

## ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ, ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥΣ

**Β. Συκάς<sup>1,2</sup>, Ε.Γεωργαντζάκου<sup>1</sup>, Λ.Ζουμπουλάκης<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

<sup>2</sup>Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία «ΕΑΒ», Σχηματάρι Βοιωτίας, Ελλάδα

(\*[izoubou@chemeng.ntua.gr](mailto:izoubou@chemeng.ntua.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αρχικά μελετήθηκε η κατασκευή και επισκευή σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας με μέσο ενίσχυσης ίνες άνθρακα. Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν είχαν ως μήτρα είτε φαινολική, είτε εποξειδική ρητίνη με ίνες άνθρακα 15% κ.ο για μέσο ενίσχυσης. Η φαινολική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι ρητίνη νεολάκης η οποία κατασκευάστηκε στο εργαστήριο μέσω σταδιακού πολυμερισμού μεταξύ φαινόλης και φορμαλδεΐδης. Αντιθέτως, η εποξειδική ρητίνη ήταν του εμπορίου της εταιρείας ΝΕΟΤΕΧ και πιο συγκεκριμένα η ΕΡΟΧΟΛ 2004 Α FLUID με σκληρυντή τον ΕΡΟΧΟΛ 2004 Β FAST σε αναλογία 100:18. Τέλος οι ίνες άνθρακα ήταν υψηλής αντοχής εφελκυσμού της, οι Tenax HTS40 24k / 1600 tex, όπου πριν την δημιουργία του σύνθετου υλικού προδιαποτίστηκαν σε ιδιοκατασκευή στο εργαστήριο.

Στην συνέχεια μερικά από τα δοκίμια υπέστησαν καταπονήσεις με σκοπό την μέτρηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Άλλα πάλι, αφού πρώτα καταπονήθηκαν, επισκευάστηκαν και τελικά μετρήθηκαν και σε αυτά οι μηχανικές ιδιότητες. Με τον τρόπο αυτό λήφθηκε μία εικόνα για το πως επηρεάζονται οι μηχανικές ιδιότητες στα σύνθετα υλικά ανάλογα με το αν αυτά είναι στην αρχική τους μορφή, "τραυματισμένα" ή επισκευασμένα. Με τον τρόπο αυτό βρέθηκε ποσοστιαία πόσο μειώθηκαν οι αντοχές σε ένα τραυματισμένο δοκίμιο συγκριτικά με το κανονικό, ή πόσο αυξήθηκαν κατά την επισκευή ενός τραυματισμένου δοκιμίου, βγάζοντας έτσι συμπεράσματα αναφορικά με το αν τα επισκευασμένα σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά καλύπτοντας όλες τις προδιαγραφές για τις οποίες και αρχικά είχαν δημιουργηθεί.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα προηγμένα σύνθετα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται αρκετά σε αεροβιομηχανικές εφαρμογές είναι συνήθως συνεχόμενες ίνες άνθρακα μέσα σε μία πολυμερική μήτρα, όπου μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικές ιδιότητες καλύτερες ακόμα και από αυτές των κραμμάτων, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά πιο ελαφριά <sup>[1]</sup>. Ως επακόλουθο της μείωσης του βάρους, έχουμε και την μείωση των εκπομπών ρύπων λόγω μειωμένης κατανάλωσης καυσίμων και κατεπέκταση οικονομικότερες πτήσεις. Τα σύνθετα υλικά αρχικά χρησιμοποιήθηκαν την δεκαετία του 1960 στα πολεμικά αεροσκάφη και έπειτα την δεκαετία του 1970 και στα πολιτικά, που και πάλι η χρήση τους δεν ήταν εκτενή, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του αεροσκάφους αποτελούσαν από κράματα μετάλλων <sup>[2]</sup>. Αυτό βέβαια δεν άργησε να αλλάξει και ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 τα σύνθετα αποτελούσαν μεγάλο κομμάτι της κύριας δομής του αεροσκάφους.

Έτσι η νέα γενιά πολιτικών αεροσκαφών, όπως το Airbus 380, το Boeing 787 και τα Bombardier C Series, αποτελούνται από σύνθετα υλικά ακόμα και στην κύρια δομή τους. Η αύξηση όμως αυτή στην χρήση των σύνθετων υλικών θα επιφέρει κάποιες διαφορές στις διαδικασίες συντήρησης, επισκευής και πρόβλεψης, τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα. Βραχυπρόθεσμα, νέες τεχνικές χρειάζονται για την συντήρηση, την επίβλεψη και την αντιμετώπιση των ζημιών που τα αεροσκάφη παθαίνουν καθ'όλη την διάρκεια της ζωής τους, όπως επίσης και η ανάγκη για ποιοτικούς ελέγχους των σύνθετων αυτών εξαρτημάτων. Καθώς αυτά τα αεροσκάφη μεγαλώνουν, είναι λογικό πως θα υπόκεινται σε φυσιολογική φθορά και θα υποβάλλονται σε ελέγχους C και D

για την διατήρηση της αξιοπιστίας τους. Στο σημείο αυτό της ζωής τους θα ήταν ιδανικό να πραγματοποιούνται αποτελεσματικοί και όσο το δυνατόν οικονομικότεροι έλεγχοι συντήρησης και επισκευής ούτως ώστε να μειώνεται το συνολικό κόστος ζωής του αεροσκάφους [3].

Από δομικής πλευράς, τα σύνθετα υλικά έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως υψηλές αντοχές συγκριτικά με το βάρος τους (weight to strength ratio), υψηλή ακαμψία, υψηλές αντοχές στις καταπονήσεις, αντοχή στην διάβρωση, διαχειρισιμότητα – μορφοποίηση, προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες και χαμηλή θερμική διαστολή [4].

Από οικονομικής πλευράς και ασφάλειας όμως, υπάρχουν κάποιες προκλήσεις για την βιομηχανία των συνθέτων όπως:

- η μείωση του κόστους των πρώτων υλών αλλά και της κατασκευής τους,
- η εγγυημένη ποιότητα παρασκευής,
- η αποτροπή των ζημιών εν ώρα λειτουργίας,
- η ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνικών σύνδεσης,
- ο σχεδιασμός αξιόπιστων κανόνων σχεδίασης, και
- η βελτίωση των τεχνικών συντήρησης και επισκευής [5,6].

Έτσι για να υπερνικηθούν αυτές οι προκλήσεις, η έρευνα και η ανάπτυξη στα σύνθετα υλικά έχει αυξηθεί ιδιαίτερα τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και βιομηχανικό επίπεδο.

Παρόλα αυτά, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης προέκυψε ότι ελάχιστες εργασίες ασχολούνται με την συντήρηση των σύνθετων υλικών και πόσο μάλλον με την μέτρηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων πριν και μετά της επισκευής. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε και η ανάλυση αυτού το θέματος.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### Νεολάκη

Η φαινολική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι ρητίνη νεολάκης η οποία κατασκευάστηκε στο εργαστήριο μέσω σταδιακού πολυμερισμού μεταξύ φαινόλης και φορμαλδεΐδης παρουσία οξέος με την φορμαλδεΐδη να βρίσκεται σε υποστοιχειομετρική αναλογία, ενώ σκληρύνθηκε με την προσθήκη εξαμεθυλενοτετραμίνης (HEXA) σε αναλογία 7:2.

Για την παραγωγή νεολάκης ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται διαδοχικά με φαινόλη – φορμαλδεΐδη και οξαλικό οξύ. Στη συνέχεια, τίθεται σε λειτουργία το σύστημα ανάδευσης και θέρμανσης (η μέγιστη θερμοκρασία ρυθμίζεται στους 130 - 140 °C). Μόλις η θερμοκρασία του αντιδρώντος μίγματος φτάσει τους 130 °C (περίπου σε 45 min), ξεκινά ο πολυμερισμός, ο οποίος συνεχίζεται σε αυτή τη θερμοκρασία και για 1,5 ώρα. Μετά το πέρας της 1,5 ώρας, η θέρμανση διακόπτεται, προστίθενται αποσταγμένο νερό και το σύστημα αφήνεται να ψυχθεί για 10 min προς πλήρη διαχωρισμό των φάσεων. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει περίπου στους 50 °C, το όλο σύστημα αποσυνδέεται και αποχύνεται η διαχωρισθείσα υδατινή φάση. Η εναπομένουσα φάση αποχύνεται σε φόρμα αλουμινίου και ξηραίνεται στους 150 °C μέχρι σταθερού βάρους για περίπου 20 min.

Κατά την απόψυξή της στερεοποιείται και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως μήτρα στα σύνθετα υλικά αρχικά λειοτριβείται με την χρήση μεταλλικού γουδιού (σχήμα 1) και στην συνέχεια περνάει από κόσκινο (κόκκοι < 300 μm) (σχήμα 2) έτσι ώστε η κοκομετρία να μην έχει μεγάλο εύρος διακύμανσης.



Σχήμα 1. Λειοτριβίση νεολάκης



Σχήμα 2. Κόσκινο με νεολάκη

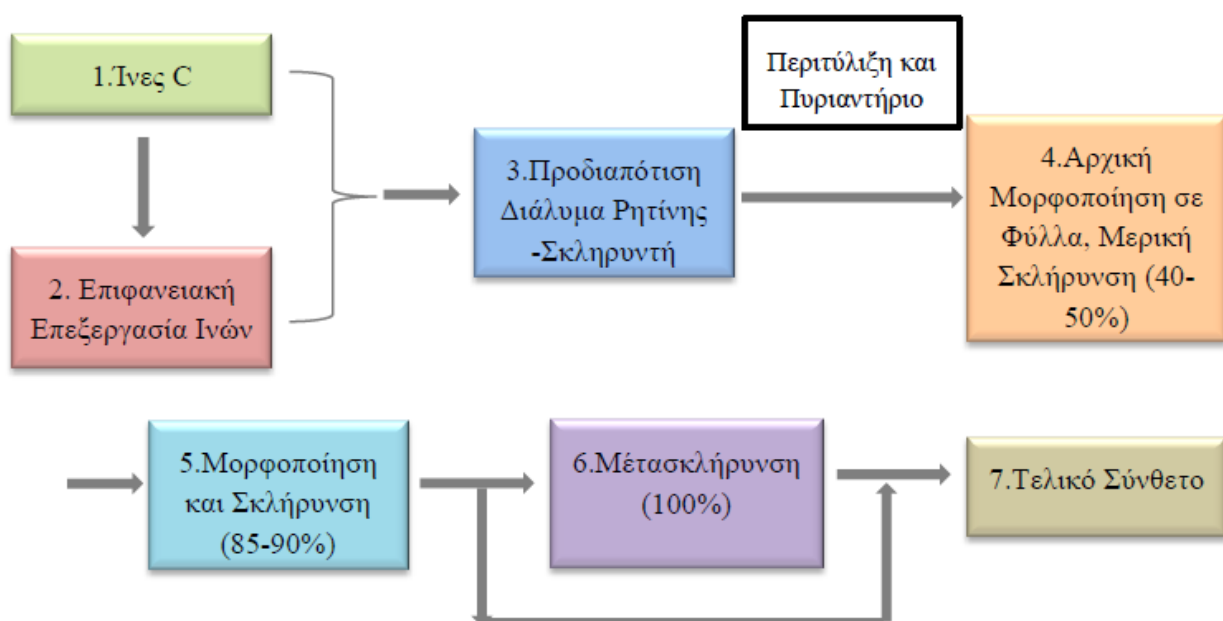
### Εποξειδική ρητίνη

Η εποξειδική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν του εμπορίου της εταιρείας NEOTEX και πιο συγκεκριμένα η EPOXOL 2004 A FLUID με σκληρυντή τον EPOXOL 2004 B FAST σε αναλογία 100:18 κ.β.

### Κατασκευή σύνθετου υλικού

Για να κατασκευαστούν σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα. Αρχικά οι ίνες επεξεργάζονται επιφανειακά με την εισαγωγή τους στο πυριαντήριο κάνοντας έτσι την επιφάνειά τους καταλληλότερη για την καλύτερη πρόσφυση της ίνας με την ρητίνη κατά την οποία θα προδιαποτιστεί στο επόμενο στάδιο. Στην συνέχεια έχουμε την μορφοποίηση των ινών σε φύλλα και την μερική τους σκλήρυνση, ενώ μετά από το στάδιο αυτό έχουμε την τελική μορφοποίηση του σύνθετου υλικού όπου πραγματοποιείται μέσω της σταδιακής τοποθέτησης των στρωμάτων ινών με ενδιάμεση προσθήκη ρητίνης και την τοποθέτησή τους σε θερμοπρέσα. Τέλος με την παραμονή όλων των δοκιμίων στο πυριαντήριο και για μεγάλο σχετικά διάστημα επιτεύχθηκε και η μετασκλήρυνσή τους.

Στο σχήμα 3 φαίνονται οι φάσεις παραγωγής σύνθετου υλικού ινών άνθρακα – θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης με βάση την μέθοδο της προδιαπότισης.



Σχήμα 3. Φάσεις παραγωγής σύνθετου υλικού ινών άνθρακα με την μέθοδο της προδιαπότισης

### Επισκευή σύνθετων υλικών

Για την επιτυχή ολοκλήρωση του πειράματος, από το σύνολο των δοκιμών που κατασκευάστηκαν τα περισσότερα από αυτά καταπονήθηκαν με διάφορους τρόπους. Δημιουργήθηκαν δηλαδή σπασίματα στην μήτρα ούτως ώστε να απογυμνωθούν οι ίνες. Οι τρόποι κατά τους οποίους επιτεύχθηκαν οι εκδορές αυτές ήταν διάφοροι. Σε μερικά με την χρήση γυαλόχαρτου, σε άλλα με ελαφριά χτυπήματα της μήτρας με την μύτη κατσαβιδιού και υποβοήθηση από σφυρί, ενώ σε άλλα αφαιρέθηκε ρητίνη με την χρήση αιχμηρού κόπτη.

Ο λόγος για τον οποίο έγινε αυτό είναι για να αποδυναμωθεί το δοκίμιο του σύνθετου υλικού και να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα και με περισσότερους τρόπους οι καταπονήσεις που ένα υλικό θα μπορούσε να δεχθεί κατά την χρήση του και την πάροδο του χρόνου. Σημειώνεται πως σε καμία περίπτωση οι ίνες του σύνθετου υλικού δεν τραυματίστηκαν, παρά μόνο η μήτρα.

Το επόμενο βήμα ήταν η επισκευή των δοκιμών (σχήμα 4-7). Στο στάδιο αυτό τα δοκίμια της εποξειδικής ρητίνης με αυτά της νεολάκης χρειάστηκαν διαφορετική προσέγγιση και αυτό γιατί η εποξειδική είναι ρευστή, ενώ η νεολάκη σε μορφή κόκκων.



**Σχήμα 4.** Σημείο σε δοκίμιο σύνθετου υλικού εποξειδικής ρητίνης πριν την επισκευή



**Σχήμα 5.** Το ίδιο ακριβώς σημείο του σύνθετου υλικού εποξειδικής ρητίνης μετά την επισκευή



**Σχήμα 6.** Σημείο σε σύνθετο υλικό νεολάκης πριν την επισκευή



**Σχήμα 7.** Το ίδιο ακριβώς σημείο στο σύνθετο υλικό νεολάκης μετά την επισκευή

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για τις δοκιμές σε κάμψη και διάτμηση χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό δυναμόμετρο, το οποίο με την άσκηση πίεσης μετρά σε αναλογική ένδειξη την προκύπτουσα παραμόρφωση δηλαδή το βέλος κάμψης. Σύμφωνα με το δυναμόμετρο αυτό (ή αλλιώς επιμηκυσιόμετρο) και τον μέσο όρο των συνολικών μετρήσεων που πάρθηκαν λαμβάνουμε τον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 1.** Μετρήσεις αντοχών σε κάμψη και διάτμηση των δοκιμών σε MPa

Κωδικός Δοκιμίου	Κάμψη (MPa)	Διάτμηση (MPa)
Αρχικό δοκίμιο Νεολάκης	366.62	15.69
Τραυματισμένο δοκίμιο Νεολάκης	315.28	12.29
Επισκευασμένο δοκίμιο Νεολάκης	335.82	14.33
Αρχικό δοκίμιο Εποξειδικής	371.76	17.27
Τραυματισμένο δοκίμιο Εποξειδικής	315.82	12.07
Επισκευασμένο δοκίμιο Εποξειδικής	325.55	13.20

Σημειώνεται πως η κάμψη τριών σημείων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με βάση το Din-53452, ενώ οι διαστάσεις των δοκιμών ήταν 21cm×1cm×0.3cm με απόσταση των σημείων στηρίξεως να είναι τα 10cm. Ενώ η μέτρηση της διατμητικής αντοχής έγινε με βάση του πειράματος κάμψεως αλλά με ελαττωμένη απόσταση των σημείων στηρίξεως (15mm), σύμφωνα με το πρότυπο ASTN-NORM D 2344-65T, ενώ οι διαστάσεις των δοκιμών ήταν 21cm×1.7cm×0.3cm.

Με βάση τον πίνακα 1 και τις πληροφορίες που λαμβάνονται από αυτόν, είναι εύκολο να βρεθεί ποσοστιαία πόση είναι η μείωση των αντοχών στο δοκίμια, αλλά και πόση είναι η ποσοστιαία αύξηση από το τραυματισμένο δοκίμιο στο επισκευασμένο. Εκτός αυτών μέσω του πίνακα 1 βγαίνουν κάποια συμπεράσματα αναφορικά με τις τιμές των αντοχών. Και στις τέσσερις περιπτώσεις είναι εμφανές, αλλά και αναμενόμενο, πως κατά την επισκευή των δοκιμών οι αντοχές τους βελτιώθηκαν αλλά όχι τόσο ώστε να ξεπεράσουν τις αρχικές τους αντοχές. Έτσι οι τιμές των αντοχών όλων των επισκευασμένων δοκιμών κυμαίνονται ανάμεσα σε αυτές του αρχικού και του τραυματισμένου.

**Πίνακας 2.** Ποσοστιαίες μεταβολές δοκιμών

Κατάσταση δοκιμών	Νεολάκη		Εποξειδική	
	Κάμψη	Διάτμηση	Κάμψη	Διάτμηση
Από αρχικό σε τραυματισμένο	-14%	-21,6%	-15,2%	-30,1%
Από τραυματισμένο σε επισκευασμένο	+6,5%	+16,6%	+3,2%	+9,3%
Από αρχικό σε επισκευασμένο	-8,4%	-8,6%	-12,4%	-23,5%

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα είναι εύκολο να διαπιστωθεί πως την καλύτερη "ανάκαμψη" κατά την επισκευή την είχαν τα δοκίμια της νεολάκης (το θετικό πρόσημο υποδηλώνει αύξηση αντοχών, ενώ το αρνητικό πτώση). Ποσοστιαία φαίνεται πως κατά την μέτρηση των αντοχών κάμψης από το τραυματισμένο δοκίμιο στο επισκευασμένο υπήρξε αύξηση αντοχών κατά 6.5%, ενώ στην μέτρηση αντοχών διάτμησης 16.6%, έναντι 3.2% και 9.3% αντίστοιχα για την εποξειδική ρητίνη. Και στις δύο περιπτώσεις το σύνθετο υλικό με μήτρα νεολάκη είχε σχεδόν διπλάσια αύξηση των αντοχών του συγκριτικά με αυτό της εποξειδικής.

Ένας λόγος που θα μπορούσε να επηρεάσει αυτή την συμπεριφορά ανάμεσα σε αυτά τα δύο είδη δοκιμών είναι ο τρόπος κατά τον οποίο έγινε τοπικά η επισκευή. Στα δοκίμια νεολάκης και αφού πρώτα τοποθετήθηκε κατάλληλη ποσότητα νεολάκης στο επισκευαζόμενο σημείο, χρησιμοποιήθηκε τοπικά και βάρος επάνω σε αυτό, εν αντιθέσει με τον τρόπο επισκευής των δοκιμών εποξειδικής που αρκέστηκε απλά στην έγχυση ρητίνης τοπικά πάνω στο σημείο επισκευής.

Επίσης μία παρατήρηση όσο αφορά τα δοκίμια της εποξειδικής ρητίνης κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι πως κάθε φορά παρουσίαζαν ψαθυρή θραύση, έναντι των δοκιμών νεολάκης στα οποία έσπαγε η μήτρα, αλλά το μέσο ενίσχυσης, οι ίνες δηλαδή άνθρακα, κρατούσαν το δοκίμιο ακέραιο. Η διαπίστωση αυτή μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμη σε διάφορες εφαρμογές στις οποίες τα σύνθετα υλικά καταπονούνται αρκετά και παρόλο που μπορεί να αστοχήσουν, θα ήταν προτιμότερο να μην έχουν ψαθυρή θραύση ούτως ώστε να υπάρξει ένας χρόνος αντίδρασης.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διαπιστώθηκε λοιπόν πως:

1. Καθόλη την διάρκεια της παρασκευής των σύνθετων υλικών θα πρέπει οι θερμοκρασίες και οι χρόνοι θέρμανσης να τηρούνται προς αποφυγή προβλήματος στο υλικό. Επίσης πολύ σημαντική είναι και η σωστή επιφανειακή επεξεργασία και διαβροχή των ινών για την καλύτερη πρόσφυση με την ρητίνη στο σύνθετο υλικό.
2. Συγκριτικά μεταξύ των σύνθετων υλικών εποξειδικής ρητίνης και νεολάκης αυτά με τις μεγαλύτερες τιμές αντοχών ήταν της εποξειδικής. Παρόλα αυτά της εποξειδικής ήταν ψαθυρά κατά την θραύση τους, πράγμα που ανάλογα με την εφαρμογή που τυχόν προορίζονται να μην προτιμάται.
3. Τα σύνθετα υλικά με μήτρα νεολάκη είχαν αισθητά μεγαλύτερη βελτίωση αντοχών κατά την επισκευή τους, συγκριτικά με αυτή των σύνθετων υλικών εποξειδικής.
4. Έγινε επίσης σαφές πως κατά την δημιουργία – επισκευή ενός υλικού πολυμερικής μήτρας πολύ σημαντικό ρόλο κατά την σκλήρυνση παίζει και η ταυτόχρονη άσκηση πίεσης. Είναι πιθανό ο λόγος για τον οποίο τα δοκίμια εποξειδικής δεν είχαν και τόσο μεγάλη αύξηση αντοχών να ήταν αυτός. Ίσως λοιπόν να χρειαζόταν μία τεχνική τύπου vacuum bagging κατά την οποία θα μπορούσε και η θερμοκρασία να αυξηθεί, αλλά και να υπάρξει ταυτόχρονα η επιθυμητή πίεση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mangalgi PD. Composite materials for aerospace applications. Bulletin of Materials Science (1999) 657-664.
- [2] Soutis C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. Materials Science and Engineering (2005) 171–176.
- [3] [Roger M. Groves, Comprehensive Composite Materials II](#), Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (2017) 300-311.
- [4] Noor AK, Venneri SL, Paul DB, Hopkins MA. Structures technology for future aerospace systems. Computers & Structures (2000) 507–519.
- [5] Bannister M. Challenges for composites into the next millennium -a reinforcement perspective. Composites Part A Applied Science and Manufacturing (2001) 901–910.
- [6] Barbero EJ. Introduction to composite materials design. Boca Raton: CRC Press (2011).