

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΤΑΔΥΤΙΚΩΝ ΛΕΠΙΔΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ  
ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τεχνικούς του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων

Μηχανικών του ΕΜΠ, κκ. Ν. Μελισσά και Η. Μίχα για την βοήθεια και την προθυμία τους στην κατασκευή του καλουπιού του καταδυτικού πεδίλου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. Π. Κωστάζο, μέλος ΕΕΔΙΠ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών για την αρωγή του στις μηχανικές δοκιμές δοκιμών καταδυτικών πεδίων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Ν. Τσούβαλη για τη δυνατότητα χρήσης του εργαστηρίου Σύνθετων Υλικών το οποίο διεθύνει, καθώς και τον κ. Α. Μαρκουλή, μέλος ΕΕΔΙΠ του εργαστηρίου αυτού για την πολύτιμη βοήθεια του στις κατασκευαστικές διαδικασίες της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον ευχαριστώ τον συνάδελφο Μπάρδη Παναγιώτη, για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και για το άρθρο του, που αποτέλεσε αναμφίβολα εφαλτήριο για την συγκεκριμένη εργασία.

Τέλος, οφείλω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον Μερκάτη Χάρη, της εταιρείας κατασκευής χειροποίητων καταδυτικών λεπίδων HST, για την απρόσκοπτη στήριξη και βοήθεια, καθώς και για τα υλικά και την τεχνογνωσία που μου παρείχε.

**Στη Δέσποινα και τον Γιάννη**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Είδη κατεργασιών με σύνθετα υλικά.....	6
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	<b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΟΪΝΩΝ(CFRP)</b>
2.1 Ανάγκη για δημιουργία σύνθετων υλικών.....	9
2.2 Σύνθετα Υλικά.....	9
2.3 Ενισχυτικές Ίνες και Πλαστικά.....	11
2.3.1 Είδη ινών.....	11
2.3.2 Είδη πλαστικών.....	11
2.4 Ανθρακονήματα.....	13
2.5 Εποξικές ρητίνες.....	14
2.5.1 Χαρακτηριστικά.....	14
2.5.2 Σκληρυντές.....	15
2.5.3 Θεράπευση.....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	<b>VACUUM INFUSION</b>
3.1 Ορισμός- Παράμετροι.....	16
3.2 Η πειραματική διαδικασία.....	16
3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την έγχυση.....	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	<b>Η ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΔΥΤΙΚΩΝ ΛΕΠΙΔΩΝ</b>
4.1 Απόδοση.....	24
4.2 Φάσεις πεδιλισμού.....	25
4.3 Δοκιμές.....	26
4.3.1 Εφελκυσμός.....	27
4.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων εφελκυσμού.....	28
4.3.3 Κάμψη τριών σημείων.....	28
4.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων κάμψης τριών σημείων.....	29
4.4 Παράμετροι σχεδίασης.....	30
4.5 Το μοντέλο στο Solidworks.....	30
4.5.1 Λεπίδα.....	31

4.5.2 Μεγάλο πέλμα-παπουτσάκι.....	31
4.5.3 Μικρό πέλμα-παπουτσάκι.....	34
4.5.4 Μεγάλα παρατροπίδια.....	35
4.5.5 Μικρά παρατροπίδια.....	36
4.6 Προσομοίωση.....	36
4.6.1 Δεδομένα.....	36
4.6.2 Λεπίδες Προσομοίωσης.....	37
4.6.3 Εισαγωγή στο Cosmos.....	39

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΡΧΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΔΥΤΙΚΩΝ ΛΕΠΙΔΩΝ

5.1 Σενάρια προσομοίωσης.....	43
5.1.1 Εξάρτηση από τη διαφορετική γεωμετρία των υφασμάτων εσωτερικά.....	43
5.1.2 Εξάρτηση από τη γωνία πέλματος-λεπίδας.....	45
5.1.3 Εξάρτηση από τη διαφορετική ύφανση στην ενίσχυση.....	48
5.1.4 Εξάρτηση από τα παρατροπίδια.....	54
5.1.5 Εξάρτηση από το πέλμα-παπούτσι.....	58
5.2 Παραδοχές.....	60
5.3 Μηχανικές ιδιότητες.....	61

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΛΕΠΙΔΩΝ ΜΕ VACUUM INFUSION

6.1 Καλούπι.....	62
6.2 Κατασκευή λεπίδων.....	65
6.2.1 Πρώτη λεπίδα.....	65
6.2.2 Χολιασμός.....	80
6.2.3 Παρατηρήσεις.....	80
6.2.4 Δεύτερη λεπίδα.....	81

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΛΕΠΙΔΩΝ

7.1 Φάσεις διαδικασίας αυτοματοποίησης.....	91
7.2 Αυτοματοποίηση και καταδυτικά πέδιλα.....	100

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Συμπεράσματα.....	103
-----------------------	-----

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

Παράρτημα Α.....105  
Παράρτημα Β.....107  
**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....115**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### Εισαγωγή

#### 1.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν ολοένα και περισσότερο πρωταρχικό στοιχείο της σημερινής παραγωγής καταναλωτικών και όχι μόνο προϊόντων, ενώ σε συνδυασμό με τις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα που αυτά προσφέρουν έναντι των παραδοσιακών υλικών, καθίστανται αντικείμενο μελέτης και εξέλιξης από πλευράς μεθόδων κατασκευής και υλικών.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την διερεύνηση της κατασκευής καταδυτικών λεπίδων από σύνθετα υλικά και συγκεκριμένα από τον συνδυασμό εποξικής ρητίνης και ινών άνθρακα. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η περιγραφή και η παρουσίαση των παραγωγικών σταδίων που εμπεριέχονται στην κατασκευή ενός πέλδου από προηγμένα υλικά. Αρχικά, γίνεται αναφορά στις διάφορες τεχνικές παρασκευής προϊόντων από σύνθετα υλικά. Ακολούθως, η εργασία εστιάζει στο αντικείμενο μελέτης, που αφοράει στην κατασκευή λεπίδων από ίνες άνθρακα και ρητίνες, κίνητρο της οποίας αποτέλεσε το άρθρο των Μπάρδη-Μαθιουλάκη. Την περιγραφή του συγκεκριμένου τύπου σύνθετων υλικών ακολουθεί μία εκτενής αναφορά στην έγχυση σε κενό (vacuum infusion), όπου αναλύονται τα χαρακτηριστικά της καθώς και οι παράμετροι που την επηρεάζουν.

Έπεται μία πρώτη μοντελοποίηση της μορφής της καταδυτικής λεπίδας καθώς και των παρελκόμενων (πέλματα, παρατροπίδια) σε πρόγραμμα CAD, μοντελοποίηση η οποία στηρίχτηκε σε πηγές από τη βιβλιογραφία και σε λογικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από το άρθρο του Μπάρδη.

Το μοντέλο στη συνέχεια υπόκειται σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης φορτίσεως, με σκοπό την καταγραφή αποτελεσμάτων, που ενδέχεται να χρησιμεύσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων ή στοιχείων που αφορούν στη συμπεριφορά του συγκεκριμένου τύπου καταδυτικών λεπίδων.

Τα μεγέθη που μεταβάλλονται κατά τα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, είναι ουσιαστικά αυτά που ορίζονται ως παράμετροι σχεδίασης μίας καταδυτικής λεπίδας, όπως ορίστηκαν στο άρθρο Μπάρδη-Μαθιουλάκη, το οποίο αποτέλεσε πηγή και κίνητρο σε ένα βαθμό για τη συγκεκριμένη εργασία. Στο εν λόγω άρθρο, παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση λεπίδων κατάδυσης διαφορετικών υλικών και σκληροτήτων, καθώς και η επίδραση των παραμέτρων σχεδίασης στον βαθμό απόδοσης της εκάστοτε λεπίδας.

Ακολουθεί η κατασκευή δύο λεπίδων με χρήση της έγχυσης σε κενό, η οποία και αναλύεται βήμα προς βήμα.

Τέλος προτείνονται δυνατότητες αυτοματοποίησης της κατασκευής καταδυτικών λεπίδων με βάση παρατηρήσεις που είτε εφαρμόζονται ήδη στην παραγωγική διαδικασία είτε αποκομίσθηκαν από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Το κέρδος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εισαγωγή της συγκεκριμένης τεχνικής στις κατεργασίες της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, καθώς και η περαιτέρω ανάλυση των παραμέτρων σχεδίασης των καταδυτικών πέλδων, όπως αυτές ορίστηκαν στο άρθρο των Μαθιουλάκη-Μπάρδη. Με τη συγκεκριμένη εργασία ως βάση, μπορούν να διεξαχθούν πειράματα για τη βελτίωση της απόδοσης των καταδυτικών πτερυγίων πέρα από τα σημερινά στάνταρντς του

εμπορίου τα οποία τις περισσότερες φορές, είναι αποτέλεσμα καθαρά προσωπικής προτίμησης εμπειρών δυτών-κατασκευαστών.

Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των συνήθων μεθόδων παρασκευής τεμαχίων από σύνθετα υλικά καθώς και η σύγκριση τους με την έγχυση σε κενό- η οποία και θα αποτελέσει σημείο αναφοράς της συγκεκριμένης εργασίας-, αναφορικά με την κατασκευή καταδυτικών λεπίδων.

## 1.2 Είδη κατεργασιών με σύνθετα υλικά

### Χειροποίητη στρώση (Prepreg Lay Up ή Hand Lay up)

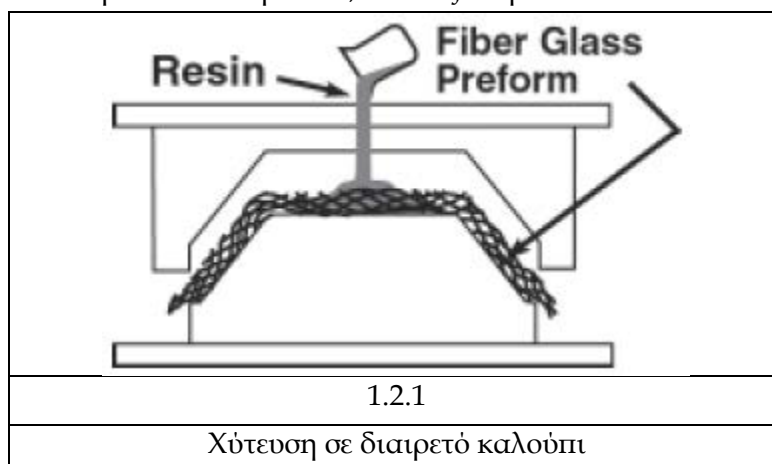
Η συγκεκριμένη διαδικασία καλείται είναι διαδικασία ανοικτού καλουπιού, όπως και η έγχυση σε κενό και έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την παραγωγή δοκιμίων με μεγάλο λόγο όγκου των ανθρακονημάτων ( $V_f$ ). Τα τεμάχια που παράγονται είναι εξαιρετικής ποιότητας και η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται πολύ στην αεροναυπηγική και στην διαστημική τεχνολογία. Το κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους-απαιτείται θεραπεία των τεμαχίων σε ειδικούς φούρνους-και για αυτό ενδείκνυται για παραγωγή μικρού αριθμού τεμαχίων μεγάλου σχετικά μεγέθους ή πρωτοτύπων, συνεπώς όχι για τη μαζική παραγωγή ειδών ελεύθερης κατάδυσης.

### Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (compression ή match die molding)

Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί μέθοδο κλειστού καλουπιού (αρσενικού-θηλυκού). Το μίγμα των υλικών που θα υποστούν κατεργασία (ρητίνη και ενίσχυση), τοποθετούνται στην μία πλευρά του καλουπιού, η οποία-πλευρά- υπόκειται σε θερμότητα. Στη συνέχεια το άλλο μισό του καλουπιού εφαρμόζει με πίεση, αναγκάζοντας το μίγμα σε επαφή σε όλο του τον όγκο. Το υλικό του καλουπιού αυτής της μεθόδου είναι συνήθως ατσάλι, για αυξημένη αντοχή στο χρόνο και τη θερμότητα (σχήμα 1.2.1).

Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (εποξικές για παράδειγμα) και ενισχυτικές ίνες μικρού μήκους (chopped short fibers) αλλά και συνεχείς ίνες μεγάλου μήκους (υφάσματα).

Το μεγάλο προσόν της μεθόδου είναι η δυνατότητα που παρέχει για τη δημιουργία οπών ή σύνθετων γεωμετριών στο προϊόν, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Τυπικά παραγόμενα τεμάχια αυτής της μεθόδου είναι προϋνία ποδηλάτων, λεπίδες πτερωτών κτλ.



### Transfer Compression Molding

Η συγκεκριμένη μέθοδος υλοποιεί την έγχυση του μίγματος(ίνες και ρητίνη με υλικά filler) σε κλειστό καλούπι , μέσω κυλίνδρου ενσωματωμένου στο καλούπι. Το μίγμα εισάγεται στο καλούπι από τον κύλινδρο με τη βοήθεια εμβόλου. Η μέθοδος εξυπηρετεί τη δημιουργία χοντρών τεμαχίων με πολλαπλές εσωτερικές κοιλότητες όπως για παράδειγμα τα έλικτρα των μετασχηματιστών(τα οποία αποτελούν τα πηνία μετασχηματιστών).

### Resin Transfer Molding

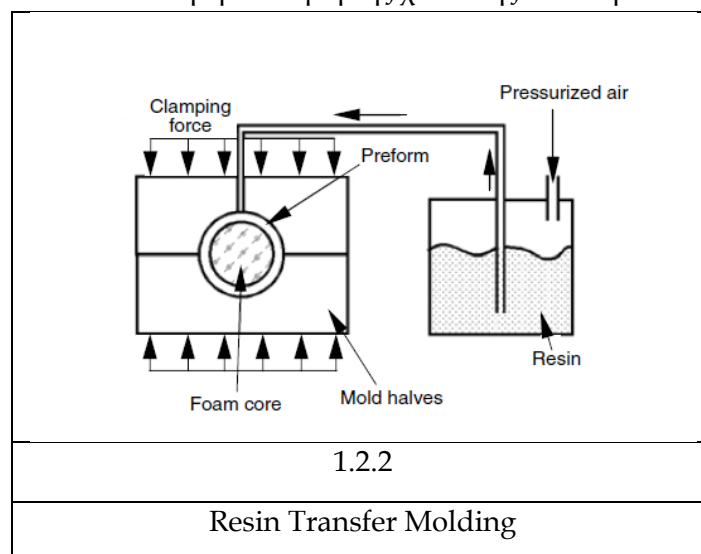
Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για μεσαίου μεγέθους παραγωγή σχετικά μεγάλων σύνθετων προϊόντων.

Είναι μέθοδος που χρησιμοποιεί διπλό καλούπι και ως εκ τούτου επιτυγχάνει καλή ποιότητα επιφάνειας και από τις δύο πλευρές του τεμαχίου. Πολλές φορές βέβαια χρησιμοποιείται και gel coat για την επίτευξη ακόμα καλύτερης επιφάνειας.

Η ρητίνη μαζί με τον σκληρυντή-καταλύτη αναμειγνύονται και στη συνέχεια αντλούνται υπό πίεση προς το καλούπι, μετατοπίζοντας έτσι τον υπάρχοντα εντός του καλουπιού αέρα, προς τις άκρες, έως ότου γεμίσει πλήρως το καλούπι. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι πιθανότητες ύπαρξης φυσαλίδων αέρα στο προϊόν, γεγονός που θα επηρέαζε τη συνοχή και τις μηχανικές ιδιότητες του.

Το καλούπι της συγκεκριμένης μεθόδου προσφέρεται για εξοικονόμηση των πρώτων υλών και η παραγόμενη φύρα θα είναι λιγότερη. Επίσης η συγκεκριμένη μέθοδος υλοποιεί την χρήση πυρήνα υλικού(foam core), δημιουργώντας έτσι τεμάχια με οπές(διαμπερείς ή όχι).

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η μέθοδος RTM παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα(σχήμα 1.2.2). Η μέθοδος RTM αποτελεί διαφοροποίηση της χύτευσης σε διαίρετο καλούπι.



### Χύτευση θαλάμου πίεσης(pressure bag ή vacuum bag)

Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί ουσιαστικά προκάτοχο της έγχυσης σε κενό. Οι διαφορές της σε σχέση με την έγχυση σε κενό, είναι η χρήση κάποιων παραπάνω αναλώσιμων φιλμ(breather) καθώς επίσης και η χρήση προεμποτισμένων συνήθως υφασμάτων. Ως εκ τούτου η αναπτυσσόμενη από την αντλία πίεση εδώ, χρησιμοποιείται για την συμπίεση των υφασμάτων του σύνθετου καθώς και για την ελαχιστοποίηση των φυσαλίδων αέρα στο σύνθετο.



Για το συγκεκριμένο προϊόν(πέδιλο) και λόγω της ευρύτερης κατηγορίας στην οποία ανήκει(μοντέρνα είδη άθλησης), αποδεικνύεται πως η έγχυση σε κενό, ως μέθοδος παρασκευής του, είναι η αποτελεσματικότερη έναντι των άλλων μεθόδων παρασκευής σύνθετων υλικών.

Η χειροποίητη στρώση(Prepreg Lay -up ή Hand Lay-up) για παράδειγμα, η οποία χρησιμοποιεί προ-εμποτισμένα ανθρακοϋφάσματα(και όχι μόνο), ενώ παράγει υψηλής ποιότητας τεμάχια, δεν ενδείκνυται για την κατασκευή πέδινων ,μιας και επιτογχάνει μικρή παραγωγή, έχοντας παράλληλα μεγάλο κόστος μηχανημάτων και εργασιών(autoclave).

Η μέθοδος αυτή, είναι από άποψη κόστους πολλές φορές πιο συμφέρουσα από την έγχυση σε κενό, ωστόσο αποδεικνύεται μη επαρκής, αφού η αναγκαστική τοποθέτηση των υφασμάτων με το χέρι, απαιτεί ακρίβεια του χειριστή ενώ καθιστά τον ποιοτικό έλεγχο πολύ δύσκολο και τα παραγόμενα κομμάτια λίγα. Επίσης είναι χρονοβόρα και κατά τη διάρκεια της αφού είναι ανοιχτή διαδικασία, έχουμε βλαβερές εκπομπές στυρενίου.

Μία μέθοδος η οποία φαίνεται ικανή να μπορεί να αντικαταστήσει την έγχυση σε κενό, είναι η μέθοδος RTM. Το κόστος των μηχανημάτων είναι μεγαλύτερο από αυτό της έγχυσης σε κενό, αλλά όχι απαγορευτικό εφόσον μιλάμε για εμπόριο.

Το μόνο μειονέκτημα σε σχέση με την έγχυση σε κενό, μπορεί να θεωρηθεί η δυσκολία ελέγχου της διαδικασίας, καθώς η RTM είναι μέθοδος κλειστού καλουπιού. Από την άλλη όμως, όντας μέθοδος κλειστού καλουπιού, προσφέρει εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας και από τις δύο πλευρές του πέδινου-σε αντίθεση με την έγχυση(τουλάχιστον χωρίς τη χρήση gel coat)- πράγμα αρκετά σημαντικό εφόσον πρόκειται για εμπορικό προϊόν. Επιπλέον έχει μηδενικές εκπομπές ρύπων. Το καλούπι είναι διπλό, αρσενικό-θηλυκό στην περίπτωση του πέδινου, εντός του οποίου τοποθετούνται τα ανθρακοϋφάσματα.

Τα υφάσματα που θα τοποθετηθούν ,ενδείκνυται να έχουν αρχικά κοπεί σε πατρόν με ανοχή βέβαια ως προς τις τελικές διαστάσεις του πέδινου, καθώς ο τύπος του καλουπιού ευνοεί το γεγονός αυτό. Έτσι μειώνεται και η ποσότητα του υλικού που θα πεταχτεί, σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Στη συνέχεια το καλούπι ασφαρίζεται είτε με δαγκάνες είτε με βάρη, είτε με κάποιο σύστημα σύσφιξης, συμπιέζοντας αρχικά σε ένα βαθμό τα υφάσματα.

Η ύπαρξη αγωγών στις άκρες του καλουπιού σε συνδυασμό με την παροχή πεπιεσμένου αέρα στο καλούπι, ωθεί τον ευρισκόμενο εντός του καλουπιού αέρα, έξω από αυτό, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα ύπαρξης φυσαλίδων στο παραγόμενο τεμάχιο.

Πάντως, δεδομένης της εξέλιξης της έγχυσης σε κενό, τόσο ως προς τα υλικά, όσο και ως προς τα εργαλεία κατασκευής(αντλίες, καλούπια), η μέθοδος RTM είναι μη συμφέρουσα συγκρινόμενη με την έγχυση σε κενό, τουλάχιστον για καταδυτικές λεπίδες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### *Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ανθρακοϊνών(CFRP)*

#### 2.1 Ανάγκη για δημιουργία Σύνθετων Υλικών<sup>[1]</sup>

Η ανάγκη των επιστημόνων για τη κατασκευή σύνθετων υλικών οφείλεται στα ακόλουθα παράδοξα των υλικών:

1. Το παράδοξο του στερεού υλικού

Η πραγματική αντοχή ενός υλικού είναι πολύ μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

2. Το παράδοξο των ινών

Η αντοχή ενός υλικού σε μορφή ινών είναι κατά πολλές φορές μεγαλύτερη από εκείνη του υλικού σε κάποια άλλη μορφή, και μάλιστα όσο λεπτότερες οι ίνες, τόσο μεγαλύτερη η αντοχή τους.

3. Το παράδοξο του ενεργού μήκους

Όσο μικρότερο είναι το ενεργό μήκος(μήκος ανάμεσα στις αρπάγες) ενός δοκιμίου με τη μορφή ινών, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του.

4. Το παράδοξο των σύνθετων υλικών

Όταν μελετάται ως ολότητα, το σύνθετο υλικό μπορεί να αντέξει τάσεις, οι οποίες θα κατέστρεφαν το πιο αδύναμο μέρος του και επιπλέον το πιο ισχυρό μέρος του σύνθετου υλικού μπορεί να αντέξει τάσεις πιο κοντά στη θεωρητική του αντοχή, από ότι εάν φορτιζόταν μεμονωμένα.

#### 2.2 Σύνθετα Υλικά<sup>[2]</sup>

Τα σύνθετα γενικότερα αποτελούν συνδυασμό- μείγμα δύο ή περισσότερων μερών. Το ένα μέρος αποτελούν οι δύσκαμπτες, μακριές ίνες και το άλλο ένα ρητινώδες συνδεδετικό υλικό ή μήτρα, που συγκρατεί τις ίνες και δίνει σχήμα στο σύνθετο υλικό.

Γενικά τα υλικά αυτά, είναι ανισότροπα, παρουσιάζουν δηλαδή διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες ανά κατεύθυνση-άξονα.Ανάλογα με τη μορφή των ινών που αυτά εμπεριέχουν, χωρίζονται σε σύνθετα με συνεχείς διαμήκεις ίνες και σε εκείνα με κομμάτια ενισχύσεων εμποτισμένα στη ρητίνη, για τα οποία γίνεται μεγάλη προσπάθεια διεύρυνσης της χρήσης τους, λόγω του αρκετά μικρότερου κόστους παραγωγής που εμφανίζουν σε σχέση με τα πρώτα.

Όταν οι ενισχυτικές ίνες και η μήτρα ενωθούν για να σχηματίσουν το σύνθετο, και τα δύο μέρη διατηρούν την αρχική τους ταυτότητα και επηρεάζουν άμεσα τις τελικές ιδιότητες του σύνθετου. Το παραγόμενο σύνθετο αποτελείται από στρώσεις(laminae) υφασμάτων(έχουν τις ίνες ως δομικά κόνταρα) .

Στον πίνακα 2.2.Α παρουσιάζονται ορισμένα σύνθετα υλικά ανάλογα με τον λόγο για τον οποίο χρησιμοποιούνται και με βάση τους τομείς εφαρμογών που αυτά έχουν:

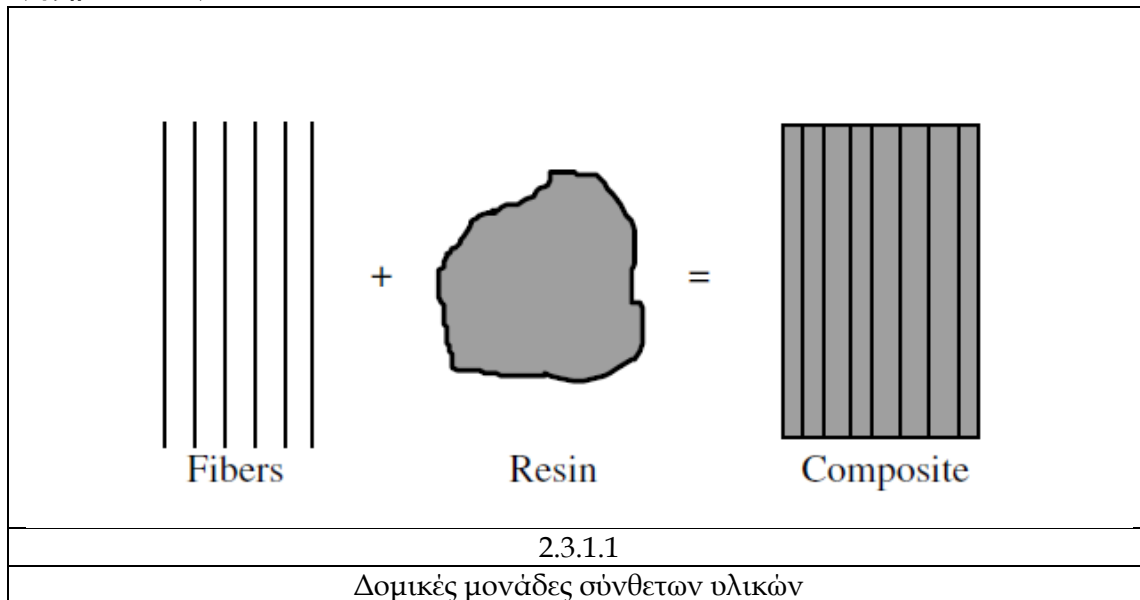
<b>Λόγος χρησιμοποίησης</b>	<b>Υλικό επιλογής</b>	<b>Εφαρμογή</b>
<i>Ελαφρύτερο, πιο δύσκαμπτο, δυνατότερο</i>	<i>Βόριο, άνθρακας/γραφίτης, μερικά αραμιδία</i>	<i>Πολεμικά αεροσκάφη, καλύτερη απόδοση/πολιτικά αεροσκάφη, μικρότερα λειτουργικά κόστη</i>
<i>Ελεγχόμενη ή μηδενική θερμική διαστολή</i>	<i>Άνθρακας /γραφίτης πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας</i>	<i>Αεροναυπηγική</i>
<i>Αντοχή σε περιβαλλοντικές μεταβολές</i>	<i>Φαΐμπεργκλας, βινυλεστέρες</i>	<i>Δεξαμενές και σωληνώσεις, αντι-διαβρωτική αντοχή έναντι χημικών, μεταφορά βενζίνης σε υψηλές θερμοκρασίες</i>
<i>Χαμηλή αδράνεια, ταχύτερες εκκινήσεις, μικρότερη εκτροπή</i>	<i>Άνθρακας υψηλής αντοχής, εποξική ρητίνη</i>	<i>Βιομηχανικά ράουλα για χαρτί, φιλμ</i>
<i>Μικρό βάρος, αντοχή σε φθορά</i>	<i>Άνθρακας υψηλής αντοχής, φαΐμπεργκλας, εποξική ρητίνη</i>	<i>Δεξαμενές καυσίμων για «πράσινα» αυτοκίνητα, λεωφορεία και φορτηγά</i>
<i>Περισσότερες παραγόμενες σύνθετες επιφάνειες</i>	<i>Άνθρακας υψηλής αντοχής, εποξική ρητίνη</i>	<i>Αεροσκάφη υψηλών ταχυτήτων</i>
<i>Μικρότερη κόπωση και πόνος για τον χρήστη</i>	<i>Άνθρακας , εποξική ρητίνη</i>	<i>Ρακέτες τένις, σκουός</i>
<i>Διαμόρφωση-ρύθμιση καμπτικών και στρεπτικών ροπών</i>	<i>Άνθρακας , εποξική ρητίνη</i>	<i>Καλάμια ψαρέματος, μπαστούνια γκολφ</i>
<i>Διαφάνεια σε ακτινοβολία</i>	<i>Άνθρακας , εποξική ρητίνη</i>	<i>Τραπέζια ακτίνων X</i>
<i>Αδιάβροχα, αντοχή στο νερό</i>	<i>Φαΐμπεργκλας, πολυεστέρες</i>	<i>Σκάφη</i>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2.Α</b>		
<b>Χαρακτηριστικά σύνθετων-Εφαρμογές</b>		

Το μεγαλύτερο προσόν των σύνθετων υλικών είναι η δυνατότητα που αυτά έχουν για πλήρη προσαρμογή τους στις συνθήκες φόρτισης, μέσω της κατάλληλης τοποθέτησης-διάταξης τους κατά την κατασκευή . Αυτή η δυνατότητα προσφέρει ουσιαστικά άπειρους συνδυασμούς τοποθέτησης των ενισχύσεων σε ένα σύνθετο, μεταβάλλοντας απλά τη σχετική γωνία του ενός προς το άλλο.

## 2.3 Ενισχυτικές Ίνες και Πλαστικά

### 2.3.1 Είδη Ινών

Τα σύνθετα υλικά όπως προαναφέρθηκε, αποτελούνται από δύο μέρη, τις ενισχυτικές ίνες και τη μήτρα(σχήμα 2.3.1.1).



Οι ίνες είναι ή συνεχείς διαμήκεις, ή κομμένες σε μικρότερα κομμάτια ή ακόμα και υβριδικές(εμπεριέχουν κομμάτια ινών διαφορετικών υλικών). Οι ίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα στα σύνθετα υλικά είναι οι ακόλουθες:

- Άνθρακα/Γραφίτη(carbon fibers)
- Φάϊμπεργκλας(fiberglass fibers)
- Οργανικές(organic fibers)
  - Αραμιδία(aramid)
  - Πολυαιθυλένιο(polyethylene)
  - PBO
- Βόριο(Boron)
- Καρβίδια σιλκόνης(Silicon carbide)
- Νιτρίδιο σιλκόνης, σίλικα, αλουμίνα
- Κατασκευές τύπου sandwich(με πυρήνα στο εσωτερικό και ενισχύσεις συμμετρικά και από τις δύο του πλευρές)

### 2.3.2 Είδη Πλαστικών<sup>[1]</sup>

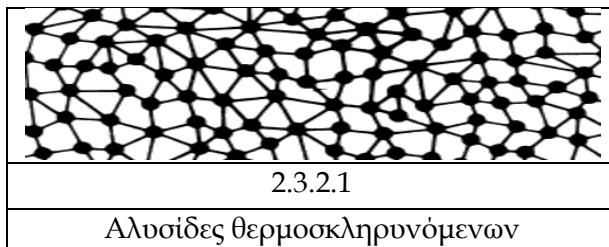
Τα πλαστικά χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- ❖ Θερμοσκληρυνόμενα(Thermosets)
- ❖ Θερμοπλαστικά(Thermoplastics)
- ❖ Ελαστομερή(Elastomers)

### Θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά

Είναι πλαστικά τα οποία μόλις θεραπευθούν(curing), δεν μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία ή επαναφορά στην αρχική τους κατάσταση. Υψηλές θερμοκρασίες τα ανθρακοποιούν(carbonize).

Μερικά θερμοσκληρυνόμενα είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές, οι πολυουρεθανικές και οι βινυλεστερικές ρητίνες.

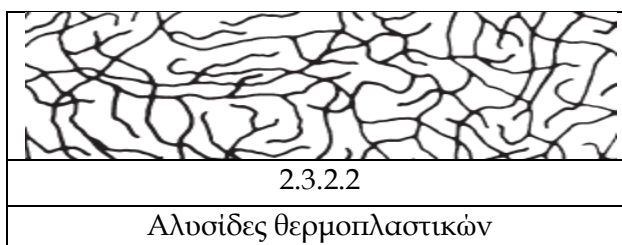


Τα μόρια των ρητινών αυτών σχηματίζουν τριδιάστατα δίκτυα και συνδέονται με ισχυρούς χημικούς δεσμούς σε όλες τις διευθύνσεις.

### Θερμοπλαστικά πλαστικά

Αυτά μαλακώνουν μόλις εφαρμοσθεί σε αυτά θερμότητα, έτσι μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Μπορούν να ενωθούν με συγκόλληση με την εφαρμογή θερμότητας ή διαλυτών.

Μερικά θερμοπλαστικά είναι το ABS, το PVC, το πολυστυρένιο και το πολυαιθυλένιο.

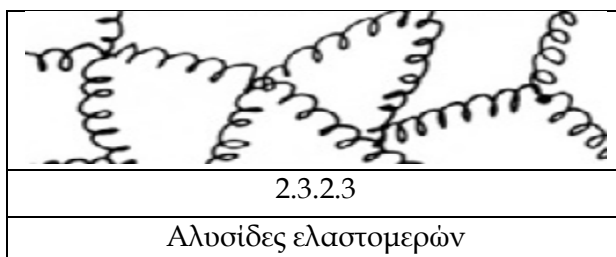


Τα μόρια των θερμοπλαστικών σχηματίζουν αλυσίδες πολύ μακριές και ευθυγραμμισμένες ακαθόριστα.

### Ελαστομερή πλαστικά

Είναι πολύ ελαστικά και επιμηκνώνονται με την εφαρμογή φορτίου σε αυτά. Είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και δεν μπορούν να ενωθούν με συγκόλληση.

Μερικά ελαστομερή είναι το σιλικονούχο λάστιχο και το βουλκανισμένο λάστιχο(vulcanized rubber).



Τα μόρια σχηματίζουν ελικοειδή αλυσίδες που επιμηκώνονται με τη φόρτιση.

Οι ίνες που θα απασχολήσουν τη συγκεκριμένη εργασία είναι οι ίνες άνθρακα ή ανθρακονήματα μιας και αποτελούν το δομικό κύτταρο των ανθρακοϋφασμάτων. Οι άλλοι τύποι ενισχυτικών ινών αναφέρθηκαν μόνο επιγραμματικά.

Αναφορικά με τους τύπους των υλικών μήτρας, θα ασχοληθούμε με τις εποξικές ρητίνες, άρα με θερμοσκληρυνόμενα υλικά. Βασικό πλεονέκτημα των θερμοσκληρυνόμενων υλικών σε σχέση με τα θερμοπλαστικά, είναι η ευκολία των πρώτων ως προς τον εμποτισμό των ινών.

#### 2.4 Ανθρακονήματα <sup>[3]</sup>

Τα ανθρακονήματα έχουν να επιδείξουν το μεγαλύτερο εύρος αντοχών και μέτρων και διαθέτουν τον μεγαλύτερο αριθμό προμηθευτών παγκοσμίως σε σχέση με τις υπόλοιπες ενισχυτικές ίνες(κέβλαρ, φάϊμπεργκλας).

Ακολουθεί μια συνοψη πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων των ανθρακοϊνών και κατ' επέκταση των σύνθετων υλικών(Πίνακας 2.4.Α).

<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
Μεταλλικά μέρη μπορούν να αντικατασταθούν από ένα σύνθετο υλικό.	Το κόστος των πρώτων υλών είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με αυτό των μετάλλων και του αλουμινίου. (5 έως 20 φορές παραπάνω)
Η αντοχή κόπωσης(όριο διαρροής) είναι πολύ υψηλή για τα σύνθετα υλικά.	Η θερμοκρασιακή ανοχή των σύνθετων υλικών εξαρτάται από την αντοχή των πλαστικών.Η θερμοκρασιακή ανοχή τους περιορίζεται από τις ιδιότητες του πλαστικού. Μέσες θερμοκρασίες λειτουργίας των σύνθετων είναι από -40 έως 100 βαθμούς Κελσίου.
Έχουν υψηλό λόγο ακαμψίας προς πυκνότητα(stiffness to density). Διαθέτουν την ακαμψία του χάλυβα στο ένα πέμπτο του βάρους και την ακαμψία του αλουμινίου στο μισό του βάρους. Εξαιτίας των υψηλών λόγων ακαμψίας και αντοχής, τα ανθρακονήματα είναι ελαφρύτερα από τους ανταγωνιστές τους.	Τα σύνθετα υλικά απορροφούν υγρασία, παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητες και την διαστασιολογική σταθερότητα των σύνθετων υλικών.

Διαθέτουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Λόγω του ότι η εξωτερική επιφάνεια των σύνθετων υλικών αποτελείται από πλαστικά, η αντοχή σε διάβρωση και σε χημικές «επιθέσεις» είναι πολύ καλή. Άρα έχουν γενικά μεγάλη διάρκεια ζωής.	Η ανάλυση των φυσικών και κυρίως των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι πολύ δύσκολη, γι' αυτό άλλωστε και οι ιδιότητες αυτές δεν δίνονται με συγκεκριμένες τιμές αλλά με εύρη τιμών.
Οι ιδιότητες τους αναφορικά με ήχο, δόνηση και σκληρότητα είναι καλύτερες σε σχέση με των μετάλλων. Τα σύνθετα υλικά αποσβένουν τις δονήσεις κατά μία τάξη μεγέθους καλύτερα από τα μέταλλα.	
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4.Α	

## 2.5 Εποξικές Ρητίνες(Θερμοσκληρυνόμενα Πλαστικά)<sup>[3]</sup>

### 2.5.1 Χαρακτηριστικά

Η πιο ευρεία χρησιμοποιούμενη μήτρα για προηγμένα σύνθετα υλικά είναι η εποξική ρητίνη. Οι ρητίνες αυτές είναι πιο ακριβές από τις πολυεστερικές και έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5.1.Α:

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Καλή πρόσφυση μεταξύ ινών- ρητίνης	Η ρητίνη και ο καταλύτης είναι αρκετά τοξικές ουσίες σε μη «θεραπευμένη» μορφή
Χαμηλό επίπεδο συρρίκνωσης κατά τη «θεραπεία»	Το θερμικό σημείο παραμόρφωσης της ρητίνης χαμηλώνει με την απορρόφηση υγρασίας
Αντοχή σε χημική διάβρωση και διαλύματα γενικότερα	Μεταβολή στις διαστάσεις και τη μορφή λόγω απορρόφησης υγρασίας
Υψηλή ή χαμηλή αντοχή και ελαστικότητα	Περιορισμένη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας
Αντίσταση στην ολίσθηση- παραμόρφωση λόγω τάσεων , αντοχή στην κόπωση	Συνδυάζεται δύσκολα σκληρότητα και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
Καλές ηλεκτρικές ιδιότητες	Σε περίπτωση πυρκαγιάς, δημιουργούν πυκνό καπνό
Πριν τη «θεραπεία» συναντώνται σε υγρή αλλά και στερεά μορφή	Ευαίσθητες σε εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας
Πολλές επιλογές τροπών «θεραπείας»	Χρονοβόρα(αργή) διαδικασία «θεραπείας»
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5.1.Α	

### 2.5.2 Σκληρυντές(hardeners)

Οι εποξικές ρητίνες αποτελούν ουσιαστικά τη χημική ένωση-αντίδραση δύο επιμέρους στοιχείων, της ρητίνης και του σκληρυντή.

Ο ρόλος του σκληρυντή( ή καταλύτη ) είναι ουσιαστικά να πολυμερίσει τα μονομερή στελέχη της ρητίνης και η διαδικασία αυτή ονομάζεται θεραπεία(curing).

Η ποσότητα σκληρυντή που απαιτείται για την θεραπεία – πολυμερισμό μιας συγκεκριμένης ρητίνης, προκύπτει από μετρήσεις και δίνεται ως αναλογία βάρους σε πίνακες κατασκευαστών ρητινών.

### 2.5.3 Θεραπεία(Curing)

Η διαδικασία πολυμερισμού της ρητίνης(με χρήση σκληρυντή) ονομάζεται θεραπεία και συναντάται σε πολλές μορφές. Είναι μια διαδικασία η οποία μπορεί να ρυθμισθεί βάσει θερμοκρασίας και φυσικά επιλογής ρητίνης και σκληρυντή. Μπορεί να διαρκέσει από λεπτά μέχρι ώρες και ευνοείται από την εκπομπή σε θερμότητα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις αρκεί θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι περισσότερες εποξικές ρητίνες χρειάζονται επιπλέον θεραπεία σε ειδικό φούρνο, όπου υπόκεινται σε θερμοκρασίες της τάξης των 60° Κελσίου για χρονικό διάστημα αρκετών ωρών(~15-20 ώρες).

Η ρητίνη που θα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή των πέδλων, θα χρειαστεί τέτοιου είδους εκτεταμένη θεραπεία και τα πέδιλα θα κατασκευαστούν με την μέθοδο της έγχυσης σε κενό, που αναλύεται παρακάτω.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### Vacuum Infusion

#### 3.1 Ορισμός-Παράμετροι <sup>[4]</sup>

Στην έγχυση σε κενό, χρησιμοποιείται κενό, δηλαδή πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής, ως κινητήρια δύναμη για τον εμποτισμό στεγνών ενισχύσεων-ινών με υγρή ρητίνη. Υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις της συγκεκριμένης επεξεργασίας.

Στην πιο συνηθισμένη μορφή, οι στεγνές ενισχύσεις(και ο πυρήνας, αν υπάρχει), τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη, σε καλούπι και στη συνέχεια καλύπτονται με μία σακούλα κενού.

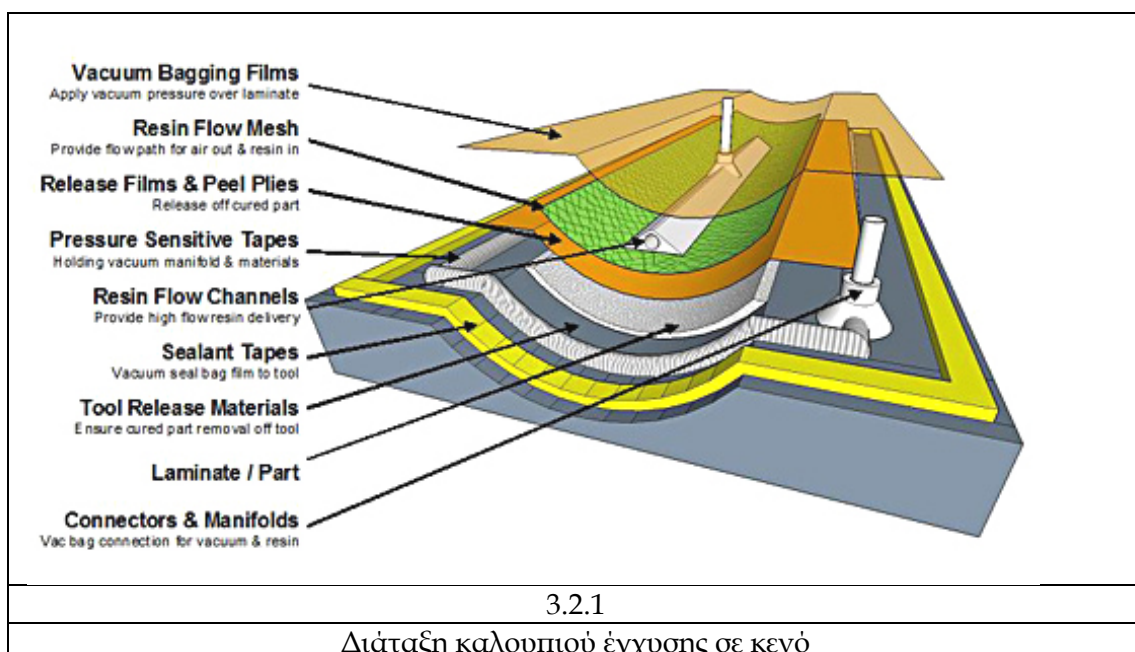
Δημιουργείται κενό, το οποίο ωθεί τη ρητίνη από το δοχείο εισαγωγής εντός της περιοχής που καλύπτεται από τη σακούλα κενού, κατά μήκος μιας γραμμής(συμμετρικά ως προς το δοκίμιο συνήθως).

Ο σκοπός της εν λόγω διαδικασίας είναι να οδηγηθεί η ρητίνη στον τελικό της προορισμό όσο το δυνατόν γρηγορότερα προκειμένου να παραχθεί ένα κομμάτι με χαμηλή περιεκτικότητα σε αέρα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον πλήρη εμποτισμό των υφασμάτων(στον βαθμό που μπορεί αυτό να ελεγχθεί βέβαια). Οι προμηθευτές ρητινών, ενισχύσεων και υλικών πυρήνα, προσφέρουν πλέον προϊόντα ειδικά σχεδιασμένα για vacuum infusion.

Αναφορικά με το τελικό τεμάχιο, παράγονται σύνθετα υλικά με ποιοτική συνοχή, καλές μηχανικές ιδιότητες και χαμηλή περιεκτικότητα σε αέρα. Παρόλα αυτά, μόνο μία πλευρά του τεμαχίου έχει ποιοτικό φινίρισμα.

Επειδή η διαδικασία γίνεται αποκομμένη από την ατμόσφαιρα, δεν έχουμε εκπομπές στυρενίου και ο χώρος εργασίας παραμένει καθαρός.

#### 3.2 Η Πειραματική διαδικασία<sup>[6]</sup>



**Προετοιμασία Καλούπιου:** Το καλούπι πρέπει να καθαριστεί διεξοδικά. Οποιαδήποτε ζημιά στο καλούπι θα πρέπει να διορθωθεί προσεκτικά, ούτως ώστε να μην επηρεαστεί ή στεγανότητα του καλούπιου. Τέλος, πρέπει να τοποθετηθεί και μία ουσία που θα διευκολύνει το διαχωρισμό του κομματιού από το καλούπι (release agent). Συνήθως χρησιμοποιείται ειδικό κερι για τον διαχωρισμό του τεμαχίου από το καλούπι. Βέβαια καθοριστικό ρόλο σε αυτό το στάδιο παίζει και ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιείται. Σωστή τοποθέτηση και αφαίρεση αυτής της ουσίας, θα παρατείνει τη διάρκεια ζωής του καλούπιου.

**Τοποθέτηση των στεγνών ενισχύσεων και των πυρήνων στο καλούπι:** Η στεγνή ενίσχυση και οι πυρήνες (εφόσον υπάρχουν), τοποθετούνται μέσα στο καλούπι. Για μεγάλα κομμάτια, η ενίσχυση τοποθετείται στο καλούπι και ασφαρίζεται έναντι μετατόπισης, η οποία ακόμα και αν είναι μικρή δύναται να επηρεάσει τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου προϊόντος.

**Τοποθέτηση των διόδων-καναλιών έγχυσης και/ή των επιστρώσεων διευκόλυνσης ροής (infusion mesh):** Όταν χρησιμοποιείται ένα στρώμα διευκόλυνσης της ροής, στην κορυφή των ενισχύσεων, αυτό συνήθως διαχωρίζεται από τις ενισχύσεις με την τοποθέτηση ενός peel ply. Αυτό διευκολύνει την αφαίρεση του μετά την έγχυση και την καλύτερη θεραπεία της ρητίνης. Ανάλογα με τη στρατηγική έγχυσης που ακολουθείται, οι δίοδοι έγχυσης τοποθετούνται συνήθως πάνω στις ενισχύσεις και/ή στα στρώματα διευκόλυνσης της ροής. Για να εξασφαλισθεί η αφαίρεση των διόδων, μετά το πέρας της διαδικασίας, συνήθως αυτά τυλίγονται με peel ply. Αυτό μπορεί επίσης να αποτρέψει τη σακούλα κενού από το να συμπιεστεί με τα ελικοειδή των διόδων έγχυσης, με αποτέλεσμα την πολύ αργή έγχυση ρητίνης. Υπερβολικό παρόλα αυτά τύλιγμα των διόδων με peel ply, λειτουργεί ανασταλτικά στην γρήγορη έγχυση της ρητίνης. Όταν χρησιμοποιείται εσωτερικό στρώμα διευκόλυνσης ροής (infusion mesh), για την γρηγορότερη έγχυση της ρητίνης, θα πρέπει οι δίοδοι έγχυσης να τοποθετούνται πάνω στο στρώμα αυτό.

**Τοποθέτηση των διόδων εξαγωγής στην κορυφή των ενισχύσεων:** Η τοποθέτηση των συγκεκριμένων διόδων εξαρτάται από τη στρατηγική έγχυσης που ακολουθείται. Διακρίνονται χονδρικά δύο διαφορετικοί τρόποι:

- Σε άκρη του κομματιού.
- Κάπου κεντρικά στο κομμάτι.

Όταν οι δίοδοι εξαγωγής τοποθετούνται σε άκρη του κομματιού, η διαδικασία αυτή είναι απλή και εύκολη. Συχνά τοποθετείται ένα κανάλι εξαγωγής περιμετρικά στο κομμάτι (ή μερικώς περιμετρικά). Αυτό το κανάλι μπορεί επίσης να ενσωματωθεί στο καλούπι. Στο σημείο όπου τοποθετείται το κανάλι εξαγωγής, πραγματοποιείται μία απλή σύνδεση μεταξύ ενίσχυσης και καναλιού. Η σύνδεση αυτή απλοποιείται με τη χρήση στρώματος διευκόλυνσης ροής.

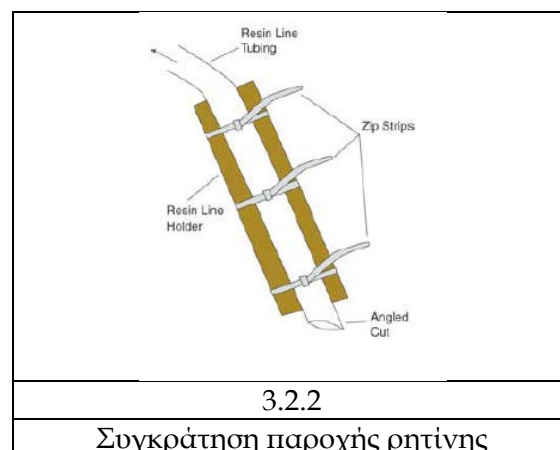
Εάν χρειαστεί να τοποθετηθεί το κανάλι εξαγωγής πάνω στη σακούλα κενού, αυτό μπορεί να γίνει μόνο, μετά την τοποθέτηση της σακούλας. Παρόλο που υπάρχουν διάφορα συγκεκριμένα προσαρμοστικά για αυτό το σκοπό, οι δίοδοι αυτοί εξακολουθούν να παραμένουν πιθανά σημεία διαρροής. Μία τέτοιου είδους διαρροή πιθανώς να μην καταστρέψει το κομμάτι, αλλά επειδή βρίσκεται στην εξαγωγή, θα είναι δύσκολο αυτή να ελεγχθεί, πριν τη διαδικασία της έγχυσης.

**Κλείσιμο του καλούπι:** Στη μέθοδο της έγχυσης σε κενό, χρησιμοποιείται ειδική στεγανωτική διάφανη σακούλα, η οποία ονομάζεται σακούλα κενού(vacuum bag).

Για οποιοδήποτε καλούπι, μπορεί να επιλεγεί απλή ή διπλή στεγάνωση. Δεδομένης της κρισιμότητας μιας διαρροής για τη συγκεκριμένη τεχνική, συχνά προτιμάται η διπλή στεγάνωση.

**Εφαρμογή κενού και έλεγχος διαρροών:** Όταν το καλούπι κλείσει(η σακούλα κενού εφάπτεται πλήρως στο καλούπι με τη βοήθεια της στεγανωτικής tucky tape ταινίας), μπορεί να εφαρμοσθεί πλέον το κενό. Προφανώς η εισαγωγή της ρητίνης πρέπει να παραμείνει κλειστή. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών δαγκάνων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται κενό στην κοιλότητα του καλούπιού. Έπεται ο έλεγχος για τυχόν διαρροές, ο οποίος υλοποιείται είτε με τη χρήση ειδικής συσκευής υπερήχων είτε ελέγχοντας το ρολόι-μετρητή της αντλίας κενού για σταθερή ή όχι ένδειξη.

**Προετοιμασία του δοχείου ρητίνης:** Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η γραμμή παροχής της ρητίνης θα παραμείνει στο δοχείο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να το εξασφαλίσουμε αυτό, όπως το *resin line holder*, που είναι ουσιαστικά ένα άκαμπτο υλικό που τυλίγεται γύρω από το σωλήνα της παροχής και εξασφαλίζει πως αυτός δεν θα τσακίσει και δεν κουλουριαστεί(σχήμα 3.2.2).



Επίσης χρήσιμο είναι να κοπεί το άκρο της γραμμής παροχής(σχήμα 3.2.1) που βρίσκεται μέσα στο δοχείο με τη ρητίνη, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη και σταθερή παροχή της ρητίνης. Τέλος χρησιμοποιείται μια δαγκάνα(σκύλα), προκειμένου να απομονώσουμε την γραμμή της ρητίνης, μέχρι να είμαστε έτοιμοι για την έγχυση αυτής.

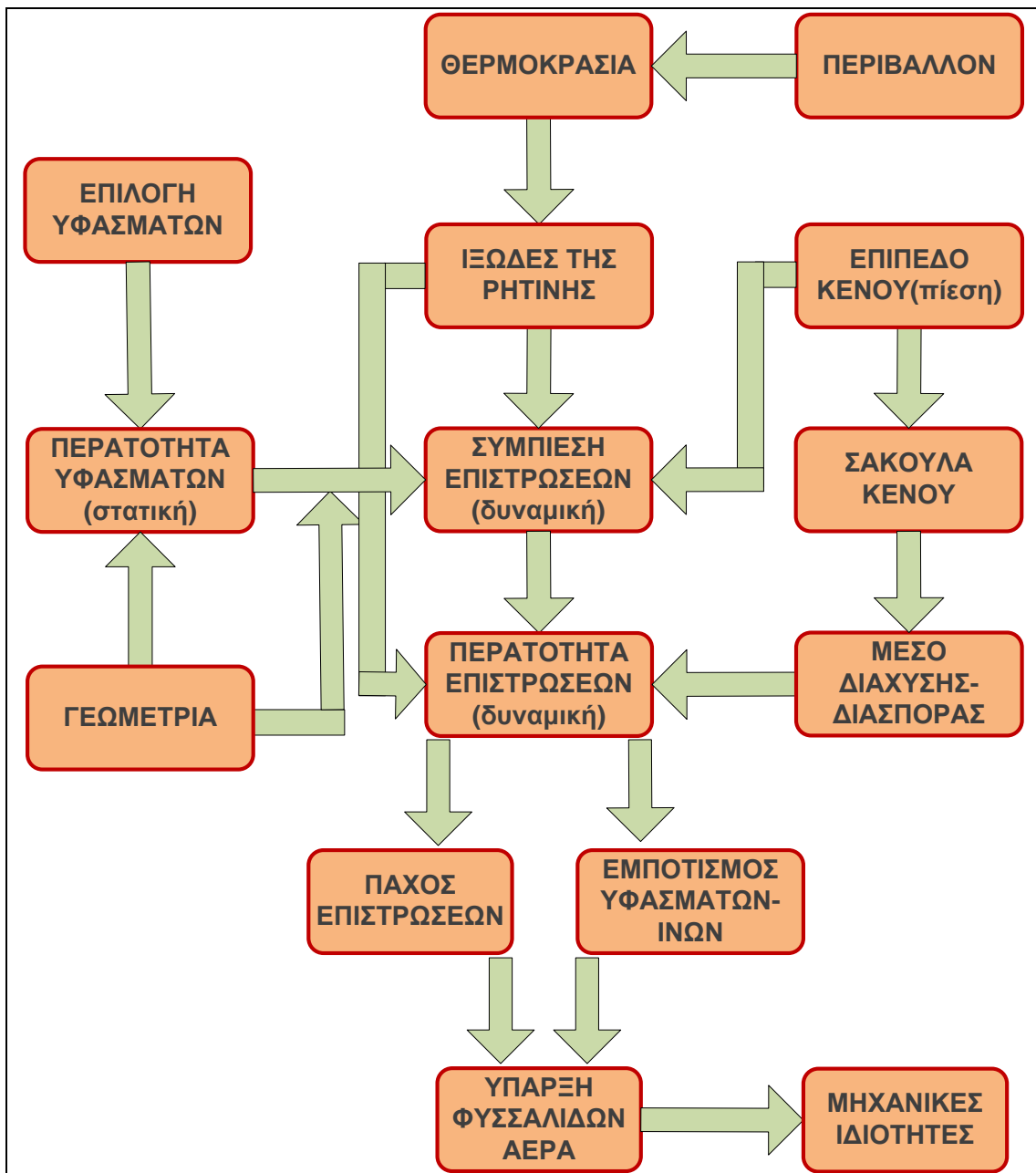
**Προσθήκη καταλύτη και έγχυση ρητίνης:** Εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί τα παραπάνω βήματα, είμαστε πλέον έτοιμοι για την ανάμειξη της ρητίνης με τον σκληρυντή-καταλύτη. Τα αναμειγνύουμε με βάση τους τύπους της ανάμειξης(όπως δίνονται από τον προμηθευτή των πολυμερών), ενώ παράλληλα κάνουμε τους τελευταίους οπτικούς ελέγχους στη διάταξη της έγχυσης. Αφαιρούμε τη δαγκάνα και η ρητίνη γεμίζει γρήγορα τον σωλήνα και αρχίζει να εμποτίζει τις ενισχύσεις. Η παροχή της ρητίνης παραμένει ανοιχτή έως ότου εμποτιστούν πλήρως τα υφάσματα.

**Διακοπή της παροχής:** Όταν το πολυστρωματικό μας δοκίμιο έχει πλήρως εμποτιστεί, δεν υφίσταται ανάγκη για επιπλέον ρητίνη. Άλλωστε εάν επρόκειτο να αδειάσει πλήρως το δοχείο της

ρητίνης, θα εισέρχονταν καταστροφικές φυσαλίδες αέρα στο δοκίμιο μας. Ασφαλίζουμε ξανά την δαγκάνα στο σωλήνα παροχής της ρητίνης και η διαδικασία ολοκληρώνεται. Τονίζεται πως το κενό πρέπει να συνεχίσει να υφίσταται-άρα δεν κλείνουμε την αντλία κενού-, μέχρις ότου να τξελάρει ολοκληρωτικά η ρητίνη.

### 3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την έγχυση<sup>[4]</sup>

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την έγχυση σε κενό, παρουσιάζονται στο γράφημα του σχήματος 3.3.1. Στο συγκεκριμένο γράφημα παρουσιάζεται και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους.



ΣΧΗΜΑ 3.3.1

Παράμετροι της έγχυσης σε κενό

## Περιβάλλον

Το περιβάλλον στο οποίο διεξάγεται η έγχυση. Οι συνθήκες δηλαδή *θερμοκρασίας* και *υγρασίας* που επικρατούν. Η πίεση λαμβάνεται ίση με την ατμοσφαιρική ως δεδομένο για την συγκεκριμένη κατεργασία.

## Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία στο εργαστήριο που διεξάγεται η έγχυση, αποτελεί μέρος των περιβαλλοντικών παραμέτρων που προαναφέρθηκαν και επιδρά άμεσα με τη σειρά της, σε μια εκ των καθοριστικότερων για το πείραμα παραμέτρων, του ιξώδους της ρητίνης.

## Ιξώδες Ρητίνης

Για εγκυκλοπαιδικούς κυρίως λόγους ορίζεται ακόλουθα το ιξώδες του ρευστού:

*Ιξώδες ρευστού , ονομάζεται η αντίσταση του ρευστού στη ροή.*

*Συνεπώς ρευστό με χαμηλό ιξώδες, είναι λεπτόρρευστο, ρέει δηλαδή εύκολα, όπως το νερό.*

*Ρευστό με μεγάλο ιξώδες, είναι παχύρρευστο, ρέει δηλαδή δύσκολα, όπως το λάδι.*

Το ιξώδες της ρητίνης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες της συγκεκριμένης διαδικασίας και είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα του παραγόμενου τεμαχίου. Άρα πολύ μεγάλη βάση πρέπει να δίνεται στην σωστή εκλογή της ρητίνης.

Τυπικά, μικρότερο ιξώδες είναι αρωγός της έγχυσης σε κενό, μιας και διευκολύνει την διείσδυση της ρητίνης στις ενισχύσεις. Από την άλλη, ρητίνες με μεγαλύτερο ιξώδες, απαιτούν πιο προσεκτικό σχεδιασμό της διαδικασίας και συνήθως περισσότερα κανάλια έγχυσης.

## Επιλογή Υφασμάτων

Ένας ακόμη πολύ καθοριστικός παράγοντας για την έγχυση σε κενό, ίσως ο καθοριστικότερος μαζί με τη ρητίνη, είναι η κατάλληλη επιλογή των υφασμάτων. Λέγοντας επιλογή, δεν εννοείται μόνο ο τύπος των υφασμάτων αλλά και ο αριθμός των στρώσεων που θα χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή αυτή βέβαια, θα έγκειται τόσο στα χαρακτηριστικά που θέλουμε να έχει το παραγόμενο τεμάχιο όσο και στη γεωμετρία του. Αν θέλουμε αυξημένη αντοχή σε διάφορες κατευθύνσεις, θα χρησιμοποιήσουμε διαφορετικούς τύπους υφασμάτων υπό γωνία ως προς άξονα συμμετρίας(αν αυτός υπάρχει).

Αν επιπλέον το καλούπι έχει σύνθετη γεωμετρία, όχι επίπεδη για παράδειγμα, περιοριζόμαστε ως προς τα υφάσματα, καθότι μερικά είδη υφασμάτων δεν «τσακίζουν» σωστά.

## Περατότητα Υφασμάτων(στατική)

Η περατότητα αποτελεί επιμέρους κριτήριο της επιλογής των υφασμάτων που προαναφέρθηκε. Με τον όρο περατότητα υφασμάτων εννοούμε την δυνατότητα που αυτά παρέχουν βάσει κατασκευής στη ρητίνη να τα εμποτίσει. Υφάσματα με μικρότερη περατότητα, εμποτίζονται πιο

δύσκολα από εκείνα με μεγαλύτερη περατότητα. Μιλώντας για στατική περατότητα, εννοούμε ουσιαστικά την περατότητα τους σε ατμοσφαιρική πίεση και όχι σε πίεση κενού, όντας αυτούσια, χωρίς δηλαδή την διεπαφή με άλλα υφάσματα.

## **Γεωμετρία**

Ως γεωμετρία υφασμάτων εννοούνται οι διαφορετικοί τύποι υφάνσεων και το βάρος των υφασμάτων ανά επιφάνεια ( $\text{gr}/\text{cm}^2$ ). Η σύγχρονη βιομηχανία παραγωγής ανθρακουφασμάτων παρέχει μεγάλη ποικιλία αναφορικά με τους τύπους υφάνσεως και το βάρος των υφασμάτων.

## **Επίπεδο Κενού(πίεση)**

Το επίπεδο του κενού αναφέρεται στο πόσο κοντά αυτό προσεγγίζει το απόλυτο(τέλειο) κενό. Το απόλυτο κενό είναι ουσιαστικά ένας όγκος χώρου, ο οποίος δεν περιέχει καθόλου ύλη. Αυτό βέβαια πρακτικά είναι ανέφικτο, αφού ακόμα και το διάστημα δεν είναι τελείως κενό ύλης.

Αναφορικά λοιπόν με το επίπεδο κενού, χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες οι οποίοι είναι : χαμηλό, μεσαίο, υψηλό, πολύ υψηλό, πάρα πολύ υψηλό και απόλυτο κενό.

Για την καλύτερη κατανόηση του κενού, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ένας ορισμός της ατμοσφαιρικής πίεσης:

*Η ατμοσφαιρική πίεση λοιπόν, δημιουργείται από το βάρος του αέρα που βρίσκεται πάνω από το σημείο μέτρησης, γι' αυτό και ποικίλλει άλλωστε ανάλογα με το υψόμετρο.*

### Πίεση κενού(gauge vacuum) και απόλυτη πίεση

*Ένα τυπικό μπαρόμετρο, μετράει ατμοσφαιρική (απόλυτη) πίεση. Η ένδειξη είναι ουσιαστικά η πίεση πάνω από το απόλυτο κενό(μηδενική πίεση).*

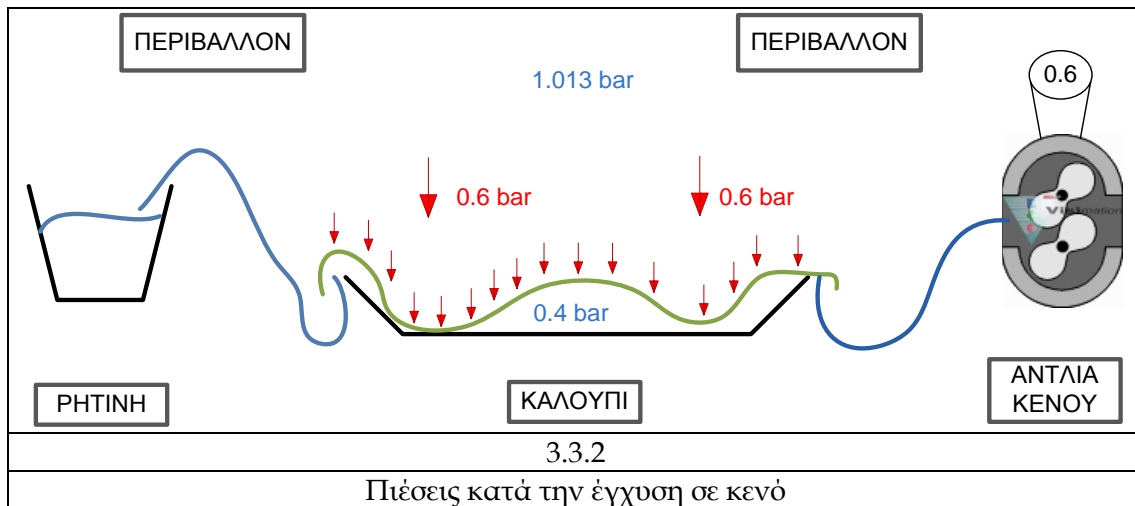
*Το κενό εσωτερικά της σακούλας κενού, μετράται με τον μετρητή κενού της αντλίας και η ένδειξη του είναι σχετική με την εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση, είτε σε bar είτε ως ποσοστό της ατμοσφαιρικής.*

*Η σχετική αυτή ένδειξη, ονομάζεται πίεση κενού και αποτελεί ουσιαστικά την διαφορά πίεσης με την ατμοσφαιρική.*

*Οπότε η πίεση εντός της σακούλας κενού(η πίεση της διαδικασίας της έγχυσης σε κενό), η οποία θα λέγεται απόλυτη πίεση έγχυσης, θα ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση μείον την πίεση κενού, αυτή δηλαδή που φαίνεται στον μετρητή-ρολόι της αντλίας κενού.*

Ως εκ τούτου, η δύναμη που ωθεί την ρητίνη για να εμποτίσει τα υφάσματα, είναι η αυτή η διαφορά μεταξύ ατμοσφαιρικής και απόλυτης πίεσης έγχυσης.

Οι παραπάνω ορισμοί αποσαφηνίζονται πλήρως στο παρακάτω σχήμα:



Στο σχήμα 3.3.2, το περιβάλλον βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση 1.013 bar, η απόλυτη πίεση έγχυσης είναι 0.4 bar και η δύναμη(πίεση) που συμπιέζει τα διάφορα υφάσματα στο καλούπι είναι 0.6 bar. Αυτή ουσιαστικά είναι η πίεση κενού και φαίνεται στο ρολόι της αντλίας κενού.

### Σακούλα Κενού(vacuum bag)

Η σακούλα που θα χρησιμοποιηθεί για την έγχυση, θα πρέπει να επιλεγεί με βάση το επίπεδο του κενού και τη γεωμετρία που θα έχει το καλούπι.

Υπάρχουν σακούλες που σκίζονται, όταν το κενό ξεπεράσει κάποια τιμή, λόγω μειωμένης αντοχής τους. Επιπλέον κάποιες σακούλες ενδέχεται να τσακίσουν, όταν το καλούπι έχει σύνθετη γεωμετρία(κλίσεις, γωνίες, εγκοπές), αυξάνοντας τον κίνδυνο για τυχόν διαρροές, γεγονός καταστροφικό για την όλη διαδικασία.

### Μέσο διευκόλυνσης ροής(infusion mesh)

Το συγκεκριμένο μέσο, είναι ένα διχτυωτό πλέγμα που τοποθετείται ανάμεσα στη σακούλα κενού και στο peel ply και διευκολύνει την ομοιόμορφη ροή της ρητίνης στο πρώτο στρώμα του πολυστρωματικού, άρα και αυτό αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για την έγχυση σε κενό.

### Συμπίεση Επιστρώσεων(δυναμική)

Η δυναμική συμπίεση των επιστρώσεων δηλώνει ουσιαστικά την δυνατότητα που αυτά έχουν, να συσσωματωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα, μειώνοντας τα μεταξύ τους κενά, υπό την επίδραση της πίεσης του κενού. Άρα η συμπίεση τους εξαρτάται άμεσα από την εφαρμοζόμενη πίεση κενού και αυτή μεγαλώνει, όσο μεγαλώνει και η πίεση κενού. Η συμπίεση είναι αλληλένδετη και με τον αδιάστατο λόγο όγκου  $V_f$  των υφασμάτων, ένα μέγεθος που δείχνει ουσιαστικά το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνουν οι ίνες στο σύνθετο υλικό. Ο λόγος αυτός είναι ανάλογος της συμπίεσης των επιστρώσεων.

## **Περατότητα Επιστρώσεων**

Με τον όρο αυτό, εννοείται η δυνατότητα για απορρόφηση της ρητίνης, που διαθέτει κάθε ύφασμα. Η περατότητα βέβαια είναι άμεσα εξαρτώμενη από την πίεση κενού και ποικίλλει για διαφορετικούς τύπους υφάνσεων.

Τα υφάσματα τύπου twill είναι πιο περατά από τα αντίστοιχα απλού-plain τύπου.

## **Πάχος Επιστρώσεων**

Το πάχος των επιστρώσεων αποτελεί βασική ένδειξη για την επιτυχία ή όχι της έγχυσης. Μία έγχυση αναφορικά με το πάχος, θεωρείται επιτυχημένη όταν αυτό, είναι το ίδιο σε όλο το προφίλ του παραγόμενου τεμαχίου.

## **Εμποτισμός Υφασμάτων**

Το ποσοστό εμποτισμού των υφασμάτων αποτελεί επίσης ένδειξη κατά πόσο πέτυχε η έγχυση σε κενό. Μεγάλο ποσοστό εμποτισμού, σημαίνει καλή περατότητα υφασμάτων, στατική και δυναμική, καλή δυναμική συμπίεση, άρα καλό επίπεδο κενού, σωστή εκλογή υφασμάτων, εξάλειψη διαρροών και ύπαρξης φυσαλίδων αέρα και άρα επιτυχημένη έγχυση και υψηλό ποιοτικά παραγόμενο προϊόν.

## **Ύπαρξη Φυσαλίδων Αέρα**

Η ύπαρξη φυσαλίδων αέρα στο τεμάχιο, είναι ότι πιο καταστροφικό για την έγχυση και για την συμπεριφορά του παραγόμενου προϊόντος. Η παρουσία αέρα, υποβαθμίζει ριζικά τις μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου και προκαλεί αυξομειώσεις της μηχανικής του συνοχής και απόδοσης.

## **Μηχανικές Ιδιότητες**

Όπως είναι αρκετά σαφές από το διάγραμμα που προηγήθηκε, οι προκύπτουσες μηχανικές ιδιότητες, είναι αυτές που καθορίζουν την ποιότητα του παραγόμενου τεμαχίου και εξαρτώνται ως επί το πλείστον από τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν. Η αντοχή του τεμαχίου από σύνθετα υλικά, εξαρτάται από τις επιμέρους μηχανικές ιδιότητες των μερών του σύνθετου(ρητίνη, ίνες) και από την ακρίβεια και αποτελεσματικότητα της έγχυσης σε κενό καθεαυτή. Περί μηχανικών ιδιοτήτων θα γίνει ξανά αναφορά παρακάτω.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### Η μορφή των καταδυτικών λεπίδων

#### 4.1. Απόδοση [7],[8]

Αναφορικά με τη μορφολογία των καταδυτικών πέλδων και τη συσχέτιση της με την αποδοτικότητα τους, δεν έχουν αναπτυχθεί θεωρίες και δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα τεκμηριωμένες θεωρητικά απόψεις.

Η πληθώρα των μελετών που έχουν γίνει κατά καιρούς και αφορούν στην απόδοση των καταδυτικών πέλδων, είναι ουσιαστικά πειράματα και δοκιμές σε εργαστήρια και συμπεράσματα εξ αυτών. Θεωρητικό μοντέλο που να περιγράφει πλήρως τον συντελεστή απόδοσης ενός καταδυτικού πέλδου σε συνάρτηση με τις παραμέτρους εκείνες που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του, δεν υπάρχει.

Αυτό συμβαίνει κατά πάσα πιθανότητα λόγω του ότι ο ανθρώπινος παράγοντας εμπεριέχεται σε μεγάλο βαθμό στην αποδοτικότητα ενός πέλδου. *Βασικά για το πέλδιλο μεγέθη, όπως η οπισθέλκουσα κατά την κολύμβηση, το εσωτερικό και το κινητικό έργο και η συνολική απόδοση, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις τεχνικές δυνατότητες του δότη.*

Ο πεδιλισμός ή το μέγεθος των μυών που χρησιμοποιούνται κατά τον πεδιλισμό για παράδειγμα, διαφέρουν από άνθρωπο σε άνθρωπο με μεγάλη διασπορά. Έτσι αποτελεσματικό μοντέλο μελέτης της απόδοσης για πέλδιλο, δεν μπορεί να αναπτυχθεί με επιτυχία μιας και οι αποκλίσεις θα είναι τέτοιες που θα το καθιστούν ανακριβές.

Υπάρχουν ωστόσο χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν σε ικανοποιητικό βαθμό να βοηθήσουν στο να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, σε επίπεδο πειράματος, αναφορικά με πέλδιλα του εμπορίου.

#### Παράμετροι αξιολόγησης

Δύο παράγοντες που μελετώνται κατά την αξιολόγηση των καταδυτικών πέλδων είναι *το βάθος πεδιλισμού(kick depth) και η συχνότητα πεδιλισμού(kick frequency).*

Άλλες παράμετροι λειτουργίας ενός πέλδου είναι η επιφάνεια που αυτό κατέχει(fin surface area) και η ελαστικότητα(ή ακαμψία ισοδύναμα) του.

Ένα σωστό κριτήριο για την αξιολόγηση ενός πέλδου είναι το ενεργειακό κόστος της κολύμβησης, το οποίο μετράται με βάση τη καταναλισκόμενη παροχή οξυγόνου(σε lt/min) από τον άνθρωπο που κολυμπάει κάνοντας χρήση των πέλδων.

Παρόλο που θα περίμενε κανείς η ακαμψία ενός πέλδου να επηρεάζει το ενεργειακό κόστος κολύμβησης, εν τούτοις κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει μιας και πέλδιλα με μικρή και άλλα με μεγάλη ακαμψία μπορούν να είναι εξίσου οικονομικά από άποψη κατανάλωσης οξυγόνου.

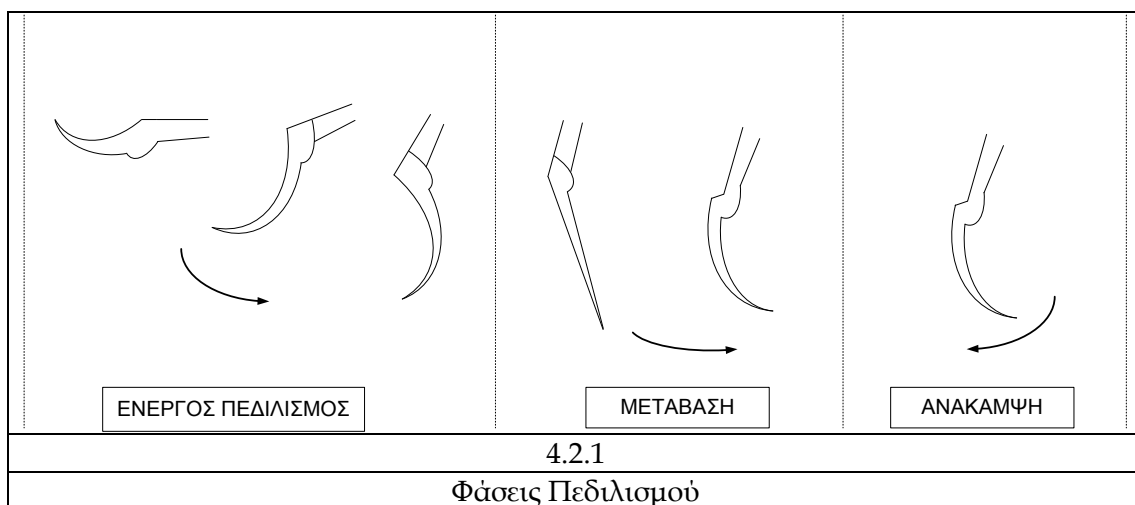
Για την βελτίωση της αποδοτικότητας ενός πέλδου, η κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί κανείς, είναι η βελτίωση της επίδρασης της οπισθέλκουσας που σχετίζεται άμεσα με το βάθος πεδιλισμού και η βελτίωση της απόδοσης του πέλδου που σχετίζεται άμεσα με την συχνότητα πεδιλισμού.

Πιο συγκεκριμένα η οπισθέλκουσα αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος πεδιλισμού, το οποίο με τη σειρά του αυξάνεται με την αύξηση της ακαμψίας του πέδιλου και η απόδοση του πέδιλου είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας πεδιλισμού. Επομένως σε πέδιλα με μικρότερη ακαμψία(πιο ελαστικά) περιμένει κανείς μεγαλύτερη συχνότητα πεδιλισμού(περισσότερες πεδιλίες στη μονάδα του χρόνου) και άρα μικρότερη απόδοση. Αυτά τα δύο μεγέθη πρέπει να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να μειωθεί στο ελάχιστο το ενεργειακό κόστος κολύμβησης. Μία ακόμα παράμετρος , άξια μελέτης, είναι η απόσταση πεδιλισμού, η απόσταση δηλαδή την οποία διανύει ο δύτες, με έναν πεδιλισμό.

Αυτή είναι αύξουσα συνάρτηση της ακαμψίας, δηλαδή είναι μεγαλύτερη σε πιο σκληρά πέδιλα. Η μέγιστη ώθηση, η δύναμη δηλαδή που παράγεται κατά τον πεδιλισμό και ωθεί τον δύτε προς τα μπροστά, είναι μεγαλύτερη, όπως θα περίμενε κανείς, για πέδιλα με μεγάλη ακαμψία. Αυτό συμβαίνει γιατί στα λιγότερο εύκαμπτα πέδιλα η συχνότητα πεδιλισμού είναι μικρότερη από ότι στα πιο ελαστικά και έτσι η ώθηση πρέπει να είναι μεγαλύτερη για συνολική ώθηση σταθερή στη μονάδα του χρόνου.

#### 4.2 Φάσεις Πεδιλισμού

Η ώθηση η οποία παράγεται κατά τον πεδιλισμό, είναι προϊόν κίνησης σε τρεις φάσεις. Αυτές είναι η φάση του ενεργού πεδιλισμού, η μεταβατική φάση και η φάση της ανάκαμψης(σχήμα 4.2.1).



Ουσιαστικά το μεγαλύτερο ποσοστό της ώσης παράγεται στη φάση του ενεργού πεδιλισμού, κατά την οποία ο δύτες, ευρισκόμενος παράλληλα με την επιφάνεια του νερού, εκτελεί πεδιλισμό προς τα κάτω.

Η μεταβατική φάση είναι αυτή κατά την οποία η λεπίδα έχει επανέλθει στιγμιαία στην κανονική της μορφή, είναι δηλαδή μη παραμορφωμένη και δεν προσφέρει καθόλου ώση.

Τέλος η φάση της ανάκαμψης είναι το διάστημα κατά το οποίο ο δύτες επαναφέρει τη λεπίδα στην φάση του ενεργού πεδιλισμού, ουσιαστικά δηλαδή εκτελεί πεδιλισμό προς τα πάνω.

Όπως προαναφέρθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό της ώσης, παράγεται κατά τον ενεργό πεδιλισμό. Οι άλλες δύο φάσεις πεδιλισμού προσφέρουν λίγο ή και καθόλου ώση και επιπλέον επειδή

συμβάλλουν στην αντίσταση κατά την κίνηση(οπισθέλκουσα) , πρέπει να υπάρξει μια αύξηση στη συχνότητα πεδιλισμού προκειμένου να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη τιμή ώσης.

Συμπερασματικά καταλαβαίνει κανείς πως εφόσον το μεγαλύτερο ποσοστό της ώσης παράγεται κατά τον ενεργό πεδιλισμό, η έρευνα για τη βελτίωση της απόδοσης μιας καταδυτικής λεπίδας πρέπει να στοχεύει στην αύξηση της παραγόμενης σε αυτή τη φάση ώσης, καθώς και στην ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας που παράγεται κατά την μετάβαση και την ανάκαμψη. Ιδανικά δηλαδή ένα πολύ αποδοτικό πέδιλο θα έπρεπε να έχει μεγάλη ακαμψία κατά τον πεδιλισμό προς τα κάτω και να έχει μεγάλη ελαστικότητα κατά τον πεδιλισμό προς τα πάνω!

#### 4.3 Δοκιμές

Τα παραπάνω αφορούν την μελέτη της απόδοσης καταδυτικών πέδινων σε επίπεδο πειραμάτων κολύμβησης.

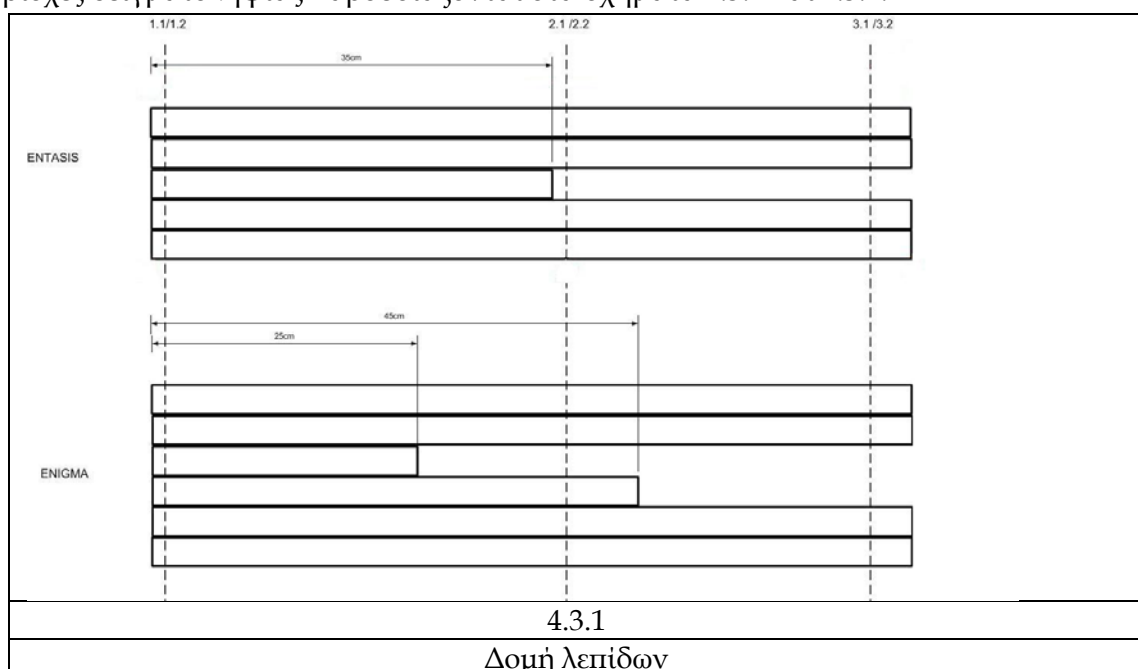
Υπάρχουν και καταστροφικές δοκιμές-έλεγχοι αναφορικά με τα πέδιλα, που εξετάζουν την ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών τους.

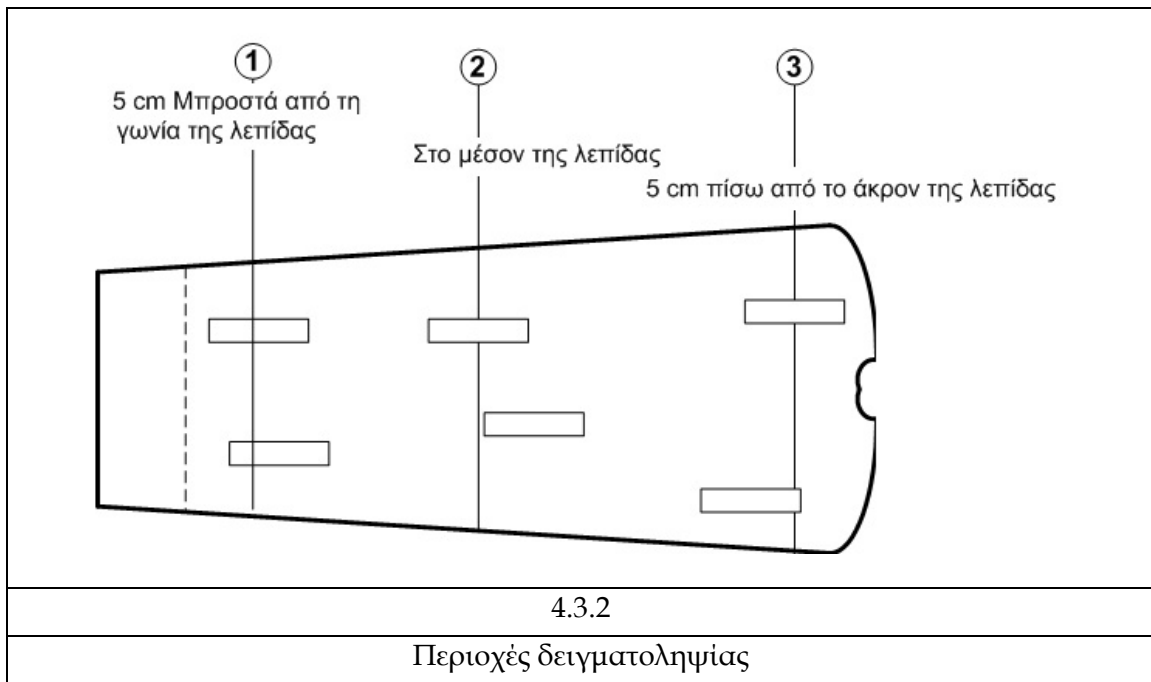
Δύο τέτοιες δοκιμές είναι ο εφελκυσμός και η κάμψη τριών σημείων. Ουσιαστικά μέσα από αυτές τις δοκιμές εξετάζεται η ποιότητα κατασκευής των διάφορων λεπίδων του εμπορίου.

Αυτές οι δύο δοκιμές διεξήχθησαν για περιορισμένο αριθμό δοκιμών, στο εργαστήριο Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την τεχνολογία των πολυστρωματικών καταδυτικών πέδινων.

Το υλικό κατασκευής των δύο λεπίδων του εμπορίου που ελέγχθηκαν είναι τα ανθρακονήματα, διαφορετικού βάρους και χαρακτηριστικών. Τα ανθρακονήματα υπερτερούν ως υλικά κατασκευής πέδινων έναντι των συμβατικών υλικών(πλαστικό, λάστιχο κ.α.) λόγω της μεγάλης δυνατότητας που επιδεικνύουν στην αποθήκευση μωικής ενέργειας με τη μορφή ελαστικής-δυναμικής και στην μετατροπή της σε εμπρόσθια κίνηση.

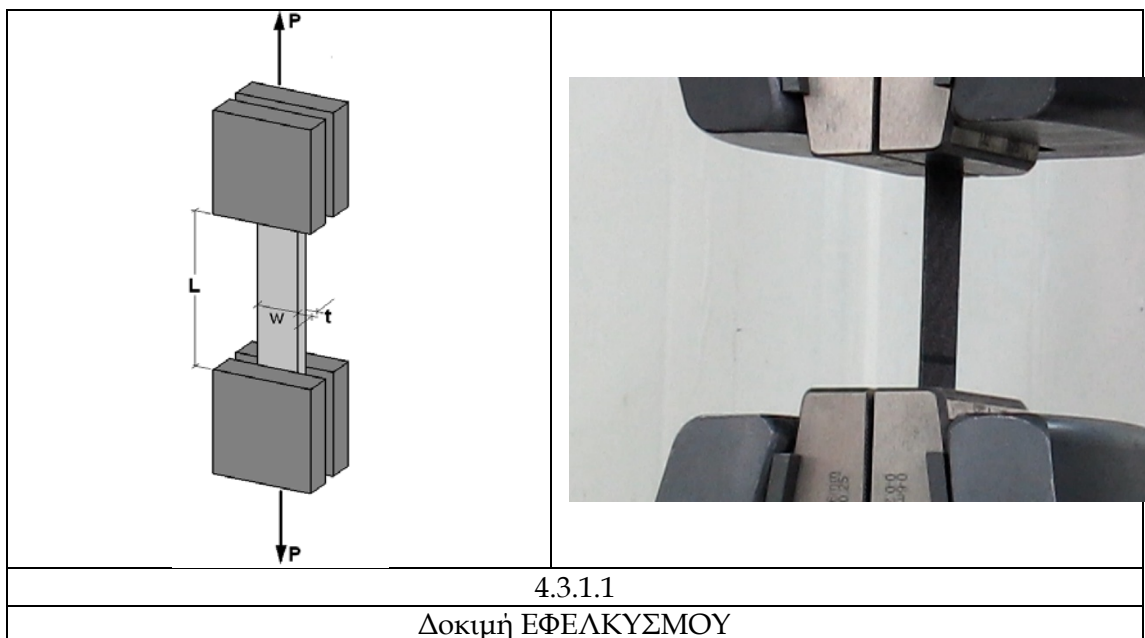
Οι εμπορικές ονομασίες των δύο λεπίδων είναι ENTASIS και ENIGMA και η δομή τους καθώς και οι περιοχές δειγματοληψίας παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3.1 και 4.3.2.





#### 4.3.1 Εφελκυσμός

Η δοκιμή εφελκυσμού έγινε βάσει προτύπου ASTM D3039. Επιλέχθηκαν 6 δοκίμια ανά τύπο λεπίδας(σχήμα 4.3.1). Οι περιοχές δειγματοληψίας για το κάθε πέδιλο ήταν τρεις(1,2,3) και ελέγχθηκαν δύο δοκίμια ανά περιοχή(σχήμα 4.3.2).



Τονίζεται πως για τη δοκιμή εφελκυσμού(αντίστοιχα για την κάμψη τριών σημείων), ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων δοκιμίων, καθιστά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μη ικανή για τη δημιουργία κανόνων που διέπουν τη συμπεριφορά των

πολυστρωματικών και αποτελεί απλά έναυσμα για την περαιτέρω μελέτη των πολυστρωματικών αυτών.

#### 4.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων εφελκυσμού

Τα διαγράμματα εφελκυσμού περιλαμβάνονται σε σχετικό παράρτημα. Κατά τον εφελκυσμό, η αστοχία δεν λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε ολόκληρη τη διατομή. Υπάρχει παραμένουσα αντοχή που αποτελεί ποσοστό της μέγιστης.

Εμφανίζεται σαφής ομοιότητα στη μορφή και στα επιμέρους χαρακτηριστικά σημεία των διαγραμμάτων δηλαδή επαναληψιμότητα και κατασκευαστική ομοιογένεια, έστω και για περιορισμένο - με βάση το πρότυπο - αριθμό δειγμάτων: μέγιστη αντοχή, παραμένουσα αντοχή, παραμόρφωση μερικής αστοχίας (στη μέγιστη αντοχή), παραμόρφωση πλήρους αστοχίας. Στα περισσότερα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (σε κάποια εντονότερα, σε άλλα λιγότερο) παρουσιάζεται μη-γραμμικότητα («γόνατο») στην περιοχή πριν την αστοχία. Πρόκειται για σύνηθες φαινόμενο σε πολύστρωτα σύνθετα ελάσματα με «κυματοειδή» διάταξη ινών (πλεχτή ύφανση twill). Υπό εφελκυστική φόρτιση, οι πιτυχωμένες ίνες τείνουν να ευθυγραμμιστούν, προκαλώντας υψηλές τάσεις στη μήτρα (ρητίνη), με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρορωγμών σε αυτήν σε σχετικά χαμηλά φορτία και ως εκ τούτου την προοδευτική αύξηση της ενδοτικότητας του ελάσματος. Παράλληλα, ρόλο παίζει η διαστρωμάτωση του υλικού (διαφορετική απόκριση των επιμέρους στρώσεων στη διεύθυνση της φόρτισης - ακόμα και θραύση στρώσης) και - όσον αφορά στη σύγκριση μεταξύ των ζωνών - η ομοιομορφία της κατασκευής του ελάσματος.

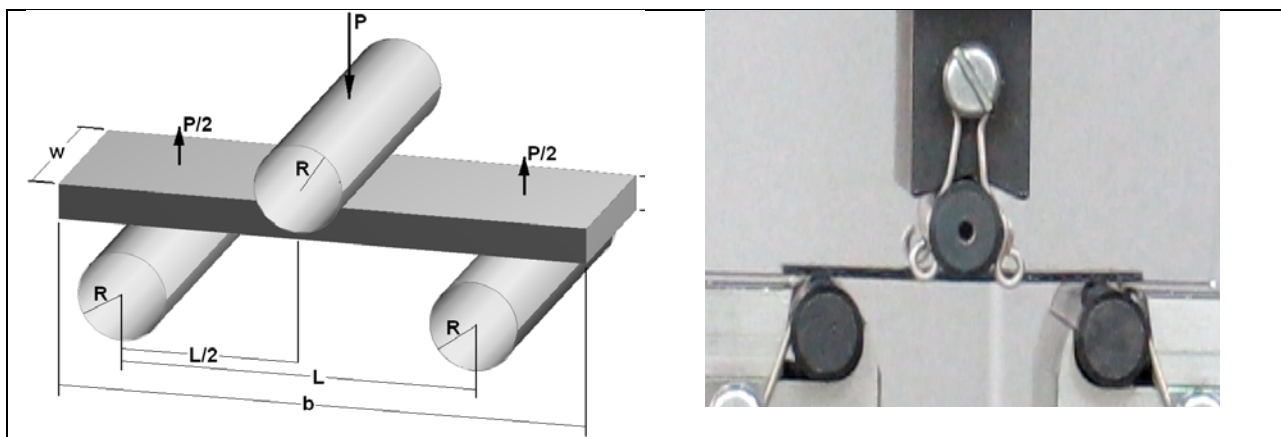
Τα δοκίμια της ζώνης 2 παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημες καμπύλες των επαναληπτικών δοκιμών για κάθε λεπίδα. Μιας και εμπλέκεται διαφορετικός αριθμός στρώσεων κατά μήκος των δοκιμίων, εξήγηση φαίνεται να αποτελεί το ότι η αστοχία εντοπίζεται σε διατομή με λιγότερες στρώσεις (ασθενέστερη περιοχή).

Επειδή όμως η διατομή αστοχίας συμπίπτει με το όριο των ζωνών συγκράτησης του δοκιμίου πάνω στη μηχανή, τα αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπισθούν με κάποιο σκεπτικισμό.

Αναφορικά με τα δοκίμια της ζώνης 3, η μεγάλη σχετικά απόσταση των θέσεων των επαναληπτικών δοκιμών, καθώς και η θέση τους (απόληξη της λεπίδας), ενδεχομένως υποδηλώνουν δομική ανομοιογένεια κατασκευής στην περιοχή αυτή. Μετρήσεις σε δοκίμια από περισσότερες ίδιες λεπίδες θα μπορούσαν να καταδείξουν συστηματικό ελάττωμα - αν αυτό όντως υφίσταται - κατά τη διαδικασία κατασκευής.

#### 4.3.3 Κάμψη Τριών Σημείων

Η δοκιμή κάμψης τριών σημείων έγινε βάσει προτύπου ASTM D790. Επιλέχθηκαν και εδώ 6 δοκίμια ανά τύπο λεπίδας(1.1-3.2). Οι περιοχές δειγματοληψίας για το κάθε πέδιλο ήταν τρεις(1,2,3) και ελέγχθηκαν δύο δοκίμια ανά περιοχή(1.1,1.2,...3.2).



4.3.3.1

Δοκιμή ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

4.3.4 Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων Κάμψης Τριών Σημείων

Τα διαγράμματα κάμψης τριών σημείων περιλαμβάνονται σε σχετικό παράρτημα. Η αστοχία της διατομής μπορεί να μην είναι καθολική, λόγω της διαστρωμάτωσης του σύνθετου ελάσματος και της σχετικής εντατικής κατάστασης (εφελκυσμός στην εξωτερική επιφάνεια, θλίψη στην εσωτερική). Η τυχόν ύπαρξη μικρού μη μηδενικού φορτίου μετά την αστοχία για περαιτέρω μετατόπιση του εμβόλου, οφείλεται σε πολύ περιορισμένη εναπομείνουσα αλώβητη διατομή (μη καθολική αστοχία της διατομής).

Στις επαναληπτικές δοκιμές κάμψης, παρουσιάζεται ορατή απόκλιση στα δοκίμια της ζώνης 3, που μπορεί να οφείλεται σε ανομοιογένεια του υλικού στη συγκεκριμένη ζώνη, η οποία διακρίνεται και στον εφελκυσμό. Πάντως, αποκλίσεις στις δοκιμές κάμψης μπορεί να οφείλονται σε μικρές αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση των δοκιμίων κατά τη δοκιμή, όπως και, λιγότερο πιθανά, στις συνοριακές συνθήκες επαφής μεταξύ εξαρτημάτων μηχανής και δοκιμίων.

Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε κάμψη παρουσιάζονται υψηλότερα των αντίστοιχων εφελκυστικών, καθώς η δοκιμή κάμψης δε συνιστά μια «καθαρή» εντατική κατάσταση.

Η τάση υπολογίζεται ως η μέγιστη τάση «ίνας» που προκύπτει ακριβώς κάτω από το σημείο φόρτισης στην εξωτερική (κυρτή) επιφάνεια του ελάσματος (είναι το μοναδικό σημείο κατά μήκος του δοκιμίου - όπως προκύπτει από τη μηχανική δοκού σε κάμψη - που αναπτύσσεται αυτή η μέγιστη τάση).

Ουσιαστικά, η τάση κατανέμεται - μεταβαλλόμενη κατά το πάχος του ελάσματος - από εφελκυστική στην κάτω επιφάνεια σε θλιπτική στην άνω (κοίλη) επιφάνεια. Η θλιπτική τάση αναχαιτίζει τη βύθιση του δοκιμίου, αυξάνοντας επίπλαστα το υπολογιζόμενο καμπτικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Οι παράγοντες που αναφέρθηκαν σχετικά με την αποδοτικότητα των καταδυτικών πέλδων σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των δοκιμών που προέκυψαν, αποκαλύπτουν την πολυδιάστατη φύση των καταδυτικών πέλδων ενώ τονίζουν παράλληλα τις αμέτρητες δυνατότητες σχεδίασης που υπάρχουν για τα πέλδια, δυνατότητες όμως, οι οποίες θα πρέπει να ταξινομηθούν βάσει

κάποιων κυρίων παραμέτρων σχεδίασης που υπάρχουν για τα πέδιλα. Αυτές αναφέρονται παρακάτω.

#### 4.4 Παράμετροι Σχεδίασης [11]

Ένα καταδυτικό βατραχοπέδιλο αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- Η γωνία που σχηματίζει το πέλμα με την λεπίδα( εφόσον βέβαια αυτή δεν είναι τελείως επίπεδη).

Η συγκεκριμένη γωνία συναντάται σε υψηλής ποιότητας και τιμής πέδιλα, κατασκευασμένα συνήθως από σύνθετα υλικά και όχι σε αυτά που υπάρχουν κατά κόρον στο εμπόριο και είναι χαμηλής τιμής και ποιότητας υλικών.

Η γωνία αυτή κυμαίνεται μεταξύ 15-23° και εξυπηρετεί την μείωση των τριβών και την καλύτερη υδροδυναμική κατά τον πεδλισμό, αφού έτσι η γωνία του εκτεταμένου πέλματος με την οριζόντιο γραμμή της επιφάνειας του νερού προσεγγίζει τις 180°(παραλληλίζονται).

- Πέλμα-παπουτσάκι

Το πέλμα είναι στην ουσία το παπούτσι το οποίο είναι κολλημένο ή βιδωμένο στη λεπίδα και υποδέχεται το πόδι του κολυμβητή. Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του είναι το λάστιχο, το PTFE και η πολυουρεθάνη. Συγκεκριμένα το PTFE είναι ένα ιδιαίτερα υδρόφοβο υλικό και γι' αυτό προτιμάται.

- Παρατροπίδια

Είναι τμήματα από λάστιχο τα οποία περικλείουν τη λεπίδα κατά μήκος και εξυπηρετούν την καλύτερη συνοχή και αντοχή του πέδιλου καθώς και την βελτίωση της συμπεριφοράς αυτού κατά τον πεδλισμό, αφού εμποδίζουν το «γλίστρημα» της λεπίδας, εγκλωβίζοντας τον όγκο του νερού που μεταφέρεται κατά το κλώσημα.

- Λεπίδα

Το κυριότερο μέρος του πέδιλου. Η επαναλαμβανόμενη συμπίεση-εκτόνωση της, ωθεί τον κολυμβητή προς τα εμπρός, ενώ παράλληλα του εξοικονομεί μεγάλα ποσά ενέργειας που θα δαπανούσε εφόσον δεν φορούσε πέδιλα. Κατασκευάζεται από πλαστικό, φάϊμπεργκλας, ανθρακονήματα κ.α.

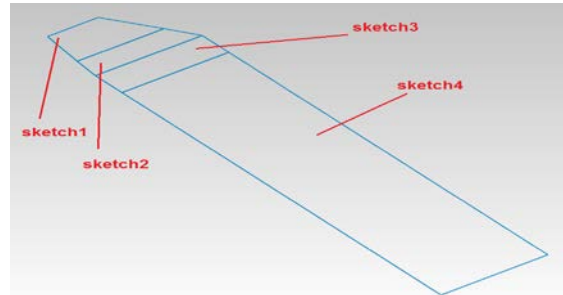
Οι παράμετροι σχεδίασης ενός καταδυτικού πέδιλου είναι όσες αναφέρθηκαν παραπάνω και με αυτές θα ασχοληθούμε στη συνέχεια, κατά την προσομοίωση που θα πραγματοποιηθεί με χρήση λογισμικού CAD.

#### 4.5 Το μοντέλο στο Solidworks

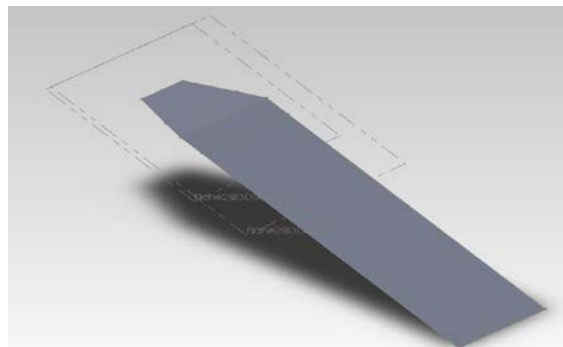
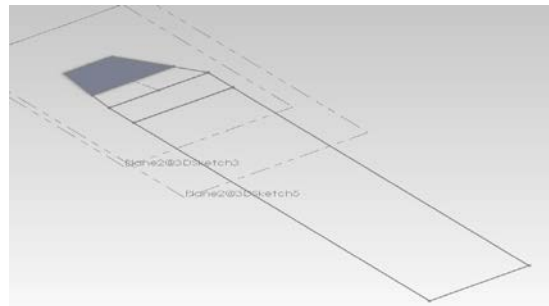
Ακολουθεί η παρουσίαση των σχεδίων των διαφόρων κομματιών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση με το COSMOS του Solidworks.

### 4.5.1 Λεπίδα

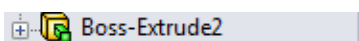
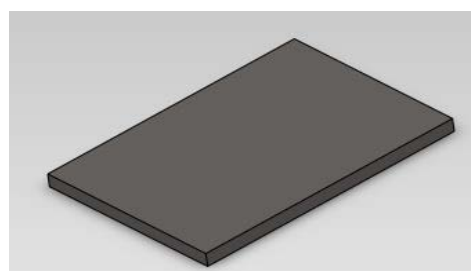
Βήμα 1<sup>ο</sup> : Κατασκευάζουμε διαφορετικά sketches τα όρια των οποίων δηλώνουν τις διάφορες περιοχές της λεπίδας.



Βήμα 2<sup>ο</sup> :Με την εντολή Fill Surface, ορίζουμε επιφάνειες πάνω στα sketches του πρώτου βήματος.

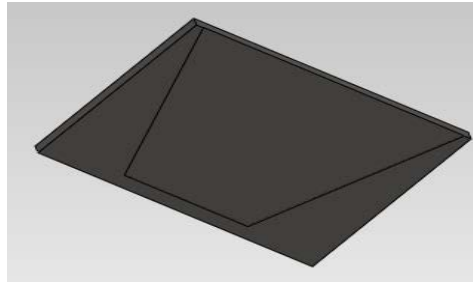


### 4.5.2 Μεγάλο Πέλμα-Παπουτσάκι

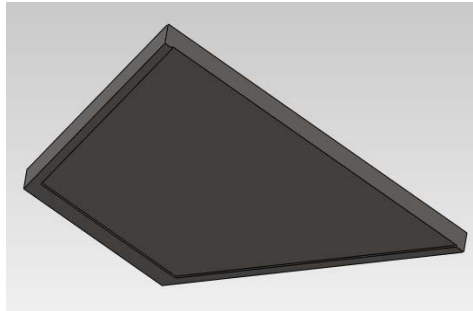




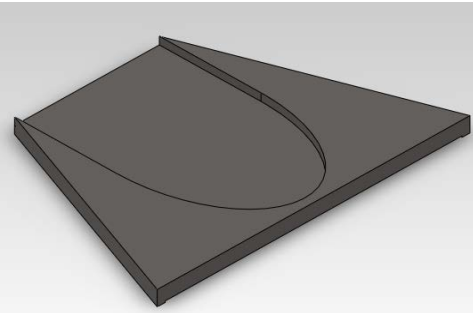
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2



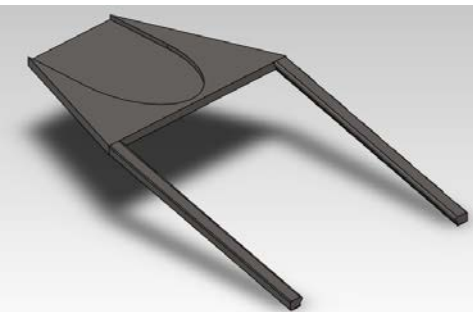
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3



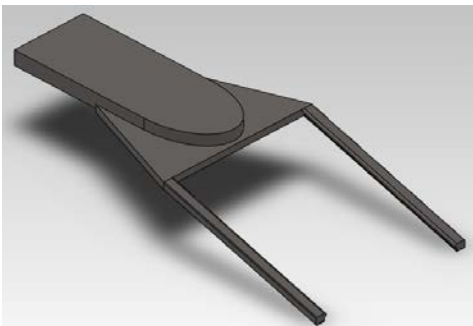
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12



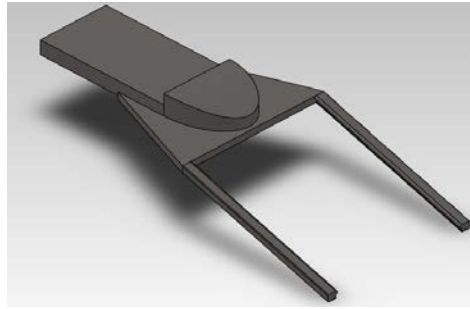
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4



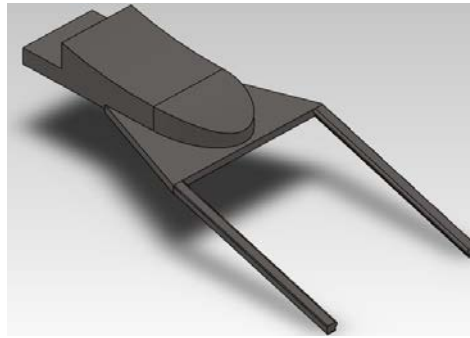
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4
- + Boss-Extrude5



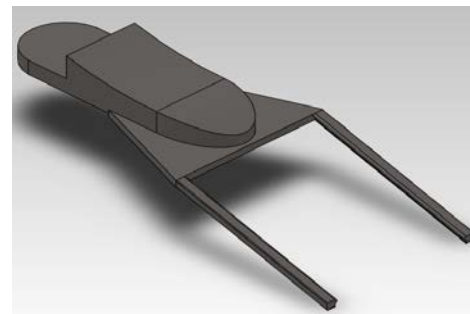
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4
- + Boss-Extrude5
- + Boss-Extrude6



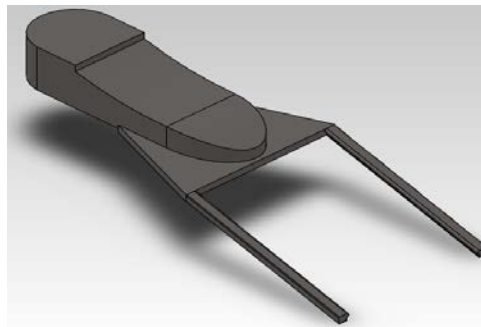
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4
- + Boss-Extrude5
- + Boss-Extrude6
- + Boss-Extrude8



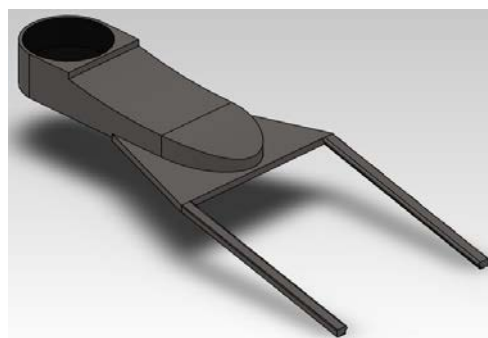
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4
- + Boss-Extrude5
- + Boss-Extrude6
- + Boss-Extrude8
- + Boss-Extrude9

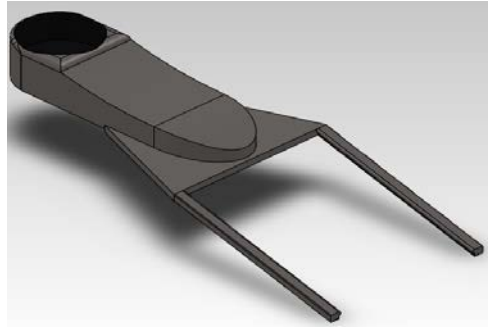
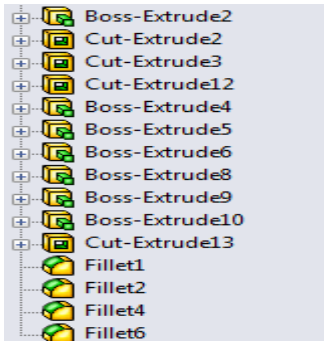


- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4
- + Boss-Extrude5
- + Boss-Extrude6
- + Boss-Extrude8
- + Boss-Extrude9
- + Boss-Extrude10

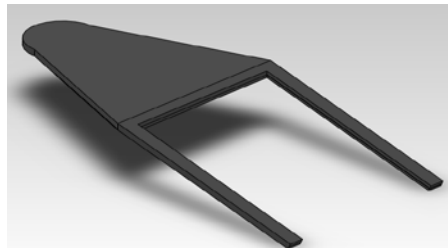
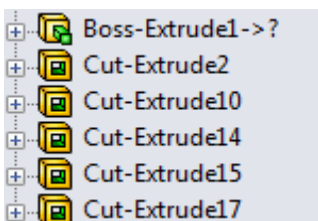
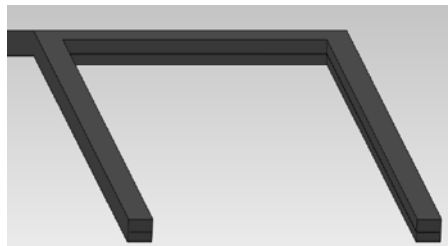
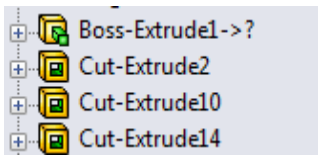
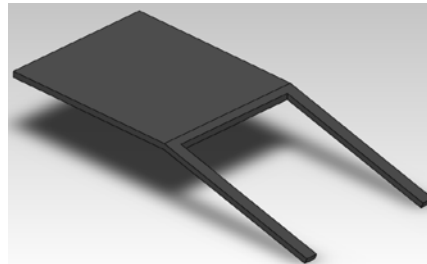
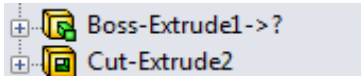
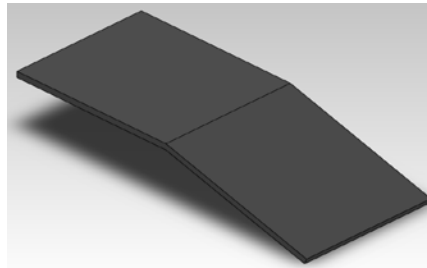
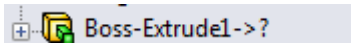


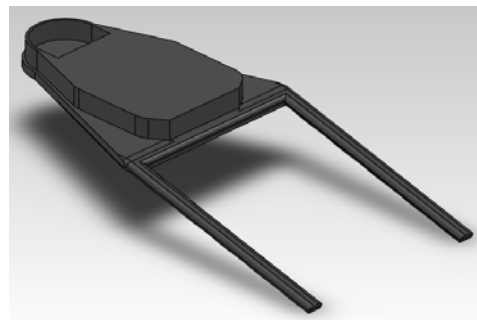
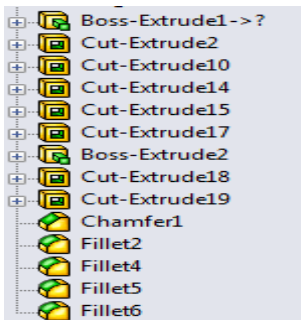
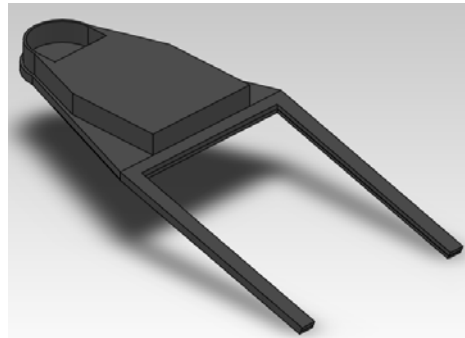
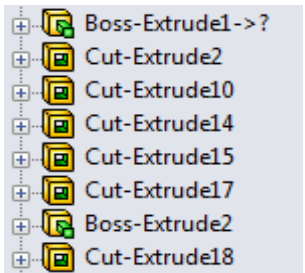
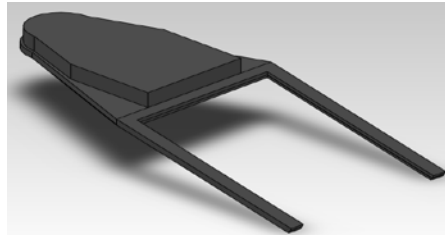
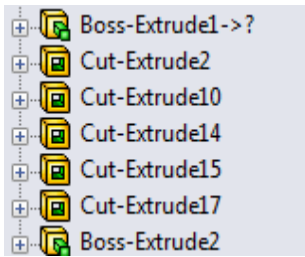
- + Boss-Extrude2
- + Cut-Extrude2
- + Cut-Extrude3
- + Cut-Extrude12
- + Boss-Extrude4
- + Boss-Extrude5
- + Boss-Extrude6
- + Boss-Extrude8
- + Boss-Extrude9
- + Boss-Extrude10
- + Cut-Extrude13



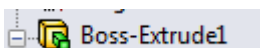
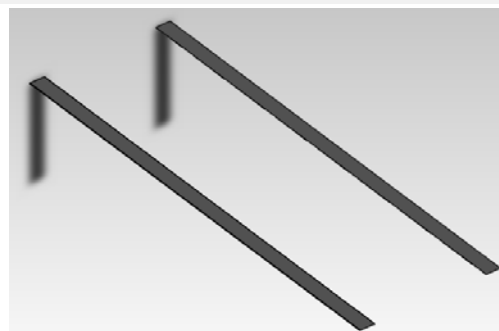
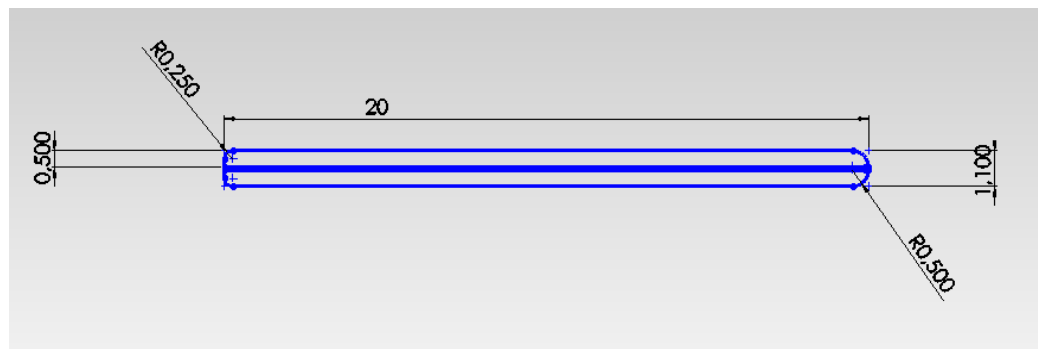


### 4.5.3 Μικρό Πέλμα-Παπουτσάκι

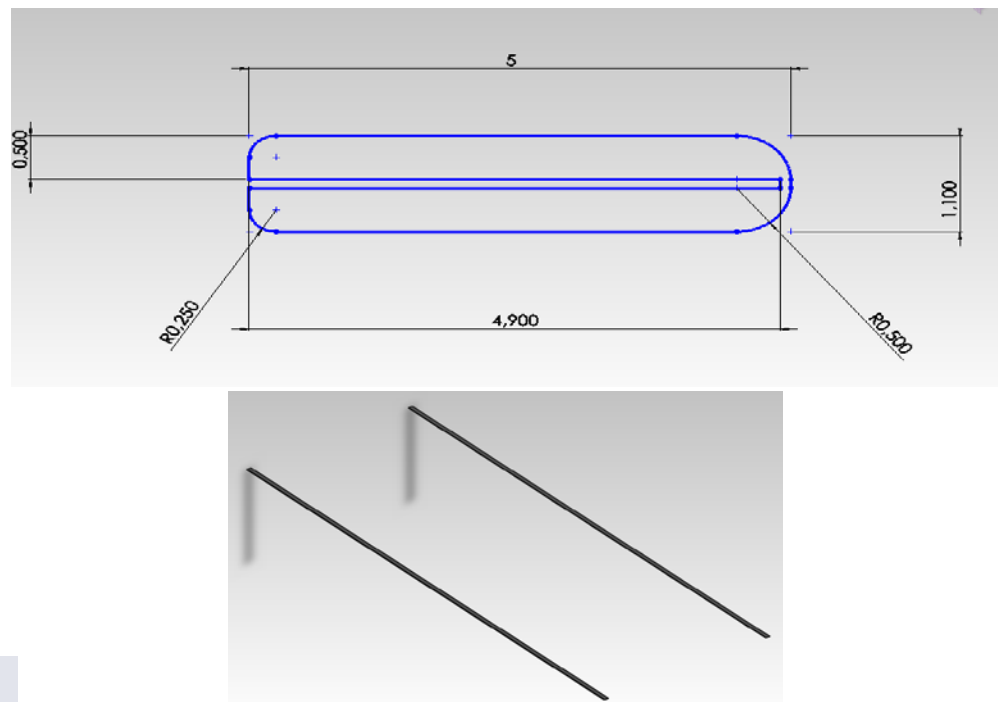




#### 4.5.4 Μεγάλα Παρατροπίδια



#### 4.5.5 Μικρά Παρατροπίδια

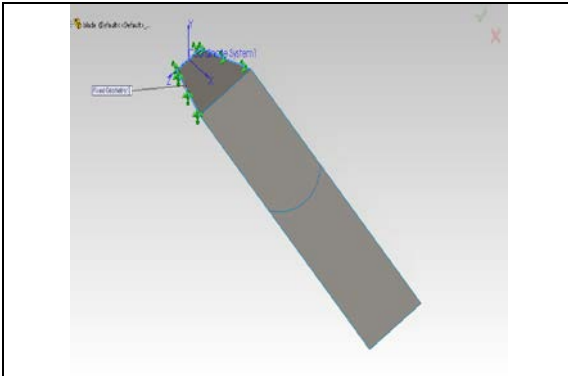
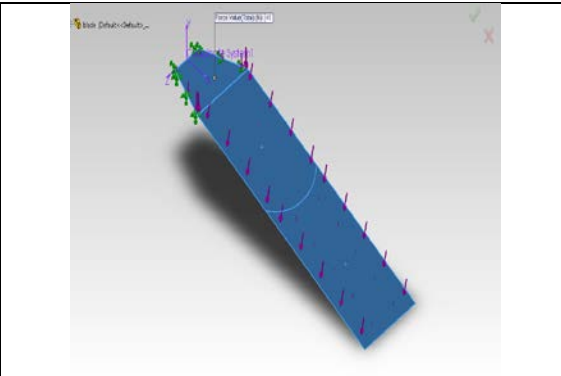


Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης των καταδυτικών λεπίδων, με αναφορές στις παραδοχές και στις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν.

#### 4.6 Προσομοίωση

##### 4.6.1 Δεδομένα

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα COSMOS του Solidworks. Για όλα τα σενάρια προσομοίωσης, οι συνθήκες φόρτισης και οι περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας είναι οι ίδιοι και παρουσιάζονται παρακάτω:

	
4.6.1.1	4.6.1.2
Πακτώσεις	Δυνάμεις

Οι τρεις ακμές της λεπίδας που φαίνονται στο σχήμα 4.6.1.1(πράσινο χρώμα), είναι πακτωμένες. Κάθετα στην πάνω επιφάνεια της λεπίδας, εφαρμόζεται στατικό φορτίο 45 Newton συνολικά(μοβ χρώμα), το οποίο δεν κατανέμεται ομοιόμορφα, αλλά ακολουθεί κατανομή τύπου  $F(x) = x^2$  ξεκινώντας από το σύστημα συντεταγμένων που φαίνεται στο σχήμα 4.6.1.2 και λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή(45 N) στην απόληξη της λεπίδας. Αυτή η παραδοχή είναι σύμφωνη με το άρθρο των Μαθιουλάκη-Μπάρδη, στο οποίο αποδεικνύεται πειραματικά πως η μέγιστη τιμή της φόρτισης πάνω στο πέδιλο εμφανίζεται στην εγκάρσια διατομή της απόληξης της λεπίδας. Η τιμή που δόθηκε για την δύναμη προκύπτει από το ίδιο άρθρο<sup>[11]</sup> και είναι η μέγιστη μετρούμενη πειραματικά δύναμη σε ένα πλήθος πέδινων. Η δύναμη αυτή είναι κάθετη στην επιφάνεια της λεπίδας ανά πάσα στιγμή και είναι η συνισταμένη των δυνάμεων που μετρήθηκαν στο εν λόγω πείραμα και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6.1.A:

Πέδιλα(A-N) Δυνάμεις	A	B	Γ	Δ	E	Z	H	Θ
Fz	84.82	65.38	42.77	81.55	57.75	74.26	58.98	69.5
Fx	27.74	16.75	16.12	24.55	19.22	21.38	18.6	20.18
F συνισταμένη	<b>89.24</b>	67.49	45.7	85.16	60.86	77.27	61.84	72.37

Πέδιλα(A-N) Δυνάμεις	I	K	Λ	M	N	
Fz	60.1	71.96	69.41	62.7	55.86	
Fx	18.4	19.88	16.83	14.68	11.29	
F συνισταμένη	62.85	74.65	71.42	64.39	56.98	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6.1.A

Η μέγιστη τιμή είναι 89.24~90 Newton κατά τον πεδιλισμό δηλαδή και για τα δύο βατραχοπέδιλα τα οποία βρίσκονται σε φάση(ημιτονοειδή). Άρα κάνοντας παραδοχή, θεωρούμε πως στο ένα πέδιλο η εφαρμοζόμενη ανά πάσα στιγμή δύναμη είναι  $90/2=45$  Newton.

#### 4.6.2 Λεπίδες Προσομοίωσης

Στον πίνακα 4.6.2.A, δίνονται τα πάχη των επιμέρους σύνθετων υλικών(ύφασμα εμποτισμένο με ρητίνη), όπως λαμβάνονται από τον κατασκευαστή τους(r-g.de):

ΟΝΟΜΑΣΙΑ-ΤΥΠΟΣ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ(mm)
CARBON 245 PLAIN	0.393
CARBON 420 TWILL	0.65
CARBON 283 4X4 TWILL	0.457
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6.2.Α	

Τα πάχη αυτά, χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.

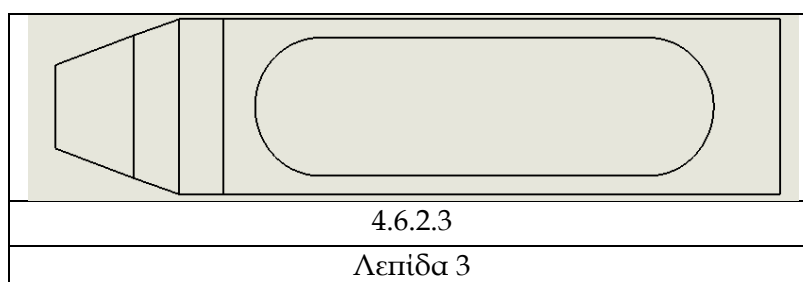
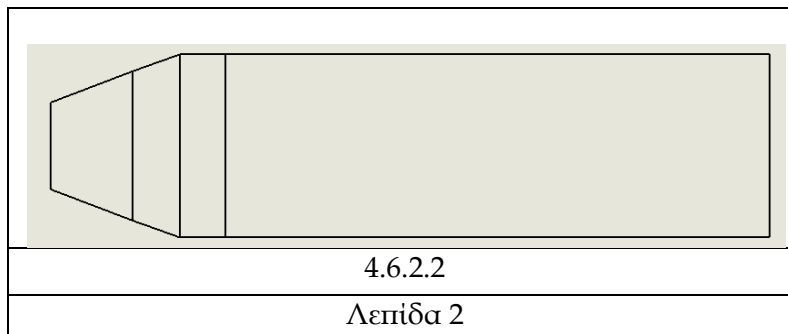
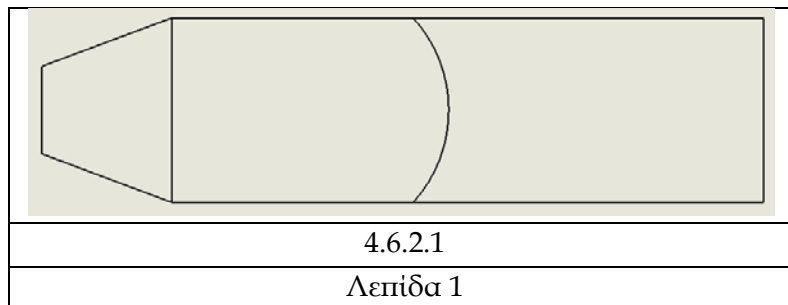
Στα διάφορα σενάρια προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά σχέδια λεπίδων.

Η *λεπίδα 1* (σχήμα 4.6.2.1) αποτελείται από ενίσχυση τύπου μισοφέγγαρου έξω (half lunate).

Η *λεπίδα 2* (σχήμα 4.6.2.2) αποτελείται από ενίσχυση κάθετη στον άξονα συμμετρίας της λεπίδας, η οποία εκτείνεται πριν και μετά από τη γωνία πέλματος-λεπίδας.

Η *λεπίδα 3* (σχήμα 4.6.2.3) αποτελείται από ενίσχυση ίδια με της λεπίδας 2 και επιπλέον περιοχή ελλειψοειδούς μορφής, εκτός της οποίας διαθέτει ενίσχυση.

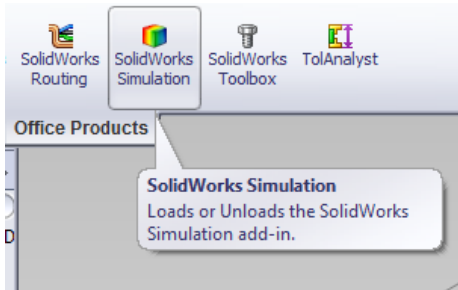
Οι απολήξεις(κάτω άκρο) και των τριών λεπίδων είναι κάθετες στον άξονα συμμετρίας τους.



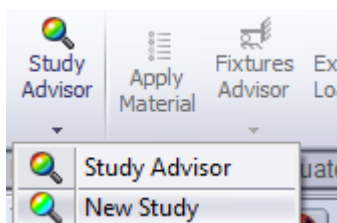
### 4.6.3 Εισαγωγή στο COSMOS

Ακολουθεί η παρουσίαση των ρυθμίσεων που γίνονται στο πρόγραμμα Cosmos, για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.

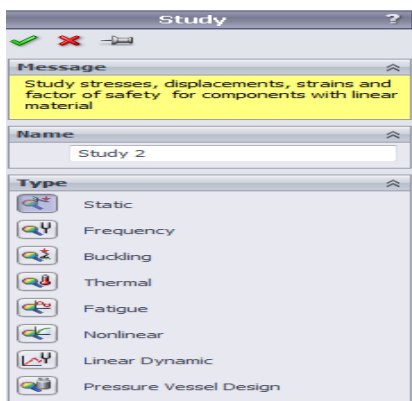
Ανοίγουμε το Cosmosworks (Solidworks Simulation).



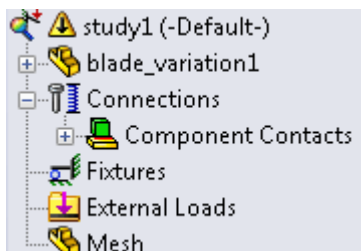
Επιλέγουμε New Study από το σχετικό drop down menu.



Επιλέγουμε Στατική(Static) Μελέτη από το σχετικό menu.

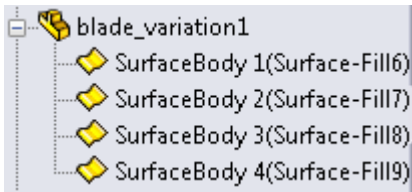


Στην Στατική φόρτιση που δημιουργήσαμε, εμφανίζεται η ακόλουθη καρτέλα στην οποία ορίζουμε μία προς μία τις παραμέτρους φόρτισης:

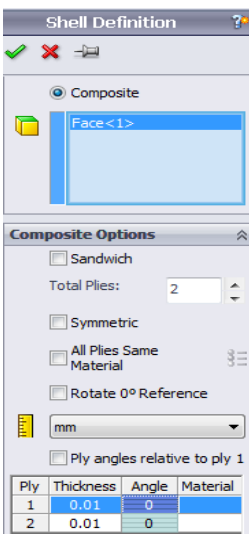
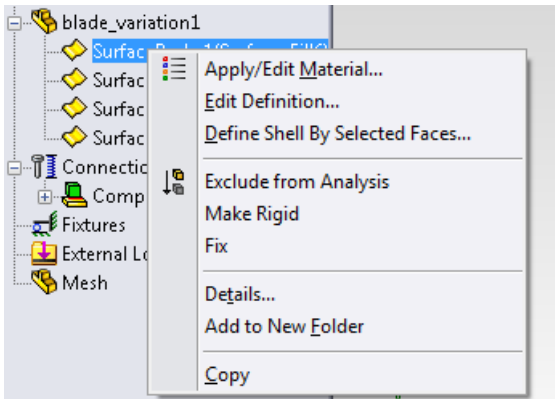


Εδώ θα ορίσουμε τα χαρακτηριστικά των επιφανειών μία προς μία. Θα αναθέσουμε αριθμό στρώσεων υφασμάτων, πάχος και προσανατολισμό στρώσης και τύπο ανθρακονήματος:



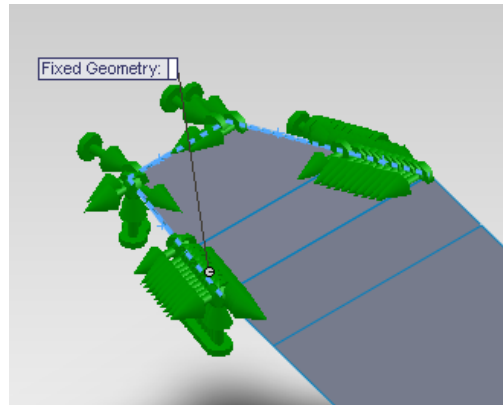
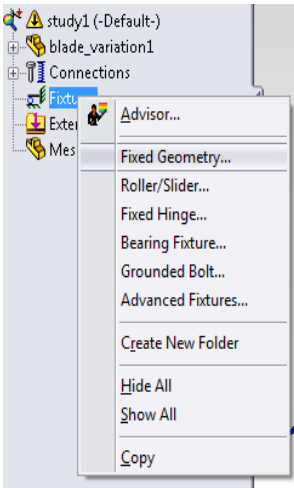


Με δεξί κλικ στην πρώτη επιφάνεια επιλέγουμε define shell by selected faces, επιλέγουμε στο σχέδιο την επιθυμητή επιφάνεια και επιλέγουμε composite. Στη συνέχεια εισάγουμε τα διάφορα χαρακτηριστικά των ανθρακούφασμάτων στη συγκεκριμένη επιφάνεια:

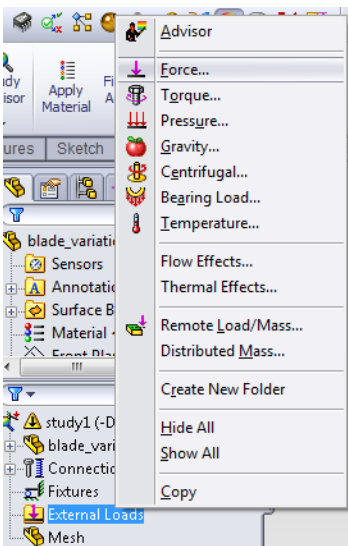


Εισάγουμε αριθμό και τύπους υφασμάτων, προσανατολισμό και πάχος που αυτά θα έχουν, ολοκληρώνοντας έτσι την συμπλήρωση των παραμέτρων του υλικού.

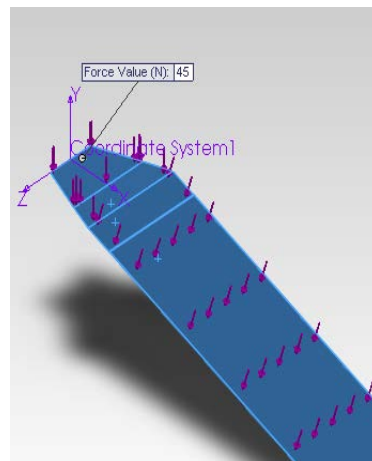
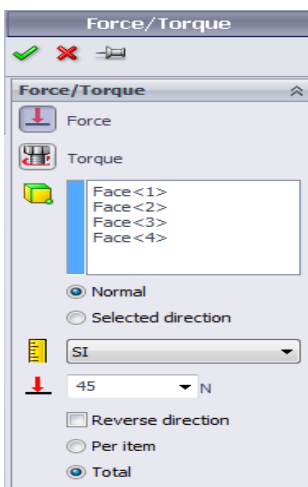
Στη συνέχεια επιλέγουμε με δεξί κλικ Fixtures → Fixed Geometry για πάκτωση στις τρεις ακμές του πέλματος:

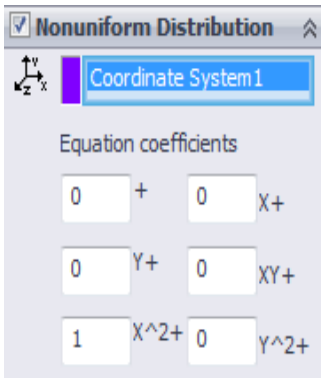


Στη συνέχεια ορίζουμε τον τύπο φόρτισης με δεξί κλικ στο External Loads→Force

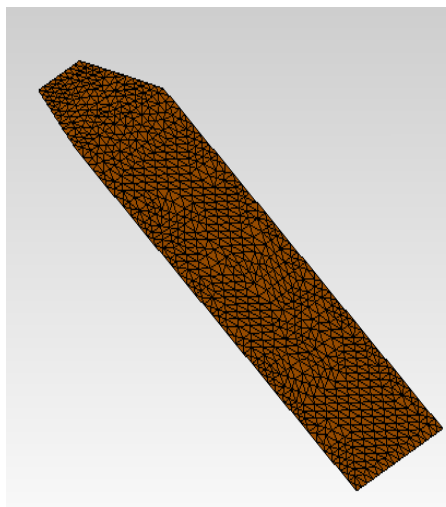
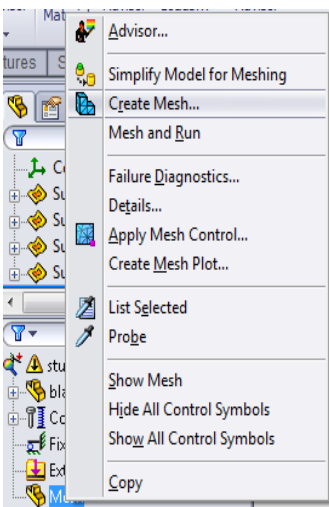


Στην καρτέλα της Δύναμης, επιλέγουμε τις πάνω επιφάνειες του πέλδου(Face 1-4), διεύθυνση κάθετη σε αυτές(Normal), 45 Newton Συνολική(Total) Δύναμη με μη ομοιόμορφη κατανομή τύπου  $y=1*x^2$  με αρχή το σύστημα συντεταγμένων που φαίνεται στο σχήμα:



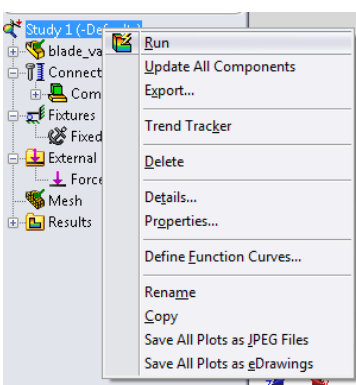


Στη συνέχεια επιλέγουμε με δεξί κλικ Mesh→Create Mesh, ρυθμίζουμε το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος και το δημιουργούμε:



Τέλος με όλες τις παραμέτρους καθορισμένες , εκτελούμε το σενάριο φόρτισης με δεξί κλικ

Study 1→Run:



Τα αποτελέσματα και τα γραφήματα που παίρνουμε , σχολιάζονται στο κεφάλαιο 5.

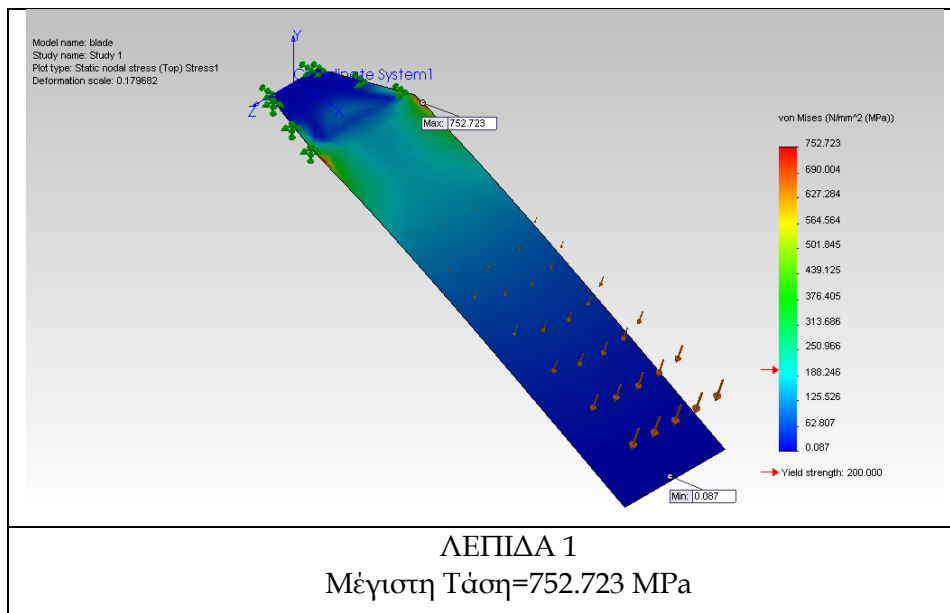
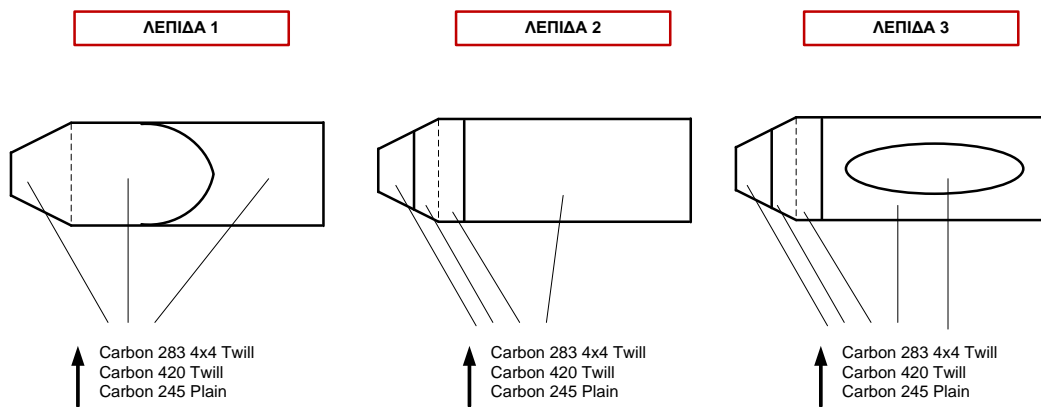
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

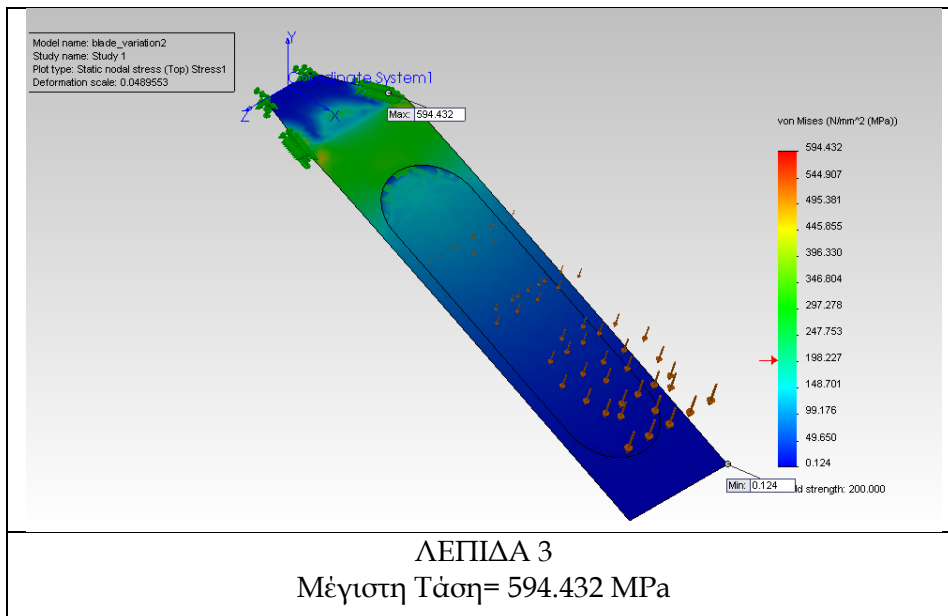
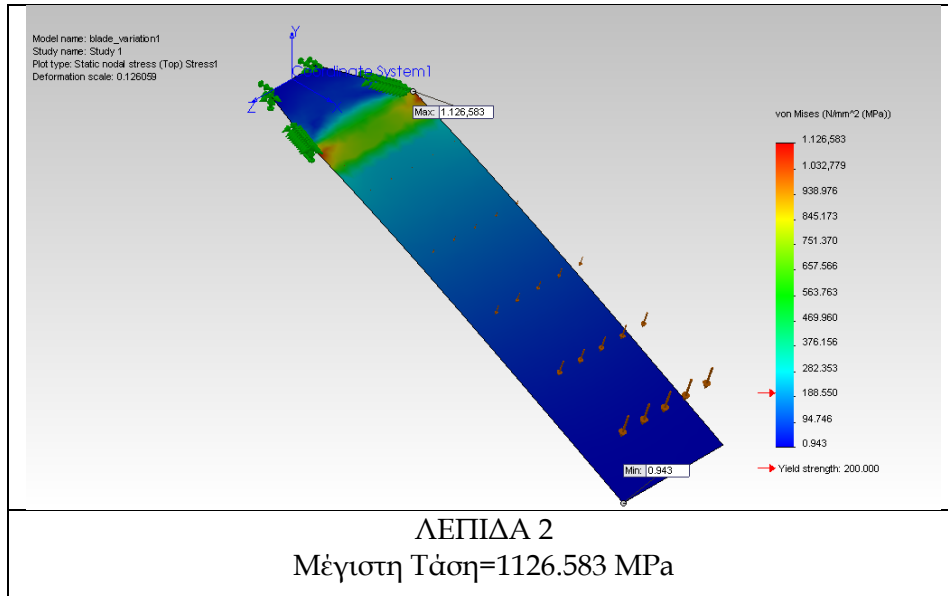
### Αρχική διερεύνηση σχεδιασμού καταδυτικών λεπίδων

#### 5.1 Σενάρια Προσομοίωσης

Ακολουθούν τα σενάρια φορτίσεως της λεπίδας και εν συνεχεία ενός ολοκληρωμένου καταδυτικού πέλδλου, με βάση τις παραμέτρους σχεδίασης.

##### 5.1.1 Εξάρτηση από τη διαφορετική γεωμετρία των υφασμάτων εσωτερικά





Παρατηρώντας τα διαγράμματα, εκ πρώτης όψεως εντοπίζουμε ως κοινό στοιχείο και των τριών λεπίδων, την περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τάσης, στη γωνία πέλματος- λεπίδας κάτι που είναι απολύτως λογικό λόγω της αλλαγής της κλίσης η οποία σαφώς επηρεάζει την ανάλυση των δυνάμεων.

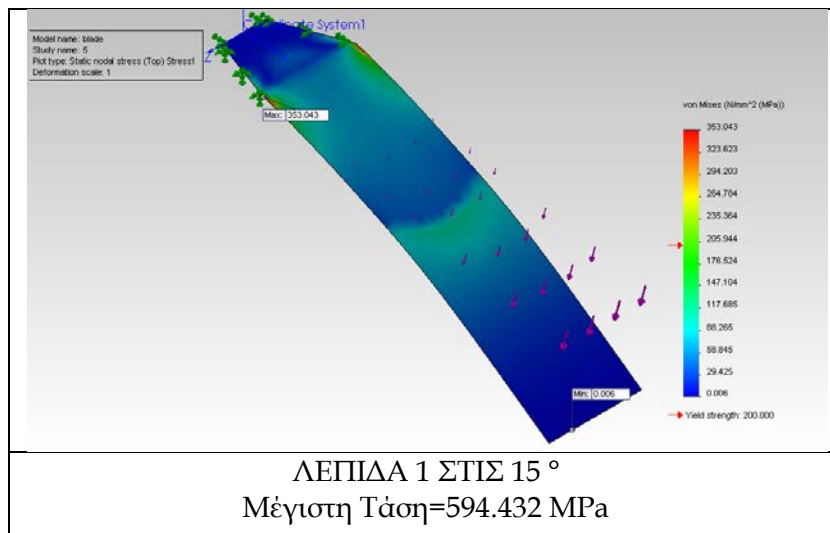
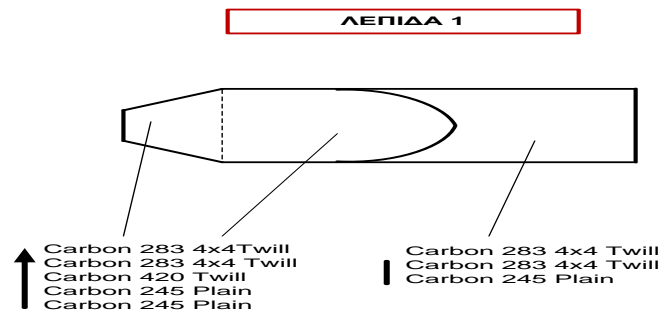
Συγκρίνοντας τις μέγιστες τιμές των διαγραμμάτων, αποδεικνύεται η υπεροχή της σχεδίασης της λεπίδας 3 έναντι των δύο άλλων. Συγκρίνοντας τη λεπίδα 1 με τη λεπίδα 2, διαπιστώνεται η υπεροχή της ενίσχυσης τύπου μισοφέγγαρου έξω, έναντι μιας ενίσχυσης αυστηρά κάθετης στον άξονα συμμετρίας της λεπίδας. Η μορφή της ενίσχυσης τύπου μισοφέγγαρο, βοηθάει στην εξομάλυνση της συγκέντρωσης των τάσεων καθώς και στη μείωση τους, κάτι που φαίνεται από τις μέγιστες τιμές τους. Άλλωστε στη λεπίδα 2 φαίνεται πως στην περιοχή της γωνίας του πέλματος, οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους, κάτι που κατασκευαστικά δεν είναι

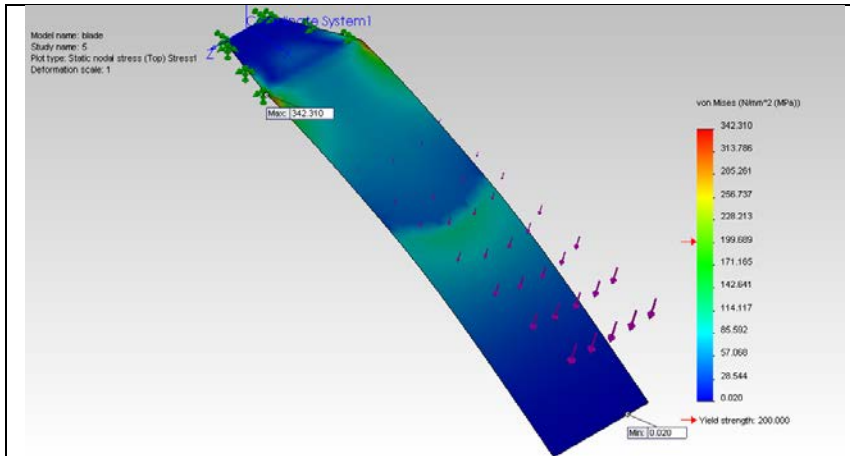
αποδεκτό, μιας και φορτίζεται έτσι πολύ έντονα η λεπίδα σε μία συγκεκριμένη περιοχή(αυξάνει η πιθανότητα αστοχίας υλικού).

Τέλος πρέπει να παρατηρήσουμε πως μολονότι τα υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ίδια σε όλο το μήκος των λεπίδων, η διαφορετική μορφή των ενισχύσεων σαφώς και επηρεάζει σημαντικά τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Άλλωστε δεν είναι τυχαίο πως δίνεται μεγάλη έμφαση στην μορφή που θα έχουν οι εσωτερικές υφάνσεις, από τους κατασκευαστές τέτοιων πέλδων.

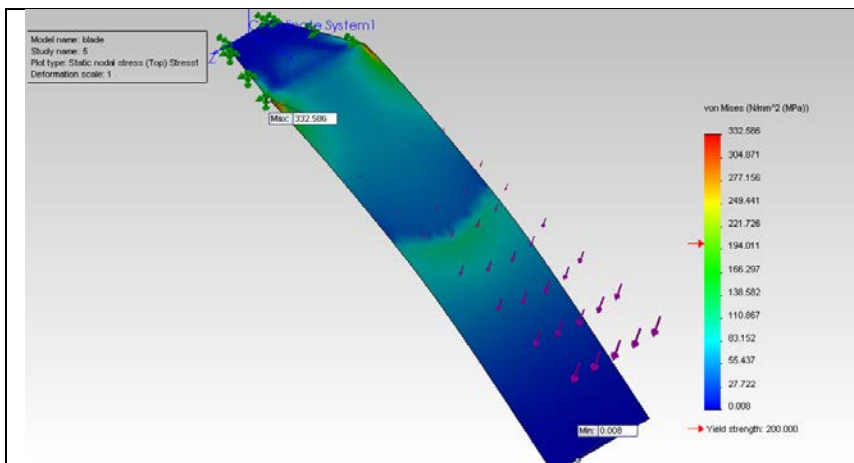
### 5.1.2 Εξάρτηση από τη γωνία πέλματος-λεπίδας

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης φορτίζεται η λεπίδα 1 για γωνίες πέλματος-λεπίδας 15-23°. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν, ισχύουν κατ'αντιστοιχία και για τις λεπίδες 2 και 3.

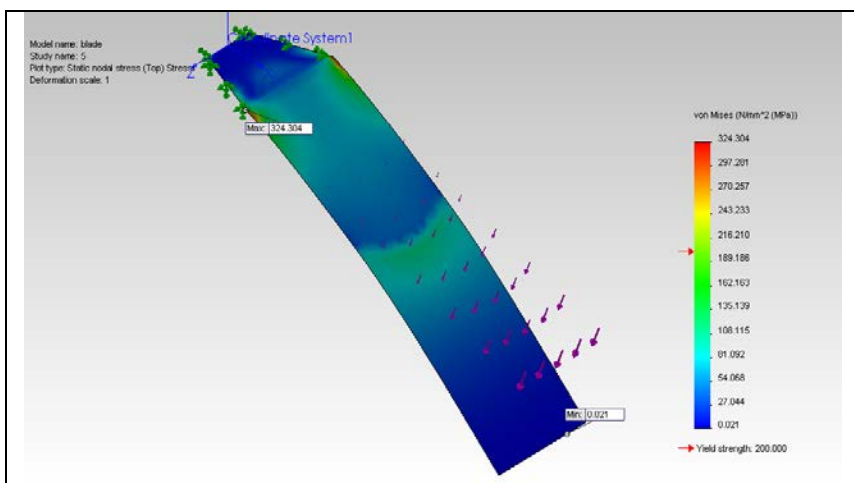




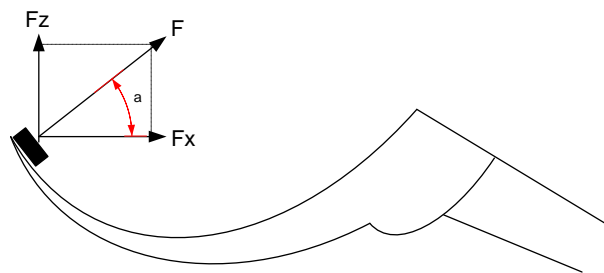
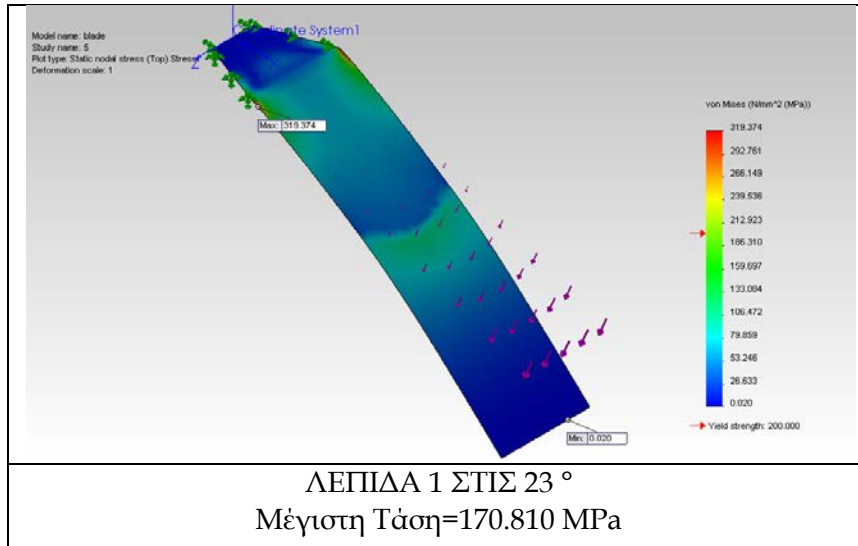
ΛΕΠΙΔΑ 1 ΣΤΙΣ 17 °  
Μέγιστη Τάση=342.310 MPa



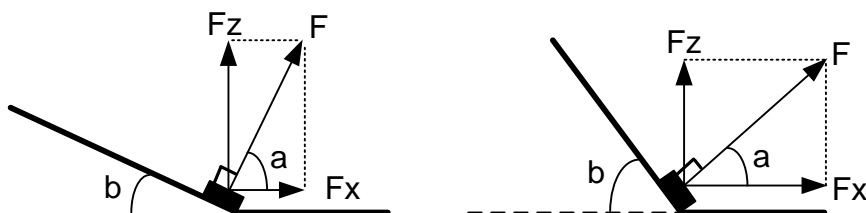
ΛΕΠΙΔΑ 1 ΣΤΙΣ 19 °  
Μέγιστη Τάση=332.586 MPa



ΛΕΠΙΔΑ 1 ΣΤΙΣ 21 °  
Μέγιστη Τάση=324.304 MPa



Η δύναμη που ασκείται ανά πάσα στιγμή στο πέδιλο(F) είναι κάθετη στην επιφάνεια του και λαμβάνει την μέγιστη τιμή της στο τελείωμα του πέδιλου. Η δύναμη αυτή αναλύεται στην δύναμη ώσης( $F_x$ ) που έχει την κατεύθυνση της κίνησης και σε μια δύναμη( $F_z$ ) που δρα ως οπισθέλκουσα και αποτελεί απώλειες-τριβές. Η γωνία  $\alpha$  μεταβάλλεται καθώς μετακινούνται τα προωστικά στοιχεία κατά μήκος της λεπίδας. Για το εν λόγω σενάριο προσομοίωσης παρατηρώντας τα διαγράμματα, βλέπουμε πως μεγαλώνοντας τη γωνία πέλματος-λεπίδας, μειώνεται η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στη λεπίδα. Αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό και μπορεί να κατανοηθεί ευκολότερα με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος:





Η γωνία  $\beta$  είναι η γωνία πέλματος-λεπίδας. Η δύναμη  $F$  πρέπει να είναι κάθε στιγμή κάθετη στην επιφάνεια του πέδλου. Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τη γωνία πέλματος-λεπίδας( $\beta$ ), μειώνεται η γωνία  $\alpha$ . Η μείωση της γωνίας αυτής οδηγεί με τη σειρά της σε μείωση των απωλειών( $Fz$ ) και ταυτόχρονη αύξηση της ώσης( $Fx$ ) για σταθερή πάντα  $F$ , αφού αναλύουμε το ίδιο προωστικό στοιχείο.

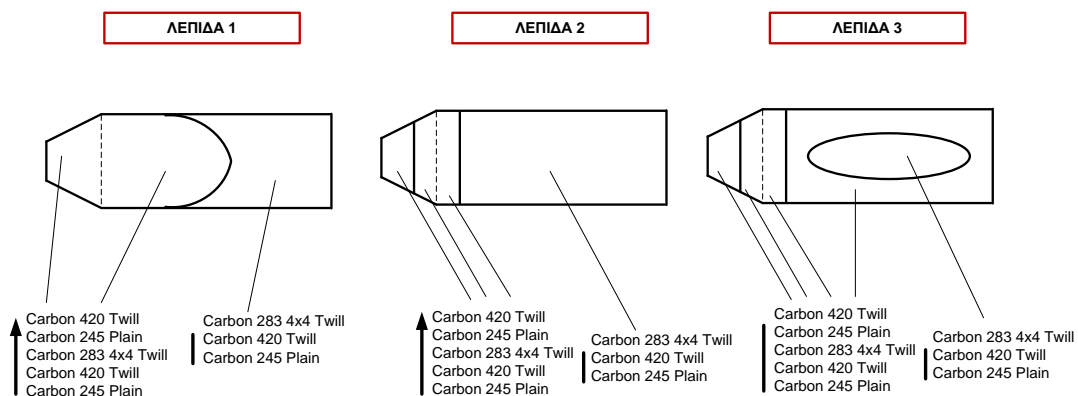
Για αυτόν το λόγο, μειώνεται η μέγιστη ασκούμενη τάση στην λεπίδα, ενώ από την άλλη οι κατανομή των διαφόρων περιοχών τάσεως(κόκκινη-πράσινη-γαλάζια-μπλε) παραμένουν αναλλοίωτες για τις διαφορετικές γωνίες πέλματος-λεπίδας.

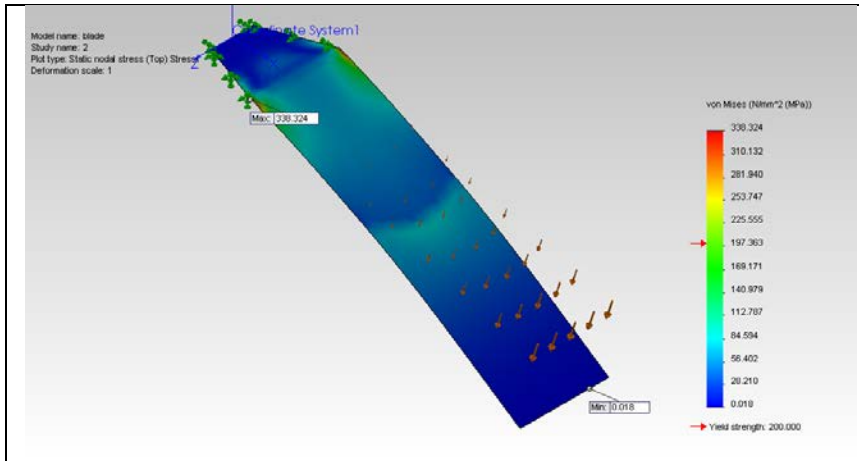
Επομένως ένα βιαστικό συμπέρασμα θα ήταν πως κατά την κατασκευή του πέδλου θα έπρεπε να είναι η συγκεκριμένη γωνία όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.

Μια τέτοια θεώρηση μπορεί εν μέρει να είναι σωστή. Δεν πρέπει όμως να παραβλέπεται το γεγονός πως η χρησιμοποίηση του πέδλου μέσα στο νερό είναι μία δυναμική φόρτιση που εμπεριέχει και στοιχεία της υδροδυναμικής οπότε πρέπει να εξεταστούν και άλλοι παράγοντες.

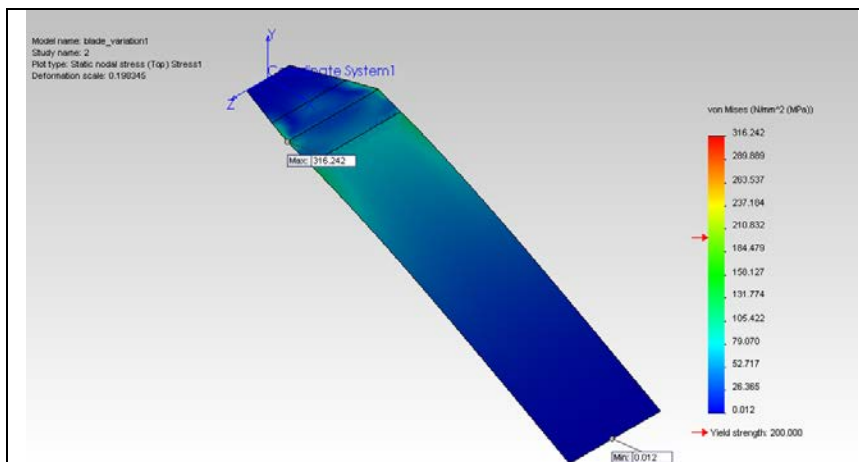
Άλλωστε αρχικά η κλίση δόθηκε στα πέδλα, έγινε προκειμένου να σχηματίζεται γωνία πέλματος πέδλου-οριζοντίου γραμμής νερού,  $180^\circ$ (ή  $0^\circ$  για καλύτερη κατανόηση) και να ελαχιστοποιούνται οι τριβές κατά την κολύμβηση. Αυξάνοντας εκ νέου τη συγκεκριμένη γωνία(με την αύξηση της γωνίας πέλματος-λεπίδας) πέρα από κάποια όρια, θα σήμαινε πιθανότατα την εκ νέου αύξηση των τριβών.

### 5.1.3 Εξάρτηση από την διαφορετική ύφανση στην ενίσχυση

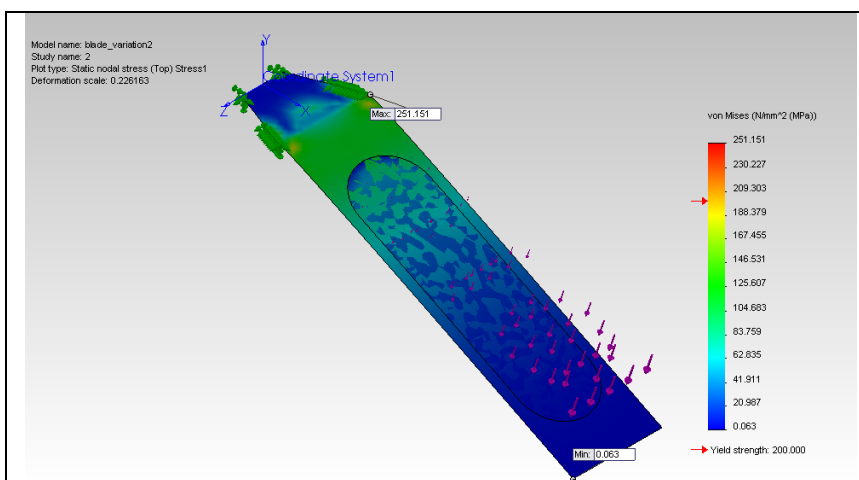




ΛΕΠΙΔΑ 1  
Μέγιστη Τάση=338.324 MPa



ΛΕΠΙΔΑ 2  
Μέγιστη Τάση=316.242 MPa



ΛΕΠΙΔΑ 3  
Μέγιστη Τάση=251.151 MPa

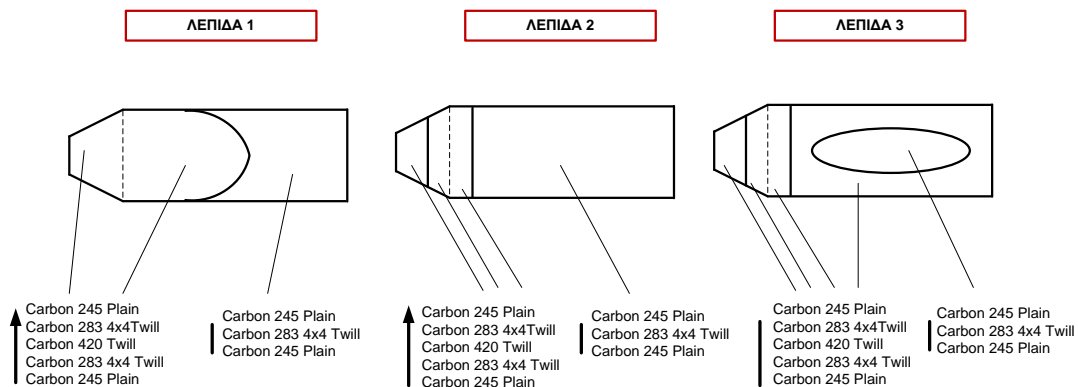
Το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, είναι το πρώτο σε αυτή τη μελέτη που υλοποιεί την χρησιμοποίηση διαφορετικών υφασμάτων ανά περιοχή. Είναι ξεκάθαρο πως η λεπίδα 3 με τη συγκεκριμένη μορφή ενίσχυσης, δημιουργεί μικρότερη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στη λεπίδα, σε σχέση με τις άλλες δύο λεπίδες.

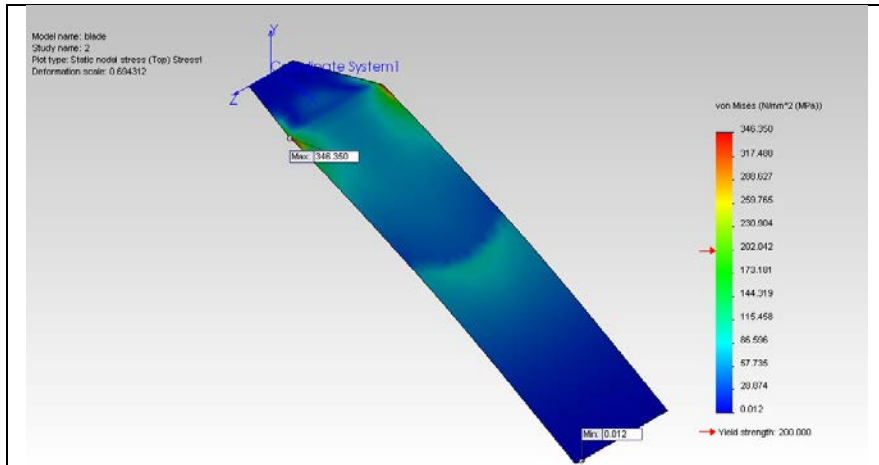
Βέβαια αυτό που παρατηρείται, είναι πως στη λεπίδα 3, οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι κυρίως μεσαίου μεγέθους ως προς την μέγιστη. Αυτό είναι καλό να αποφεύγεται όποτε είναι δυνατόν. Σε αντιπαράβολή, η λεπίδα 2 αν και δεν διαθέτει την αποτελεσματικότερη σχεδίαση από άποψη αντοχής, διαθέτει μία σχεδίαση τέτοια, που της επιτρέπει να εμφανίζει μεγάλες περιοχές τάσεων μικρού μεγέθους σχετικά, εμφανίζοντας τις μεγαλύτερες τάσεις σε μικρότερες περιοχές επιφάνειας. Πιθανόν μια σχεδίαση της μορφής της λεπίδας 2 με επιπλέον ενίσχυση μορφής διαφορετικής από τη λεπίδα 3, να οδηγούσε στη βελτιστοποίηση της σχεδίασης, τουλάχιστον για την κατασκευή της λεπίδας με τα συγκεκριμένα υφάσματα.

Άλλωστε από πρακτική και μόνο πλευρά, εφόσον ένα πέδιλο σπάσει κατά τη χρήση του και όντας σε μεγάλα βάθη, είναι σίγουρα προτιμότερο αυτό να συμβεί σε σημείο πλησιέστερα στην απόληξη του και όχι στη γωνία πέλματος, αφού στην πρώτη περίπτωση δίνεται το περιθώριο στο δύτη να ανέβει προς την επιφάνεια, ενώ στη δεύτερη τα πράγματα είναι πολύ δύσκολα.

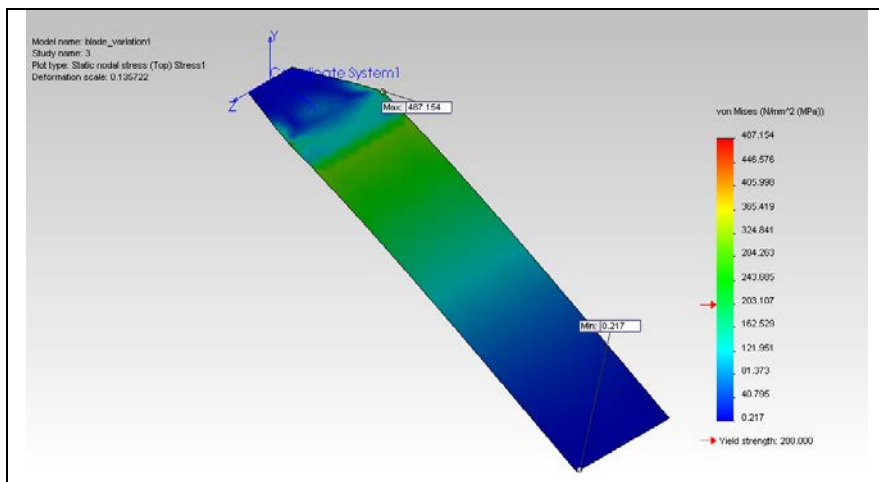
Ακολουθούν δύο εναλλακτικά σενάρια προσομοίωσης, στα οποία χρησιμοποιούνται οι ίδιοι τρεις τύποι υφασμάτων με διαφορετική διάταξη σε σχέση με αυτό το σενάριο.

## ΣΕΝΑΡΙΟ 2

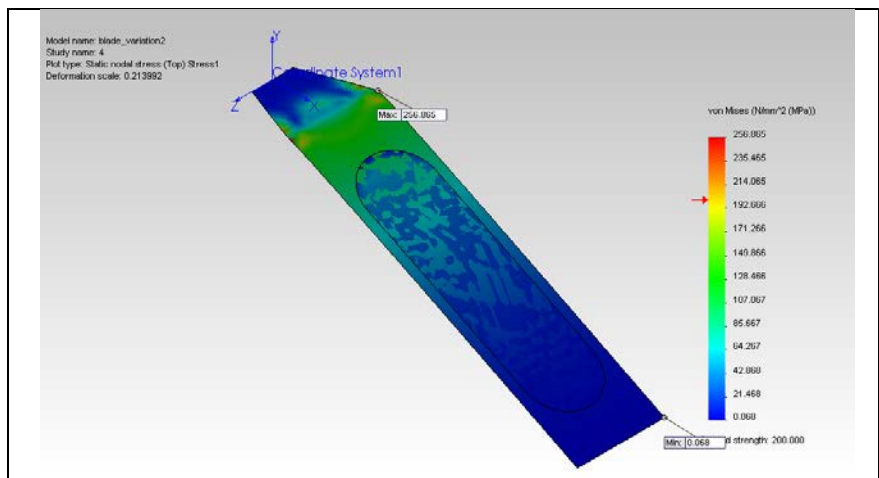




ΛΕΠΙΔΑ 1  
Μέγιστη Τάση= 346.350 MPa

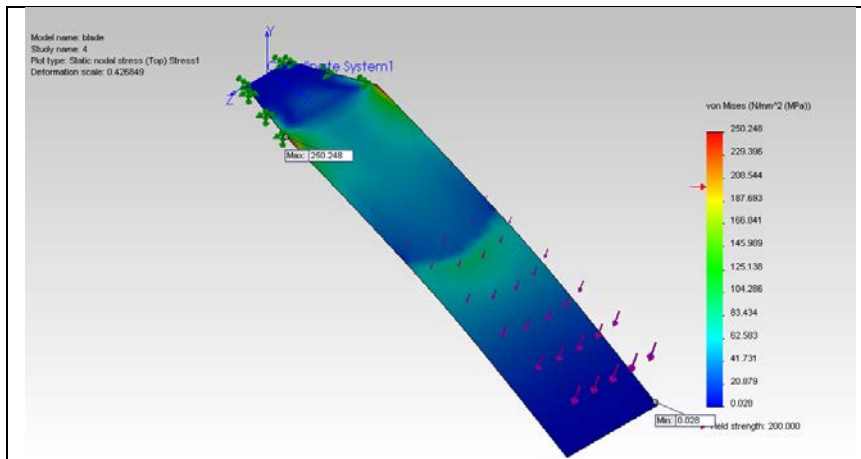
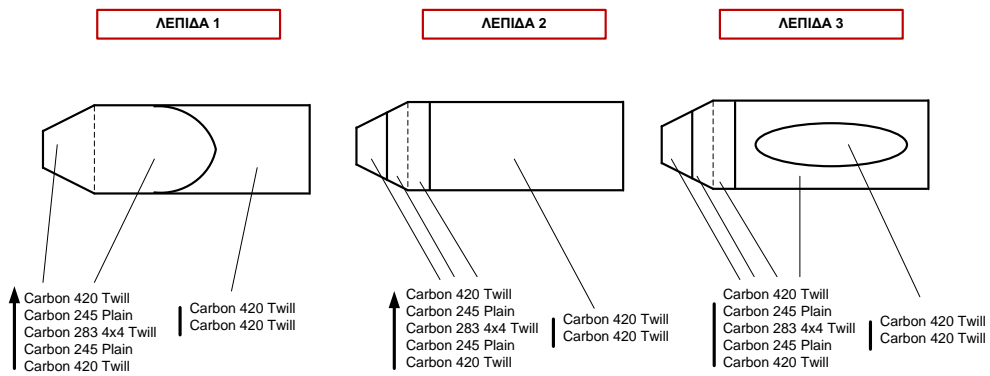


ΛΕΠΙΔΑ 2  
Μέγιστη Τάση=487.154 MPa

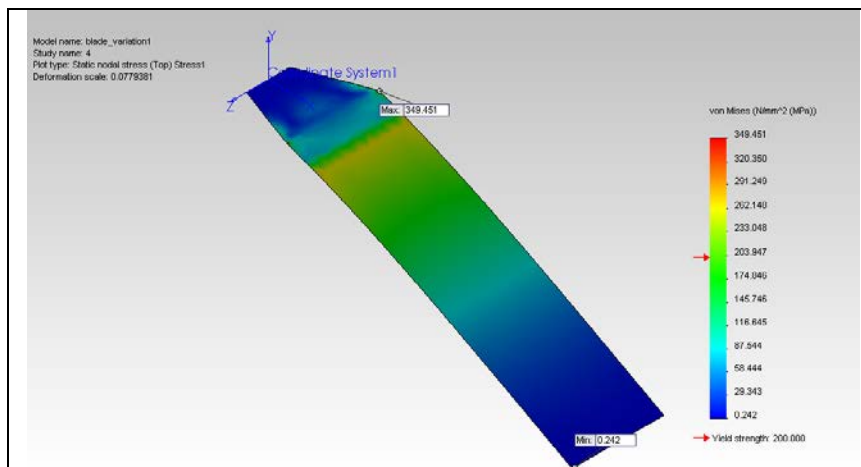


ΛΕΠΙΔΑ 3  
Μέγιστη Τάση= 256.865 MPa

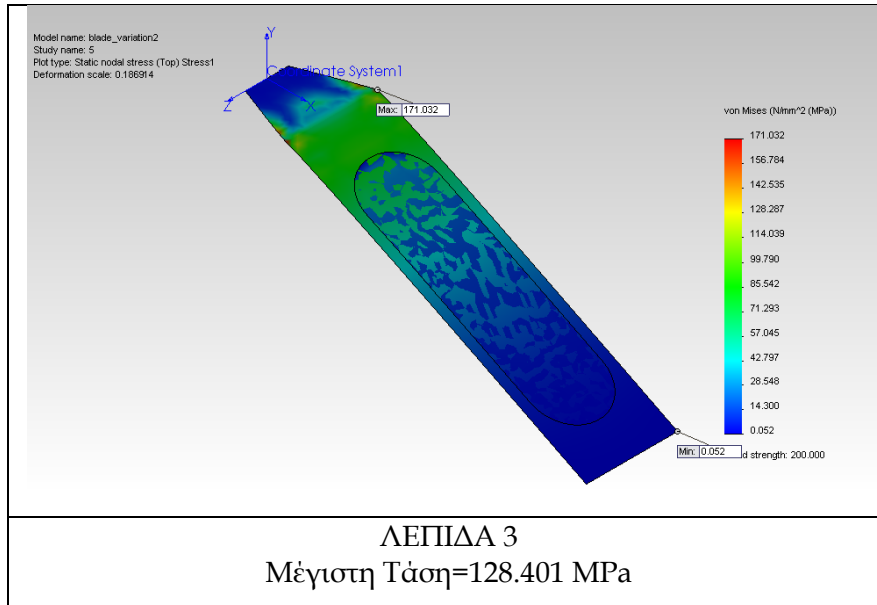
## ΣΕΝΑΡΙΟ 3



**ΛΕΠΙΔΑ 1**  
Μέγιστη Τάση=250.248 MPa



**ΛΕΠΙΔΑ 2**  
Μέγιστη Τάση=349.451 MPa



ΛΕΠΙΔΕΣ	ΣΕΝΑΡΙΑ	1 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MAX ΤΑΣΗ(MPa)	2 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MAX ΤΑΣΗ(MPa)	3 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MAX ΤΑΣΗ(MPa)
1		338.324	346.350	250.248
2		316.242	487.154	349.451
3		251.151	256.865	171.032
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ (mm)		2.543	2.543	2.543
ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ (mm)		1.5	1.243	1.3

Πίνακας 5.1.3.A

Παρατηρώντας την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ανά λεπίδα και σενάριο προσομοίωσης, εξάγουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

Καταρχάς η σχεδίαση της λεπίδας 3 υπερτερεί έναντι των άλλων δύο, γεγονός που έχει τονιστεί και ωρίτερα.

Από την άλλη η λεπίδα 2, κρίνεται ανεπαρκής ως προς τη σχεδίαση της, σε σχέση με τις υπόλοιπες. Σε όλες τις λεπίδες, μόλις μειώνεται το ελάχιστο πάχος τους(η επιφάνεια μετά από αυτή της ενίσχυσης), αυξάνεται και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση, πράγμα απολύτως λογικό.

Από άποψη επιλογής υφασμάτων τώρα, στο 1<sup>ο</sup> σενάριο τα υφάσματα τοποθετούνται εναλλάξ(δείτε αντίστοιχο σχήμα), στο 2<sup>ο</sup> τα πιο ισχυρά υφάσματα στο εσωτερικό και τα λιγότερο ισχυρά προς το εξωτερικό του πολυστρωματικού ενώ στο 3<sup>ο</sup> σενάριο τα λιγότερο ισχυρά υφάσματα στο εσωτερικό και τα πιο ισχυρά προς το εξωτερικό του πολυστρωματικού.

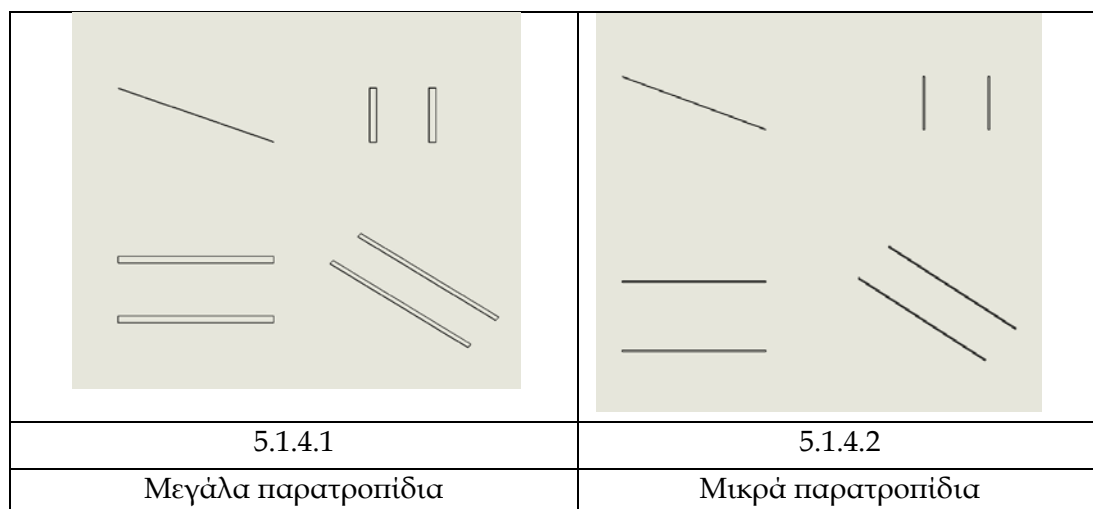
Με τον όρο «ισχυρά υφάσματα», εννοούμε τα υφάσματα που υπερτερούν των άλλων λόγω μεγαλύτερου πάχους και καλύτερου τύπου ύφανσης (twill έναντι plain).

Τέλος τονίζεται πως στο 3<sup>ο</sup> σενάριο, τα υφάσματα που χρησιμοποιούνται εκτός της περιοχής ενίσχυσης είναι δύο, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια είναι τρία, συνεπώς υπάρχει εξοικονόμηση υλικού.

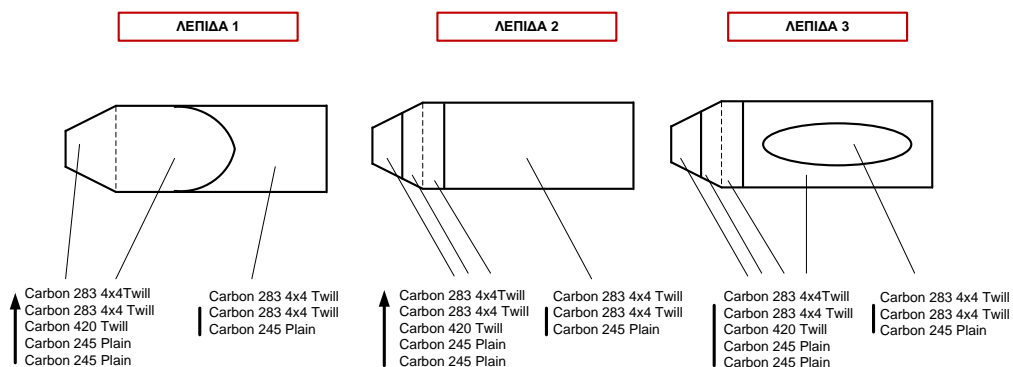
Σαφές είναι επίσης το γεγονός πως πιο δόκιμη είναι η τοποθέτηση των ισχυρών υφασμάτων εξωτερικά από ότι εσωτερικά κατά την κατασκευή ενός πέδιλου.

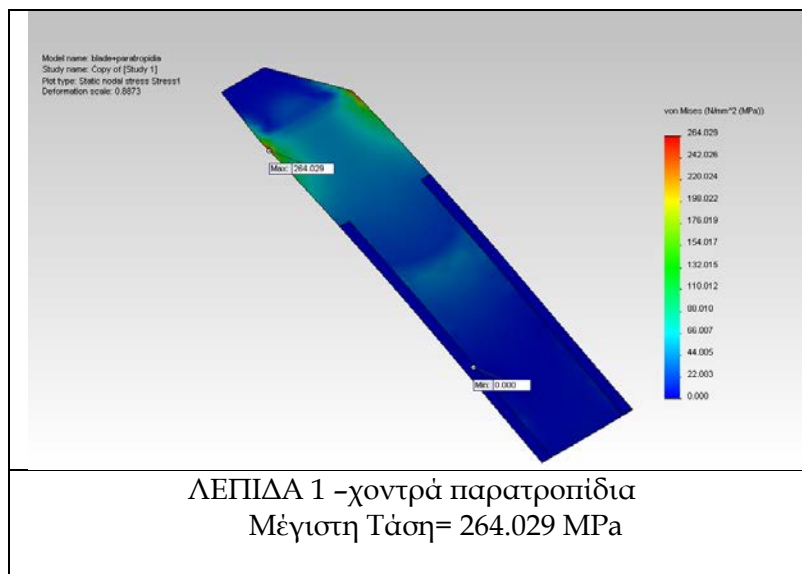
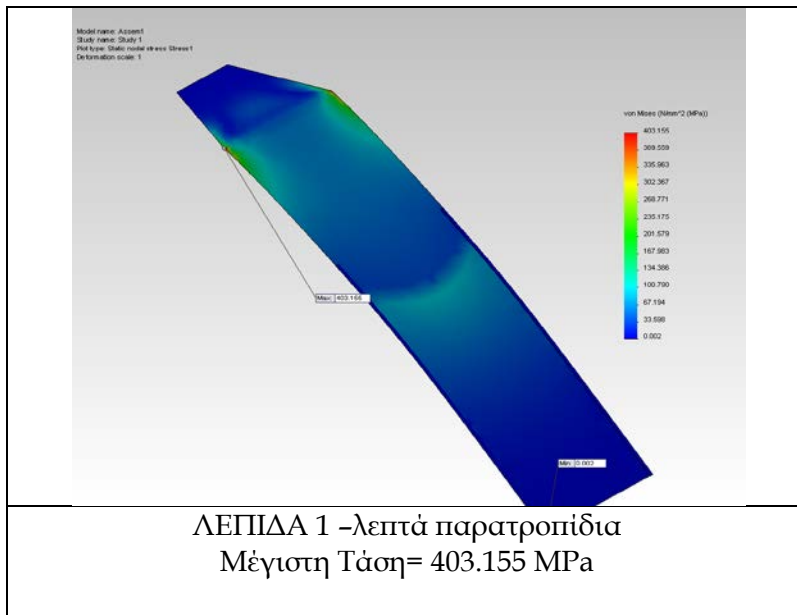
Αυτή αποδεικνύεται στο 3<sup>ο</sup> σενάριο φόρτισης μιας και οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις στις λεπίδες, είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές των άλλων σεναρίων.

#### 5.1.4 Εξάρτηση από τα παρατροπίδια

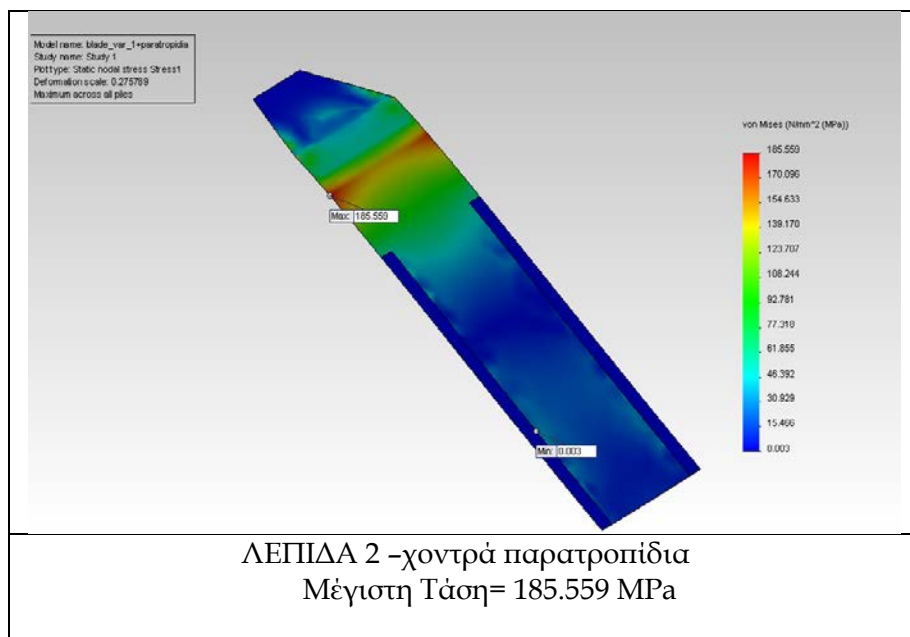
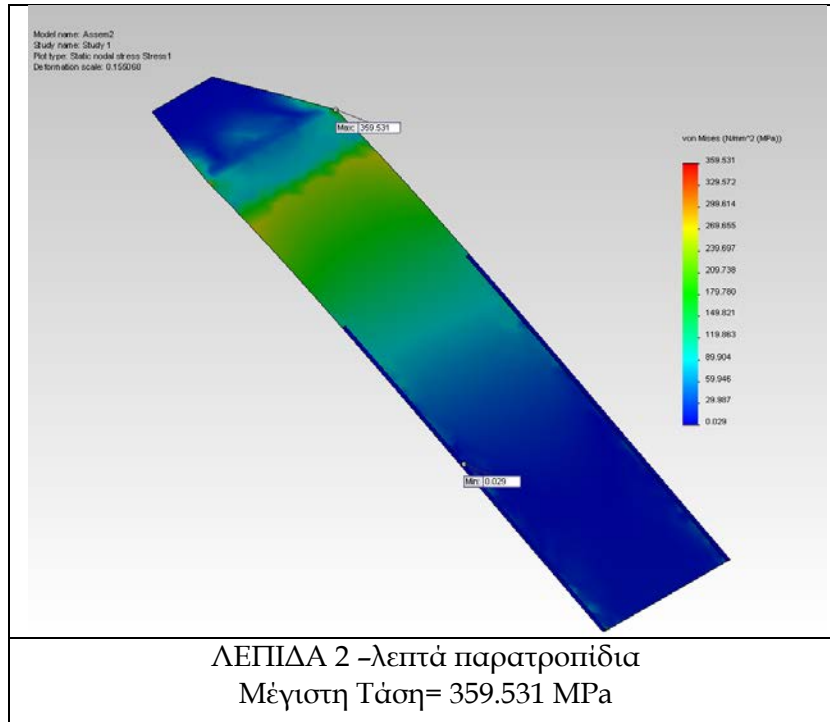


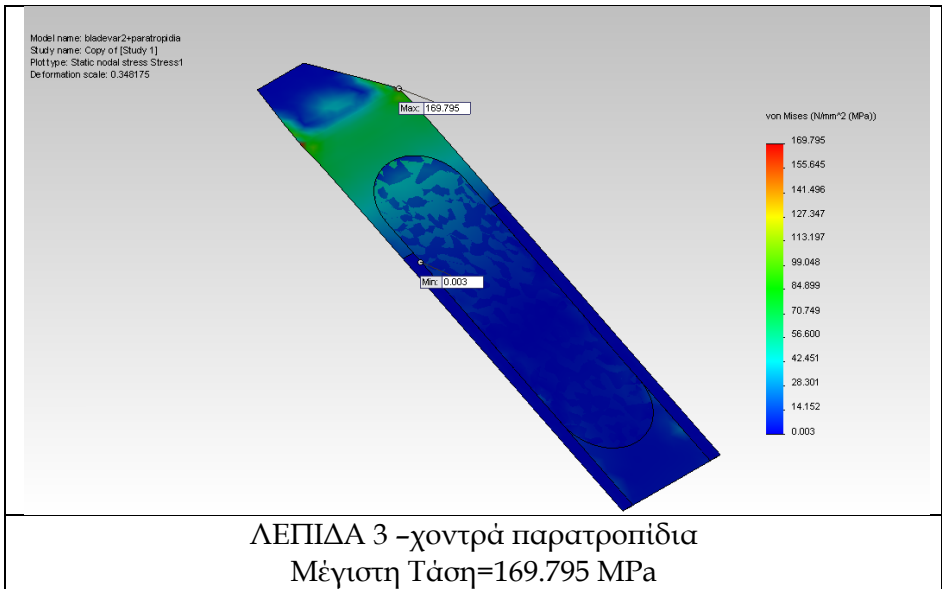
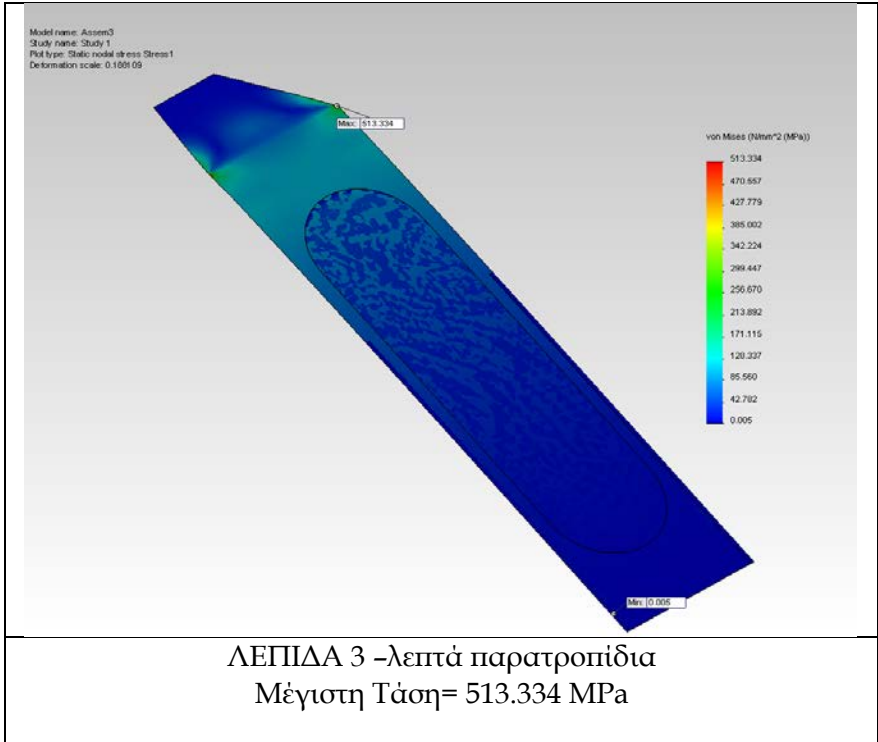
Στα σχήματα 5.1.4.1, 5.1.4.2, φαίνονται τα σχέδια των παρατροπίδιων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο σχήμα 5.1.4.1 παρουσιάζονται τα μεγάλα παρατροπίδια, βάρους 19 γραμμαρίων, ενώ στο σχήμα 5.1.4.2 παρουσιάζονται τα μικρά παρατροπίδια βάρους 10 γραμμαρίων.









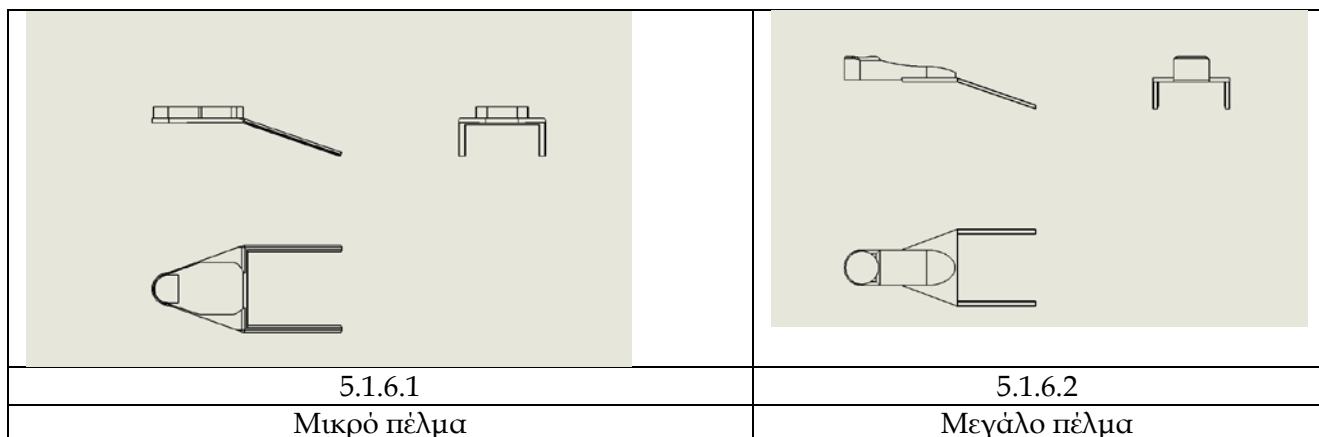


Λεπίδες/πατροπιδία	Λεπτά πατροπιδία	Χοντρά πατροπιδία
ΛΕΠΙΔΑ 1	403.155 MPa	264.029 MPa
ΛΕΠΙΔΑ 2	359.531 MPa	185.559 MPa
ΛΕΠΙΔΑ 3	513.334 MPa	169.795 MPa
Πίνακας 5.1.4.Α		

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων για τις διάφορες λεπίδες(Πίνακας 5.1.4.Α), γίνεται ξεκάθαρο πως το μέγεθος( άρα και το βάρος εφόσον πρόκειται για το ίδιο υλικό PTFE) των πατροπιδίων σαφώς και επηρεάζει την αντοχή της λεπίδας, η οποία αυξάνεται και για τα χοντρά πατροπιδία σε σχέση με τα άλλα. Αυτό που φαίνεται επίσης είναι η μεγαλύτερη εξάρτηση της λεπίδας 3 από τον τύπο των πατροπιδίων, πιθανότατα λόγω γεωμετρίας της ενίσχυσης της, αφού η μέγιστη αναπτυσσόμενη σε αυτήν τάση για την περίπτωση των χοντρών πατροπιδίων, είναι το 1/3 της περίπτωσης των λεπτών.

Επιπλέον παρατηρείται για την λεπίδα 2, πως η χρήση των συγκεκριμένων χοντρών πατροπιδίων μετατοπίζει την περιοχή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης(που είναι και για τις τρεις λεπίδες η περιοχή της γωνίας πέλματος), πιο χαμηλά, προς την απόληξη της λεπίδας. Αυτό πιθανώς οφείλεται και εδώ, στη μορφή και το βάρος των πατροπιδίων και αξίζει περαιτέρω μελέτης, προκειμένου να διασπιστωθεί αν όντως μπορεί να μετατοπισθεί η συγκεκριμένη περιοχή «έντονης» φόρτισης και άρα να προκύψει πιο αποτελεσματική σχεδιαστικά λεπίδα.

#### 5.1.5 Εξάρτηση από το πέλμα-παπούτσι

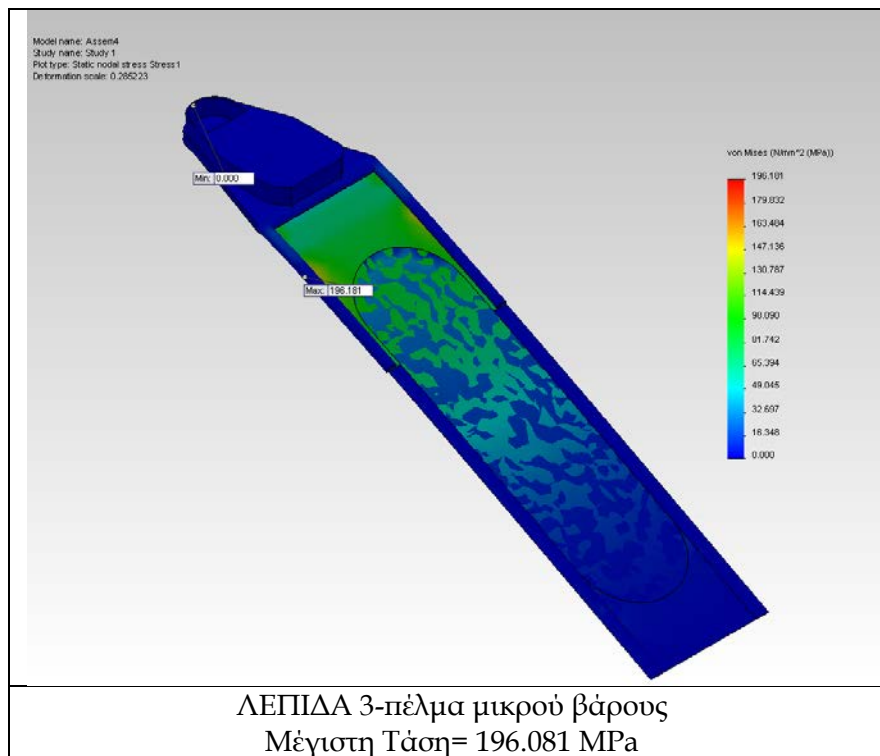
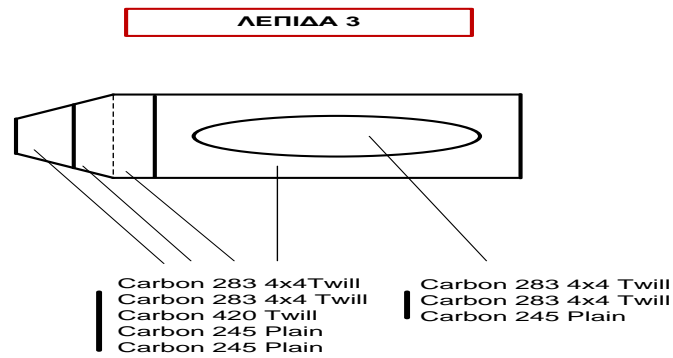


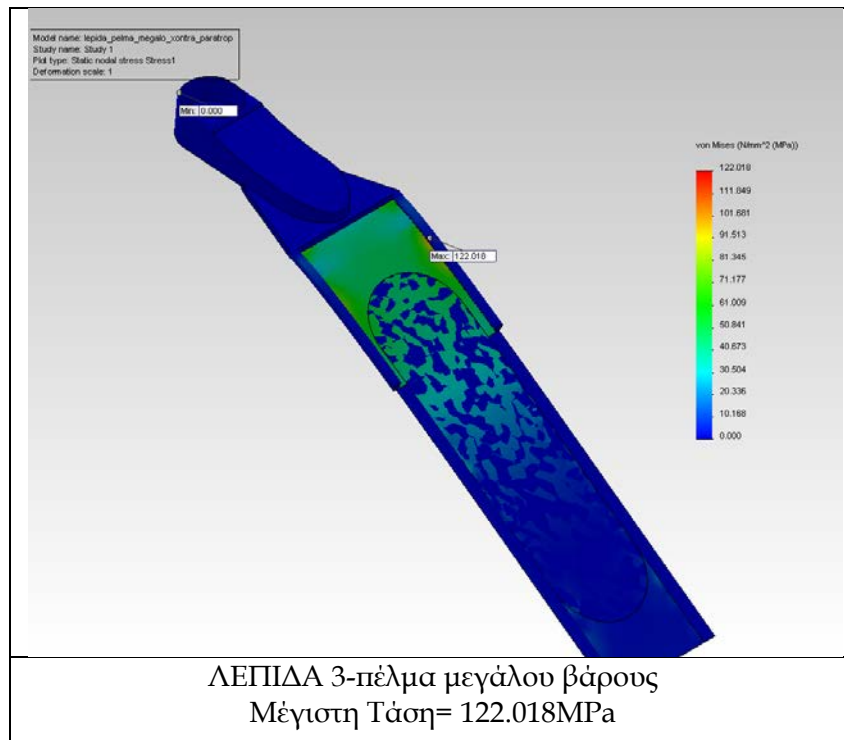
Στα σχήματα 5.1.6.1,5.1.6.2, φαίνονται τα σκαριφήματα δύο διαφορετικών πελμάτων-παπουτσιών που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή την προσομοίωση.

Στο σχήμα 5.1.6.1, το παπουτσαάκι -πέλμα έχει βάρος 512.79 γραμμάρια.

Στο σχήμα 5.1.6.2, το παπουτσαάκι -πέλμα έχει βάρος 1044.78 γραμμάρια.

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση μελετάται μόνο η λεπίδα 3-αυτή διαθέτει τη βέλτιστη σχεδίαση σε σχέση με τις άλλες- με τα χοντρά παρατροπίδια-δίνουν καλύτερα νούμερα σε σχέση με τα λεπτά-.





Μελετώντας τα αποτελέσματα σε αυτό το σενάριο φόρτισης, διαπιστώνει κανείς εύκολα, πως το πέλμα μεγαλύτερου βάρους, αυξάνει την αντοχή της λεπίδας, το οποίο ερμηνεύεται σε ανάπτυξη μικρότερων τάσεων.

Αυτό που παρατηρείται επίσης, είναι η μετατόπιση του σημείου εμφάνισης της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης, μακριά από τη γωνία πέλματος. Πιθανόν η ενσωμάτωση νεύρων στο πέλμα, τα οποία θα περιβάλλουν την λεπίδα, να οδηγήσει στην περαιτέρω μετατόπιση αυτού του κρίσιμου σημείου προς την απόληξη, κάτι αρκετά επιθυμητό κατά τη λειτουργία της λεπίδας, εφόσον βέβαια δεν υπάρξουν επιπτώσεις στην υδροδυναμική της λεπίδας.

## 5.2 Παραδοχές

**A)** Η φόρτιση είναι στατική και σε καμία περίπτωση δεν προσομοιώνει τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης του βατραχοπέδιλου. Έχουν γίνει υπεραπλουστεύσεις λόγω του ότι το εργαλείο προσομοίωσης σύνθετων υλικών του προγράμματος, δεν επιτρέπει τη δυναμική φόρτιση της προς μελέτη διάταξης. Άλλωστε σκοπός της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι η καταγραφή δεδομένων και η εξαγωγή πιθανώς, κάποιων ποιοτικών και μόνο συμπερασμάτων αναφορικά με τις παραμέτρους σχεδίασης αλλά και την δομή των καταδυτικών λεπίδων. Σε καμία περίπτωση τα συμπεράσματα που εξάγονται, δεν πρέπει να εκληφθούν δογματικά, αναφορικά με την καλύτερη κατασκευή και απόδοση μιας λεπίδας.

**B)** Οι ίνες άνθρακα και τα υφάσματα τους κατ' επέκταση, είναι ανισότροπα υλικά, Συνεπώς για μία ρεαλιστική προσομοίωση, θα πρέπει να προσομοιωθούν ως τέτοια(ανισότροπα). Συγκεκριμένα τα ανθρακοϋφάσματα θεωρούνται ορθοτροπικά υλικά, δηλαδή υλικά με ίδιες μηχανικές ιδιότητες στον άξονα συμμετρίας των ινών, κατά μήκος της λεπίδας δηλαδή. Οι μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζονται παρακάτω, προέκυψαν από υπολογισμούς βασισμένους στον κανόνα των μιγμάτων που διέπει τα σύνθετα υλικά. Τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών(ρητίνη,

ανθρακοϋφάσματα, υλικό πέλματος-παρατροπιδίων PTFE) προέκυψαν από πίνακες κατασκευαστών. Τονίζεται πως το υλικό PTFE μοντελοποιήθηκε ως ισότροπο υλικό, που είναι. Γ) Σε ορισμένα σενάρια προσομοίωσης, παρατηρείται υπέρβαση της αντοχής του υλικού (Yield strength), η οποία βέβαι μεταφράζεται ως αστοχία του υλικού. Τονίζεται πως ενώ οι μηχανικές ιδιότητες και ως εκ τούτου η αντοχή του υλικού είναι πραγματικές ως νούμερα, η στατική φόρτιση της λεπίδας δεν προσεγγίζει μία ρεαλιστική φόρτιση της λεπίδας κατά τη λειτουργία της (κολύμβηση). Επομένως, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλώς συμπέρασμα περί αστοχίας ή όχι του υλικού.

### 5.3 Μηχανικές Ιδιότητες

Στον Πίνακα 5.3.A, παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών της μοντελοποίησης, όπως αυτές εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

Ο υπολογισμός τους, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού του παπουτσιού-πέλματος και των παρατροπιδίων, PTFE, περιέχονται στο παράρτημα Α.

Υλικό	Tensile Strength(Pa)	Modulus $E_x$ (Pa)	Modulus $E_z$ (Pa)	Modulus $E_y$ (Pa)	Poisson	$G_{xz}$ (Pa)
Carbon 245	3.786E+09	1.66e+011	1.165e+010	1.165e+010	0.25	1.763E+10
Carbon 283 Twill	3.808E+09	5.935E+010	5.935E+010	7.13E+09	0.25	8.22E+09
Carbon 420 Twill	5.160E+09	5.935E+010	5.935E+010	7.13E+09	0.25	8.22E+09
Ρητινή LF	80	3.62	3.62	3.62	0.34	-
	$G_{xy}$ (Pa)	$G_{yz}$ (Pa)	Yield Strength(Pa)	Density(kg/m <sup>3</sup> )	$V_f$	
Carbon 245	4.66E+09	4.66E+09	3.786E+09	1770	0.7	
Carbon 283 Twill	2.85E+09	2.85E+09	3.808E+09	1750	0.5	
Carbon 420 Twill	2.85E+09	2.85E+09	5.160E+09	1800	0.5	
Ρητινή LF	-	-	-	-	0.3-0.5	

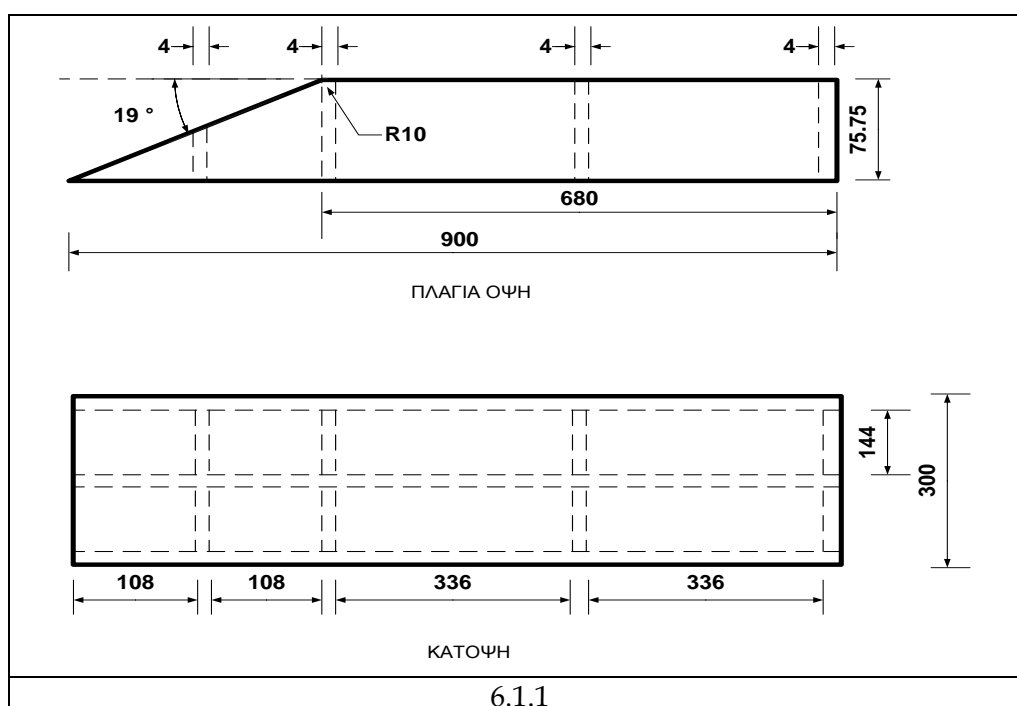
Πίνακας 5.3.A

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### Διερεύνηση κατασκευής λεπίδων με vacuum infusion

#### 6.1 Καλούπι

Το καλούπι κατασκευάζεται από απλή λαμαρίνα πάχους 4 mm. Το πάχος αυτό κρίθηκε ικανοποιητικό για την όσο το δυνατόν μικρότερη παραμόρφωση του καλουπιού υπό την εφαρμογή της πίεσεως κενού -τη διαφορά δηλαδή ανάμεσα στην ατμοσφαιρική και την εντός της σακούλας κενού πίεσεως-, βάσει προσομοίωσης που έγινε με χρήση του λογισμικού Solidworks Cosmos και παρουσιάζεται στην ακόλουθη σελίδα.

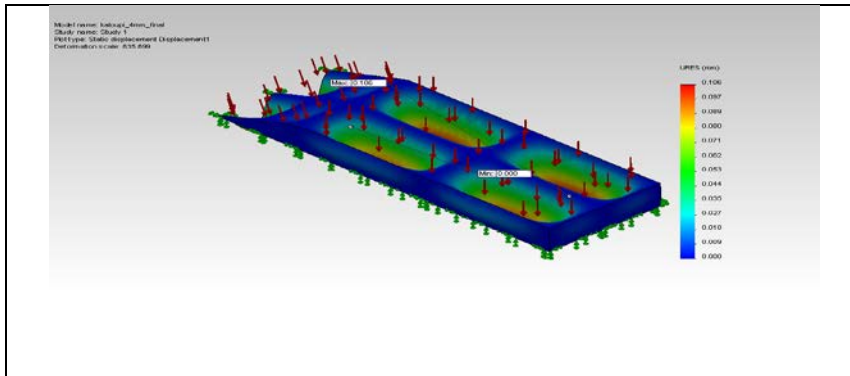


Το καλούπι αποτελείται από την πάνω επιφάνεια (η οποία γίνεται επικλινή στις 19 °) και περιλαμβάνει τρία διαμήκη νεύρα και τέσσερα εγκάρσια (σχήμα 6.1.1).

Οι διαστάσεις στο σχήμα 6.1.1 είναι σε mm.

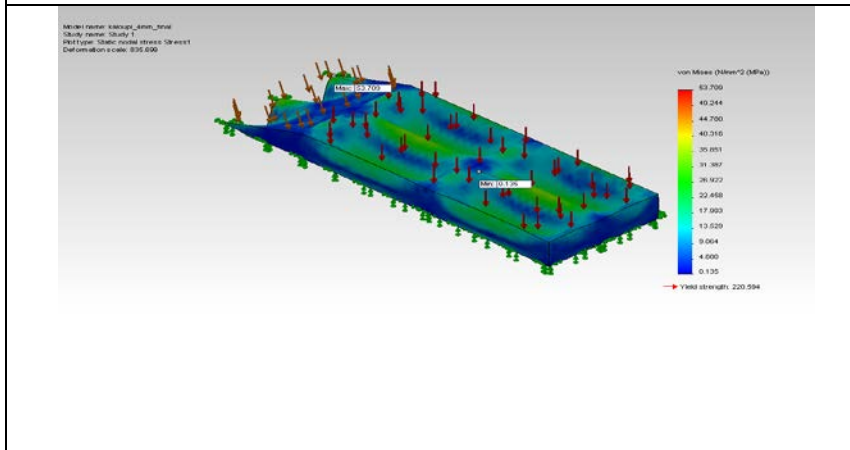
Ακολουθούν τα αντίστοιχα γραφήματα προσομοίωσης για  $P_{\text{gauge}}=0.86 \text{ bar}$ , την πίεση κενού δηλαδή (ένδειξη αντλίας κενού), που ασκήθηκε στο καλούπι κατά την κατασκευή των δύο λεπίδων.

$P_{\text{gauge}}=0.86 \text{ bar}=0.086 \text{ Newton/mm}^2$ .



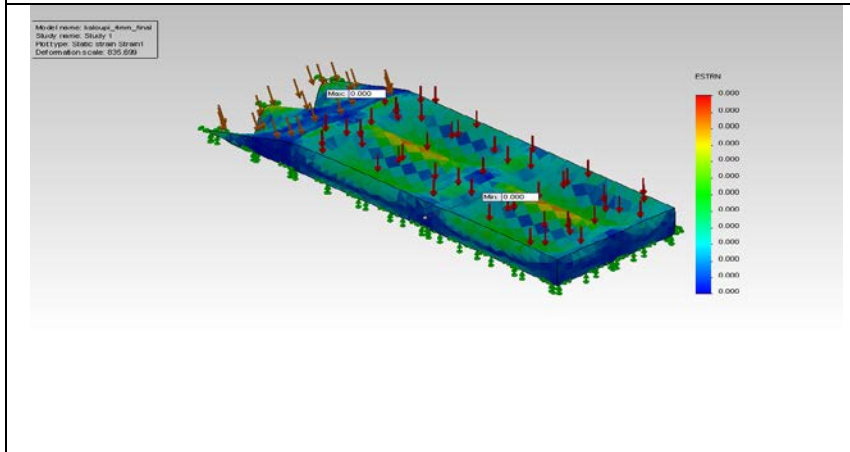
Displacement(mm)

6.1.2



Von Mises Stress(N/mm<sup>2</sup>)

6.1.3



Strain

6.1.4

Το δυσμενέστερο σημείο του καλουπιού θα υποστεί μετατόπιση 0.106 mm (δέκατο του χιλιοστού-σχήμα 6.1.2). Στα παραπάνω σχήματα τονίζεται πως οι μεταβολές παρουσιάζονται υπερβολικά μεγάλες, συγκεκριμένα 835.699 φορές μεγαλύτερες των πραγματικών (σχήμα 6.1.2), για λόγους οπτικούς.

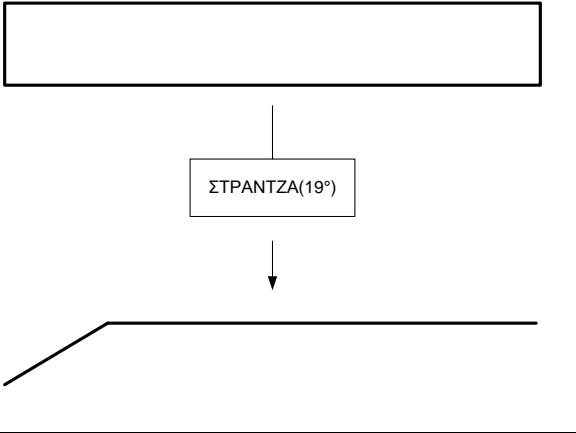
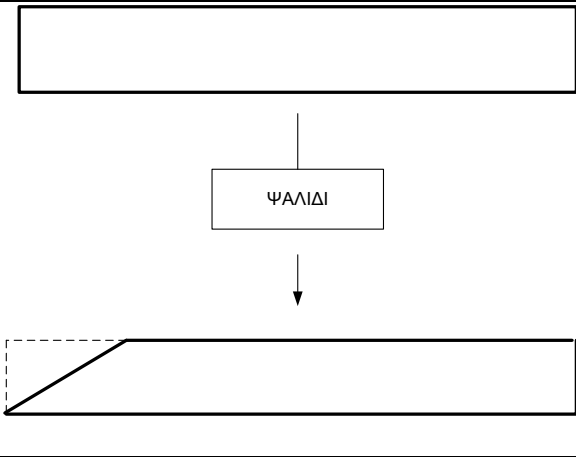

Συνεπώς η μετατόπιση αυτή θα είναι πολύ μικρή προκειμένου να προκληθεί παραμόρφωση στο καλούπι.



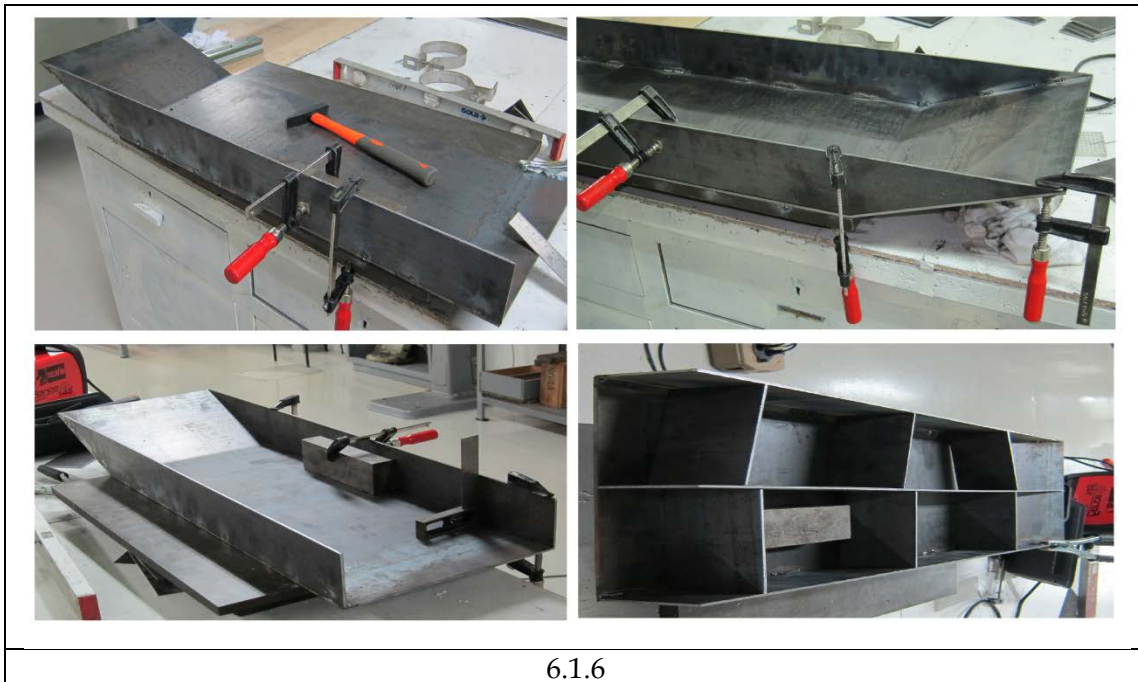
Το κριτήριο που τέθηκε για την εκλογή υλικού και πάχους υλικού κατασκευής του καλουπιού, ήταν η μηδενική παραμόρφωση για τις συγκεκριμένες συνθήκες πίεσεως, που απ' ότι φαίνεται στα αντίστοιχα γραφήματα παραμόρφωσης, ικανοποιείται πλήρως.

Τονίζεται πως το πάχος της λαμαρίνας του καλουπιού θα μπορούσε να είναι μικρότερο, αλλά επιλέχθηκε λαμαρίνα πάχους 4 mm, λόγω τοποποίησης των λαμαρινών καθώς και για αντοχή του καλουπιού στο χρόνο, επαναχρησιμοποίηση και τυχόν φθορά του από τις ρητίνες, που πιθανόν να απαιτούσε τρόχισμα της πάνω επιφάνειάς του.

Τα κομμάτια τα οποία αποτελούν το καλούπι, κόπηκαν με την ακόλουθη σειρά και μεθοδολογία, με την χρήση ψαλιδιού και στράντζας σε εξειδικευμένο μηχανουργείο:

<p align="center"><b>ΠΑΝΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ</b></p>	
<p>Κόβεται πρώτα στο ψαλίδι, κομμάτι των κατάλληλων διαστάσεων και εν συνέχεια τοποθετείται στη στράντζα, όπου του δίνεται κλίση 19° στην κατάλληλη απόσταση από το άκρο του κομματιού</p>	
<p align="center"><b>ΔΙΑΜΗΚΗ ΝΕΥΡΑ</b></p>	
<p>Κόβονται τρία παραλληλόγραμμα κομμάτια κατάλληλων διαστάσεων στο ψαλίδι και εν συνέχεια τοποθετούνται με κατάλληλη κλίση στο ψαλίδι όπου και διαμορφώνονται κατάλληλα</p>	
<p align="center"><b>ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΝΕΥΡΑ</b></p>	
<p>Κόβονται έξι παραλληλόγραμμα κομμάτια κατάλληλων διαστάσεων στο ψαλίδι και δύο ακόμα παραλληλόγραμμα κομμάτια κατάλληλων διαστάσεων που αποτελούν τα νεύρα του επικλινούς τμήματος της πάνω επιφάνειάς του καλουπιού.</p>	
<p align="center">6.1.5</p>	

Τα κομμάτια που κόπηκαν, συγκολλήθηκαν στο μηχανουργείο της Σχολής Μηχανολόγων Ε.Μ.Π. και έτσι προέκυψε το καλούπι της εγχύσεως σε κενό (σχήμα 6.1.6), το οποίο εν συνεχεία αλειφθηκε με λάδι, προκειμένου να μην οξειδωθεί.

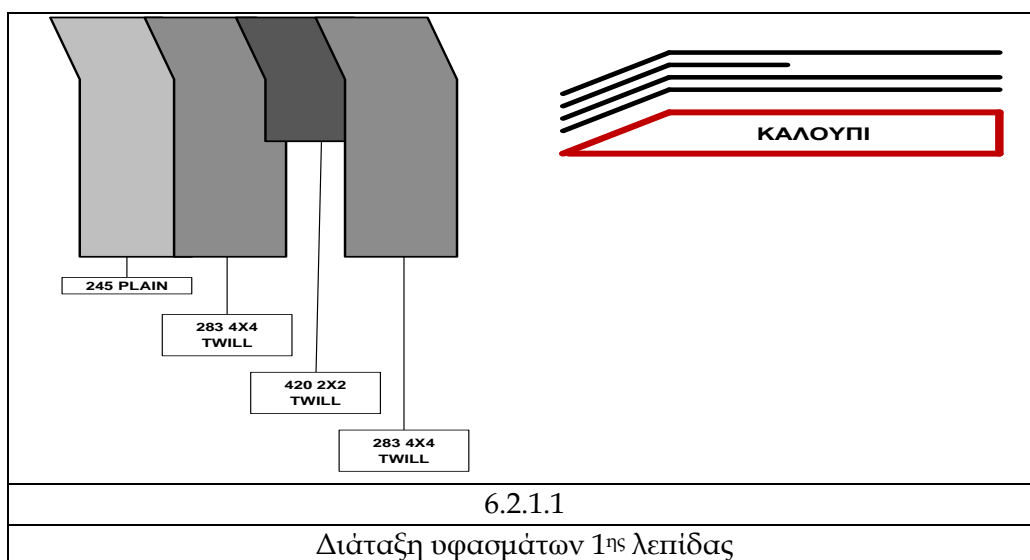


6.1.6

## 6.2 Κατασκευή λεπίδων

### 6.2.1 Πρώτη λεπίδα

Το πέδιλο κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών-Μηχανολόγων Μηχανικών σε συνεργασία με τον τεχνικό Μαρκουλή Αθανάσιο.



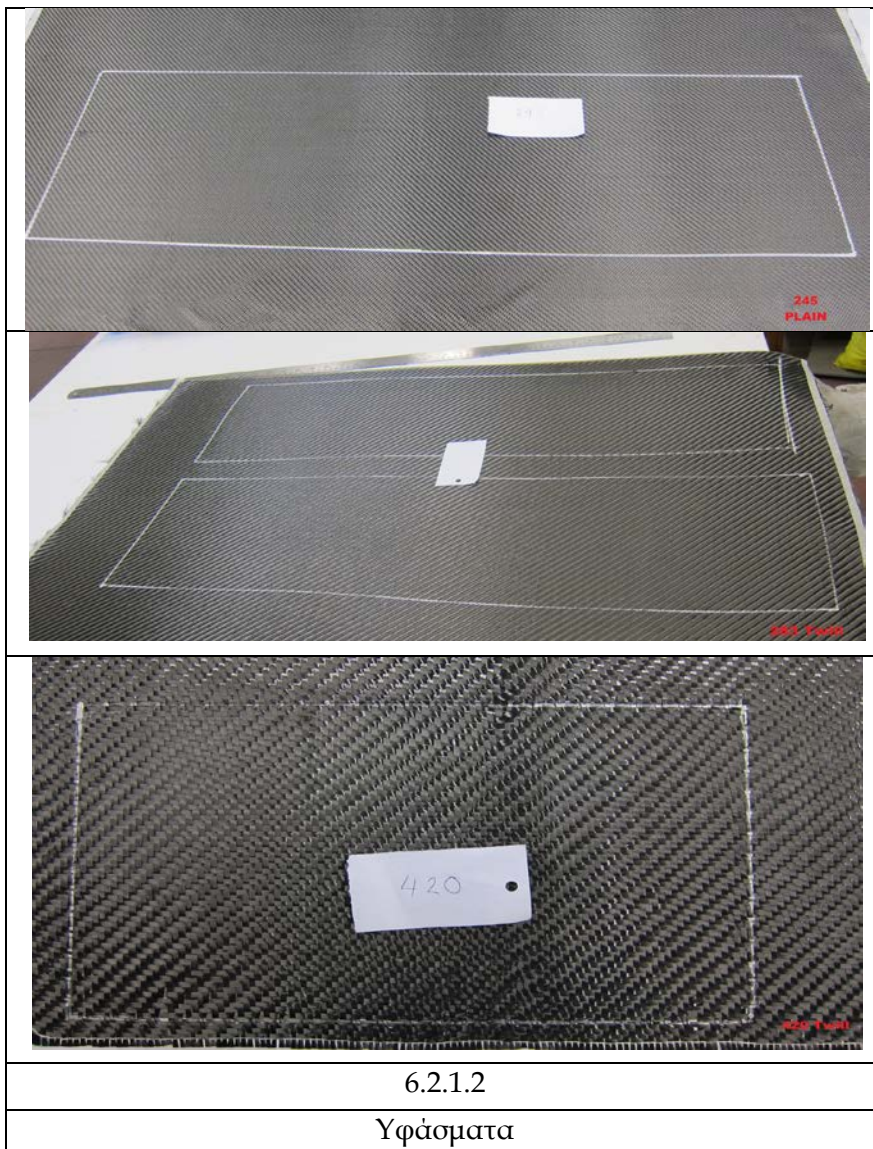
6.2.1.1

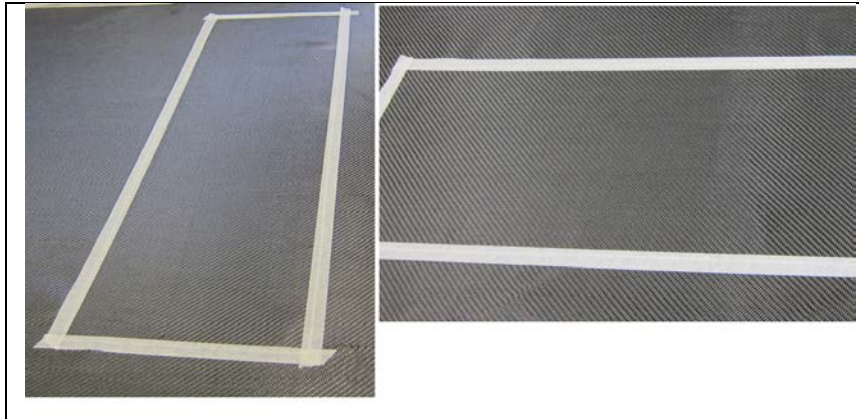
Διάταξη υφασμάτων 1ης λεπίδας

Στο σχήμα 6.2.1.1 παρουσιάζεται η διάταξη των υφασμάτων του πέδιλου. Όλοι οι τύποι υφασμάτων είναι προσανατολισμένοι στην ίδια διεύθυνση, στις 0° ως προς τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Οι διαφορετικές αποχρώσεις, υποδηλώνουν διαφορετικό βάρος υφάσματος. Όσο πιο σκούρα η απόχρωση, τόσο βαρύτερο το ύφασμα.

### Κόψιμο υφασμάτων

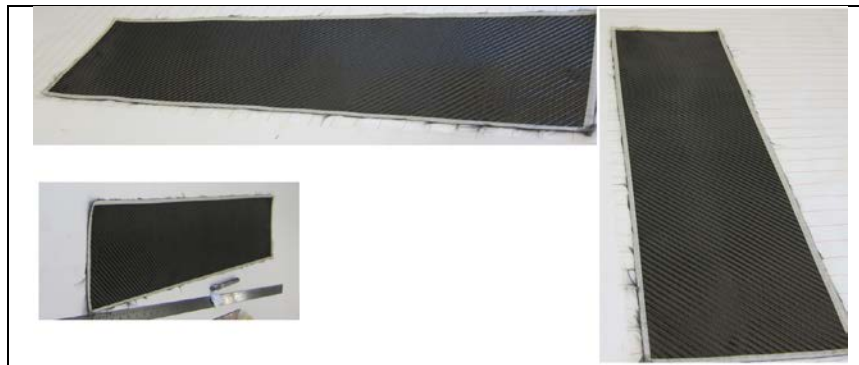
Στο πρώτο βήμα του πειράματος, κόβονται τα υφάσματα. Στην αρχή σημειώνονται με μαρκαδόρο οι διαστάσεις του τεμαχίου (σχ. 6.2.1.2), το οποίο είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και στη συνέχεια τοποθετείται χαρτοταινία πάνω στα συγκεκριμένα ίχνη (σχήμα 6.2.1.3). Το επόμενο βήμα είναι το κόψιμο των τμημάτων αυτών με ειδικό ψαλίδι κοπής ανθρακοϋφασμάτων (σχήμα 6.2.1.4). Τονίζεται πως συγκεκριμένα για τα 283 και 420, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την κοπή γιατί τα εν λόγω υφάσματα ξεφτίζουν με το παραμικρό.





6.2.1.3

Υφάσματα



6.2.1.4

Υφάσματα

### Προετοιμασία καλουπιού

Ακολουθεί η προετοιμασία του καλουπιού. Το καλούπι που χρησιμοποιείται είναι από απλή λαμαρίνα πάχους 4 mm, και έχει τη μορφή τραπεζίου(σφήνας-σχήμα 6.2.1.5).

Τονίζεται πως μετά την κατασκευή του αλείφτηκε με λάδι προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση του.

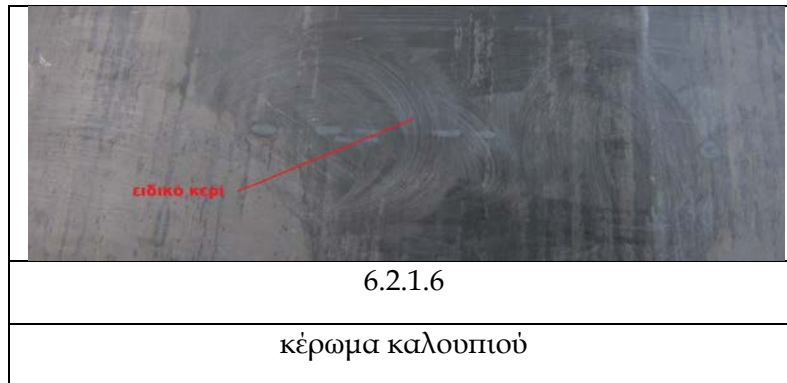


6.2.1.5

Καλούπι

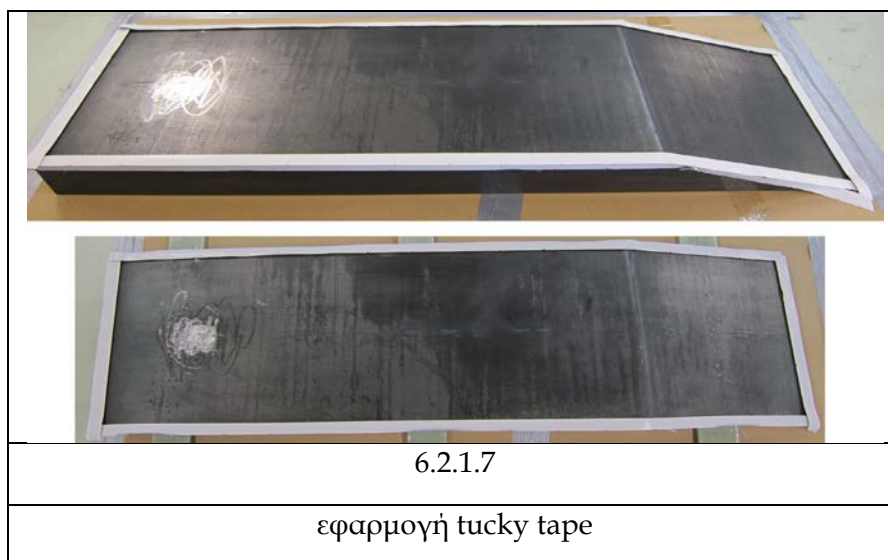
Σε αυτό το στάδιο το καλούπι αλείφεται είτε με gelcoat είτε με ειδικό κερί -στην περίπτωση μας κερί(σχήμα 6.2.1.6) , το οποίο εξυπηρετεί τους εξής σκοπούς:

- Προστατεύει το καλούπι από τη ρητίνη και έτσι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί .
- Διευκολύνει την αποκόλληση των υφασμάτων χωρίς το ρίσκο αλλοίωσης τους.
- Δημιουργεί ένα φιλμ, το οποίο καλύπτει τυχόν μικρές επιφανειακές ατέλειες του καλουπιού, εξασφαλίζοντας καλή ποιότητα επιφάνειας για το πάνω τμήμα του πεδίου.

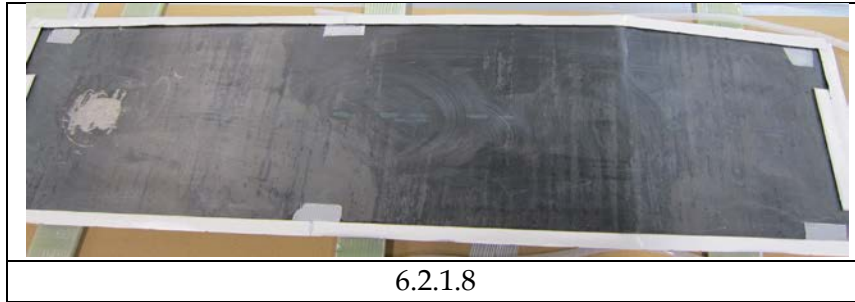


Στη συνέχεια τοποθετείται tucky tape στις ακμές της πάνω επιφάνειας του καλουπιού(σχήμα 6.2.1.7), οριοθετώντας έτσι την περιοχή εντός της οποίας θα εφαρμοσθεί το κενό για την έγχυση.

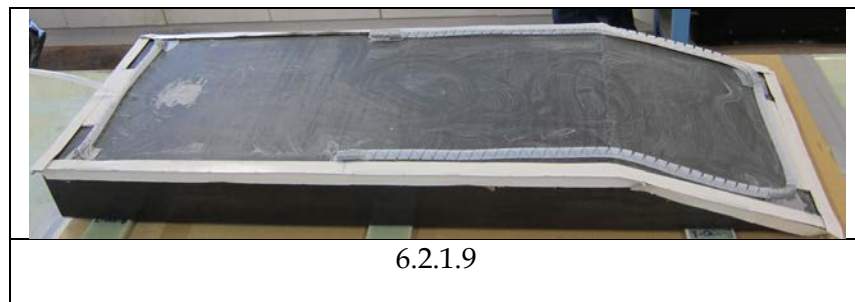
*Το tucky tape είναι μία διπλής όψεως στεγανωτική ταινία η οποία χρησιμοποιείται για την έγχυση σε κενό. Η μία όψη της εφάπτεται στο καλούπι και στην άλλη όψη της εφάπτεται η σακούλα της έγχυσης σε κενό.*



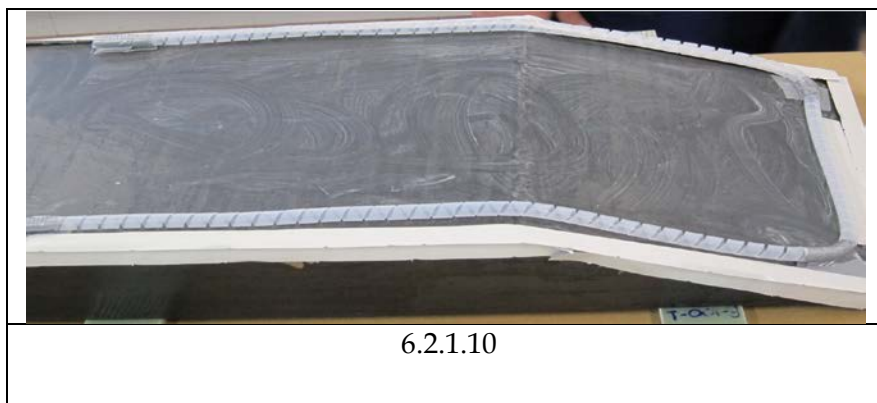
Επιπλέον τοποθετούνται μικρά κομμάτια tucky tape (σχήμα 6.2.1.8), πάνω στα οποία θα προσκολληθούν τα σπινάλ σωληνάκια της αναρρόφησης καθώς και της έγχυσης της ρητίνης προκειμένου αυτά να είναι σταθεροποιημένα όσο το δυνατόν καλύτερα.



Εν συνεχεία, τοποθετούνται τα σωληνάκια των κυκλωμάτων αναρρόφησης και έγχυσης ρητίνης(σχήμα 6.2.1.9).



Ο σωλήνας του κυκλώματος αναρρόφησης είναι σπιράλ, μορφής «Π» και εκτείνεται περίπου στα δύο τρίτα του μήκους του καλουπιού(σχήμα 6.2.1.10). Ο λόγος για αυτό είναι πως έτσι επιτυγχάνεται ομοιόμορφο μέτωπο ροής της ρητίνης, γεγονός μείζονος σημασίας για την έγχυση σε κενό. Επιπλέον ο συγκεκριμένος σωλήνας προσκολλάται καλύτερα στο καλούπι με χρήση tucky tape όπως προαναφέρθηκε.



Ακολουθεί η τοποθέτηση του σωλήνα εισόδου της ρητίνης, ο οποίος είναι και αυτός σπιράλ, μορφής «Τ» και εκτείνεται ουσιαστικά στο πλάτος του καλουπιού(σχήμα 6.2.1.11).



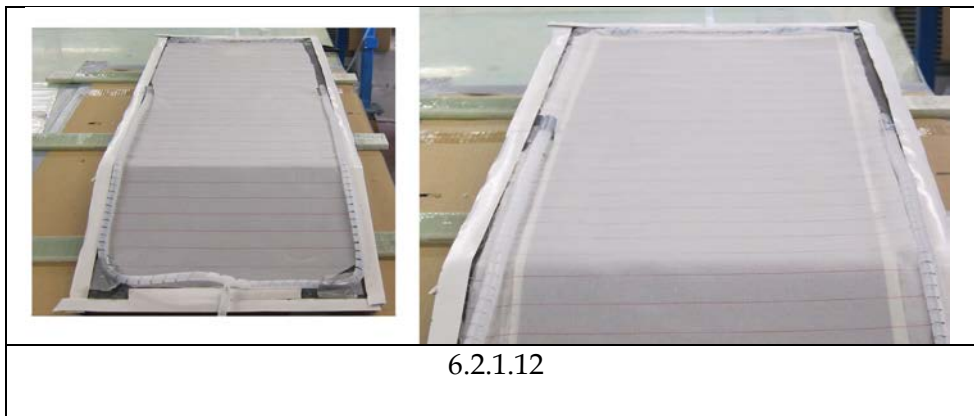
### Τοποθέτηση Υφασμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει τα προηγούμενα βήματα, είμαστε πλέον έτοιμοι να τοποθετήσουμε τα ανθρακοϋφάσματα καθώς και τα υπόλοιπα υφάσματα (peel ply, infusion mesh) πάνω στο καλούπι.

Πρώτα τοποθετούμε το peel ply, ομοιόμορφα εντός των ορίων του καλουπιού.

*Το peel ply είναι ένα ειδικό ύφασμα, το οποίο διευκολύνει την αποκόλληση των αναλώσιμων υλικών της έγχυσης από το παραγόμενο πολυστρωματικό, εν προκειμένω του infusion mesh και της σακούλας της έγχυσης. Επίσης διευκολύνει στην αποκόλληση του πολυστρωματικού από το καλούπι.*

*Μία στρώση peel ply τοποθετείται απευθείας πάνω στο καλούπι, πριν το πρώτο ανθρακοϋφάσμα και ακόμα μία πάνω από το τελευταίο ανθρακοϋφάσμα (σχήμα 6.2.1.12).*



Μετά την τοποθέτηση της πρώτης στρώσεως peel ply ακολουθεί η τοποθέτηση των ανθρακοϋφασμάτων με βάση το διάγραμμα στα εισαγωγικά της κατασκευής του πέδιλου. Για λόγους εποπτικών, υπενθυμίζεται η σειρά των υφασμάτων ξεκινώντας από το πρώτο που εφάπτεται στο καλούπι (σχήμα 6.2.1.13):

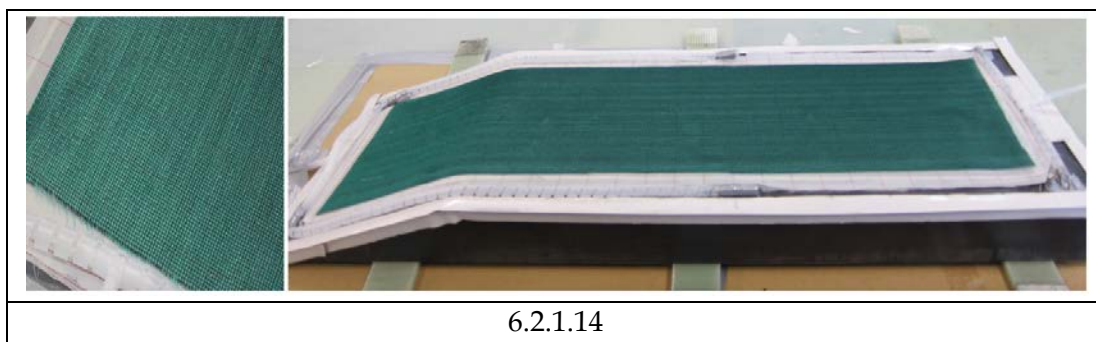
- A. 245 Plain
- B. 283 Twill
- C. 420 Twill
- D. 283 Twill



Μετά την τοποθέτηση του τελευταίου ανθρακοϋφάσματος τοποθετείται άλλη μία στρώση peel ply(σχήμα 6.2.1.12), όπως προαναφέρθηκε.

Πάνω από το peel ply, τοποθετείται το infusion mesh(σχήμα 6.2.1.14).

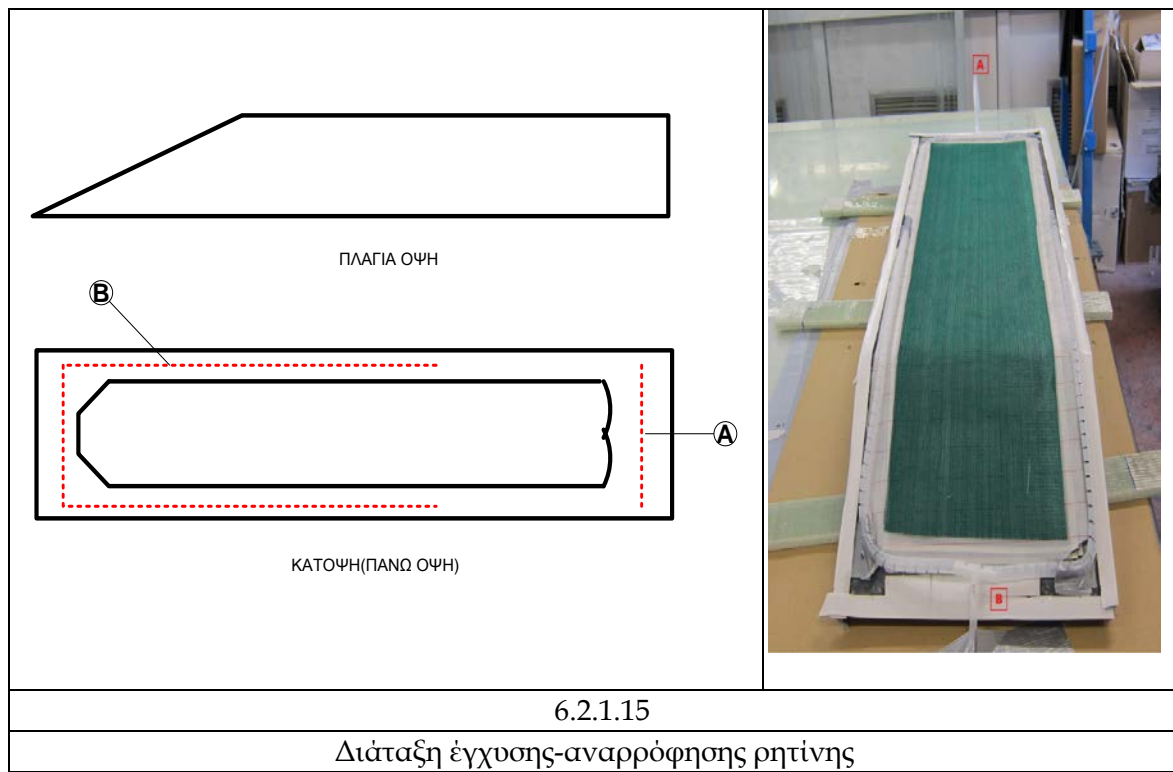
*Το infusion mesh είναι ένα διχτυωτό πλέγμα το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για την έγχυση καθώς διευκολύνει τη ροή της ρητίνης, κυρίως στο ανώτερο ανθρακοϋφασμα και εμμέσως σε όλο το πολυστρωματικό.*





## Σακούλα κενού(vacuum bag), διάταξη έγχυσης

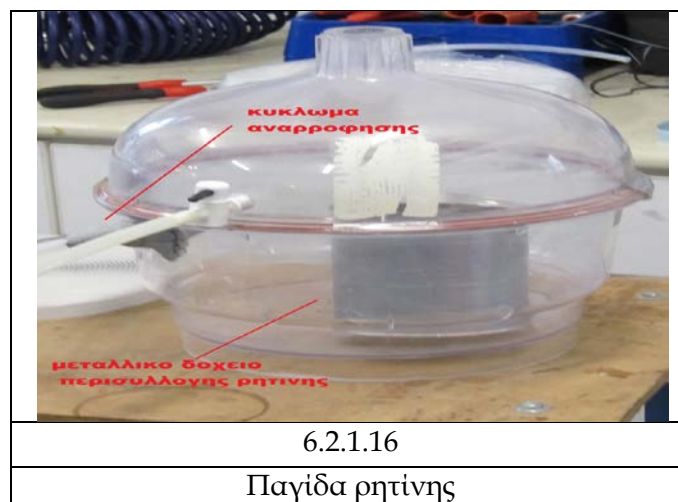
Στο σχήμα 6.2.1.15 , φαίνεται η διάταξη του πειράματος για την έγχυση σε κενό.



Το καλούπι τοποθετείται σε τρεις κάθετες βέργες, για λόγους σταθερότητας και για να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένο.

Το σημείο A στο σχήμα 6.2.1.15, αντιπροσωπεύει το κανάλι έγχυσης της ρητίνης, ενώ το B είναι η αναρρόφηση του κυκλώματος.

Στο σχήμα 6.2.1.16 παρουσιάζεται η παγίδα ρητίνης .



Η παγίδα έχει τη μορφή διαφανούς αεροστεγούς κλειστού δοχείου-για διατήρηση της πίεσως της έγχυσης-, εμπεριέχει μεταλλικό δοχείο στο οποίο καταλήγει το κύκλωμα αναρρόφησης και ως εκ τούτου η περίσσεια της ρητίνης(εφόσον αυτή υπάρξει) , προκειμένου να μην εισχωρήσει στην αντλία και την καταστρέψει.

Το τελευταίο ύφασμα που τοποθετείται πριν τη σακούλα κενού, είναι το πλέγμα διευκόλυνσης ροής της ρητίνης (πράσινο χρώμα-σχήμα 6.2.1.17).



6.2.1.17

Infusion mesh και σακούλα κενού

Η σακούλα κενού κόβεται από ρολό νάυλον, που χρησιμοποιείται συγκεκριμένα για την έγχυση σε κενό.

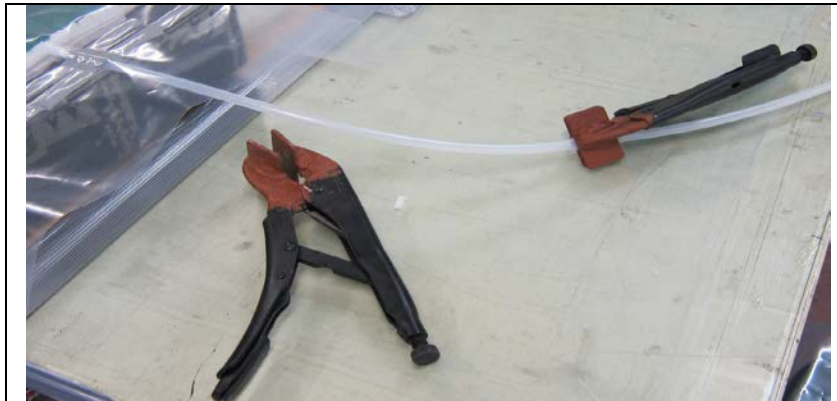
Η επιφάνεια της σακούλας είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια του πάνω μέρους του καλουπιού και ασφαλιζεται με την βοήθεια tucky tape στα πλευρικά τοιχώματα του καλουπιού(σχήμα 6.2.1.18).



6.2.1.18

Ασφάλιση σακούλας κενού

Το άκρο του σωλήνα έγχυσης της ρητίνης σφραγίζεται εν συνεχεία με ειδική τοιμπίδα(σχήμα 6.2.1.19) , η οποία λέγεται «σκόλα». Αυτό γίνεται προκειμένου να κλείσει το κύκλωμα και να αρχίσει η εφαρμογή του κενού με την έναρξη της λειτουργίας της αντλίας.



6.2.1.19

Τοιμπίδες-«σκόλες»

### Εφαρμογή Κενού (vacuum)

Αφού τοποθετηθεί η ειδική τοιμπίδα(«σκόλα»), είμαστε έτοιμοι πλέον για την εφαρμογή του κενού στη διάταξη μας(σχήμα 6.2.1.20).

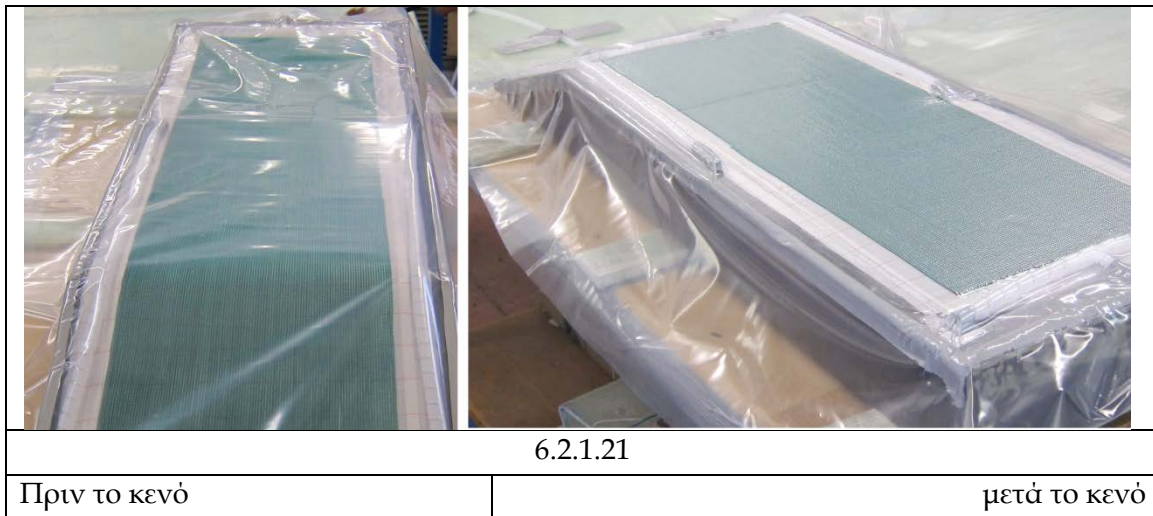
Τονίζεται πως δεν συνδέουμε το δοχείο ρητίνης με το κύκλωμα, αφού εφαρμόζοντας κενό τώρα, ελέγχουμε το κύκλωμα μας για διαρροές σε πρώτη φάση και δεν ξεκινούμε ακόμα την έγχυση.



6.2.1.20

Διάταξη έγχυσης

Η αντλία κενού θέτεται σε λειτουργία και η σακούλα κενού αρχίζει να συμπιέζεται(τεντώνει) ενώ τα ζαρώματα που αυτή εμφάνιζε, δεν υπάρχουν πλέον(σχήμα 6.2.1.21).



Ενώ η αντλία βρίσκεται σε λειτουργία και το κενό εφαρμόζεται κανονικά, ελέγχουμε το πάνω τμήμα του καλοπιού για τυχόν σημεία στα οποία η σακούλα πιέζεται υπερβολικά από το καλούπι και προσπαθούμε με το χέρι μας να εξομαλύνουμε το φαινόμενο αυτό, καθώς αυτά τα σημεία είναι επικίνδυνα για διαρροές, οι οποίες είναι καταστροφικές για την έγχυση. Μόλις έχουμε ελέγξει διεξοδικά και περιμετρικά τα όρια tucky tape και σακούλας κενού, καθώς και τα σημεία που προαναφέρθηκαν, θέτουμε την αντλία εκτός λειτουργίας.

Το σκεπτικό με το κλείσιμο της αντλίας, είναι πως εφόσον υπάρχουν διαρροές, η ένδειξη του ρολογιού της αντλίας(που δείχνει την πίεση κενού) θα μεταβληθεί-συγκεκριμένα θα μειωθεί-, οπότε θα υπάρξουν τότε διορθωτικές κινήσεις.

*Εφόσον περάσει ένα εύλογο χρονικό διάστημα- 10 λεπτών- και η ένδειξη της αντλίας δεν μεταβληθεί, αυτό σημαίνει πως δεν έχουμε διαρροή στο κύκλωμα μας και πως είμαστε έτοιμοι να συνδέσουμε το δοχείο της ρητίνης-αποσυνδέοντας ακολούθως την τσιμπίδα- και να ξεκινήσει η καθ' εαυτή διαδικασία της έγχυσης εν κενώ.*

**Το επίπεδο κενού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των δύο λεπίδων είναι 0.86 bar, όσο δηλαδή η ένδειξη του ρολογιού της αντλίας- η πίεση κενού δηλαδή-, επομένως τα υλικά εντός της σακούλας κενού θα βρίσκονται σε απόλυτη πίεση ίση με  $1-0.86= 0.14$  bar.**

## Υπολογισμοί Βάρους Υφασμάτων - Ρητίνης- Σκληρυντή

Έχοντας ολοκληρώσει τον έλεγχο διαρροών και την εφαρμογή κενού, ακολουθούν οι υπολογισμοί βάρους των υλικών της έγχυσης εν κενώ. Για το πρώτο πέδιλο, υπενθυμίζεται η διάταξη των υφασμάτων, ξεκινώντας από το καλούπι και προς τα πάνω:

245 Plain

283 Twill

420 Twill

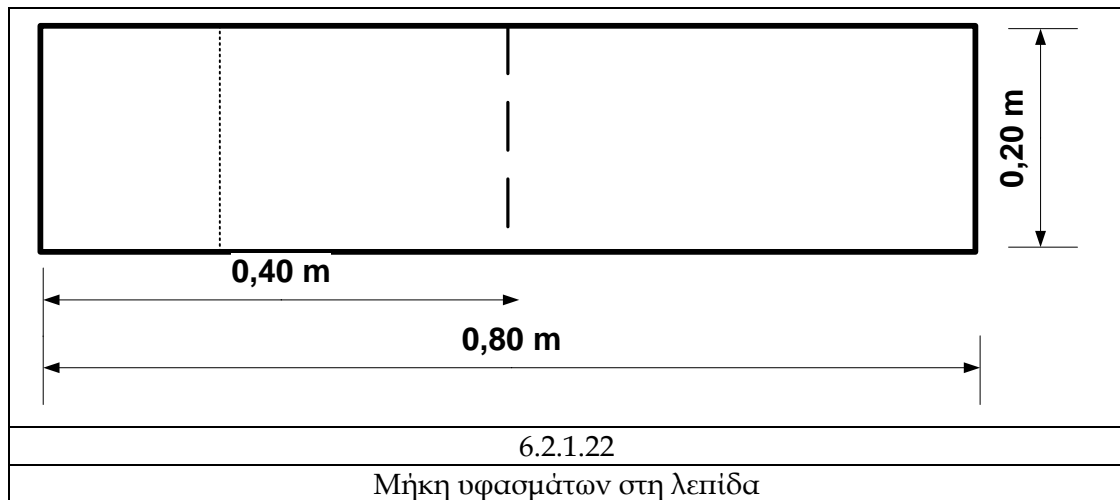
283 Twill

Το νούμερο που προηγείται του τύπου ύφανσης δηλώνει το βάρος του υφάσματος ανά μονάδα τετραγωνικής επιφάνειας και οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι τα GSM-Grams per Square Meter-, δηλαδή τα γραμμάρια ανά τετραγωνικό μέτρο.

Έτσι γνωρίζοντας την επιφάνεια του παραγόμενου τεμαχίου μπορούμε να υπολογίσουμε το βάρος των υφασμάτων, ρητίνης, σκληρυντή που το απαρτίζουν και ως εκ τούτου το συνολικό του βάρος. Τονίζεται πως τα νούμερα που προκύπτουν είναι ενδεικτικά και όχι ακριβή, μιας και υπάρχουν παράμετροι που καθιστούν αδύνατη την ακριβή μέτρηση του βάρους του τεμαχίου πριν την έναρξη της έγχυσης όπως:

- Ο εμποτισμός της ρητίνης δεν είναι σχεδόν ποτέ ομοιόμορφος σε όλο τον όγκο των υφασμάτων και έτσι ενώ θεωρητικά το βάρος της ρητίνης υπολογίζεται να είναι το ίδιο με εκείνο του συνόλου των υφασμάτων, πρακτικά αυτό δεν συμβαίνει λόγω των φυσαλλίδων αέρα που συσσωρεύονται στο σύστημα ρητίνη-υφάσματα ή γενικότερα λόγω του μη καλού εμποτισμού της ρητίνης.
- Το βάρος των υφασμάτων υπολογιζόμενο ως το γινόμενο του βάρους ανά μονάδα τετραγωνικής επιφάνειας επί την επιφάνεια του κάθε υφάσματος, μπορεί να αποκλίνει πολλές φορές από την πραγματικότητα, παραδείγματος χάρη λόγω σφαλμάτων κατά την κοπή των υφασμάτων. Ο πιο άμεσος και σωστός τρόπος για την μέτρηση του βάρους, είναι η ζύγιση των υφασμάτων σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας μετά την κοπή τους.
- Είθισται, τουλάχιστον σε επίπεδο μελέτης, όπου το κόστος δεν είναι ο κρισιμότερος παράγοντας(σε αντιπαράθεση με την παραγωγή για εμπόριο), η ρητίνη που χρησιμοποιείται να είναι πολλές φορές ακόμα και διπλάσια σε ποσότητα από την απαιτούμενη βάσει των υπολογισμών. Αυτό γίνεται για λόγους ασφαλέστερης περάτωσης της έγχυσης εν κενώ, αφού ρητίνη πολλές φορές δεσμεύεται από τα σωληνάκια εισόδου της ροής, από αυτά της εξόδου, διάκενα μεταξύ υφασμάτων-ορίων της σακούλας κενού ή και την παγίδα ρητίνης και τα αναλώσιμα υφάσματα της μεθόδου(*peel ply, infusion mesh*).



Ακολουθεί ο υπολογισμός των βαρών των υφασμάτων για την συνολική επιφάνεια του τεμαχίου(πίνακας 6.2.1.A). Τονίζεται πως το ύφασμα 420 που χρησιμοποιείται ως ενίσχυση, είναι το μισό σε μήκος(400 mm) από τα υπόλοιπα υφάσματα(σχήμα 6.2.1.22):



Κωδικός	GSM(grams/m <sup>2</sup> )	Επιφάνεια Στρώσεως(m <sup>2</sup> )	Βάρος Στρώσεως(grams)
245 Plain	245	0,2x0,8=0,16	245x0,16=39,2
283 4x4 Twill	283	0,2x0,8=0,16	283x0,16=45,28
420 Twill	420	0,2x0,4=0,08	420x0,08=33,6
283 4x4 Twill	283	0,2x0,8=0,16	283x0,16=45,28
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ</b>			163,36 grams
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.1.Α			

Στο σχήμα 6.2.1.23, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ρητίνης και του σκληρυντή που θα χρησιμοποιηθούν.

Από αυτά εξάγουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα:

<p><b>Epoxy resin L 285 Aero (LF)</b> (single component)</p> <p>Low-viscosity laminating resin free of solvents and fillers for impregnating glass, aramid, and carbon fibres.</p> <p><b>It has been approved for the construction and repair of gliders and powered aircraft</b></p> <p>Please order <b>hardener 285 (LF 1)</b> separately</p> <p>Laminate structures for vehicle construction in combination with this product and hardener 285 (LF 1) are approved by the TÜV-Süd. The specified requirements you'll find on the R&amp;G website.</p> <p>Storage: 24 months</p>	
<p><b>Hardener 285 (LF 1) (Aero)</b> (single component)</p> <p>■ Hardener for epoxy resin L 285 (LF) ■ Processing time: 50 minutes</p> <p>Mixing ratio: 100 : 40 parts by weight of resin to hardener Curing time: 24 hours at room temperature, followed by hot curing for 15 hours at 55 °C</p> <p>Please order resin L 285 (LF) separately</p> <p>Laminate structures for vehicle construction in combination with this product and epoxy resin L 285 (LF) are approved by the TÜV-Süd. The specified requirements you'll find on the R&amp;G website.</p> <p>Storage: 24 months</p>	
6.2.1.23	
Τεχνικά χαρακτηριστικά πλαστικού	

- Καταρχάς η συγκεκριμένη ρητίνη χρησιμοποιείται μόνο με τον συγκεκριμένο σκληρυντή.
- Ο χρόνος κατεργασίας της ρητίνης- με τη χρήση του συγκεκριμένου σκληρυντή- είναι 50 λεπτά από τη στιγμή που αυτά αναμειγνύονται.
- Η αναλογία βάρους μεταξύ ρητίνης-σκληρυντή είναι 100/40 δηλαδή για 1000 grams ρητίνης, χρησιμοποιούνται 400 grams σκληρυντή.
- Με το πέρας της έγχυσης το τεμάχιο αφήνεται σε θερμοκρασία δωματίου(περί τους 25 °C) για 24 ώρες, ενώ εν συνεχεία «ψήνεται» σε ειδικό φούρνο για 10 έως 15 ώρες σε αυξανόμενη σταδιακά θερμοκρασία με μέγιστο τους 55 °C.

Έχοντας ως δεδομένο την αναλογία βάρους μεταξύ ρητίνης-σκληρυντή, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε το βάρος τους με βάση πάντα και το βάρος των ανθρακούφασμάτων(πίνακας 6.2.1.B). Τονίζεται πως το βάρος της ρητίνης θα είναι το διπλάσιο από αυτό των υφασμάτων, ως συντελεστής ασφαλείας για την έγχυση, βάσει της παρατήρησης που προηγήθηκε:

<b>Βάρος Υφασμάτων</b>	163,36~170 grams
<b>Βάρος Ρητίνης</b>	170x2=340 grams
<b>Βάρος Σκληρυντή</b>	(40x340)/100=136 grams
<b>Βάρος Μείγματος</b>	136+340=476 grams
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.1.B	

Αφού είναι γνωστά πλέον τα βάρη ρητίνης και σκληρυντή, εισάγουμε ρητίνη σε πλαστικό δοχείο, ευρισκόμενο πάνω σε ηλεκτρονική ζυγαριά, έως ότου φτάσουμε στο επιθυμητό βάρος. Εν συνεχεία επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία σε άλλο δοχείο για τον σκληρυντή και αφού πάρουμε τα επιθυμητά γραμμάτια, αναμειγνύουμε την ρητίνη και τον σκληρυντή και

ανακατεύουμε γρήγορα για μικρό χρονικό διάστημα(περί τα 4 λεπτά). Το μείγμα είναι πλέον έτοιμο για την έγχυση του(σχήμα 6.2.1.24).



6.2.1.24

Δοχείο έγχυσης ρητίνης

### Έγχυση Σε Κενό (vacuum infusion)

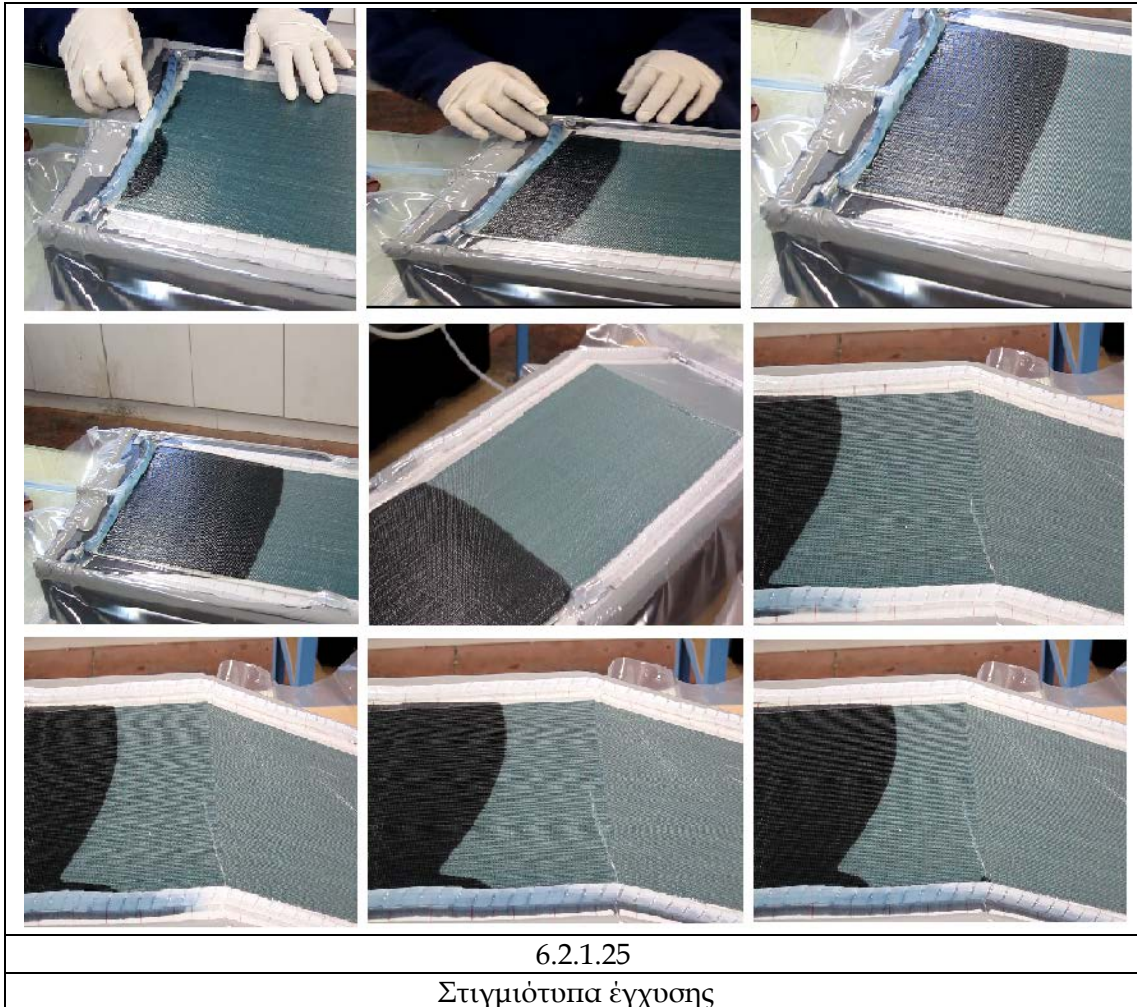
Συνδέουμε το δοχείο της ρητίνης με το κύκλωμα και αφαιρούμε την τοιμπίδα(«σκούλα»).

Η ρητίνη λόγω της διαφοράς πίεσεως αρχίζει και ρέει από το σωληνάκι έγχυσης προς το καλούπι, ξεκινώντας τον εμποτισμό των υφασμάτων.

Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας και μέχρι την ολοκλήρωση της, τονίζεται πως έχουμε τη δυνατότητα να είναι σε λειτουργία η αντλία κενού ή όχι. Είθισται να επιλέγεται το πρώτο για λόγους ύπαρξης σταθερής διαφοράς πίεσεως-έχει για παράδειγμα η σακούλα ένα πολύ μικρό σκίσιμο , μη εντοπίσιμο, το οποίο ανεβάζει την πίεση εντός του καλουπιού με πολύ αμελητέο ρυθμό- και αυτό κάνουμε και εμείς.

Ακολουθούν στιγμιότυπα της έγχυσης μέχρι την στιγμή που αυτή διακόπηκε(σχήμα 6.2.1.25), λόγω της αδυναμίας περαιτέρω χρήσης της ρητίνης.





### 6.2.2 Σχολιασμός

Η διαδικασία διακόπτεται στο τελευταίο στιγμιότυπο, λόγω σημαντικής αύξησης θερμοκρασίας της ρητίνης, η οποία την καθιστά επικίνδυνη για την διαδικασία και γενικότερα. Η ταχύτερη αύξηση της θερμοκρασίας της, δηλώνει ουσιαστικά πως ο χρόνος κατεργασιμότητας της έχει πλέον παρέλθει.

Χύνουμε τη ρητίνη σε δοχείο με νερό, ενώ παράλληλα η αντλία κενού εξακολουθεί να δουλεύει.

Μολονότι ο πλήρης εμποτισμός των υφασμάτων απέτυχε, συγκεντρώθηκαν χρήσιμες παρατηρήσεις και εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την έγχυση σε κενό.

### 6.2.3 Παρατηρήσεις

- Ο ρυθμός έγχυσης της ρητίνης μειώνεται σημαντικά , όσο το μέτωπο έγχυσης απομακρύνεται από το σπιράλ σωληνάκι παροχής.
- Ο ρυθμός έγχυσης της ρητίνης μειώνεται σημαντικά , όταν το μέτωπο έχει διανύσει 30 περίπου εκατοστά, δηλαδή εκεί περίπου που ξεκινάει η επιπλέον ενίσχυση με το carbon 420 twill.

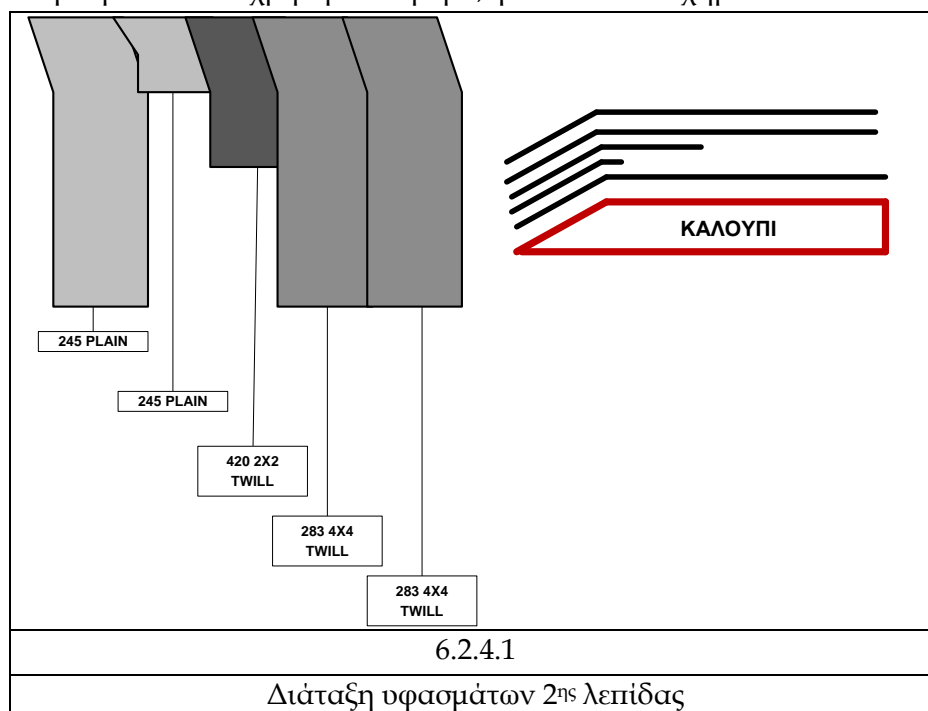
- Μόλις το μέτωπο ρητίνης πάει να κινείται ομοιόμορφα, αρχίζουν να υπάρχουν ανομοιογένειες στη διαδικασία. Στην προκειμένη περίπτωση, διεισδύει ρητίνη στο σωληνάκι αναρρόφησης από τη μία μόνο πλευρά.
- Εφόσον η διαδικασία έχει εφαρμοσθεί σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται για την έγχυση εν κενώ και η ρητίνη δεν έχει προλάβει να εμποτίσει πλήρως τα υφάσματα, κάποια παράμετρος της διαδικασίας έχει οδηγήσει σε αποτυχία το πείραμα.
- Το επίπεδο του κενού ελέγχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα και συντηρείται, το δοχείο παροχής και το σωληνάκι της ρητίνης είναι καλώς τοποθετημένα το ένα εντός του άλλου, χρονικά η διαδικασία έχει διαρκέσει περί τα 45 λεπτά- γεγονός που συμβαδίζει με το χρόνο που δίνεται από τον κατασκευαστή της ρητίνης-, συνεπώς το λογικό συμπέρασμα είναι πως κάποιο αναλώσιμο πλην των ανθρακοϋφασμάτων, καθυστέρησε την έγχυση της ρητίνης. Τονίζεται πως θέμα λανθασμένης ένδειξης ή ακόμα και ελαττωματικής αντλίας δεν τίθεται, μιας και η συγκεκριμένη αντλία χρησιμοποιείται κατά κόρον και με επιτυχία.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για την αποτυχία της έγχυσης, υπεύθυνο είναι το πλέγμα διευκόλυνσης της ροής (infusion mesh), το οποίο είναι «αργό» για το συγκεκριμένο δοκίμιο που κατασκευάζεται. Επιπλέον παράγοντας αποτυχίας σε έναν βαθμό, θεωρείται το σημείο εκλογής για την έγχυση της ρητίνης, αφού αν αυτή είχε τοποθετηθεί πιο κεντρικά στο κομμάτι, πιθανόν η διαδικασία να είχε επιτύχει. Βέβαια επειδή το καλούπι είναι μονό(για ένα πέδιλο), η έγχυση τοποθετήθηκε ορθά. Η τοποθέτηση της έγχυσης σε πιο κεντρικό σημείο, γίνεται στην περίπτωση διπλού καλούπιού κατά κανόνα.

#### 6.2.4 Δεύτερη Λεπίδα

Το συγκεκριμένο πέδιλο κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών-Μηχανολόγων Μηχανικών σε συνεργασία με τον τεχνικό Μαρκουλή Αθανάσιο και τον κο Μερκάτη Χάρη, κατασκευαστή χειροποίητων πεδίων από ανθρακοϋφάσματα.

Η διάταξη των υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκε, φαίνεται στο σχήμα 6.2.4.1:



Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη των υφασμάτων του πέδιλου. Όλοι οι τύποι υφασμάτων είναι προσανατολισμένοι στην ίδια διεύθυνση, στις 0° ως προς τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Οι διαφορετικές αποχρώσεις, υποδηλώνουν διαφορετικό βάρος υφάσματος. Όσο πιο σκούρα η απόχρωση, τόσο βαρύτερο το ύφασμα.

Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων υφασμάτων αναφέρθηκαν προηγουμένως, σε σχετική παράγραφο.

Τονίζεται πως για αυτό το πέδιλο τοποθετούνται από το καλούπι και προς τα πάνω:

- 245 Plain
- 245 Plain (ενίσχυση)
- 420 Twill (ενίσχυση)
- 283 4x4 Twill
- 283 4x4 Twill

#### Κόψιμο Υφασμάτων

Στο πρώτο βήμα του πειράματος, κόβονται τα υφάσματα.

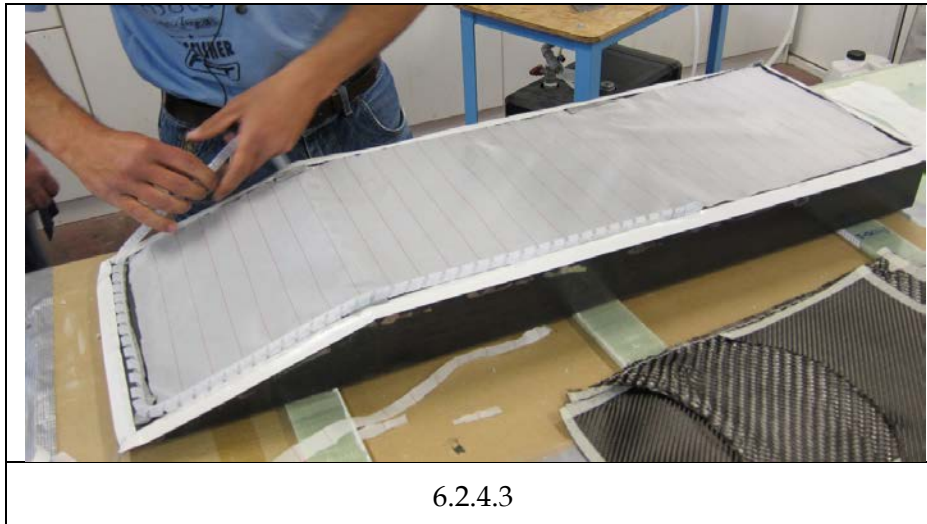


Στο σχήμα 6.2.4.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία των δύο ενισχύσεων που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το πέδιλο. Είναι αποδεδειγμένο πως η συγκεκριμένη διαμόρφωση (καμπυλοειδής-half lunate in), οδηγεί σε εξομάλυνση των τάσεων στην ενίσχυση-οπότε και στο πέδιλο γενικότερα- κατά τον πεδιλισμό και μειώνει ριζικά τις πιθανότητες σπασίματος της λεπίδας.

## Προετοιμασία καλουπιού

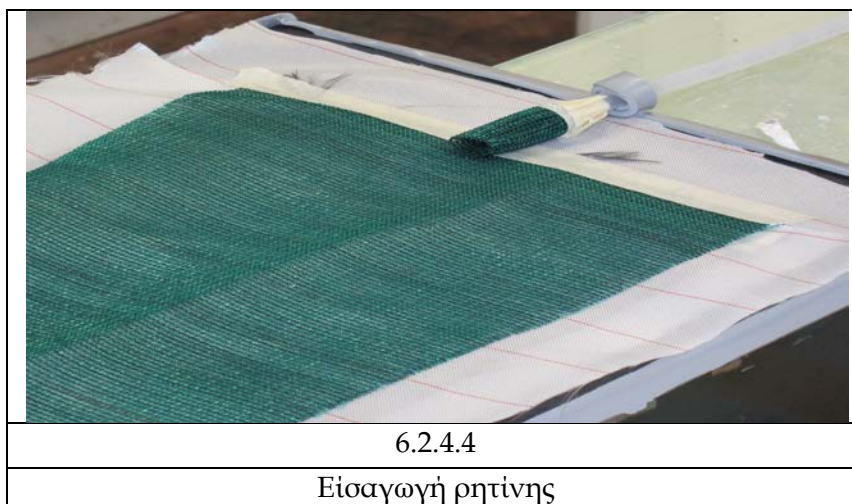
Ακολουθεί η προετοιμασία του καλουπιού. Τα βήματα εδώ είναι ίδια ακριβώς με αυτά της κατασκευής του πρώτου πέδιλου(σχήματα 6.4.3.5-6.4.3.6).

Εν συνεχεία, τοποθετούνται τα σωληνάκια των κυκλωμάτων αναρρόφησης και έγχυσης ρητίνης(σχήμα 6.2.4.3).



Ο σωλήνας του κυκλώματος αναρρόφησης είναι και εδώ σπιδράλ, μορφής «Π» και εκτείνεται περίπου στα δύο τρίτα του μήκους του καλουπιού(σχήμα 6.2.4.3).

Ακολουθεί η τοποθέτηση του σωλήνα εισόδου της ρητίνης, ο οποίος σε αντίθεση με το πρώτο πείραμα, δεν είναι μορφής «Τ», αλλά είναι η απόληξη του σωλήνα έγχυσης της ρητίνης(σχήμα 6.2.4.4).



Ο σωλήνας έγχυσης της ρητίνης σταθεροποιείται στο καλούπι με χρήση tucky tape και τον τυλίγουμε εξωτερικά με πλέγμα διευκόλυνσης της ροής(infusion mesh).

Η στρατηγική έγχυσης ρητίνης διαφέρει σε σχέση με το πρώτο πείραμα αλλά όπως διαπιστώνεται σχετικά με το μέτωπο ροής, οι δύο παραλλαγές της έγχυσης είναι εξίσου αποτελεσματικές.

Συγκεκριμένα δεν επιλέγεται τώρα σωληνάκι τύπου «Τ», αφού θεωρείται πως το πλάτος του δοκιμίου είναι αρκετά μικρό και κάτι τέτοιο θα ήταν περιττό. Η απόληξη του σωλήνα ρητίνης «ντύνεται» με infusion mesh, γεγονός που όπως αποδεικνύεται, επιταχώνει τη μετάβαση της ρητίνης από το σωλήνα στα υφάσματα. Επίσης επιβεβαιώνεται η μη ανάγκη για ύπαρξη σωλήνα τύπου «Τ», αφού τα προφίλ των μετώπων ροής της ρητίνης στα δύο πειράματα είναι σχεδόν πανομοιότυπα.

#### Τοποθέτηση Υφασμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει τα προηγούμενα βήματα, είμαστε πλέον έτοιμοι να τοποθετήσουμε τα ανθρακοϋφάσματα καθώς και τα υπόλοιπα υφάσματα (peel ply, infusion mesh) πάνω στο καλούπι (σχήματα 6.4.3.10-6.4.3.12).

Η σειρά τοποθέτησης των διαφόρων υφασμάτων είναι η ίδια με αυτή του πρώτου πειράματος (με εξαίρεση βέβαια τα ανθρακοϋφάσματα)

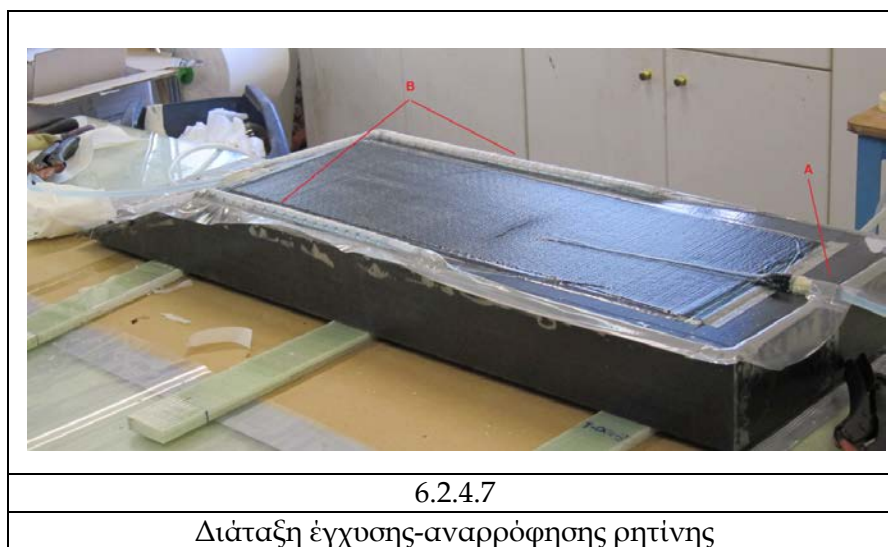
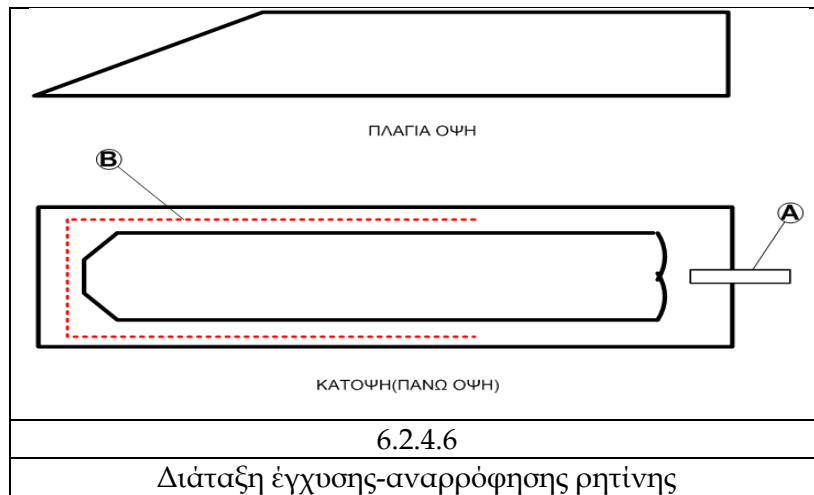
Μετά την τοποθέτηση της πρώτης στρώσεως peel ply ακολουθεί η τοποθέτηση των ανθρακουφασμάτων (σχήμα 6.2.4.5) από καλούπι και προς τα πάνω:

- A. 245 Plain
- B. 245 Plain (ενίσχυση μέχρι τα 25 εκατοστά)
- C. 420 Twill (ενίσχυση μέχρι τα 40 εκατοστά)
- D. 283 Twill (δύο στρώσεις)



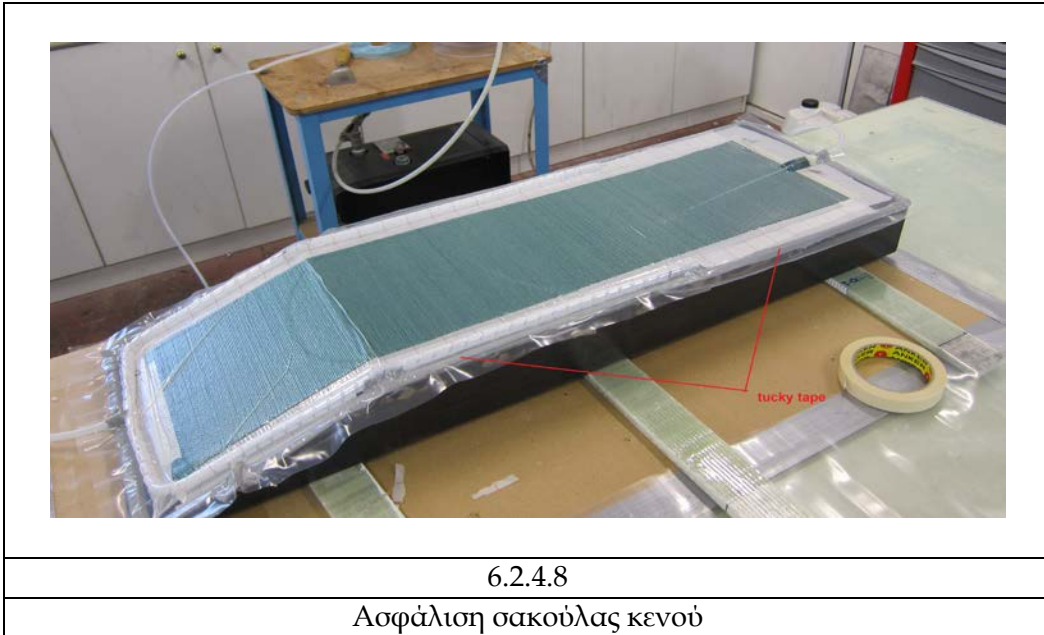
#### Σακούλα Κενού (vacuum bag), διάταξη έγχυσης

Στα σχήματα 6.2.4.6, 6.2.4.7, φαίνεται η διάταξη του συστήματος έγχυσης-αναρρόφησης του πειράματος.



Όπως τονίστηκε και προηγουμένως, η στρατηγική έγχυσης είναι διαφορετική σε αυτό το πείραμα και δεν χρησιμοποιείται σπράλ σωληνάκι έγχυσης, απλά και μόνο η απόληξη του σωλήνα που καταλήγει στο δοχείο ρητίνης.

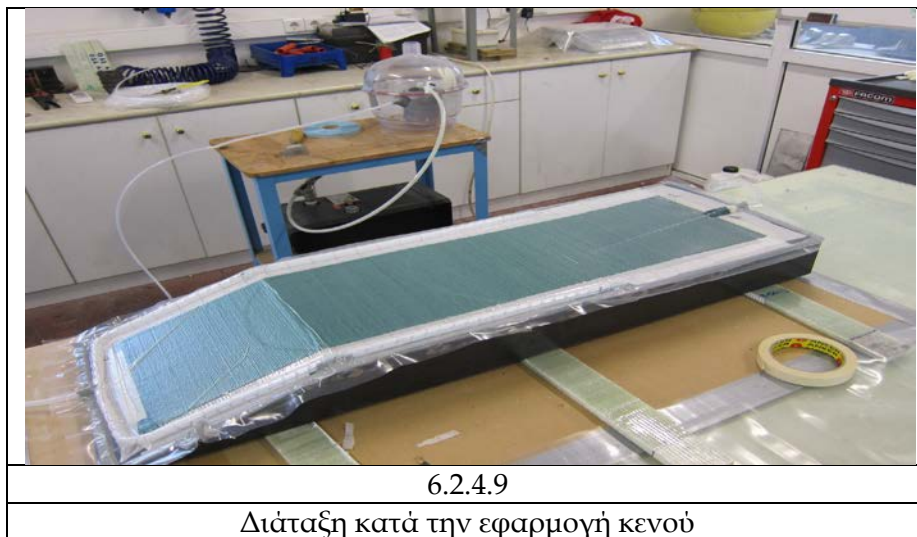
Το σημείο A στο σχήμα 6.2.4.7, αντιπροσωπεύει το κανάλι έγχυσης της ρητίνης, ενώ το B είναι η αναρρόφηση του κυκλώματος.



### Εφαρμογή κενού

Αφού τοποθετηθεί η ειδική τοιμπίδα («σκόλα»), είμαστε έτοιμοι πλέον για την εφαρμογή του κενού στη διάταξη μας (σχήμα 6.2.4.9).

Τονίζεται πως δεν συνδέουμε το δοχείο ρητίνης με το κύκλωμα, αφού εφαρμόζοντας κενό τώρα, ελέγχουμε το κύκλωμα μας για διαρροές σε πρώτη φάση και δεν ξεκινούμε ακόμα την έγχυση.



Η αντλία κενού θέτεται σε λειτουργία και η σακούλα κενού αρχίζει να συμπιέζεται.

Οι ενέργειες που γίνονται κατά την εφαρμογή κενού, είναι οι ίδιες με αυτές του πρώτου πειράματος.

**Το επίπεδο κενού που θα χρησιμοποιηθεί και εδώ, είναι 0.86 bar.**

## Υπολογισμοί Βάρους Υφασμάτων - Ρητίνης- Σκληρυντή

Έχοντας ολοκληρώσει τον έλεγχο διαρροών και την εφαρμογή κενού, ακολουθούν οι υπολογισμοί βάρους των υλικών της έγχυσης εν κενώ. Για το δεύτερο πέδιλο, υπενθυμίζεται η διάταξη των υφασμάτων, ξεκινώντας από το καλούπι και προς τα πάνω:

245 Plain

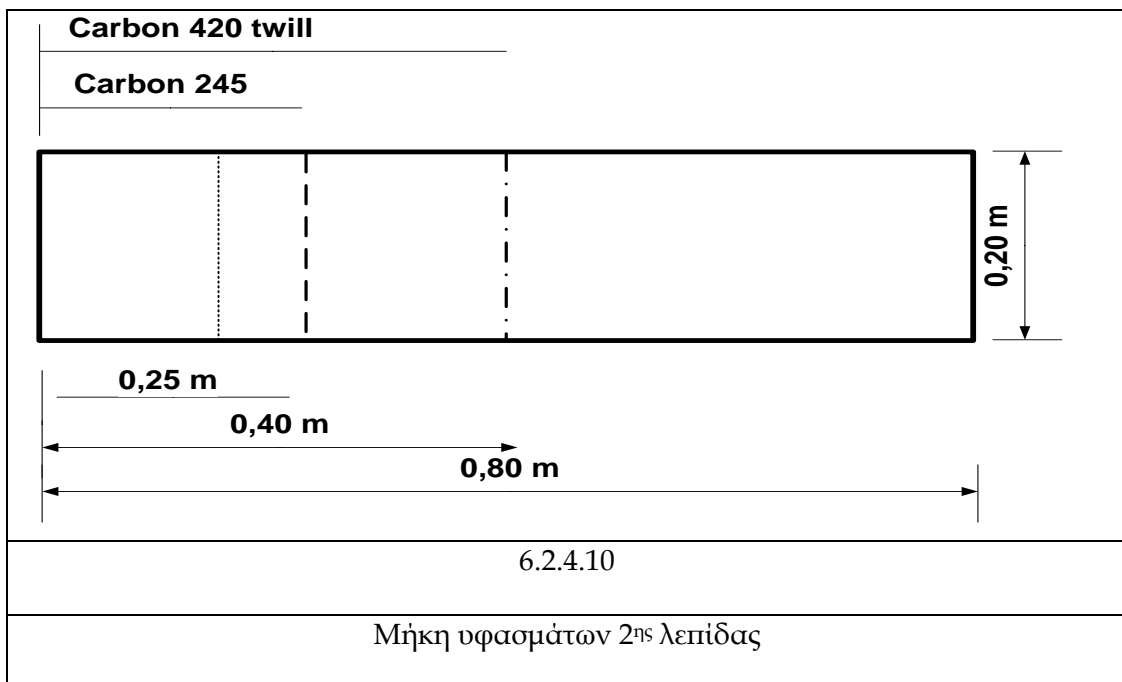
245 Plain(ενίσχυση)

420 Twill (ενίσχυση)

283 Twill

283 Twill

Ακολουθεί ο υπολογισμός των βαρών των υφασμάτων για την συνολική επιφάνεια του τεμαχίου(Πίνακας 6.2.4.Α). Τονίζεται πως το ύφασμα 420 που χρησιμοποιείται ως ενίσχυση, είναι το μισό σε μήκος(400 mm) από τα υπόλοιπα υφάσματα. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για το 245, στα 25 εκατοστά(σχήμα 6.2.4.10):





Κωδικός	GSM(grams/m <sup>2</sup> )	Επιφάνεια Στρώσεως(m <sup>2</sup> )	Βάρος Στρώσεως(grams)
245 Plain	245	0,2x0,8=0,16	245x0,16=39,2
245 Plain	245	0,2x0,25=0,05	283x0,16=12,25
420 Twill	420	0,2x0,4=0,08	420x0,08=33,6
283 4x4 Twill	283	0,2x0,8=0,16	283x0,16=45,28
283 4x4 Twill	283	0,2x0,8=0,16	283x0,16=45,28
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ</b>			175,61grams
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.4.A			

Η ρητίνη που χρησιμοποιείται σε αυτό το πείραμα, είναι η ίδια με του πρώτου πειράματος και τα χαρακτηριστικά της είναι ήδη γνωστά.

Έχοντας ως δεδομένο την αναλογία βάρους μεταξύ ρητίνης-σκληρυντή, μπορούμε να υπολογίσουμε το βάρος τους με βάση πάντα και το βάρος των ανθρακουφασμάτων(Πίνακας 6.2.4.B). Τονίζεται πως το βάρος της ρητίνης θα είναι και τώρα παραπάνω από αυτό των υφασμάτων, ως συντελεστής ασφαλείας για την έγχυση:

<b>Βάρος Υφασμάτων</b>	175,61 grams
<b>Βάρος Ρητίνης</b>	200 grams
<b>Βάρος Σκληρυντή</b>	(40x200)/100=80 grams
<b>Βάρος Μείγματος</b>	200+80=280 grams
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.4.B	

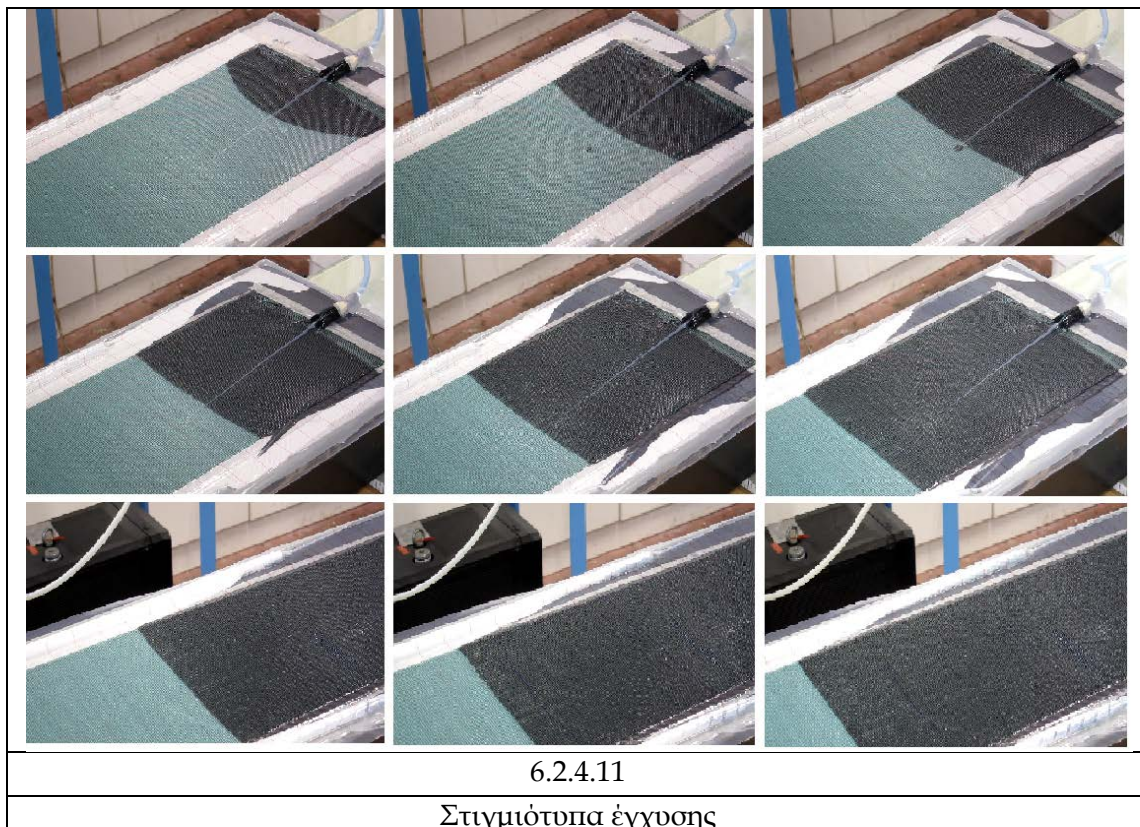
Αφού είναι γνωστά πλέον τα βάρη ρητίνης και σκληρυντή, εισάγουμε ρητίνη σε πλαστικό δοχείο, ευρισκόμενο πάνω σε ηλεκτρονική ζυγαριά, έως ότου φτάσουμε στο επιθυμητό βάρος. Εν συνεχεία επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία σε άλλο δοχείο για τον σκληρυντή και αφού πάρουμε τα επιθυμητά γραμμάρια, αναμειγνύουμε την ρητίνη και τον σκληρυντή και ανακατεύουμε γρήγορα για μικρό χρονικό διάστημα(περί τα 4 λεπτά).

## 7. Έγχυση σε κενό

Συνδέουμε το δοχείο της ρητίνης με το κύκλωμα και αφαιρούμε την τομπίδα («σκύλα»).

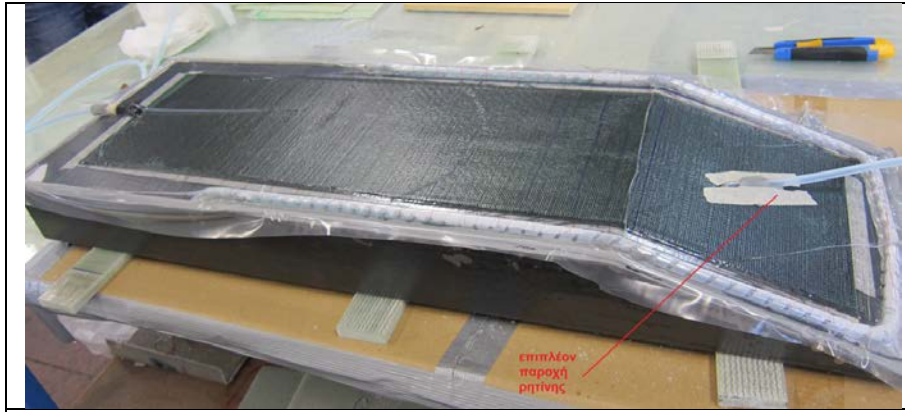
Η ρητίνη λόγω της διαφοράς πίεσεως αρχίζει και ρέει από το σωληνάκι έγχυσης προς το καλούπι, ξεκινώντας τον εμποτισμό των υφασμάτων.

Ακολουθούν στιγμιότυπα της έγχυσης(σχήμα 6.2.4.11) :



Στο 25<sup>ο</sup> λεπτό από την έναρξη της έγχυσης και ενώ το μέτωπο της ρητίνης βρισκόταν πάνω από την ενίσχυση 420(περίπου 45 εκατοστά από το σημείο έγχυσης της, αφού εξακριβώθηκε πως ο ρυθμός κινήσεως(ταχύτητα του μετώπου) ήταν σαφώς μειωμένος στην συγκεκριμένη περιοχή(λόγω και πάλι του πλέγματος διευκόλυνσης της ρητίνης), αποφασίστηκε να προστεθεί νέα παροχή ρητίνης στην υπό κλίση επιφάνεια του πέδιλου.

Αυτό έγινε χωρίς την διακοπή της διαδικασίας. Προετοιμάστηκε νέο δοχείο με την κατάλληλη αναλογία ρητίνης-καταλύτη και ανοίχτηκε με μεγάλη ταχύτητα οπή σε κεντρικό σημείο της επιφάνειας υπό κλίση. Τοποθετήθηκε το σωληνάκι και μονώθηκε περιμετρικά με την χρήση χαρτοταινίας(σχήμα 6.2.4.12).



6.2.4.12

Επιπλέον παροχή ρητίνης

Η παροχή ρητίνης πλέον εφαρμόζοταν από δύο σημεία , έως ότου ολοκληρώθηκε ο πλήρης εμποτισμός του δοκιμίου με απόλυτη επιτυχία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

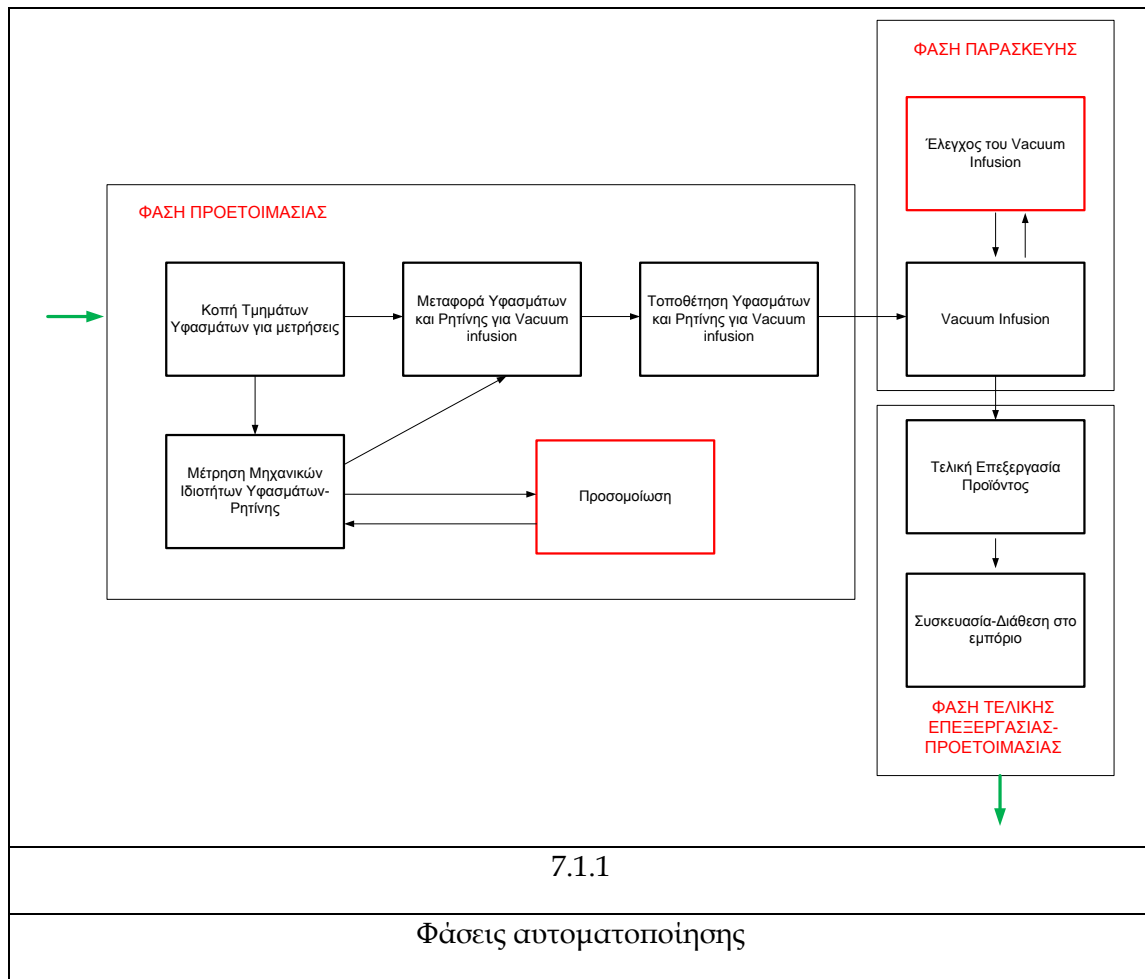
### Δυνατότητες αυτοματοποίησης της κατασκευής λεπίδων

Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής ενός προϊόντος από σύνθετα υλικά, ανεξάρτητα από την μέθοδο κατασκευής, πρέπει να ελεγχθούν ορισμένες παράμετροι, οι οποίες θα οδηγήσουν τελικά στην παραγωγή προϊόντων τα οποία θα είναι πανομοιότυπα και θα πληρούν ένα σύνολο από χαρακτηριστικά τα οποία θα έχουν εκλεχθεί από τον κατασκευαστή με ελάχιστη μεταξύ τους απόκλιση.

#### 7.1 Φάσεις Διαδικασίας Αυτοματοποίησης<sup>[9], [10]</sup>

Γενικά οι παράμετροι εντάσσονται σε ορισμένες κατηγορίες ανάλογα με την φάση της κατασκευής του προϊόντος. Έτσι για την περίπτωση του πέδιλου αλλά και γενικότερα έχουμε τρεις φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας:

- Η φάση της προετοιμασίας των υλικών για την διαδικασία παρασκευής
  
- Η φάση της παρασκευής
  
- Η τελική επεξεργασία και προετοιμασία του προϊόντος που θα διατεθεί στο εμπόριο



Στο σχήμα 7.1.1, τα πράσινα βέλη, δηλώνουν εισοδο-έξοδο και τα κόκκινα πλαίσια δηλώνουν σημεία ανάδρασης της όλης παραγωγικής διαδικασίας.

#### Φάση Προετοιμασίας υλικών<sup>[9]</sup>

Οι κυριότερες παράμετροι στη φάση αυτή- και εφόσον βέβαια αναφερόμαστε σε προϊόν από σύνθετα υλικά- είναι οι ακόλουθες:

##### *Κοπή Τμημάτων Υφασμάτων Για Μετρήσεις*

Είναι το πρώτο στάδιο της κατασκευαστικής διαδικασίας. Τα ανθρακοϋφάσματα διατίθενται σε μεγάλα ρολά. Αυτά ξετυλίγονται και τμήματα κατάλληλων διαστάσεων, τα οποία στη συνέχεια θα υποστούν δοκιμές προκειμένου να καθοριστούν πλήρως οι μηχανικές τους ιδιότητες. Τα υφάσματα κόβονται από τεχνικούς με χρήση ειδικών ψαλιδιών ή κοπιδίων κοπής ανθρακοϋφασμάτων και στη συνέχεια υπόκεινται σε δοκιμές.

## Μέτρηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Υφασμάτων-Ρητίνης

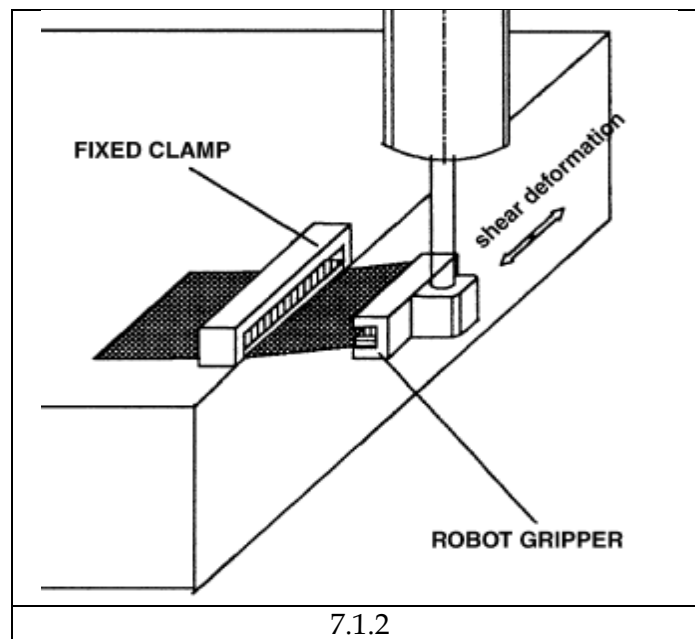
Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης(μέτρα ελασικότητας, αντοχή σε κάμψη κτλ), συμβουλευόμαστε τα datasheets του προμηθευτή της ρητίνης. Αυτά είναι συνήθως αρκετά ικανοποιητικά για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Αναφορικά με τα υφάσματα, τονίζεται πως η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία μόνο φορά-ώστε να προκύψουν τα δεδομένα για την προσομοίωση- και όχι για το υλικό του κάθε πέδιλου που θα κατασκευαστεί, εφόσον βέβαια πρόκειται για τον ίδιο τύπο υφασμάτων, δηλαδή ουσιαστικά για το ίδιο μοντέλο πέδιλου.

Έτσι τα υφάσματα του «πρωτότυπου» πέδιλου αφού κοπούν, υπόκεινται διάφορους ελέγχους:

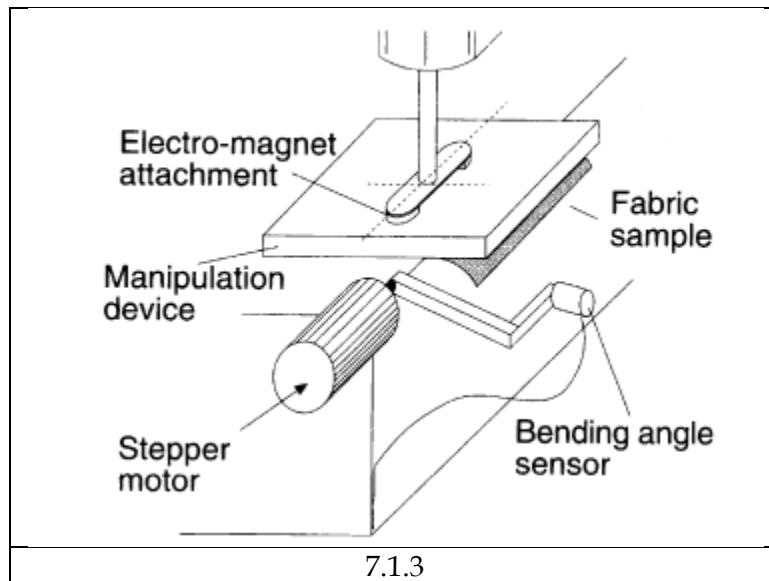
-Έλεγχος διάτμησης:

Ο συγκεκριμένος έλεγχος μετράει την έσω-στρωματική διατμητική ακαμψία και το όριο διάτμησης.



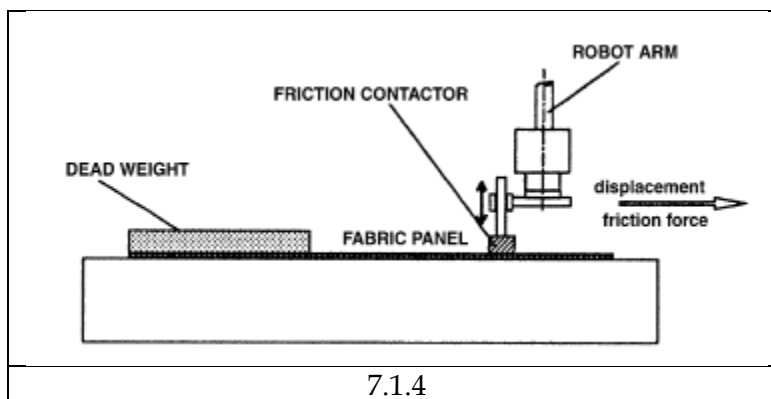
-Έλεγχος κάμψης

Από τον συγκεκριμένο έλεγχο παράγεται μία καμπύλη ροπής-καμπυλότητας για το ύφασμα που ελέγχεται κάθε φορά. Τα νούμερα που παράγονται , χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της έγχυσης σε κενό.



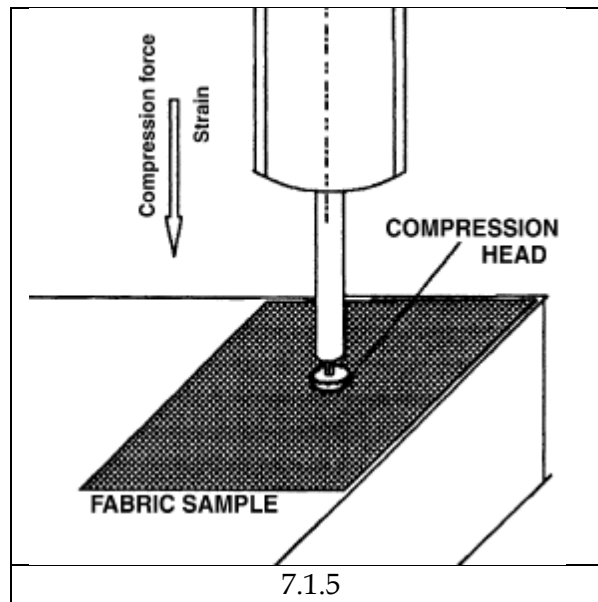
#### -Έλεγχος τριβής

Ο συγκεκριμένος έλεγχος μετράει διατμητικές δυνάμεις ή δυνάμεις τριβής μεταξύ υφάσματος – επιφάνειας εργαλείου. Τα νούμερα που προκύπτουν, χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας του πέδιλου(προσομοίωση σε σώμα ρευστού), εφόσον αυτή γίνει.



#### -Έλεγχος εφελκυσμού

Ο συγκεκριμένος έλεγχος γίνεται για να ορισθούν τα μέτρα ελαστικότητας κατά τον εφελκυσμό, η επιμήκυνση καθώς και άλλα στοιχεία που θα κάνουν ρεαλιστικότερη την προσομοίωση που θα ακολουθήσει.



### Προσομοίωση

Το συγκεκριμένο στάδιο της φάσης προετοιμασίας των υλικών είναι από τα πιο καθοριστικά. Είναι ουσιαστικά ένα στάδιο ελέγχου της γενικότερης διαδικασίας κατασκευής του πέδιλου, αφού εφόσον αυτό δεν παράξει τα επιθυμητά αποτελέσματα και ως εκ τούτου τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του πέδιλου, θα πρέπει να γίνουν εκ νέου ρυθμίσεις-αλλαγές στην διαδικασία παρασκευής (υφάσματα, ρητίνη, έλεγχος των μηχανημάτων μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων). Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση βάσει μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών καθώς και επιθυμητών χαρακτηριστικών του προς κατασκευή πέδιλου.

### Μεταφορά υφασμάτων και ρητίνης

Για την αυτοματοποιημένη μεταφορά των υφασμάτων στο μέρος όπου θα πραγματοποιηθεί η φάση της παρασκευής, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι:

- αρπάγες κενού
- πλάκες τριβής
- ηλεκτροστατικές αρπάγες
- απλή μεταφορά με δαγκάνες οι οποίες θα κρατάνε το ύφασμα από μία άκρη του.
- Επίσης υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος χρησιμοποιεί κενό και διαθέτει και δαγκάνα.

### Τοποθέτηση Υφασμάτων -Ρητίνης<sup>[9],[10]</sup>

Η τοποθέτηση των υφασμάτων είναι αν όχι το βασικότερο, ένα από τα βασικότερα στάδια της διαδικασίας της έγχυσης σε κενό. Δεν έχει αναπτυχθεί κάποια αποτελεσματική τεχνική για την πλήρη αυτοματοποίηση του συγκεκριμένου σταδίου της παραγωγής. Αυτό οφείλεται κυρίως στην φύση και τη γεωμετρία των ανθρακοϋφασμάτων.

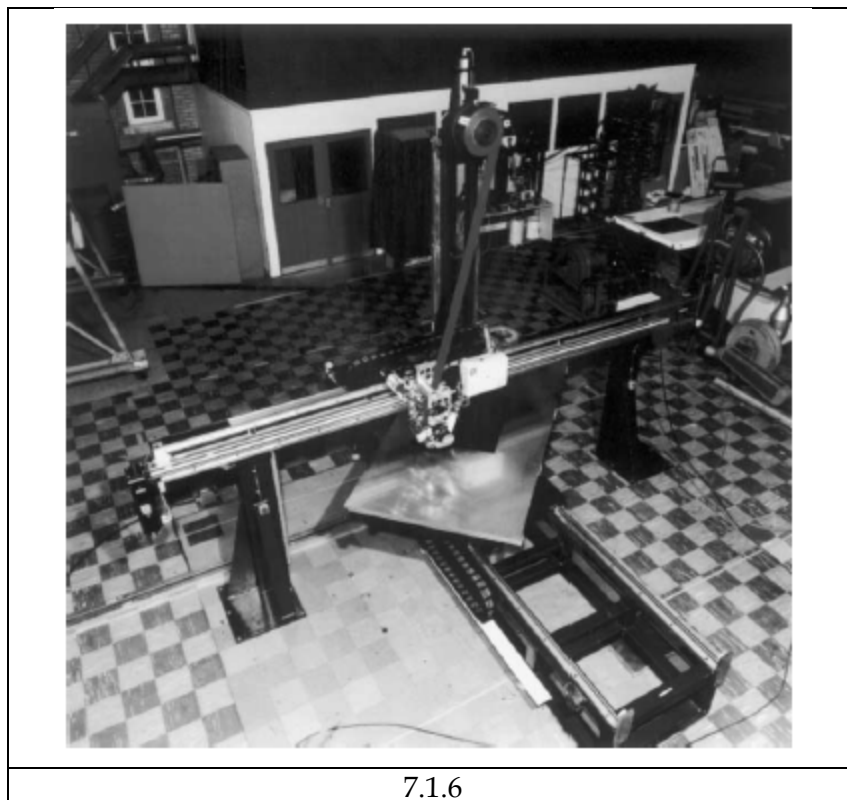


Τα συγκεκριμένα υφάσματα «ζαρώνουν» εύκολα και έτσι για την σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση τους στο καλούπι, είναι αναγκαίος ο ανθρώπινος παράγοντας. Τα υφάσματα αυτά πριν τον εμποτισμό τους με ρητίνη είναι πολύ ευαίσθητα στο χειρισμό τους και έτσι η τοποθέτηση τους στο καλούπι με το σωστό προσανατολισμό μεταξύ τους, είναι μία διαδικασία που δεν είναι υλοποιήσιμη(σε ικανοποιητικό βαθμό τουλάχιστον και αναφορικά με καταδυτικές λεπίδες υψηλής ποιότητας) από μηχανισμούς.

Η δυσκολία, εντοπίζεται κυρίως στο γεγονός ότι τα ανθρακονήματα βρίσκονται σε μορφή υφασμάτων, αφού έχουν αναπτυχθεί ρομποτικοί μηχανισμοί και μηχανές τύπου κασέτας(tape layers) για την τοποθέτηση λωρίδων ανθρακονημάτων πάνω σε καλούπι. Βέβαια κάτι τέτοιο δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για την έγχυση σε κενό αλλά για άλλες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα για την RTM και για επίπεδης γεωμετρίας καλούπια. Για καλούπια με διπλή καμπυλότητα, απαιτείται επιπρόσθετα το πέρασμα των ανθρακονημάτων με μαλακά ρολά, προκειμένου να πάρουν αυτά τη μορφή του καλουπιού με αμφίβολα πάντα αποτελέσματα για σύνθετης γεωμετρίας καλούπια.

Στο σχήμα 7.1.6, παρουσιάζεται ένας μηχανισμός τοποθέτησης τύπου BTP(Bindered Tape Placement)των ανθρακονημάτων σε καλούπι.

Οι περιορισμοί βέβαια είναι τέτοιοι, που δεν επιτρέπουν την χρησιμοποίηση αυτών των μηχανημάτων για την έγχυση σε κενό και την κατασκευή πέλδων. Προφανές είναι, πως η λειτουργία τους εξυπηρετεί τη χρήση μόνο μονοδιευθυντικών και όχι Twill υφασμάτων.



Επομένως συμπερασματικά τονίζεται η αναγκαιότητα ύπαρξης τεχνικού σε αυτό το στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας.

## Φάση Παρασκευής

Οι παράμετροι της φάσης παρασκευής του πέδιλου είναι η καθεαυτή διαδικασία της έγχυσης σε κενό, η οποία και έχει αναλυθεί πλήρως σε προηγούμενο κεφάλαιο και ο έλεγχος της έγχυσης, η αποτελεσματικότητα του οποίου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την δυνατότητα αυτοματοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας.

### *Έλεγχος της έγχυσης σε κενό*

Οι λόγοι ύπαρξης ελέγχου της διαδικασίας έγχυσης σε κενό, είναι καταρχάς η αυτοματοποίηση της κατασκευής του πέδιλου και κατά δεύτερον η δημιουργία ενός προϊόντος με καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως αυτά έχουν ορισθεί από τον κατασκευαστή.

Ο έλεγχος θα πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο και να ικανοποιεί την τήρηση βασικών παραμέτρων της έγχυσης(θερμοκρασία και πίεση).

Έτοι για παράδειγμα θα πρέπει να ελέγχεται:

- Η θερμοκρασία και η κατανομή της θερμότητας κατά την έγχυση σε κενό
- Οι θερμοκρασιακές παράμετροι της έγχυσης να είναι ομοιόμορφοι σε όλο το τεμάχιο.
- Η πίεση να διατηρείται στα επίπεδα που έχουν προκαθοριστεί.
- Ο συγκέντρωση φυσαλίδων αέρα να είναι ελάχιστη αν όχι μηδενική.
- Να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερος και ομοιόμορφος εμποτισμός των υφασμάτων.

Ο έλεγχος των διαφόρων παραμέτρων και της τήρησης των επιθυμητών συνθηκών γίνεται με τη χρήση αισθητήρων.

Το χρησιμοποιούμενο σύστημα αισθητήρων θα πρέπει να πληρεί ορισμένες πολύ βασικές απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να μπορεί να μετρά με ακρίβεια και αξιοπιστία τα προκαθορισμένα φυσικά φαινόμενα(θερμοκρασία, πίεση)
- Το σύστημα των αισθητήρων θα πρέπει να διαθέτει επαρκή αριθμό αισθητήρων, προκειμένου να μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως και αντικειμενικά το παραγόμενο τεμάχιο ανά πάσα στιγμή στη φάση της παρασκευής.
- Το σύστημα των αισθητήρων δεν θα πρέπει να επηρεάζει την ακεραιότητα και τη λειτουργικότητα του συστήματος(καλούπι) στο οποίο θα βρίσκεται.
- Το σύστημα των αισθητήρων θα πρέπει να είναι στιβαρό.
- Το σύστημα των αισθητήρων δεν θα πρέπει να υπόκεινται σε φθορά λόγω επαφής με τα συστατικά της μεθόδου κατασκευής(π.χ. ρητίνη).
- Η τιμή του συστήματος αισθητήρων θα πρέπει να είναι ανάλογη του κόστους της κατεργασίας(στην περίπτωση μας, της έγχυσης σε κενό).

Τα είδη των συστημάτων αισθητήρων για τον έλεγχο της κατεργασίας είναι τυπικά δύο:

- εκείνα στα οποία οι αισθητήρες βρίσκονται σε απόσταση από το υλικό ενώ αυτό υπόκειται την επεξεργασία.

- εκείνα στα οποία οι αισθητήρες είναι ενσωματωμένοι στο υλικό και στη συνέχεια πρέπει να αφαιρεθούν.

*Είναι περισσότερο από προφανές, πως στην περίπτωση του πέδιλου αλλά και γενικότερα της έγχυσης σε κενό, χρησιμοποιούνται μη ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου.*

*Βέβαια το κύριο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων σε σχέση με τα άλλα, είναι πως για τη ανάλυση των σημάτων τους, απαιτούνται πιο περίπλοκοι υπολογισμοί και μεθοδολογίες.*

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων σε σχέση με τα ενσωματωμένα, είναι πως αυτά, επηρεάζονται λιγότερο ή και καθόλου από τις συνθήκες(πίεση, θερμοκρασία) της μεθόδου κατασκευής. Ένας αισθητήρας ενσωματωμένος στα ανθρακοϋφάσματα είναι πολύ πιο επιρρεπής σε λάθος μέτρηση, υπό την επίδραση της ρέουσας ρητίνης, από ότι ένας μη ενσωματωμένος.

Περαιτέρω ανάλυση των συστημάτων ελέγχου ξεφεύγει από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

Σημειώνεται πως η τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά κόρον για τον έλεγχο των κατεργασιών σύνθετων υλικών , βασίζεται σε αισθητήρες οπτικών ινών. Άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι η εκπομπή υπερήχων , οι αισθητήρες διηλεκτρικού, οι μικρομηχανικοί αισθητήρες και οι αισθητήρες μετώπου ροής(flow front).

#### Φάση τελικής επεξεργασίας-προετοιμασίας<sup>[11],[12]</sup>

Στην τελική φάση της παραγωγής του προϊόντος, αυτό θα τοποθετηθεί σε μηχανή CNC, όπου και θα πάρει τις τελικές του(net shape) διαστάσεις με τριμάρισμα (trimming) και στη συνέχεια θα συσκευαστεί(εφόσον υπάρχει τέτοια απαίτηση) και θα δοθεί στον καταναλωτή. Η τελική επεξεργασία στο πέδιλο γίνεται προκειμένου να αφαιρεθεί το πρόσθετο υλικό και να επιτευχθεί καλή ποιότητα επιφάνειας.

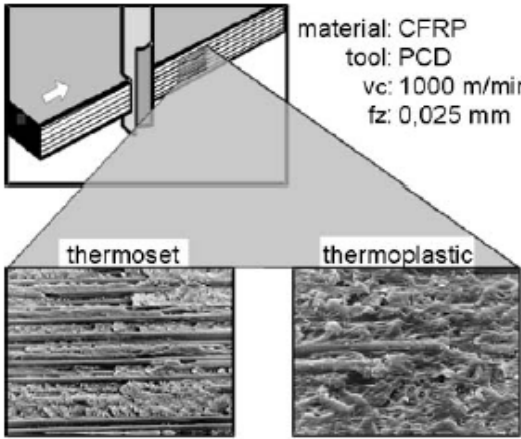

Κατά το milling των σύνθετων υλικών από ανθρακοϋφάσματα, το υλικό που αφαιρείται συγκριτικά με τον συνολικό όγκο του τεμαχίου είναι πολύ λίγο σε σχέση με αυτό που αφαιρείται στα μέταλλα για παράδειγμα. Οι καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις παραμέτρους της διαδικασίας milling που θα γίνει στο CNC, είναι ο τύπος των χρησιμοποιούμενων υφασμάτων, η δομή της ενίσχυσης(σχετική γωνία υφασμάτων) και ο λόγος όγκου της ρητίνης( $V_m$ ).

Αναφορικά με την εκλογή του κοπτικού εργαλείου, αυτή εστιάζεται σχεδόν αποκλειστικά στην εκλογή του κατάλληλου υλικού του κοπτικού, και όχι τόσο στη γεωμετρία του.

Η κοπτική ακμή θα πρέπει να είναι ανθεκτική σε chipping(αποτρίμματα) λόγω της μεγάλης αντοχής που επιδεικνύουν τα ανθρακονήματα.

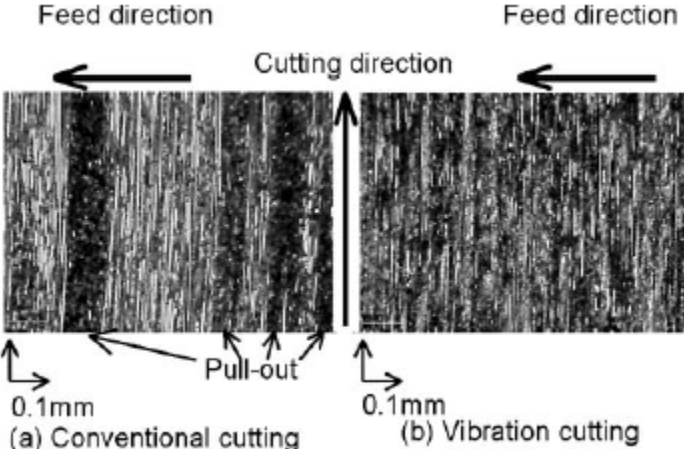
Έτσι συνηθίζεται η χρήση PCD υλικών(PolyCrystalline Diamond) για την κεφαλή του κοπτικού εργαλείου. Τα κεραμικά υλικά αποφεύγονται λόγω της χαμηλής θερμικής τους αγωγιμότητας αλλά και της ψαθυρότητας και της μικρής τους αντοχής σε κραδασμούς.

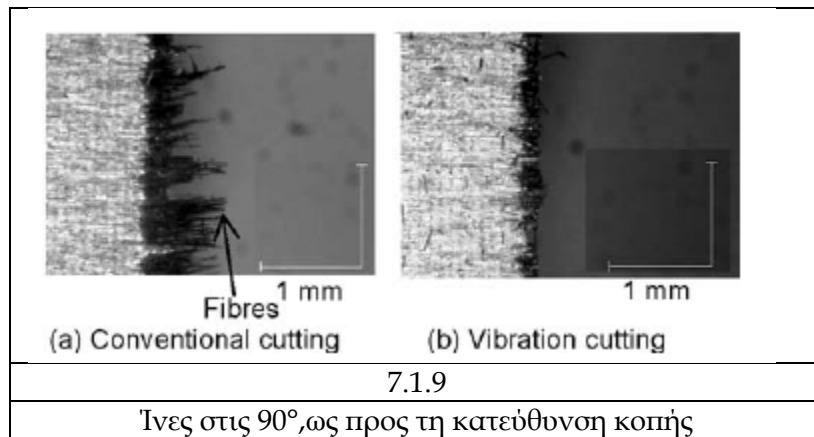
Στο σχήμα 7.1.7, παρουσιάζεται η ποιότητα επιφάνειας μετά την κατεργασία τριμαρίσματος με χρήση κοπτικού από διαμάντι(PCD) για σύνθετα(ανθρακονημάτων) με θερμοσκληρυνόμενες και θερμοπλαστικές ρητίνες. Επιπλέον παρουσιάζονται τυπικές περιπτώσεις κοπτικών κεφαλών για PCD, καθώς και τυπικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατεργασίας για PCD.

	
7.1.7	
Ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας	Κοιπτικές κεφαλές

Επίσης προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική κοπή των άκρων των υφασμάτων με ένα πέρασμα και με όσο το δυνατόν μικρότερη δημιουργία ατέλειας στη μορφή των υλικών, αναγκαία είναι η μεγάλη αιχμηρότητα της κοιπτικής ακμής.

Άλλες τεχνικές κοπής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και δεν προάγουν την ανάπτυξη θερμότητας στην περιοχή κοπής, είναι η κοπή δέσμης νερού και η κοπή με υπέρηχους, η ανωτερότητα της οποίας (έναντι της συμβατικής κοπής) παρουσιάζεται στα σχήματα 7.1.8, 7.1.9.

	
7.1.8	
Ίνες στις 0°, ως προς τη κατεύθυνση κοπής	



Τέλος, αναφορικά με τη γεωμετρία των κοπτικών ακμών κατά την κοπή ανθρακούφασμάτων, αυτή είναι αντίστοιχη με εκείνη των μετάλλων λόγω κυρίως της ψαθυρής φύσης των ανθρακονημάτων.

## 7.2 Αυτοματοποίηση και καταδυτικά πέδιλα

Στην παράγραφο που προηγήθηκε, αναφέρθηκαν ορισμένες αρχές και τεχνικές για την αυτοματοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας κατασκευής καταδυτικών πέδινων.

Τονίζεται πως πλήρης αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας δεν προτείνεται και θεωρητικά δεν μπορεί να υπάρξει, αφού η φύση της διαδικασίας και η πληθώρα των κατασκευαστικών παραμέτρων που εμπεριέχονται, καθιστούν κάτι τέτοιο πολύ δύσκολο ή και αδύνατο με την υπάρχουσα τεχνολογία, για το συγκεκριμένο προϊόν.

Παρόλα αυτά στο βαθμό αυτοματοποίησης που μπορεί να επιτευχθεί, η διαδικασία θα ήταν η ακόλουθη:

### **Βήμα 1<sup>ο</sup>**

Στο βήμα αυτό τα υφάσματα κόβονται είτε σε πατρόν είτε με χρήση χαρτοταινίας από εξειδικευμένους τεχνικούς.

Μπορούν είτε να κοπούν μικρά τμήματα υφασμάτων, εφόσον πρέπει να καθοριστούν βάσει μετρήσεων οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, είτε παραλληλόγραμμα που προσεγγίζουν τις τελικές διαστάσεις του πέδινου που θα παραχθεί (αφήνοντας έτσι περιθώριο για το τελικό trimming).

### **Βήμα 2<sup>ο</sup>**

Στο βήμα αυτό, θα μεταφερθούν τα κομμένα τμήματα των υφασμάτων στον χώρο όπου βρίσκεται το καλούπι. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση κάποιων από τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν (αρπάγες, ηλεκτροστατικές πλάκες, ρομποτικοί μηχανισμοί).

### **Βήμα 3<sup>ο</sup>**

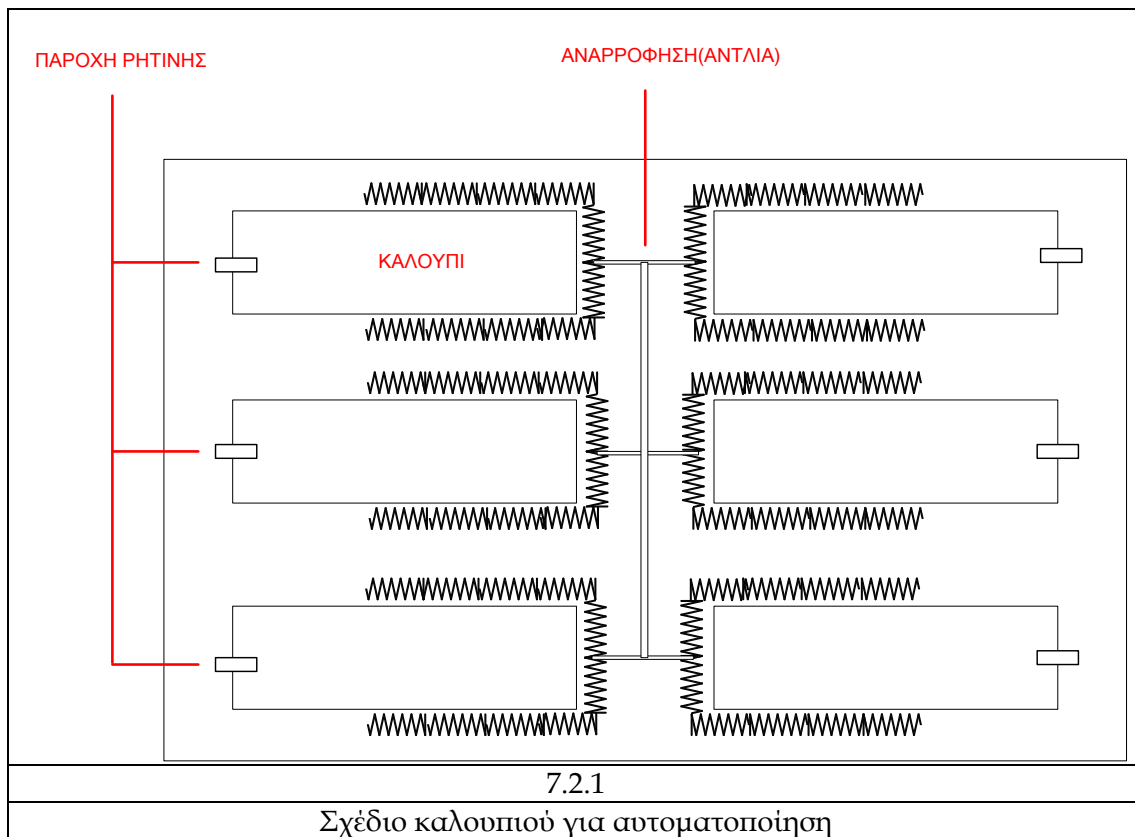
Στο βήμα αυτό θα τοποθετηθούν τα υφάσματα πάνω στο καλούπι, από έμπειρους τεχνικούς, σύμφωνα με προκαθορισμένο τρόπο (προσανατολισμός, στρώσεις κτλ.).

Επιπλέον σε αυτό το στάδιο θα τοποθετηθούν και τα αναλώσιμα υφάσματα της έγχυσης σε κενό, όπως το infusion mesh και η σακούλα κενού. Για την τοποθέτηση των υλικών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοματοποιημένες διατάξεις υπό την εποπτεία πάντα των τεχνικών.

#### Βήμα 4ο

Στο βήμα αυτό θα πραγματοποιηθεί η έγχυση σε κενό.

Ένα τυπικό σχέδιο καλούπιού για έξι πέδιλα, που βοηθάει στην αύξηση της παραγωγής, παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2.1.



Σε κάθε καλούπι θα υπάρχουν αισθητήρες ελέγχου, οι οποίοι θα καταγράφουν την ροή του μετώπου της ρητίνης, καθώς και την πίεση και τη θερμοκρασία εντός της σακούλας κενού, πραγματοποιώντας μεταβολές στις συνθήκες όταν αυτό είναι αναγκαίο(αυξομείωση πίεσης κενού).

#### Βήμα 5ο

Στο βήμα αυτό θα αφαιρούνται τα πέδιλα από το καλούπι και θα πραγματοποιείται η θεραπεία τους, αρχικά σε συνθήκες δωματίου(θερμοκρασία, υγρασία) και στη συνέχεια σε ειδικούς φούρνους. Εδώ μπορούν να εφαρμοσθούν αυτοματοποιημένες μέθοδοι ελέγχου των συνθηκών που επικρατούν στον χώρο(αισθητήρες ελέγχου πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας). Επιπλέον η μεταφορά και η τοποθέτηση της λεπίδας σε φούρνο, για τη θεραπεία της, είναι δυνατόν να γίνεται με τη χρήση συμβατικών αυτοματοποιημένων διατάξεων μεταφοράς.

**Βήμα 6<sup>ο</sup>**

Σε αυτό το τελικό στάδιο της επεξεργασίας, το οποίο είναι και πλήρως αυτοματοποιημένο, τα πέλδια μεταφέρονται σε μηχανές CNC, όπου και υφίστανται επεξεργασία για την επίτευξη της τελικής τους μορφής. Η επεξεργασία αυτή είναι πλήρως αυτοματοποιημένη στα συγκεκριμένα μηχανήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, τόσο σε επίπεδο αυτοματοποίησης της γενικότερης διαδικασίας παραγωγής καταδυτικών λεπίδων, όσο και σε επίπεδο τεχνικής και αμιγούς κατασκευαστικής μεθόδου, μπορεί να διαπιστώσει κανείς, πως δεν υπάρχει αυστηρά προκαθορισμένη αποτελεσματική στρατηγική για την παραγωγή ποιοτικών λεπίδων κατάδυσης από σύνθετα υλικά.

Ωστόσο υπάρχουν κάποιες γενικές προτάσεις-κατευθύνσεις που θα πρέπει να εφαρμόζονται, προκειμένου να διασφαλίζεται ένα αρκετά καλό επίπεδο κατασκευής. Ένα άριστο επίπεδο κατασκευής θα επιτευχθεί- εάν αυτό βέβαια υφίσταται!- μόνο με την αποκλειστική αφοσίωση του κατασκευαστή σε αυτήν την κατεύθυνση, πράγμα πολυδάπανο τις περισσότερες φορές.

Για να στήσει λοιπόν κάποιος ένα σύστημα παραγωγής καταδυτικών λεπίδων, δίνοντας έμφαση στα διαφορετικά σχέδια (designs) αυτών, δηλαδή στη γεωμετρία λεπίδας, στα υφασμάτα ενίσχυσης καθώς και στη διάταξη και την διαφορετικότητα ως προς την ύφανση των εκάστοτε υφασμάτων από σύνθετα υλικά (συμπεριλαμβανομένων και αυτών από φάιμπεργκλας με έντονη χρήση τελευταία), προτείνονται τα ακόλουθα:

- Καταρχάς, θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα πακέτο λογισμικού για τη δυναμική μελέτη (πραγματικές συνθήκες) διαφόρων σχεδίων λεπίδων, καταλήγοντας έτσι σε διάφορα ικανοποιητικά σχέδια λεπίδων, ως προς την μορφή της ενίσχυσης, τον τύπο, ύφανση και την σχετική γωνία μεταξύ των ανθρακούφασμάτων.
- Αφού καταλήξει σε έναν αριθμό ικανοποιητικών σχεδίων βάσει της προσομοίωσης, θα πρέπει να κατασκευάσει ζευγάρια πατρών μεταλλικά, διαστάσεων προσεγγιστικών (σχετικά μεγαλύτερων) ως προς τις τελικές διαστάσεις της παραγόμενης λεπίδας (ορθογώνια παραλληλόγραμμα). Επίσης, θα πρέπει να κατασκευαστούν ζεύγη πατρών, ίδιων διαστάσεων και γεωμετρίας με αυτών της υφασμάτινης ενίσχυσης που θα χρησιμοποιηθεί. Σε αυτά τα πατρών θα τοποθετούνται και θα κόβονται αρχικά τα χρησιμοποιούμενα υφάσματα.
- Θα κατασκευάσει μεγάλα καλούπια (μέταλλικά ή από ειδικό γυαλί ή και φάιμπεργκλας), τα οποία θα δέχονται περισσότερες από μία προς κατασκευή λεπίδες, με σκοπό την ταυτόχρονη εκτέλεση της έγχυσης σε κενό, για επιτάχυνση της παραγωγής.
- Τα αναλώσιμα υφάσματα και υλικά γενικότερα, θα είναι προετοιμασμένα και δεν θα κόβονται επί τόπου, προκειμένου να μην καθυστερείται η παραγωγή τους. Η ποσότητα της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης ρητίνης θα είναι ήδη τοποθετημένη στα ειδικά δοχεία, από τα οποία θα αναρροφάται.
- Με το πέρας της έγχυσης σε κενό το καλούπι θα μεταφέρεται σε χώρο με ρυθμιζόμενες συνθήκες πίεσης-θερμοκρασίας-υγρασίας, βάσει προδιαγραφών, για την θεραπεία της ρητίνης.
- Εφόσον απαιτείται περαιτέρω θεραπεία, θα αφαιρούνται οι λεπίδες από τα καλούπια και θα υφίστανται την βάση προδιαγραφών θεραπεία σε ειδικό φούρνο.



- Οι λεπίδες που παρήχθησαν θα τοποθετούνται σε διπλά πατρόν, μορφής ίδιας με αυτήν της προς πώληση λεπίδας και θα κόβονται. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μηχανές CNC , εφόσον διαθέτουν τα κατάλληλα κοπτικά υλικά(PCD) και μεθόδους κοπής, για την κατεργασία τεμαχίων από σύνθετα υλικά.
- Θα ελέγχονται τέλος οι λεπίδες, ως προς την ποιότητα της μορφής και επιφανείας τους, τον σωστό εμποτισμό τους από τη ρητίνη, καθώς και προς την ακεραιότητα και τις τελικές διαστάσεις των ενισχύσεων που αυτές διαθέτουν.

Η εξέλιξη των σύνθετων υλικών καθώς και των λογισμικών σχεδιασμού και προσομοίωσης, κάνει επιτακτική την ανάγκη για συνύπαρξη προσομοίωσης και κατασκευαστικής μεθόδου των υλικών ,ούτως ώστε να οδηγείται η παραγωγή και το εμπόριο των λεπίδων, σε πιο βιώσιμα και αποδοτικά σχέδια για τα καταδυτικά πέδιλα, με σκοπό την βελτιστοποίηση τιμής- απόδοσης των προς πώληση προϊόντων. Επιπλέον το πλεονέκτημα που προσφέρει η προσομοίωση, έναντι των παραδοσιακών-εμπειρικών στρατηγικών κατασκευής λεπίδων, είναι ένα αρχικό μικρότερο κόστος κατασκευής και άρα μεσοπρόθεσμα μικρότερη τιμή πώλησης, αύξηση του υγιούς ανταγωνισμού και τελικά εξέλιξη της τεχνικής, καθώς και δυνατότητες συνυπολογισμού παραμέτρων που δεν θα ήταν εφικτό να εκτιμηθούν, με πειραματικές διατάξεις.

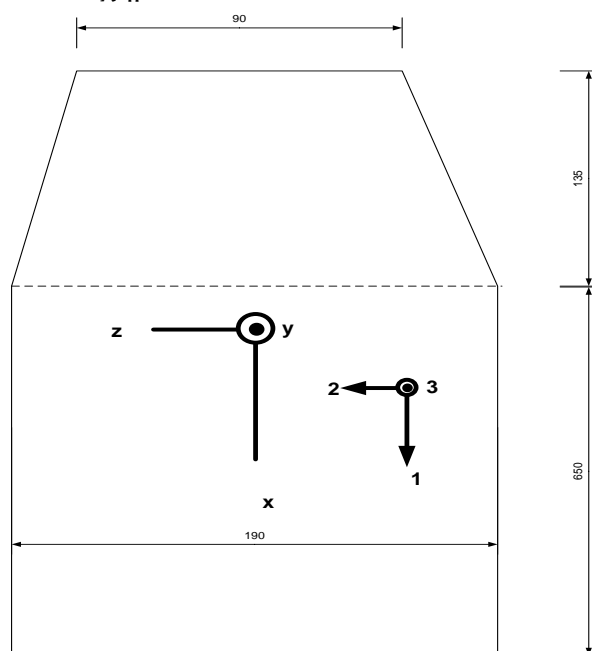
Άλλωστε δεν είναι τυχαίο το ότι πρωτοπόροι του χώρου κατασκευής καταναλωτικών προϊόντων αθλητισμού(BURTON, αμερικάνικη κατασκευάστρια εταιρεία σανίδων σνόουμπορντ) έχουν ήδη ενσωματώσει στην παραγωγή, πακέτα λογισμικού προσομοίωσης των προϊόντων τους(από το 2004).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Υπολογισμός Μηχανικών Ιδιοτήτων ανθρακοϋφασμάτων

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τις μηχανικές ιδιότητες του Πίνακα ..., παρουσιάζονται παρακάτω:

Η αντιστοιχία δεικτών (x,y,z,1,2,3) φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



$$V_m = 1 - V_f$$

$$E_1 = n_L * n_0 * E_f * V_f + E_m * (1 - V_f)$$

$$n_L = 1$$

$$n_0 = 0.5$$

$$E_2 = \frac{E_f * E_m'}{E_m' * V_f + E_f * (1 - V_f)}$$

$$E_m' = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2}$$

$$G_{ij} = \frac{\sqrt{E_i * E_j}}{2 * (1 + \sqrt{\nu_{ij} * \nu_{ji}})} \quad \text{Τύπος για ορθοτροπικά υλικά}$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

Μηχανικές ιδιότητες ισότροπου υλικού PTFE	
Elastic modulus	496422532 N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.46
Mass density	2195 kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength	27579029.17 N/m <sup>2</sup>
Compressive strength	4136854.38 N/m <sup>2</sup>
Yield strength	15030570.9 N/m <sup>2</sup>

Datasheets υφασμάτων για υπολογισμό μηχανικών ιδιοτήτων

### 245 plain

N° de lot	Traction Tensile strength MPa (Kg/mm <sup>2</sup> )	Module Tensile Modulus GPa (T/mm <sup>2</sup> )	Allongt Elong. %	Masse volumique Density (g / cm <sup>3</sup> )	Masse linéique Yield (g /10 <sup>2</sup> m) g/m <sup>2</sup>	Ensimage Sizing %	Poids Weight Kg	Nombre de bobines Number bobbins
F4107K2								
Moyenne Average	3785 (386)	237 (24,1)	1,60	1,77	198 0.198	1,1	718,00	359
%								

### 283 4x4 twill

N° de lot	Traction Tensile strength MPa (Kg/mm <sup>2</sup> )	Module Tensile Modulus GPa (T/mm <sup>2</sup> )	Allongt Elong. %	Masse volumique Density (g / cm <sup>3</sup> )	Masse linéique Yield (g /10 <sup>2</sup> m)	Ensimage Sizing %	Poids Weight Kg	Nombre de bobines Number bobbins
F4109D1								
Moyenne Average	3808 (388)	231 (23,6)	1,65	1,75	198	1,1	1 702,00	851
%								

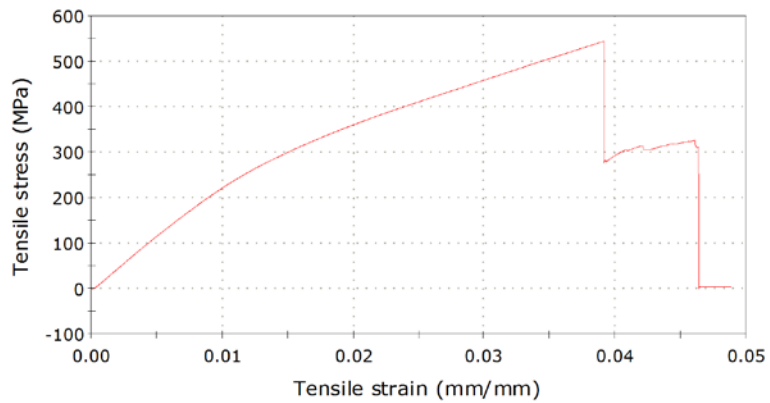
## 420 twill

LOT NO.	TENSILE STRENGTH MPA [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	TENSILE MODULUS GPA [10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup> ]	ELONGATION %	DENSITY 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	YIELD tex	SIZE AMOUNT %
714041	5160 [526]	231 [23.6]	2.2	1.80	806	0.2

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

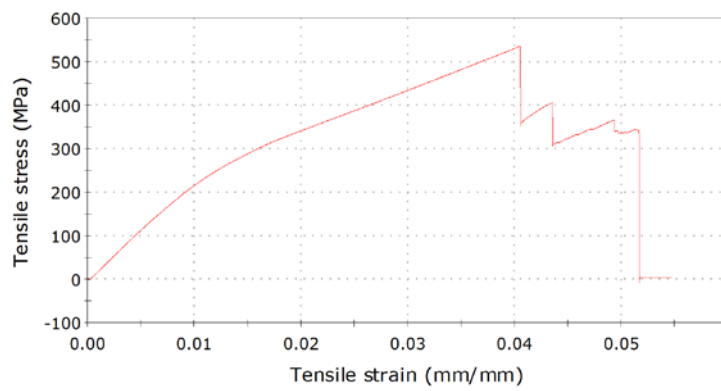
Διαγράμματα δοκιμών εφελκυσμού-κάμψης τριών σημείων για λεπίδες ENTASIS και ENIGMA

### ENTASIS 1.1



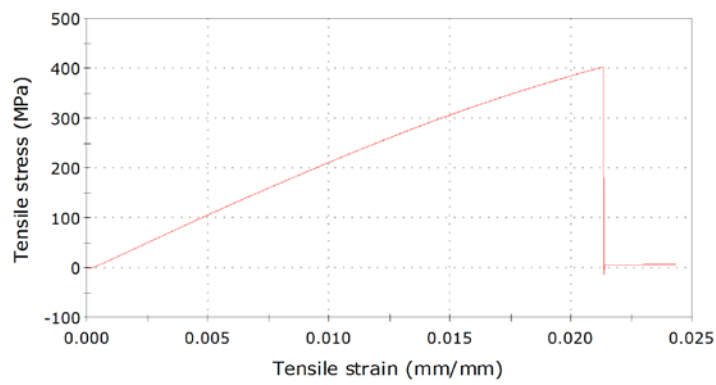
(α)

**ENTASIS 1.2**



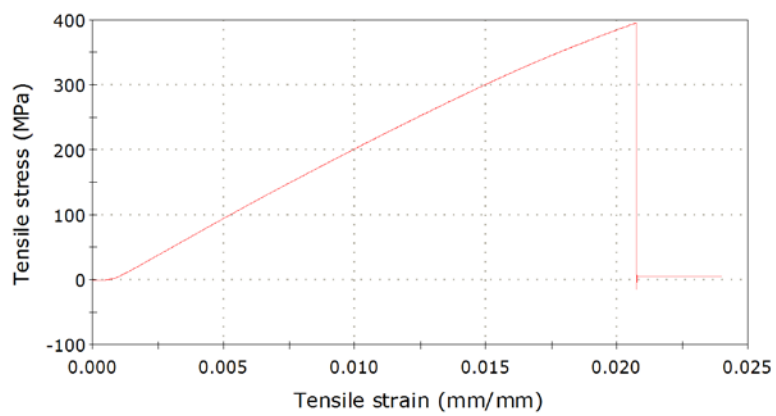
**(β)**

**ENTASIS 2.1**



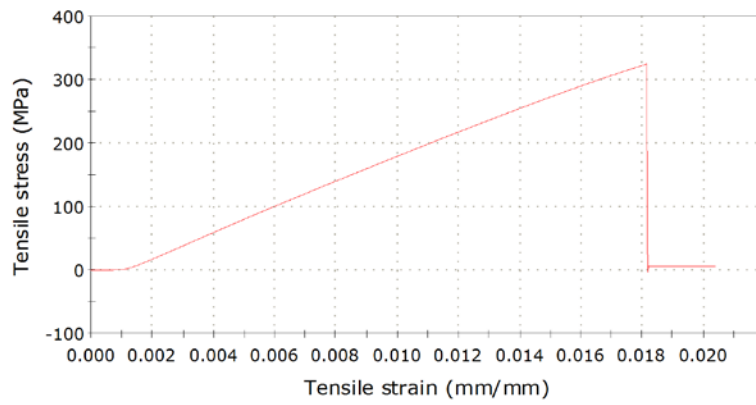
**(γ)**

**ENTASIS 2.2**



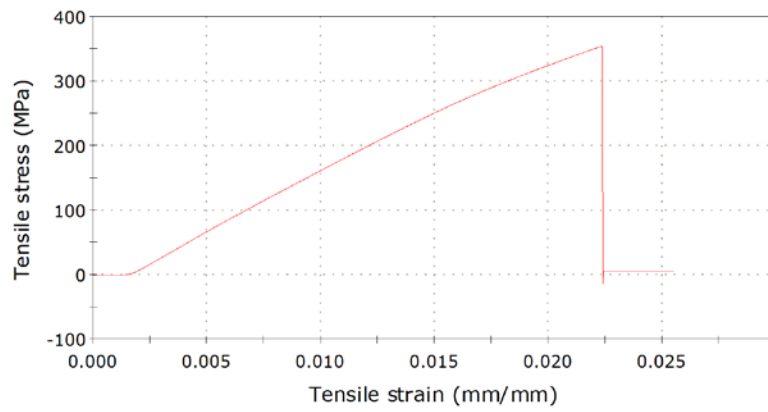
**(δ)**

### ENTASIS 3.1



(ε)

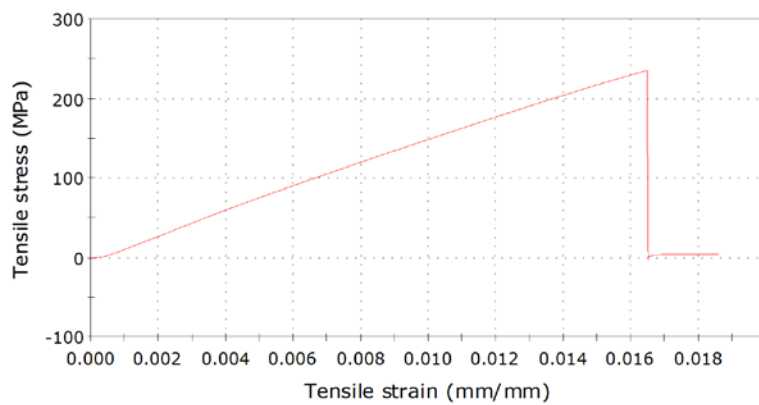
### ENTASIS 3.2



(σ)

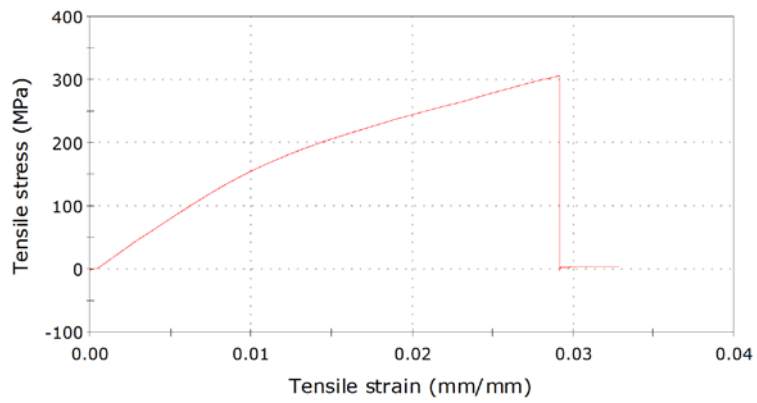
Διάγραμμα 1 (α)-(στ) Καμπόλες τάση-παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για τη λεπίδα ENTASIS

### ENIGMA 1.1



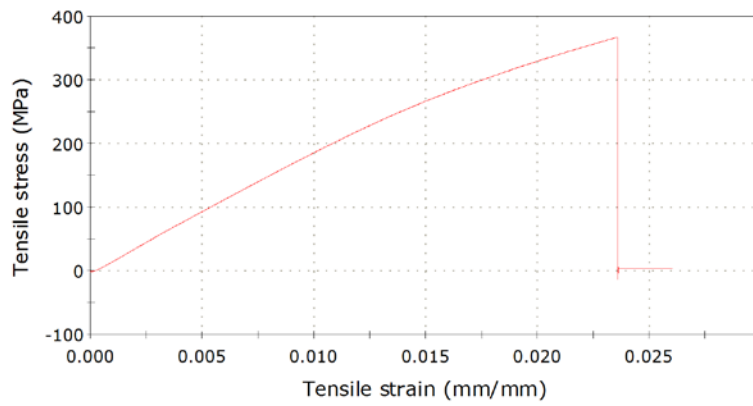
(α)

### ENIGMA 1.2



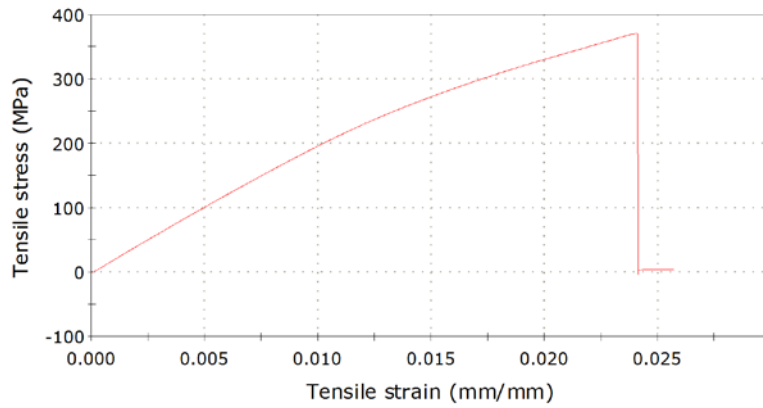
(β)

### ENIGMA 2.1



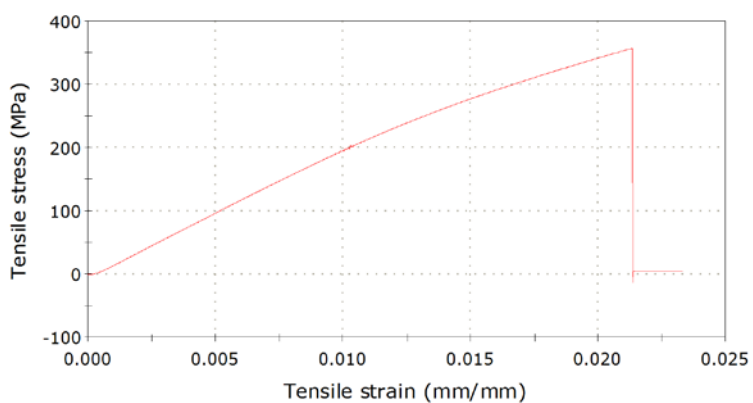
(γ)

### ENIGMA 2.2



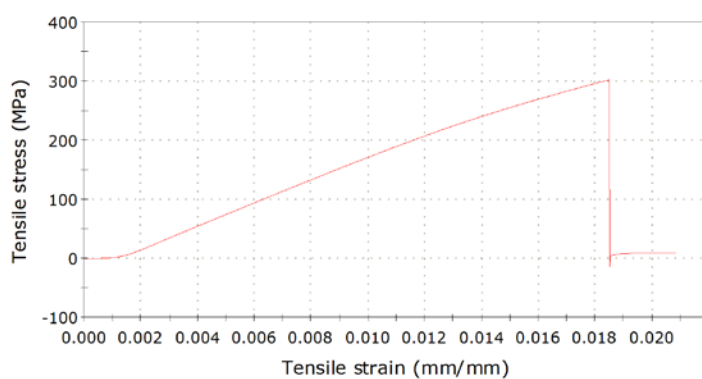
(δ)

### ENIGMA 3.1



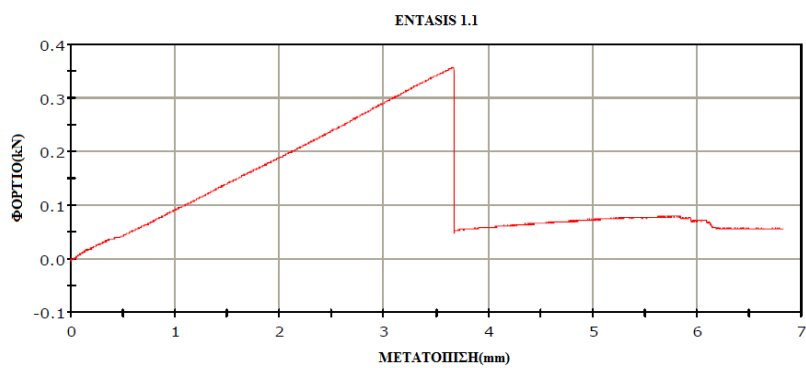
(ε)

### ENIGMA 3.2



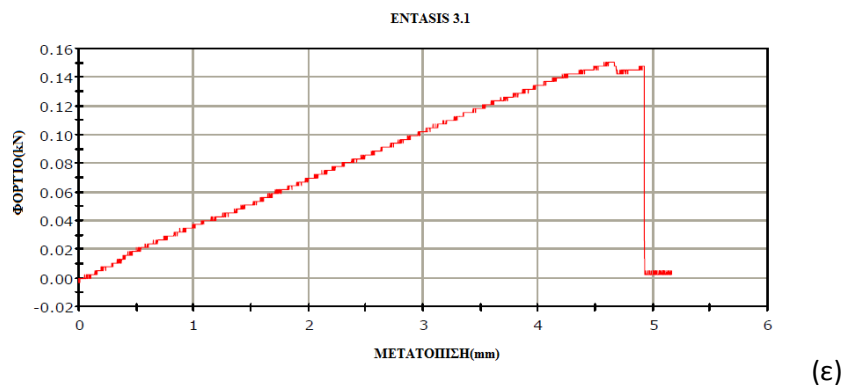
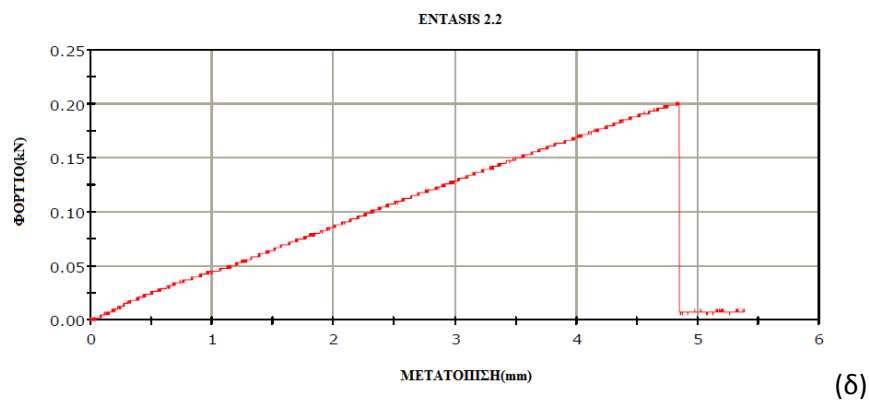
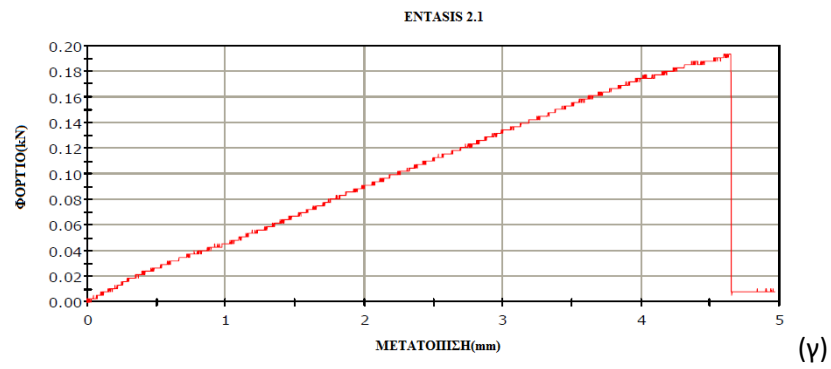
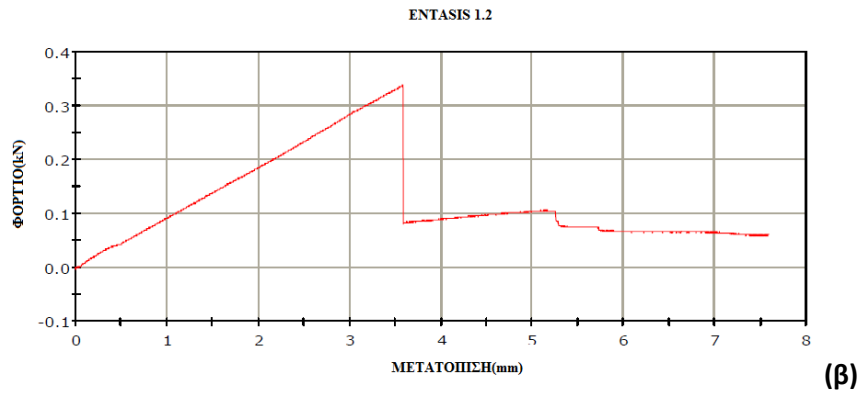
(σ)

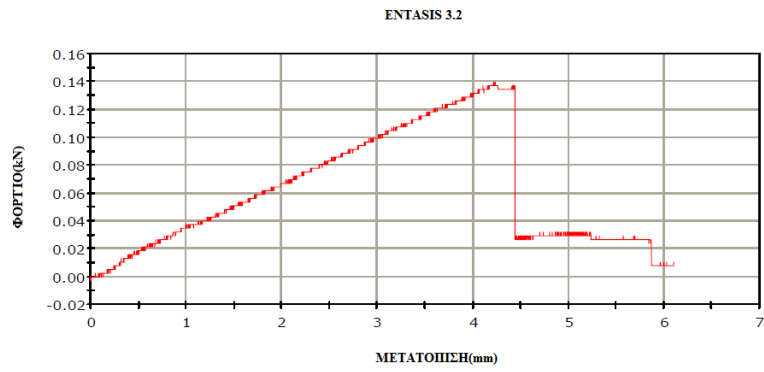
Διάγραμμα 2 (α)-(στ) Καμπύλες τάση-παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για τη λεπίδα ENIGMA



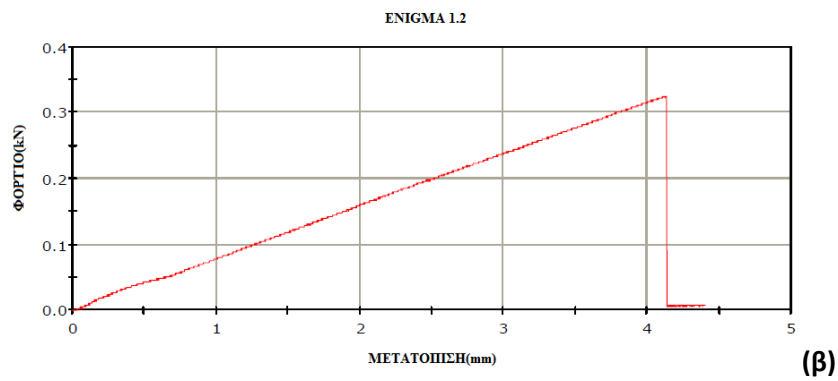
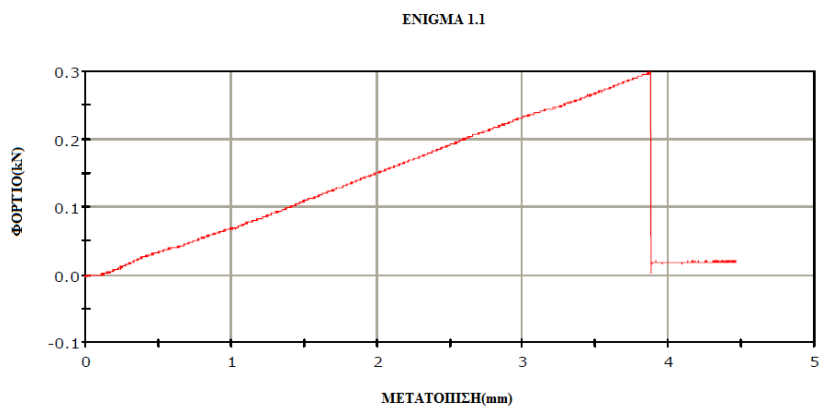
(α)

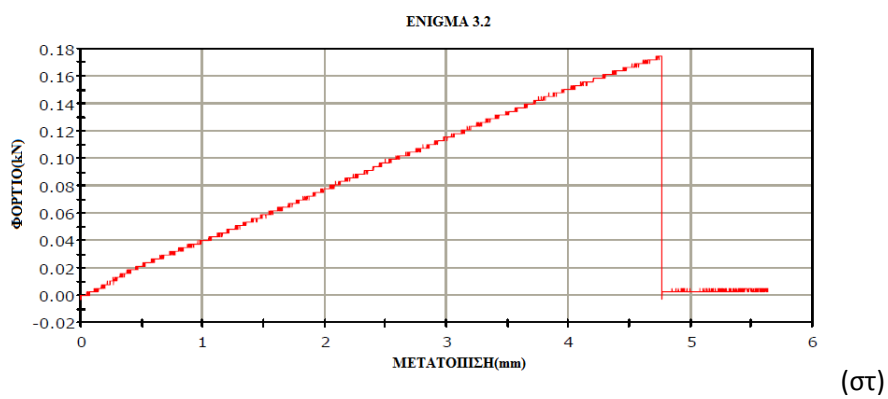
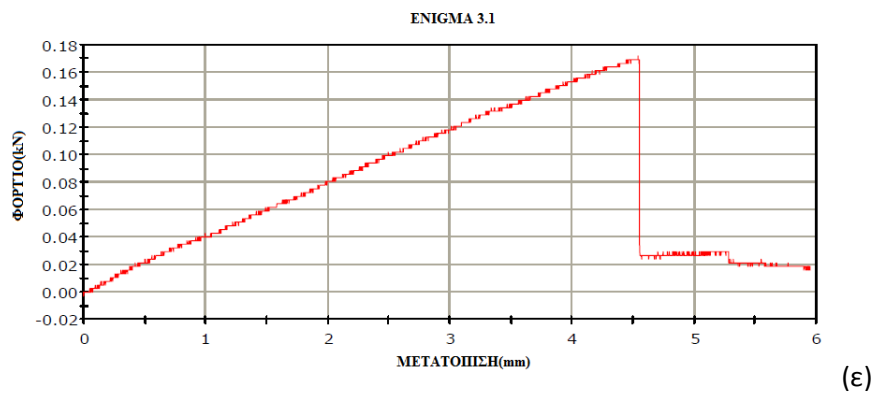
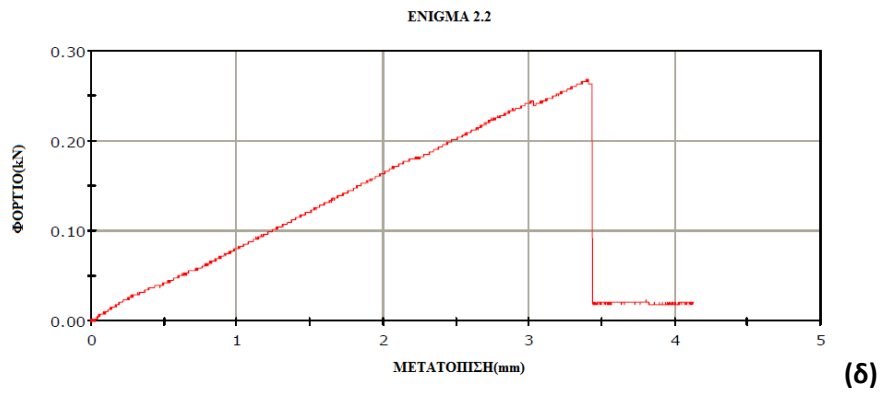
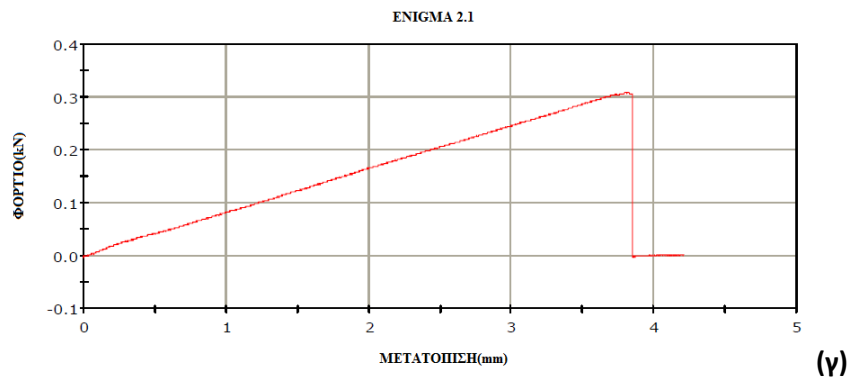






Διάγραμμα 3 (α)-(στ) Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σε κάμψη τριών σημείων για τη λεπίδα ENTASIS





Διάγραμμα 4 (α)-(στ) Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σε κάμψη τριών σημείων για τη λεπίδα ENIGMA

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Anonymous, Κατάλογος R-G ([www.r-g.de](http://www.r-g.de))
- [2] L. Tong, A.P. Mouritz, M.K. Bannister , 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, Elsevier, Publications, 2002.
- [3] S.T. Peters , Composite Materials And Processes, Chapter 4 in: C. A. Harper (editor) Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites, Fourth Edition, McGraw Hill, 2002.
- [4] N.C. Correia, F. Robitaille, A.C. Long , C.D. Rudd, P. Šimáček, S.G. Advani, Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 36, Issue 12, 2005, pp. 1645–1656.
- [5] M. Leggett, Vacuum resin infusion, a brief history, <http://www.compositesaustralia.com.au/pdfs/Vacuum%20Resin%20Infusion%20Magazine%20Article%20ab%20edited.pdf>
- [6] Anonymous, guide to vacuum infusion, Vacuum Infusion: The Equipment and Process of Resin Infusion, <http://cdn.fibreglast.com/downloads/vacuuminfusion.pdf>
- [7] D.R. Pendergast, J. Mollendorf, Evaluation of Fins used in underwater swimming, UHM, Vol 30, No 1, 2003, pp. 55-71.
- [8] P. Bardis, D.S. Mathioulakis, "Performance Evaluation of Swim Fins under Zero Translation Speed", International Journal of Sports Science and Coaching, vol. 6, issue 2, 2011, pp.253-268.
- [9] P. Potluri, , J. Atkinson, Automated manufacture of composites: handling, measurement of properties and lay-up simulations, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 34/6, 2003, pp. 493–501.

- [10] A. Mills , Automation for Carbon fiber Preform manufacture for affordable aerospace applications ,Composites Part A, vol.32/7, 2001, pp. 955-962.
- [11] ] R. Teti , Machining of Composite Materials, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 51/2, 2002, pp. 611-634.
- [12] Anonymous, Advanced Composites Inc., Compression Molding,  
[http://www.advancedcomposites.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=49&Itemid=79](http://www.advancedcomposites.com/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=79)
- [13] E. W. Andrews, M.R. Garnich, Stresses around fiber ends at free and embedded ply edges, Composite Science and Technology , vol. 68,2008, pp.3352-3357
- [14] S. Chou, H. C. Chen, H.E. Chen, Effect of weave structure in Mechanical fracture behavior of three-dimensional carbon fiber fabric reinforced epoxy resin composites, Composite Science and Technology, vol. 45, 1992, pp. 23-35
- [15] D. Modi, N. Correia, M. Johnson, A. Long, C. Rudd, F. Robitaille, Active Control of the vacuum infusion process, Composites part A: Applied science and manufacturing, vol. 38, 2007, pp.1271-1287.
- [16] B. Yenilmez, M. Senan, E. M. Sozer, Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process, Composite Science and technology, vol. 69, 2009, pp 1710-1719.
- [17] Anonymous, Airtech article, Cost effective resin infusion, Reinforced plastics magazine, Jan-Febr 2009, pp. 38-39.
- [18] J. F.A. Kessels, A. S. Jonker, R. Akkerman, Fully 2<sup>1/2</sup>D flow modeling of resin infusion under flexible tooling using unstructured meshes and wet and dry compaction properties, Composites: part A: applied science and manufacturing, vol. 38, 2007, pp. 51-60
- [19] D. Modi, M. Johnson, A. Long, C. Rudd, Analysis of pressure profile and flow progression in the vacuum infusion process, Composite Science and Technology, vol. 69, 2009, pp.1458-1464.

[20] Q. Govignon, S. Bickerton, P.A. Kelly, Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process, *Composites: part A*, vol. 41, 2010, pp. 45-57

[21] S. K. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, product and process engineering*, CRC press, 2002, pp. 45-50.

[22] A. C. Long, *Design and Manufacture of Textile Composites*, CRC press, 2005, pp. 198-203,208-211.