας με πεπερασμένα στοιχεία τύπου S4R.....	89
Σχήμα 128: Διάγραμμα σύγκρισης ρυθμού παραμόρφωσης .....	89
Σχήμα 129: Τέταρτο επιφάνειας μητρικού υλικού .....	90
Σχήμα 130: Απεικόνιση των τάσεων S11-S12-S Third Invariant .....	90

## 8 Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας ελαστικών σταθερών .....	18
Πίνακας 2: Πίνακας τεχνικών στοιχείων τετραγωνικών δοκιμίων .....	55
Πίνακας 3: Πίνακας τεχνικών στοιχείων καμπυλόμορφων ορθογωνικών δοκιμίων .....	64
Πίνακας 4: Πίνακας τεχνικών στοιχείων δοκιμίων σύνθεσης 6/200gr/m <sup>2</sup> .....	75
Πίνακας 5: Τεχνικά στοιχεία δοκιμίων σύνθεσης 7/200gr/m <sup>2</sup> .....	75
Πίνακας 6: Τεχνικά στοιχεία δοκιμίων σύνθεσης 8/200gr/m <sup>2</sup> .....	76
Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά δοκιμίων σύνθεσης 3/500gr/m <sup>2</sup> .....	77
Πίνακας 8: Τεχνικά στοιχεία δοκιμίων σύνθεσης 4/500gr/m <sup>2</sup> .....	77
Πίνακας 9: Πίνακας ομαδοποίησης δοκιμίων βάση του βάρους τους .....	82