



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ**

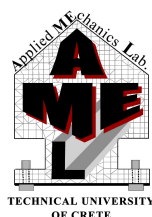
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

# **Μελέτη της επίδρασης της ύφανσης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σύνθετων υλικών**

**Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας σε  
υφάσματα απλής πλέξης**

**Αντώνης Ε. Αντωνογιαννάκης**

**Επιβλέπων: Αλέξανδρος Δ. Γκότσης**

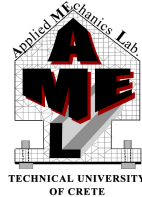


**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ  
«ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ  
ΥΦΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΙΣ  
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ  
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

*Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας σε  
υφάσματα απλής πλέξης*

**Αντώνης Ε. Αντωνογιαννάκης**  
**Μηχανικός Αεροσκαφών**

Διπλωματική διατριβή υποβληθείσα στα πλαίσια των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης  
στο πρόγραμμα

**«ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**  
του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης

31 Μαΐου, 2013

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

Αντώνης Ε. Αντωνογιαννάκης,  
αρ. φ. μητρώου: 2010040262  
e-mail: antonis2x@yahoo.gr

### **Η διατριβή εγκρίθηκε από την ακόλουθη τριμελή συμβουλευτική επιτροπή:**

1. Αλέξανδρος Δ. Γκότσης, αναπλ. καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης, Επιβλέπων
2. Μαρία Σταυρουλάκη, λέκτωρ Πολυτεχνείου Κρήτης
3. Κωνσταντίνος Προβιδάκης, καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

στις 20 Ιουνίου, 2013

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ:

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Κτήριο Επιστημών, Πανεπιστημιούπολη, Κουνουπιδιανά, 73100 Χανιά  
τηλ. 2821037259  
fax. 2821037672  
e-mail: gotsis@science.tuc.gr

# ΔΗΛΩΣΗ

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή είναι προϊόν ανεξάρτητης εργασίας μου που διεξήχθη κατά τις μεταπτυχιακές μου σπουδές στο Γενικό τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης, στα Χανιά,

Για ό,τι δεδομένα ή πληροφορίες χρησιμοποίησα που προέρχονται από εξωτερικές πηγές έχουν δοθεί οι αρμόζουσες αναγνωρίσεις και αναφορές.

Αντώνης Ε. Αντωνογιαννάκης



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια των απαιτήσεων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη «Μηχανική και Τεχνολογία Υλικών και Κατασκευών» του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σκοπός της εργασίας ήταν να αναπτυχθεί ένα πρωτότυπο αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σύνθετων υλικών με υφασμένες ίνες, και η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

Τα υφάσματα ινών είναι σήμερα ευρέως διαδεδομένα λόγω της ευκολίας κατασκευής και χρήσης τους για την παραγωγή σύνθετων υλικών. Παρ' όλα αυτά, λόγω της ιδιάζουσας μορφολογίας τους, οι μηχανικές τους ιδιότητες αποκλίνουν από την Classic Laminate Theory που αφορά πολυστρωματικά υλικά με μονοαξονική κατεύθυνση ινών ανά στρώμα. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ύφανσης. Παράλληλα, μια από τις πιο σημαντικές μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι το μέτρο ελαστικότητας. Λαμβάνοντάς αυτά υπόψη, και προσπαθώντας να κρατηθεί η ευκολία και η απλότητα εφαρμογής σε υψηλά επίπεδα, όπως απαιτείται για πρακτικές και αποδοτικές εφαρμογές, αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο που υπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας για σύνθετα υλικά με στρώσεις υφασμάτων απλής πλέξης. Για να δοκιμαστεί η εγκυρότητα αυτού του μοντέλου, διεξήχθησαν δοκιμές εφελκυσμού με σειρές δοκιμών από υφάσματα υαλονημάτων απλής πλέξης, εμποτισμένα σε εποξική ρητίνη με την βοήθεια μιας αντλίας κενού. Τα πειραματικά δεδομένα από αυτές τις δοκιμές, καθώς και άλλα πειραματικά δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία, όταν συγκρίθηκαν με το θεωρητικό μοντέλο έδειξαν πολύ καλή σύγκλιση.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ                                                                                    | iii       |
| Ευχαριστίες                                                                                 | vii       |
| Abstract                                                                                    | ix        |
| Σύμβολα                                                                                     | xi        |
| <b>1 Εισαγωγή και προσδιορισμός του προβλήματος</b>                                         | <b>1</b>  |
| 1.1 Ορισμός σύνθετων υλικών και κατηγοριοποίησή τους                                        | 1         |
| 1.2 Υλικά ενίσχυσης                                                                         | 2         |
| 1.3 Υλικά μήτρας                                                                            | 4         |
| 1.4 Τρόποι διάταξης της ενίσχυσης                                                           | 5         |
| 1.5 Προσδιορισμός του προβλήματος                                                           | 9         |
| <b>2 Ανασκόπηση</b>                                                                         | <b>11</b> |
| 2.1 Εισαγωγή                                                                                | 11        |
| 2.2 Τα αναλυτικά μοντέλα                                                                    | 11        |
| 2.3 FEM μοντέλα                                                                             | 16        |
| 2.4 Τα μοντέλα γενετικών και ιεραρχικών αλγορίθμων                                          | 18        |
| <b>3 Το θεωρητικό μοντέλο</b>                                                               | <b>21</b> |
| 3.1 Γεωμετρική περιγραφή                                                                    | 21        |
| 3.1.1 Εισαγωγή                                                                              | 21        |
| 3.1.2 Ανάλυση κατά το επίπεδο $z = 0$                                                       | 22        |
| 3.1.3 Ανάλυση κατά το επίπεδο $z = a_{\text{weft}}/4$                                       | 23        |
| 3.1.4 Ανάλυση κατά τα επίπεδα $x = 0$ , $x = a_{\text{warp}}/4$ και $x = a_{\text{warp}}/2$ | 24        |
| 3.1.5 Υπολογισμός των μερικών όγκων                                                         | 26        |
| 3.2 Υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας                                                    | 28        |
| 3.2.1 Εισαγωγή                                                                              | 28        |
| 3.2.2 Υπολογισμός της περιεκτικότητας, $\phi_s^f$ , (ν/ν) νήματος σε ίνες                   | 28        |
| 3.2.3 Υπολογισμός των ελαστικών σταθερών των matrix rockets                                 | 29        |
| 3.2.4 Υπολογισμός ελαστικών σταθερών νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων                     | 29        |

|          |                                                                                                                                              |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.5    | Υπολογισμός ελαστικών σταθερών νήματος στο γενικό σύστημα συν/νων . . . . .                                                                  | 29        |
| 3.2.6    | Σύνθεση των επιμέρους στοιχείων του μοναδιαίου κελιού και εισαγωγή των συντελεστών $c$ , $b$ και $n_0$ . . . . .                             | 30        |
| 3.2.7    | Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας του συνολικού μοντέλου . . . . .                                                                            | 33        |
| <b>4</b> | <b>Η πειραματική διαδικασία</b>                                                                                                              | <b>35</b> |
| 4.1      | Περιγραφή εξοπλισμού και πρωτοκόλλου διαδικασίας . . . . .                                                                                   | 35        |
| 4.2      | Αναφορά 2ης σειράς δοκιμών . . . . .                                                                                                         | 39        |
| 4.3      | Αναφορά 3ης σειράς δοκιμών . . . . .                                                                                                         | 43        |
| 4.4      | Αναφορά 9ης σειράς δοκιμών . . . . .                                                                                                         | 47        |
| <b>5</b> | <b>Ανάλυση αποτελεσμάτων</b>                                                                                                                 | <b>51</b> |
| 5.1      | Ανάλυση πειραματικών δεδομένων . . . . .                                                                                                     | 51        |
| 5.1.1    | Η θραυστομηχανική εικόνα . . . . .                                                                                                           | 51        |
| 5.1.2    | Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης . . . . .                                                                                                   | 51        |
| 5.1.3    | Ποιοτική σύγκριση αποτελεσμάτων σειρών και υποσειρών – Ερμηνεία αποτελεσμάτων . . . . .                                                      | 52        |
| 5.2      | Σύγκριση θεωρητικού μοντέλου – πειραματικών δεδομένων . . . . .                                                                              | 53        |
| 5.2.1    | Εκτίμηση τιμών από το θεωρητικό μοντέλο . . . . .                                                                                            | 53        |
| 5.2.2    | Υπολογισμός του συντελεστή αλληλοεπικάλυψης, του μεγέθους του ανηγμένου μοναδιαίου κελιού και του μερικού όγκου των matrix pockets . . . . . | 54        |
| <b>6</b> | <b>Συζήτηση, συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές</b>                                                                                     | <b>57</b> |
| 6.1      | Συζήτηση . . . . .                                                                                                                           | 57        |
| 6.2      | Συμπεράσματα . . . . .                                                                                                                       | 65        |
| 6.3      | Μελλοντικές προοπτικές . . . . .                                                                                                             | 65        |
|          | <b>Βιβλιογραφία</b>                                                                                                                          | <b>69</b> |
| <b>A</b> | <b>Μέτρηση (ταχύτητας) παραμόρφωσης</b>                                                                                                      | <b>71</b> |
| <b>B</b> | <b>Vacuum bag forming</b>                                                                                                                    | <b>73</b> |
|          | <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>                                                                                                                     | <b>79</b> |
|          | <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>                                                                                                                    | <b>81</b> |
|          | <b>Ευρετήριο</b>                                                                                                                             | <b>83</b> |
|          | <b>Vitae</b>                                                                                                                                 | <b>85</b> |

## Ευχαριστίες

Στο πρόσωπο της επιτροπής αξιολόγησης, καθώς και της Προέδρου του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό και διοικητικό προσωπικό του Τμήματος, για την παροχή όχι μόνο γνώσεων, αλλά ενός ολοκληρωμένου τρόπου σκέψης και επίλυσης προβλημάτων, τόσο εκπαιδευτικού, όσο και πρακτικού χαρακτήρα.

Ιδιαίτερη μνεία στον αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αλέξανδρο Γκότση, επιβλέποντα της παρούσης εργασίας, για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη, την καθοδήγηση και το άριστο κλίμα συνεργασίας που μου χάρισε αμέριστα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους οικείους μου για την ηθική τους υποστήριξη. Σε αυτούς, τρόπον τινά, αφιερώνεται η εργασία.



# Abstract

## Introduction

Composite materials, despite their use in the past, have evolved during the past 40 years to a new, independent branch of Material Science, as their products have totally customized properties. In Composite Materials applications, the use of fiber textiles as reinforcement holds a prominent and constantly growing place due to the ease of fabrication and handling, as well as their reduced planar anisotropy. Since the early '80s, analytical models have been developed to describe their complex geometry and the details of the stress distribution that the woven reinforcement induces. Later, when it became computationally feasible, these models have been enriched with Finite Element Analysis (FEA). Today's computational capabilities permit the properties of each element, along with the way that elements are combined, to be appointed to every next higher assembly. In this way, via the inheritance of properties, a logical basis is set to reproduce every material and configuration in a virtual space. However, these models are very resource-demanding. Moreover, in common manufacturing, the statistical tolerance in material properties is greater than the error tolerance of these extreme precision models. Thus, there is a lack in simple and easy-to-apply models that can calculate the basic elastic parameters of a material in a short time at minimum computational cost.

## Theoretical model

On this basis, a model was developed, which is capable of calculating the Young's Modulus,  $E$ , of a plain weave fabric composite, by using only 2 fundamental textile geometry parameters, the overall reinforcement volume fraction and by introducing a couple of correction coefficients. Thus, it uses five independent parameters, namely: (a) the unit cell height,  $h$ , equal to the sum of the thicknesses of the weft and warp threads per textile (Fig. 3.3); (b) the strand undulation length in the textile,  $\alpha$ ; (c) a textile imbalance coefficient,  $b$ , for the cases when the warp and the weft volume fractions are uneven; (d) a unit cell interference coefficient,  $n_0$ , which depends on unit cell stacking configuration; and (e) the overall reinforcement volume fraction,  $\phi_0^f$ . These parameters are combined with the elastic properties of the reinforcement and the matrix in a block diagram. The model considers every matrix-impregnated strand

as a single composite material having lenticular cross-section, as well as it includes the matrix pockets that are created due to the geometry of the weave. As the aim of the model is to evaluate Young's Modulus, it premises Hooke's Law to relate stress to deformation. Hence it is a linear elastic model applicable only to small deformations. However, this covers the greatest part of the stress – strain diagrams for brittle materials.

## Experimental validation

In order to examine the validity of the theoretical model, three series of tension tests were conducted, using specimens made of glass fabric/epoxy composite, fabricated for this purpose at the Technical University of Crete. The specimens were cut along 0°C, 45°C and 90°C angles of the main textile direction. The resultant stress – strain curves have qualitatively correct shape, lie within correct order of magnitude values and are consistent in repeatability. The specimens cut along a 45°C angle show a special interest, as they have an apparent macroscopic ductility, caused by the alteration of the weave geometric parameters. However, the theoretical model, as developed, concerns only the specimens in which the loading direction is parallel to the axis of the warp.

The results of the experiments are in very good agreement with the predicted values of the theoretical model. Moreover, in order for the model to be further validated, experimental data from the literature were used, and they showed a remarkable agreement with the predicted values.

## Conclusions

An analytical model was developed to calculate the Young's Modulus of a composite material that consists of textile reinforcement within a polymeric matrix. The model relies on the geometry of the plain weave fabric and the stacking configuration in the material. The combination of unit cell height,  $h$ , and strand undulation length,  $\alpha$ , leads to a weighted combination of serial and parallel composition of the strands. The imbalance coefficient,  $b$ , and the unit cell interference coefficient,  $n_0$ , affect almost linearly the  $E_x$ , but have a slight effect on  $E_y$ . When  $n_0$  reaches its limit values, namely 0 and 1, the model predicts values for  $E_x$  that tend to the lower and upper limit, respectively (Table 5.3). The overall reinforcement volume fraction,  $\phi_0^f$  affects the theoretical model in accordance with Classic Laminate Theory. The validity of the model was tested successfully by comparison with experimental data acquired from both the literature and tension tests conducted for this reason. The greatest asset of the model is its simplicity and ease in application by engineers and designers, for whom it was originally developed.

## Σύμβολα

|                  |                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $E$              | μέτρο ελαστικότητας                                             |
| $E_x^L$          | μέτρο ελαστικότητας διαμήκους νήματος (στημόνι) στον άξονα x    |
| $E_y^L$          | μέτρο ελαστικότητας διαμήκους νήματος (στημόνι) στον άξονα y    |
| $E_1^f$          | διαμήκης μέτρο ελαστικότητας ίνας                               |
| $E_2^f$          | εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας ίνας                               |
| $E_L$            | διαμήκης μέτρο ελαστικότητας νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων |
| $E_T$            | εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων |
| $E_m$            | μέτρο ελαστικότητας μήτρας                                      |
| $E_x$            | συνιστάμενο μέτρο ελαστικότητας στον άξονα x                    |
| $E_x^{max}$      | μέγιστο θεωρητικά αναμενόμενο μέτρο ελαστικότητας στον άξονα x  |
| $E_x^{min}$      | ελάχιστο θεωρητικά αναμενόμενο μέτρο ελαστικότητας στον άξονα x |
| $E_y$            | συνιστάμενο μέτρο ελαστικότητας στον άξονα y                    |
| $G_{12}^L$       | μέτρο διάτμησης νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων              |
| $G_f$            | μέτρο διάτμησης ίνας                                            |
| $G_m$            | μέτρο διάτμησης μήτρας                                          |
| $V_f$            | όγκος ινών                                                      |
| $V_m$            | όγκος μήτρας                                                    |
| $V_m^s$          | όγκος εμποτισμένης μήτρας στο νήμα                              |
| $V_m^{mtx\ pks}$ | όγκος μήτρας στα “matrix pockets”                               |
| $V_{cell}$       | όγκος μοναδιαίου κελιού                                         |
| $V_{strand}$     | όγκος νημάτων                                                   |

|                 |                                                                       |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $\nu_{12}^L$    | λόγος Poisson νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων 1-2                  |
| $\nu_{21}^L$    | λόγος Poisson νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων 2-1                  |
| $\nu_{xy}^L$    | λόγος Poisson νήματος στο x-y σύστημα συν/νων                         |
| $\nu_{yx}^L$    | λόγος Poisson νήματος στο y-x σύστημα συν/νων                         |
| $\nu_f$         | λόγος Poisson ίνας                                                    |
| $\nu_m$         | λόγος Poisson μήτρας                                                  |
| $\phi_o^f$      | περιεκτικότητα (ν/ν) μοναδιαίου κελιού σε ίνες                        |
| $\phi_s^f$      | περιεκτικότητα (ν/ν) νήματος σε ίνες                                  |
| $\sigma_{uts}$  | τάση θραύσης                                                          |
| $\varepsilon\%$ | μέγιστη παραμόρφωση κατά τη θραύση                                    |
| $a_{warp}$      | περίοδος κυμάτωσης του νήματος στον άξονα $x$ (στημόνι - warp)        |
| $a_{weft}$      | περίοδος κυμάτωσης του νήματος στον άξονα $z$ (υφάδι – weft)          |
| $b$             | συντελεστής ανισοτροπίας στημονιού/υφαδιού για μη συμμετρικά υφάσματα |
| $c$             | συντελεστής ποσόστωσης σειριακού – παράλληλου μοντέλου                |
| $h$             | ύψος μοναδιαίου κελιού κατά τον άξονα $y$                             |
| $n_0$           | συντελεστής αλληλοεπικάλυψης μοναδιαίων κελιών                        |

## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή και προσδιορισμός του προβλήματος

### 1.1 Ορισμός σύνθετων υλικών και κατηγοριοποίησή τους

Με βάση την χημική τους σύσταση, τα ομοιογενή υλικά συνήθως διακρίνονται σε μεταλλικά, κεραμικά και οργανικά. Υπάρχουν όμως και μη ομοιογενή υλικά, αποτελούμενα από δύο ή περισσότερα είδη υλικών, που δεν μπορούν να συμπεριληφθούν σε μία από αυτές τις κατηγορίες. Τα σύνθετα αυτά υλικά είναι γνωστά από την αρχαιότητα, αλλά τα τελευταία 40 χρόνια έχει γίνει μια επανάσταση στο χώρο των κατασκευών από την όλο και εκτενέστερη χρήση τους.

*Σύνθετο υλικό είναι το υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από μόνο του δεν μπορεί να επιτύχει.* Χαρακτηρίζονται δε από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηριζόμενο ως **υλικό ενίσχυσης**, προσδίδει στο υλικό αυξημένες μηχανικές (συνήθως) ιδιότητες, και το άλλο, το οποίο καλείται **μήτρα**, εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης [1].

Η δυνατότητα επιλογής όχι μόνο των υλικών ενίσχυσης και μήτρας από την πληθώρα των διαθέσιμων υλικών, αλλά και τον τρόπο που αυτά θα συνδυαστούν, ουσιαστικά δημιουργεί μια απεριόριστη δυναμική κατά την κατασκευαστική πρακτική. Ενώ μέχρι τώρα ο μηχανικός ήταν υποχρεωμένος να συμβιβαστεί και να επιλέξει από συγκεκριμένα και περιορισμένα διαθέσιμα υλικά, τώρα μέρος της σχεδίασης ενός προϊόντος είναι και η κατασκευή αυτών των υλικών, που οι ιδιότητές τους πληρούν ακριβώς τις κατασκευαστικές απαιτήσεις.

Αυτή η δυνατότητα όμως, εισάγει πολλές παραμέτρους κατά την σχεδίαση, οι οποίες πρέπει να ελεγχθούν. Ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας, το όριο θραύσης, η δυσθραυστότητα, η θερμική αγωγιμότητα και διαστολή, και η χημική συμβατότητα των υλικών που απαρτίζουν ένα σύνθετο υλικό, είναι αντικείμενο έρευνας, πειραμάτων και εξέλιξης ανά τον κόσμο. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ενίσχυση είναι σχεδιαστική μεταβλητή και διακρίνει τα σύνθετα υλικά στις παρακάτω κατηγο-

ρίες [2]:

- Σύνθετα ενισχυμένα με τεμαχίδια (particulate fillers)
- Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες (fibers)
- Σύνθετα ενισχυμένα με φύλλα (laminar fillers)
- Σύνθετα ενισχυμένα με δομικά στοιχεία (π.χ. δομικό αφρό ή κυψελλωτά στρώματα)

## 1.2 Υλικά ενίσχυσης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση μπορεί να είναι μέταλλα ή αμέταλλα, ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση τους σε σχέση με τις μηχανικές τους ιδιότητες. Κατά κανόνα όμως, όλα έχουν υψηλή αντοχή και χαμηλή πυκνότητα. Περαιτέρω ιδιότητες, όπως η συμβατότητα με την μήτρα, η θερμική και χημική σταθερότητα και η ευκολία κατασκευής είναι που διαμορφώνουν την τελική επιλογή για κάθε κατασκευή.

Για την **ενίσχυση με τεμαχίδια**, χρησιμοποιούνται συνήθως διάφορα καρβίδια ή οξειδία μετάλλων, τα οποία βελτιώνουν τις τριβολογικές ιδιότητες της μήτρας [3]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η εισαγωγή καρβιδίων σε μεταλλικές ή κεραμικές μήτρες στην κατασκευή δίσκων κοπής και λείανσης ή ως αιωρήματα σε γυαλιστικές κρέμες. Άλλοτε πάλι, χρησιμοποιούνται φτηνά ανόργανα υλικά ως πλήρωση για λόγους κόστους και ευκολίας κατασκευής, όπως το χαλίκι στην κατασκευή σκυροδέματος.

Στα **πολυστρωματικά υλικά**, η ενίσχυση βελτιώνει ειδικές ιδιότητες κατ' απαίτηση της κατασκευής. Συνηθέστερα, αυξάνει την δυσθραυστότητα (ή δημιουργεί ειδικές συνθήκες θραύσης) και την αντοχή σε διάβρωση [2]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα παρμπρίζ των αυτοκινήτων, τα οποία σε περίπτωση σύγκρουσης θρυμματίζονται, αλλά παραμένουν στην θέση τους προς αποφυγή δευτερογενών τραυματισμών των επιβατών από τα θραύσματα. Πολυστρωματικά υλικά επίσης χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ισοτροπικότητας στο επίπεδο, καθώς τα ινολιτισμένα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ανισοτροπία παράλληλα και κάθετα στην κατεύθυνση των ινών.

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά για την παραγωγή **ινών** είναι ο άνθρακας, η ύαλος ή άλλες πυριτικές ενώσεις και διάφορα άλλα οργανικά πολυμερή, όπως το αραμίδιο [3].

Στα **ανθρακονήματα**, τα άτομα του άνθρακα σχηματίζουν επίπεδα φύλλα μονοατομικού πάχους αποτελούμενα από εξαγωνικές διατάξεις (γραφένια). Τα φύλλα αυτά είναι παράλληλα στον άξονα της ίνας (και μεταξύ τους). Για να επιτευχθούν οι μέγιστες μηχανικές ιδιότητες, πρέπει τα επίπεδα αυτά να είναι όσο το δυνατόν ευθυγραμμισμένα με την κατεύθυνση της ίνας. Η διάταξη αυτή δίνει μεγάλη ανισοτροπία στις ιδιότητές των ινών, με βέλτιστη διεύθυνση αυτήν του άξονά τους.

Η αντοχή των ινών άνθρακα σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητάς τους μπορεί να είναι ανταγωνιστικές ιδιότητες, αλλά και ελέγχιμες κατά την παραγωγή τους.

Έτσι, μπορούν να επιτευχθούν ακριβώς οι επιθυμητές τιμές κατά τον συμβιβασμό. Επίσης, με συγκεκριμένη μέθοδο παραγωγής, οι παραγόμενες ίνες έχουν τόσο καλή θερμική αγωγιμότητα, που σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή τους, χρησιμοποιούνται στα φρένα των αεροσκαφών, όπου τα μηχανικά και θερμικά φορτία κατά την επιβράδυνση είναι πολύ μεγάλα.

Οι ίνες άνθρακα εντούτοις, επηρεάζονται έντονα από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας ή άλλα οξειδωτικά περιβάλλοντα, υποβαθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, οι εξαιρετικές τους ιδιότητες εξασφαλίζονται μόνο αν η μήτρα είναι ικανή να διασφαλίσει την μόνωση από οξειδωτικούς παράγοντες. Τέτοιες μήτρες σπάνια είναι μέταλλα, διότι αντιδρούν χημικά με τον άνθρακα κατά την παραγωγή των υλικών. Συνήθως οι μήτρες για ίνες άνθρακα είναι είτε πολυμερικές, για συνήθη κατασκευαστικά προϊόντα, είτε γραφιτικός άνθρακας (carbon/carbon σύνθετα υλικά), για εξειδικευμένες εφαρμογές (φρένα αεροσκαφών).

Τα **υαλονήματα** είναι η πιο συνήθης και ευρύτερα διαδεδομένη επιλογή για κατασκευές με πολυμερική μήτρα, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους τους. Η ακριβής τους περιεκτικότητα, πέραν της πυριτίας,  $SiO_2$ , σε οξείδια του βορίου, αλουμινίου, σιδήρου, ασβεστίου, μαγνησίου, και αλκαλίων καθορίζει τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους. Οι τρεις πιο διαδεδομένοι τύποι υάλου είναι τα E-glass, C-glass και S-glass. Το E-glass (E για electrical) έχει καλές ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες, και το φτηνό κόστος του το καθιστούν τον πιο διαδεδομένο τύπο. Το C-glass (C για corrosion) έχει καλύτερη αντοχή σε διάβρωση, αλλά και χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από το E-glass. Τέλος, το S-glass (S για strength) έχει υψηλότερη αντοχή, μέτρο ελαστικότητας και θερμική αντοχή από το E-glass, αλλά και αυξημένο κόστος. Σε αντίθεση με τις ίνες άνθρακα, η δομή, και συνεπακόλουθα οι ιδιότητες της ίνας, είναι ιστροπική.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει έντονα τις ίνες υάλου είναι το περιβάλλον. Η υγρασία της ατμόσφαιρας υποβαθμίζει την αντοχή, λόγω της απορρόφησης της από την επιφάνεια της ίνας. Σε μεταλλικά οξέα, η υποβάθμιση αυτή είναι ακόμα εντονότερη. Επίσης, η θερμοκρασία υποβαθμίζει ραγδαία την αντοχή τους, ειδικά μετά τους 250° C. Αυτό είναι αναστρέψιμο για τις ίνες, αλλά όχι για συνήθεις μήτρες των υαλονημάτων, οι οποίες είναι πολυμερικές και δεν έχουν τόσο υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Ακόμη, η τριβή μεταξύ των ινών κατά την κατεργασία παραγωγής τους είναι παράγοντας υποβάθμισης της αντοχής τους.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω παραγόντων, μια συνήθης πρακτική είναι οι ίνες να προστατεύονται από μια πολυμερική επικάλυψη (sizing), και μάλιστα στα πρώτα στάδια της παραγωγής τους. Η επικάλυψη αυτή, εκτός της προστασίας της επιφάνειας της ίνας, λιπαίνει την διεπιφάνεια ώστε οι ίνες να αντέξουν χωρίς σημαντική υποβάθμιση της αντοχής τους την κατεργασία προς ένα τελικό προϊόν, να ενώνονται μεταξύ τους για ευκολία στην κατεργασία, να μεταφέρουν τις αντιστατικές τους ιδιότητες και να ενισχύσουν την διεπιφάνεια με την μήτρα.

Άλλες **πυριτικές ενώσεις** που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ινών, είναι αφ' ενός το καρβίδιο του πυριτίου, και αφετέρου ίνες με οξείδια του πυριτίου και του αλουμινίου σε ποσοστό περίπου 50%. Το πρώτο έχει παρόμοια δομή με το διαμάντι, χαμηλή πυκνότητα, υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, αλλά η παραγωγή ινών σε μεγάλη κλίμακα αντιμετωπίζει ακόμη προβλήματα στην εφαρμογή. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε εφαρμογές μόνωσης υψηλών θερμοκρασιών, καθώς και σε σύνθετα υλικά με μήτρα από αλουμίνιο.

Το **αραμίδιο** είναι το πιο σημαντικό οργανικό πολυμερές κατασκευής ινών. Από αυτό παράγονται ίνες με την εμπορική ονομασία “Kevlar™” ή “Twaron”, οι οποίες έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας και πολύ υψηλό όριο θραύσης. Παρόλα αυτά, οι ίνες είναι πολύ ευαίσθητες στην έκθεση σε θερμοκρασία και ηλιακό φως. Έτσι, απαιτούν επικάλυψη από ένα στρώμα που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, και έχουν τόσο περιορισμένο θερμοκρασιακό πεδίο λειτουργίας, που πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα ώστε να μην επηρεαστούν οι ίνες κατά την διαδικασία αντίδρασης των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών, ή την θερμοκρασία τήξης των θερμοπλαστικών πολυμερών, όταν αυτά χρησιμοποιούνται σαν μήτρες [3].

### 1.3 Υλικά μήτρας

Η μήτρα αποτελεί το μέσο που μεταφέρει το φορτίο στην ενίσχυση, και την προστατεύει από οξειδωτικούς ή/και διαβρωτικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες. Το τελικό προϊόν, κατά κανόνα, απαιτείται να έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με την μήτρα, οπότε, δεν έχει νόημα η ενίσχυση μιας πολύ ισχυρής και δύσθραυστης μήτρας με λιγότερο ανθεκτικές ίνες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την μήτρα στα σύνθετα υλικά είναι συνήθως πολυμερή, και σπανιότερα μέταλλα και κεραμικά.

Οι **μεταλλικές** μήτρες αφορούν κυρίως σε τρία μέταλλα και τα κράματά τους, το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και το τιτάνιο. Η αύξηση στις μηχανικές τους ιδιότητες είναι σχετικά μικρή κατά την ενίσχυση, αλλά μεταβάλλονται σημαντικά οι τριβολογικές και θερμομηχανικές τους ιδιότητες. Η εφαρμογή τους παρουσιάζει ακόμα προβλήματα, που δεν έχουν επιτρέψει στις μεταλλικές μήτρες να επεκταθούν σε μεγάλη κλίμακα, ειδικά αφού οι ιδιότητές τους δεν βελτιώνονται και πολύ. Τα προβλήματα αφορούν κυρίως στην ευαισθησία που έχουν τα μέταλλα στο οξυγόνο και στις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην διεπιφάνεια μήτρας – ενίσχυσης.

Οι **κεραμικές** μήτρες, οι οποίες εγγενώς ως κεραμικά, είναι πολύ ψαθυρές, ενισχύονται με κεραμικές ίνες με σκοπό την αύξηση της σκληρότητάς τους. Η αύξηση αυτή επιτυγχάνεται, λόγω της παρουσίας των ινών, με την συνεχή σκέδαση των ρωγμών που αναπτύσσονται λόγω του φορτίου. Έτσι, σύμφωνα με την θεωρία του Griffith, και τα μοντέλα των Cook, Gordon, Kendall, He και Hutchinson, η απορροφούμενη ενέργεια αυξάνει, και το υλικό μακροσκοπικά εμφανίζει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα. Μια ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών με μεγάλη εμπορική σημασία είναι το σύστημα άνθρακα / άνθρακα, δηλαδή γραφίτης ινοπλισμένος με ανθρακονήματα, το οποίο χρησιμοποιείται για την πολύ υψηλή θερμομηχανική αντοχή του.

Οι **πολυμερικές** μήτρες αποτελούν την πιο ευρέως διαδεδομένη μορφή, λόγω της ευκολίας παραγωγής τόσο των ιδίων, όσο και των σύνθετων υλικών στα οποία συμμετέχουν, το χαμηλό ιξώδες σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος που επιτρέπουν την καλύτερη διαβροχή των ινών, την καλή συμβατότητά τους με διάφορα είδη ενίσχυσης, την ελαστοπλαστική τους συμπεριφορά, το χαμηλό τους βάρος, κ.ά. Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αντίστοιχες των πολυμερών που χρησιμοποιούνται, τις θερμοσκληρυνόμενες, και τις θερμοπλαστικές. Η εφαρμογή τους περιορίζεται συνήθως από την θερμοκρασία λειτουργίας, ειδικά στα θερμοπλαστικά [3].

Τα **θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή** αφορούν κυρίως εποξειδικές ρητίνες και πολυεστέρες, αλλά μπορεί να είναι και βινυλικοί εστέρες, φαινολικά και ακρυλικά [4].

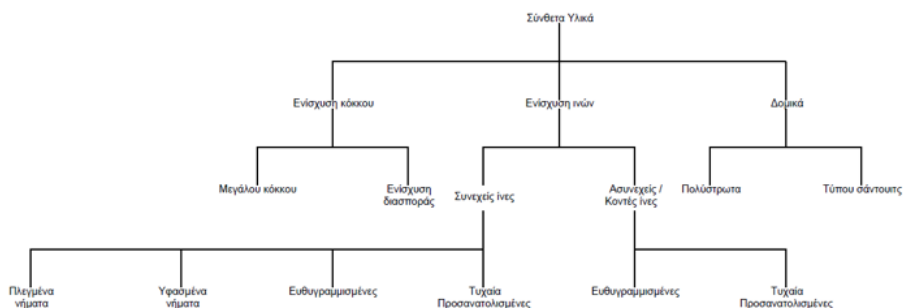
Γενικά καλύπτουν μια πολύ μεγάλη γκάμα ιδιοτήτων, με κοινό χαρακτηριστικό ότι κατά το υλικό πριν τον πολυμερισμό είναι ρευστές και μάλιστα με αρκετά χαμηλό ιξώδες, ενώ μετά τον πολυμερισμό το υλικό σκληραίνει λόγω της δημιουργίας ενός πυκνού τρισδιάστατου δικτύου χημικών σταυροδεσμών. Ο πολυμερισμός μπορεί να γίνει και σε θερμοκρασία δωματίου, αν και συνήθως προτιμούνται ειδικοί φούρνοι για τον έλεγχο και την βελτιστοποίηση της διεργασίας. Τα χαρακτηριστικά των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών είναι η ψαθυρότητα, η καλύτερη αντίδραση σε θερμικά φορτία, η σχετικά μικρή συρρίκνωση κατά τον πολυμερισμό, και κυρίως ότι ο πολυμερισμός γίνεται άπαξ, και όταν ολοκληρωθεί, η διαδικασία δεν είναι αναστρέψιμη με άνοδο της θερμοκρασίας. Δηλαδή, το υλικό μπορεί να αποσυντεθεί καιόμενο, αλλά δεν επανατήκεται. Αυτή είναι και η ειδοποιός μακροσκοπική διαφορά με τα θερμοπλαστικά.

Στα **θερμοπλαστικά πολυμερή**, σε αντίθεση με τα θερμοσκληρυνόμενα, δεν υπάρχουν χημικοί σταυροδεσμοί. Το υλικό χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μεγάλες μοριακές αλυσίδες, οι οποίες, ούσες πλεγμένες μεταξύ τους και σε χαμηλή ενεργειακή στάθμη, δίνουν στο υλικό μακροσκοπικά ιδιότητες συνοχής. Κατά την θέρμανσή τους, οι μοριακές αλυσίδες ξεπερνούν τα ενεργειακά τους φράγματα και το υλικό αποκτά μια παχύρρευστη μορφή. Σε αυτή τη μορφή γίνεται δυνατή και η διαβροχή της ενίσχυσης. Λόγω όμως του μεγάλου ιξώδους, ο εμποτισμός δεν είναι εύκολος σε πολύ ψιλά πλέγματα ινών. Επίσης, η εξάρτηση της συνοχής του υλικού από την υφιστάμενη ενεργειακή του στάθμη, αν και αναστρέψιμη, δημιουργεί προβλήματα στην χρήση του υλικού σε ανεβασμένες θερμοκρασίες, καθώς μεταβάλλονται οι μηχανικές του ιδιότητες, και τελικά τήκεται. Παράλληλα, υπό συνεχή τάση το υλικό υπόκειται σε ερπυσμό, το οποίο μεταβάλλει τις ισορροπίες τάσεων όταν συμμετέχει σε ένα σύνθετο υλικό. Γι' αυτούς τους λόγους, η χρήση θερμοπλαστικών μητρών είναι γενικά πιο περιορισμένη από τις θερμοσκληρυνόμενες. Στα πλεονεκτήματά του όμως πρέπει να αναφερθεί η εξαιρετική του αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, καθώς και η δυνατότητα μορφοποίησης του σύνθετου υλικού και μετά την δημιουργία του, θερμαίνοντάς το [3].

## 1.4 Τρόποι διάταξης της ενίσχυσης

Κάθε μία από τις κατηγορίες διάκρισης των σύνθετων υλικών ως προς την ενίσχυσή τους επιμερίζεται σε άλλες υποκατηγορίες. Το διάγραμμα στο Σχ. 1.1 είναι ενδεικτικό. Αυτή η διάκριση γίνεται διότι ο κάθε συνδυασμός υλικών ενίσχυσης – μήτρας μπορεί να γίνει με διαφορετική διάταξη. Πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ύαλος και ο άνθρακας, τα οποία μπορούν να συμμετέχουν σε πολυμερική μήτρα σαν σωματίδια, κοντές ίνες, ή συνεχείς ίνες, με διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά.

Κατά την **ενίσχυση κόκκου** ή **με τεμαχίδια**, βασική επίδραση στη μήτρα είναι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 2 έως 3 φορές. Σε αντίθεση με το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή του σύνθετου υλικού κατά κανόνα δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό. Τουναντίον, μπορεί να παρουσιάσει ελαφρά μείωση. Αυτό συμβαίνει διότι η διεπιφάνεια ενίσχυσης – μήτρας λειτουργεί σαν σημείο συγκέντρωσης τάσεων και έναρξης ρωγμών. Ως εκ τούτου, σημαντικές παράμετροι είναι το μέγεθος των τεμαχιδίων και η συμβατότητά τους με τη μήτρα. Το βασικό πλεονέκτημα όμως με την



Σχήμα 1.1: Κατηγορίες σύνθετων υλικών

ενίσχυση κόκκου είναι ότι το υλικό διατηρεί την ιστροπικότητά του στο χώρο [4].

Διακρίνεται σε ενίσχυση μεγάλου κόκκου ή διασποράς ανάλογα με το μέγεθος της ενίσχυσης, αν και το μεταξύ τους όριο είναι ασαφές.

Τα σύνθετα υλικά με **ενίσχυση κοντών ινών** έχουν μεγαλύτερη ικανότητα παραλαβής φορτίου από τα αντίστοιχα με ενίσχυση τεμαχιδίων, ενώ ο τρόπος παραγωγής τους είναι παρόμοιος. Μια ίνα θεωρείται «κοντή» όταν ο λόγος  $L/D$  είναι τάξης μεγέθους 100. Ενίσχυση τέτοιας μορφής δίνει στην μήτρα πολύ υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας αλλά συμβάλλει αποδοτικά στην ακαμψία του συστήματος μόνο όταν το φορτίο υποβάλλεται κατά μήκος του άξονά της. Αυτό δίνει στο σύστημα δύο δυναμικές:

- Οι ίνες να είναι προσανατολισμένες κατά την διεύθυνση του φορτίου. Ο προσανατολισμός των ινών είναι (στατιστικά) εφικτός κατά την ανάμιξή τους με την μήτρα. Τότε, το σύνθετο υλικό είναι ανισότροπο ως προς τις διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στον άξονα των ινών, αλλά έχει αυξημένη αντοχή ως προς την παράλληλη διεύθυνση στον άξονα των ινών.
- Οι ίνες να έχουν τυχαία κατανομή προσανατολισμού μέσα στη μήτρα. Το υλικό τότε είναι ισότροπο, αλλά χαμηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων.

Η παραπάνω διάκριση γίνεται ακόμη εντονότερη όταν η ίδια η ίνα είναι ανισότροπη, όπως οι ίνες άνθρακα. Ακόμη, ο λόγος  $L/D$  επηρεάζει πολύ έντονα τη συνολική μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων. Μεγιστοποιώντας και τους τρεις παραπάνω παράγοντες, δηλαδή τον προσανατολισμό, τις ιδιότητες της ενίσχυσης και το λόγο  $L/D$ , μπορεί να επιτευχθεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της μήτρας έως και 400%. Επίσης, αφού παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, και θεωρώντας ότι η διεπιφάνεια μήτρας – ενίσχυσης είναι αρκετά ισχυρή ώστε να το μεταφέρει χωρίς ολίσθηση, αυξάνεται αντίστοιχα και το όριο θραύσης. Παρόλα αυτά, η ενίσχυση με κοντές ίνες μετριάζει την επιμήκυνση θραύσης και την δυσθραυστότητα του υλικού.

Πέραν της αναβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, οι κοντές ίνες μπορεί να συμμετέχουν στο υλικό για να του δώσουν ειδικά χαρακτηριστικά, όπως ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, στα σύνθετα υλικά που χρησιμο-

ποιούνται στην Αεροναυπηγική, οι μήτρες ενισχύονται με νήματα μετάλλων, ώστε το αεροσκάφος να απορροφήσει την ηλεκτρική εκκένωση από κεραυνό σε περίπτωση καταιγίδας, χωρίς να καταστραφεί κάποιο κομμάτι της κατασκευής, του ηλεκτρονικού του εξοπλισμού ή / και του ωφέλιμου φορτίου του.

Όταν η ενίσχυση γίνεται με **συνεχείς ίνες**, οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού πλησιάζουν πολύ περισσότερο αυτές των ινών, παρά της μήτρας. Έτσι, γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών τους, ενώ η μήτρα αναλαμβάνει να κρατήσει τις ίνες παραταγμένες, και να μεταφέρει το φορτίο.

Η απλούστερη περίπτωση είναι όταν οι ίνες είναι **ευθυγραμμισμένες** και παράλληλες μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση, τα υλικά έχουν την μέγιστη δυνατή αντοχή τους κατά την διεύθυνση των ινών, αλλά εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη ανισοτροπία. Η αντοχή τους περιγράφεται από την Classic Laminate Theory, και καλύπτεται επαρκώς από τα μοντέλα των Reuss και Halpin-Tsai για παράλληλη και εγκάρσια φόρτιση αντίστοιχα. Τα υλικά αυτά όταν είναι διατεταγμένα μόνο σε ένα στρώμα είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στην πράξη λόγω της ανισοτροπίας τους.

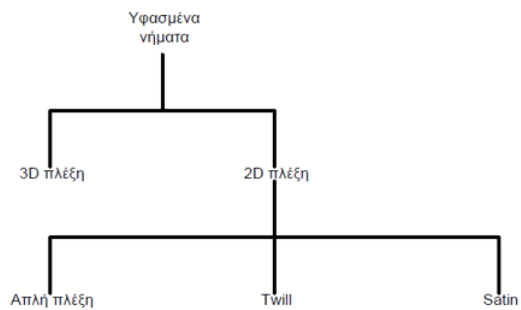
Για την άρση αυτής της ανισοτροπίας, οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε **τυχαίο προσανατολισμό**. Όμως, τα παραγόμενα υλικά, αν και ισότροπα, έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες λόγω των σχετικά χαμηλών τιμών της μέγιστης περιεκτικότητας σε ενίσχυση [4].

Ίσως ο πιο εύκολος και ευρέως διαδεδομένος τρόπος για την (σχεδόν) ισοτροπική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών στο επίπεδο φόρτισης είναι η χρήση υφασμένων και πλεγμένων νημάτων. Οι διάφορες τεχνολογίες ύφανσης και πλέξης είναι εξαιρετικά δημοφιλείς λόγω της ευκολίας κατασκευής και χρήσης τόσο στην καθημερινή, όσο και στην βιομηχανική κατασκευαστική πρακτική. Άλλωστε, τόσο η δημιουργία, όσο και η διαχείριση υφασμάτων είναι ένα κληροδότημα που εξελίσσεται από της αρχές της ανθρώπινης Ιστορίας. Ακόμη, η ευελιξία που προσφέρουν γενικά τα υφάσματα τους επιτρέπουν να μορφοποιούνται και σε πέραν των επίπεδων κατασκευών. Σε αυτές τις διατάξεις, οι μακριές, συνεχείς ίνες δεν είναι απλώς παρατεταγμένες με κάποιο κανονικότητα στο υλικό, αλλά είναι συγκροτημένες σε νήματα, τα οποία δύναται να είναι υφασμένα σε 2 ή 3 διαστάσεις.

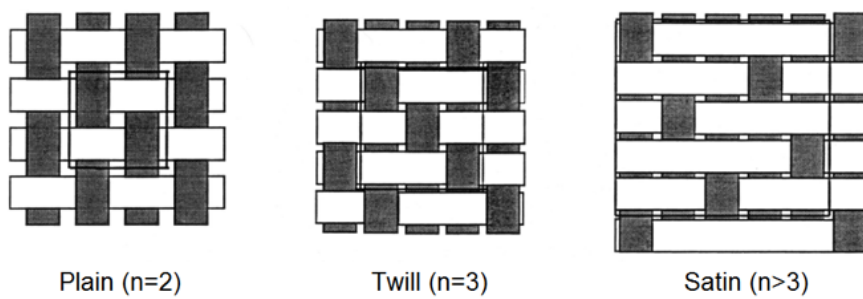
Τα **υφασμένα νήματα** έχουν συνήθως 2-D πλέξη, όπου το στημόνι και το υφάδι αλληλεπιδρούν περιοδικά σε γωνία  $90^\circ$  για την δημιουργία μοτίβων. Διακρίνονται ανάλογα με την περιοδικότητα της ύφανσης και τον αριθμό νημάτων ανά περίοδο,  $n$ , σε plain (απλή πλέξη, ανά δύο), twill (ανά τρία) ή satin (ανά τέσσερα ή περισσότερα) όπως φαίνεται στα σχήματα 1.2 και 1.3.

Η ύφανση εισάγει περαιτέρω παραμέτρους στη σχεδίαση πέραν του προσδιορισμού της ίνας, όπως η πυκνότητα της ύφανσης, το πλήθος των ινών ανά νήμα και η αναλογία νημάτων προς κάθε διεύθυνση. Αυτά όμως διατίθενται στο εμπόριο σε τόσες διαθέσιμες επιλογές, που πρακτικά καλύπτουν κάθε απαίτηση. Επίσης, λόγω της ύφανσης δημιουργούνται κενά που δεν μπορούν να καλυφθούν παρά μόνο με μήτρα, περιορίζοντας την μέγιστη περιεκτικότητα του υλικού σε ενίσχυση σε σχέση με την μονοαξονική. Ως εκ τούτου, περιορίζεται και η μέγιστη αύξηση των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Τα **πλεγμένα νήματα** είναι διαθέσιμα σε πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις, αν και σε όλες το νήμα περιελίσσεται περιοδικά δημιουργώντας θηλιές στο επίπεδο ή στο χώρο. Έτσι, η κατεύθυνσή του αλλάζει συνεχώς. Λόγω αυτής της διαμόρφωσης,



Σχήμα 1.2: Διάκριση υφασμένων νημάτων



Σχήμα 1.3: Τρόποι ύφανσης για σύνθετα υλικά

η περιεκτικότητα του υλικού σε νήματα είναι ακόμη χαμηλότερη, ενώ δεν μπορούν να αποφευχθούν μεγάλα κενά αμιγούς μήτρας. Συνεπώς, η αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού δεν είναι πολύ μεγάλη. Όμως, λόγω της συνεχούς αλλαγής της γωνίας φόρτισης σε σχέση με τις ίνες, τα υλικά αυτά έχουν ιστροπική συμπεριφορά, εκτός κι αν έχουν σχεδιαστεί διαφορετικά.

Ένας άλλος τρόπος άρσης αυτής της ανισοτροπίας είναι να χρησιμοποιηθούν **πο-λυστρωματικά υλικά** (laminates), δηλαδή επάλληλα στρώματα από μονοαξονικές ίνες (laminae) σε διάφορες κατευθύνσεις. Η λύση αυτή, αν και λύνει μερικώς το πρόβλημα, αφενός αναγκαστικά βάζει περισσότερες στρώσεις υλικού στο σύστημα, αυξάνοντας το βάρος, και αφετέρου δημιουργεί δευτερογενείς τάσεις κατά την φόρτιση λόγω της συστολής Poisson μεταξύ των στρωμάτων. Έτσι, το σύστημα οδηγείται στην καλύτερη περίπτωση σε παραμόρφωση του υλικού, ενώ στην χειρότερη σε αστοχία λόγω διαστρωματικής διάτμησης [3].

Η βέλτιστη λύση βρίσκεται συνδυάζοντας λιγότερες στρώσεις από υφάσματα ινών αντί για μονοαξονικές ίνες. Έτσι, το υλικό αποκτά ιστροπικότητα (όταν αυτή είναι επιθυμητή), διατηρώντας χαμηλό το βάρος (λόγω των λιγότερων στρώσεων) και τις διαστρωματικές τάσεις (λόγω της μικρότερης ανισοτροπίας των στρωμάτων).

## 1.5 Προσδιορισμός του προβλήματος

Η αντοχή ενός σύνθετου υλικού όταν οι ίνες είναι ευθυγραμμισμένες και προς μία κατεύθυνση, έστω κι αν αυτή σχηματίζει γωνία με την διεύθυνση φόρτισης ή/και οι ίνες κείνται σε περισσότερα του ενός laminae, καλύπτεται επαρκώς από την Classic Laminate Theory, που χρησιμοποιεί σαν βάση τα μοντέλα των Reuss και Voigt. Όταν όμως οι ίνες κάμπτονται για να δημιουργήσουν τις κυματώσεις της ύφανσης, τότε η κλασική θεωρία δεν είναι επαρκής, επειδή η γεωμετρία του υλικού και η διεύθυνση φόρτισης είναι (περιοδικά) μεταβαλλόμενη.

Από την δεκαετία του '80 έως σήμερα, έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη διάφορων μοντέλων που αναλύουν την γεωμετρία της ύφανσης, και υπολογίζουν, κυρίως αριθμητικά, την αντοχή του μοναδιαίου κελιού (και κατ' επέκταση του υλικού). Όμως, με την ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, τα μοντέλα αυτά γίνονται όλο και πιο σύνθετα. Ως αποτέλεσμα, ακόμη και για τον υπολογισμό απλούστερων γεωμετριών, υπάρχει αυξημένη απαίτηση σε μέσα, τεχνογνωσία και χρόνο, τα οποία, στο πεδίο των Εφαρμοσμένων Επιστημών, είναι συχνά πολυτέλεια. Η λεπτομέρεια δε και η ακρίβεια των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την τάνυση των συστημάτων ινών – νημάτων – υλικών, και η περιγραφή των οποίων είναι αντικείμενο των σύγχρονων μοντέλων, είναι συχνά ίδιας τάξης μεγέθους με το στατιστικό σφάλμα και τις κατασκευαστικές ατέλειες.

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι να αναπτύξει ένα απλό και εύκολα εφαρμόσιμο μοντέλο υπολογισμού της αντοχής, και να το επικυρώσει με πειραματικά δεδομένα, τόσο από πειράματα που έγιναν στο Πολυτεχνείο Κρήτης, όσο και από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Επειδή η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα καλύπτει όλες τις πιθανές διαμορφώσεις της ύφανσης είναι εξαιρετικά σύνθετη, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο που καλύπτει

την δισδιάστατη ύφανση απλής πλέξης, η οποία είναι η απλούστερη μορφή. Αντίστοιχα μοντέλα όμως δύνανται να αναπτυχθούν και για κάθε άλλη πλέξη.

## Κεφάλαιο 2

# Ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

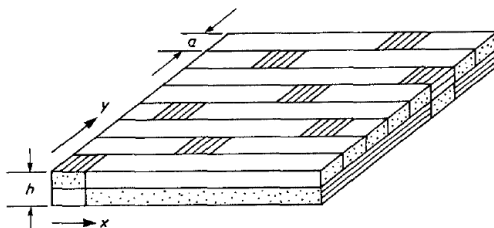
Τα σύνθετα υλικά με υφασμένες ίνες για ενίσχυση κέρδισαν πολύ γρήγορα την πρωτεύουσα θέση στην κατασκευαστική πρακτική συνθέτων υλικών με συνεχείς ίνες, όχι μόνο λόγω της ευκολίας κατασκευής και διαχείρισής τους, αλλά και επειδή συνδυάζουν αντοχή με ελαστικότητα, ελεγχόμενη ανισοτροπία και μεγάλη περιεκτικότητα σε ενίσχυση. Η γεωμετρία της ύφανσης όμως, καθώς και όλες οι παράμετροι που εισάγει η ύφανση κατά την σχεδίαση του υλικού, είναι αντικείμενο μελέτης και έρευνας με στόχο να προσδιοριστούν με ακρίβεια και να εξελιχθούν οι θερμομηχανικές ιδιότητες του τελικού σύνθετου υλικού.

Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει για να δημιουργηθούν μοντέλα ικανά να περιγράψουν την συμπεριφορά του μοναδιαίου κελιού της ύφανσης, ώστε επαγωγικά να είναι προβλέψιμη η εντατική κατάσταση του υλικού και, κατ' επέκταση, των κατασκευών. Τα μοντέλα αυτά ξεκίνησαν ως αναλυτικά και επεκτάθηκαν, όταν η τεχνολογία το επέτρεψε, σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Σήμερα, χρησιμοποιούνται εξελιγμένοι αλγόριθμοι με δεκάδες παραμέτρους για τον προσδιορισμό της αντοχής και της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς αυτών των υλικών.

### 2.2 Τα αναλυτικά μοντέλα

Η αρχή της μοντελοποίησης των υφασμάτων υπό τάση ξεκίνησε από τις εργασίες των Ishikawa and Chou [5], οι οποίοι ανέπτυξαν τρία μοντέλα για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους στις αρχές της δεκαετίας του '80. Τα τρία αυτά μοντέλα ήταν το μοντέλο «μωσαϊκού» (mosaic model), το μοντέλο «κυμάτωσης της ίνας» (fibre undulation model), και το μοντέλο «γεφύρωσης» (bridging model). Το τελευταίο έχει εφαρμογή μόνο στις υφάνσεις satin.

Στο μοντέλο «μωσαϊκού», όπως περιγράφεται στο σχήμα 2.1, το ύφασμα θεωρείται ως ένα απλό διαστρωμάτωμα από ασύμμετρα φύλλα (laminae), στα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη οι διατμητικές παραμορφώσεις κατά την καθ' ύψος διεύθυνση. Έτσι, οι 2-D τομές απλοποιούνται σε 1-D μοντέλα, τα οποία συντίθενται παράλληλα



**Σχήμα 2.1:** Το μοντέλο «μωσαϊκού», όπως περιγράφεται από τους Ishikawa and Chou [5].

ή σειριακά, ανάλογα με την διάταξη των τομών, χρησιμοποιώντας ισοπαραμορφωσι-  
ακές (iso-strain) ή ισοτασικές (iso-stress) συνθήκες αντίστοιχα.

Όταν το μοντέλο χρησιμοποιεί την παράλληλη σύνδεση των φύλλων, δίνει τα άνω  
όρια των ελαστικών σταθερών του μοναδιαίου κελιού. Αντίστοιχα, όταν η σύνδεση γί-  
νεται σειριακά, το μοντέλο δίνει τα κάτω όρια. Αν και αυτά τα όρια έχουν σωστή τάξη  
μεγέθους και συγκρίσιμα αποτελέσματα με διάφορα πειραματικά δεδομένα, εντού-  
τοις δεν συμπίπτουν για ύφανση απλής πλέξης, στην οποία υπάρχει η μέγιστη κυμά-  
τωση του νήματος. Αυτό σημαίνει ότι η πραγματικότητα βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα  
και πρέπει να υπολογισθεί με πιο ακριβές μοντέλο.

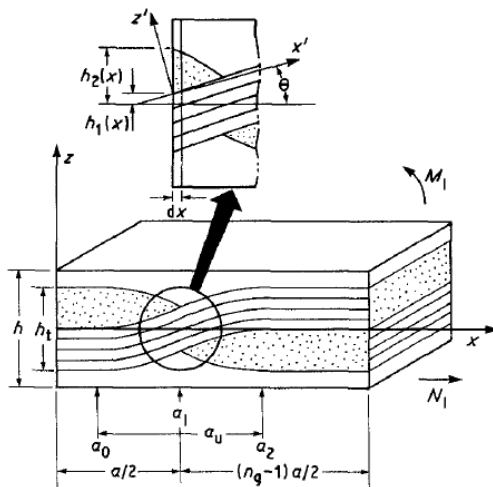
Οι αδυναμίες του «μωσαϊκού» μοντέλου είναι ότι: (1) δεν θεωρεί το νήμα συνε-  
χές, και (2) παραβλέπει την συνέχεια των τάσεων και των παραμορφώσεων στα όρια  
των υποσυστημάτων κατά την σύνθεση του μοναδιαίου κελιού. Τις αδυναμίες αυτές  
προσπάθησαν να επιλύσουν στην ίδια εργασία με το μοντέλο «κυμάτωσης της ίνας».  
Το μοντέλο αυτό είναι μονοδιάστατο και λαμβάνει υπόψη την συνέχεια και την κυμά-  
τωση της ίνας, χωρίζεται δε σε 3 περιοχές: την περιοχή «κυμάτωσης», την «ευθεία»  
περιοχή και την περιοχή «αμιγούς μήτρας», όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.

Ενώ στην ευθεία περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο μωσαϊκού, στην  
περιοχή κυμάτωσης, σε κάθε απειροστή φέτα του νήματος εφαρμόζεται η Κλασική  
Θεωρία Διαστρωματώσεων (Classic Laminate Theory) κατά την διεύθυνση φόρτισης.  
Ολοκληρώνοντας σε κάθε περιοχή και συνδυάζοντας σε σειρά τις δύο περιοχές, πα-  
ράγονται οι ελαστικές σταθερές του συνθέτου.

Η αδυναμία αυτού του μοντέλου είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την κυμάτωση του  
νήματος κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης.

Το μοντέλο αυτό είναι μια επέκταση του σειριακού μοντέλου μωσαϊκού, και εί-  
ναι καταλληλότερο για υφάσματα με χαμηλές τιμές νημάτων ανά μοναδιαίο κελί,  $n$ ,  
δηλαδή, για υφάσματα με απλή ή twill ύφανση. Για την μοντελοποίηση της συμπε-  
ριφοράς των satin υφασμάτων, όπου οι περιοχές που διαπλέκονται τα νήματα δεν  
εφάπτονται, εισήχθη το μοντέλο «γεφύρωσης».

Το μοντέλο «γεφύρωσης» είναι ένας συνδυασμός των παραπάνω μοντέλων. Εί-  
ναι ένα δισδιάστατο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την κυμάτωση του νήματος κατά  
την διεύθυνση φόρτισης. Παραβλέπει, όμως, την κυμάτωση του νήματος κάθετα σε  
αυτήν. Για την σύνδεση των επιμέρους περιοχών χρησιμοποιεί παράλληλη ή/και σει-



**Σχήμα 2.2:** Το μοντέλο «κυμάτωσης της ίνας», όπως περιγράφεται από τους Ishikawa and Chou [5].

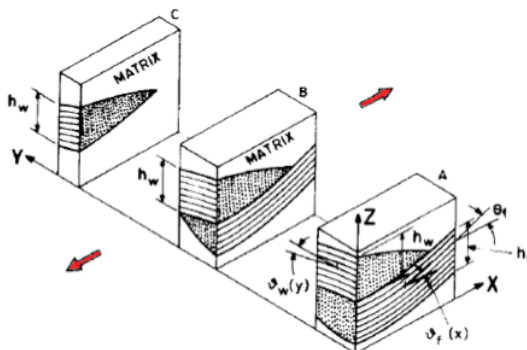
ριακή σύνδεση. Έχει εφαρμογή όμως μόνο για τιμές  $n > 3$ , δηλαδή για satin υφάσματα, ενώ για  $n = 2, 3$  εκφυλίζεται στο μοντέλο κυμάτωσης.

Σε ένα πιο πρόσφατο άρθρο τους [6], οι ίδιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα μοντέλα κυμάτωσης και γεφύρωσης και, εισάγοντας τους μη-γραμμικούς συντελεστές από τις εργασίες των Hahn and Tsai [7] προσπάθησαν να περιγράψουν τη μη-γραμμική συμπεριφορά των υφασμάτων. Δεν έλαβαν όμως υπόψη τα νήματα κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης, ούτε την διατομή των νημάτων. Έτσι, και αυτά τα μοντέλα χρειάζονταν περαιτέρω τροποποίηση, αν και συνέκλιναν ήδη αρκετά με τα πειραματικά δεδομένα.

Στη συνέχεια, ο Kabelka [8] εξέλιξε το μοντέλο κυμάτωσης λαμβάνοντας υπόψη την κυμάτωση και των δύο νημάτων, αν και δεν περιέλαβε την διατομή των νημάτων. Οι τιμές των ελαστικών σταθερών των νημάτων προσδιορίστηκαν σε ισοστατικό πεδίο και στην συνέχεια, μέσω της Κλασσικής Θεωρίας Διαστρωματώσεων (Classic Laminate Theory), προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του συνθέτου υλικού.

Παρόμοια εργασία έκαναν και οι Naik and Shembekar [9], οι οποίοι έλαβαν υπόψη τους την διατομή των νημάτων και εισήγαγαν πιθανό κενό μεταξύ τους. Συνδυάζοντας τις περιοχές του μοντέλου πρώτα σειριακά και μετά παράλληλα ή αντιστρόφως, εξήγαγαν τα άνω και κάτω όρια των ελαστικών σταθερών αντίστοιχα. Οι τιμές που υπολογίστηκαν συμφωνούσαν αρκετά με τα πειραματικά δεδομένα.

Καθοριστική τέλος ήταν και η προσπάθεια των Naik and Ganesh [10], οι οποίοι στις αρχές της δεκαετίας του '90 όχι μόνο παρουσίασαν δύο πολύ εκτενή αναλυτικά μοντέλα, τα μοντέλα «διάταξης τομών» (Slice Array Model – SAM) και «διάταξης στοιχείων» (Element Array Model – EAM), αλλά εμπλούτισαν και την διεθνή βιβλιογραφία με εκτενή πειραματικά δεδομένα.



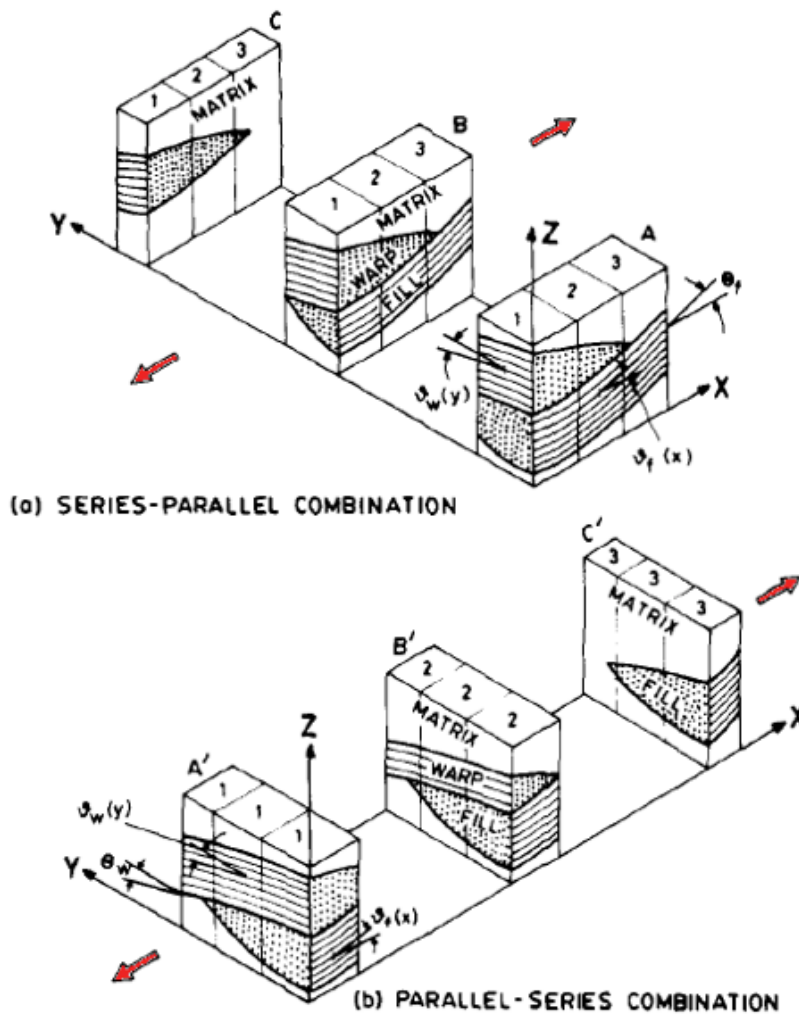
**Σχήμα 2.3:** Το μοντέλο «διάταξης τομέων», όπως περιγράφεται από τους Naik and Ganesh [10].

Στο μοντέλο «διάταξης τομέων», το μοναδιαίο κελί διακρίνεται σε τομείς κατά την διεύθυνση φόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Οι ελαστικές σταθερές κάθε τομέα υπολογίζονται ξεχωριστά υπό ισοπαραμορφωσιακή κατάσταση (iso-strain), και στην συνέχεια επανασυντίθενται στο μοναδιαίο κελί. Το μοντέλο αυτό έχει κάποιες αδυναμίες στη σύγκλιση των αποτελεσμάτων για μεγάλες γωνίες κυμάτωσης του νήματος, ενώ κάνει μόνο μια απλή εκτίμηση για την συμβολή του κάθετου στην διεύθυνση φόρτισης νήματος στην συνολική ελαστικότητα.

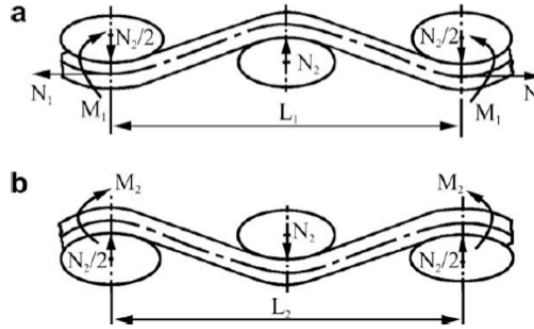
Οι αδυναμίες αυτές αίρονται με το μοντέλο «διάταξης στοιχείων», όπου οι τομείς τέμνονται ξανά σε στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ελαστικές σταθερές του κάθε στοιχείου, και γίνεται η επανασύνθεση των στοιχείων. Ανάλογα με το αν η σύνθεση γίνεται πρώτα κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης και μετά παράλληλα ή το ανάποδο, το μοντέλο διακρίνεται σε SP (Serial – Parallel) ή PS (Parallel – Serial). Σε κάθε περίπτωση, η σειριακή σύνθεση γίνεται για ισοτασική κατάσταση (iso-stress), ενώ η παράλληλη για ισοπαραμορφωσιακή κατάσταση (iso-strain).

Και τα δύο παραπάνω μοντέλα δίνουν καλή σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα. Αργότερα οι ίδιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν αυτά τα μοντέλα για τον υπολογισμό όχι μόνο των ελαστικών σταθερών των υλικών, αλλά και των ορίων αντοχής τους, καθώς και για να αναπαραστήσουν ολόκληρα τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης υπό μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών των εργασιών ήταν επίσης θετικά.

Έκτοτε και μέχρι σήμερα, αναπτύχθηκαν διάφορα άλλα αμιγώς αναλυτικά μοντέλα, όπως των Xiong et al. [11], το οποίο στη βάση του έχει την ελαχιστοποίηση της ελαστικής ενέργειας των νημάτων κατά την τάση τους, για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών. Λαμβάνει υπόψη του όχι μόνο τα κάθετα στην φόρτιση νήματα, αλλά και τις δυνάμεις και ροπές που δημιουργούν αυτά κατά την τάση του παράλληλου στην φόρτιση νήματος. Οι αδυναμίες όμως του μοντέλου είναι ότι κάνει αυθαίρετη προσέγγιση της διατομής των νημάτων ως έλλειψη (από μικροφωτογραφίες έχει φανεί ότι πλησιάζουν περισσότερο ημιτονοειδείς καμπύλες), και ότι είναι μόνο



**Σχήμα 2.4:** Το μοντέλο «διάταξης στοιχείων», όπως περιγράφεται από τους Naik and Ganesh [10].



**Σχήμα 2.5:** Οι δυνάμεις στο μοντέλο των Xiong et al. [11] στο (a) παράλληλο και (b) κάθετο νήμα στη φόρτιση.

2-D. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματά τους είναι πολύ ενθαρρυντικά σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.

Τα παραπάνω μοντέλα έχουν αναλυτική λύση κλειστής μορφής, εκτός από το μοντέλο διάταξης στοιχείων (EAM). Σε αυτό, οι υπολογισμοί γίνονται τόσο πολύπλοκοι, που απαιτούν την χρήση αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού. Επίσης, η έννοια της διακριτοποίησης σε πεπερασμένα στοιχεία, καθώς και τα τεχνικά μέσα της εποχής που αναπτύχθηκε (αρχές της δεκαετίας του '90), θέτει τις απαρχές για την ανάπτυξη μοντέλων που χρησιμοποιούν τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM).

### 2.3 Μοντέλα που χρησιμοποιούν τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την επίλυση μητρώων δυσκαμψίας σε διάφορα αναλυτικά μοντέλα. Αργότερα όμως, τα μοντέλα έγιναν εξ' ολοκλήρου ως αποτέλεσμα εξομίωσης διάφορων υπολογιστικών πακέτων. Όμως, καθώς η δομή των υφασμάτων είναι πολύ σύνθετη, ήταν σχεδόν αδύνατο να περιληφθούν όλοι οι παράγοντες σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Με σκοπό να υπάρξουν κάποια αξιόλογα αποτελέσματα με εφικτό υπολογιστικό κόστος, οι ερευνητές προσανατολίστηκαν στην ανάπτυξη εναλλακτικών θεωρήσεων και πιο αποδοτικών μεθόδων υπολογισμού.

Πέραν των Naik and Ganesh [10], οι Sankar and Marrey [12] πρότειναν ένα μοντέλο στο οποίο τα πεδία τάσεων και παραμορφώσεων σε επίπεδο μοναδιαίου κελιού προκύπτουν από την επίλυση μιας εξίσωσης πινάκων της μορφής:

$$[K][\varepsilon] = [P] ,$$

όπου  $[K]$  είναι ο πίνακας δυσκαμψίας,  $\varepsilon$  είναι το διάνυσμα των παραμορφώσεων και  $[P]$  είναι το διάνυσμα των φορτίων. Σε αυτό το μοντέλο, το υλικό θεωρείται ότι

υπόκειται σε ομοιόμορφη παραμόρφωση, βάσει της οποίας τα περιεχόμενα του κελιού υπόκεινται σε συνδυασμό εφελκυσμού, κάμψης και διάτμησης. Οι παραγόμενες δυνάμεις / τάσεις από αυτές τις παραμορφώσεις εφαρμόζονται σε ένα ισοπαραμετρικό στοιχείο επίπεδης παραμόρφωσης 8 κόμβων, στο οποίο αντιστοιχεί το μοναδιαίο κελί. Αν και η λύση του έδινε καλά αποτελέσματα σε σχέση με την θεωρία, το μοντέλο δεν επικυρώθηκε από πειραματικά δεδομένα.

Οι Ichihashi et al. [13] πρότειναν ένα μοντέλο για να υπολογίσουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού με μία στρώση υφάσματος. Το μοντέλο περιγράφει τα νήματα σαν ένα ζευγάρι δοκών από υλικό όμοιο με τις ίνες. Ένα διαφορετικό στοιχείο ανάμεσα στους δοκούς χρησιμεύει για να μοντελοποιηθεί η μήτρα μεταξύ των ινών. Έτσι, λαμβάνονται υπόψη και φαινόμενα αλληλεπίδρασης σε επίπεδο νημάτων, αλλά και ινών. Τα αποτελέσματα ήταν ότι ένα πιο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, αλλά με μεγαλύτερης αντοχής διεπιφάνεια, έχει καλύτερη αντοχή σε ρηγματώσεις, και ότι η πυκνότητα της κυμάτωσης των ινών έχει μικρότερη επιρροή από την αντοχή της διεπιφάνειας όσον αφορά στην αρχική τάση θραύσης.

Οι Glaessgen et al. [14, 15] θεώρησαν ότι η μέση γραμμή του κάθε νήματος περιγράφεται από μία καμπύλη Bezier. Τόσο οι ίνες, όσο και η μήτρα θεωρούνται ιστροπικές και η διατομή του νήματος ελλειπτική. Σε αυτή τη μέθοδο, η γεωμετρική και μηχανική μοντελοποίηση γίνονται σε επίπεδο μοναδιαίου κελιού. Η FEM διακριτοποίηση έγινε σε υπολογιστικό περιβάλλον ABAQUS χρησιμοποιώντας κανονικά τετράεδρα στοιχεία. Αποτέλεσμα αυτού του μοντέλου, είναι να συνδυαστούν οι γεωμετρικές ιδιότητες του υφάσματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, για να προσδιοριστούν οι εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις του μοναδιαίου κελιού, καθώς και οι παράμετροι θραύσης.

Οι Cox et al. [16] και Xu et al. [17] πρότειναν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, γνωστό ως «δυναμικό μοντέλο», για να προσομοιάσουν την συμπεριφορά μοναδιαίων κελιών τρισδιάστατης ύφανσης στην ελαστική περιοχή. Σε αυτό το μοντέλο, το οποίο επίσης υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ABAQUS, η κατά μήκος (αξονική) συμπεριφορά των νημάτων μοντελοποιείται από δικομβικά (bimodal), μονοδιάστατα στοιχεία, ενώ όλες οι υπόλοιπες ιδιότητες, όπως η εγκάρσια δυσκαμψία, η διατμητική δυσκαμψία και ο λόγος Poisson, αντιπροσωπεύονται από τρισδιάστατα στοιχεία 8 κόμβων, με ιστροπικές και ομοιογενείς ιδιότητες. Παρόλα αυτά, δεν λαμβάνονται υπόψη οι ανισότροπες και ετερογενείς ιδιότητες της πλέξης.

Ο Whitcomb [18] πρότεινε μια επαναληπτική μέθοδο ανάλυσης. Στο μοντέλο του χρησιμοποιείται ένας τραχύς κάρναβος για να μεταφερθούν οι δυνάμεις και μετατοπίσεις ως οριακές συνθήκες σε συγκεκριμένα τοπικά και πιο εκλεπτυσμένα δικτυώματα που αντιπροσωπεύουν την μικροδομή. Αν και το μοντέλο αυτό αναφέρεται ότι δεν δίνει καλά αποτελέσματα, και έχει προβλήματα οριακών συνθηκών στην περιοχή της μετάβασης από τον λεπτό στον τραχύ κάρναβο, ήταν το πρώτο μοντέλο στο οποίο εισήχθη η έννοια της μετάβασης από την μακροδομή στην μικροδομή και τούμπαλιν.

Το μοντέλο εξελίχθηκε από τους Woo and Whitcomb [19], Chapman and Whitcomb [20], Whitcomb and Srirangam [21]. Η προβληματική μετάβαση από τον τραχύ στον λεπτό κάρναβο βελτιώθηκε, όπως και η γεωμετρία για τα νήματα. Παρ' όλα αυτά, τα μοντέλα εξακολουθούν να είναι ευαίσθητα στους τομείς της ολοκλήρωσης και της μετάβασης από την μικροδομή στην μακροδομή.

Οι Fujita et al. [22] παρουσίασαν ένα μοντέλο που περιγράφει τη συνέχεια των

ιδιοτήτων του υλικού από την μικροδομή ως την μακροδομή. Η κάθε ίνα μοντελοποιείται με 9 στοιχεία δοκού, ενώ η μήτρα μοντελοποιείται τόσο στην περιοχή μεταξύ των ινών στο κάθε νήμα για την σύνδεσή τους, όσο και ως αμιγές υλικό στις κενές περιοχές που αφήνει η ύφανση. Το μοντέλο όμως χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιάσει μόνο τις μηχανικές ιδιότητες των 2D υφασμάτων, ενώ δεν έγινε παραμετρική ανάλυση όσον αφορά στις γεωμετρικές ιδιότητες του υφάσματος.

Τέλος, οι Karayaka and Kurath [23] παρουσίασαν ένα μικρομηχανιστικό μοντέλο για να ερευνήσουν την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με υφάσματα, όταν οι διευθύνσεις φόρτισης, καθώς και οι παράμετροι της ύφανσης είναι ελεύθερες. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει μια ενοποιημένη και ποσοτικοποιημένη σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών, των παραμέτρων ύφανσης, και των συνθηκών φόρτισης. Η περιγραφή και η συσχέτιση της μικρο- και μακροσκοπικής συμπεριφοράς εξηγεί την αντοχή ως την θραύση, καθώς και τους συσχετιζόμενους μηχανισμούς. Το μοντέλο επίσης παρέχει στοιχεία για τις διαμήκεις, εγκάρσιες και διατμητικές ιδιότητες των υλικών, που αντιστοιχούν ποσοτικά με τους παρατηρηθέντες μηχανισμούς αστοχίας.

Έτσι, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ενώ ξεκίνησαν ως απλοί επιλυτές μητρώων, κατέληξαν να περιγράφουν την δομή του υλικού και, βάσει αυτής, να υπολογίζουν την αντοχή του. Τα όρια ετίθετο μόνο από τα τεχνολογικά μέσα, και πόσο αυτά μπορούσαν να ανταποκριθούν στις υπολογιστικές απαιτήσεις των μοντέλων.

## 2.4 Τα μοντέλα γενετικών και ιεραρχικών αλγορίθμων

Η λογική της ενιαίας αντιμετώπισης του υλικού από την μικροδομή ως την μακροδομή του, έχει από την αρχή της προηγούμενης δεκαετίας αρκετή υπολογιστική ισχύ για να εφαρμοστεί. Έτσι, τα σύγχρονα μοντέλα δεν μοντελοποιούν απλώς το υλικό, αλλά και όλη την ιεραρχική δομή του, κληροδοτώντας σε κάθε επόμενο επίπεδο τις ιδιότητες του προηγούμενου.

Ως ιεραρχικό επίπεδο στα υλικά από υφάσματα μπορεί να θεωρηθεί η σειρά:

Ίνα → Νήμα → Ύφασμα/Μήτρα → Μοναδιαίο Κελί → Σύνθετο Υλικό

Αν και οι απαρχές της έννοιας της ιεραρχίας στην δομή των υφασμάτων ανάγονται στην δεκαετία του 1930, στις εργασίες των Peirce [24], Pozdnyakov [25], Novikov [26], όλα τα μοντέλα αντιμετώπιζαν αφενός το πρόβλημα θεωρητικά και αναλυτικά, και αφετέρου αφορούσαν σε μία μόνο δομή (π.χ. απλή ύφανση). Δεν υπήρχε, δηλαδή, ένα γενικό μοντέλο. Από τις αρχές της δεκαετίας του '80, οι Hearle and Shanahan [27] και de Jong and Postle [28] εισήγαγαν την αρχή της Ελάχιστης Ενέργειας στην ιεραρχική δομή των υφασμάτων. Και ενώ τα μοντέλα είχαν φυσική ακεραιότητα και ήταν δυνατό να επιλυθούν με τα υπολογιστικά μέσα της εποχής, είχαν δύο βασικές αδυναμίες. Η πρώτη είναι ότι τα υφάσματα εγγενώς δεν είναι συντηρητικά μηχανικά συστήματα, ενώ η αρχή της Ελάχιστης Ενέργειας εφαρμόζεται μόνο σε τέτοιου τύπου συστήματα. Η δεύτερη είναι ότι η δομή του υφάσματος δεν μετέχει ως παράγοντας στην εφαρμογή της αρχής. Βέβαια, αυτήν την αρχή χρησιμοποίησαν διάφορα αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα της εποχής (και συνεχίζει να χρησιμοποιείται μέχρι

σήμερα), αλλά μόνο σε ένα ιεραρχικό επίπεδο.

Το 2001, οι Lomov et al. [29], παρουσίασαν μία νέα τεχνική, τον «Προγραμματισμό ως προς το Αντικείμενο» (Object Oriented Programming – OOP), η οποία έχει τρία χαρακτηριστικά: την συγκέντρωση (encapsulation), την κληρονομικότητα (inheritance) και τον πολυμορφισμό (polymorphism). Ως συγκέντρωση, εννοείται ότι το κάθε αντικείμενο δεν διατηρεί μόνο δεδομένα, αλλά και συμπεριφορά. Ως κληρονομικότητα, εννοείται ότι κατασκευάζοντας ένα αντικείμενο ανώτερης τάξης, όπως είναι το νήμα για τις ίνες, αυτό παίρνει τα χαρακτηριστικά από τις συνιστώσες του. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει μια λογική βάση για την σταδιακή βελτίωση του μοντέλου. Τέλος, ως πολυμορφισμός εννοείται η δυνατότητα που έχει ο σχεδιαστής να εκμεταλλευτεί πλήρως αυτήν τη σταδιακή βελτίωση. Έτσι, το αντικείμενο αλλάζει συμπεριφορά ανάλογα με τα τρέχοντα υποσυγκροτήματά του.

Συνολικά, όλη η διαδικασία παραγωγής του υφάσματος και εν συνεχεία του υλικού επαναλαμβάνεται εικονικά, παράγοντας εικονικά υλικά και προϊόντα μέσω της διαδοχικής επεξεργασίας του κάθε επιπέδου.

Αυτή η κλιμακωτή αναγωγή των ιδιοτήτων της μικροδομής, συνδυαζόμενες με μακροσκοπικά χαρακτηριστικά προς ένα τελικό αποτέλεσμα της συμπεριφοράς του συνολικού συνθέτου υλικού ήταν ο ανεπίτευκτος στόχος των μοντέλων που χρησιμοποιούν FEM. Σε κάθε επίπεδο ιεραρχίας χρησιμοποιούνται διάφορα αναλυτικά μοντέλα και βάσεις δεδομένων για τον προσδιορισμό των τιμών που αφορούν αυτό το επίπεδο. Έτσι, το πρόβλημα του προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού αποκτά μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, αφού πλέον δεν μοντελοποιείται αλλά αναπαράγεται σε ένα παράλληλο, εικονικό χώρο. Η αναπαραγωγή αυτή γίνεται με ολοκληρωμένα, custom-made, λογισμικά πακέτα, τα οποία μπορεί να είναι εμπορικά. Σε κάθε περίπτωση, η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς πλέον δεν αποτελεί εμπόδιο.



## Κεφάλαιο 3

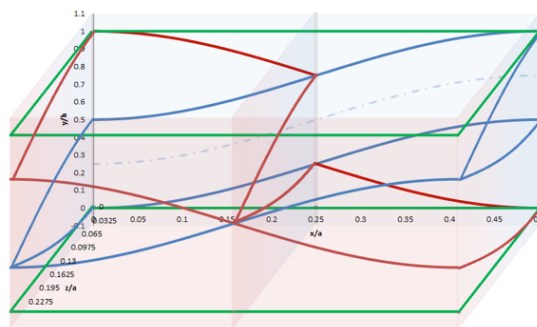
# Το θεωρητικό μοντέλο

### 3.1 Γεωμετρική περιγραφή

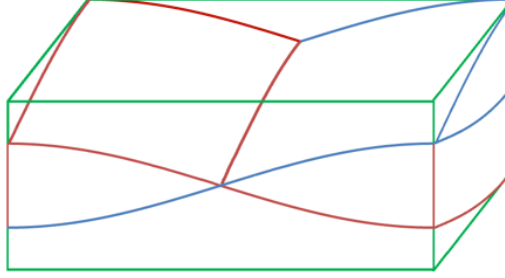
#### 3.1.1 Εισαγωγή

Το σχήμα 3.1 απεικονίζει την δομή ενός μοναδιαίου ημι-κελιού σε σύνθετο υλικό μίας στρώσης υφάσματος απλής πλέξης, που περιγράφει την διάταξη των νημάτων, με  $h$  το ύψος του,  $a_{warp}$  την περίοδο της κυμάτωσης του νήματος στον άξονα  $x$  (στημόνι - warp), και  $a_{weft}$  την περίοδο της κυμάτωσης του νήματος στον άξονα  $z$  (υφάδι - weft). Για λόγους απλότητας, και καθώς η συμμετρία του κελιού το επιτρέπει, το ημι-κελί απεικονίζεται στον άξονα  $x$  από 0 έως  $a_{warp}/2$ , στον άξονα  $y$  από 0 έως  $h$ , και στον άξονα  $z$  από 0 έως και  $a_{weft}/4$ .

Για καλύτερη κατανόηση, στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται και μια προοπτική απεικόνιση του ημι-κελιού, στην οποία φαίνονται μόνο οι ορατές ακμές.



Σχήμα 3.1: Η δομή του μοναδιαίου ημι-κελιού



Σχήμα 3.2: Προοπτική απεικόνιση του μοναδιαίου ημι-κελίου

### 3.1.2 Ανάλυση κατά το επίπεδο $z = 0$

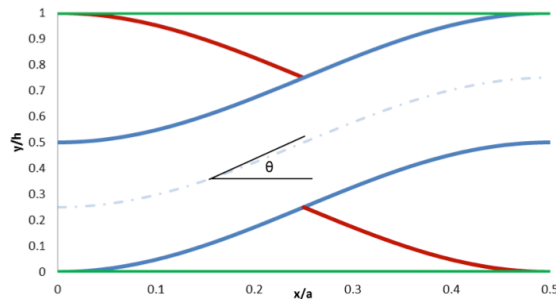
Έστω ότι η συνάρτηση που περιγράφει την κυμάτωση του στημονιού είναι συνημιτονοειδούς μορφής, και δίνεται από τον τύπο:

$$y = h \left( 0.5 - 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \quad x \in \left[ 0, \frac{a_{warp}}{2} \right] \quad (3.1)$$

Από αυτήν την συνάρτηση, και με offset  $0.25h$ , προκύπτουν τα όρια του στημονιού στο επίπεδο  $x - y$ . Σε κάθε σημείο, η γωνία που σχηματίζει το νήμα με τον άξονα  $x$ , δίνεται από την παράγωγο της συνάρτησης, και ισούται με:

$$\theta = \arctan \left( \frac{h\pi}{2a_{warp}} \sin \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \quad (3.2)$$

Έστω ότι η διατομή των νημάτων που κείνται στον άξονα  $z$  (υφάδι) προσεγγίζονται από 2 συμμετρικές ως προς το  $y = h/4$  και το  $y = 3h/4$  συνημιτονοειδείς συναρτήσεις, ενώ το ημι-πλάτος κάθε νήματος είναι  $a_{warp}/4$ . Έτσι, οι συναρτήσεις που



Σχήμα 3.3: Τομή του μοναδιαίου κελίου στο επίπεδο  $z = 0$

περιγράφουν τα όρια των διατομών του υφαδιού είναι:

$$y = h \left( 0.75 + 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \quad x \in \left[ 0, \frac{a_{warp}}{4} \right] \quad (3.3)$$

$$y = h \left( 0.25 + 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \quad x \in \left[ \frac{a_{warp}}{4}, \frac{a_{warp}}{2} \right] \quad (3.4)$$

Το κελί ολοκληρώνεται με ευθείες που το περιορίζουν άνω και κάτω, και προσεγγίζουν την μήτρα. Αυτές είναι:

$$y = 0 \quad x \in [0, a_{warp}/2] \quad (3.5)$$

$$y = h \quad x \in [0, a_{warp}/2] \quad (3.6)$$

Η εγκυρότητα αυτών των υποθέσεων επιβεβαιώνεται από μικροφωτογραφίες .

### 3.1.3 Ανάλυση κατά το επίπεδο $z = a_{wefl}/4$

Κατά τον άξονα  $z$ , το πάχος του στημονιού είναι αυξομειούμενο έτσι, ώστε σε  $z = a_{wefl}/4$ , το στημόνι να έχει εκφυλιστεί σε μία γραμμή. Αντίθετα, η διατομή του υφαδιού, η οποία αυξομειώνεται κατά τον άξονα  $x$ , παραμένει σταθερή.

Οι συνάρτηση που περιγράφει το σχήμα του στημονιού είναι:

$$y = h \left( 0.5 - 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \quad x \in \left[ 0, \frac{a_{warp}}{2} \right] \quad (3.7)$$

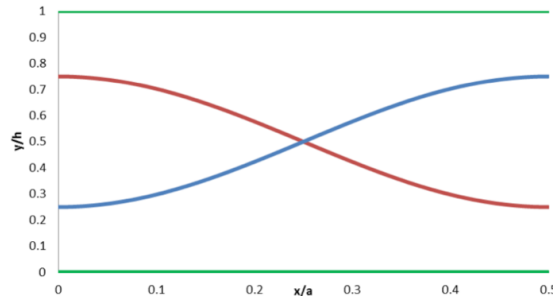
ενώ η διατομή των υφαδιών περιορίζεται αφενός από το στημόνι, αφετέρου από την συνάρτηση:

$$y = h \left( 0.5 + 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \quad x \in \left[ 0, \frac{a_{warp}}{2} \right] \quad (3.8)$$

Ξανά, η μήτρα περιορίζεται από τα νήματα και τις ευθείες

$$y = 0 \quad x \in \left[ 0, \frac{a_{warp}}{2} \right] \quad (3.9)$$

$$y = h \quad x \in \left[ 0, \frac{a_{warp}}{2} \right] \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.4: Τομή του μοναδιαίου κελιού στο επίπεδο  $z = a_{wefl}/4$

### 3.1.4 Ανάλυση κατά τα επίπεδα $x = 0$ , $x = a_{warp}/4$ και $x = a_{warp}/2$

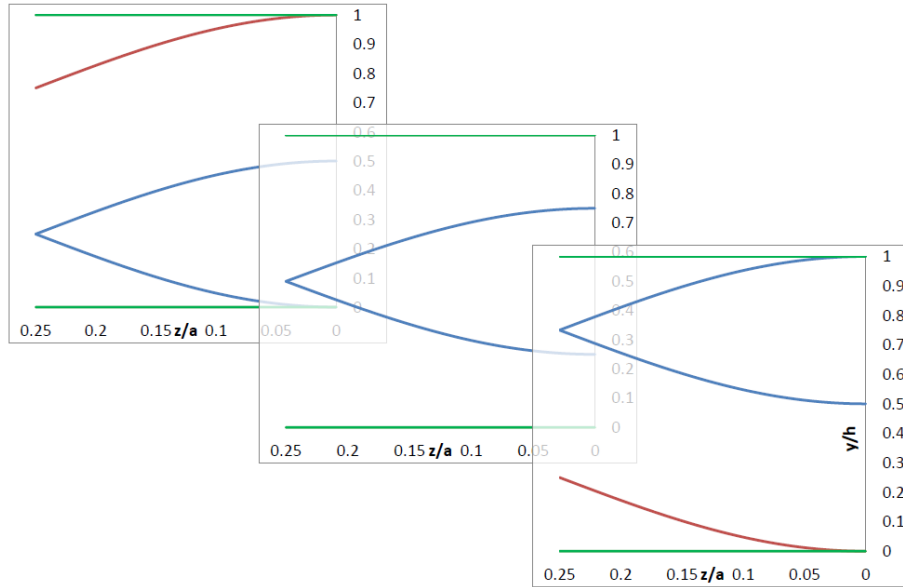
Είναι λογικό ότι το κατά τον άξονα  $z$ , το στημόνι συμπεριφέρεται σαν υφάδι και τούμπαλιν, αλλά με διαφορά φάσης  $\pi/2$ . Έτσι, κατά τον άξονα  $z$ , η διατομή του στημονιού παραμένει σταθερή στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, αλλά μετατοπίζεται κατά τον άξονα  $y$ , ενώ τα δύο νήματα υφιδιού εκφυλίζονται στο μέσο της ημι-περιόδου στα όρια του στημονιού.

Στα επιμέρους σχήματα του σχήματος 3.5, απεικονίζεται μόνο το  $\frac{1}{2}$  της διατομής του στημονιού ως προς τον άξονα  $z$ , για λόγους συνέπειας προς την (κατά  $\frac{1}{2}$  ως προς το επίπεδο  $z = 0$ ) απεικόνιση του μοναδιαίου κελιού στην εισαγωγή. Συνεχίζοντας με τους ίδιους γεωμετρικούς ορισμούς ( $a_{wefl}$  είναι η περίοδος κυμάτωσης του υφιδιού, και άρα το πλάτος του στημονιού είναι  $a_{wefl}/2$ ), οι καμπύλες από τις οποίες ορίζεται το στημόνι είναι:

Στο επίπεδο  $x = 0$ :

$$y = h \left( 0.25 + 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{wefl}} \right) \quad z \in [-a_{wefl}/4, a_{wefl}/4] \quad (3.11)$$

$$y = h \left( 0.25 - 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{wefl}} \right) \quad z \in [-a_{wefl}/4, a_{wefl}/4] \quad (3.12)$$



**Σχήμα 3.5:** Τομές του μοναδιαίου κελιού στα επίπεδα  $x = 0$ ,  $x = a_{warp}/4$  και  $x = a_{warp}/2$

Στο επίπεδο  $x = a_{warp}/4$ :

$$y = h \left( 0.5 + 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.13)$$

$$y = h \left( 0.5 - 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.14)$$

Στο επίπεδο  $x = a_{weft}/2$ :

$$y = h \left( 0.75 + 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.15)$$

$$y = h \left( 0.75 - 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.16)$$

Ενώ οι καμπύλες που περιγράφουν το υφάδι είναι:

Στο επίπεδο  $x = 0$ :

$$y = h \left( 0.75 + 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.17)$$

$$y = h \left( 0.25 + 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.18)$$

Στο επίπεδο  $x = a_{warp}/4$ :

$$y = h \left( 0.5 + 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.19)$$

$$y = h \left( 0.5 - 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.20)$$

Στο επίπεδο  $x = a_{warp}/2$ :

$$y = h \left( 0.75 - 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.21)$$

$$y = h \left( 0.25 - 0.25 \cos \frac{2\pi z}{a_{weft}} \right) \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.22)$$

Τέλος, και στις τρεις τομές, τα όρια της μήτρας περιορίζονται από τα νήματα και τις ευθείες:

$$y = 0 \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.23)$$

$$y = h \quad z \in [-a_{weft}/4, a_{weft}/4] \quad (3.24)$$

### 3.1.5 Υπολογισμός των μερικών όγκων

Στο υφάδι, η διατομή του παραμένει σταθερή κάθετα στον τοπικό άξονα του νήματος, διότι η διατομή στρέφει ακολουθώντας την καμπύλη του νήματος. Αν  $L$  είναι το συνολικό μήκος του κάθε νήματος στο μοναδιαίο κελί ( $-a_{weft}/4 \leq z \leq a_{weft}/4$ ), τότε ο υπολογισμός του όγκου του ισούται με:

$$V_{weft} = \int_0^L A_{local} dl = A \int_0^L dl \quad (3.25)$$

Άρα, το πρόβλημα ανάγεται αφενός στην εξεύρεση του εμβαδού της διατομής  $A$ , το οποίο ισούται με:

$$A = A_{local}(z = a_{weft}/4) = \int_0^{a_{warp}/2} \left| h \left( 0.5 + 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) - h \left( 0.5 - 0.25 \cos \frac{2\pi x}{a_{warp}} \right) \right| dx \quad (3.26)$$

$$A = \frac{ha_{warp}}{2\pi} \approx 0.3183 \frac{ha_{warp}}{2} \quad (3.27)$$

και αφετέρου στον υπολογισμό του μήκους  $L$ , για το οποίο ισχύουν τα παρακάτω:

Σε κάθε σημείο  $z$  του νήματος, ισχύει:

$$dl = \sqrt{(dz)^2 + (dy)^2} \quad (3.28)$$

Κανονικοποιώντας τα μεγέθη  $z$ ,  $y$  και  $l$ , έτσι ώστε:

$$z' = \frac{z}{\frac{a_{weft}}{2}} \quad y' = \frac{y}{h} \quad l' = \frac{l}{L} \quad (3.29)$$

και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση που συνδέει το  $z$  και το  $y$ , λαμβάνουμε ότι:

$$dl' = \sqrt{(dz')^2 + (dy')^2} = \sqrt{(dz')^2 + \left( \frac{\pi}{4} \sin(\pi z') dz' \right)^2} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{16} \sin^2(\pi z')} dz' \quad (3.30)$$

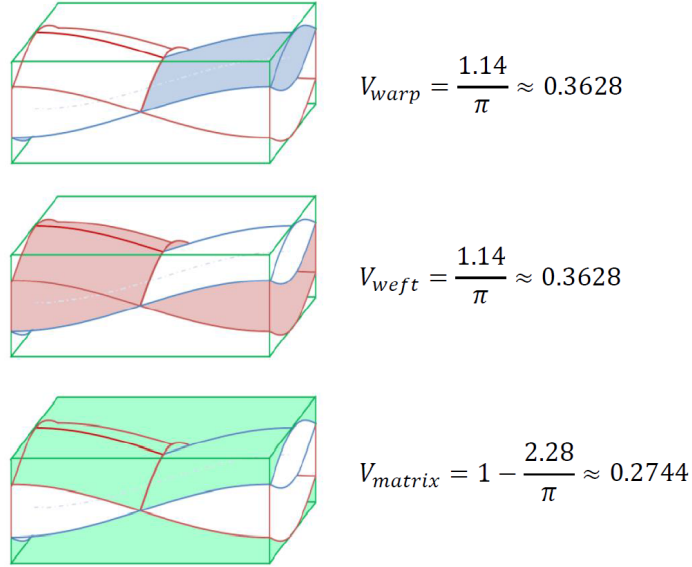
Επίσης, λόγω της κανονικοποίησης, αλλάζει και το διάστημα ολοκλήρωσης από  $[0, L]$  σε  $[0, 1]$ . Άρα:

$$\int_0^1 \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{16} \sin^2(\pi z')} dz' = \frac{2}{\pi} E \left( -\frac{\pi^2}{16} \right) \approx 1.14 \quad (3.31)$$

Όπου  $E(m)$  είναι το πλήρες ελλειπτικό ολοκλήρωμα δευτέρου είδους.

Η παραπάνω τιμή αφορά το  $z'$  (κανονικοποιημένη διάσταση του άξονα  $z$ ). Για το μοναδιαίο κελί με  $z$ -διάσταση ίση με  $a_{weft}/2$ , το αρχικό ολοκλήρωμα ισούται με:

$$\int_0^L dl \approx 1.14 a_{weft}/2 \quad (3.32)$$



Σχήμα 3.6: Μερικοί όγκοι νημάτων και μήτρας

Άρα, από τις σχέσεις 3.25, 3.27 και 3.32, προκύπτει:

$$V_{weft} = \frac{1.14}{\pi} \left( h \frac{a_{warp}}{2} \frac{a_{weft}}{2} \right) \quad (3.33)$$

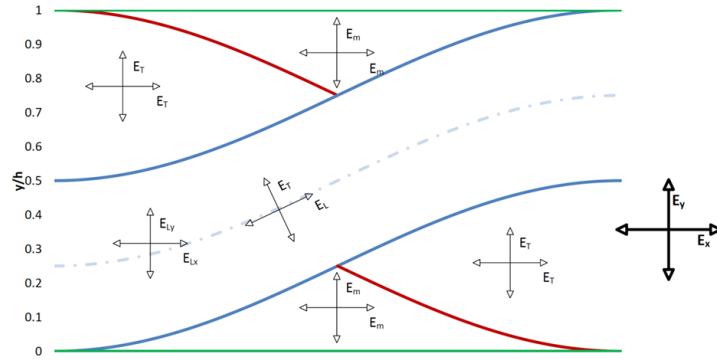
Και αφού ο παράγοντας εντός της παρένθεσης ισούται με τον όγκο του μοναδιαίου κελιού, ο μερικός όγκος του υφαιδιού ισούται με  $1.14/\pi$ .

Ομοίως υπολογίζεται και ο μερικός όγκος του στημονιού, που για λόγους συμμετρίας λαμβάνει την ίδια τιμή.

Ο μερικός όγκος της μήτρας ισούται με το υπόλοιπο του μοναδιαίου κελιού αν αφαιρέσουμε τα νήματα, ήτοι  $1 - 2.28/\pi$ . Οπότε, οι ποσοστιαίοι όγκοι στο μοναδιαίο κελί παρουσιάζονται στο σχήμα 3.6:

Στα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των ορίων των νημάτων και των επιπέδων  $y = 0$  και  $y = h$  δημιουργούνται περιοχές καθαρής μήτρας (matrix rockets). Λόγω της διάταξης των νημάτων οι περιοχές αυτές είναι πάντα μη-μηδενικές, και θέτουν στην περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε ενίσχυση ινών ένα άνω όριο μικρότερο της μονάδας.

Από το τελευταίο σχήμα γίνονται ακόμη αντιληπτά το μέγεθος και η μορφή των περιοχών καθαρής μήτρας, και προσδιορίζεται το άνω όριο περιεκτικότητας σε ενίσχυση ενός μεμονωμένου μοναδιαίου κελιού. Ακόμη κι αν τα νήματα δεν έχουν καθόλου μήτρα μεταξύ των ινών (μηδενικός εμποτισμός), και όλη η μήτρα βρίσκεται στα matrix rockets, το μοναδιαίο κελί έχει μέγιστη κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες  $\phi_{max} = 2.28/\pi \approx 0.7256$ .



Σχήμα 3.7: Τα τοπικά και το ολικό σύστημα συντεταγμένων

## 3.2 Υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας

### 3.2.1 Εισαγωγή

Θεωρούμε ότι το κάθε νήμα είναι από μόνο του ένα σύνθετο υλικό με κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες  $\phi_s^f$ . Τα σύνθετα υλικά αυτά φορτίζονται εγκάρσια, off-axis και παράλληλα, και τελικά συνδυάζονται με τις αρχές της Classic Laminate Theory, ώστε να δώσουν μια τελική τιμή του μέτρου ελαστικότητας κατά την διεύθυνση φόρτισης (χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρούμε τον  $x$  άξονα) για το μοναδιαίο κελί. Άρα, το πρόβλημα του υπολογισμού αναλύεται σε τρία σκέλη:

1. Τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών κάθε σώματος στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων  $1 - 2$  ή  $L - T$
2. Το μετασχηματισμό των ελαστικών σταθερών κάθε σώματος στο γενικό σύστημα συντεταγμένων  $x - y$ .
3. Τη σύνθεση των επιμέρους μέτρων ελαστικότητας

Έστω μία τομή κατά το επίπεδο  $x - y$ . Χωρίς βλάβη της γενικότητας, στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται η τομή για  $z = 0$ .

### 3.2.2 Υπολογισμός της περιεκτικότητας, $\phi_s^f$ , $(v/v)$ νήματος σε ίνες

Εξ' ορισμού της κατ' όγκο περιεκτικότητας,  $V_f = \phi_o^f V_{cell}$ , ενώ από το ισοζύγιο όγκου ισχύουν  $V_{cell} = V_f + V_m$  και  $V_m = V_m^{matrix} + V_m^s$ . Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο μερικός όγκος των matrix rockets, όπως αποδείχθηκε, είναι  $1 - 2.28/\pi$  του όγκου του μοναδιαίου κελιού, λαμβάνουμε ότι:

$$V_{cell} = \phi_o^f V_{cell} + (1 - 2.28/\pi) V_{cell} + V_m^s \quad (3.34)$$

Επίσης,

$$V_m^s = (1 - \phi_s^f) V_{strand} = (1 - \phi_s^f) \frac{2.28}{\pi} V_{cell} \quad (3.35)$$

Από τις δύο τελευταίες εξισώσεις, και διαιρώντας κατά μέλη με το  $V_{cell}$ , λαμβάνουμε τελικά ότι:

$$\phi_s^f = \frac{\pi}{2.28} \phi_o^f \quad (3.36)$$

### 3.2.3 Υπολογισμός των ελαστικών σταθερών των matrix rockets

Τα matrix rockets αποτελούνται αποκλειστικά από μήτρα, η οποία θεωρείται ισοτροπική. Άρα, το μέτρο ελαστικότητας της προς κάθε διεύθυνση είναι  $E_m$ . Με γνωστό το λόγο Poisson  $\nu_m$ , υπολογίζεται και το  $G_m = 0.5E_m/(1 + \nu_m)$ . Αυτές οι ελαστικές σταθερές είναι ανεξάρτητες του συστήματος συντεταγμένων, λόγω της ισοτροπικότητας του υλικού.

### 3.2.4 Υπολογισμός ελαστικών σταθερών νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων

Το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης του νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων υπολογίζονται από το μοντέλο Halpin – Tsai, για  $\phi_s^f$  και  $\xi = 1$ :

$$E_T = \frac{E_m(1 + \xi\eta\phi_s^f)}{1 - \eta\phi_s^f}, \quad \eta = \frac{E_2^f - E_m}{E_2^f + \xi E_m} \quad (3.37)$$

$$G_{12}^L = \frac{G_m(1 + \xi\eta\phi_s^f)}{1 - \eta\phi_s^f}, \quad \eta = \frac{G_f - G_m}{G_f + \xi G_m} \quad (3.38)$$

Παράλληλα, το διαμήκες μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson  $\nu_{12}^L$  του νήματος στο τοπικό σύστημα συν/νων υπολογίζονται από το μοντέλο Voigt (Rule of Mixtures):

$$E_L = \phi_s^f E_1^f + (1 - \phi_s^f) E_m \quad (3.39)$$

$$\nu_{12}^L = \phi_s^f \nu_f + (1 - \phi_s^f) \nu_m \quad (3.40)$$

Ενώ:

$$\nu_{21}^L = \nu_{12}^L \frac{E_T}{E_L} \quad (3.41)$$

### 3.2.5 Υπολογισμός ελαστικών σταθερών νήματος στο γενικό σύστημα συν/νων

Για κάθε σημείο που το νήμα στρέφει ως προς τον άξονα  $x$  κατά γωνία  $\theta$ , υπάρχει off-axis loading, άρα το διαμήκες μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson κατά τους άξονες  $x$  και  $y$  δίνονται από τον πίνακα μετασχηματισμού  $[\bar{S}]$ , τα στοιχεία του οποίου είναι:

$$\bar{S}_{11} = S_{11}(c^4) + S_{22}(s^4) + (2S_{12} + S_{66})(c^2 s^2) \quad (3.42)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11}(s^4) + S_{22}(c^4) + (2S_{12} + S_{66})(c^2 s^2) \quad (3.43)$$

$$\bar{S}_{12} = S_{12}(c^4 + s^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{66})(c^2 s^2) \quad (3.44)$$

Με:

$$S_{11} = 1/E_L \quad S_{22} = 1/E_T \quad S_{12} = -\nu_L/E_L \quad S_{66} = 1/G_L$$

Και

$$c = \cos \left( \arctan \left\{ \frac{h\pi}{2a} \sin \frac{2\pi x}{a} \right\} \right) \quad (3.45)$$

$$s = \sin \left( \arctan \left\{ \frac{h\pi}{2a} \sin \frac{2\pi x}{a} \right\} \right) \quad (3.46)$$

Τελικά, αυτές οι ελαστικές σταθερές για κάθε  $x$  ως προς τους άξονες  $x$  και  $y$  είναι:

$$E_x^L = 1/\bar{S}_{11} \quad E_y^L = 1/\bar{S}_{22} \quad \nu_{xy}^L = -E_x^L \bar{S}_{12} \quad \nu_{yx}^L = -E_y^L \bar{S}_{12}$$

Οπότε, για όλο το μοναδιαίο κελί, τα μέτρα ελαστικότητας  $E_x^L$  και  $E_y^L$ , καθώς και ο λόγος Poisson του νήματος βρίσκονται υπολογίζοντας το μέσο όρο των παραπάνω σχέσεων στο διάστημα  $[0, a_{warp}/2]$ , διαδικασία που ανάγεται στην ολοκλήρωση των συναρτήσεων  $c^2, c^4, s^2, s^4$  στο ίδιο διάστημα, καθώς:

$$\begin{aligned} \bar{E}_x^L = \frac{1}{\bar{S}_{11}} = & \left( \frac{2S_{11}}{a_{warp}} \int_0^{a_{warp}/2} c^4 dx + \frac{2S_{22}}{a_{warp}} \int_0^{a_{warp}/2} s^4 dx + \right. \\ & \left. + \frac{4S_{12} + 2S_{66}}{a_{warp}} \int_0^{a_{warp}/2} c^2 s^2 dx \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.47)$$

### 3.2.6 Σύνθεση των επιμέρους στοιχείων του μοναδιαίου κελιού και εισαγωγή των συντελεστών $c, b$ και $n_0$

Κάθε σώμα που υπάρχει στο μοναδιαίο κελί μπορεί να συνδεθεί με τα υπόλοιπα είτε σειριακά, είτε παράλληλα σε ένα διάγραμμα block χρησιμοποιώντας τα μοντέλα των Reuss και Voigt αντίστοιχα για την παραγωγή των συνολικών ελαστικών σταθερών. Εντούτοις, η κάθε μια από τις δύο επιλογές πρέπει να είναι σύμφωνη με το παραμορφωσιακό και τασικό πεδίο που αναπτύσσεται σε κάθε σώμα.

Τα matrix pockets επί της ουσίας παραμορφώνονται όσο τους υποδεικνύει το παραμορφωσιακό πεδίο στα νήματα, αφού τα ίδια έχουν πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τα νήματα. Γι' αυτό, δεν μπορούν να συμμετέχουν σειριακά σε ένα μοντέλο. Άρα, μπαίνουν πάντα παράλληλα προς το σύμπλεγμα των νημάτων (iso-strain condition), διατηρώντας το ειδικό βάρος  $(1 - 2.28/\pi)$  επί του μοναδιαίου κελιού, και μέτρο ελαστικότητας  $E_{mtrx\ pockets} = E_m$ .

Για τα νήματα, το στημόνι συμμετέχει για το μέτρο ελαστικότητας  $E_x$  με το  $E_x^L$  και για το μέτρο ελαστικότητας  $E_y$  με το  $E_y^L$ , όταν η φόρτιση είναι κατά τον άξονα  $x$  ενώ το υφάδι με το  $E_T$  ανεξαρτήτου διεύθυνσης στο επίπεδο  $x - y$ , διότι η διατομή του είναι εγκάρσια ορθοτροπική.

**Ο συντελεστής ποσόστωσης,  $c$** 

Το σύμπλεγμα των νημάτων (δηλαδή το εμποτισμένο με ρητίνη ύφασμα), με ειδικό βάρος  $2.28/\pi$  ως προς το μοναδιαίο κελί, δεν συντίθενται ούτε εντελώς σειριακά, ούτε εντελώς παράλληλα. Έστω λοιπόν ένας «συντελεστής ποσόστωσης»,  $c$ , ο οποίος εφαρμόζεται στο ειδικό βάρος του κάθετου προς την φόρτιση νήματος, παίρνει τιμές από 0 έως 1, και ανάλογα με την τιμή του το μοντέλο γίνεται σειριακό, παράλληλο, ή οποιαδήποτε γραμμική αναλογία μεταξύ τους.

Ο συντελεστής ποσόστωσης  $c$  πρέπει όχι μόνο να έχει φυσική σημασία, αλλά και να μπορεί να υπολογιστεί με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πλέξης κατά την διεύθυνση της φόρτισης. Έτσι, πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Όταν το  $2h/a$  τείνει στο άπειρο (πρακτικά πάνω από 2), η σύνθεση των νημάτων είναι σειριακή, άρα το  $c$  πρέπει να παίρνει την τιμή 1.
2. Όταν το  $2h/a$  τείνει στο 0, η σύνθεση των νημάτων είναι παράλληλη, άρα το  $c$  πρέπει να παίρνει την τιμή 0
3. Το  $2h/a$  είναι ουσιαστικά η εφαπτομένη της μέσης γωνίας που σχηματίζει το νήμα καθώς κυματώνεται στο μοναδιαίο κελί.

Άρα, αν θεωρήσουμε ότι:

$$c = \frac{2}{\pi} \arctan(2h/a) , \quad (3.48)$$

τότε το  $c$  έχει φυσική σημασία (σαν συντελεστής κλίσης) και σωστά πεδία ορισμού και τιμών.

**Ο συντελεστής ανισοτροπίας,  $b$** 

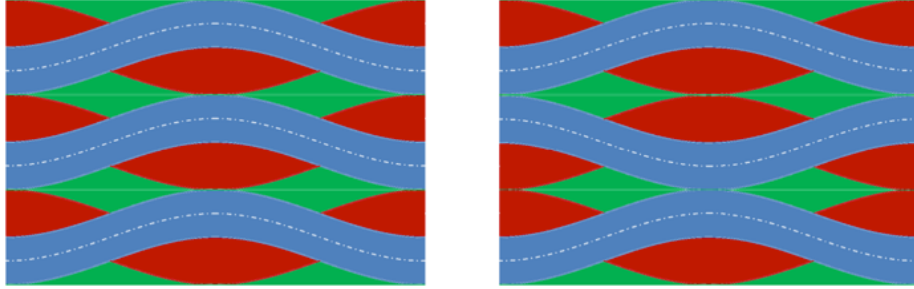
Το παραπάνω μοντέλο αναπτύχθηκε θεωρώντας ότι το στημόνι και το υφάδι συμμετέχουν στην πλέξη με το ίδιο ποσοστό. Παρ' όλα αυτά, αυτό είναι μόνο μία ειδική περίπτωση. Στην πράξη είναι σύνηθες να βρίσκονται υφάσματα με χαρακτηριστικά "warp 60% - weft 40%" ή αντίστοιχα.

Όμως, αυτή η ανισοτροπία επηρεάζει μόνο τη σχέση στημονιού – υφιδιού, καθώς το ένα νήμα κερδίζει σε μερικό όγκο εις βάρος του μερικού όγκου του άλλου, ενώ το άθροισμα των μερικών όγκων τους ως προς το μοναδιαίο κελί παραμένει σταθερό και ίσο με  $2.28/\pi$ .

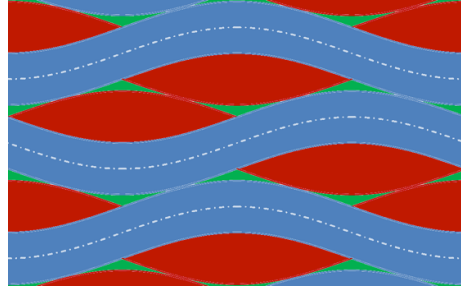
Έστω ένας συντελεστής  $b$  ίσος με το λόγο του μερικού όγκου του νήματος κατά το οποίο γίνεται η φόρτιση προς το συνολικό όγκο του υφάσματος (π.χ., για ύφασμα 60% στημόνι – 40% υφάδι, και φόρτιση κατά το στημόνι, τότε  $b = 0.6$ ), ο οποίος εφαρμόζεται στους μερικούς όγκους του στημονιού και του υφιδιού ως  $b$  και  $1 - b$  αντίστοιχα.

**Ο συντελεστής αλληλοεπικάλυψης,  $n_0$** 

Όλο το μοντέλο αναπτύχθηκε σε ένα ανεξάρτητο χωρικά μοναδιαίο κελί, θεωρώντας ότι σε περίπτωση 2 ή περισσότερων στρώσεων, αυτές θα στοιβάζονταν όπως σε



Σχήμα 3.8: Διατάξεις ελάχιστης πυκνότητας μοναδιαίων κελιών



Σχήμα 3.9: Διάταξη μέγιστης πυκνότητας μοναδιαίων κελιών

μία από τις δύο περιπτώσεις του σχήματος 3.8, αφήνοντας διαθέσιμα όλα τα matrix rockets που δημιουργούνται.

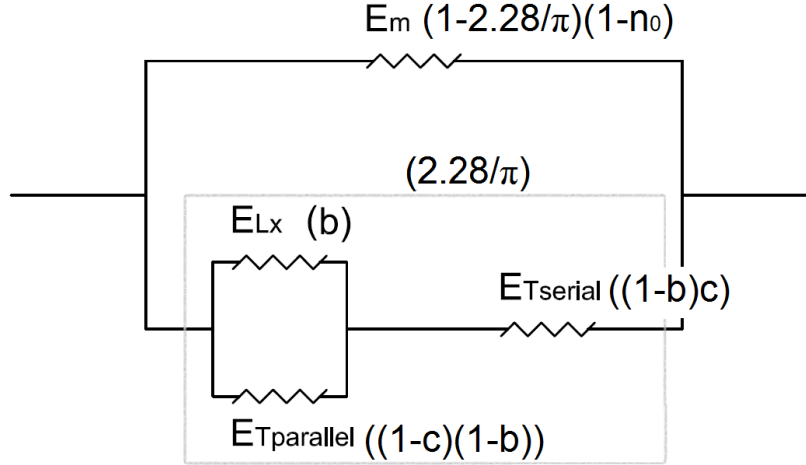
Αυτό όμως σπάνια συμβαίνει. Αντιθέτως, όταν οι στρώσεις στοιβαχθούν όπως στο σχήμα 3.9, τότε ο χώρος των matrix rockets σχεδόν γεμίζει με νήματα. Συνεπώς, οι μερικοί όγκοι τείνουν από  $2.28/\pi$  για τα νήματα, και  $(1 - 2.28/\pi)$  για τα matrix rockets, στο 1 και 0 αντίστοιχα.

Τα υλικά που είναι πιθανό να έχουν τέτοια διαμόρφωση είναι υλικά με πολλές στρώσεις υφασμάτων (λόγω στατιστικής), με λεπτά υφάσματα (μεγαλύτερη ευελιξία κατά τον εμποτισμό), με κενά μεταξύ των νημάτων και υποκείμενα μεγαλύτερης συμπίεσης κατά την παραγωγή.

Έστω ένας συντελεστής αλληλοεπικάλυψης μοναδιαίων κελιών  $n_0$ , ο οποίος εφαρμόζεται στον μερικό όγκο του matrix rocket, και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, έτσι ώστε η τιμή 0 να αντιστοιχεί σε μηδενική αλληλοεπικάλυψη των μοναδιαίων κελιών, και η τιμή 1 σε πλήρη απουσία των matrix rockets (οριακές περιπτώσεις, ειδικά η δεύτερη, διότι από το σχήμα 3.9 φαίνεται ότι τα matrix rockets μπορεί να μειωθούν δραματικά, αλλά δεν εξαλείφονται). Η ακριβής τιμή του συντελεστή προσδιορίζεται πειραματικά.

### 3.2.7 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας του συνολικού μοντέλου

Αν όλα τα παραπάνω σχεδιαστούν σε ένα διάγραμμα block, και παραχθούν βάσει αυτού οι εξισώσεις που αφορούν στα μέτρα ελαστικότητα κατά τους άξονες  $x$  και  $y$ , τότε έχουμε:



Σχήμα 3.10: Block διάγραμμα σύνθεσης του θεωρητικού μοντέλου.

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας  $E_x$  του συνολικού μοντέλου είναι ο υπολογισμός του  $E_x^{fabric}$  του υφάσματος, δηλαδή, του κατώτερου κλάδου του βρόγχου στο Σχ. 3.10. Το ύφασμα έχει μερικό όγκο  $2.28/\pi$  ως προς το σύνολο. Τότε,

$$E_{interm} = E_x^L(b) + E_T(1-b)(1-c) \quad (3.49)$$

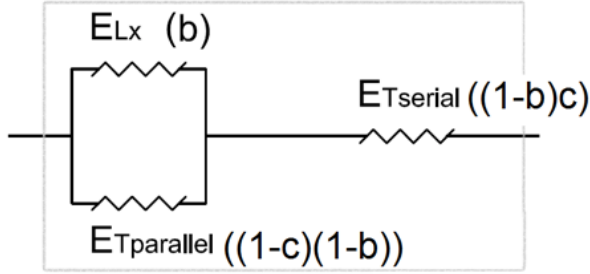
$$\frac{1}{E_x^{fabric}} = \frac{1-c+cb}{E_{interm}} + \frac{(1-b)c}{E_T} \quad (3.50)$$

Και τελικά:

$$E_x = \frac{E_x^{fabric} (2.28/\pi) + E_m(1-2.28/\pi)(1-n_0)}{1-n_0(1-2.28/\pi)} \quad (3.51)$$

Εναλλακτικά, αν θα θέλαμε έναν μόνο τύπο υπολογισμού του  $E_x$ , είναι:

$$E_x = \frac{\left( \frac{1-c+cb}{E_x^L(b) + E_T(1-b)(1-c)} + \frac{(1-b)c}{E_T} \right)^{-1} (2.28/\pi) + E_m(1-2.28/\pi)(1-n_0)}{1-n_0(1-2.28/\pi)} \quad (3.52)$$



**Σχήμα 3.11:** Εκφυλισμένο μοντέλο με μεγιστοποιημένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για το  $E_y$ :

$$E_y = \frac{\left( \frac{1 - c + cb}{E_y^L(b) + E_T(1 - b)(1 - c)} + \frac{(1 - b)c}{E_T} \right)^{-1} (2.28/\pi) + E_m(1 - 2.28/\pi)(1 - n_0)}{1 - n_0(1 - 2.28/\pi)} \quad (3.53)$$

#### Παρατηρήσεις:

Από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζεται και η μεταβολή του όγκου του μοναδιαίου κελιού κατά την αλληλοεπικάλυψη, αφού για  $n_0$  τείνοντος στο 1 (πλήρης απουσία matrix rockets), το  $V_{cell}$  (ο παρονομαστής του κλάσματος) τείνει στο  $2.28/\pi$ , που είναι ο μερικός όγκος μόνο των νημάτων.

Αν δεν υπάρχουν δεδομένα για την τιμή του  $n_0$ , τότε θέτοντας τις οριακές τιμές, βρίσκονται τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια του μέτρου ελαστικότητας για το υλικό. Η ανώτερη τιμή βρίσκεται όταν  $n_0 = 1$ , διότι τότε το μοντέλο εκφυλίζεται στο σύστημα που απεικονίζει το σχήμα 3.11.

Αντίστροφα, με γνωστές τιμές του μέτρου ελαστικότητας, μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής  $n_0$ , και άρα να υπολογιστεί το μέγεθος των matrix rockets, χωρίς την χρήση μικροφωτογραφιών.

## Κεφάλαιο 4

# Η πειραματική διαδικασία

Για την αξιολόγηση του θεωρητικού μοντέλου έγιναν τρεις σειρές πειραμάτων με δοκίμια από υαλοϋφασμα απλής πλέξης εμποτισμένο με ρητίνη. Τα δοκίμια κόπηκαν σε διαστάσεις σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-638M/99 Type IV, και στη συνέχεια τα μέτρα ελαστικότητάς τους μετρήθηκαν σε μηχανή εφελκυσμού στο Γενικό Τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο και αξιολογούνται σε σχέση με το θεωρητικό μοντέλο στο επόμενο.

### 4.1 Περιγραφή εξοπλισμού και πρωτοκόλλου διαδικασίας

Η διαθέσιμη μηχανή εφελκυσμού INSTRON στο Εργαστήριο Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών του Γενικού Τμήματος στο Πολυτεχνείο Κρήτης έχει δυνατότητα μέτρησης με κεφαλή των 1000 N ή 5000 N, και σταθερό ρυθμό μετατόπισης των δαγκανών (ταχύτητα παραμόρφωσης). Στα πειράματά μας αυτός ορίστηκε σε 0.05 mm/sec. Το όργανο παράγει ηλεκτρική τάση ανάλογη με την μετατόπιση και το φορτίο, η οποία βαθμονομήθηκε και προσδιορίστηκε με γνωστά βάρη και εξωτερικά μετρημένες μετατοπίσεις. Το ηλεκτρικό σήμα μεταφέρεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσα από σύστημα συλλογής πειραματικών δεδομένων, και υφίσταται επεξεργασία με κατάλληλο λογισμικό. Αυτή η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 4.1.

Έτσι, ορίστηκαν οι συναρτήσεις αντιστοιχίας για την δύναμη και την μετατόπιση (Σχ. 4.3 και 4.4), οι οποίες είναι:

$$F [Nt] = 483.64 \cdot v [Volt] + 7.8422, \quad R^2 = 0.9995$$

$$\Delta l [mm] = 98.385 \cdot v [Volt] + 0.9950, \quad R^2 = 0.9999$$

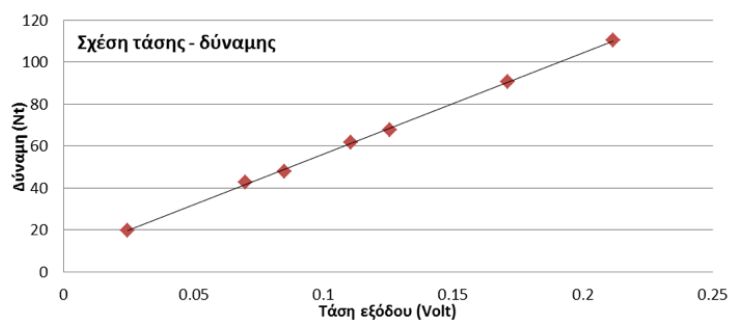
Για την κατασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε αντλία κενού μοντέλου VALUE VE 125, και ισχύος 0.25 HP, με δυνατότητα αναρρόφησης μέχρι 0.05 bar (Εικόνα 4.2).



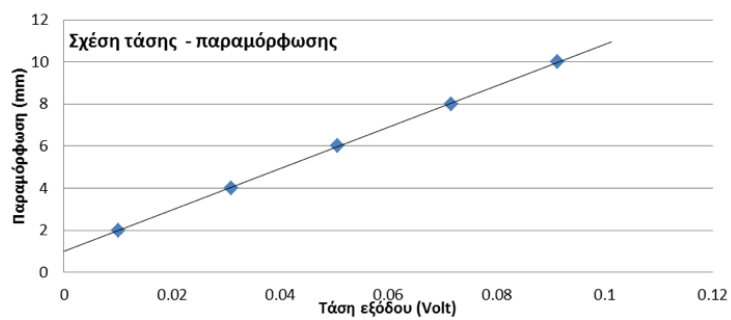
Φωτογραφία 4.1: Διάταξη μηχανής εφελκυσμού - ηλεκτρονικού υπολογιστή



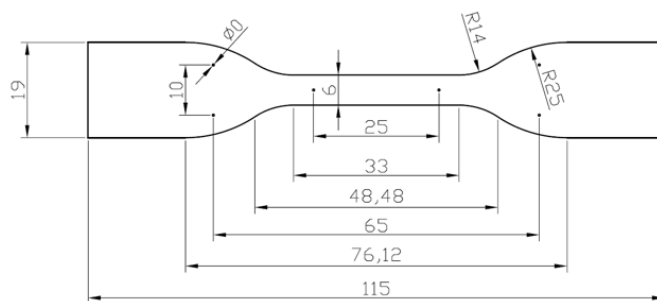
Φωτογραφία 4.2: Διάταξη αντλίας κενού - μανομέτρου



Σχήμα 4.3: Αντιστοίχιση δύναμης - τάσης σήματος



Σχήμα 4.4: Αντιστοίχιση μετατόπισης - τάσης σήματος



**Σχήμα 4.5:** Διαστάσεις δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-638M/99 Type IV

Για την κατασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν πρώτες ύλες από την εταιρία Fibermax® (Βόλος), ενώ τα παραγόμενα φύλλα σύνθετων υλικών κόπηκαν σύμφωνα με τις διαστάσεις που περιγράφονται στο πρότυπο ASTM D-638M/99 Type IV (Σχ. 4.5) είτε σε χειροκίνητη πρέσα στην εταιρία Πλαστικά Κρήτης (Ηράκλειο), είτε σε μηχανή υδροκοπής από εμπορικό μηχανουργείο των Χανίων. Τα δοκίμια κόπηκαν σε γωνίες 0°, 45° και 90° ως προς την κύρια διεύθυνση των ινών του φύλλου, καθώς επηρεάζονται οι ελαστικές σταθερές σε περίπτωση ανισότροπων ή/και μη ισορροπημένων υφασμάτων.

Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας των πρώτων υλών επιβεβαιώθηκαν πειραματικά με ξεχωριστές δοκιμές εφελκυσμού, και το μέτρο ελαστικότητας του υαλονήματος βρέθηκε ίσο με 45 GPa. Αυτή η απόκλιση από την τιμή της βιβλιογραφίας (70-76 GPa) πρέπει να οφείλεται στις επικαλύψεις (sizing) που υπάρχουν στην επιφάνεια των ινών υάλου, οι οποίες δεν συμμετέχουν ουσιαστικά στο μέτρο ελαστικότητας, αν και αυξάνουν την επιφάνεια της διατομής στον υπολογισμό των τάσεων και της αντοχής.

Τα παραγόμενα δοκίμια καθαρίστηκαν, κωδικοποιήθηκαν κατά ομάδα, διεύθυνση φόρτισης και αύξοντα αριθμό, ζυγίστηκαν για τον ακριβή προσδιορισμό της κατά βάρος περιεκτικότητάς τους σε ενίσχυση, μετρήθηκε η ακριβής διατομή του προς εφελκυσμού στελέχους τους και τελικά εφελκύνστηκαν μονοαξονικά σε θερμοκρασία δωματίου μέχρι να αστοχήσουν.

Το ενεργό μήκος για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης θεωρήθηκε η έξοδος από τις δαγκάνες, δηλαδή 65mm, διότι η μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων μετά τον εφελκυσμό υποδεικνύει από την χρωματική αλλοίωση της ρητίνης (άσπρισμα) ότι υπάρχει ανάπτυξη τασικού πεδίου στην περιοχή, και υπήρχαν περιπτώσεις που η τελική θραύση έγινε στα όρια του λαιμού, άρα εκτός των ορίων των 25mm.

Συνολικά έγιναν εννέα σειρές πειραμάτων, από τις οποίες αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία μόνο αυτές που αφορούν στην ενίσχυση με υαλοϋφάσματα. Για τα αποτελέσματα των σειρών αυτών συνετάχθησαν και οι αντίστοιχες αναλυτικές αναφορές.

## 4.2 Αναφορά 2ης σειράς δοκιμών

**Υλικό:** 2 παράλληλες στρώσεις υαλοϋφάσματος σε ποσοστό κατ' όγκο  $\phi (v/v) = 32,2\%$  εμποτισμένα σε σύστημα εποξικής ρητίνης 9330-9054 (78% - 22% κ.β.).

**Χαρακτηριστικά υφάσματος:**

Ειδικό βάρος: 201 gr/ m<sup>2</sup>

Ύφανση: Απλή

Στημόνι: Ίνες γυαλιού EC9 - 68 Z28 876s, 57%, 16.8 κλωστές/cm

Υφάδι: Ίνες γυαλιού EC9 - 68 Z28 876s, 43%, 12.8 κλωστές/cm

**Χαρακτηριστικά εφελκυσμού εποξικού συστήματος:**

Μέτρο ελαστικότητας: 2700 MPa

Μέγιστη αντοχή: 60 MPa

Αντοχή κατά την θραύση: 50 MPa

Επιμήκυνση κατά την μέγιστη αντοχή: 3.2%

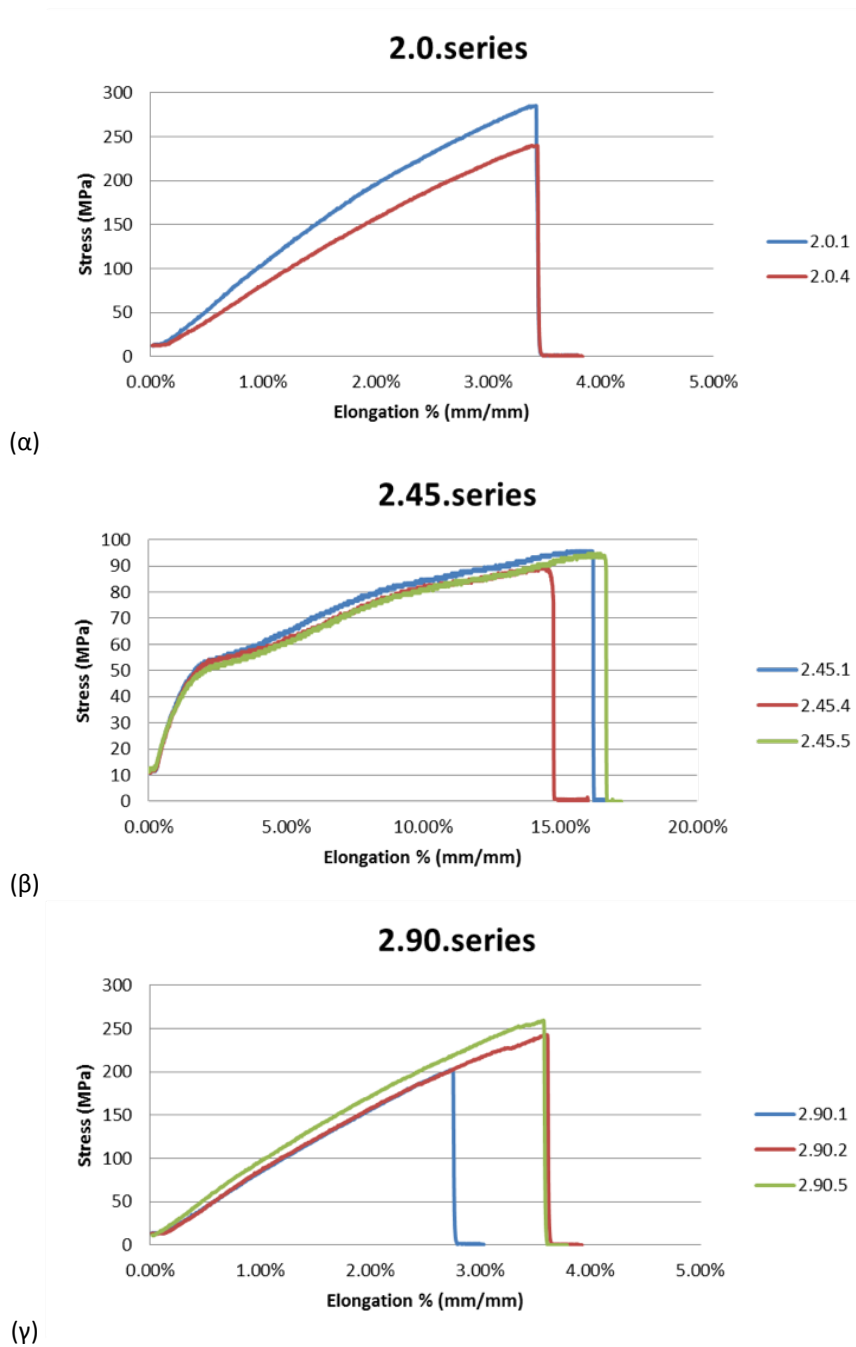
Επιμήκυνση κατά την θραύση: 3.8%

**Τύπος δοκιμίου:** Δοκίμια κομμένα σε χειροκίνητη πρέσσα (Πλαστικά Κρήτης) σύμφωνα με το πρότυπο ποιότητας ASTM D-638M/99 Type IV σε διευθύνσεις ως προς την πλέξη του υφάσματος 0°, 45° και 90°.

**Αποτελέσματα εφελκυσμού:** Τα εφελκυσμένα δοκίμια σκαναρίστηκαν κατά ομάδες (Φωτογραφία 4.6), ενώ το ξεχωριστό δοκίμιο στην εικόνα δίνεται για λόγους αναφοράς προς το πρότυπο. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των μετρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.1.



Φωτογραφία 4.6: Απεικόνιση των εφελκυσμένων δοκιμίων σειράς 2.xx.x



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σειράς (α) 2.0.x, (β) 2.45.x, και (γ) 2.90.x

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μετρήσεων για τη σειρά δοκιμών 2

| Σειρά 2.0       |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 2.0.1           | 10,259  | 285,3                | 3,37         |
| 2.0.4           | 7,860   | 240,0                | 3,39         |
| Μέσος όρος      | 9,060   | 262,7                | 3,38         |
| Τυπική απόκλιση | 1,200   | 22,6                 | 0,01         |

| Σειρά 2.45      |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 2.45.1          | 4,150   | 95,7                 | 16,20        |
| 2.45.4          | 4,045   | 89,7                 | 14,73        |
| 2.45.5          | 3,754   | 94,8                 | 16,68        |
| Μέσος όρος      | 3,983   | 93,4                 | 15,87        |
| Τυπική απόκλιση | 0,168   | 2,7                  | 0,83         |

| Σειρά 2.90      |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 2.90.1          | 8,318   | 202,1                | 2,76         |
| 2.90.2          | 8,386   | 241,8                | 3,62         |
| 2.90.5          | 8,318   | 259,5                | 3,58         |
| Μέσος όρος      | 8,341   | 234,7                | 3,32         |
| Τυπική απόκλιση | 0,032   | 24,1                 | 0,40         |

### 4.3 Αναφορά 3ης σειράς δοκιμών

**Υλικό:** 2 παράλληλες στρώσεις υαλοϋφάσματος σε ποσοστό κατ' όγκο  $\phi (v/v) = 38,6\%$  εμποτισμένα σε σύστημα εποξικής ρητίνης 9330-9054 (78% - 22% κ.β.).

**Χαρακτηριστικά υφάσματος:**

Ειδικό βάρος: 201 gr/ m<sup>2</sup>

Ύφανση: Απλή

Στημόνι: Ίνες γυαλιού EC9 - 68 Z28 876s, 57%, 16.8 κλωστές/cm

Υφάδι: Ίνες γυαλιού EC9 - 68 Z28 876s, 43%, 12.8 κλωστές/cm

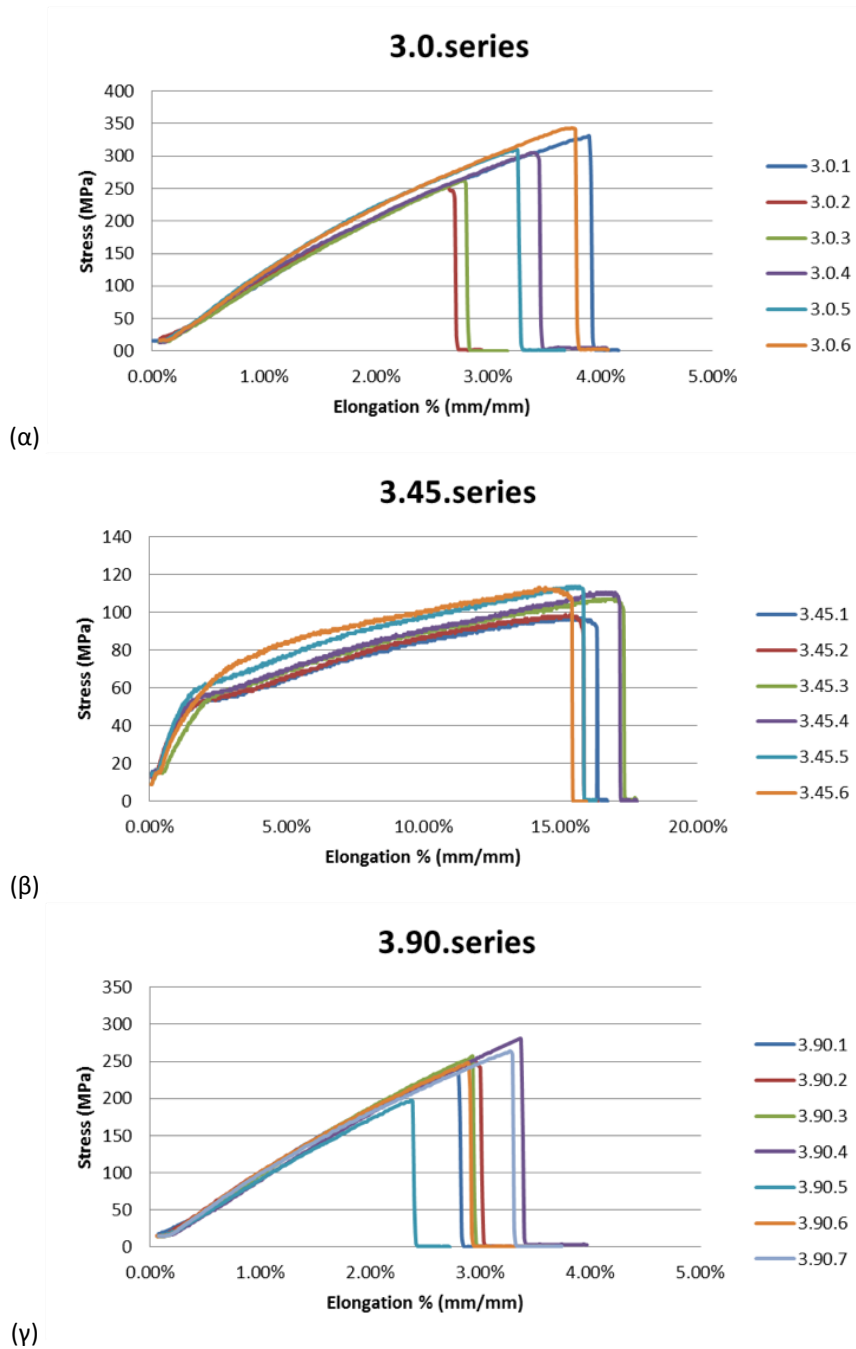
Τα χαρακτηριστικά του εποξικού συστήματος είναι ίδια με τις άλλες σειρές.

**Τύπος δοκιμίου:** Δοκίμια κομμένα με υδροκοπή σύμφωνα με το πρότυπο ποιότητας ASTM D-638M/99 Type IV, σε διευθύνσεις ως προς την πλέξη του υφάσματος 0°, 45° και 90°.

**Αποτελέσματα εφελκυσμού:** Τα εφελκυσμένα δοκίμια σκαναρίστηκαν κατά ομάδες (Φωτογραφία 4.8), ενώ το ξεχωριστό δοκίμιο στην εικόνα δίνεται για λόγους αναφοράς προς το πρότυπο. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των μετρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.2.



Φωτογραφία 4.8: Απεικόνιση των εφελκυσμένων δοκιμίων σειράς 3.xx.x



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σειράς (α) 3.0.x, (β) 3.45.x, και (γ) 3.90.x

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μετρήσεων για τη σειρά δοκιμών 3

| Σειρά 3.0       |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 3.0.1           | 10,337  | 331,0                | 3,92         |
| 3.0.2           | 11,147  | 253,4                | 2,72         |
| 3.0.3           | 10,781  | 262,0                | 2,82         |
| 3.0.4           | 11,854  | 304,9                | 3,47         |
| 3.0.5           | 12,772  | 309,3                | 3,28         |
| 3.0.6           | 12,547  | 343,4                | 3,79         |
| Μέσος όρος      | 11,573  | 292,1                | 3,33         |
| Τυπική απόκλιση | 0,895   | 33,1                 | 0,45         |

| Σειρά 3.45      |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 3.45.1          | 4,541   | 97,0                 | 16,28        |
| 3.45.2          | 4,895   | 98,8                 | 15,78        |
| 3.45.3          | 2,868   | 106,9                | 17,26        |
| 3.45.4          | 4,674   | 110,5                | 17,12        |
| 3.45.5          | 4,833   | 113,6                | 15,80        |
| 3.45.6          | 4,062   | 113,2                | 15,39        |
| Μέσος όρος      | 4,312   | 105,4                | 16,27        |
| Τυπική απόκλιση | 0,700   | 6,6                  | 0,70         |

| Σειρά 3.90      |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 3.90.1          | 10,080  | 238,5                | 2,83         |
| 3.90.2          | 9,993   | 248,6                | 3,02         |
| 3.90.3          | 9,763   | 257,0                | 2,92         |
| 3.90.4          | 9,181   | 280,3                | 3,40         |
| 3.90.5          | 9,116   | 197,5                | 2,40         |
| 3.90.6          | 9,917   | 247,7                | 2,92         |
| 3.90.7          | 10,066  | 263,5                | 3,31         |
| Μέσος όρος      | 9,731   | 247,6                | 2,97         |
| Τυπική απόκλιση | 0,382   | 23,9                 | 0,31         |

## 4.4 Αναφορά 9ης σειράς δοκιμών

**Υλικό:** 5 παράλληλες μεταξύ τους στρώσεις υαλοϋφάσματος σε ποσοστό κατ' όγκο  $\phi (v/v) = 18\%$  εμποτισμένα σε σύστημα εποξικής ρητίνης 9330-9054 (78% - 22% κ.β.).

**Χαρακτηριστικά υφάσματος:**

Ειδικό βάρος: 25 gr/m<sup>2</sup>

Ύφανση: Απλή

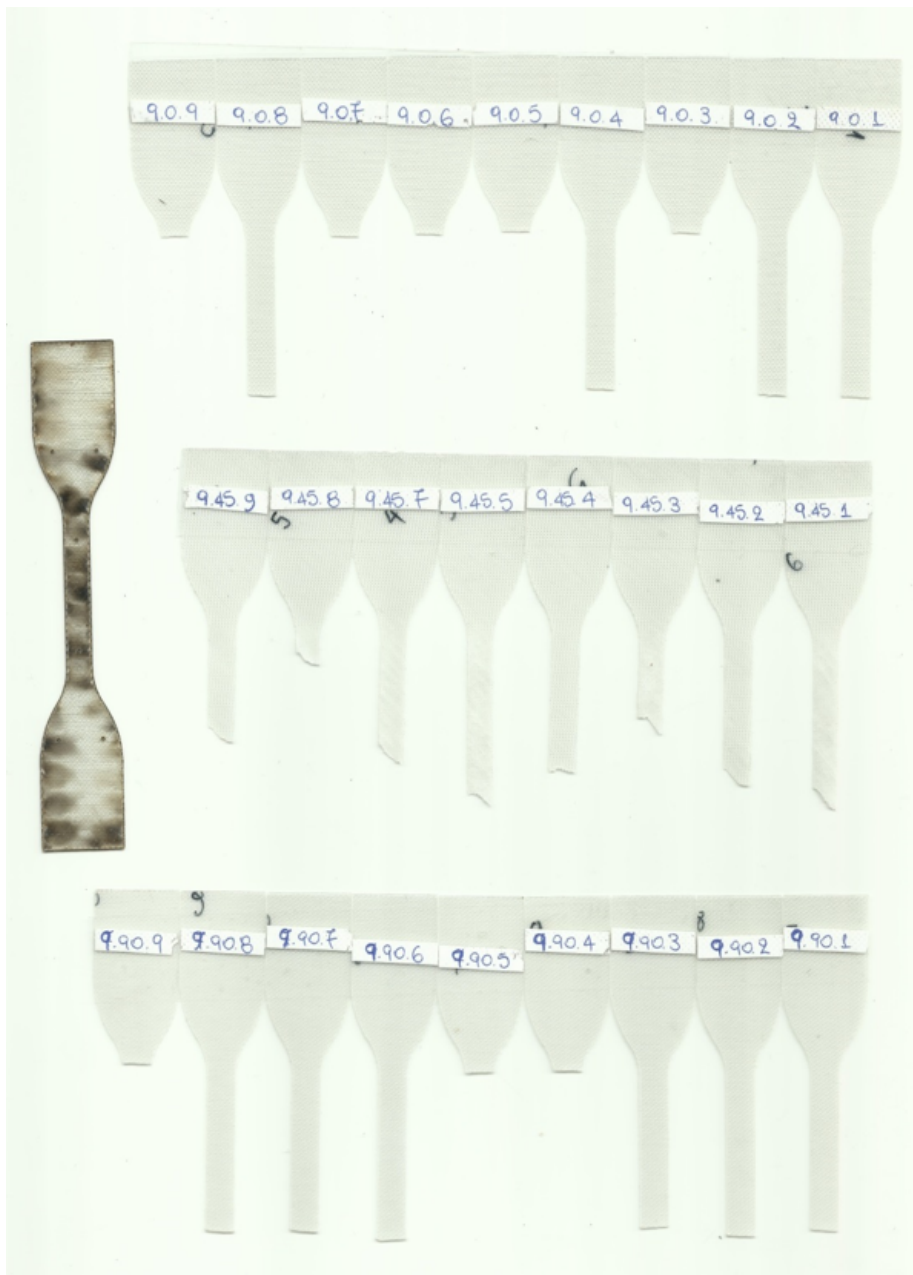
Στημόνι: Ίνες γυαλιού EC5 5.6, 50%, 22 κλωστές/cm

Υφάδι: Ίνες γυαλιού EC5 2.9, 50%, 22 κλωστές/cm

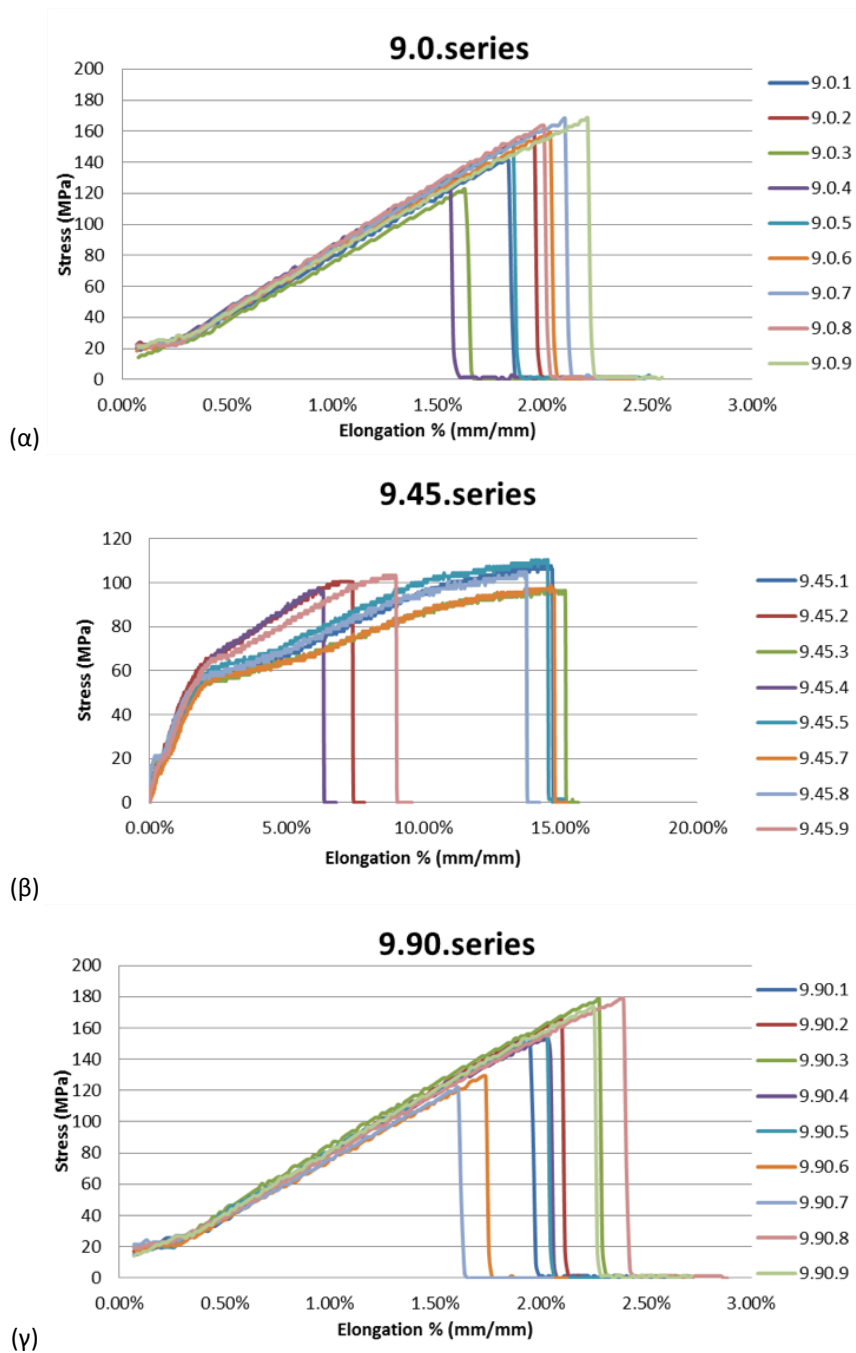
Τα χαρακτηριστικά του εποξικού συστήματος είναι ίδια με τις άλλες σειρές.

**Τύπος δοκιμίου:** Δοκίμια κομμένα με υδροκοπή σύμφωνα με το πρότυπο ποιότητας ASTM D-638M/99 Type IV σε διευθύνσεις ως προς την πλέξη του υφάσματος 0°, 45° και 90°.

**Αποτελέσματα εφελκυσμού:** Τα εφελκυσμένα δοκίμια σκαναρίστηκαν κατά ομάδες (Φωτογραφία 4.10), ενώ το ξεχωριστό δοκίμιο δίνεται για λόγους αναφοράς προς το πρότυπο. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των μετρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.11. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.3.



Φωτογραφία 4.10: Απεικόνιση των εφελκυσμένων δοκιμών σειράς 9.xx.x



**Σχήμα 4.11:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σειράς (α) 9.0.x, (β) 9.45.x, και (γ) 9.90.x

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μετρήσεων για τη σειρά δοκιμών 9

| Σειρά 9.0       |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 9.0.1           | 8,006   | 141,3                | 1,85         |
| 9.0.2           | 8,511   | 158,6                | 1,98         |
| 9.0.3           | 7,589   | 122,5                | 1,65         |
| 9.0.4           | 8,307   | 130,2                | 1,58         |
| 9.0.5           | 8,137   | 150,6                | 1,88         |
| 9.0.6           | 8,279   | 159,1                | 2,05         |
| 9.0.7           | 8,171   | 168,2                | 2,12         |
| 9.0.8           | 8,450   | 163,4                | 2,02         |
| 9.0.9           | 7,768   | 168,5                | 2,23         |
| Μέσος όρος      | 8,135   | 151,4                | 1,93         |
| Τυπική απόκλιση | 0,287   | 15,7                 | 0,20         |

| Σειρά 9.45      |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 9.45.1          | 3,186   | 107,6                | 14,68        |
| 9.45.2          | 3,913   | 100,4                | 7,37         |
| 9.45.3          | 3,458   | 97,7                 | 15,15        |
| 9.45.4          | 3,284   | 97,5                 | 6,30         |
| 9.45.5          | 3,086   | 110,3                | 14,49        |
| 9.45.7          | 2,952   | 98,5                 | 14,74        |
| 9.45.8          | 3,953   | 104,9                | 13,72        |
| 9.45.9          | 3,401   | 103,3                | 8,97         |
| Μέσος όρος      | 3,404   | 102,5                | 11,93        |
| Τυπική απόκλιση | 0,341   | 4,5                  | 3,48         |

| Σειρά 9.90      |         |                      |              |
|-----------------|---------|----------------------|--------------|
| Δοκίμιο         | E [GPa] | $\sigma_{uts}$ [MPa] | $\epsilon$ % |
| 9.90.1          | 8,212   | 155,3                | 1,98         |
| 9.90.2          | 8,084   | 165,3                | 2,12         |
| 9.90.3          | 8,314   | 178,7                | 2,29         |
| 9.90.4          | 7,908   | 155,0                | 2,07         |
| 9.90.5          | 8,058   | 157,4                | 2,05         |
| 9.90.6          | 7,528   | 129,1                | 1,75         |
| 9.90.7          | 7,597   | 121,9                | 1,62         |
| 9.90.8          | 7,825   | 178,6                | 2,41         |
| 9.90.9          | 8,112   | 173,0                | 2,27         |
| Μέσος όρος      | 7,960   | 157,1                | 2,06         |
| Τυπική απόκλιση | 0,253   | 19,1                 | 0,24         |

## Κεφάλαιο 5

# Ανάλυση αποτελεσμάτων

### 5.1 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

#### 5.1.1 Η θραυστομηχανική εικόνα

Στις σειρές x.0 και x.90, όπου οι ίνες είναι παράλληλες στην διεύθυνση φόρτισης, τα δοκίμια έσπασαν παρουσιάζοντας ψαθυρή συμπεριφορά, όπως αναμενόταν. Η θραύση έγινε στα όρια αλλαγής της διατομής του δοκιμίου, όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων, ενώ η διατομή τους δεν άλλαξε σημαντικά.

Οι σειρές x.45, δηλαδή αυτές που οι ίνες σχημάτιζαν γωνία  $45^\circ$  με την διεύθυνση φόρτισης, έσπασαν παρουσιάζοντας όλκιμη συμπεριφορά. Το υλικό παρουσίασε ενδείξεις διαρροής, δημιουργίας λαιμού, και τελικά θραύσης στο μέσον του δοκιμίου. Η διατομή των δοκιμών μετά την δοκιμή είχε σημαντική μεταβολή, ενώ οι διασταυρούμενες ίνες παρουσιάζουν πολύ μικρότερη γωνία από την αρχική τους ( $90^\circ$ ). Η χρωματική αλλοίωση (άσπρισμα) της ρητίνης από τα πρώτα στάδια των δοκιμών υποδηλώνει αστοχία της μήτρας στην αναμενόμενη επιμήκυνση (3-4%). Έτσι, η φαινόμενη όλκιμη συμπεριφορά αποδίδεται στην μεταβολή των γεωμετρικών ιδιοτήτων του υφάσματος υαλονημάτων.

#### 5.1.2 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δεν είναι τελείως γραμμική στην αρχή της δοκιμής διότι τα δοκίμια ήταν ελαφρώς λυγισμένα (buckled) κατά την τοποθέτησή τους στην μηχανή εφέλκυσμού. Έτσι παρελάμβαναν το φορτίο σταδιακά. Επίσης, κατά την ευθυγράμμιση των κεφαλών εφέλκυσμού υπό φορτίο, διαγράφεται από αυτές ένα τόξο και η παραμόρφωση είναι το συνημίτονο αυτού. Έτσι, δημιουργείται ένα οριζόντιο επίπεδο στην καμπύλη στην περιοχή 0,5 – 1 % επιμήκυνσης, ύψους 10 – 15 MPa. Ως διορθωτική ενέργεια, οι καμπύλες μετατοπίζονται οριζόντια έτσι ώστε η προέκταση της γραμμικής περιοχής που ακολουθεί να τέμνει την αρχή των αξόνων. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας έγινε σε αυτήν τη γραμμική περιοχή.

Για κάθε σειρά, στη συνέχεια γίνεται μια ποιοτική εκτίμηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μετά την στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

Κατά τη σειρά 2.0, τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας και του ορίου θραύσης που προκύπτουν έχουν σωστή τάξη μεγέθους, ενώ η επιμήκυνση στο σημείο θραύσης είναι πολύ κοντά στην αναφερόμενη μέγιστη αντοχή της ρητίνης (3,2%). Τα δοκίμια 2.45.2 και 2.45.3 εφελκύστηκαν σε υψηλότερη ταχύτητα εφελκυσμού και δεν συμμετέχουν στα διαγράμματα. Τα υπόλοιπα δοκίμια παρουσιάζουν εξαιρετικά συνεπείς καμπύλες. Οι μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας έγιναν στη γραμμική περιοχή μέχρι περίπου 1% παραμόρφωση. Τέλος, κατά την σειρά 2.90, η συνέπεια στην τάξη μεγέθους των διαγραμμάτων σε σχέση με τη σειρά 2.0 είναι ποιοτικά αναμενόμενη, και έτσι ισχύουν τα ίδια σχόλια. Η μικρή πτώση των τιμών του  $E$  είναι επίσης αναμενόμενη, λόγω της ανισοτροπίας του υφάσματος.

Στο σύνολό της η σειρά 3 έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τα αντίστοιχα μεγέθη της σειράς 2. Η συνέπεια αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς τα δύο αυτά υλικά διαφέρουν μόνο στην περιεκτικότητα σε ενίσχυση, και στον τρόπο κοπής των δοκιμίων.

Στη σειρά 9.0, το μέτρο ελαστικότητας έχει πολύ μικρή τυπική απόκλιση, ενώ η μέγιστη αντοχή έχει απόκλιση που ξεπερνάει το 10% της μέσης τιμής. Σε ένα υλικό με τόσο ψιλή ύφανση, όμως, είναι λογικό η παραμικρή διαστατική ατέλεια ή ανισοτροπία στην περιεκτικότητα σε ίνες να είναι σημείο συγκέντρωσης τάσεων και άρα να επηρεάζει έντονα την αντοχή. Στη σειρά 9.45, η μορφή των καμπυλών παρουσιάζει (πλην εξαιρέσεων) την χαρακτηριστική φαινομενικά όλκιμη συμπεριφορά που απαντήθηκε και στις σειρές 2 και 3. Στις εξαιρέσεις, μάλιστα, η απόκλιση μπορεί να εξηγηθεί από την ύπαρξη ελαττωμάτων, τα οποία λειτούργησαν σαν σημεία έναρξης της θραύσης. Ειδικά στο δοκίμιο 9.45.4, που παρουσιάζει και την λιγότερο όλκιμη συμπεριφορά, η γραμμή θραύσης δεν είναι καν σε γωνία 45°, όπως φαίνεται στην φωτογραφία 4.10. Τέλος, στη σειρά 9.90, η οποία είναι θεωρητικά απολύτως όμοια με την σειρά 9.0, η απόκλιση από την σειρά 9.0 είναι της τάξης του 2,2% για το μέτρο ελαστικότητας και 3,6% για το όριο θραύσης, ενώ σε παρόμοια επίπεδα κινείται και η επιμήκυνση θραύσης.

### 5.1.3 Ποιοτική σύγκριση αποτελεσμάτων σειρών και υποσειρών – Ερμηνεία αποτελεσμάτων

#### Σύγκριση σειρών x.0 και x.90

Οι διαφορές στις τιμές μπορούν να ερμηνευτούν ικανοποιητικά από την ανισοτροπία πλέξης του υαλοϋφάσματος στις σειρές 2 και 3, ενώ στη σειρά 9, τα αποτελέσματα είναι εντός των πλαισίων της στατιστικής ανοχής, και μάλιστα με πολύ μικρή απόκλιση.

#### Σύγκριση σειρών x.0 και x.45:

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Hull and Clyne [3], figure 5.4), οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για προσανατολισμό  $\pm 45^\circ$  κυμαίνονται στην περιοχή 20-30% των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για  $0^\circ$ . Ο πίνακας 5.1 δίνει τον λόγο των δύο αυτών τιμών για τις σειρές 2, 3 και 9.

Ο λόγος αυτός παρατηρείται εδώ αρκετά αυξημένος. Μια πιθανή ερμηνεία είναι η κυμάτωση των ινών που περιγράφεται και στο θεωρητικό μοντέλο (Κεφάλαιο 3). Η κυμάτωση αυτή προκαλεί την ελάττωση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας σε

**Πίνακας 5.1:** Λόγος  $E_{45}/E_0$  για τις σειρές 2, 3 και 9

| Σειρά | $E_{45}/E_0$ |
|-------|--------------|
| 2     | 43,9 %       |
| 3     | 37,2 %       |
| 9     | 41,8 %       |

σχέση με ένα αντίστοιχο διαστρωμάτωμα  $[0^\circ/90^\circ]$  φύλλων μονοαξονικά προσανατολισμένων ινών.

#### Σύγκριση σειρών x.45:

Τα διαγράμματα των σειρών με υαλοϋφασμα παρουσιάζουν μια φαινόμενη ολκιμότητα. Στις επιφάνειες θραύσης οι ίνες δεν διατηρούν τον αρχικό τους προσανατολισμό ( $\pm 45^\circ$ ), ενώ παρουσιάζεται μείωση διατομής. Μια πιθανή εξήγηση του γεγονότος είναι ότι οι ίνες που βρίσκονται υπό γωνία στο δοκίμιο ευθυγραμμίζονται με την διεύθυνση φόρτισης και τανύονται εντός της πλέξης πριν σπάσουν, γεγονός που μπορεί να πιστοποιηθεί και μακροσκοπικά παρατηρώντας τις άκρες των σπασμένων δοκιμίων. Αυτός ο μηχανισμός απαιτεί αρκετή ενέργεια ώστε να κρατήσει το δοκίμιο σε τόσο μεγάλες παραμορφώσεις (15 – 17%), αλλά και αρκετό χρόνο (μικρός ρυθμός παραμόρφωσης) για να προλαβαίνει να την απορροφά και να την μετατρέπει σε έργο. Έτσι, το πλέγμα δίνει μια χαρακτηριστική φαινόμενη ολκιμότητα στο υλικό.

## 5.2 Σύγκριση θεωρητικού μοντέλου – πειραματικών δεδομένων

Το θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφ. 3 περιορίζεται σε τάση παράλληλη στην διεύθυνση ύφανσης, οπότε οι σειρές x.45 δεν συμμετέχουν στην σύγκριση. Στον πίνακα 5.2, παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπόλοιπων σειρών, καθώς και χαρακτηριστικά από άλλα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας [10, 30, 31].

### 5.2.1 Εκτίμηση τιμών από το θεωρητικό μοντέλο

Όταν τα παραπάνω εισαχθούν σαν τιμές στο θεωρητικό μοντέλο, προκύπτουν τα στοιχεία του πίνακα 5.3.

Παρατηρείται ότι γενικά υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση με τις πειραματικές τιμές. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές είναι εντός των ορίων που θέτει το θεωρητικό μοντέλο (εκτός από τη σειρά GLE2, η οποία μπορεί να θεωρηθεί στατιστικό outlier). Το αν είναι εγγύτερα στο άνω ή στο κάτω όριο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού. Όπως περιεγράφη στο κεφάλαιο 3.2.6, τα υλικά με πολλές και λεπτές στρώσεις υφασμάτων τείνουν να έχουν μεγαλύτερο συντελεστή αλληλοεπικάλυψης, και άρα

**Πίνακας 5.2:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ύφανσης και υλικών στα δοκίμια. Το δοκίμιο GLE0 είναι από τους Naik and Ganesh [10]· τα GLE1 - GLE7 από τους Naik and Ganesh [30]· και το GLE00 από τους Sheng and Hoa [31].

| Σειρά | $\phi_0^f$ [v/v%] | b    | h [mm] | a [mm] |
|-------|-------------------|------|--------|--------|
| 2.0   | 32.2              | 0.57 | 0.24   | 1.19   |
| 2.90  | 32.2              | 0.43 | 0.24   | 1.56   |
| 3.0   | 38.6              | 0.57 | 0.20   | 1.19   |
| 3.90  | 38.6              | 0.43 | 0.20   | 1.56   |
| 9.0   | 18.0              | 0.50 | 0.05   | 0.91   |
| 9.90  | 18.0              | 0.50 | 0.05   | 0.91   |
| GLE0  | 42.0              | 0.50 | 0.20   | 1.34   |
| GLE1  | 28.0              | 0.50 | 0.09   | 1.30   |
| GLE2  | 23.0              | 0.50 | 0.10   | 1.50   |
| GLE3  | 40.0              | 0.50 | 0.18   | 1.44   |
| GLE4  | 43.0              | 0.50 | 0.18   | 1.44   |
| GLE5  | 46.0              | 0.50 | 0.22   | 1.72   |
| GLE6  | 47.0              | 0.50 | 0.22   | 1.72   |
| GLE7  | 41.0              | 0.50 | 0.45   | 2.76   |
| GLE00 | 25.0              | 0.50 | 0.15   | 1.46   |

να κυμαίνονται στο άνω όριο που προβλέπει το μοντέλο. Στα πειράματα που έγιναν στο Πολυτεχνείο Κρήτης, μόνο η σειρά 9 έχει αυτά τα χαρακτηριστικά, και όπως φαίνεται, η συμφωνία με το θεωρητικό μοντέλο είναι εξαιρετική. Επίσης καλή σύγκλιση παρουσιάζουν οι τιμές των άλλων σειρών (2.0, 2.90, 3.0 και 3.90) με τα κάτω όρια του μοντέλου (αλλά χωρίς να ξεφεύγουν από αυτά), καθώς τα υλικά αποτελούνταν από μόλις 2 στρώσεις υφάσματος, και μάλιστα με αρκετά χονδρή ύφανση.

### 5.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή αλληλοεπικάλυψης, του μεγέθους του ανηγμένου μοναδιαίου κελιού και του μερικού όγκου των matrix rockets

Λύνοντας τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3.2.7 ως προς  $n_0$ , μπορεί να προσδιοριστεί όχι μόνο η τιμή του, αλλά και το μέγεθος του ανηγμένου μοναδιαίου κελιού σε σχέση με το παραλληλεπίπεδο κελί (τιμή αναφοράς), καθώς και ο μερικός όγκος των matrix rockets. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4. Οι μη λογικές τιμές (αρνητικές τιμές, τιμές πάνω από 100%), θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με την ανοχή των στατιστικών αποκλίσεων.

**Πίνακας 5.3:** Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις προβλέψεις του θεωρητικού μοντέλου. Οι τιμές των  $GLE_i$  είναι όπως στον Πίνακα 5.2. Η απόκλιση (5η και 7η στήλη) ορίζεται ως  $\delta E_x (\%) = 100 (E_x^i - E_x) / E_x^i$ .

| Σειρά | Πειραματικές τιμές |           |  |  | απόκλιση % |  | απόκλιση % |
|-------|--------------------|-----------|--|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|       | $E_x$ [GPa]        | Std. Dev. |  | $E_x^{max}$                                                                       |            | $E_x^{min}$                                                                        |            |
| 2.0   | 9.060              | ± 1.200   |  | 11.366                                                                            | 20.29      | 8.988                                                                              | -0.80      |
| 2.90  | 8.341              | ± 0.032   |  | 10.133                                                                            | 17.69      | 8.034                                                                              | -3.05      |
| 3.0   | 11.573             | ± 0.895   |  | 14.220                                                                            | 18.61      | 11.059                                                                             | -4.65      |
| 3.90  | 9.731              | ± 0.253   |  | 12.612                                                                            | 22.84      | 9.892                                                                              | 1.63       |
| 9.0   | 7.960              | ± 0.253   |  | 8.188                                                                             | 2.79       | 6.683                                                                              | -19.12     |
| 9.90  | 8.135              | ± 0.287   |  | 8.188                                                                             | 0.65       | 6.683                                                                              | -21.74     |
| GLE0  | 19.300             | ± 0.000   |  | 21.623                                                                            | 10.74      | 16.651                                                                             | -15.91     |
| GLE1  | 17.500             | ± 1.000   |  | 16.909                                                                            | -3.49      | 13.230                                                                             | -32.27     |
| GLE2  | 20.000             | ± 0.800   |  | 14.371                                                                            | -39.17     | 11.389                                                                             | -75.61     |
| GLE3  | 21.500             | ± 1.000   |  | 21.237                                                                            | -1.24      | 16.371                                                                             | -31.33     |
| GLE4  | 20.800             | ± 0.700   |  | 23.033                                                                            | 9.69       | 17.674                                                                             | -17.69     |
| GLE5  | 22.800             | ± 1.200   |  | 24.496                                                                            | 6.92       | 18.736                                                                             | -21.69     |
| GLE6  | 22.400             | ± 1.000   |  | 25.178                                                                            | 11.03      | 19.231                                                                             | -16.48     |
| GLE7  | 19.600             | ± 1.300   |  | 18.392                                                                            | -6.57      | 14.306                                                                             | -37.01     |
| GLE00 | 14.500             | ± 1.500   |  | 14.344                                                                            | -1.09      | 11.369                                                                             | -27.54     |

**Πίνακας 5.4:** Όγκος ανηγμένου μοναδιαίου κελιού και matrix rockets ως προς το μοναδιαίο κελί αναφοράς

| Σειρά | $n_0$  | $V_{cell}^{actual}$ % | $V_{mtx\ pkts}^{actual}$ % |
|-------|--------|-----------------------|----------------------------|
| max   | 0.000  | 100                   | 27.44                      |
| min   | 1.000  | 72.56                 | 0.00                       |
| 2.0   | 0.041  | 98.87                 | 26.31                      |
| 2.90  | 0.160  | 95.62                 | 23.05                      |
| 3.0   | 0.211  | 94.21                 | 21.65                      |
| 3.90  | -0.084 | 102.3                 | 29.73                      |
| 9.0   | 0.885  | 75.71                 | 3.15                       |
| 9.90  | 0.974  | 73.28                 | 0.71                       |
| GLE0  | 0.611  | 83.23                 | 10.67                      |
| GLE1  | 1.122  | 69.50                 | -3.06                      |
| GLE2  | 1.902  | 47.81                 | -24.75                     |
| GLE3  | 1.039  | 71.51                 | -1.06                      |
| GLE4  | 0.659  | 81.93                 | 9.36                       |
| GLE5  | 0.768  | 78.94                 | 6.36                       |
| GLE6  | 0.611  | 83.23                 | 10.67                      |
| GLE7  | 1.199  | 67.12                 | -5.45                      |
| GLE00 | 1.038  | 71.53                 | -1.03                      |

## Κεφάλαιο 6

# Συζήτηση, συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

### 6.1 Συζήτηση

Τα υφάσματα ινών είναι εξαιρετικά διαδεδομένα στην σημερινή κατασκευαστική πρακτική ως ενίσχυση στα σύνθετα υλικά λόγω της ευκολίας παραγωγής και διαχείρισής τους, και τις ελεγχόμενες κατά την παραγωγή μηχανικές τους ιδιότητες κατά το επίπεδο.

Για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών και εν γένει των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, των οποίων η ενίσχυση αφορά σε υφάσματα ινών, υπάρχουν διαθέσιμα μοντέλα που χρησιμοποιούν αναλυτικές μεθόδους ή μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα αυτά τείνουν να γίνονται όλο και πιο σύνθετα, τόσο που η εφαρμογή τους απαιτεί ισχυρά υπολογιστικά συστήματα και μεγάλο χρόνο υπολογισμού. Όμως, στην καθημερινή κατασκευαστική πρακτική, η ευκολία εφαρμογής και η απλότητα είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία αποδοχή ενός μοντέλου.

Στο πλαίσιο αυτό, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ορθός τρόπος σκέψης ενός Μηχανικού – απόφοιτου ενός Πολυτεχνείου, περιλαμβάνει, εκτός από την ακρίβεια, και την ποιοτική εκτίμηση, την αντίληψη και την ταχύτητα στην λύση πρακτικών κατασκευαστικών προβλημάτων, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο που παρέχει τιμές για το μέτρο ελαστικότητας των εν λόγω υλικών. Το μοντέλο αυτό αντιμετωπίζει το πρόβλημα γραμμικά κι ελαστικά, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού όταν αναπτύσσεται σε αυτό έντονο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε μικρές παραμορφώσεις, όπου η συμπεριφορά του υλικού υπακούει στο νόμο του Hooke, και έχει νόημα το μέτρο ελαστικότητας. Εντούτοις, αν και αυτή η περιοχή στα όλκιμα υλικά είναι μια μικρή περιοχή στην αρχή του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων, στα ψαθυρά υλικά καλύπτει σχεδόν το σύνολο του διαγράμματος.

Για να υπολογίσει το μέτρο ελαστικότητας, το μοντέλο χρησιμοποιεί 5 ανεξάρτητους συντελεστές. Οι συντελεστές αυτοί έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να ελεγχθούν κατά την παραγωγή των υφασμάτων και των υλικών, και είναι ανεξάρτητοι από

τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Αυτοί είναι:

A. Το πάχος του υφάσματος,  $h$ . Εναλλακτικά, το άθροισμα των διαστάσεων των νημάτων του στημονιού και του υφιδιού στην κατεύθυνση του πάχους του υφάσματος.

B. Η περίοδος κυμάτωσης,  $\alpha$ , του νήματος κατά την ύφανση στο επίπεδο του υφάσματος. Εναλλακτικά, το πάχος του νήματος κατά το επίπεδο αυτό ως  $\alpha/2$ .

Οι δύο αυτοί συντελεστές αφορούν στα χαρακτηριστικά των ίδιων των νημάτων που συμμετέχουν στην ύφανση, και ο λόγος τους διαμορφώνει την τιμή του συντελεστή  $c$  (κεφ. 3.2.6).

Γ. Ο συντελεστής αλληλοεπικάλυψης  $n_0$  (κεφ. 3.2.6). Ο συντελεστής αυτός είναι στατιστικός και η ακριβής τιμή του δεν μπορεί παρά να προσδιορίζεται πειραματικά. Όμως, η τιμή του επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του υφάσματος, του συστήματος ενίσχυσης – μήτρας, καθώς και την διαδικασία παραγωγής. Συγκεκριμένα:

- Η τιμή του μεγαλώνει όσο πιο ψιλή είναι η ύφανση του υφάσματος (άρα όσο πιο μικρά είναι το  $h$  και το  $\alpha$ ), διότι τα λεπτότερα υφάσματα μπορούν να προσαρμολογούνται ευκολότερα στα κενά που δημιουργούν τα διπλανά τους.
- Όσο πιο χαμηλό είναι το ιξώδες της μήτρας, τόσο καλύτερη είναι η διαβροχή των υφασμάτων, άρα περιορίζονται τα matrix rockets για ορισμένη περιεκτικότητα.
- Οι στρώσεις του υφάσματος στο υλικό, καθώς ο συντελεστής είναι κατά βάση στατιστικός, και αφορά στις διεπιφάνειες των δύο στρωμάτων. Όσοι περισσότερες είναι οι στρώσεις, τόσο πιο πιθανό είναι να υπάρχει στοίβαξη αυτών κατά την μέγιστη πυκνότητα, όπως στο σχήμα 3.9.
- Οι ειδικές συνθήκες κατά την παραγωγή του υλικού. Όσο πιο υψηλή συμπίεση υπάρχει κατά την διαβροχή των υφασμάτων, τόσο όλο το διαθέσιμο μεταξύ τους διάστημα μειώνεται, άρα ο συντελεστής αλληλοεπικάλυψης αυξάνει.

Δ. Το ποσοστό ανισοτροπίας της ύφανσης. Είναι χαρακτηριστικό της ύφανσης και διαμορφώνει το συντελεστή  $b$  (κεφ. 3.2.6).

Ε. Η κατ' όγκο περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε ενίσχυση. Αν και η μετρήσιμη πειραματική τιμή είναι πιο αξιόπιστη από την θεωρητικά αναμενόμενη, και είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί κατά την παραγωγή, εντούτοις είναι από τα πιο βασικά φυσικά μεγέθη κάθε σύνθετου υλικού.

Για τους παραπάνω παράγοντες έγινε παραμετρική ανάλυση για να φανεί η συναρτησιακή σχέση με την οποία επηρεάζουν το θεωρητικό μοντέλο. Οι τιμές για την ενίσχυση και τη μήτρα είναι τυπικές τιμές για ίνες υάλου και ρητίνη, όπως φαίνονται στον πίνακα 6.1. Κατά την ανάλυση κάθε παράγοντα, οι υπόλοιποι λαμβάνουν τυπικές τιμές, οι οποίες είναι:

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες συστήματος παραμετρικής ανάλυσης

|          |          |   |        |
|----------|----------|---|--------|
| Μήτρα    | $E_m$    | = | 3 GPa  |
|          | $\nu_m$  | = | 0.35   |
| Ενίσχυση | $E_{1f}$ | = | 70 GPa |
|          | $E_{2f}$ | = | 70 GPa |
|          | $\nu_f$  | = | 0.25   |

$$\phi = 30\% \quad b = 0.5 \text{ ή } 0.75 \quad n_0 = 0.1 \text{ ή } 0.9 \quad h = 0.25$$

$$\alpha = 1.00 \quad h/\alpha = 0.15$$

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης φαίνονται στα σχήματα 6.1 έως 6.5.

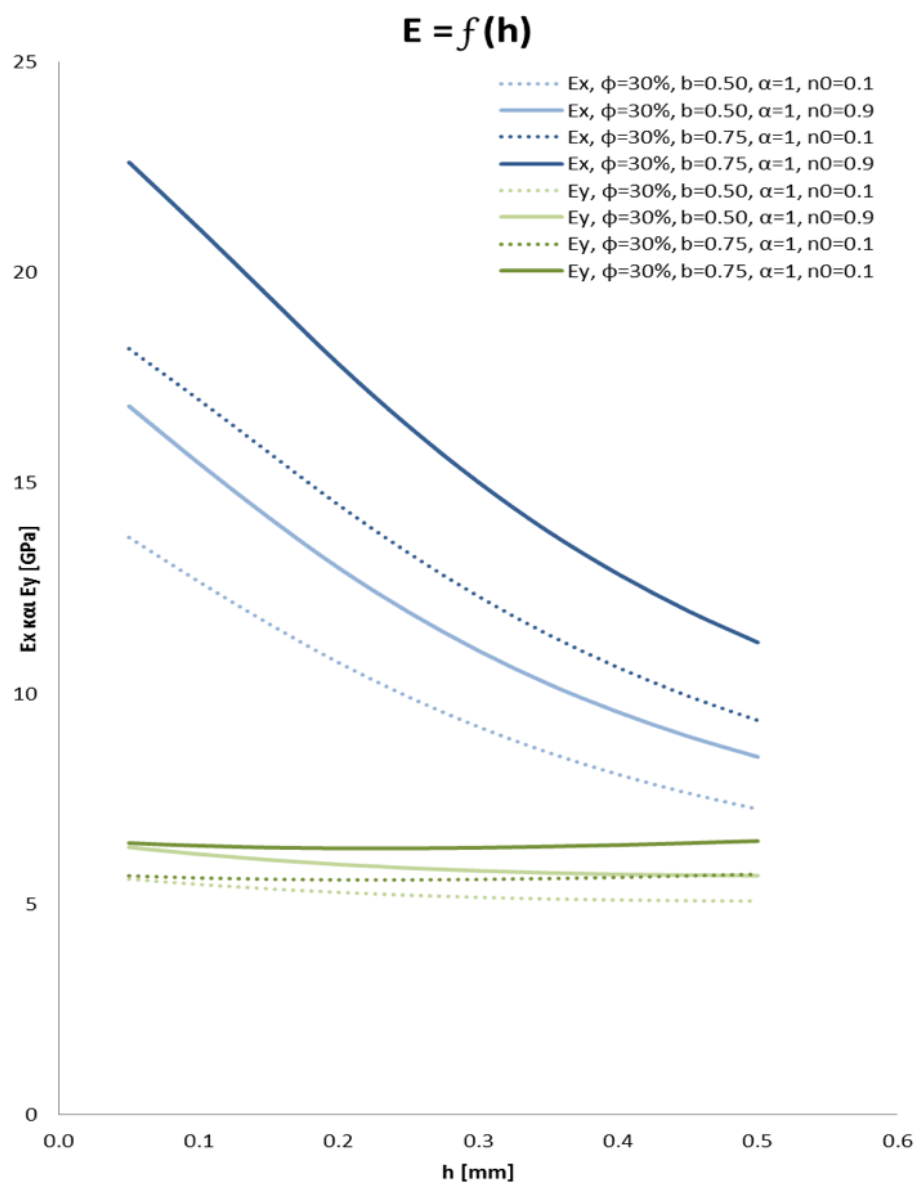
Στα σχήματα 6.1 και 6.2 απεικονίζεται το μέτρο ελαστικότητας ως συνάρτηση του  $h$  και του  $\alpha$ . Η κυρίαρχη τάση (trend) που δείχνουν τα γραφήματα είναι ότι όσο ο λόγος  $h/\alpha$  μεγαλώνει (άρα αυξάνει το  $h$  ή μειώνεται το  $\alpha$ ), τόσο η τιμή του  $E$  πέφτει, διότι από τον ορισμό του συντελεστή  $c$ , όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο το μοντέλο προσεγγίζει την σειριακή συμπεριφορά.

Στο σχήμα 6.3, φαίνεται ότι ο συντελεστής  $n_0$  έχει αναλογική σχέση με το μέτρο ελαστικότητας  $E_x$  και σχεδόν δεν επηρεάζει το  $E_y$ . Η αναλογική σχέση όμως για το  $E_x$  επηρεάζεται έντονα από την μεταβολή του  $b$ .

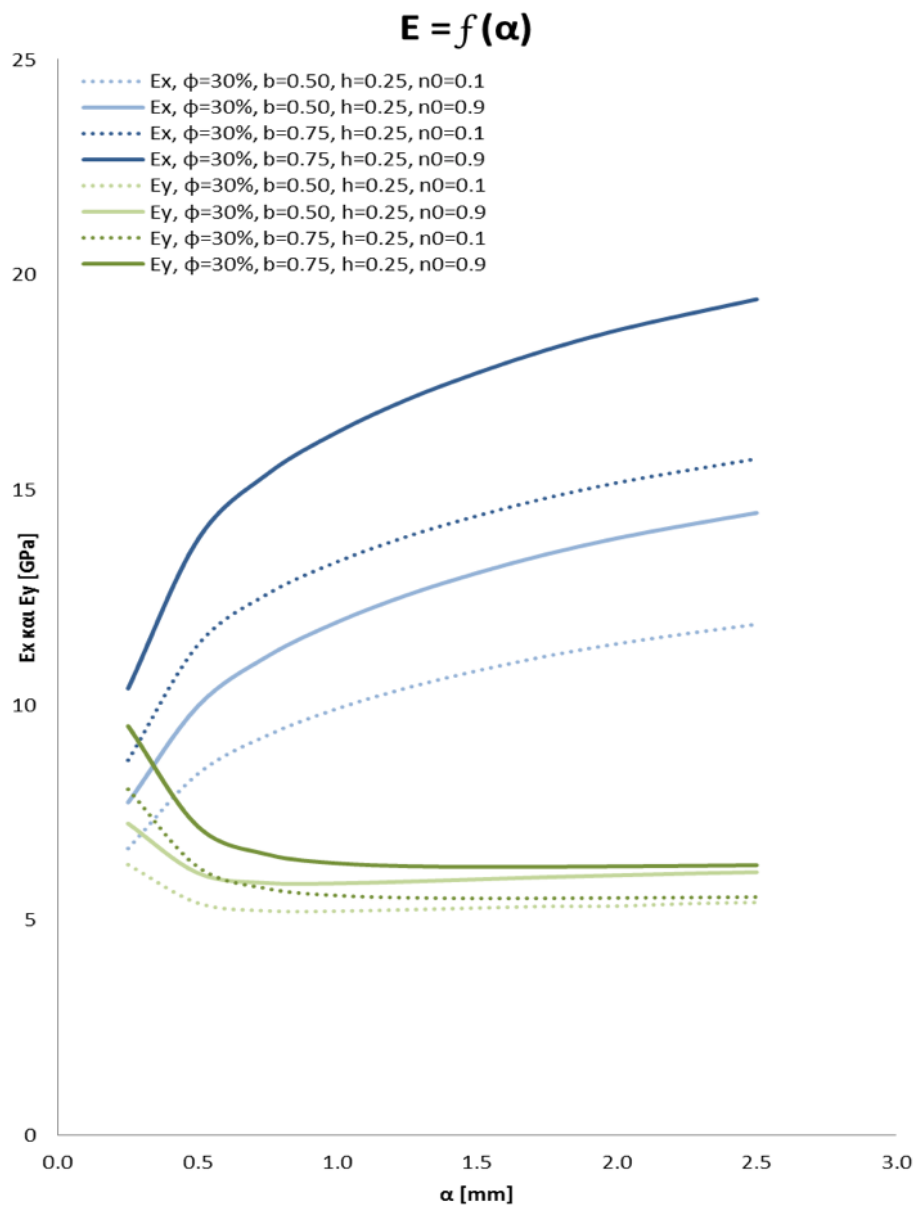
Επίσης, σχεδόν γραμμική σχέση παρουσιάζουν τα  $b$  και  $\phi$  ως προς την επίδραση τους στο μέτρο ελαστικότητας  $E_x$  (σχήματα 6.4 και 6.5). Αυτή η παρατήρηση, στο πλαίσιο που αφορούν στο ποσοστό των ινών που συμμετέχουν στην παραλαβή του φορτίου, είναι σύμφωνη με τις αρχές της Classic Laminate Theory. Ακόμη, η μορφή της καμπύλης για το  $E_y$  ως συνάρτηση του  $\phi$ , θυμίζει την σειριακή σύνθεση, που πρεσβεύεται από τα μοντέλα των Reuss και Halpin-Tsai.

Η επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου έγινε κατ' αρχήν με 3 σειρές δοκιμών εφελκυσμού με δοκίμια από υαλοϋφασμα εμποτισμένο σε εποξική ρητίνη. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν και εφελκύστηκαν στο Εργαστήριο Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών του Γενικού Τμήματος στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Τα πειράματα χαρακτηρίστηκαν από καλή επαναληψιμότητα, και οι ληφθείσες τιμές έχουν σωστή τάξη μεγέθους. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε μόνο το μέτρο ελαστικότητας, αν και από τις δοκιμές προκύπτουν κι άλλα στοιχεία, όπως το όριο θραύσης, η μέγιστη επιμήκυνση, η μορφή του διαγράμματος και η ενέργεια (έργο) ως την θραύση.

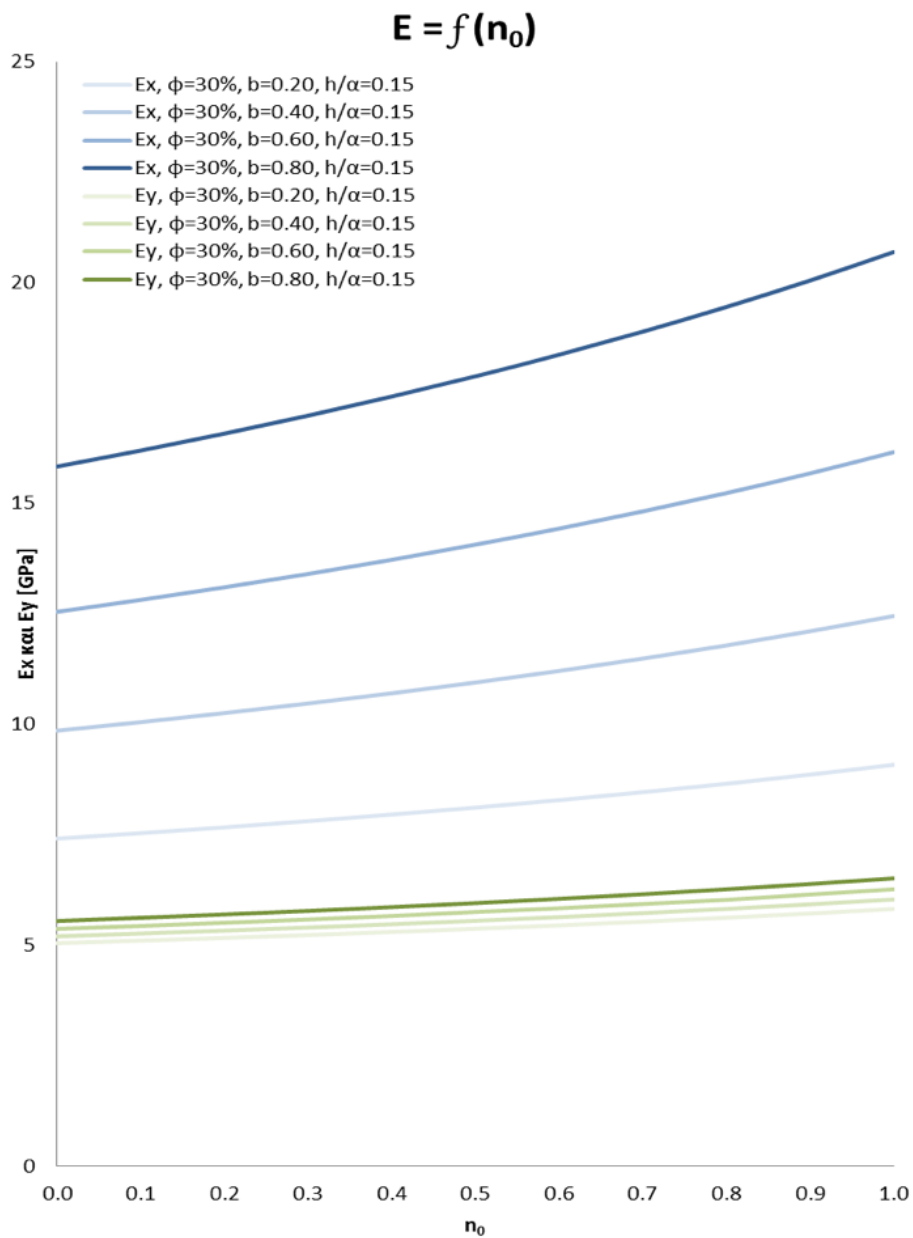
Για να ξεφύγει όμως από το τοπικό πλαίσιο του Πολυτεχνείου Κρήτης, το μοντέλο συγκρίθηκε και με πειραματικά δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία, και μάλιστα με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.3. Η συνέπεια αυτή συμβάλλει στην εγκυρότητα του μοντέλου.



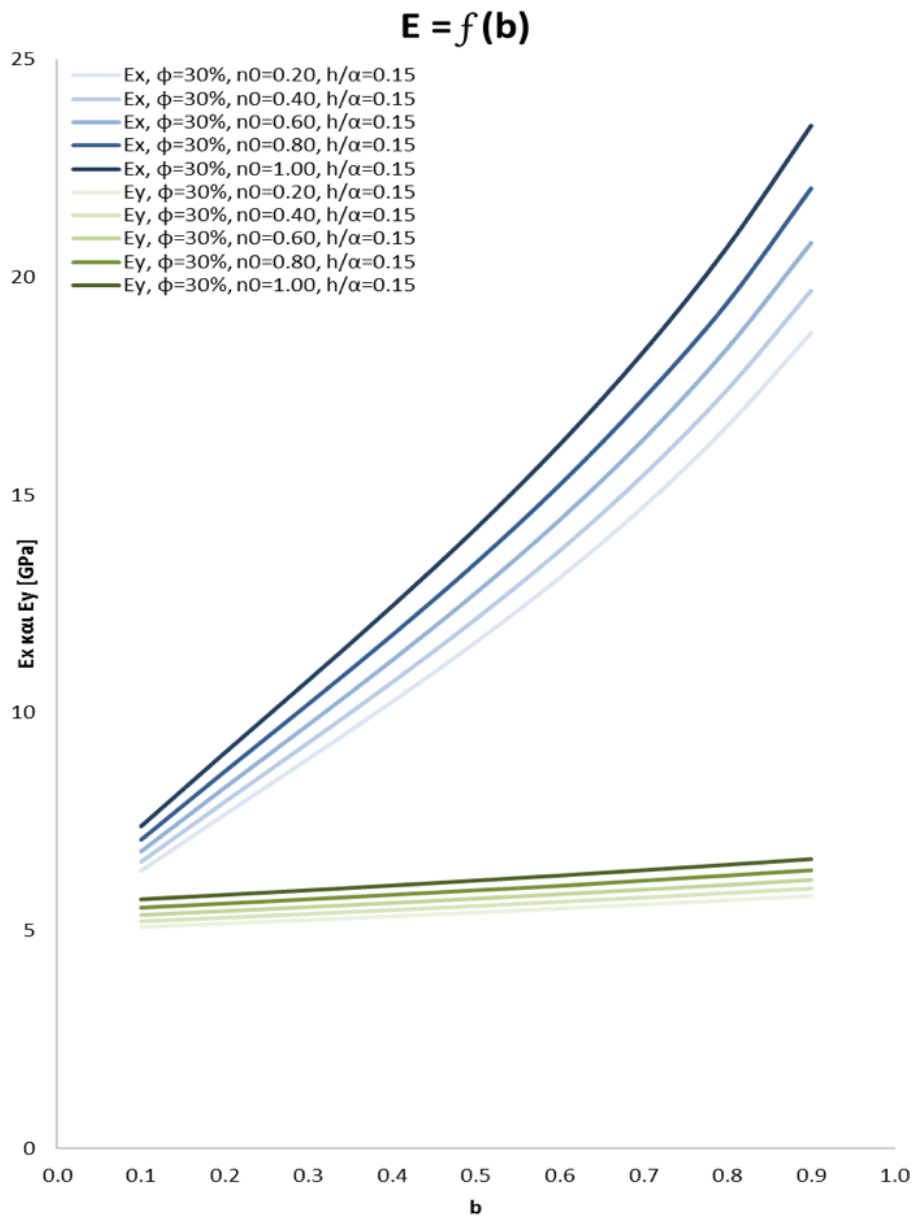
Σχήμα 6.1: Τα μέτρα ελαστικότητας  $E_x$  και  $E_y$  ως συνάρτηση του πάχους,  $h$ .



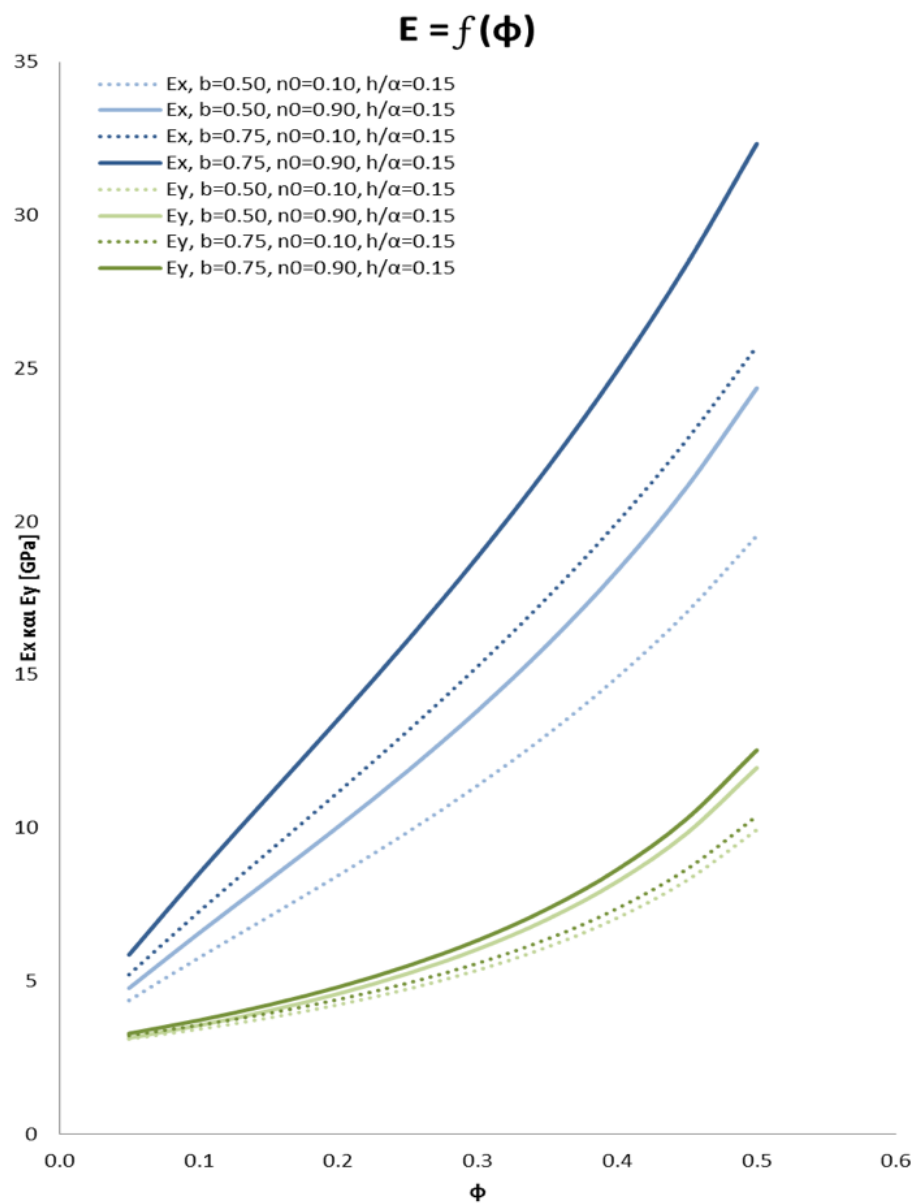
**Σχήμα 6.2:** Τα μέτρα ελαστικότητας  $E_x$  και  $E_y$  ως συνάρτηση της περιόδου της κυμάτωσης της ίνας,  $\alpha$ .



**Σχήμα 6.3:** Τα μέτρα ελαστικότητας  $E_x$  και  $E_y$  ως συνάρτηση του συντελεστή αλληλοεπικάλυψης,  $n_0$ .



**Σχήμα 6.4:** Τα μέτρα ελαστικότητας  $E_x$  και  $E_y$  ως συνάρτηση του συντελεστή ανισοτροπίας,  $b$ .



**Σχήμα 6.5:** Τα μέτρα ελαστικότητας  $E_x$  και  $E_y$  ως συνάρτηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας σε ενίσχυση,  $\phi$ .

## 6.2 Συμπεράσματα

1. Αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο που στηρίζεται στην γεωμετρία του υφάσματος. Οι βασικοί παράμετροι του μοντέλου είναι το πάχος του υφάσματος,  $h$ , η περίοδος κυμάτωσης του νήματος στην ύφανση,  $\alpha$ , το ποσοστό ανισοτροπίας της ύφανσης,  $b$ , η στοίβαξη των υφασμάτων,  $n_0$  και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του υλικού σε ενίσχυση,  $\phi$ .
2. Το μοντέλο επιβεβαιώθηκε πειραματικά για υφάσματα απλής πλέξης, συμμετρικά και μη.
3. Το μοντέλο πλεονεκτεί σε σχέση με τα διαθέσιμα στην βιβλιογραφία ως προς την ευκολία εφαρμογής και την απλότητα.
4. Ο συνδυασμός των παραγόντων  $h$  και  $\alpha$  επηρεάζει το μοντέλο προσεγγίζοντας περισσότερο ένα παράλληλο (ισο-παραμορφωσιακό) ή σειριακό (ισο-τασικό) μοντέλο. Οι παράγοντες  $n_0$  και  $b$  επηρεάζουν σχεδόν γραμμικά το  $E_x$ , και σχεδόν δεν επηρεάζουν το  $E_y$ . Ο παράγοντας  $\phi$  επηρεάζει το μοντέλο με τρόπο σύμφωνο με την Classic Laminate Theory.

## 6.3 Μελλοντικές προοπτικές

Η παρούσα εργασία, καθώς και τα πειραματικά δεδομένα που έμειναν αναξιοποίητα από τις δοκιμές εφελκυσμού, μπορούν, και ενθαρρύνονται, να χρησιμοποιηθούν σαν βάση για επόμενες εργασίες με παραπλήσιο θέμα. Οι βασικοί άξονες επέκτασης της παρούσης είναι:

- Επέκταση του θεωρητικού μοντέλου για γωνίες φόρτισης διαφορετικές από τους άξονες της ύφανσης (off axis loading). Αξιοποίηση πειραματικών δεδομένων σειρών x.45.
- Επέκταση του θεωρητικού μοντέλου για άλλα είδη ύφανσης (twill ή/και satin). Επικύρωση μοντέλου με πειραματικά δεδομένα.
- Επέκταση του θεωρητικού μοντέλου για παραμορφώσεις κοντά στο όριο θραύσης – Μηχανισμός αστοχίας. Αξιοποίηση δεδομένων δοκιμών εφελκυσμού της παρούσης.
- Πειραματική επικύρωση του θεωρητικού μοντέλου με περισσότερες σειρές πειραμάτων. Χρήση άλλων υλικών και γεωμετριών ύφανσης.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δημήτρης Ι. Παντελής. *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*. Εκδ. Παπασωτηρίου, 1996.
- [2] Ευθύμιος Καβελάκης. *Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα*, 2010. Διπλωματική Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [3] D. Hull and W. Clyne. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 2003.
- [4] Αλέξανδρος Γκότσης. *Σημειώσεις Τεχνολογίας Πολυμερών*. Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.
- [5] T. Ishikawa and T.W. Chou. Stiffness and strength behavior of woven fabric composites. *Journal of Materials Science*, 17:3211–3220, 1982.
- [6] T. Ishikawa and T. W. Chou. Nonlinear behavior of woven fabric composites. *Journal of Composite Materials*, 17(5):399–413, 1983.
- [7] H. T. Hahn and S. W. Tsai. Nonlinear elastic behavior of unidirectional composite laminae. *Journal of Composite Materials*, 7(January):102–108, 1973.
- [8] J. Kabelka. Prediction of the thermal properties of fibre-resin composites. In G. Pritchard, editor, *Developments in Reinforced Plastics-3*, pages 167–202. Elsevier Applied Science Publishers, London, 1984.
- [9] N. K. Naik and P. S. Shembekar. Elastic behavior of woven fabric composites: I-Lamina analysis. *Journal of Composite Materials*, 26(15):2197–2255, 1992.
- [10] N. K. Naik and V. K. Ganesh. Prediction of on-axes elastic properties of plain weave fabric composites. *Composites Science and Technology*, 45(2):135–152, 1992.
- [11] J. J. Xiong, R. A. Shenoi, and X. Cheng. A modified micromechanical curved beam analytical model to predict the tension modulus of 2d plain weave fabric composites. *Composites B*, 40:776–783, 2009.
- [12] B. V. Sankar and R. V. Marrey. A unit-cell model of textile composite beams for predicting stiffness properties. *Composite Science and Technology*, 49(1):61–69, 1993.

- [13] H. Ichihashi, H. Hamada, N. Ikuta, and Z. Maekawa. Finite element analysis of woven fabric composites considering interfacial properties. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Society of Interfacial Science of Composites, Japan*, volume 2(2), 1994.
- [14] E. H. Glaessgen, O. H. Griffin, C. M. Pastore, and A. Birger. Modeling of textile composites. *ICCE*, 1:183–184, 1994.
- [15] E. H. Glaessgen, O. H. Griffin, C. M. Pastore, and A. Birger. Geometrical and finite element modeling of textile composites. *Composites B*, 27B:43–50, 1996.
- [16] B. N. Cox, W. C. Carter, and N. A. Fleck. A binary model of textile composites – I. Formulation. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(10):3463–3479, 1994.
- [17] J. Xu, B. N. Cox, M. A. McGlockton, and W. C. Carter. A binary model of textile composites – II. The elastic regime. *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(9):3511–3524, 1995.
- [18] J. D. Whitcomb. Iterative global/local finite element analysis. *Computers and Structures*, 40(4):1027–1032, 1991.
- [19] K. Woo and J. D. Whitcomb. Three-dimensional failure analysis of plain weave textile composites using a global/local finite element method. *Journal of Composite Materials*, 30(9):984–1003, 1996.
- [20] C. Chapman and J. D. Whitcomb. Effect of assumed tow architecture on predicted moduli and stresses in plain weave composites. *Journal of Composite Materials*, 29(16):2134–2459, 1995.
- [21] J. D. Whitcomb and K. Sirengen. Effect of various approximations on predicted progressive failure in plain weave composites. *Journal of Composite Materials*, 34(16):13–20, 1996.
- [22] A. Fujita, A. Nakai, A. Yokohama, and H. Hamada. Simulation system for mechanical behaviors of textile composites. In *Proceedings of the International Conference on Computational Engineering Science, Hawaii*, Computational Mechanics, '95 Theory and Applications, pages 2311–2316, 30 July – 3 August, 1995.
- [23] M. Karayaka and P. Kurath. Deformation and failure behavior of woven composite laminates. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 116:222–232, 1994.
- [24] F. T. Peirce. The geometry of cloth structure. *J Text Inst.*, 28(3):45–96, 1937.
- [25] B. P. Pozdnyakov. Fabric resistance to tension in different directions (in russian), 1932. Moscow – Leningrad: GIZLegProm.
- [26] N. G. Novikov. A fabric structure and its design with the geometrical technique (in russian). *Tetlnaya Promishlennost*, 6(2):9–17, 1946.

- [27] J. W. S. Hearle and W. J. Shanahan. An energy method for calculations in fabric mechanics. *J Text Inst*, 69(4):81–110, 1978.
- [28] S. de Jong and R. Postle. A general energy analysis in fabric mechanics using optimal control theory. *Text Res J*, 48(3):127–135, 1978.
- [29] S. V. Lomov, G. Huysmans, R. S. Luo, Y. amd Parnas, A. Prodromou, I. Verpoest, and F. R. Phelan. Textile composites: modeling strategies. *Composites A*, 32: 1379–1394, 2001.
- [30] N.K. Naik and V.K. Ganesh. An analytical method for plain weave fabric composites. *Composites*, 26:281–289, 1992.
- [31] S.Z. Sheng and S.V. Hoa. Three dimensional micro-mechanical modeling of woven fabric composites. *J.Comp.Mater.*, 35:1701, 2001.



## Παράρτημα Α

# Επιλογή της μεθόδου μέτρησης της παραμόρφωσης και προσδιορισμός της ταχύτητας παραμόρφωσης

Έχοντας μετρήσει τις ηλεκτρικές καταγραφές για συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ των δαγκανών χωρίς φορτίο, έγινε γραμμική συναρτησιακή αντιστοιχία του ηλεκτρικού σήματος με την πραγματική παραμόρφωση. Η συνάρτηση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$L[\text{mm}] = 98.385 \times L[\text{Volt}] + 0.995$$

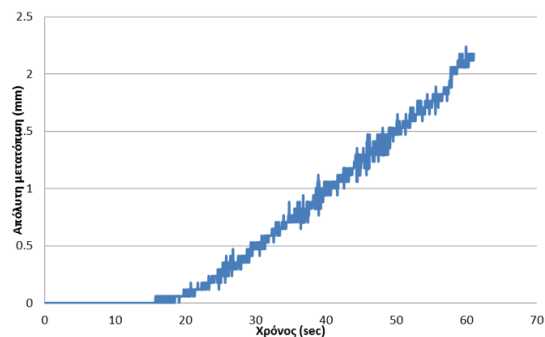
Τα σφάλματα λόγω διακύμανσης του ηλεκτρικού σήματος στα όρια ανοχής του καταγραφικού οδηγούν σε πολύ ασαφή διαγράμματα. Όμως, και σε συνέχεια της παραπάνω συναρτησιακής αντιστοιχίας, αν σε κάθε καταγραφή αντιστοιχηθεί ένας χρόνος από την αρχή της εγγραφής ( $t = 0$ ) συν τον αύξοντα αριθμό της καταγραφής επί το χρονικό βήμα (0.05 sec εν προκειμένω), τότε προκύπτει ένα γράφημα όπως στο Σχ.

**A.1.**

Η κλίση του παραπάνω διαγράμματος δίνει την ταχύτητα παραμόρφωσης εκπεφρασμένη σε mm/sec. Μετατοπίζοντας το διάγραμμα τόσο ώστε:

1. Να απαλειφθεί ο νεκρός χρόνος καταγραφής και
2. Η προέκταση της γραμμικής περιοχής να τέμνει την αρχή των αξόνων,

βρίσκεται η ζητούμενη ταχύτητα (0.05 mm/sec), και μάλιστα με πολύ καλή ακρίβεια. Δειγματοληπτικές μετρήσεις σε πολλά δοκίμια επιβεβαιώνουν αυτήν την τιμή, και μάλιστα σε όλο το εύρος των εμφανιζόμενων τιμών φορτίου. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, μόνο τις καταγεγραμμένες τιμές του φορτίου, και υπολογίζοντας την παραμόρφωση με βάση το χρόνο και την σταθερή αυτή ταχύτητα, μπορούμε να εξάγουμε τις ζητούμενες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης.



**Σχήμα Α.1:** Χρονική εξέλιξη της μετατόπισης μιας μέτρησης του δοκιμίου «2.90.1» στο όργανο εφελκυσμού.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Απαλείφεται η ταλάντευση της ηλεκτρικής τιμής της παραμόρφωσης από το καταγραφικό, στοιχείο που οδηγεί σε πολύ καθαρότερα διαγράμματα.
2. Απαλείφεται η εμφάνιση της σταδιακής φόρτισης του δοκιμίου, μετατοπίζοντας το διάγραμμα τόσο, ώστε η προέκταση της γραμμικής περιοχής να τέμνει την αρχή των αξόνων. Έτσι, υπάρχει ακριβέστερη μέτρηση της κλίσης (μέτρο ελαστικότητας).

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Η παραμόρφωση μετράται έμμεσα
2. Αν η ταχύτητα δοκιμής δεν είναι η αργή, (ταχύς εφελκυσμός όπως στην περίπτωση των δοκιμών 2.0.2, 2.45.2, 2.45.3 και 2.90.3), η καταγραφή δεν είναι έγκυρη και χρειάζεται καινούργια μετρονόμηση της παραμόρφωσης.

## Παράρτημα Β

# Η μορφοποίηση υπό κενό και η εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη

### Εισαγωγή

Η μορφοποίηση υπό κενό (vacuum bag forming) είναι μία πολύ διαδεδομένη μέθοδος κατασκευής σύνθετων υλικών λόγω της ευχρηστίας και του χαμηλού της αρχικού κόστους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή έως και αρκετά μεγάλων, μονοκόμματων, και όχι κατ' ανάγκη επίπεδων φύλλων σύνθετου υλικού. Η γεωμετρία του παραγόμενου τεμαχίου εξαρτάται από το καλούπι στο οποίο θα στρωθεί η ενίσχυση. Έτσι, τα παραγόμενα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην καθημερινή κατασκευαστική πρακτική. Πάνω στο καλούπι υπάρχουν στρώσεις ινών ενίσχυσης, ενώ παροχές άντλησης της μήτρας διατρέχουν την κατασκευή. Όλο το συγκρότημα κλείνεται αεροστεγώς με πλαστικό κάλυμμα, και αντλείται από αυτό ο αέρας με μια αντλία κενού. Το κενό αυτό δημιουργεί υποπίεση σε ένα δοχείο με ρευστή μήτρα, η οποία αντλείται δια μέσου της ενίσχυσης. Έτσι, οι ίνες διαβρέχονται, και η μήτρα παραμένει σε αυτή τη θέση μέχρι την στερεοποίησή της. Το κενό αέρος (υποπίεση) επίσης εξυπηρετεί στην συμπίεση των υλικών πάνω στο καλούπι μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας, παράγοντας διαστατικά άρτια τεμάχια.

Έτσι, τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: η κατασκευή σύνθετων γεωμετριών, η ευκολία κατασκευής, η διαστατική ακρίβεια και η επιφανειακή ποιότητα των τεμαχίων, καθώς και το χαμηλό κόστος.

Η διαδικασία κατασκευής σύνθετων υλικών με αυτή τη μέθοδο, όπως ακολουθήθηκε στο Εργαστήριο Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, έχει τα εξής στάδια:

### Δημιουργία και προετοιμασία καλούπιου

Το καλούπι, ανάλογα με την ζητούμενη κατασκευή, μπορεί να είναι από μια απλή επίπεδη επιφάνεια, ως και μία σύνθετη κοίλη ή / και κυρτή κατασκευή. Το υλικό κατασκευής του ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα των τεμαχίων που αναμένεται να κατασκευαστούν, τη ζητούμενη επιφανειακή τους ποιότητα, καθώς και το κόστος του υλικού. Για επίπεδα φύλλα σύνθετων υλικών, ένα απλό τζάμι ανάλογων διαστάσεων είναι αρκετό. Για πιο σύνθετες γεωμετρίες, τείνουν να χρησιμοποιούνται προπλάσματα από μη πορώδη υλικά, όπως το μέταλλο ή συμπαγές πολυμερές. Στο καλούπι εφαρμόζονται αρκετές στρώσεις αποκολλητικού κεριού, ή σε ορισμένες περιπτώσεις που η επιφανειακή ποιότητα είναι υψηλών απαιτήσεων, και μία στρώση αποκολλητικού τζελ. Σε κάθε περίπτωση όμως, μόνο η προσκείμενη στο καλούπι επιφάνεια του υλικού έχει καλή επιφανειακή ποιότητα, και γι' αυτό χαρακτηρίζεται ως επιφάνεια Α (A-surface). Έτσι, το καλούπι θα πρέπει να έχει τέτοια γεωμετρία ώστε να περιγράφει την εξωτερική επιφάνεια του τεμαχίου, αν αυτή είναι η επιφάνεια ενδιαφέροντος.

Για την δημιουργία των δοκιμών που απαιτήθηκαν για τις πειραματικές δοκιμές της παρούσης, χρησιμοποιήθηκε απλό τζάμι πάχους 5 mm, και διαστάσεων 50 cm x 100 cm. Η επιφάνεια αυτή ήταν ικανή να δώσει φύλλα σύνθετων υλικών που η εκμεταλλεύσιμη επιφάνειά τους ξεπερνούσε τις διαστάσεις ενός φύλλου Α3.

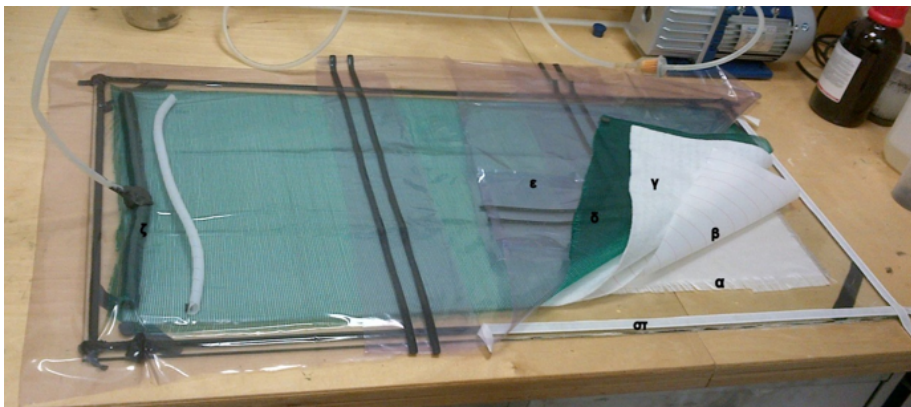
### Προετοιμασία στρώσεων ενίσχυσης και βοηθητικών υλικών

Πάνω στο κερωμένο καλούπι απλώνονται κατάλληλα κομμένες στρώσεις ενίσχυσης, οι οποίες μπορεί να είναι παράλληλες ή διασταυρούμενες, να περιέχουν υλικά πλήρωσης (πυρήνες) σε συγκεκριμένα σημεία, δοκίδες κ.ά. Ένα από τα πλεονεκτήματα των υφασμένων και των πλεγμένων ινών σε σχέση με τις παράλληλες είναι ότι μπορούν να τανυθούν μεταβάλλοντας ελαφρά την μορφολογία της ύφανσης / πλέξης, και άρα να εφαρμόσουν καλύτερα στις γεωμετρικές μεταβολές του καλουπιού.

Πάνω από την τελευταία στρώση ενίσχυσης τοποθετούνται υφάσματα που διευκολύνουν τη ροή της μήτρας διαμέσου του υλικού (breathers). Μεταξύ αυτών και των στρώσεων της ενίσχυσης τοποθετείται ένα ύφασμα που έχει την ικανότητα να μην κολλάει στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού (peeler), και όταν αυτό σχηματιστεί, καθιστά δυνατό τον αποχωρισμό του από τα breathers. Η ύφανση του peeler διαμορφώνει την άλλη επιφάνεια του σύνθετου υλικού. Το κάθε ύφασμα πρέπει να υπερκαλύπτει ελαφρώς το αμέσως προηγούμενό του για να υπάρχει ομοιόμορφη κατανόμη της ροής.

Η ροή της μήτρας (συνήθως ρητίνης) επιτυγχάνεται με την εισαγωγή δύο σπειροειδών σωλήνων: μία παροχή άντλησης του αέρα με αντλία κενού, και μία παροχή εισαγωγής της μήτρας στο σύστημα. Οι παροχές αυτές τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε για να φτάσει η μήτρα προς την αντλία, να πρέπει να περάσει από το σύνολο της ενίσχυσης. Η διάταξη αυτή μπορεί να είναι είτε ομοκεντρικά (outwards – inwards), είτε παράλληλα.

Για την δημιουργία των δοκιμών που απαιτήθηκαν για τις πειραματικές δοκιμές της παρούσης, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν παράλληλη, ήτοι οι δύο παροχές ήταν εκατέρωθεν και παράλληλα με αντικριστές πλευρές των στρώσεων της ενίσχυσης. Αυτό έδινε ένα σχετικά «γραμμικό» μέτωπο πλήρωσης.



**Φωτογραφία Β.1:** Διάταξη των στρωμάτων κατά το vacuum forming: α. φύλλα ενίσχυσης, β. peeler, γ, δ. breather, ε. αεροστεγές φιλμ, στ. μαστιχοταινία, ζ. παροχή άντλησης αέρα.

Το σύνολο των παραπάνω διατάξεων καλύπτεται με ένα τελείως αεροστεγές φιλμ, το οποίο στερεώνεται στα όρια του καλουπιού με μαστιχοταινία. Έτσι, συνδέοντας την αντλία κενού στην αντίστοιχη παροχή, όλο το συγκρότημα συμπιέζεται. Τυχόν διαρροές καλύπτονται με μαστιχοταινία.

Στην φωτογραφία **Β.1**, φαίνεται η παραπάνω περιγραφείσα διάταξη των φύλλων.

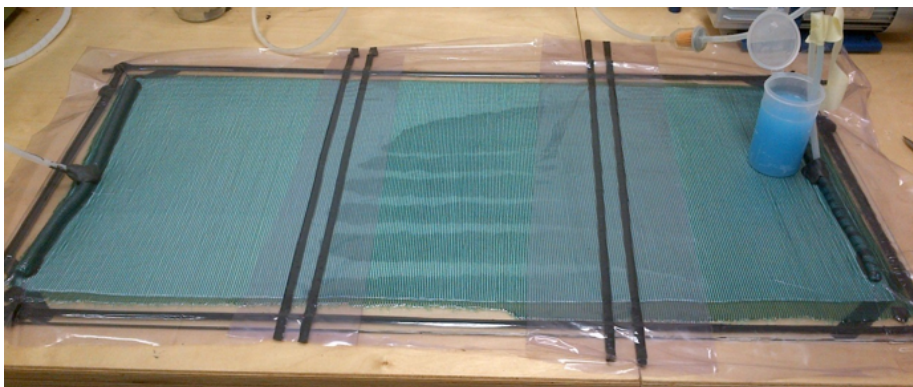
### Άντληση της μήτρας

Αφού ολοκληρωθεί ο έλεγχος διαρροών με ένα συνδεδεμένο μανόμετρο, η μήτρα αναρροφάται από ένα δοχείο με ελεύθερη επιφάνεια μέσω της παροχής εισαγωγής στο σύστημα. Στη φωτογραφία **Β.2** φαίνεται ένα «μέτωπο» διαβροχής. Μέσω του ελέγχου της υποπίεσης, είναι δυνατό να μεταβληθεί η ταχύτητα διαβροχής. Η άντληση της μήτρας είναι, όπως αναγνωρίστηκε εμπειρικά, από τα πιο σημαντικά στάδια, διότι η παροχή άντλησης δεν πρέπει να πάρει αέρα. Εάν συμβεί αυτό, ο αέρας θα ακολουθήσει την πορεία της μήτρας, «σαρώνοντας» και απομακρύνοντάς την. Έτσι, το υλικό θα έχει τοπικές ατέλειες. Για να μην γίνει αυτό, η ποσότητα της μήτρας πρέπει να είναι υπέρ-αρκετή, ώστε να μην εξαντληθεί πριν διαβραχεί όλη η ενίσχυση.

Από την άλλη, υπερβάλλουσα ποσότητα μήτρας μπορεί να αναρροφηθεί μέσω της παροχής άντλησης αέρα προς την αντλία, καταστρέφοντάς την. Γι' αυτό, υπάρχει μια ειδική διάταξη (matrix trap – Φωτογραφία **Β.3**) που παγιδεύει όση μήτρα πέρασε από την παροχή άντλησης.

Όταν όλη η επιφάνεια της ενίσχυσης έχει διαβραχεί με μήτρα, η απομόνωση του συστήματος γίνεται κατά σειρά:

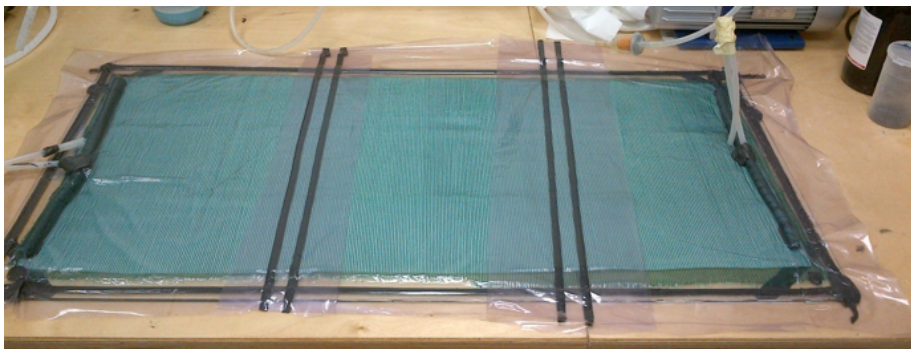
1. Απομόνωση της παροχής εισαγωγής της μήτρας. Έτσι το σύστημα φτάνει στην μέγιστή του υποπίεση, και αντλείται το πλεόνασμα μήτρας.



**Φωτογραφία Β.2:** "Μέτωπο" διαβροχής της ενίσχυσης. Η μήτρα εδώ είναι απλώς χρωματισμένο νερό, γι' αυτό έχει τόσο μικρό ιξώδες.



**Φωτογραφία Β.3:** Παγίδα μήτρας. Προστατεύει την αντλία κενού από την εισροή μήτρας.



**Φωτογραφία Β.4:** Απομονωμένο σύστημα υπό κενό κατά την διαδικασία στερεοποίησης.

2. Απομόνωση της παροχής άντλησης του αέρα με την αντλία σε λειτουργία. Έτσι, το εκμεταλλεύσιμο σύστημα ενίσχυσης – μήτρας πλέον απομονώνεται και αφήνεται να στερεοποιηθεί.
3. Σβήσιμο της αντλίας κενού.

Οποιαδήποτε άλλη σειρά οδηγεί στην εισαγωγή αέρα στο συμπιεσμένο σύστημα, είτε μέσω της αντλίας, είτε μέσω του δοχείου της μήτρας, με καταστροφικά αποτελέσματα για την ομοιογένεια του υλικού.

### **Στερεοποίηση της μήτρας – Ξεκαλούπωμα**

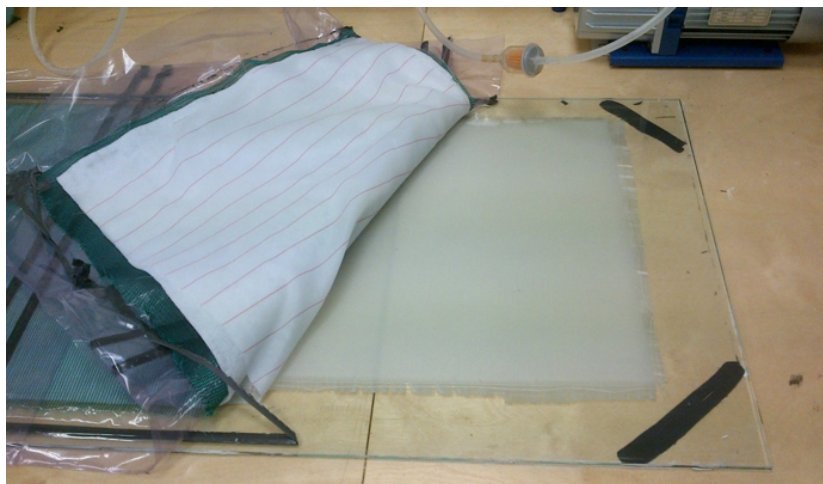
Ανάλογα με το υλικό της μήτρας και τις επικρατούσες εξωτερικές συνθήκες, η στερεοποίηση της μήτρας, ειδικά αν πρόκειται για θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (ρητίνη) μπορεί να διαρκέσει από κάποιες ώρες μέχρι κάποιες μέρες μέχρι να ολοκληρωθεί. Ιδανικά, η στερεοποίηση γίνεται σε κλιβάνους με ελεγχόμενα θερμοκρασιακά προφίλ. Στην πράξη, αφήνεται να στερεοποιηθεί για μία μέρα, σε χώρο με κλιματιζόμενο περιβάλλον.

Στην φωτογραφία **B.4**, φαίνεται ένα υλικό που έχει αφεθεί να στερεοποιηθεί, αφού ακολουθήθηκαν οι παραπάνω διαδικασίες.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, η απομακρύνεται το αεροστεγές φιλμ, οι παροχές άντλησης και εισαγωγής, και τα φύλλα των breathers, τα οποία είναι αναλώσιμα. Τελικά, το υλικό αποκολλάται από το καλούπι με τη βοήθεια (αν απαιτηθεί) μιας απλής σπάτουλας.

Το αποτέλεσμα φαίνεται στην φωτογραφία **B.5**.

Τελικά, το παραγόμενο τεμάχιο μπορεί να κοπεί, να τρυπηθεί και να τριφτεί, (τηρώντας πάντα τα απαραίτητα μέτρα ατομικής προστασίας – μάσκα, γάντια, αναρροφητική σκούπα), προς ένα τελικό προϊόν.



**Φωτογραφία Β.5:** Τελικό προϊόν. Το σύνηθες είναι να κολλάει στο peeler, και όχι στο κερωμένο καλούπι, αλλά στην εικόνα η μήτρα δεν έχει στερεοποιηθεί (χρωματισμένο νερό).

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|     |                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Αποτελέσματα μετρήσεων για τη σειρά δοκιμών 2 . . . . .                                                                                                                                                                | 42 |
| 4.2 | Αποτελέσματα μετρήσεων για τη σειρά δοκιμών 3 . . . . .                                                                                                                                                                | 46 |
| 4.3 | Αποτελέσματα μετρήσεων για τη σειρά δοκιμών 9 . . . . .                                                                                                                                                                | 50 |
| 5.1 | Λόγος $E_{45}/E_0$ για τις σειρές 2, 3 και 9 . . . . .                                                                                                                                                                 | 53 |
| 5.2 | Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ύφανσης και υλικών στα δοκίμια. Το δοκίμιο GLE0 είναι από τους Naik and Ganesh [10], τα GLE1 - GLE7 από τους Naik and Ganesh [30], και το GLE00 από τους Sheng and Hoa [31].                 | 54 |
| 5.3 | Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις προβλέψεις του θεωρητικού μοντέλου. Οι τιμές των $GLE_i$ είναι όπως στον Πίνακα 5.2. Η απόκλιση (5η και 7η στήλη) ορίζεται ως $\delta E_x (\%) = 100 (E_x^i - E_x)/E_x^i$ . | 55 |
| 5.4 | Όγκος ανηγμένου μοναδιαίου κελιού και matrix rockets ως προς το μοναδιαίο κελί αναφοράς . . . . .                                                                                                                      | 56 |
| 6.1 | Ιδιότητες συστήματος παραμετρικής ανάλυσης . . . . .                                                                                                                                                                   | 59 |



# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|      |                                                                                                          |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Κατηγορίες σύνθετων υλικών . . . . .                                                                     | 6  |
| 1.2  | Διάκριση υφασμένων νημάτων . . . . .                                                                     | 8  |
| 1.3  | Τρόποι ύφανσης για σύνθετα υλικά . . . . .                                                               | 8  |
| 2.1  | Το μοντέλο «μωσαϊκού», όπως περιγράφεται από τους Ishikawa and Chou [5]. . . . .                         | 12 |
| 2.2  | Το μοντέλο «κυμάτωσης της ίνας», όπως περιγράφεται από τους Ishikawa and Chou [5]. . . . .               | 13 |
| 2.3  | Το μοντέλο «διάταξης τομέων», όπως περιγράφεται από τους Naik and Ganesh [10]. . . . .                   | 14 |
| 2.4  | Το μοντέλο «διάταξης στοιχείων», όπως περιγράφεται από τους Naik and Ganesh [10]. . . . .                | 15 |
| 2.5  | Οι δυνάμεις στο μοντέλο των Xiong et al. [11] στο (a) παράλληλο και (b) κάθετο νήμα στη φόρτιση. . . . . | 16 |
| 3.1  | Η δομή του μοναδιαίου ημι-κελιού . . . . .                                                               | 21 |
| 3.2  | Προοπτική απεικόνιση του μοναδιαίου ημι-κελιού . . . . .                                                 | 22 |
| 3.3  | Τομή του μοναδιαίου κελιού στο επίπεδο $z = 0$ . . . . .                                                 | 22 |
| 3.4  | Τομή του μοναδιαίου κελιού στο επίπεδο $z = a_{weft}/4$ . . . . .                                        | 23 |
| 3.5  | Τομές του μοναδιαίου κελιού στα επίπεδα $x = 0$ , $x = a_{warp}/4$ και $x = a_{warp}/2$ . . . . .        | 24 |
| 3.6  | Μερικοί όγκοι νημάτων και μήτρας . . . . .                                                               | 27 |
| 3.7  | Τα τοπικά και το ολικό σύστημα συντεταγμένων . . . . .                                                   | 28 |
| 3.8  | Διατάξεις ελάχιστης πυκνότητας μοναδιαίων κελιών . . . . .                                               | 32 |
| 3.9  | Διάταξη μέγιστης πυκνότητας μοναδιαίων κελιών . . . . .                                                  | 32 |
| 3.10 | Block διάγραμμα σύνθεσης του θεωρητικού μοντέλου. . . . .                                                | 33 |
| 3.11 | Εκφυλισμένο μοντέλο με μεγιστοποιημένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας . . . . .                           | 34 |
| 4.1  | Διάταξη μηχανής εφελκυσμού - ηλεκτρονικού υπολογιστή . . . . .                                           | 36 |

|      |                                                                                                                                                                      |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2  | Διάταξη αντλίας κενού - μανομέτρου . . . . .                                                                                                                         | 36 |
| 4.3  | Αντιστοίχιση δύναμης - τάσης σήματος . . . . .                                                                                                                       | 37 |
| 4.4  | Αντιστοίχιση μετατόπισης - τάσης σήματος . . . . .                                                                                                                   | 37 |
| 4.5  | Διαστάσεις δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-638M/99 Type IV . . . . .                                                                                | 38 |
| 4.6  | Απεικόνιση των εφελκυσμένων δοκιμίων σειράς 2.xx.x . . . . .                                                                                                         | 40 |
| 4.7  | Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σειράς (α) 2.0.x, (β) 2.45.x, και (γ) 2.90.x . . . . .                                                                                  | 41 |
| 4.8  | Απεικόνιση των εφελκυσμένων δοκιμίων σειράς 3.xx.x . . . . .                                                                                                         | 44 |
| 4.9  | Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σειράς (α) 3.0.x, (β) 3.45.x, και (γ) 3.90.x . . . . .                                                                                  | 45 |
| 4.10 | Απεικόνιση των εφελκυσμένων δοκιμίων σειράς 9.xx.x . . . . .                                                                                                         | 48 |
| 4.11 | Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σειράς (α) 9.0.x, (β) 9.45.x, και (γ) 9.90.x . . . . .                                                                                  | 49 |
| 6.1  | Τα μέτρα ελαστικότητας $E_x$ και $E_y$ ως συνάρτηση του πάχους, $h$ . . .                                                                                            | 60 |
| 6.2  | Τα μέτρα ελαστικότητας $E_x$ και $E_y$ ως συνάρτηση της περιόδου της κυμάτωσης της ίνας, $\alpha$ . . . . .                                                          | 61 |
| 6.3  | Τα μέτρα ελαστικότητας $E_x$ και $E_y$ ως συνάρτηση του συντελεστή αλληλοεπικάλυψης, $n_0$ . . . . .                                                                 | 62 |
| 6.4  | Τα μέτρα ελαστικότητας $E_x$ και $E_y$ ως συνάρτηση του συντελεστή ανισοτροπίας, $b$ . . . . .                                                                       | 63 |
| 6.5  | Τα μέτρα ελαστικότητας $E_x$ και $E_y$ ως συνάρτηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας σε ενίσχυση, $\phi$ . . . . .                                                      | 64 |
| A.1  | Χρονική εξέλιξη της μετατόπισης μιας μέτρησης του δοκιμίου «2.90.1» στο όργανο εφελκυσμού. . . . .                                                                   | 72 |
| B.1  | Διάταξη των στρωμάτων κατά το vacuum forming: α. φύλλα ενίσχυσης, β. peeler, γ, δ. breather, ε. αεροστεγές φιλμ, στ. μαστιχοταινία, ζ. παροχή άντλησης αέρα. . . . . | 75 |
| B.2  | ”Μέτωπο” διαβροχής της ενίσχυσης. Η μήτρα εδώ είναι απλώς χρωματισμένο νερό, γι’ αυτό έχει τόσο μικρό ιξώδες. . . . .                                                | 76 |
| B.3  | Παγίδα μήτρας. Προστατεύει την αντλία κενού από την εισροή μήτρας. . . . .                                                                                           | 76 |
| B.4  | Απομονωμένο σύστημα υπό κενό κατά την διαδικασία στερεοποίησης. . . . .                                                                                              | 77 |
| B.5  | Τελικό προϊόν. Το σύνηθες είναι να κολλάει στο peeler, και όχι στο κερωμένο καλούπι, αλλά στην εικόνα η μήτρα δεν έχει στερεοποιηθεί (χρωματισμένο νερό). . . . .    | 78 |

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

- bridging model, 11
- C-glass, 3
- carbon/carbon, 3
- Classic Laminate Theory, 12, 13, 28, 59
- E-glass, 3
- Element Array Model, 13
- fibre undulation model, 11
- Griffith, 4
- Halpin-Tsai, 59
- laminae, 9, 11
- laminates, 9
- matrix pockets, 32, 54
- mosaic model, 11
- Object Oriented Programming, 19
- plain, 7
- Reuss, 59
- Rule of Mixtures, 29
- S-glass, 3
- satin, 7
- sizing, 3, 38
- Slice Array Model, 13
- twill, 7
- Κλασική Θεωρία Διαστρωματώσεων, 12, 13
- ίνες, 2
- ίνες άνθρακα, 3
- ανθρακονήματα, 2
- γραφένια, 2
- δυναμικό μοντέλο, 17
- ενίσχυση κόκκου, 5
- ενίσχυση με κοντές ίνες, 6
- ενίσχυση με τεμαχίδια, 2, 5
- επαναληπτική μέθοδος ανάλυσης, 17
- ετερογενή υλικά, 1
- θερμοπλαστικά πολυμερή, 5
- θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, 4
- ιεραρχική δομή, 18
- κεραμικές μήτρες, 4
- κληρονομικότητα (inheritance), 19
- μήτρα, 1, 4
- μακροδομή, 17
- μεταλλικές μήτρες, 4
- μικροδομή, 17
- μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, 16
- ομοιογενή υλικά, 1
- πάχος υφάσματος, 58
- περίοδος κυμάτωσης, 58
- πλεγμένα νήματα, 7
- πολυμερικές μήτρες, 4
- πολυμορφισμός (polymorphism), 19
- πολυστρωματικά υλικά, 2, 9
- πυριτικές ενώσεις, 3
- συγκέντρωση (encapsulation), 19
- συντελεστής αλληλοεπικάλυψης,  $n_0$ , 32, 53, 58, 59
- συντελεστής ανισοτροπίας,  $b$ , 31, 58
- συντελεστής ποσόστωσης,  $c$ , 31, 58, 59
- σύνθετο υλικό, 1
- υαλονήματα, 3
- υλικό ενίσχυσης, 1
- υφασμένα νήματα, 7



## Vitae



Ο Αντώνιος Αντωνογιαννάκης γεννήθηκε στις 22 Απριλίου 1986 στο Ηράκλειο Κρήτης, όπου και ολοκλήρωσε την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευσή του. Εισήχθη με τη διαδικασία των Πανελληνίων Εξετάσεων το 2004 στην Σχολή Ικάρων – Τμήμα Μηχανικών, απ' όπου αποφοίτησε το 2008 με ειδικότητα Μηχανικού Αεροσκαφών. Από το 2008 μέχρι σήμερα είναι τοποθετημένος στην 115 Πτέρυγα Μάχης με έδρα τη Σούδα. Επίσης, από τον Οκτώβριο 2010 παρακολουθεί Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η συγγραφική του δραστηριότητα μέχρι τώρα αφορά σε:

Παρουσιάσεις σε Διεθνή Συνέδρια:

- Antonios Antonogiannakis, Nikolaos Vaxevanidis, "Complete design of an aero-engine gearbox based on DIN and AGMA methodologies". Proc. The 3rd International Conference - POWER TRANSMISSIONS '09, 1-2 October 2009, Kallithea-Chalkidiki, Greece, pp. 595-600

Άλλα:

- Α. Αντωνογιαννάκης, Ν. Βαξεβανίδης, "Αεροπορικά κιβώτια ταχυτήτων (οδοντωτοί τροχοί, έδρανα)", 01/2009, Σχολή Ικάρων (διδακτικές σημειώσεις για την Σχολή Ικάρων)
- Α. Αντωνογιαννάκης, "Σχεδιομελέτη διβάθμιου μειωτήρα", Διπλωματική εργασία, 05/2008, Σχολή Ικάρων. Βαθμός: 100 / 100 Επιβλέπων: Δρ. Νικόλαος Βαξεβανίδης, Λέκτορας Σχολής Ικάρων.