



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΝΑΣ / ΜΗΤΡΑΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ
ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΝΔΡΕΣΑΚΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

A.M.: 51117045

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΔΡΑΓΑΤΟΓΙΑΝΝΗΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

«Προσομοίωση συστήματος ίνας / μήτρας και μελέτη θερμομηχανικής συμπεριφοράς»

Συγγραφέας

Κωνσταντίνος Π. Ανδρεσάκης (Α.Μ.: 51117045)

Επιβλέπων

Δρ. Δημήτριος Α. Δραγατογιάννης,

Ημερομηνία εξέτασης

27/10/2020

Εξεταστική Επιτροπή

Δημήτριος Αθ. Δραγατογιάννης

Δρ. Ακαδημαϊκός Υπότροφος
ΠΑ.ΔΑ

Πολίτης Κωνσταντίνος

Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

Θεοδουλίδης Αλέξανδρος

Επικ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

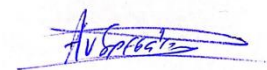
Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κατώθι υπογεγραμμένος Ανδρεσάκης Κωνσταντίνος του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 51117045 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι :

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολο τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επιπλέον, βεβαιώνω πως αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου όσο και του ιδρύματος.

Παράβαση των ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ανδρεσάκης Κωνσταντίνος

Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης του κύκλου σπουδών μου στο τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Οφείλω να ευχαριστήσω εγκάρδια τον Καθηγητή και Επιβλέπων της εργασίας αυτής, κο. Δημήτριο Δραγατογιάννη για την πολύτιμη βοήθεια του και την διαρκή καθοδήγησή του κατά την περίοδο εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τμήματος των Ναυπηγών Μηχανικών για τις υψηλού επιπέδου γνώσεις που αποκόμισα την περίοδο των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συνεχή υποστήριξη και αντοχή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Ανδρεσάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των θερμικών φορτίων στη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ίνες άνθρακα. Μέσω συνδυασμού θερμικού φορτίου και κατάλληλης εφελκυστικής δύναμης πραγματοποιείται εκρίζωση της ίνας (Fiber pull-out) λόγω του διαχωρισμού (Debonding) ίνας/μήτρας στη διεπιφάνεια. Το τρισδιάστατο μοντέλο προσομοιώθηκε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο είναι ένα δοκίμιο κυλινδρικής γεωμετρίας ίνας/μήτρας.

Οι παράμετροι οι οποίες μελετήθηκαν είναι τα υλικά της μήτρας (matrix), της ίνας (fiber), οι μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας (interface), η γεωμετρία της ίνας, τα ογκομετρικά κλάσματα της μήτρας, διαφορετικό μήκος δοκιμίου και της ίνας και τέλος το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης.

Σε διαφορετικές θερμοκρασίες από 30°C έως 120°C και με βήμα 30°C μελετήθηκε η εκρίζωση της ίνας από τη μήτρα. Έπειτα, στους πιο εύθραυστους συνδυασμούς αυτών, δηλαδή στις ενεργειακά βέλτιστες λύσεις, έγινε μελέτη για διαφορετική ακτίνα της ίνας και διαφορετικό μήκος του δοκιμίου.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS Student.

Λέξεις κλειδιά : Σύνθετα Υλικά, Διεπιφάνεια, Ίνα, Μήτρα, Αποκόλληση, Δυσθραυστότητα, Εκρίζωση, Διακριτοποίηση.

Abstract

The aim of this thesis is to study the effects of thermal loads on the interface of carbon fiber reinforced composite material. Through a combination of thermal load and appropriate tensile force, fiber pull-out occurs due to the fiber/matrix debonding at the interface. The 3D model was simulated by the finite element method. Which is a cylindrical fiber/matrix geometry specimen.

The parameters that were studied are the materials of the matrix, the fiber, the mechanical properties of the interface, the geometry of the fiber, the volumetric fractions of the matrix, different length of the sample and the fiber and finally the diagram Force-Displacement.

At different temperatures from 30°C to 120°C and with a step of 30°C, the fiber pull-out was studied. Then, at the most fragile combinations of these, i.e. at the energetically optimal solutions, a study was made for different radius of the fiber and different length of the specimen.

In this thesis the software ANSYS Student was used.

Key Words : Composite Materials, Interface, Fiber, Matrix, Debonding, Unbreakability, Pull-Out, Discretization.

Περιεχόμενα

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας	4
Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Ευρετήριο Διαγραμμάτων.....	11
Ευρετήριο Πινάκων	15
Ευρετήριο Εικόνων.....	16
Συνομογραφίες	17
ΕΝΟΤΗΤΑ 1 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	18
1.1 Πείραμα Εκρίζωσης Ίνας (Fiber Pullout Test).....	18
1.2 Ιστορία Δομικής Ανάλυσης.....	19
1.3 Πεπερασμένα Στοιχεία.....	21
1.4 Βασικές έννοιες της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	22
1.5 Στάδια Επίλυσης της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	25
1.6 Ίδρυση Εταιρίας ANSYS	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	30
2.1 Σύνθετα Υλικά.....	30
2.2 Ίνες Άνθρακα	31
2.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία	32
2.3.1 Υλικά Μήτρας	32
2.3.2 Υλικά Ίνας	33
2.4 Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	34
2.5 Ρυθμός Απελευθέρωσης Ενέργειας (Energy Release Rate).....	35
2.6 Κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Stress Failure Criterion).....	37
2.7 Κριτήριο Benzeggagh Kennane (B-K).....	40
2.8 Modified Criterion Benzeggagh Kennane (Modified B-K)	41
2.9 Virtual Crack Closure Technique (VCCT).....	42
2.10 Παράγοντας Έντασης Τάσης (K)	44
ΕΝΟΤΗΤΑ 2 – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	46
1.1 Διαδικασία Δημιουργίας Γεωμετρικού Μοντέλου	46
1.2 Διαδικασία Προγραμματισμού ANSYS Workbench.	50
1.3 Διακριτοποίηση (Mesh) Γεωμετρικού Μοντέλου	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	60
2.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για Διαφορετικές Θερμοκρασίες.....	60
Εισαγωγή	60
Σχεδιασμός Προσομοίωσης	60
2.1.1 Matrix : PS – Fiber : T800S (294 GPa)	61
2.1.2 Matrix : PS – Fiber : T300 (230 GPa)	67
2.1.3 Matrix : PS – Fiber : T700S (230 GPa)	73
2.1.4 Matrix : ABS – Fiber : T800S (294 GPa).....	79
2.1.5 Matrix : ABS – Fiber : T300 (230 GPa)	85
2.1.6 Matrix : ABS – Fiber : T700S (230 GPa).....	91
Συμπεράσματα	97
2.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για διαφορετικές Ακτίνες Ίνας.....	98
Εισαγωγή	98
Σχεδιασμός Προσομοίωσης	98
2.2.1 Matrix : PS – Fiber : T800S (294 GPa)	99
2.2.2 Matrix : PS – Fiber : T300 (230 GPa)	104
2.2.3 Matrix : PS – Fiber : T700S (230 GPa)	109
2.2.4 Matrix : ABS – Fiber : T800S (294 GPa).....	114
2.2.5 Matrix : ABS – Fiber : T300 (230 GPa)	119
2.2.6 Matrix : ABS – Fiber : T700S (230 GPa).....	124
Συμπεράσματα	129
2.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για διαφορετικά Μήκη Ίνας.....	130
Εισαγωγή	130
Σχεδιασμός Προσομοίωσης	130
2.3.1 Matrix : PS – Fiber : T800S (294 GPa)	131
2.3.2 Matrix : PS – Fiber : T300 (230 GPa)	136
2.3.3 Matrix : PS – Fiber : T700S (230 GPa)	141
2.3.4 Matrix : ABS – Fiber : T800S (294 GPa).....	146
2.3.5 Matrix : ABS – Fiber : T300 (230 GPa)	151
2.3.6 Matrix : ABS – Fiber : T700S (230 GPa).....	156
Συμπεράσματα	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	162
3.1 Συμπεράσματα/Προτάσεις	162
Βιβλιογραφία	163

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 : PS-T800S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: PS-T800S / ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 : PS-T800S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 : PC-CF / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6 : PC-CF / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7 : PS-T800S / ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΙΜΗ ERR ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8 : PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9 : PS-T800S / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10 : PS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	66
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 : PS-T300 / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14 : PS-T300 / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15 : PS-T300 / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16 : PS-T300 / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17 : PS-T300 / ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΙΜΗ ERR ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	70
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	70
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19 : PS-T300 / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	71
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20 : PS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	72
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21 : PS-T700S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	74
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	74
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24 : PS-T700S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 25 : PS-T700S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26 : PS-T700S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27 : PS-T700S / ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΙΜΗ ERR ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	76
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	76
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29 : PS-T700S / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	77
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 30 : PS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	78
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 31 : ABS-T800S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	79
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 32 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	80
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 33 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	80
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 34 : ABS-T800S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	81
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 35 : ABS-T800S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	81
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 36 : ABS-T800S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	81
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 37 : ABS-T800S / ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΙΜΗ ERR ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 38 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 39 : ABS-T800S / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	83
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 40 : ABS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	84
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 41 : ABS-T300 / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	85

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 42 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.....	86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 43 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 44 : ABS-T300 / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 45 : ABS-T300 / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 46 : ABS-T300 / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 47 : ABS-T300 / ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΙΜΗ ERR ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	88
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 48 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	88
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 49 : ABS-T300 / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	89
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 50 : ABS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	90
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 51 : ABS-T700S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	91
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 52 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.....	92
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 53 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ. ...	92
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 54 : ABS-T700S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 55 : ABS-T700S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 56 : ABS-T700S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 57 : ABS-T700S / ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΙΜΗ ERR ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	94
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 58 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	94
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 59 : ABS-T700S / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	95
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 60 : ABS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	96
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 61 : PS-T800S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	99
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 62 : PS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	99
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 63 : PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	100
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 64 : PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	100
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 65 : PS-T800S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	101
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 66 : PS-T800S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	101
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 67 : PS-T800S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	101
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 68 : PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	102
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 69 : PS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	103
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 70 : PS-T300 / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	104
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 71 : PS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	104
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 72 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	105
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 73 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	105
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 74 : PS-T300 / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	106
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 75 : PS-T300 / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	106
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 76 : PS-T300 / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	106
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 77 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	107
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 78 : PS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	108
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 79 : PS-T700S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	109
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 80 : PS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	109
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 81 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	110
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 82 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	110
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 83 : PS-T700S / ERR MODE-I ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	111
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 84 : PS-T700S / ERR MODE-II ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	111
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 85 : PS-T700S / ERR MODE-III ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	111

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 86 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	112
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 87 : PS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	113
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 88 : ABS-T800S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΊΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	114
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 89 : ABS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	114
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 90 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	115
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 91 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ. ..	115
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 92 : ABS-T800S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	116
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 93 : ABS-T800S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	116
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 94 : ABS-T800S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	116
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 95 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	117
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 96 : ABS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	118
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 97 : ABS-T300 / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ.	119
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 98 : ABS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	119
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 99 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	120
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 100 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ. ..	120
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 101 : ABS-T300 / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	121
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 102 : ABS-T300 / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	121
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 103 : ABS-T300 / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	121
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 104 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	122
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 105 : ABS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	123
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 106 : ABS-T700S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ.	124
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 107 : ABS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	124
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 108 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE.	125
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 109 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	125
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 110 : ABS-T700S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	126
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 111 : ABS-T700S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	126
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 112 : ABS-T700S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	126
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 113 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	127
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 114 : ABS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.....	128
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 115 : PS-T800S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	131
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 116 : PS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	131
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 117 : PS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΗΚΟΣ.	132
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 118 : PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	132
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 119 : PS-T800S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	133
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 120 : PS-T800S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	133
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 121 : PS-T800S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	133
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 122 : PS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	134
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 123 : PS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	135
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 124 : PS-T300 / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	136
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 125 : PS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	136
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 126 : PS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΗΚΟΣ.....	137
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 127 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	137
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 128 : PS-T300 / ERR MODE-I ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.	138

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 129 : PS-T300 / ERR MODE-II ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	138
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 130 : PS-T300 / ERR MODE-III ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	138
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 131 : PS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	139
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 132 : PS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	140
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 133 : PS-T700S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΟΣ.....	141
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 134 : PS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	141
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 135 : PS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΗΚΟΣ.....	142
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 136 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	142
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 137 : PS-T700S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	143
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 138 : PS-T700S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	143
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 139 : PS-T700S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	143
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 140 : PS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	144
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 141 : PS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	145
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 142 : ABS-T800S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	146
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 143 : ABS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	146
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 144 : ABS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΗΚΟΣ.....	147
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 145 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	147
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 146 : ABS-T800S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	148
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 147 : ABS-T800S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	148
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 148 : ABS-T800S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	148
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 149 : ABS-T800S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	149
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 150 : ABS-T800S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	150
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 151 : ABS-T300 / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	151
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 152 : ABS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	151
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 153 : ABS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΗΚΟΣ.....	152
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 154 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	152
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 155 : ABS-T300 / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	153
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 156 : ABS-T300 / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	153
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 157 : ABS-T300 / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	153
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 158 : ABS-T300 / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	154
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 159 : ABS-T300 / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	155
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 160 : ABS-T700S / ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	156
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 161 : ABS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΙΝΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	156
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 162 : ABS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΗΚΟΣ.....	157
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 163 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ QUADRATIC FAILURE ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	157
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 164 : ABS-T700S / ERR GI ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	158
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 165 : ABS-T700S / ERR GII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	158
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 166 : ABS-T700S / ERR GIII ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	158
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 167 : ABS-T700S / ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ Β-Κ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	159
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 168 : ABS-T700S / ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	160

Ευρετήριο Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : ΥΛΙΚΑ ΜΗΤΡΑΣ.....	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : ΥΛΙΚΑ ΙΝΑΣ.....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 : ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 : ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΚΡΙΖΩΣΗΣ ΊΝΑΣ Fd.....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 : ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESH).....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 : ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 : PS-T800S/ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 9 : PS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ...	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 10 : PS-T300/ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 11 : PS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ...	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 12 : PS-T700S / ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 13 : PS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 14 : ABS-T800S/ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 15 : ABS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 16 : ABS-T300/ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 17 : ABS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 18 : ABS-T700S/ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 19 : ABS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.	96
ΠΙΝΑΚΑΣ 20 : PS-T800S /ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 21 : PS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 22 : PS-T300 /ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 23 : PS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 24 : PS-T700S /ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 25 : PS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	113
ΠΙΝΑΚΑΣ 26 : ABS-T800S /ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ...	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 27 : ABS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 28 : ABS-T300 /ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 29 : ABS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	123
ΠΙΝΑΚΑΣ 30 : ABS-T700S /ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ...	127
ΠΙΝΑΚΑΣ 31 : ABS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ ΙΝΑΣ.	128
ΠΙΝΑΚΑΣ 32 : PS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	135
ΠΙΝΑΚΑΣ 33 : PS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	140
ΠΙΝΑΚΑΣ 34 : PS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	145
ΠΙΝΑΚΑΣ 35 : ABS-T800S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	150
ΠΙΝΑΚΑΣ 36 : ABS-T300 / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	155
ΠΙΝΑΚΑΣ 37 : ABS-T700S / ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ T _s ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΗΚΗ.....	160

Ευρετήριο Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1 : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΡΙΖΩΣΗΣ ΙΝΑΣ. (ARAIN, MINGXUE, JIANYONG, & ZHANG, 2019)	18
ΕΙΚΟΝΑ 2 : ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΡΑΒΔΟΥ.	23
ΕΙΚΟΝΑ 3 : ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ (Α) ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΑ, (Β) ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΚΑΙ (C) ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ. (ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, 2017)	26
ΕΙΚΟΝΑ 4 : ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. (ΦΡΑΓΚΙΣΚΟΣ, 2018).....	30
ΕΙΚΟΝΑ 5 : ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ.	31
ΕΙΚΟΝΑ 6 : ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΚΑΤΑ ΜΟΔΕ-I, ΙΙ, ΙΙΙ. (TWISP, 2008).....	35
ΕΙΚΟΝΑ 7 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΕΔΙΟ ΟΡΘΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ. (ΟΓΙΗΑΡΑ & ΚΟΥΑΝΑΓΙ, 2010)	37
ΕΙΚΟΝΑ 8 : ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ BENZEGGAGH KENNANE. (WANG, ZHANG , DUAN, & MENG, 2018)	38
ΕΙΚΟΝΑ 9 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΜΙΑ ΡΩΓΜΗ. (ΦΑΤΗ, 2019)	43
ΕΙΚΟΝΑ 10 : ΠΟΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΣΤΟ ΑΚΡΟ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.	45
ΕΙΚΟΝΑ 11 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS.....	46
ΕΙΚΟΝΑ 12 : ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΡΙΖΩΣΗ ΤΗΣ ΙΝΑΣ.	47
ΕΙΚΟΝΑ 13 : ΠΑΚΤΩΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΩ ΜΕΡΟΥΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 14 : ΔΥΝΑΜΗ ΕΚΡΙΖΩΣΗΣ ΣΤΟ ΑΚΡΟ ΤΗΣ ΙΝΑΣ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 15 : ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΜΠΡΟΣΤΙΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.	48
ΕΙΚΟΝΑ 16 : ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 17 : ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 18 : ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.	49
ΕΙΚΟΝΑ 19 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.	50
ΕΙΚΟΝΑ 24 : ΤΙΜΕΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΕΚΡΙΖΩΣΗΣ ΓΙΑ ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ ABS.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 25 : ΤΙΜΕΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΕΚΡΙΖΩΣΗΣ ΓΙΑ ΥΛΙΚΟ ΜΗΤΡΑΣ PS.	53
ΕΙΚΟΝΑ 26 : ΕΠΙΛΟΓΗ SOLVE ΣΤΟ STEADY STATE THERMAL.	53
ΕΙΚΟΝΑ 27 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ STEADY STATE THERMAL ΣΤΟ STATIC STRUCTURAL.	54
ΕΙΚΟΝΑ 28 : ΕΠΙΛΟΓΗ SOLVE ΣΤΟ STATIC STRUCTURAL.	54
ΕΙΚΟΝΑ 29 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ.....	55
ΕΙΚΟΝΑ 30 : ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (DISCRETIZATION) ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	55
ΕΙΚΟΝΑ 31 : ΛΟΓΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (ASPECT RATIO) ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	56
ΕΙΚΟΝΑ 32 : ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΠΛΗΘΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΛΟΓΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (ASPECT RATIO).....	57
ΕΙΚΟΝΑ 33 : ΛΟΞΟΤΗΤΑ (SKEWNESS) ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 34 : ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΠΛΗΘΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΛΟΞΟΤΗΤΑΣ (SKEWNESS).....	58
ΕΙΚΟΝΑ 35 : ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ELEMENT QUALITY) ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	58
ΕΙΚΟΝΑ 36 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΛΗΘΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (ELEMENT QUALITY).....	59
ΕΙΚΟΝΑ 37 : ΟΠΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ 120oC ΓΙΑ PS-T800S.	61
ΕΙΚΟΝΑ 38 : ΟΠΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ 120oC ΓΙΑ PS-T300.....	67
ΕΙΚΟΝΑ 39 : ΟΠΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ 120oC ΓΙΑ PS-T700S.	73
ΕΙΚΟΝΑ 40 : ΟΠΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ 120oC ΓΙΑ ABS-T800S.	79
ΕΙΚΟΝΑ 41 : ΟΠΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ 120oC ΓΙΑ ABS-T300.	85
ΕΙΚΟΝΑ 42 : ΟΠΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ 120oC ΓΙΑ ABS-T700S.	91

Συντομογραφίες

FEA:	Finite Element Analysis
FEM:	Finite Element Method
CAD:	Computer Aided Design
CAE:	Computer Aided Engineering
PS:	Polystyrene
ABS:	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ERR:	Energy Release Rate
VCCT:	Virtual Crack Closure Technik
SIF:	Stress Intensity Factor
B-K:	Benzeggagh Kennane
S.F:	Safety Factor
GI:	Energy Release Rate / Mode-I
GII:	Energy Release Rate / Mode-II
GIII:	Energy Release Rate / Mode-III

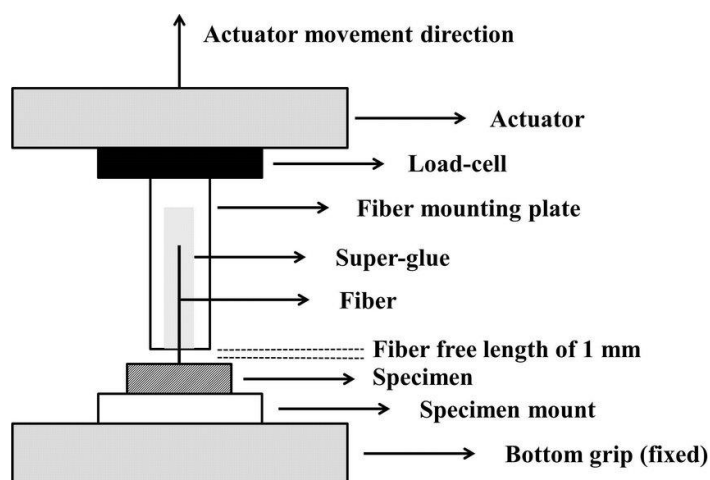
1.1 Πείραμα Εκρίζωσης Ίνας (Fiber Pullout Test)

Η διαδικασία εκρίζωσης της ίνας από σύνθετο υλικό έχει στόχο τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας του συγκεκριμένου συνδυασμού υλικών. Δηλαδή, σκοπός είναι να φτάσει το υλικό στην αστοχία. Συγκεκριμένα, προκύπτουν οι ιδιότητες της διεπιφάνειας, δηλαδή του μέρους μεταξύ ίνας-μήτρας. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να εξαρτώνται από :

- Τη γεωμετρία ίνας-μήτρας.
- Τις μηχανικές ιδιότητες ίνας-μήτρας.
- Τις συνθήκες θερμοκρασίας.

(Christina Scheffler, 2021)

Ο μηχανισμός πρόκλησης αστοχίας για τη δοκιμή εκρίζωσης της ίνας συνίστατο κυρίως στην αναφορά του πειραματικά παρατηρούμενου μέγιστου φορτίου, βάση των παλαιότερων ερευνητών. Αργότερα, στις ερευνητικές προσπάθειες αναφέρθηκαν η διάδοση της διεπιφανειακής ρωγμής ίνας-μήτρας και ορισμένες παράμετροι έλξης. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μια προσέγγιση μηχανικής θραύσης για την μοντελοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι δυσκολίες που υπήρξαν περιλάμβαναν την μεταχείριση των δειγμάτων και την ικανότητα παρατήρησης των αποτελεσμάτων αστοχίας με επαρκή λεπτομέρεια. (DiFrancia, Ward, & Claus, 1996)



Εικόνα 1 : Μηχανισμός εκρίζωσης ίνας. (Arain, Mingxue, Jianyong, & Zhang, 2019)

1.2 Ιστορία Δομικής Ανάλυσης

Οι πρώτοι υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν για δομική ανάλυση ήταν αναλογικές μηχανές οι οποίες έλυναν σειρές από διαφορικές εξισώσεις. Τέτοιου είδους μηχανήματα κατασκευάζονταν από τα τέλη της δεκαετίας του 1930 και ήταν μηχανικής φύσης, δηλαδή χρησιμοποιούσαν ελατήρια, γρανάζια και άλλες συσκευές. Όμως, στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και σε όλη τη διάρκεια του 1950 οι ηλεκτρονικοί αναλογικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνταν όλο και περισσότερο για την επίλυση μηχανικών προβλημάτων ανάλυσης, κυρίως στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Οι περισσότεροι από αυτούς τους μηχανισμούς είχαν δυσκολία επίλυσης προβλημάτων με περισσότερους από 200 βαθμούς ελευθερίας. Παρά ταύτα, ακόμα και με αυτόν τον περιορισμό, υπήρξαν πολλά προβλήματα με καταπονήσεις ή κραδασμούς τα οποία κατάφεραν να λύσουν με επιτυχία. Ωστόσο, επειδή οι ανάγκες της βιομηχανίας συνεχώς αυξάνονταν, χρειαζόταν κάποια ακόμα καλύτερη τεχνολογία για να προσεγγιστούν καλύτερα οι αναλύσεις αυτές. Η λύση αποδείχθηκε πως ήταν αυτό που γνωρίζουμε και ως σήμερα ως Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis – FEA). Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει την διαίρεση ενός αντικειμένου, όπως ένα μηχανικό μέρος, σε μικρά στοιχεία και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις μεταξύ αυτών των στοιχείων, υπολογίζει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από διάφορες συνθήκες φόρτισης δίνοντας ένα αναλυτικό αποτέλεσμα. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται συχνότερα για την κατασκευή μοντέλων είναι η τοποθέτηση ενός πλέγματος στο σχέδιο το οποίο έχει δημιουργήσει κάποιος και έπειτα χειροκίνητη διαίρεση του αντικειμένου σε διακριτά στοιχεία.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων του μοντέλου, το οποίο οι αναλυτές προσπαθούσαν να διαχωρίσουν όσο το δυνατόν λεπτομερέστερα καθώς είχαν πολύ περιορισμένο χρόνο. Ωστόσο, έπρεπε να έχουν στο μυαλό τους ότι ο χρόνος υπολογισμού μιας λύσης αυξάνεται γεωμετρικά με τον αριθμό των στοιχείων μέσα στο μοντέλο. Για μια αρχική ανάλυση ενός τμήματος με 1000 στοιχεία η όλη διαδικασία θα χρειαζόταν αρκετές εβδομάδες. Πέραν του ζητήματος του χρόνου, μικρά αριθμητικά λάθη ήταν δύσκολο να εντοπιστούν καθώς έλειπαν στοιχεία ή έλειπαν πληροφορίες που καθορίζουν τον τρόπο σύνδεσης κάθε στοιχείου με τα γειτονικά του στοιχεία. Αυτά τα σημεία σύνδεσης αναφέρονται και ως κόμβοι. (Weisberg, 2008)

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1960 ανακαλύφθηκαν υπολογισμοί κατασκευών για φράγματα στην Κίνα από τον *Feng Kang*, που ονόμαζε την μέθοδο πεπερασμένες διαφορές και ήταν βασισμένη στην αρχή της διακύμανσης. Επομένως, έγινε γνωστό πως η μέθοδος αυτή είχε αρχίσει να έχει εφαρμογές και σε άλλους τομείς. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν έχουν το βασικό χαρακτηριστικό το οποίο είναι η διακριτοποίηση ενός συνεχούς τομέα σε ένα σύνολο διακριτών υποτομέων, δηλαδή τα διακριτά στοιχεία.

Η πραγματική ανάπτυξη των πεπερασμένων στοιχείων έγινε τις δεκαετίες του 1960 και 1970 από τα πειράματα του *J.H Argyris* με συναδέλφους του στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, του *RW Clough* με συναδέλφους στο UC Berkley, του *O.C. Zienkiewicz* με τους συναδέλφους του *Ernest Hinton*, *Bruce Irons*, και άλλοι στο Πανεπιστήμιο του Swansea, ο *Philippe G. Ciarlet* στο Πανεπιστήμιο του Παρισιού 6 και ο *Richard Gallagher* με συναδέλφους του στο Πανεπιστήμιο Cornell. Η ανάπτυξη αυτή εκείνη την περίοδο πραγματοποιήθηκε από τα διαθέσιμα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων όπου ήταν ανοικτού κώδικα.

Η NASA πραγματοποίησε την αρχική έκδοση του Nastran, και το Πανεπιστήμιο UC Berkeley έκανε ευρέως διαθέσιμο το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP IV. Στη Νορβηγία ο νηογνώμονας Det Norske Veritas (τόρα γνωστός ως DNV GL) ανέπτυξε το πρόγραμμα Sesam το 1969 το οποίο χρησιμοποιούσε στην ανάλυση των πλοίων. Μια αυστηρή μαθηματική βάση για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρασχέθηκε το 1973 με τη δημοσίευση από τους *William Gilbert Strang* και *George J. Fix*. Από τότε η μέθοδος γενικεύτηκε για την αριθμητική μοντελοποίηση φυσικών συστημάτων σε μια ευρεία ποικιλία επιστημονικών κλάδων μηχανικής, όπως ηλεκτρομαγνητισμός, μεταφορά θερμότητας και δυναμική ρευστών.

(Zienkiewicz, Taylor, & Zhu, 2005)

1.3 Πεπερασμένα Στοιχεία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών ή συνήθων διαφορικών εξισώσεων.

Για προβλήματα που περιλαμβάνουν σύνθετες γεωμετρίες, φορτίσεις και ιδιότητες υλικών είναι δύσκολο να υπάρξει ακριβής αναλυτική μαθηματική λύση γιατί απαιτείται η επίλυση μιας συνήθους ή μερικής διαφορικής εξίσωσης. Παρόλα αυτά, μπορούν να προσεγγιστούν λύσεις εάν χρησιμοποιήσουμε αριθμητικές μεθόδους όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων.

Είναι μια προσεγγιστική μέθοδος, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλων των ειδών τα προβλήματα.

Το μειονέκτημα της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ειδικά στην περίπτωση εφαρμογής της σε σύνθετα μοντέλα. Όμως, η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών τα τελευταία χρόνια έχει καταφέρει να το αντιμετωπίσει. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, όπου ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και την μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η ουσία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στη διαδικασία της μοντελοποίησης ενός σώματος σε ισοδύναμα μικρότερα σώματα συνδεδεμένα μεταξύ τους με κοινά σημεία (κομβικά σημεία) και συνοριακές γραμμές και επιφάνειες, το οποίο ονομάζεται διακριτοποίηση. (Logan, 2011)

Στις επιστήμες του Μηχανικού, μέσα στις οποίες ανήκει και η Ναυπηγική, υπάρχει σημαντική ανάπτυξη των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση γεωμετριών αλλά και για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου (στατική, δυναμική, θερμοδυναμική, ρευστομηχανική, θραυστομηχανική).

Αυτή η ανάπτυξη έχει προκύψει από την δημιουργία εξειδικευμένων πακέτων λογισμικού σε κάθε τομέα της μηχανολογίας, από την αρχική σχεδίαση μέχρι την γραμμή παραγωγής.

Τα πακέτα αυτά χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα πακέτα σχεδίασης με την βοήθεια H/Y – CAD (Computer Aided Design) και τα πακέτα ανάλυσης με την χρήση του H/Y – CAE (Computer Aided Engineering). Αυτές οι δυνατότητες επιτρέπουν στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και να μελετήσει την συμπεριφορά του υπό-μελέτη προϊόντος, ώστε να φτάσει στο στάδιο της παράγωγης με τη βέλτιστη δυνατή ακρίβεια. (Στούρας, 2015)

1.4 Βασικές έννοιες της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

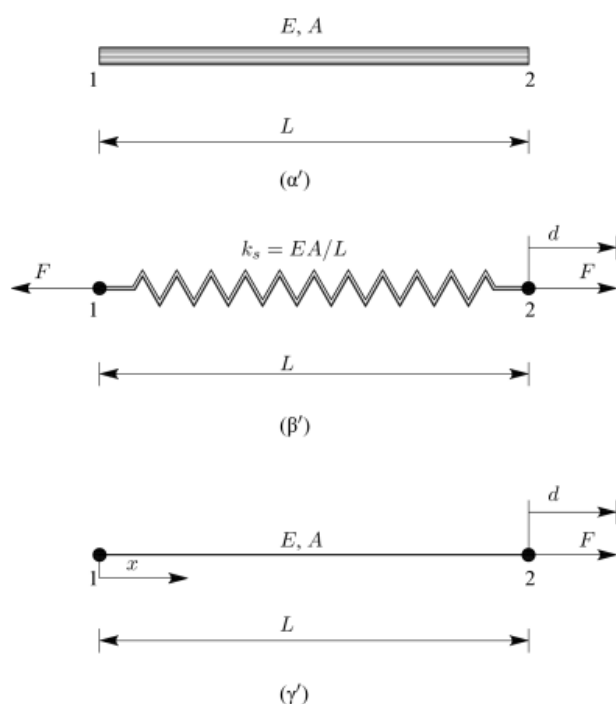
Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται με έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή, στην ουσία της είναι προσομοίωση πλαισίων καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Ωστόσο, σε μια συνεχή κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία συνδέονται κατά μήκος των άκρων τους. Τα τεχνικά αυτά στοιχεία (ή πεπερασμένα στοιχεία) είναι συνήθως τρίγωνα ή τετράπλευρα, και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Προκειμένου να γίνει χρήση της μεθόδου απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις οι παράγωγοί τους. Εάν εμπεριέχονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για *βαθμούς ελευθερίας* αντί για *μετατοπίσεις κόμβων*.

Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. (Καρίδης, 2006)

Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους, δηλαδή, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Επομένως, απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει την συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου. Βασική δομική μονάδα αποτελεί το «στοιχείο» που αναφέρουμε, το οποίο έχει προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Στο πλέγμα το οποίο θα δημιουργηθεί, κάθε κόμβος εκτείνεται προς κάποιον άλλον γειτονικό κόμβο μέσω ενός στοιχείου πλέγματος. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν πως θα συμπεριφερθεί μια κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης. Οι κόμβοι θα τοποθετηθούν με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Σε περιοχές που αναμένουμε μεγαλύτερη τάση θα έχουν και πυκνότερο πλέγμα άρα και μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων. Για παράδειγμα, περιοχές ιδιαίτερης σημασίας είναι αυτές στις οποίες έχει διαπιστωθεί σε πειραματικές μελέτες η παρουσία θραύσης, γωνίες, κενά και περιοχές

υψηλής τάσης. Για να αποδειχτεί επιτυχές το μοντέλο πρέπει η πυκνότητα του πλέγματος να είναι ικανοποιητική, προκειμένου να λυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Εάν το πλέγμα είναι αδρό τότε είναι πιο δύσκολη η επίλυση του προβλήματος. Αντιθέτως, εάν το πλέγμα είναι ιδιαίτερα λεπτομερές και περιέχει μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων από ότι είναι αναγκαίο, τότε το κόστος υπολογιστικού χρόνου και ο απαραίτητος χρόνος για την ανάλυση είναι δυνατό να υπερβούν το όφελος από την ανάλυση. Μαζί με όλες αυτές τις εξισώσεις που είναι απαραίτητο να λυθούν από το πρόγραμμα, υπάρχουν και οι εξισώσεις ισορροπίας, οι οποίες καταγράφονται σε ένα μαθηματικό πίνακα και επιλύονται από τον υπολογιστή. Με την κατάλληλη εφαρμογή των συνθηκών περιορισμού και των επιθυμητών φορτίσεων υπολογίζονται οι παρεκτοπήσεις των κόμβων επιλύοντας τις εξισώσεις του πίνακα. Από τις παρεκτοπήσεις αυτές υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που ασκούνται στην κατασκευή ή στο υλικό που μελετάται. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει την δυνατότητα να μελετήσουμε την επίδραση σημαντικού αριθμού παραμέτρων, καθώς επίσης είναι δυνατή η εφαρμογή πολλαπλών συνθηκών στο ίδιο μοντέλο. (Γιαννακόπουλος, 2010)

Εξίσου μια σημαντική βασική έννοια είναι η διατύπωση του μητρώου δυσκαμψίας μιας κατασκευής. Έστω το στοιχείο ράβδου της (Εικόνα 2 : Στοιχείο Ράβδου. μήκους L , διατομής A και μέτρου ελαστικότητας E).



Εικόνα 2 : Στοιχείο Ράβδου.

(α') Φυσικό Πρόβλημα,

(β') Ελατηριακό Ανάλογο,

(γ') Προσομοίωμα. (ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ & ΚΑΡΑΟΥΛΗΣ, 2015)

Οι δυνάμεις συνδέονται με τις μετακινήσεις μέσω του μητρώου δυσκαμψίας K^e σύμφωνα με τη σχέση :

$$f^e = K^e * u^e \quad (1)$$

Η οποία γράφεται αναλυτικά :

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Τα διανύσματα f^e και u^e ονομάζονται διανύσματα επικόμβιων φορτίσεων και επικόμβιων μετακινήσεων.

Ο πίνακας δυσκαμψίας K^e μπορεί να διατυπωθεί με διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά θα εξεταστεί η πιο απλή περίπτωση σύμφωνα με την οποία το στοιχείο ράβδου αντικαθίσταται από ένα γραμμικό ελατήριο με δυσκαμψία k_s , όπως φαίνεται στην [Εικόνα 2 : Στοιχείο Ράβδου.(γ')]. Εάν οι ιδιότητες του στοιχείου είναι σταθερές σε όλο το μήκος του, τότε ισχύει :

$$k_s = \frac{EA}{L} \quad (3)$$

Επομένως η σχέση δυνάμεων-μετακινήσεων γράφεται ως :

$$F = k_s d = \frac{EA}{L} d \quad (4)$$

Όπου F είναι η αξονική δύναμη και d η σχετική αξονική μετακίνηση που αντιστοιχεί στην αλλαγή του μήκους του στοιχείου.

Σε όρους επικόμβιων δυνάμεων και μετακινήσεων προκύπτει :

$$F = \bar{f}_2 = -\bar{f}_1 \quad (5)$$

$$d = \bar{u}_2 - \bar{u}_1 \quad (6)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αντιστοιχούν στην ισορροπία των δυνάμεων και στο συμβιβαστό των μετακινήσεων αντίστοιχα.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2) με τις (5)-(6) προκύπτει :

$$\bar{f}^e = \begin{bmatrix} \bar{f}_1 \\ \bar{f}_2 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = K^e * u^e \quad (7)$$

Όπου το μητρώο δυσκαμψίας στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων δίνεται ως :

$$K^e = \frac{EA}{L} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.5 Στάδια Επίλυσης της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

1^ο Στάδιο :

Στο πρώτο στάδιο έχουμε την διακριτοποίηση της γεωμετρίας, ακολουθούμενη από την επιλογή των στοιχείων. Δηλαδή, η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων γίνεται με την προοπτική στην τελική μορφή το σώμα να είναι πιο κοντά στην πραγματική φυσική του συμπεριφορά. Όσο πιο μεγάλη ακρίβεια θέλουμε, τόσο μεγαλύτερος θα πρέπει να είναι ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Βασικό κριτήριο επιλογής μεγέθους είναι ο υπολογιστικός χρόνος, καθώς όσο πιο πολλά στοιχεία έχουμε, τόσο πιο πολύ υπολογιστικό χρόνο χρειαζόμαστε. Μικρός αριθμός στοιχείων είναι προτιμότερος όταν τα αποτελέσματα μεταβάλλονται γρήγορα, όπως για παράδειγμα σε μια αλλαγή γεωμετρίας. Αντίθετα, μεγαλύτερα στοιχεία προτιμώνται όταν τα αποτελέσματα θα είναι σχετικά σταθερά.

2^ο Στάδιο :

Στο δεύτερο στάδιο, πρέπει να γίνει η επιλογή της συνάρτησης των μετατοπίσεων. Όταν δηλαδή η μετατόπιση μιας κατασκευής δεν μπορούμε να την προβλέψουμε αναλυτικά, τότε θα επιλέξουμε μια συνάρτηση η οποία θα προσεγγίζει την μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε καθένα από τα στοιχεία.

3^ο Στάδιο :

Στο τρίτο στάδιο, γίνεται ο καθορισμός του μητρώου δυσκαμψίας, με τις αντίστοιχες εξισώσεις που το διέπουν. Δηλαδή, θα καθοριστούν οι εξισώσεις που θα εκφράζουν τις ιδιότητες του κάθε στοιχείου. Ο καθορισμός του πίνακα αυτού μπορεί να γίνει με τις 2 ακόλουθες μεθόδους :

Αρχή Δυνατών Έργων – ΑΔΕ

Καθώς ο εκάστοτε φορέας ο οποίος βρίσκεται υπό την επίδραση των εξωτερικών φορτίων παραμορφώνεται, μπορούμε να υπολογίσουμε το έργο των εξωτερικών φορτίων καθώς και της εσωτερικής ενέργειας που προκαλούν αυτή την παραμόρφωση. Αποτελεί μια από τις απλές μεθόδους υπολογισμού, και μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου σε δισδιάστατα σώματα όσο και σε τρισδιάστατα.

Μέθοδος Άμεσης Ισορροπίας

Σε αυτή την μέθοδο, το μητρώο δυσκαμψίας μας δίνει τις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή κατά βάση σε στοιχεία δοκούς.

4^ο Στάδιο :

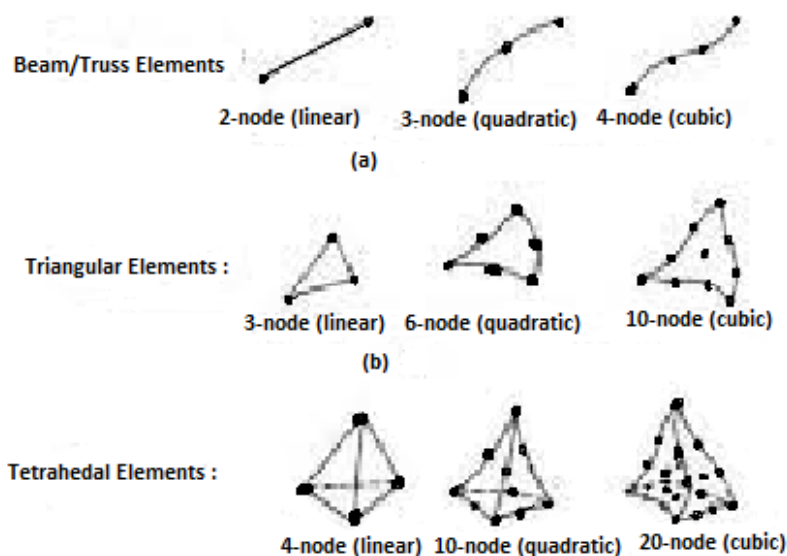
Στο τέταρτο στάδιο πρέπει να μετατραπεί το μητρώο δυσκαμψίας στο γενικό σύστημα αξόνων, καθώς επίσης να εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία δηλαδή αποτελείται από την μετατροπή του τοπικού συστήματος συντεταγμένων στο γενικό σύστημα συντεταγμένων. Οι συνοριακές συνθήκες είναι για παράδειγμα οι μετατοπίσεις των κόμβων, οι δυνάμεις, οι γωνίες στροφής κ.λπ.

5^ο Στάδιο :

Στο πέμπτο στάδιο, εφόσον έχουν οριστεί οι συνοριακές συνθήκες θα ακολουθήσει επίλυση του συστήματος. Αυτό γίνεται προκειμένου να οριστούν οι άγνωστοι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων.

6^ο Στάδιο :

Στο έκτο στάδιο, δεδομένου ότι πλέον είναι γνωστές οι κομβικές μετατοπίσεις, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τις παραμορφώσεις με την βοήθεια των απαραίτητων σχέσεων. (Μακρής & Ψυλάκης, 2015)



Εικόνα 3 : Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα. (Κωνσταντίνος, 2017)

1.6 Ίδρυση Εταιρίας ANSYS

Ο John Swanson εντάχθηκε στο Westinghouse Astronuclear Laboratory στο Πίτσμπουργκ το 1963 ως διευθυντής δομικής ανάλυσης. Ενώ εργαζόταν για τη Westinghouse ολοκλήρωσε την εργασία του για διδακτορικό στο Πανεπιστήμιο του Πίτσμπουργκ το 1966. Νωρίτερα είχε λάβει το πτυχίο και εξίσου το μεταπτυχιακό του από το Πανεπιστήμιο Cornell. Στο Westinghouse προώθησε τη χρήση του υπολογιστή για μοντέλα πρόβλεψης των τάσεων και των μετατοπίσεων των πυρηνικών αντιδραστήρων λόγω θερμικών φορτίων και υψηλών πιέσεων. Αναγνωρίζοντας τις μελλοντικές δυνατότητες της τεχνολογίας της ανάλυσης, συνέστησε να ξεκινήσει ανάπτυξη του λογισμικού FEA γενικής χρήσης. Όταν η εταιρεία τον απέρριψε αποφάσισε να ιδρύσει τη δική του εταιρεία το 1970, την Swanson Analysis Systems. Η πρώτη έκδοση αυτού που σύντομα έγινε το κορυφαίο προϊόν της εταιρείας, το ANSYS (ANalysis SYStems), αναπτύχθηκε με χρήση ενός mainframe στην US Steel. Η αρχική έκδοση του λογισμικού ολοκληρώθηκε στα τέλη του 1970 και ο πρώτος πελάτης ήταν η Westinghouse. Ενώ το ANSYS αρχικά εμφανίστηκε σε mainframe και υπερυπολογιστές, ο Swanson υποστήριζε πολύ τη νέα γενιά μικρών υπολογιστών 32 bit. Η εταιρεία αναγνώρισε επίσης την ανάγκη για προετοιμασία μοντέλων και λογισμικού που να προβάλλει τα αποτελέσματα. Το δημοφιλές πακέτο Μοντελοποίησης Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) ονομαζόταν PREP7 ενώ το πρόγραμμα προβολής τους ήταν το POST1, όπου η χρήση και των δύο αυτών θα παρείχε μια ολοκληρωμένη λύση για FEA (Finite Element Analysis). Κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας, η εταιρεία έκανε όλο και πιο αισθητή την παρουσία της στην αγορά, καθιστώντας τον εαυτό της ως έναν αξιολογούμενο προμηθευτή τεχνικού λογισμικού. Επίσης, κατάφερε να επεκταθεί ακόμα περισσότερο το 1992 όταν αγόρασε από την Compufluo Inc. το λογισμικό FLOTRAN που είχε να κάνει με υπολογιστική ρευστοδυναμική. Στις αρχές του 1994, η TA Associates, μια επενδυτική εταιρεία με έδρα την Βοστώνη της Μασαχουσέτης, απέκτησε πλειοψηφικό ενδιαφέρον στην Swanson Analysis με αποτέλεσμα ο John Swanson να παραιτηθεί από πρόεδρος και διευθύνων σύμβουλος, και για τα επόμενα χρόνια ενεργούσε ως επικεφαλής τεχνολόγος. Ωστόσο, αντικαταστάθηκε από τον Peter Smith, ένα πρώην στέλεχος της Digital Equipment Corporation, ο οποίος σύντομα άλλαξε το όνομα της εταιρείας σε ANSYS Inc. Ο Swanson ήταν ακόμα βασικός μέτοχος της εταιρείας και παρέμεινε στο διοικητικό συμβούλιο της εταιρείας μέχρι και τις αρχές του 2000. Μέχρι τα τέλη του 1994, η

εταιρεία είχε επικεντρωθεί σε διάφορους τεχνικούς στόχους. Η σειρά ANSYS Designer Series ήταν πολύ φιλική προς τους μηχανικούς σχεδιασμού, έτσι ώστε πολλά προβλήματα να μπορούν να αντιμετωπιστούν χωρίς την ανάγκη χρήσης ειδικών αναλύσεων. Επίσης, δημιουργήθηκε το ANSYS 5.1 το οποίο χρησιμοποιούνταν όλο και περισσότερο για την βελτιστοποίηση σχεδιασμού, το οποίο υποστήριζε πάνω από 100 διαφορετικούς τύπους στοιχείων και ήταν ικανό να λύνει στατικά και δυναμικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένων γραμμικών και μη γραμμικών περιπτώσεων. Ένα ακόμα λογισμικό, το Adaptive Meshing, προσαρμοζε αυτόματα το μέγεθος του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων μέχρι να συγκλίνει η λύση, κάτι που παλαιότερα αποτελούσε μια χρονοβόρα διαδικασία για τον μηχανικό. Το ANSYS 5.1 περιλάμβανε επίσης μια νέα τεχνολογία λύσεων που επεξεργαζόταν μοντέλα FEA μια τάξη μεγέθους ταχύτερα από την προηγούμενη έκδοση.

Σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση ενσωματώθηκαν περιοδικά σε επόμενες εκδόσεις του λογισμικού, συγκεκριμένα η ANSYS ήταν πρωτοπόρος στην εφαρμογή τεχνικών πολλαπλής επεξεργασίας στον υπολογισμό των FEA. Σήμερα, το ANSYS χρησιμοποιείται τακτικά για την επίλυση μοντέλων με πάνω από ένα εκατομμύριο στοιχεία. Επίσης, η εταιρεία συνεργαζόταν στενά με προμηθευτές λογισμικού CAD, συμπεριλαμβανομένων των PTC και Autodesk, για να ενσωματώσει το λογισμικό της με διάφορα πακέτα CAD. Το πακέτο ANSYS/AutoFea, που παρουσιάστηκε τον Οκτώβριο του 1994, ενσωματώθηκε στενά με το AutoCAD Release 12 και πωλήθηκε για μόλις 1200 δολάρια, ενώ μια προηγούμενη έκδοση, το ANSYS/AutoFea 3D κυκλοφόρησε τον Ιούνιο του 1996 στην προτεινόμενη τιμή των 3800 δολαρίων.

Η εταιρεία αναγνωρίστηκε ως ηγέτης στον τομέα επίλυσης προβλημάτων πολυφυσικής, κάτι το οποίο αναφέρεται σε καταστάσεις όπου ένας αναλυτής αντιμετωπίζει προβλήματα που αφορούν το συνδυασμό δομικών, θερμικών, ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων και δονήσεων. Τον Ιούνιο του 1996, η εταιρεία είχε μια αρχική δημόσια προσφορά, πουλώντας 3.580.000\$ μετοχές για 13\$ ανά μετοχή και αντλώντας περισσότερα από 46 εκατομμύρια δολάρια για την εταιρεία. Κατά την περίοδο του 1995 έως το 1999 το επιχειρηματικό μοντέλο της εταιρίας άλλαξε σημαντικά, ενώ τα συνολικά έσοδα αυξήθηκαν από 39.6 εκατομμύρια δολάρια σε 63.2 εκατομμύρια και τα έσοδα από μίσθωση λογισμικού μειώθηκαν από 18.1 εκατομμύρια δολάρια σε 16.6 εκατομμύρια. Παράλληλα, τα έσοδα από τις υπηρεσίες υπερτριπλασιάστηκαν από 7 εκατομμύρια σε 22.2 εκατομμύρια δολάρια και η πώληση

πλήρως εξοφλημένων αδειών σχεδόν διπλασιάστηκε από 14.5 σε 24.4 εκατομμύρια δολάρια.

Ο Jim Cashman, έγινε πρόεδρος της ANSYS τον Απρίλιο του 1999 και Διευθύνων Σύμβουλος τον Φεβρουάριο του 2000, είχε ενταχθεί στην εταιρεία ως αντιπρόεδρος λειτουργιών το 1997 αφού είχε εργαστεί για τις PAR Technology, Metaphase και SDRC. Τον Φεβρουάριο του 2003, η ANSYS εξαγόρασε την CFX, μια εταιρεία λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για 21.7 εκατομμύρια δολάρια.

Τον Φεβρουάριο του 2001, ο Μπράντ Μόρλεϊ, πρώην Διευθύνων Σύμβουλος της Applicon, εντάχθηκε στο διοικητικό συμβούλιο της ANSYS. Η εταιρεία χάραξε πολύ καλή πορεία τα τελευταία χρόνια με τα έσοδα το 2005 να ξεπερνούν τα 155 εκατομμύρια δολάρια. Το 2006 η ANSYS ολοκλήρωσε την εξαγορά της Fluent, ενός προμηθευτή λογισμικού υπολογιστικής υδροδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) για την τιμή των 565 εκατομμυρίων δολαρίων. Το αποτέλεσμα ήταν η εταιρεία να έχει περίπου 1350 εργαζόμενους και με τα ενοποιημένα έσοδα να φτάνουν τα 264 εκατομμύρια δολάρια το 2006. (Weisberg, 2008)

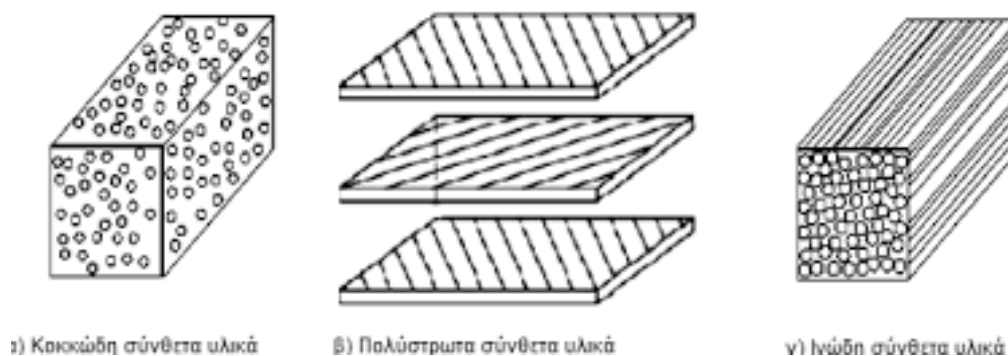
2.1 Σύνθετα Υλικά

Agarwal – 1990 : Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Για ένα οποιοδήποτε σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει πως το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέλη. Επομένως, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις χαρακτηρίζεται ως σύνθετο υλικό (Composite Material).

Στην παρούσα χρονική περίοδο, ως σύνθετα αναγνωρίζονται τα υλικά εκείνα τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με πολύ διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους. Ωστόσο, το αποτέλεσμα του σύνθετου υλικού έχει εξίσου σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του. Προκειμένου να θεωρηθεί ένα υλικό ως σύνθετο θα πρέπει να ακολουθεί τον εξής κανόνα: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (Τουλάχιστον πενταπλάσιες) καθώς και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (>10%) .

Τα συστατικά μέρη χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Το **συστατικό ενίσχυσης** είναι αυτό το οποίο προσδίδει βελτιωμένες μηχανικές κυρίως ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται **μήτρα**, το οποίο συνήθως είναι χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων ενίσχυσης. (Μανολάκος, 2005)

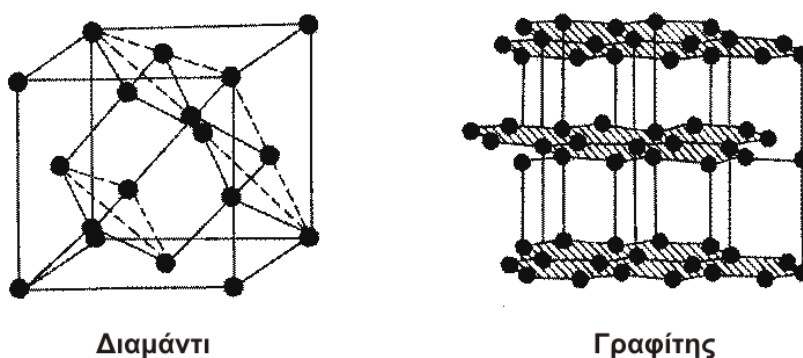


Εικόνα 4 : Είδη σύνθετων υλικών. (Φραγκίσκος, 2018)

2.2 Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες του άνθρακα ή ίνες γραφίτη, παραμένουν η καλύτερη ενίσχυση υψηλής αντοχής με την ιδιότητα του υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων υλικών για υψηλές επιδόσεις με ρητινική μήτρα. Όταν ο στόχος είναι ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και μείωσης του συνολικού βάρους, οι ίνες που θα προτιμηθούν είναι οι ίνες άνθρακα. Επιπλέον, πέραν των υψηλών επιδόσεων τους σε μηχανικές καταπονήσεις, οι ίνες άνθρακα προτιμώνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να κρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο. Αυτή η συμπεριφορά των ανθρακονημάτων οφείλεται στους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζονται με τα άλλα άτομα άνθρακα.

Η συνέπεια του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλίτων παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων του άνθρακα στις επίπεδες εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Σε αντίθεση, με τους δεσμούς τύπου Van der Waals που υφίσταται μεταξύ των γειτονικών στρώσεων, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μέτρο ελαστικότητας χαμηλότερο σε αυτή την διεύθυνση. (Bhatt & Goe, 2017)



Εικόνα 5 : Βασικές δομές άνθρακα.

2.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

2.3.1 Υλικά Μήτρας

Πίνακας 1 : Υλικά μήτρας.

	Polystyrene (PS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
Πυκνότητα	1040 $\frac{kg}{m^3}$	1040 $\frac{kg}{m^3}$
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής	1.16E – 04 C^{-1}	9.54E – 05 C^{-1}
Μέτρο Ελαστικότητας	2.73 <i>GPa</i>	2.39 <i>GPa</i>
Λόγος Poisson	0,4	0,4
Μέτρο Ελαστικότητας Όγκου	3.1 <i>GPa</i>	2.98 <i>GPa</i>
Συντελεστής Διάτμησης	6.11 <i>GPa</i>	5.7 <i>GPa</i>
Θερμική Αγωγιμότητα	0,13 $\frac{W}{m*K}$	0,258 $\frac{W}{m*K}$
Όριο Διαρροής	28.05 <i>MPa</i>	41 <i>MPa</i>
Μέγιστο Όριο Διαρροής	30 <i>MPa</i>	43 <i>MPa</i>

2.3.2 Υλικά Ίνας

Πίνακας 2 : Υλικά ίνας.

	T800S (294 GPa)	T300 (230 GPa)	T700S (230 GPa)
Πυκνότητα	$1800 \frac{kg}{m^3}$	$1760 \frac{kg}{m^3}$	$1800 \frac{kg}{m^3}$
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής	$-0.4E - 06 C^{-1}$	$-0.4E - 06 C^{-1}$	$-0.38E - 06 C^{-1}$
Μέτρο ελαστικότητας z- διεύθυνση (Ez)	294 GPa	230 GPa	230 GPa
Μέτρο ελαστικότητας x- διεύθυνση (Ex)	29,4 GPa	23 GPa	23 GPa
Μέτρο ελαστικότητας y- διεύθυνση (Ey)	29,4 GPa	23 GPa	23 GPa
Λόγος Poisson XZ	0,3	0,2	0,25
Λόγος Poisson XY	0,3	0,2	0,25
Λόγος Poisson YZ	0,4	0,4	0,4
Μέτρο Διάτμησης XY	9 GPa	9 GPa	9,2 GPa
Μέτρο Διάτμησης YZ	8 GPa	8,2 GPa	8 GPa
Μέτρο Διάτμησης XZ	9 GPa	9 GPa	9,2 GPa
Θερμική Αγωγιμότητα	$11.3 \frac{W}{mK}$	$10.46 \frac{W}{mK}$	$9.62 \frac{W}{mK}$

2.4 Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)

Στην επιστήμη της μηχανικής, η έννοια της διατμητικής αντοχής είναι η αντοχή ενός υλικού έναντι κάποιου τύπου διαρροής ή δομικής αστοχίας όταν το υλικό αυτό αστοχεί κατά την διάτμηση. Ένα διατμητικό φορτίο είναι μια δύναμη που τείνει να προκαλέσει αστοχία ολίσθησης σε ένα υλικό, κατά μήκος ενός επιπέδου που είναι παράλληλο προς την κατεύθυνση της δύναμης. (Hibbeler & Yap, 2018)

Η εκτίμηση της διατμητικής αντοχής στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας παίζει βασικό ρόλο στην κατανόηση της συμπεριφοράς ενός υλικού σε διάτμηση, συμπίεση και φέρουσας δομικής αντοχής σύνθετων υλικών με μήτρα πολυμερές/πλαστικό. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRPs) είναι δύσκολο να επεξεργαστούν με τις συμβατικές μεθόδους, λόγω των μεγάλων διαφορών στις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. (Ghaffari, Seon, & Makeev, 2021)

Για τον παραπάνω λόγο, στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία ANSYS Workbench. Ο όρος της διατμητικής αντοχής λαμβάνεται υπόψη κατά την αποκόλληση που συμβαίνει στη διεπιφάνεια μεταξύ ίνας-μήτρας, έπειτα από την επιβολή της δύναμης εκρίζωσης η οποία θα προκαλέσει ολίσθηση στη περιοχή αυτή. Συμβολίζεται με το γράμμα τ_s και δίνεται από τον τύπο :

$$\tau_s = \frac{F_{\max}}{\pi dL} \quad (9)$$

Όπου :

F_{\max} : είναι η δύναμη εκρίζωσης F_d

d : είναι η διάμετρος της ίνας, και

L : είναι το μήκος επαφής ίνας-μήτρας, δηλαδή, το Embedded length.

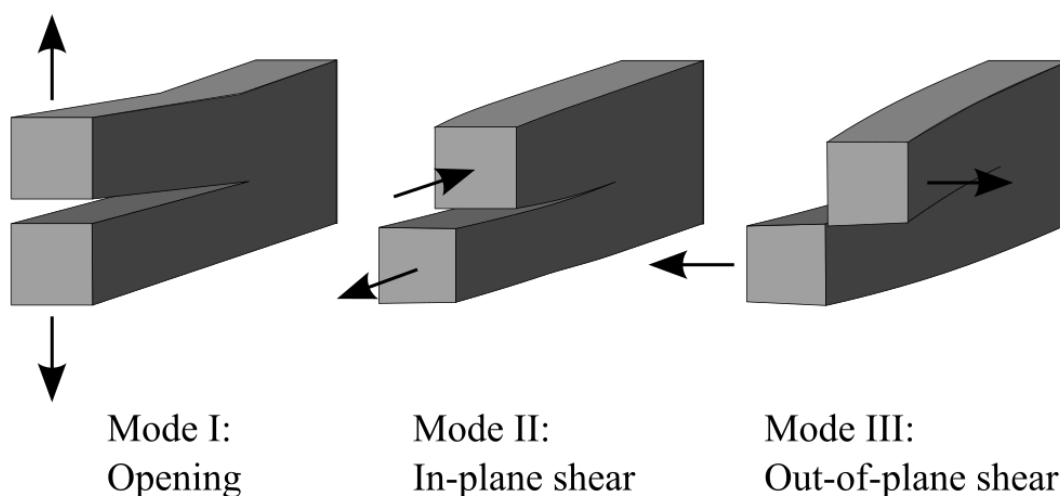
(Meng & Chang, Interfacial crack propagation between a rigid fiber and a hyperelastic elastomer: Experiments and Modeling, 2020)

2.5 Ρυθμός Απελευθέρωσης Ενέργειας (Energy Release Rate)

Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας στην ουσία του είναι η ενέργεια που δαπανάται κατά την θραύση για να δημιουργηθεί μια νέα επιφάνεια στην αιχμή της ρωγμής. Μαθηματικά εκφράζεται ως η μείωση της συνολικής δυναμικής ενέργειας ανά αύξηση του εμβαδού της επιφάνειας θραύσης, επομένως εκφράζεται σε όρους ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας [$\frac{J}{m^2}$]. (Zehnder & Alan, 2012)

Ο ρυθμός απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας σχετίζεται άμεσα με τον Παράγοντα Έντασης Τάσης (Stress Intensity Factor) και την μέθοδο Virtual Crack Closure Technique (VCCT).

Επομένως, η συσχέτιση με τον Stress Intensity Factor (SIF) γίνεται δεδομένης μιας λειτουργίας φόρτισης από τα Mode-I, Mode-II, Mode-III όταν η ρωγμή αναπτύσσεται ευθεία.



Εικόνα 6 : Τρόποι διάδοσης ρωγμής κατά Mode-I, II, III. (Twisp, 2008)

- **Mode I:** Μια τάση εφελκυσμού στο επίπεδο της ρωγμής.

$$G_I = \frac{K_I^2}{E'} \quad (10)$$

Όπου το E' σχετίζεται με το Μέτρο Ελαστικότητας (E), και (ν) ο λόγος Poisson.

$$E' = \begin{cases} E, & \text{Plane Stress} \\ \frac{E}{1-\nu^2}, & \text{Plane Strain} \end{cases}$$

- Mode II : Μια διατμητική τάση που ενεργεί παράλληλα στο επίπεδο της ρωγμής και κάθετα στο μέτωπο της ρωγμής.

$$G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E'} \quad (11)$$

- Mode III : Μια διατμητική τάση που ενεργεί παράλληλα στο επίπεδο της ρωγμής και παράλληλα στο μέτωπο της ρωγμής.

Για το Mode III, ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας τώρα είναι συναρτήσσει του συντελεστή διάτμησης μ .

$$G_{III} = \frac{K_{III}^2}{2\mu} = K_{III}^2 \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \quad (12)$$

Για έναν αυθαίρετο συνδυασμό όλων των τρόπων φόρτωσης, αυτές οι γραμμικές ελαστικές λύσεις μπορούν να υπερτίθενται ως :

$$G_T = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (13)$$

Ο όρος αυτός είναι απαραίτητος στο πεδίο της θραυστομηχανικής κατά την επίλυση προβλημάτων αντοχής και την εκτίμηση των ιδιοτήτων του υλικού που σχετίζονται με την θραύση και την κόπωση. (Zehnder & Alan, 2012)

2.6 Κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Stress Failure Criterion)

Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει και η συμπεριφορά στην διεπιφάνεια (Interface). Το ενδιάμεσο αυτό υλικό μεταξύ της μήτρας και της ίνας υπόκειται ακτινική δύναμη εφελκυσμού. Σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιείται το κριτήριο αστοχίας τετραγωνικής τάσης (Quadratic Stress Failure Criterion).

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure Criterion) δίνεται από τον τύπο:

$$\left(\frac{\sigma_n}{N_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{T_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S_{\max}}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

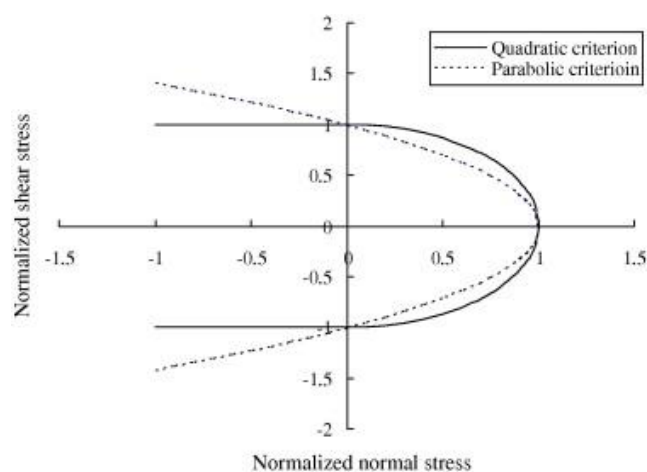
Όπου :

σ_n : Η ορθή τάση όπου εφαρμόζεται στην μπροστινή επιφάνεια της ίνας.

$\sigma_t = \sigma_s$: Οι διατμητικές τάσεις στη πρώτη και δεύτερη κατεύθυνση λόγω της κυλινδρικής συμμετρίας.

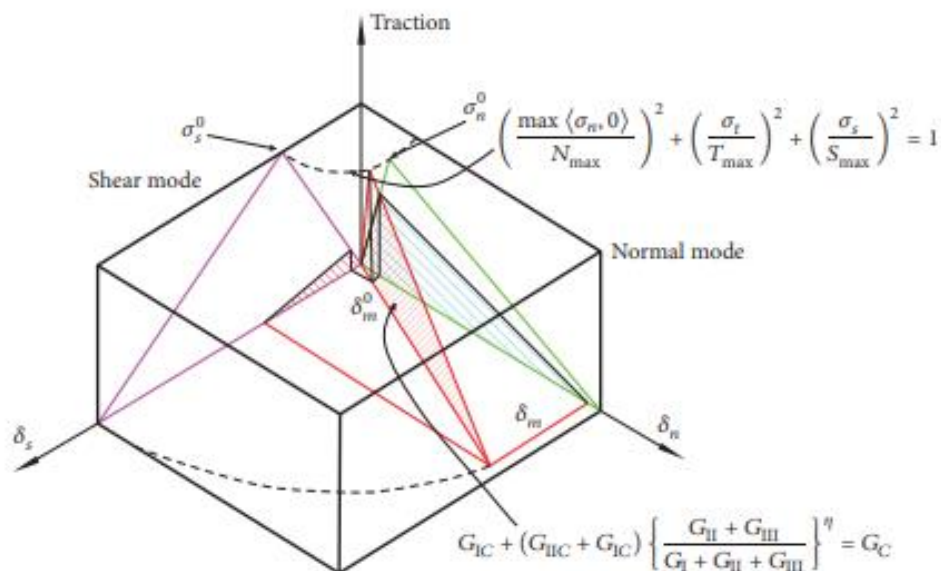
N_{\max} : Η δύναμη στην ορθή κατεύθυνση.

T_{\max}, S_{\max} : Δυνάμεις στη πρώτη και δεύτερη φορά διάτμησης.



Εικόνα 7 : Διάγραμμα επιφανειών αστοχίας σε κανονικοποιημένο πεδίο ορθών και διατμητικών τάσεων για το κριτήριο της τετραγωνικής και παραβολικής αστοχίας. (Ogihara & Koyanagi, 2010)

Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της ρωγμής, το κριτήριο θα λάβει υπόψη του τις ορθές και τις διατμητικές τάσεις όπου θα ασκηθούν.



Εικόνα 8 : Κριτήριο τετραγωνικής αστοχίας σε συνδυασμό με κριτήριο θραύσης Benzeggagh Kenane. (Wang, Zhang, Duan, & Meng, 2018)

Λύνοντας την εξίσωση (14) παίρνουμε τα εξής :

$$\left(\frac{\sigma_n}{N_{max}}\right)^2 + 2\left(\frac{\tau}{\tau_{max}}\right)^2 = 1 \quad (15)$$

Η δύναμη που απαιτείται ώστε να επιτύχουμε την αστοχία συμβολίζεται με F_d , επομένως :

$$\left(\frac{\frac{F_d}{A_f}}{N_{max}}\right)^2 + 2\left(\frac{\frac{F_d}{A_i}}{\tau_{max}}\right)^2 = 1 \quad (16)$$

Όπου A_f είναι το εμβαδό κυλίνδρου της ίνας και A_i της διεπιφάνειας. Επομένως, η εξίσωση (15) γίνεται :

$$F_d = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{N_{max} \cdot A_f}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{\tau_{max} \cdot A_i}\right)^2}} \quad (17)$$

$$F_d = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{N_{max} \cdot \pi r_f^2}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{\tau_{max} \cdot 2\pi r_f l_i}\right)^2}} \quad (18)$$

Όπου r_f η ακτίνα της ίνας και l_i το μήκος της διεπιφάνειας.

Οι τιμές των όρων θα προκύπτουν κάθε φορά για τα διαφορετικά υλικά μήτρας ως εξής:

$$N_{max} = YTS [MPa]$$

$$\tau_{max} = \frac{YTS}{\sqrt{3}} [MPa]$$

(Wang, Zhang , Duan, & Meng, 2018) (Βουθούνης, 2017)

2.7 Κριτήριο Benzeggagh Kennane (B-K)

Το κριτήριο Benzeggagh Kennane το οποίο αφορά την διάδοση των ρωγμών αξιολογείται μέσω της σχέσης :

$$f = \frac{G_T}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_T} \right)^n} \quad (19)$$

Όπου G_{IC} ($i = I, II, III$) είναι οι αντίστοιχοι κρίσιμοι ρυθμοί απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας, κάτω από τις αντίστοιχες φορτίσεις των Mode-I, II, III. G_T, G_{II}, G_{III} είναι οι κανονικοί ρυθμοί απελευθέρωσης ενέργειας και (n) είναι ο εκθέτης B-K.

Οι κρίσιμοι ρυθμοί απελευθέρωσης ενέργειας G_{IC} ($i = I, II, III$) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την δύναμη εκρίζωσης Fd .

Επομένως, η σχέση δίνεται από :

$$G_{IC} = \frac{r C33s}{2} \left[\frac{Fd}{\pi r^2} + \frac{(a_f - a_m) \Delta T}{2 C33s} \right]^2 \quad (20)$$

Όπου r είναι η ακτίνα της ίνας του άνθρακα και τα a_f και a_m είναι , αντίστοιχα, οι συντελεστές θερμικής διαστολής της ίνας και της μήτρας. Επίσης, ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας που επιβάλουμε στην διεπιφάνεια και της εξωτερικής θερμοκρασίας, και τέλος το $C33s$ δίνεται από τον τύπο :

$$C33s = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E_f} + \frac{Vf}{Vm Em} \right] \quad (21)$$

Όπου E_f και E_m αντίστοιχα είναι τα μέτρα ελαστικότητας της ίνας και της μήτρας. Τα Vf και Vm αντίστοιχα, είναι ογκομετρικά κλάσματα της ίνας και της μήτρας. (Hongxiao , Xiahui , Yugang , & Lingjie, 2018) (Jia, Yan, & Liu, 2012)

2.8 Modified Criterion Benzeggagh Kennane (Modified B-K)

Το κριτήριο θραύσης αυτό είναι πλέον στο τρισδιάστατο επίπεδο καθώς συνδυάζει και τους τρεις τρόπους αποκόλλησης κατά τα Mode-I, II, III. Το απλό κριτήριο θραύσης B-K δίνει όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα σε ένα μόνο από τα τρία διαφορετικά είδη κατά τον διαχωρισμό (Mode-I, II, III) κάθε φορά. Επομένως, η έννοια της τροποποίησης είναι να λαμβάνονται τα απαραίτητα αποτελέσματα και για τις τρεις πιθανές περιπτώσεις των τρόπων διαχωρισμού ταυτόχρονα. Δηλαδή, το κριτήριο αυτό θα αξιολογεί την ανθεκτικότητα σε θραύση κατά έναν μικτό τρόπο φόρτισης.

Η αξιοπιστία του τροποποιημένου αυτού κριτηρίου φαίνεται από αριθμητικές επικυρώσεις στην περιοχή της ρωγμής σε σχέση με άλλα κριτήρια που χρησιμοποιούν πειραματικά δεδομένα ή συγκρίσεις για τον ίδιο σκοπό. Ωστόσο, η ευρύτερη κατανόηση των πραγματικών μηχανισμών που ελέγχουν την ανθεκτικότητα σε θραύση κατά έναν μικτό τρόπο φόρτισης δεν μπορεί εύκολα να τεκμηριωθεί.

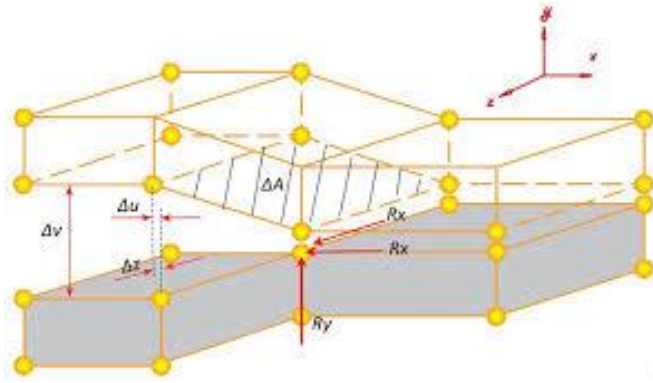
(Q.V. Bui, 2011)

2.9 Virtual Crack Closure Technique (VCCT)

Όσο αναφορά την συσχέτιση με την μέθοδο VCCT, η μέθοδος αυτή ονομάζεται και Μέθοδος Επέκτασης Ρωγμής με τα Πεπερασμένα Στοιχεία, και καταλήγει σε ένα γενικό αποτέλεσμα καθώς οι δυνάμεις στο δομικό επίπεδο πολλαπλασιάζονται με τις παραμορφώσεις για να υπολογιστεί η ενέργεια που απαιτείται για την προώθηση της ρωγμής. Ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας υπολογίζεται τοπικά στο μέτωπο της ρωγμής και ο υπολογισμός αυτός απαιτεί μόνο έναν ακόμα υπολογισμό του πίνακα ακαμψίας των στοιχείων που επηρεάζονται από την εικονική επέκταση της ρωγμής. Η μέθοδος αποδίδει τον συνολικό ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας ως συνάρτηση της κατεύθυνσης στην οποία η ρωγή επεκτάθηκε ουσιαστικά, δίνοντας πληροφορίες για την πιο πιθανή κατεύθυνση ανάπτυξής της.

Όπως και στην περίπτωση μας, σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο έχει κατασκευαστεί από τρισδιάστατα στερεά στοιχεία η αποκόλληση αντιπροσωπεύεται ως δισδιάστατη ασυνέχεια από δυο επιφάνειες. Το μέτωπο στο οποίο συμβαίνει η αποκόλληση αντιπροσωπεύεται είτε από μια σειρά μεμονωμένων κόμβων είτε από δυο σειρές κόμβων με πανομοιότυπες συντεταγμένες. Αντίστοιχα, το άθικτο τμήμα, όπου δεν έχει επέλθει αποκόλληση και η δομή είναι ανέπαφη, μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μεμονωμένους κόμβους ή δυο κόμβους με πανομοιότυπες συντεταγμένες. (Kueger, 2004)

Η μέθοδος αυτή, είναι αποτελεσματική και αρκετά απλή στη χρήση, καθώς φροντίζει για τον ρυθμό απελευθέρωσης παραμόρφωσης κατά τα Mode-I, II, III. Προϋπόθεση είναι ότι η απαιτούμενη ενέργεια για την λήψη μοναδιαίας θραυσμένης επιφάνειας (ΔA) είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για την συνένωση των σπασμένων επιφανειών, και ότι η ρωγή προχωρά σε μια προκαθορισμένη διαδρομή. Επίσης, η τεχνική αυτή υποθέτει πως η κατάσταση της τάσης στο άκρο της ρωγμής δεν αλλάζει, και αυτό συμβαίνει επειδή η διάδοση της ρωγμής είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με ολόκληρο το μήκος της ρωγμής. Το VCCT χρησιμοποιεί κόμβους που συμπίπτουν κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής της ρωγμής και υπολογίζει τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης λαμβάνοντας υπόψη τις μετακινήσεις και τις δυνάμεις αντίδρασης των κόμβων στο άκρο της ρωγμής. (Εικόνα 9 : Τρισδιάστατο μοντέλο για μια ρωγή.)



Εικόνα 9 : Τρισδιάστατο μοντέλο για μια ρωγμή. (Fatih, 2019)

Αν Δu , Δv και Δw είναι οι μετατοπίσεις των διαχωρισμένων κόμβων στις κατευθύνσεις x , y και z αντίστοιχα, και αν τα R_x , R_y και R_z είναι οι δυνάμεις αντίδρασης στο άκρο της ρωγμής, τότε ο ρυθμός απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας για τις καταστάσεις Mode-I,II,III δίνεται ως :

$$G_I = \frac{1}{2\Delta A} R_y \Delta v \quad (22)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2\Delta A} R_x \Delta u \quad (23)$$

$$G_{III} = \frac{1}{2\Delta A} R_z \Delta w \quad (24)$$

(Daricik, 2019)

2.10 Παράγοντας Έντασης Τάσης (K)

Την δεκαετία 1950 με 1960, ο Αμερικανός επιστήμονας George Rankin Irwin παρατήρησε πως οι τάσεις γύρω από κάποια ρωγμή μπορούσαν να εκφραστούν με κάποιους όρους από έναν παράγοντα κλιμάκωσης, πλέον γνωστός ως παράγοντας έντασης τάσης (Stress Intensity Factor). Ρωγμές οι οποίες υποβάλλονταν σε οποιαδήποτε είδους φόρτιση κατέληγαν πάντα σε έναν από τους τρεις πιθανούς γραμμικά ανεξάρτητους τρόπους ρωγμής, με τύπους φόρτισης που κατηγοριοποιούνται ως Mode-I,II,III. (Suresh, 1992)

Στη θραυστομηχανική, ο παράγοντας έντασης τάσης χρησιμοποιείται για να προβλέψει την κατάσταση τάσης κοντά στο άκρο μιας ρωγμής ή εγκοπής που προκαλείται από κάποιο φορτίο ή από παραμένουσες τάσεις. Είναι μια θεωρητική έννοια που εφαρμόζεται συνήθως σε κάποιο ομοιογενές υλικό, με γραμμικό-ελαστική συμπεριφορά και είναι εξίσου χρήσιμο για την παροχή ενός κριτηρίου αστοχίας για εύθραυστα υλικά. (Anderson, 2005)

Επίσης, ο τύπος υπολογισμού διαφέρει με το είδος φόρτισης.

Εξαρτάται από :

- Την γεωμετρία του δείγματος.
- Το μέγεθος της ρωγμής.
- Την θέση της ρωγμής.
- Την εγκοπή (εάν υπάρχει).
- Το μέγεθος και την κατανομή των φορτίων.

Ο τύπος υπολογισμού είναι :

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (25)$$

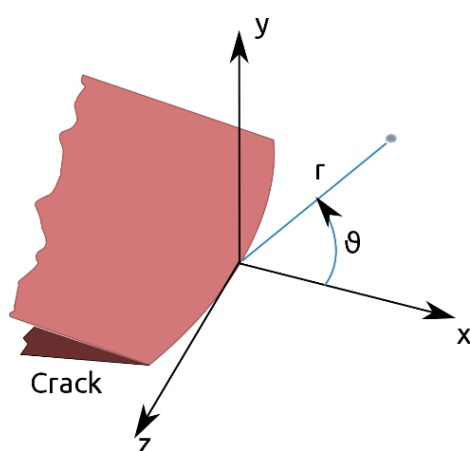
Όπου Y είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από την γεωμετρία της ρωγμής του δείγματος a , και το πλάτος του δείγματος W , και σ είναι η εφαρμοζόμενη τάση. (Soboyejo, 2003)

Στην παρούσα εργασία, μας ενδιαφέρει ο κρίσιμος παράγοντας έντασης τάσης (Critical Stress Intensity Factor) που συμβολίζεται ως K_{Ic} ($i=I, II, III$) αναλόγως το είδος της φόρτισης.

Ο όρος Y είναι μια αδιάστατη σταθερά, όμως καθορίζεται από τον τρόπο θραύσης καθώς και τη γεωμετρία του δείγματος δοκιμής. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί για την εξαγωγή αυτής της σταθεράς είναι πολύπλοκοι και η τιμή εξαρτάται από τη θέση της ρωγμής στο δείγμα, τον προσανατολισμό του φορτίου σε σχέση με τη ρωγμή, το μήκος της ρωγμής, το μέγεθος και το σχήμα του δοκιμίου δοκιμής και τέλος την λειτουργία φόρτισης. Ωστόσο, τέτοιου είδους προβλήματα έχουν λυθεί αρκετές φορές στο παρελθόν και υπάρχουν εγχειρίδια που περιέχουν πινακοποιημένες τιμές για τις περισσότερες γνωστές συνθήκες. Οι μονάδες του K_{Ic} εκφράζονται ως τάση επί τετραγωνική ρίζα μήκους. Ο K_{Ic} προσδιορίζει την ελάχιστη απαραίτητη τάση ώστε να διαδοθεί μια ρωγμή, σε μια ήδη υπάρχουσα ρωγμή.

Εάν το δείγμα δοκιμής είναι αρκετά παχύ, τότε ο τρόπος φόρτισης Mode-I μετατρέπεται σε μια απλή κατάσταση παραμόρφωσης, επομένως, το K_{Ic} αναφέρεται συχνά ως η ανθεκτικότητα στη θραύση για απλή παραμόρφωση ενός υλικού. Έχοντας ως δεδομένο τον παράγοντα K_{Ic} και μιας συνθήκης φόρτωσης, είναι δυνατό να εκτιμήσουμε το ελάχιστο μήκος μιας ρωγμής που θα διαδοθεί κάτω από αυτή την συνθήκη, αυτό είναι γνωστό ως το κρίσιμο μήκος ρωγμής.

Τέλος, μια αστοχία από κόπωση συμβαίνει με την έναρξη και τη διάδοση ρωγμών σε ένα υλικό που υπόκειται κυκλική φόρτιση (δηλαδή, επαναλαμβανόμενες δυνάμεις). Η επιστήμη της θραυστομηχανικής παρέχει ένα μέσο συσχέτισης των επιπέδων της έντασης της τάσης με την διάδοση των ρωγμών διαφόρων σχημάτων. Ως εκ τούτου, είναι λογικό ότι οι μέθοδοι της θραυστομηχανικής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν την συμπεριφορά κόπωσης όλων των υλικών. (Gedeon, 2014)



Εικόνα 10 : Πολικές συντεταγμένες στο άκρο της ρωγμής.

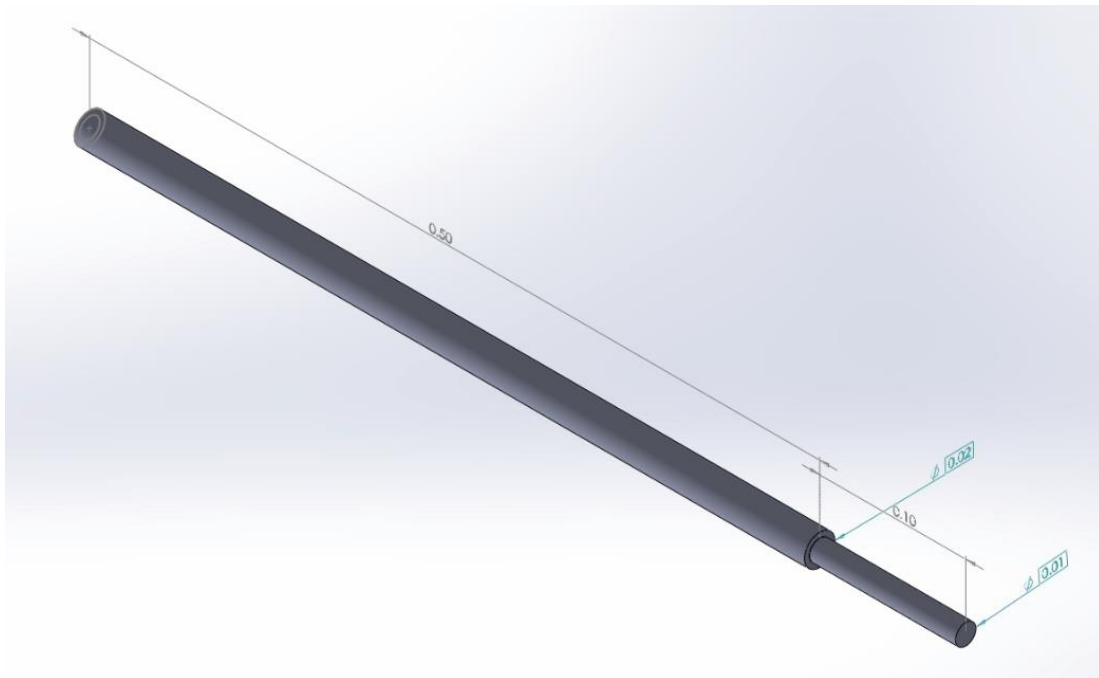
1.1 Διαδικασία Δημιουργίας Γεωμετρικού Μοντέλου

Το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

Πίνακας 3 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου.

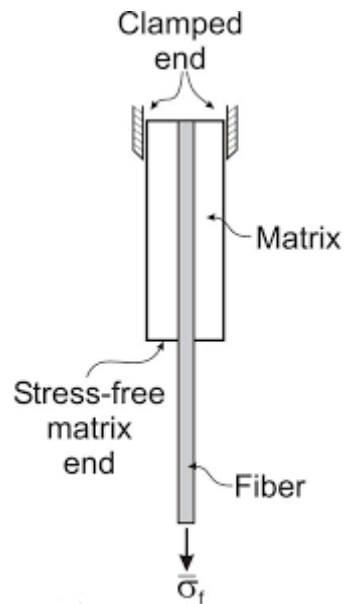
Χαρακτηριστικά	Μονάδες (Units)
Μήκος Ύνας	500 [μm]
Μήκος Μήτρας	500 [μm]
Ακτίνα Ύνας	7 [μm]
Ακτίνα Μήτρας	10.5 [μm]
Ογκομετρικό κλάσμα Ύνας	0.45
Ογκομετρικό κλάσμα Μήτρας	0.55

Το γεωμετρικό μοντέλο αυτό με τα παραπάνω χαρακτηριστικά κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα σχεδίασης SOLIDWORKS, επομένως, το τρισδιάστατο σχήμα που θα προσομοιαστεί είναι το παρακάτω :



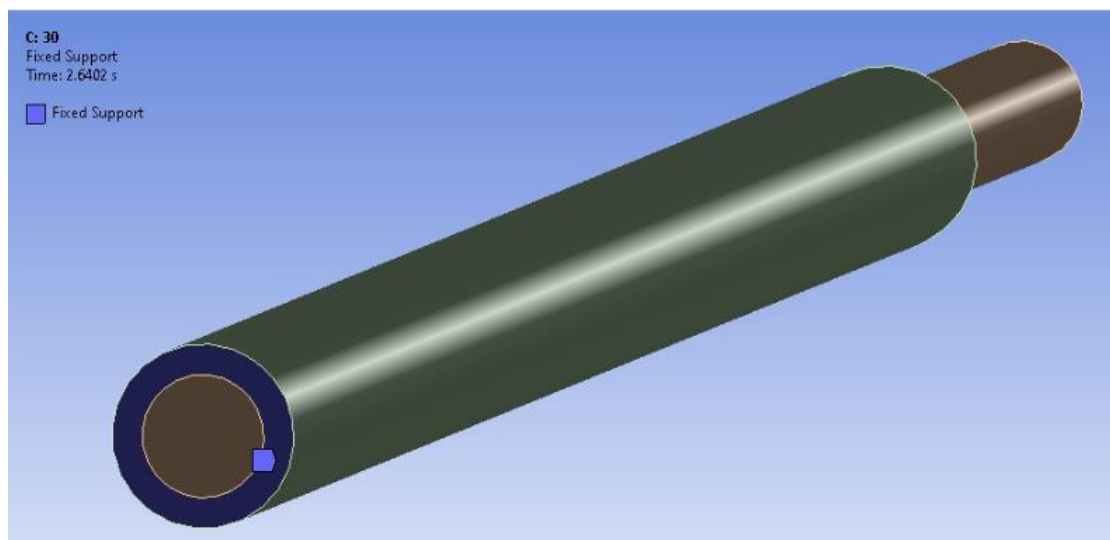
Εικόνα 11 : Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Μοντέλου από το πρόγραμμα Solidworks.

Στο γεωμετρικό μοντέλο υπάρχουν οριακές συνθήκες καθώς πραγματοποιείται η εκρίζωση της ίνας όπου θα πρέπει να έχει τους παρακάτω περιορισμούς και προϋποθέσεις.

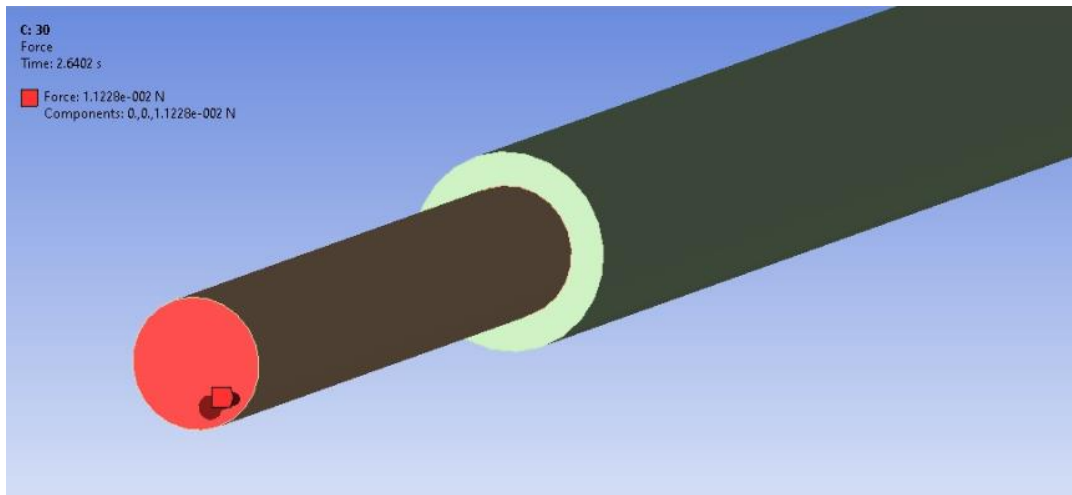


Εικόνα 12 : Οριακές συνθήκες για την εκρίζωση της ίνας.

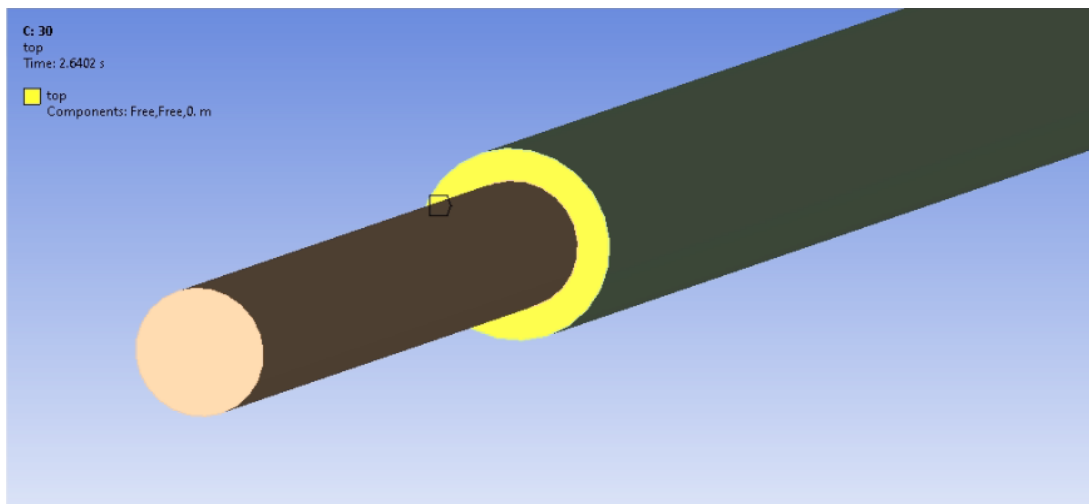
Επομένως, οι οριακές συνθήκες που έχουν εφαρμοστεί στο μοντέλο είναι οι εξής :



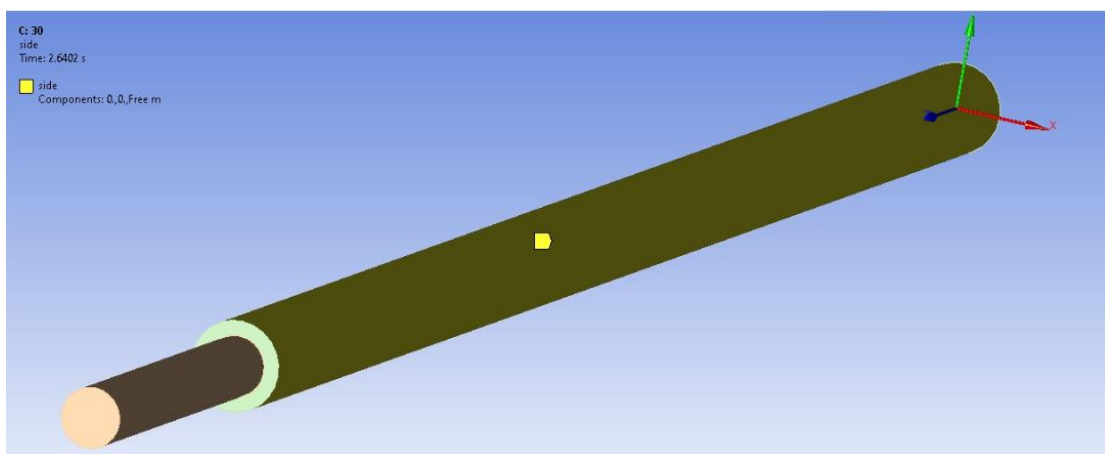
Εικόνα 13 : Πάκτωση του πίσω μέρους της μήτρας.



Εικόνα 14 : Δύναμη εκρίζωσης στο άκρο της ίνας.

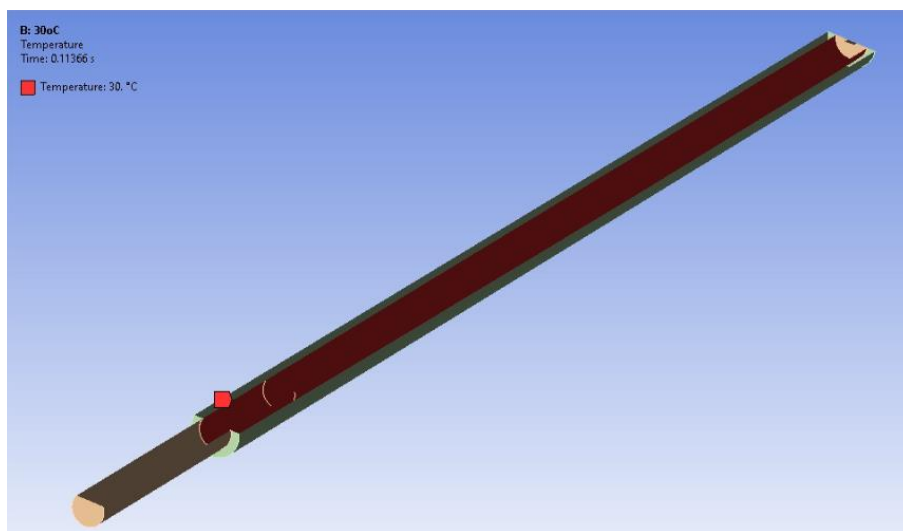


Εικόνα 15 : Μετατόπιση της μπροστινής επιφάνειας της μήτρας.

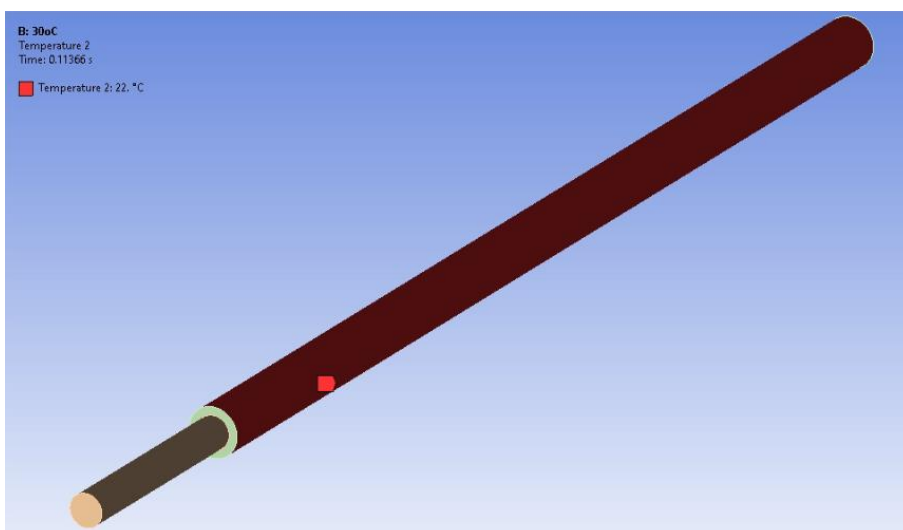


Εικόνα 16 : Μετατόπιση των τοιχωμάτων της μήτρας.

Όσον αφορά τα θερμικά φορτία τα οποία επιβάλλονται στο μοντέλο, αυτά είναι η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια και η θερμοκρασία στο περιβάλλον. Αυτές οι καταπονήσεις έχουν την παρακάτω μορφή :



Εικόνα 17 : Επιβαλλόμενη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια.



Εικόνα 18 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος.

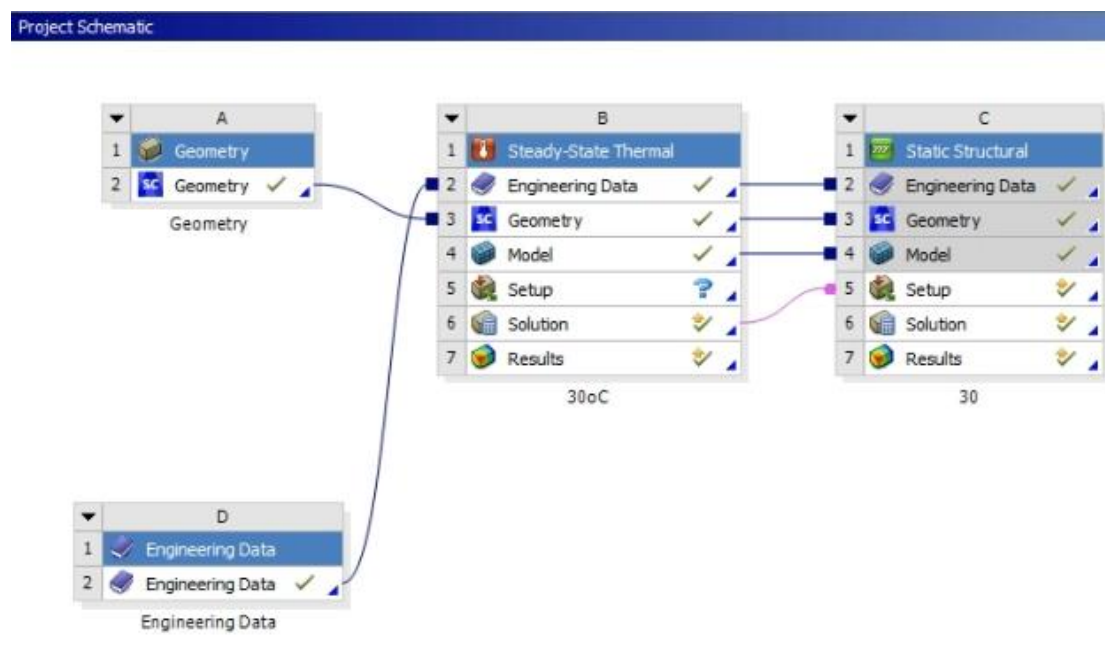
Κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 22°C αλλάζει κάθε φορά η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια. Οι τιμές που θα εφαρμοστούν είναι οι εξής :

Πίνακας 4 : Θερμοκρασίες Διεπιφάνειας.

Θερμοκρασίες Διεπιφάνειας
30 °C
60 °C
90 °C
120 °C

1.2 Διαδικασία Προγραμματισμού ANSYS Workbench.

Η διάταξη στο περιβάλλον του προγράμματος θα έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 19 : Πειραματική διάταξη προγράμματος.

Στην παρούσα διάταξη υπάρχει ένα μοντέλο το οποίο συνδυάζει θερμική και μηχανική καταπόνηση. Δηλαδή, στη μελέτη του Steady State Thermal λύνεται η μελέτη αγωγής της θερμότητας. Έπειτα τα δεδομένα αυτά εισάγονται στην μελέτη Static Structural όπου μαζί με την δύναμη εκρίζωσης αποτελούν τις φορτίσεις που προκαλούν την εκρίζωση της ίνας.

Οι γεωμετρίες που δημιουργήθηκαν, προκειμένου να γίνουν λειτουργικές στο περιβάλλον του ANSYS Workbench πρέπει να εισαχθούν στην επιλογή Geometry τόσο της μελέτης Steady State Thermal όσο και της μελέτης Static Structural. Τα βήματα τα οποία πρέπει να γίνουν για την εισαγωγή της γεωμετρίας είναι δεξί κλικ στην επιλογή Geometry → Insert → CAD geometry.

Έπειτα, πρέπει να οριστούν τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την μήτρα, την ίνα και την διεπιφάνεια. Στις περιπτώσεις όπου η βιβλιοθήκη των υλικών του προγράμματος δεν περιέχει τα υλικά που χρειάζονται, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας αυτών, εφόσον βρούμε τις απαραίτητες ιδιότητες τους στο διαδίκτυο. Τρεις είναι οι περιπτώσεις στις οποίες τα υλικά που χρειάζονται δεν υπάρχουν στην βιβλιοθήκη του ANSYS, και αυτές είναι για την ίνα άνθρακα T300 (230 GPa), την ίνα άνθρακα T700S (230 GPa) και την ίνα T800S (294 GPa).

Τα χαρακτηριστικά αυτών ελήφθησαν ως εξής :

T300 (230 GPa) :

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.76 g/cc	0.0636 lb/in ³	TY-030B-02
Filament Diameter	7.0 μm	7.0 μm	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength	3530 MPa	512000 psi	TY-030B-01
Elongation at Break	1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Tensile Modulus	230 GPa	33400 ksi	TY-030B-01
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00170 ohm-cm	0.00170 ohm-cm	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	-0.410 μm/m-°C	-0.228 μin/in-°F	
Specific Heat Capacity	0.777 J/g-°C	0.186 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	10.5 W/m-K	72.5 BTU-in/hr-R ² -°F	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	>= 93 %	>= 93 %	
Descriptive Properties			
Composition, Na + K		<50 ppm	
Yield		198 g/1000m	3K, TY-030B-03
		396 g/1000m	6K, TY-030B-03
		66 g/1000m	1K, TY-030B-03

T700S (230 GPa) :

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.80 g/cc	0.0650 lb/in ³	TY-030B-02
Filament Diameter	7.0 μm	7.0 μm	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength	4900 MPa	711000 psi	TY-030B-01
Elongation at Break	2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Tensile Modulus	230 GPa	33400 ksi	TY-030B-01
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00160 ohm-cm	0.00160 ohm-cm	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	-0.380 μm/m-°C	-0.211 μin/in-°F	
Specific Heat Capacity	0.752 J/g-°C	0.180 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	9.62 W/m-K	66.7 BTU-in/hr-R ² -°F	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	>= 93 %	>= 93 %	
Descriptive Properties			
Composition, Na + K		<50 ppm	
Yield		1650 g/1000m	24K, TY-030B-03
		400 g/1000m	6K, TY-030B-03
		800 g/1000m	12K, TY-030B-03

T800S (294 GPa) :

Physical Properties	Metric	English
Density	1.80 g/cc	0.0650 lb/in ³
Filament Diameter	5.0 μm	5.0 μm
Mechanical Properties	Metric	English
Tensile Strength	5880 MPa	853000 psi
Elongation at Break	2.0 %	2.0 %
Tensile Modulus	294 GPa	42600 ksi
Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.000130 ohm-cm	0.000130 ohm-cm
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	-0.400 μm/m-°C	-0.222 μin/in-°F
Specific Heat Capacity	0.740 J/g-°C	0.177 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	11.3 W/m-K	78.3 BTU-in/hr-ft ² -°F
Component Elements Properties	Metric	English
Carbon, C	>= 96 %	>= 96 %
Descriptive Properties		
Composition, Na + K		<50 ppm
Yield		1030 g/1000m 515 g/1000m

Στο υλικό της διεπιφάνειας πρέπει να εισαχθούν χαρακτηριστικά όπως ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η θερμική αγωγιμότητα και οι τιμές των κρίσιμων ρυθμών απελευθέρωσης ενέργειας. Οι τιμές για τον συντελεστή θερμικής διαστολής και την θερμική αγωγιμότητα θα είναι οι ίδιες με εκείνες του υλικού της εκάστοτε μήτρας ενώ οι τιμές των κρίσιμων ρυθμών απελευθέρωσης ενέργειας θα προκύπτουν κάθε φορά από την εξίσωση (20).

Στις οριακές συνθήκες που έχουν οριστεί, συγκαταλέγεται και η δύναμη εκρίζωσης F_d , η οποία σύμφωνα με την εξίσωση (19) θα είναι διαφορετική για κάθε συνδυασμό με διαφορετικό υλικό μήτρας. Επειδή υπάρχουν μόνο δύο διαφορετικά υλικά μήτρας (ABS και PS) οι τιμές που θα πάρει η δύναμη εκρίζωσης για τη χρονική στιγμή του 1 sec θα είναι οι εξής :

Πίνακας 5 : Δυνάμεις Εκρίζωσης Ένας F_d .

Υλικά Μήτρας	ABS	PS
Δύναμη Εκρίζωσης F_d	6.37E-03 [N]	5.31E-03 [N]

Κατά τη διάρκεια της εκρίζωσης ωστόσο, αυξάνεται σταδιακά η δύναμη ώσπου μετά από ένα σημείο παραμένει σταθερή. Συγκεκριμένα, και στις δύο περιπτώσεις για διαφορετικές δυνάμεις εκρίζωσης η σταδιακή αύξηση στις τιμές θα έχει τις παρακάτω μορφές :

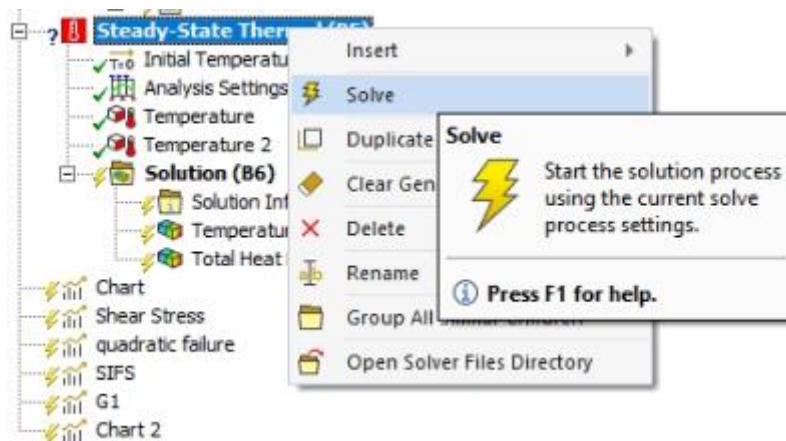
Tabular Data					
	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> X [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Y [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Z [N]
1	1	0.	0.	0.	0.
2	1	1.	0.	0.	6.369e-003
3	1	3.5	0.	0.	1.3774e-002
4	1	5.	0.	0.	1.3774e-002

Εικόνα 20 : Τιμές δύναμης εκρίζωσης για υλικό μήτρας ABS.

Tabular Data					
	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> X [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Y [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Z [N]
1	1	0.	0.	0.	0.
2	1	1.	0.	0.	5.307e-003
3	1	3.5	0.	0.	1.3774e-002
4	1	5.	0.	0.	1.3774e-002

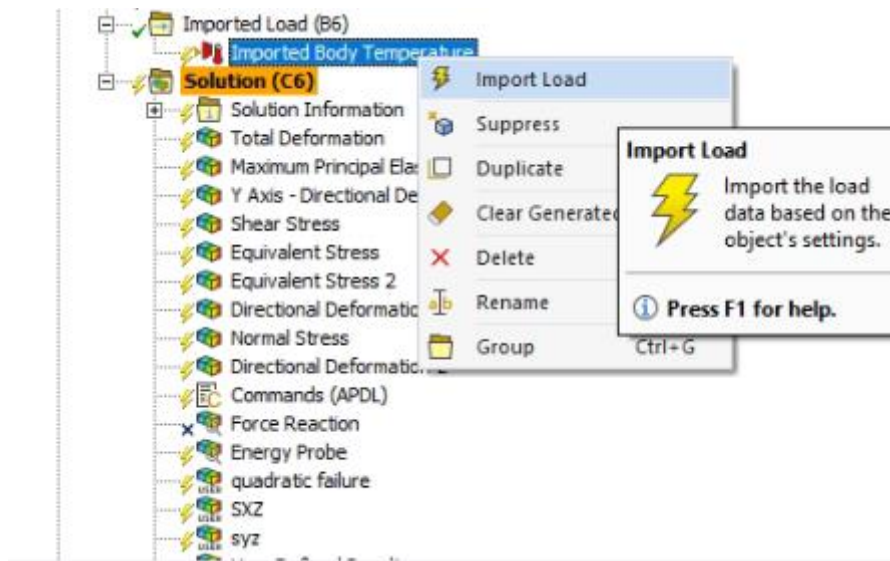
Εικόνα 21 : Τιμές δύναμης εκρίζωσης για υλικό μήτρας PS.

Επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή του θερμικού φορτίου στο υπό μελέτη δοκίμιο. Πηγαίνοντας στο παράθυρο του Outline όπου υπάρχει το δέντρο με τα αναλυτικά δεδομένα, στο Steady State Thermal πρέπει να γίνει η επιλογή Solve ώστε να προχωρήσει η μελέτη.



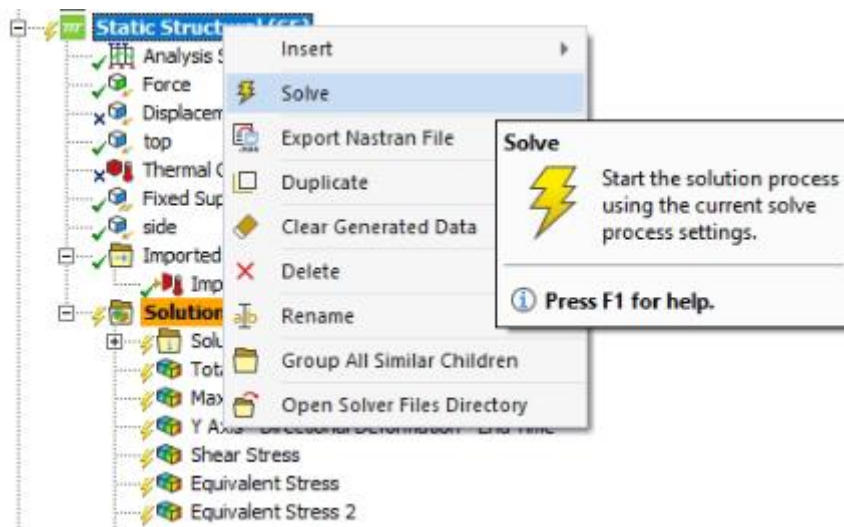
Εικόνα 22 : Επιλογή Solve στο Steady State Thermal.

Έπειτα, τα δεδομένα της μελέτης Steady State Thermal πρέπει να περαστούν στη μελέτη Static Structural, το οποίο το γίνεται με την επιλογή Import Thermal Load.



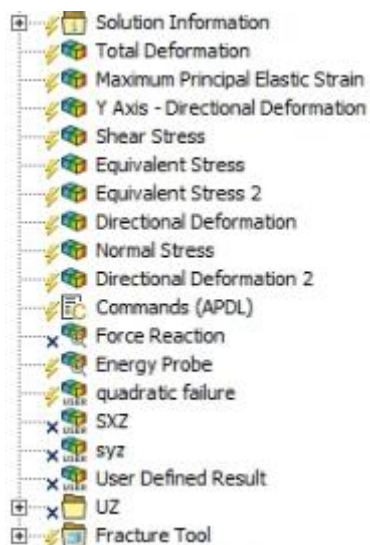
Εικόνα 23 : Εφαρμογή των λύσεων του Steady State Thermal στο Static Structural.

Τέλος, ώστε να λυθεί η μελέτη Static Structural πρέπει να επιλεγεί ξανά η επιλογή Solve.



Εικόνα 24 : Επιλογή Solve στο Static Structural.

Τα πρωτογενή στοιχεία τα οποία λαμβάνονται για τη στατική καταπόνηση είναι η ολική μετατόπιση της ίνας κατά τη διάρκεια της εκρίζωσης (Total Deformation):

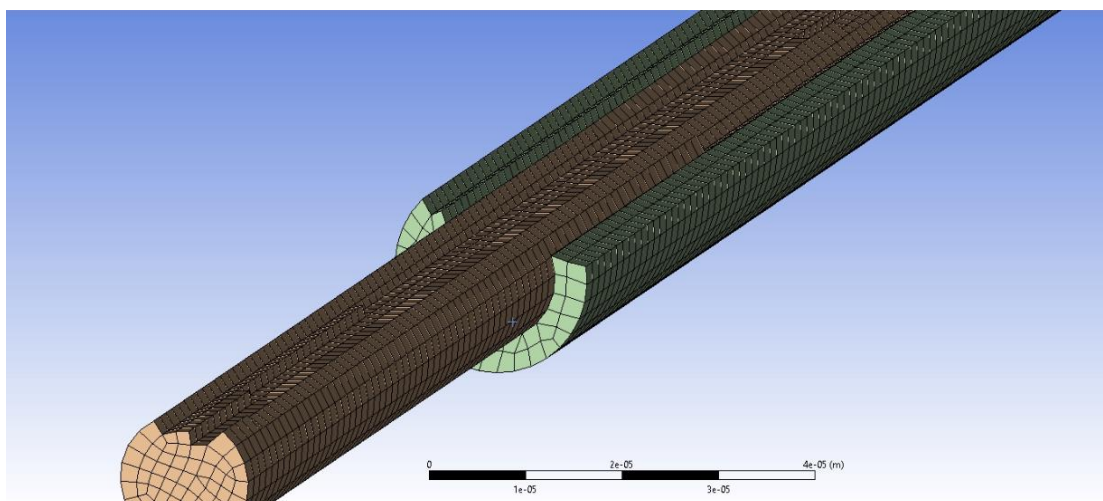


Εικόνα 25 : Αποτελέσματα που υπολογίζονται από τις στατικές καταπονήσεις.

Επομένως, τα υπόλοιπα αποτελέσματα προκύπτουν βάση της ολικής μετατόπισης της ίνας.

1.3 Διακριτοποίηση (Mesh) Γεωμετρικού Μοντέλου

Η διακριτοποίηση (mesh) του δοκιμίου έχει την εξής μορφή :



Εικόνα 26 : Διακριτοποίηση (Discretization) του γεωμετρικού μοντέλου.

Η διακριτοποίηση της ίνας και της μήτρας αποτελείται από πρισματικά 8-κομβικά στοιχεία, με 3 βαθμούς ελευθερίας κίνησης στον κάθε κόμβο.

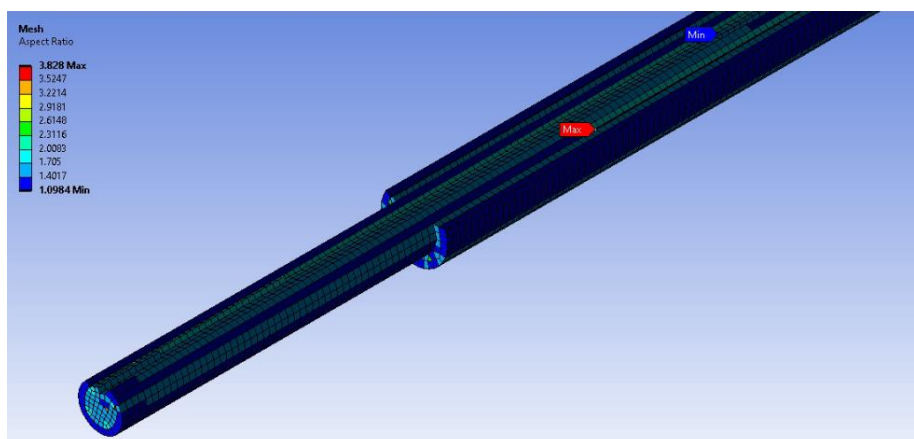
Η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής :

Πίνακας 6 : Στοιχεία Πλέγματος (Mesh).

	Συνήθεις Περιπτώσεις	
Κομμάτι (Part)	Μέγεθος Στοιχείων	Συνολικός Αριθμός Στοιχείων
Μήτρα	2E-03 [mm]	
Ίνα	2E-03 [mm]	
Ολικό Σχήμα	2E-03 [mm]	31,218

Η ποιότητα του πλέγματος μπορεί να αποδοθεί από τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Aspect Ratio :



Εικόνα 27 : Λόγος Διαστάσεων (Aspect Ratio) γεωμετρικού μοντέλου.

Ο λόγος των διαστάσεων (Aspect Ratio) ποσοτικοποιεί την ποιότητα των στοιχείων πλέγματος, με τον αριθμό 1 να υποδηλώνει το τέλειο σχήμα του στοιχείου, ενώ το σχήμα θα είναι χειρότερο για υψηλότερο λόγο διαστάσεων. Από την παραπάνω εικόνα είναι εμφανές πως το πλεόνασμα των στοιχείων πλέγματος εμπίπτουν στο περιθώριο το οποίο καθορίζει ένα πλέγμα ‘καλό’.

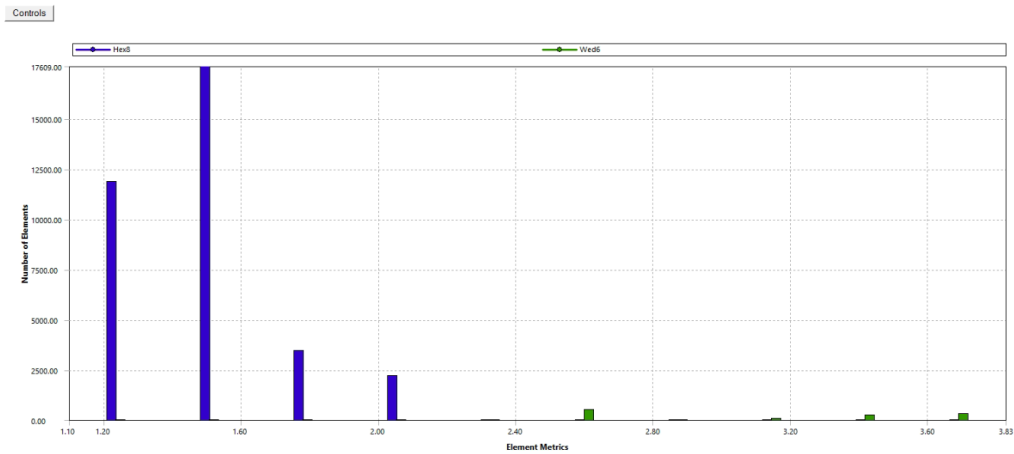
Τύπος υπολογισμού του παραπάνω όρου είναι ο εξής :

$$A. R = \frac{\text{Μεγάλο Μήκος Στοιχείου}}{\text{Μικρό Μήκος Στοιχείου}} \quad (26)$$

(EngMorph, 2022)

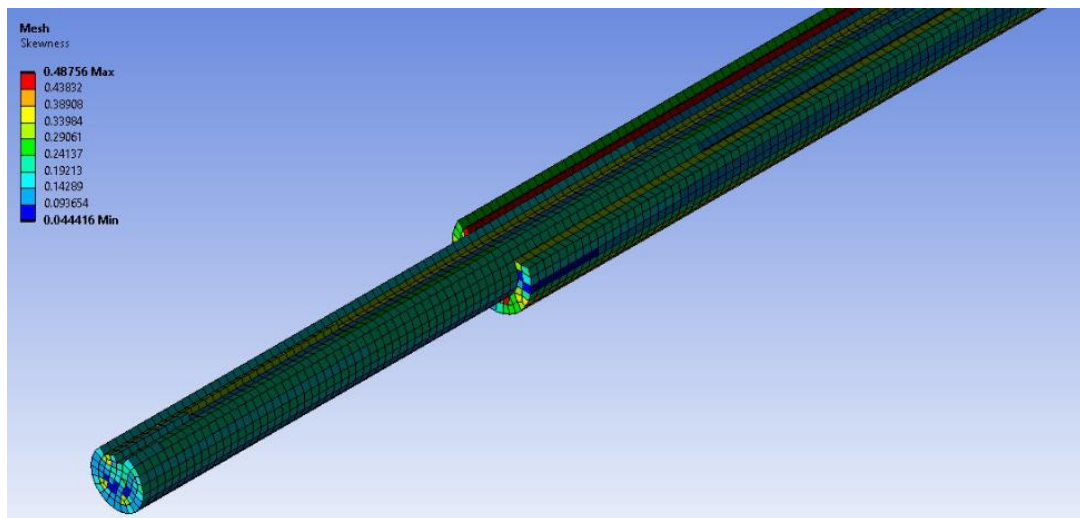
Από το παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως ο μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων του πλέγματος έχουν τιμή Aspect Ratio 1.51.

Ο μέσος όρος για το μέγεθος αυτό είναι 1.53.



Εικόνα 28 : Ραβδόγραμμα πλήθους στοιχείων πλέγματος και λόγου διαστάσεων (Aspect Ratio).

- Skewness :



Εικόνα 29 : Λοξότητα (Skewness) γεωμετρικού μοντέλου.

Ο όρος λοξότητα (Skewness) είναι το γωνιακό μέτρο της ποιότητας του στοιχείου σε σχέση με τις γωνίες των ιδανικών τύπων στοιχείου. Αποτελεί ένα από τα κύρια μέτρα ποιότητας του πλέγματος στα πεπερασμένα στοιχεία και καθορίζει πόσο κοντά στο ιδανικό (δηλαδή, ισόπλευρο ή ισογώνιο) είναι ένα πρόσωπο (face) ή κελί (cell). Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι ο όρος του Skewness τόσο καλύτερο το πλέγμα. Από την παραπάνω εικόνα είναι εμφανές πως το πλεόνασμα των στοιχείων πλέγματος εμπίπτουν στα περιθώρια τα οποία καθορίζουν το πλέγμα ‘καλό’.

Τύπος υπολογισμού του παραπάνω όρου είναι ο εξής :

$$Skewness = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (27)$$

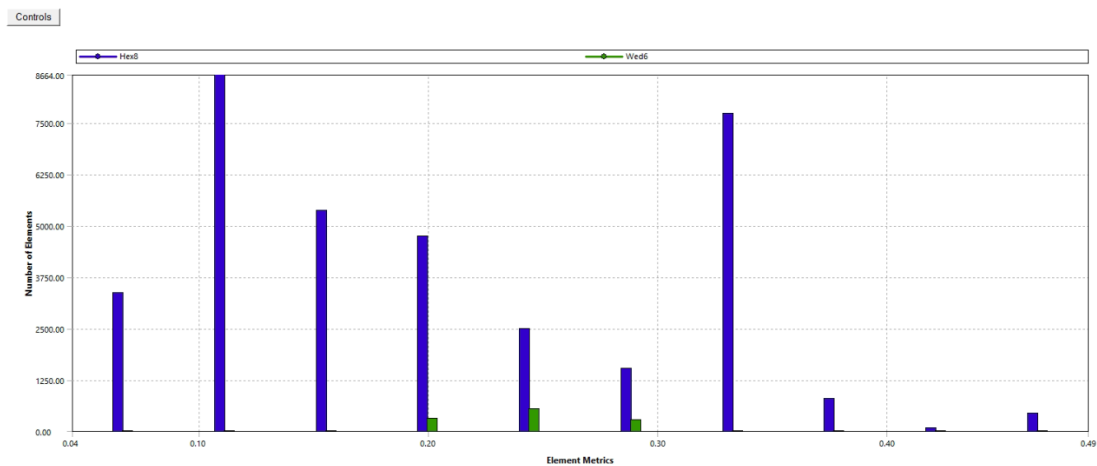
θ_{\max} : Μεγαλύτερη γωνία στο πρόσωπο (face) ή κελί (cell).

θ_{\min} : Μικρότερη γωνία στο πρόσωπο (face) ή κελί (cell).

θ_e : Γωνία για ισογωνιακή όψη στο πρόσωπο (face) ή κελί (cell) ($\theta_e=60^\circ$ για τρίγωνα και $\theta_e=90^\circ$ για τετράγωνα).

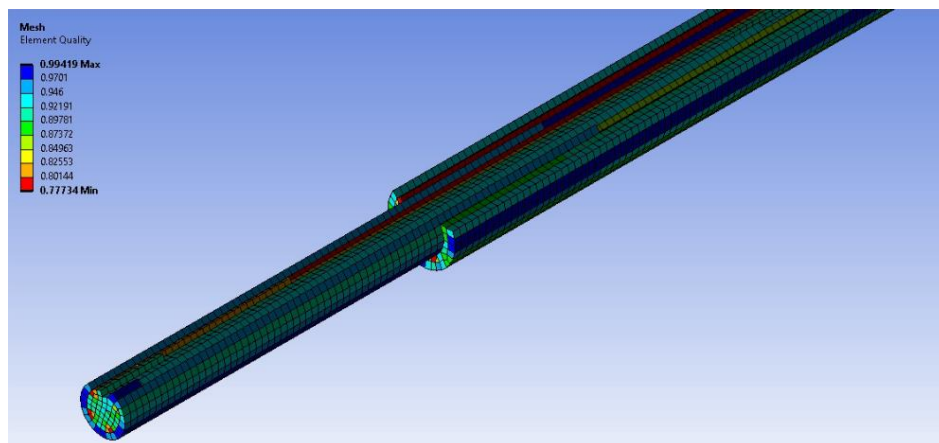
(EngMorph, 2022)

Επίσης, από το παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως ο μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων έχουν τιμή Skewness ίση με 0.11. Ο μέσος όρος για το μέγεθος αυτό είναι 0.20.



Εικόνα 30 : Ραβδόγραμμα πλήθους στοιχείων και λοξότητας (Skewness).

- Element Quality :



Εικόνα 31 : Ποιότητα Στοιχείων (Element Quality) γεωμετρικού μοντέλου.

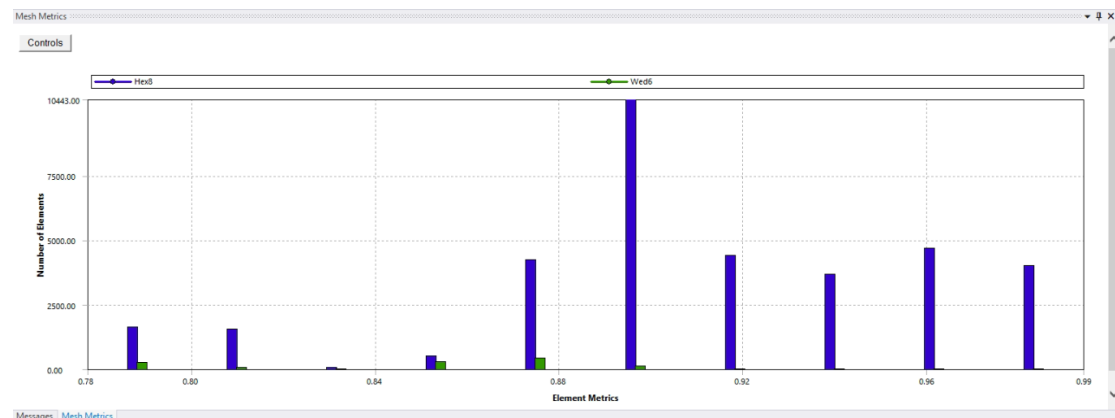
Η ποιότητα των στοιχείων πλέγματος μετρά την κανονικότητα των στοιχείων αυτών, δηλαδή, μια χαμηλή ποιότητα στοιχείων πλέγματος μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα σύγκλισης των στοιχείων μεταξύ τους. Ο όρος αυτός είναι μια αδιάστατη

ποσότητα και λαμβάνει τιμές μεταξύ των 0 και 1, όπου ο αριθμός 1 αντιπροσωπεύει ένα απολύτως κανονικό στοιχείο, ενώ ο αριθμός 0 ένα κακοφτιαγμένο στοιχείο. Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται πως η ποιότητα των στοιχείων του γεωμετρικού μοντέλου μπορεί να θεωρηθεί ‘καλή’.

(EngMorph, 2022)

Τέλος, από το παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως ο μεγαλύτερος αριθμός των στοιχείων έχουν τιμή για Element Quality ίση με 0.71.

Ο μέσος όρος για το μέγεθος αυτό είναι 0.90.



Εικόνα 32 : Διάγραμμα πλήθους στοιχείων και ποιότητας πλέγματος (Element Quality).

2.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για Διαφορετικές Θερμοκρασίες

Εισαγωγή

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην συμπεριφορά του υλικού έπειτα από εφαρμογή θερμικών φορτίων στη διεπιφάνεια.

Παράλληλα με τα θερμικά φορτία, ασκείται και μια εφελκυστική δύναμη στο άκρο της ίνας, η δύναμη εκρίζωσης F_d . Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται με την χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων στοιχείων μέσω του εμπορικού προγράμματος ANSYS Workbench 2022.

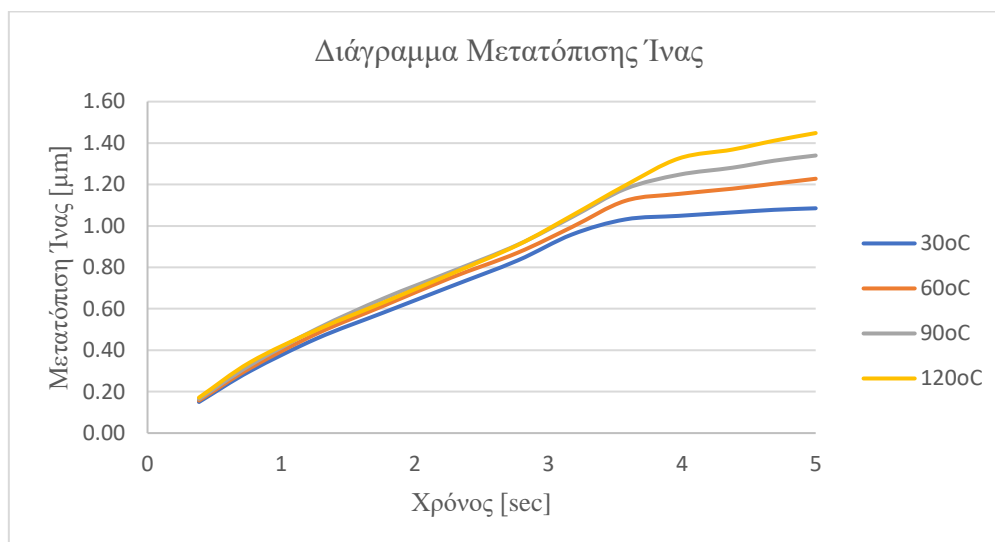
Το ενδιαφέρον στρέφεται στη διεπιφάνεια καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες καθώς επηρεάζει άμεσα την απόδοση μεταφοράς του θερμικού φορτίου μεταξύ ίνας και μήτρας, όπως επίσης καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τέτοιες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί από [(Hongxiao , Xiahui , Yugang , & Lingjie, 2018) ; (Asp, 1998) , (Jia, Yan, & Liu, 2012)].

Σχεδιασμός Προσομοίωσης

Οι παράμετροι οι οποίες θα αλλάζουν σε αυτή την μελέτη είναι οι θερμοκρασίες στη διεπιφάνεια (30°C, 60°C, 90°C και 120°C), καθώς θα γίνει εφαρμογή διαφορετικών υλικών τόσο στη μήτρα όσο και στην ίνα. Στο υλικό της διεπιφάνειας θα εισάγονται τα χαρακτηριστικά του υλικού της μήτρας (Συντελεστής θερμικής διαστολής και Θερμική αγωγιμότητα), καθώς και οι κρίσιμες τιμές των ERR που θα προκύπτουν από τους υπολογισμούς της εξίσωσης (20). Όσον αφορά τα υλικά της μήτρας και της ίνας, επιλέχθηκαν έπειτα από έρευνα με κριτήριο να έχουν υψηλές θερμομηχανικές ιδιότητες. Επίσης, επιλέχθηκαν δύο ίνες άνθρακα με Μέτρο Ελαστικότητας τα 230 GPa και μια με 294 GPa, ενώ για την μήτρα επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά πλαστικά, το ABS και το PS. Έπειτα από την εφαρμογή όλων αυτών των παραμέτρων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

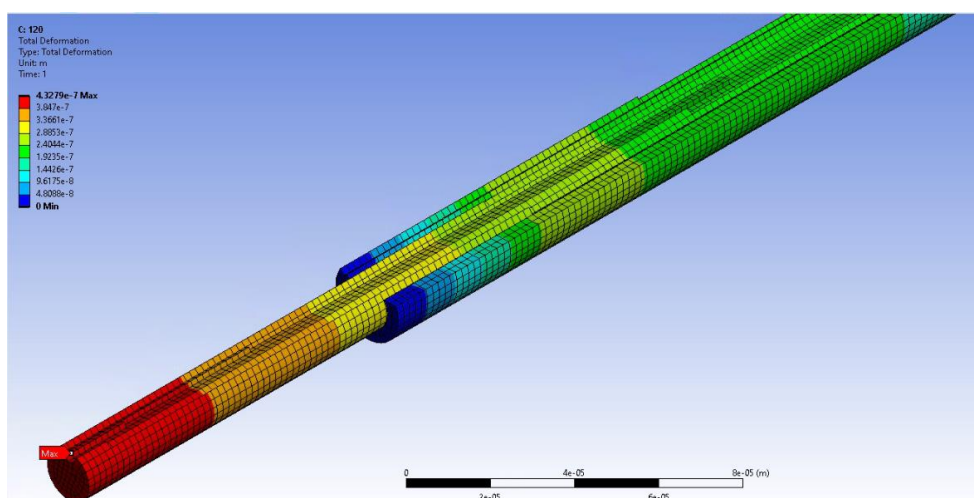
2.1.1 Matrix : PS – Fiber : T800S (294 GPa)

Ως υλικό της μήτρας χρησιμοποιείται το Polystyrene (PS), επομένως τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για την συμπεριφορά των συνδυασμών του είναι τα παρακάτω.



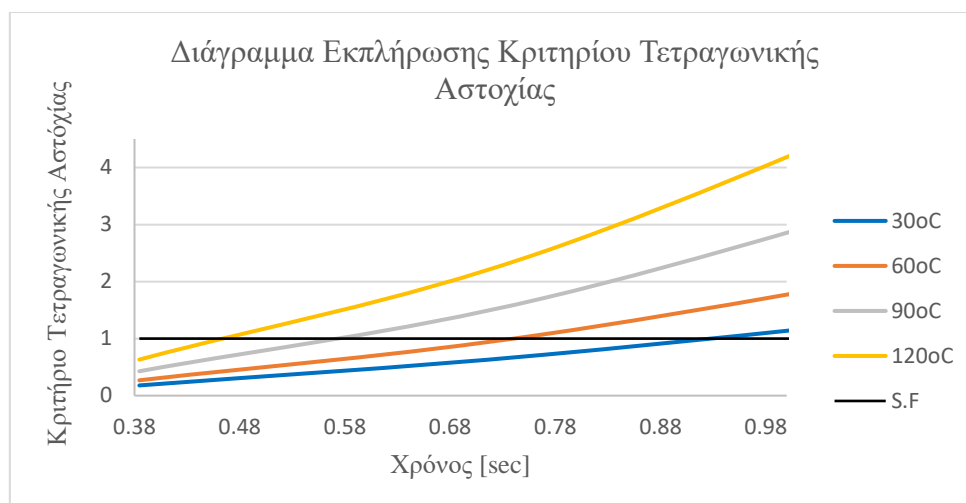
Διάγραμμα 1 : PS-T800S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Το διάγραμμα αυτό δείχνει το τελικό μήκος της ίνας έπειτα από την διαδικασία εκρίζωσής της για την εκάστοτε θερμοκρασία. Η μετατόπιση της ίνας στους 120°C είναι 23% μεγαλύτερη από ότι στους 30°C. Η αύξηση της θερμοκρασίας αποσκοπεί στην ευκολότερη αξονική μετατόπιση της ίνας, το όποιο φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα πως επιτυγχάνεται.



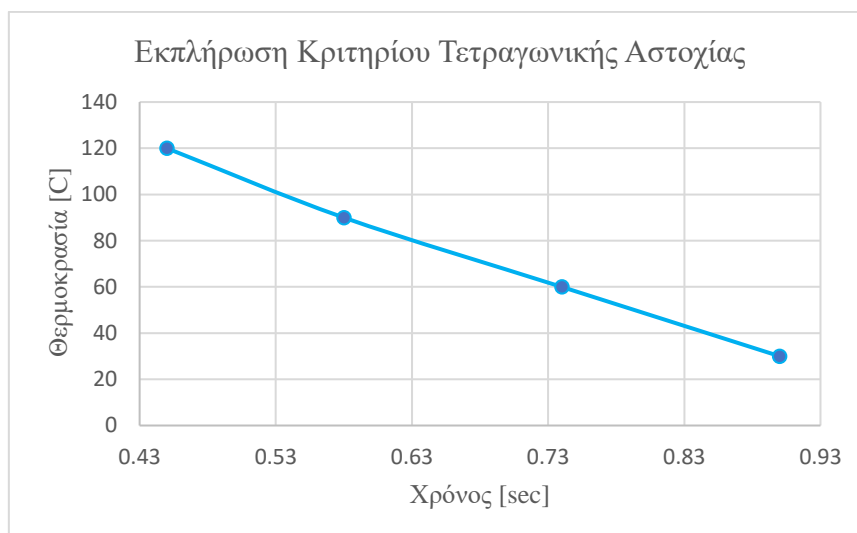
Εικόνα 33 : Οπτικό αποτέλεσμα παραμόρφωσης για 120oC για PS-T800S.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας δίνει τα εξής αποτελέσματα :



Διάγραμμα 2: PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

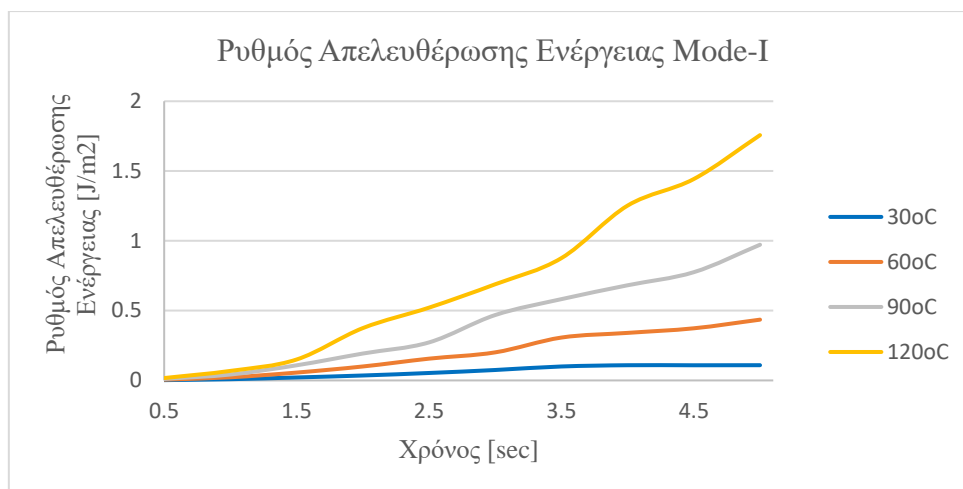
Το διάγραμμα αυτό δείχνει την χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμής, δηλαδή, το σημείο τομής της ευθείας του συντελεστή ασφαλείας 1 με την καμπύλη τετραγωνικής αστοχίας της εκάστοτε θερμοκρασίας. Έχει την συμπεριφορά που αναμενόταν, καθώς παρατηρείται πως η συντομότερη έναρξη της ρωγμής συμβαίνει για τη θερμοκρασία των 120°C. Το ίδιο φαίνεται αναλυτικότερα και στο παρακάτω διάγραμμα.



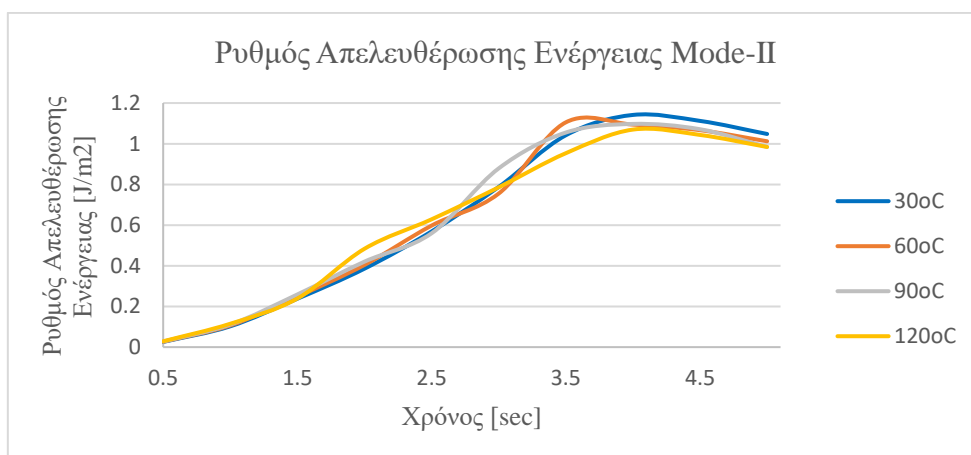
Διάγραμμα 3: PS-T800S / Χρονική στιγμή εκπλήρωσης κριτηρίου τετραγωνικής αστοχίας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Είναι εμφανές πως με την αύξηση της θερμοκρασίας εκπληρώνεται πιο σύντομα το κριτήριο. Με την αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια το πλαστικό θα παραμορφωθεί ευκολότερα, επομένως, θα επιτρέψει και την έναρξη της ρωγμής γρηγορότερα.

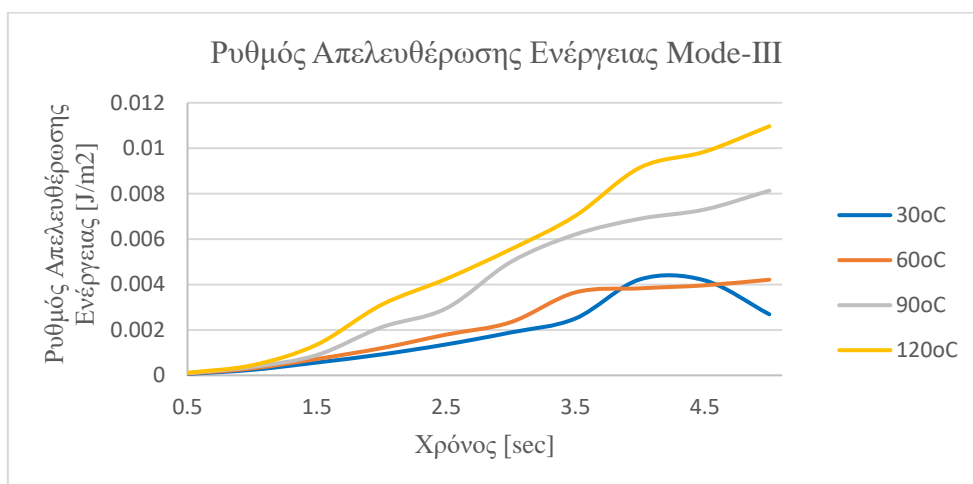
Σημαντικός είναι και ο ρυθμός απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας κατά τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 4 : PS-T800S / ERR GI για διαφορετικές θερμοκρασίες.



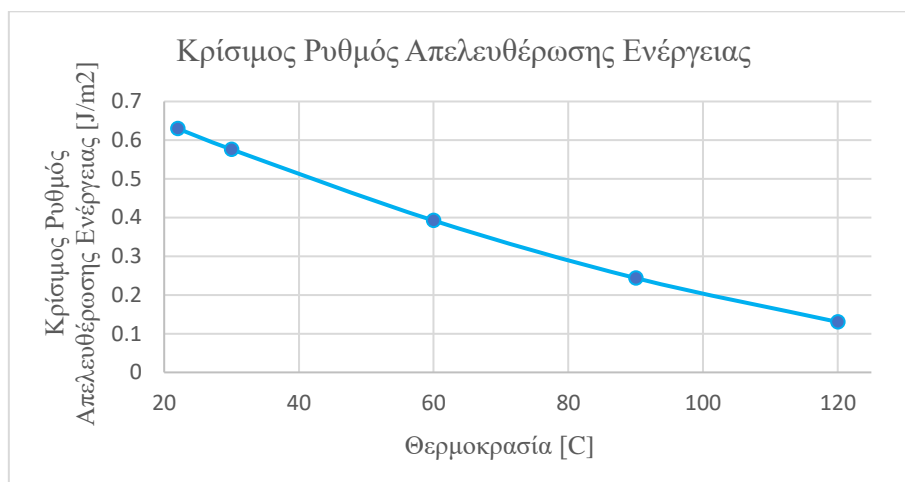
Διάγραμμα 5 : PC-CF / ERR GII για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 6 : PC-CF / ERR GIII για διαφορετικές θερμοκρασίες.

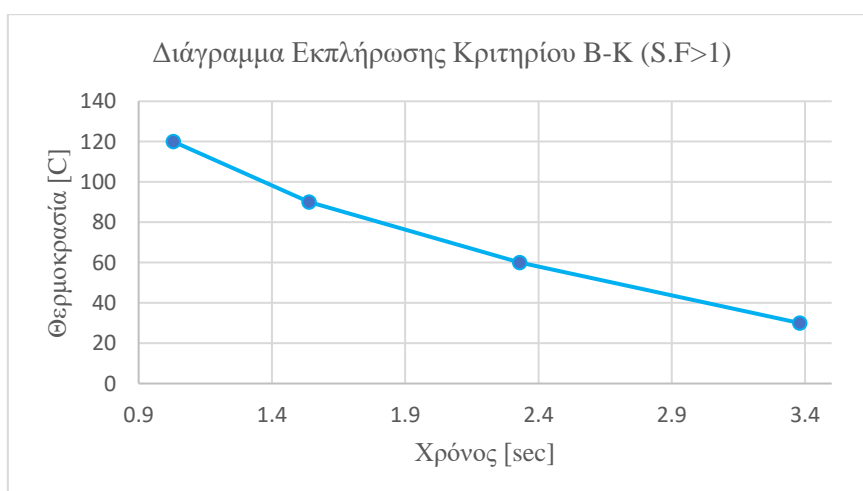
Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν τον ρυθμό με τον οποίο συμβαίνει η παραμόρφωση στον εκάστοτε τρόπο παραμόρφωσης. Όταν οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες, υπάρχει και μεγάλος ρυθμός έκλυσης παραμορφωσιακής ενέργειας. Δηλαδή, είναι αναμενόμενο σε υψηλές θερμοκρασίες να είναι ευκολότερη η παραμόρφωση του δοκιμίου.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (20) και (21) το διάγραμμα κρίσιμης τιμής του ρυθμού απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας έχει την παρακάτω μορφή :



Διάγραμμα 7 : PS-T800S / Κρίσιμη τιμή ERR για όλες τις θερμοκρασίες.

Η καμπύλη έχει την μορφή που αναμενόταν καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας μικραίνει και η τιμή της απαιτούμενης κρίσιμης ενέργειας παραμόρφωσης. Τέλος, απαραίτητη γραφική παράσταση είναι η εκπλήρωση του κριτηρίου Benzeggagh Kenane καθώς και η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό :

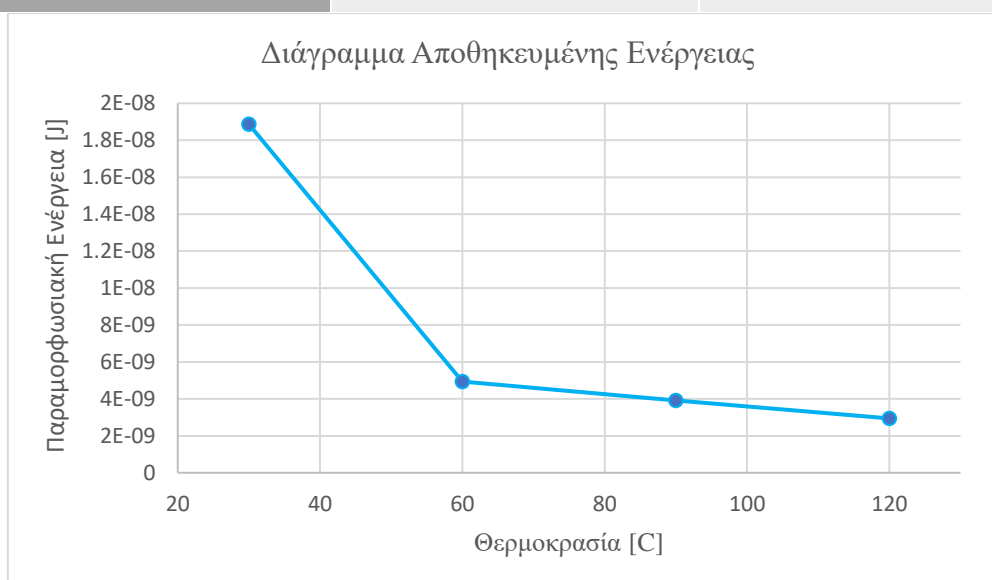


Διάγραμμα 8 : PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Το κριτήριο B-K λαμβάνει υπόψη τον συντελεστή ασφαλείας 1, επομένως, το παραπάνω διάγραμμα δείχνει την χρονική στιγμή την οποία η εξίσωση (19) λαμβάνει την τιμή 1. Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές πως με την αύξηση της θερμοκρασίας το κριτήριο εκπληρώνεται γρηγορότερα, το οποίο είναι λογικό καθώς σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχει γρηγορότερη διάδοση της ρωγμής.

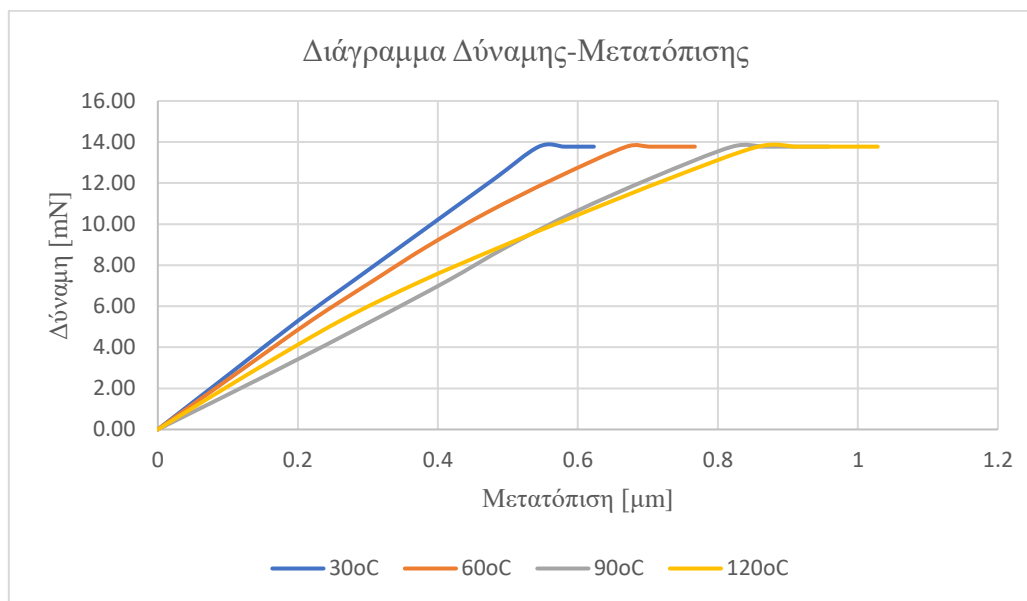
Πίνακας 7 : PS-T800S/Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Θερμοκρασίες	Χρόνος Εκπλήρωσης	Αποθηκευμένη Ενέργεια
30°C	3.38 sec	1.88E-08 [J]
60°C	2.33 sec	4.94E-09 [J]
90°C	1.54 sec	3.92E-09 [J]
120°C	1.03 sec	2.94E-09 [J]



Διάγραμμα 9 : PS-T800S / Αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή διάδοσης της ρωγμής σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα υπολογίζεται ως το άθροισμα των ενεργειών παραμόρφωσης (Strain Energy) έως την χρονική στιγμή εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh-Kennane. Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει την ενέργεια που απορροφά το σύστημα κατά την διαδικασία εκρίζωσης της ίνας έως την στιγμή που ξεκινάει η διάδοση τα ρωγμής, δηλαδή, είναι το συνδυασμένο έργο της εφελκυστικής δύναμης με το θερμικό έργο στην κάθε θερμοκρασία. Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως στη θερμοκρασία των 120°C η αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια είναι η μικρότερη. Επομένως, η ενεργειακά βέλτιστη περίπτωση για τον διαχωρισμό της ίνας από την μήτρας είναι στους 120°C.



Διάγραμμα 10 : PS-T800S / Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές πως με την αύξηση της δύναμης εκρίζωσης αυξάνεται και η μετατόπιση του σημείου επαφής μεταξύ ίνας-μήτρας. Η περιοχή του γραφήματος από την αρχή των αξόνων έως το σημείο της δύναμης εκρίζωσης στην οποία ξεκινάει η διάδοση της ρωγμής (F_d) είναι η γραμμική περιοχή του γραφήματος. Επίσης, γίνεται αντιληπτό πως για μεγαλύτερη θερμοκρασία η μετατόπιση αυτή θα αυξάνεται, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς σε υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνεται η δυσθραυστότητα, άρα οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Από τα παραπάνω δεδομένα μπορεί να υπολογιστεί και ο όρος της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας. Ο όρος αυτός υπολογίζεται από την σχέση (9) και λαμβάνει υπόψη την εκάστοτε εφελκυστική δύναμη F_d την χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμής και το μήκος επαφής L_e (Embedded length).

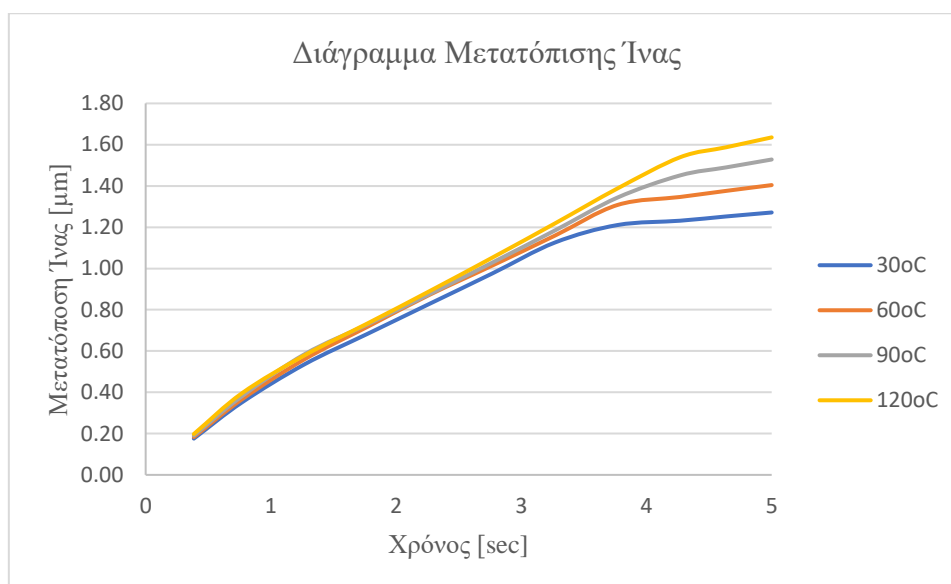
Πίνακας 8 : PS-T800S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
30°C	67.85
60°C	50.57
90°C	37.17
120°C	27.44

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας.

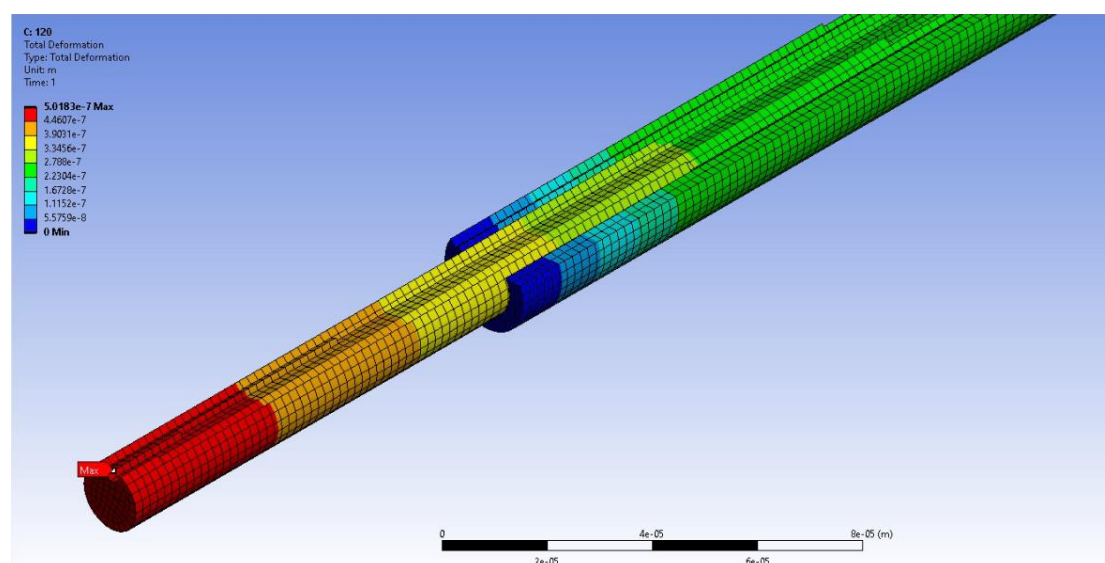
2.1.2 Matrix : PS – Fiber : T300 (230 GPa)

Ως υλικό μήτρας παραμένει το Polystyrene (PS), και αλλάζει ίνα του άνθρακα σε T300.



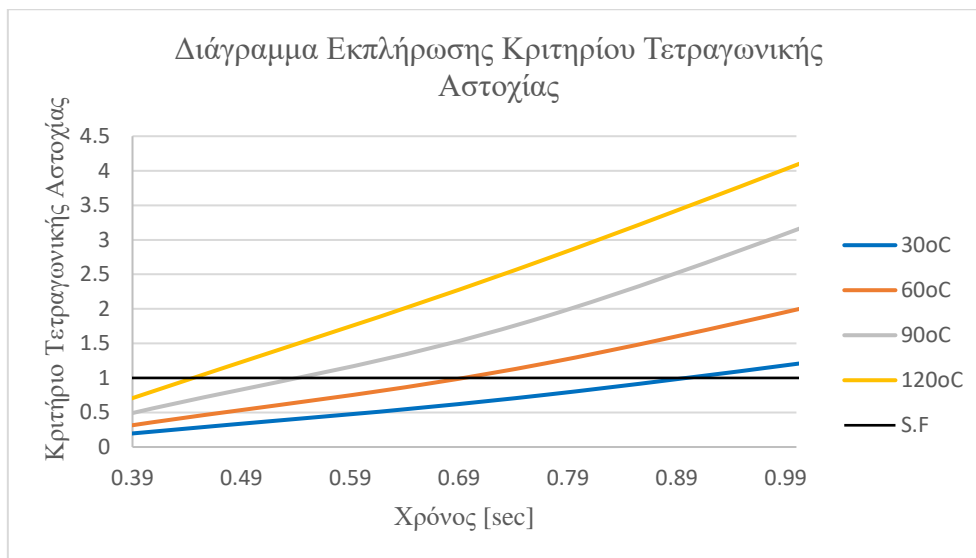
Διάγραμμα 11 : PS-T300 / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η μετατόπιση της ίνας στους 120°C είναι 22% μεγαλύτερη από ότι στους 30°C. Οι τιμές ήταν αναμενόμενες καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται πιο εύκολα την αξονική μετατόπισή της ίνας.



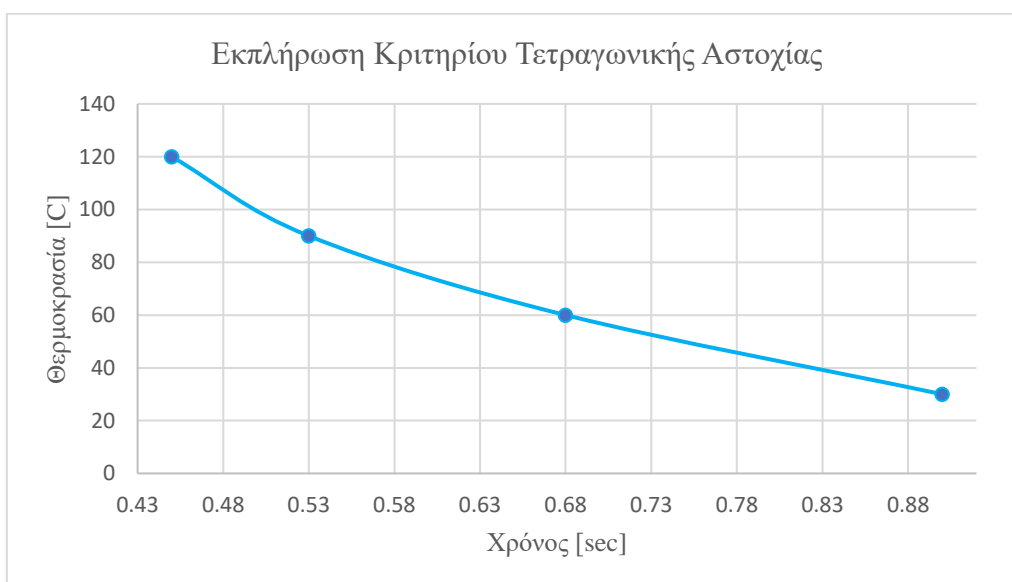
Εικόνα 34 : Οπτικό αποτέλεσμα παραμόρφωσης για 120oC για PS-T300.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας σε αυτή την περίπτωση δίνει τα εξής αποτελέσματα :



Διάγραμμα 12 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

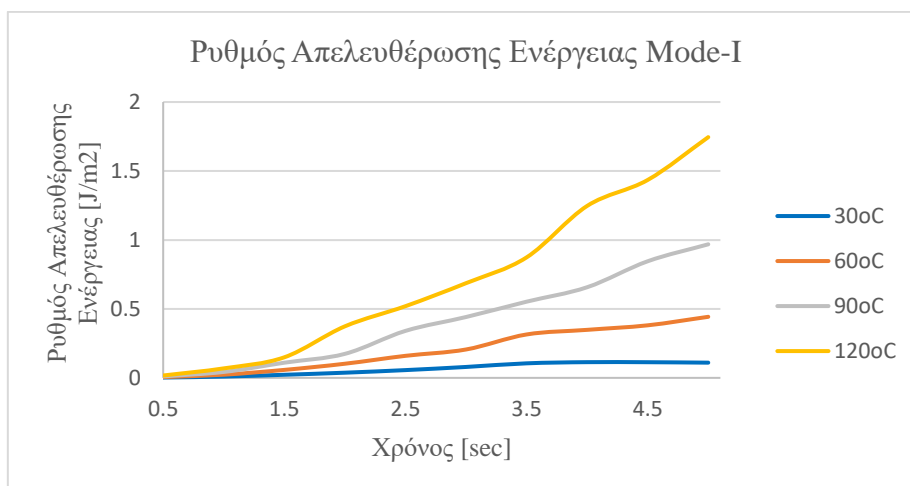
Οι τιμές συμπεριφέρονται με λογικό τρόπο, καθώς η συντομότερη έναρξη της ρωγμής συμβαίνει για τη θερμοκρασία των 120°C. Κάτι το οποίο φαίνεται πιο αναλυτικά στο παρακάτω διάγραμμα :



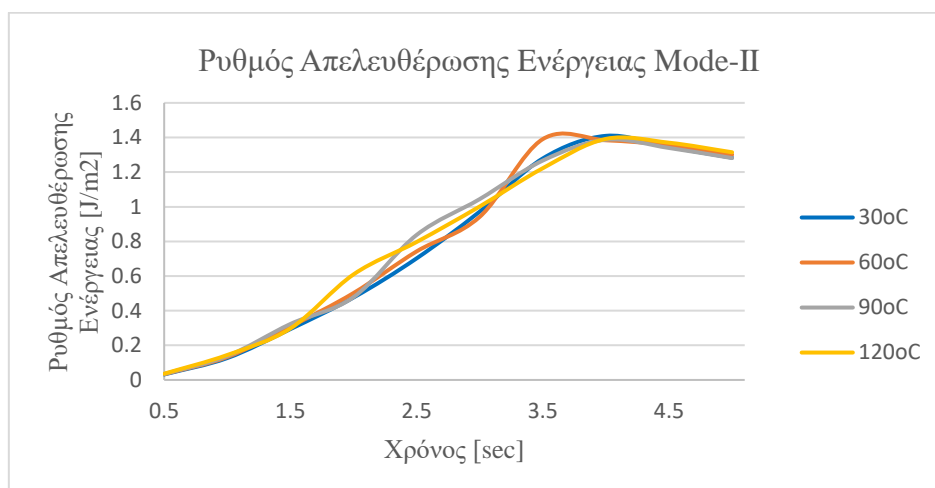
Διάγραμμα 13 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Είναι επίσης εμφανές πως με την αύξηση της θερμοκρασίας εκπληρώνεται πιο σύντομα το κριτήριο.

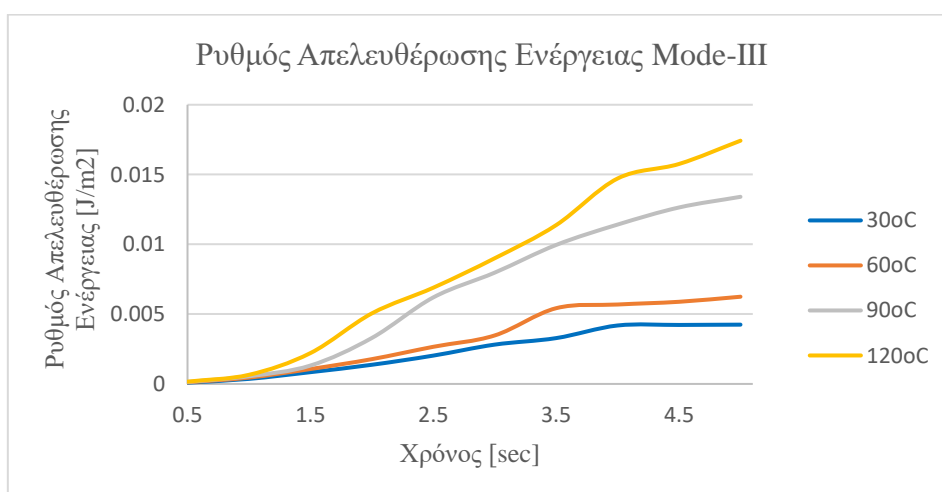
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 14 : PS-T300 / ERR GI για διαφορετικές θερμοκρασίες.



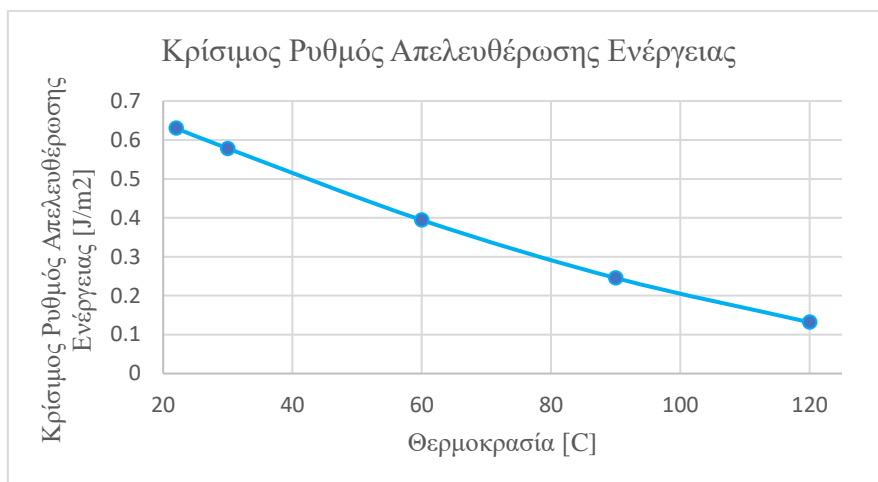
Διάγραμμα 15 : PS-T300 / ERR GII για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 16 : PS-T300 / ERR GIII για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Επίσης τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση έχουν την αναμενόμενη μορφή καθώς για μεγαλύτερες θερμοκρασίες τόσο πιο μεγάλο ρυθμό παραμόρφωσης θα υπάρχει στο σύστημα.

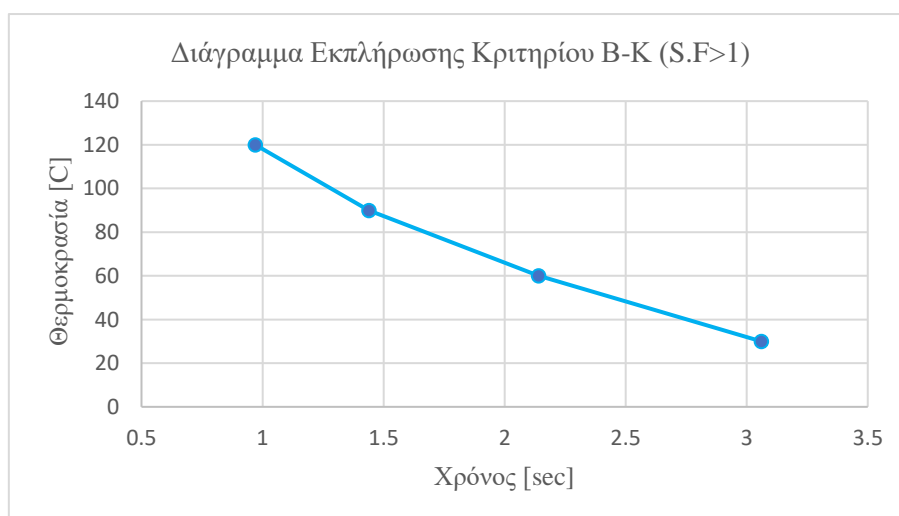
Η κρίσιμη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας έχει την παρακάτω μορφή :



Διάγραμμα 17 : PS-T300 / Κρίσιμη τιμή ERR για όλες τις θερμοκρασίες.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ έχει την αναμενόμενη η καμπύλη καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη κρίσιμη ενέργεια παραμόρφωσης.

Τέλος, απαραίτητη γραφική παράσταση είναι η εκπλήρωση του κριτηρίου Benzeggagh Kenane καθώς και η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό :

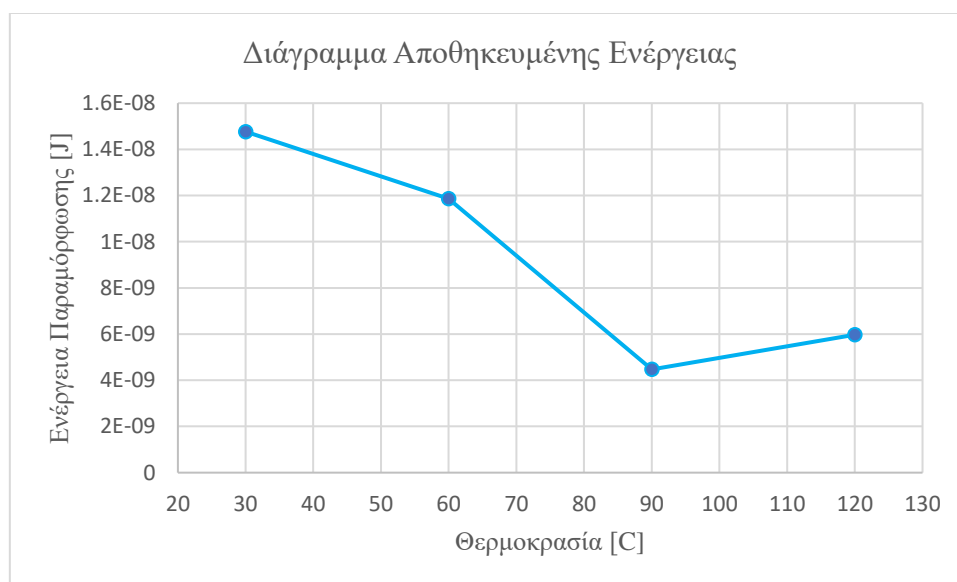


Διάγραμμα 18 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα πιο σύντομα θα διαδοθεί η ρωγμή για την θερμοκρασία των 120°C. Ωστόσο, οι ενέργειες που αποθηκεύονται στο σύστημα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

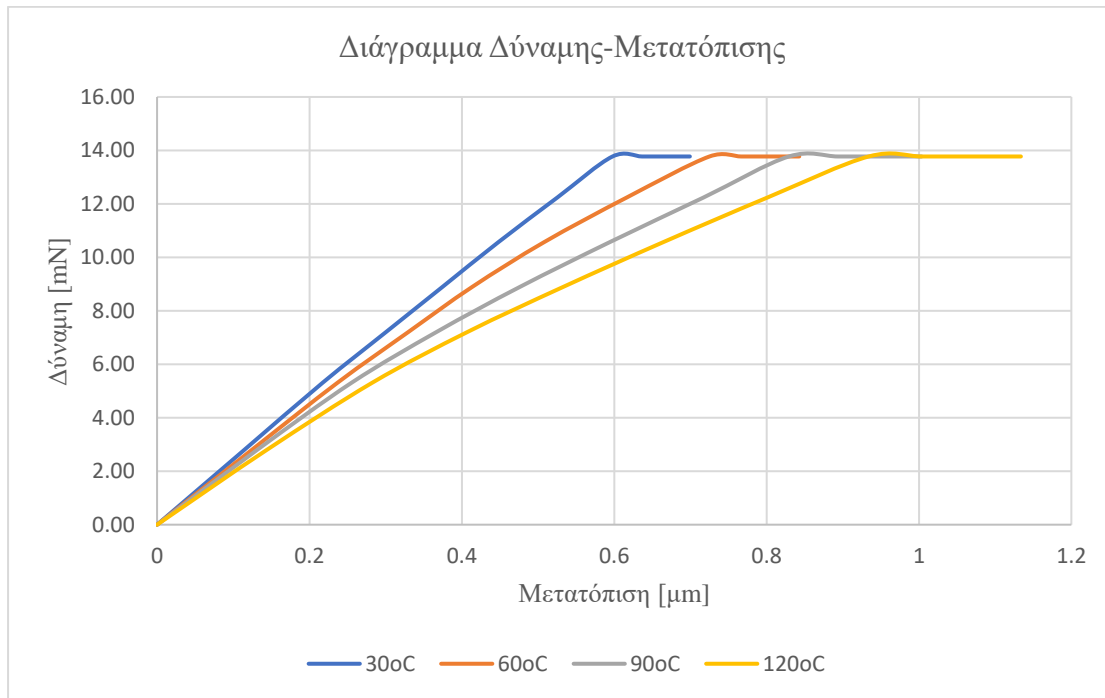
Πίνακας 9 : PS-T300/Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Θερμοκρασίες	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
30°C	3.06 sec	1.48E-08 [J]
60°C	2.14 sec	1.18E-08 [J]
90°C	1.44 sec	4.47E-09 [J]
120°C	0.97 sec	5.97E-09 [J]



Διάγραμμα 19 : PS-T300 / Αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή διάδοσης της ρωγμής σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως και σε αυτή την περίπτωση στη θερμοκρασία των 90°C η αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής είναι η μικρότερη. Επομένως, η ενεργειακά βέλτιστη περίπτωση για τον διαχωρισμό της ίνας από την μήτρας, είναι στους 90°C.



Διάγραμμα 20 : PS-T300 / Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως με την αύξηση της θερμοκρασίας οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας είναι μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια του χρόνου. Μια τέτοια συμπεριφορά είναι λογική καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας πέφτουν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Ωστόσο, οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση με ίνας άνθρακα T800S, γεγονός το οποίο οφείλεται στο διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας της ίνας αυτής.

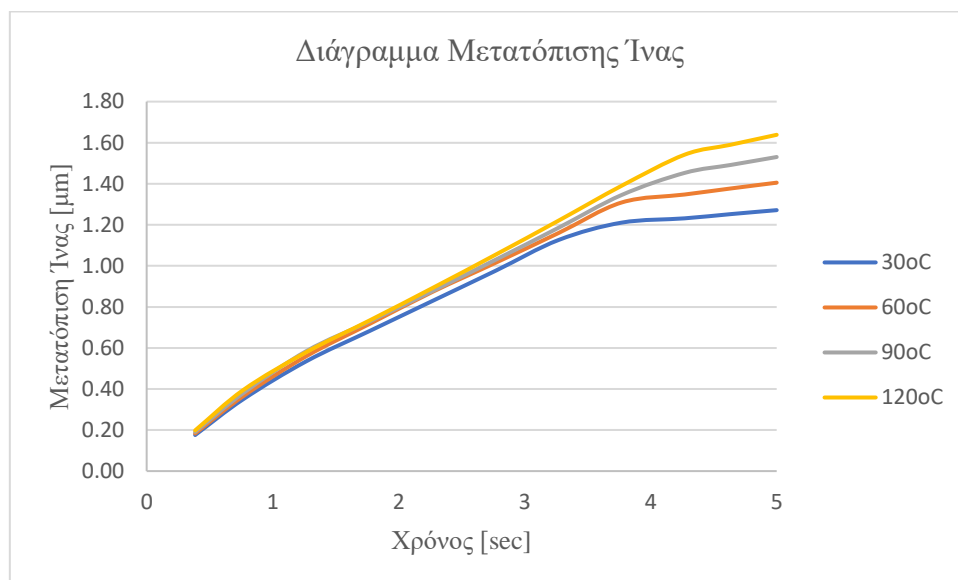
Πίνακας 10 : PS-T300 / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
30°C	62.87
60°C	47.35
90°C	35.33
120°C	26.09

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, οι τιμές του όρου αυτού σε σχέση με τον προηγούμενο συνδυασμό είναι ελαφρώς μικρότερες, γεγονός το οποίο οφείλεται στις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες των ινών όπου τα αποτελούν.

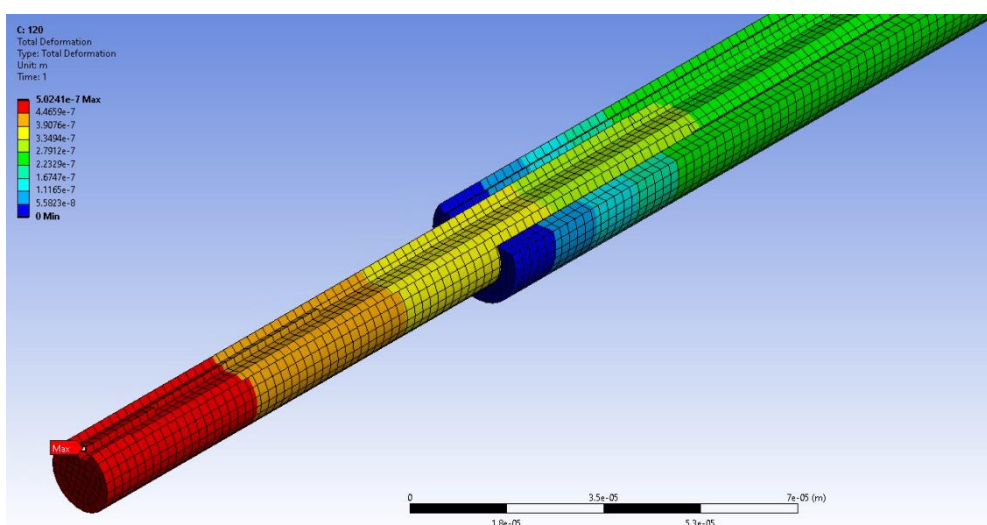
2.1.3 Matrix : PS – Fiber : T700S (230 GPa)

Εξίσου και σε αυτό τον συνδυασμό παραμένει το υλικό της μήτρας ως PS και αλλάζει η ίνα του άνθρακα σε T700S (230 GPa).



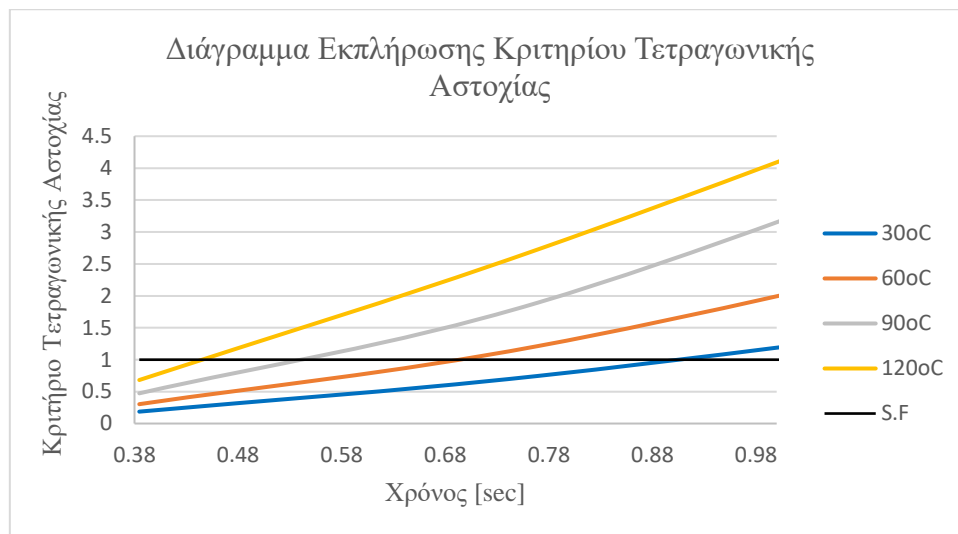
Διάγραμμα 21 : PS-T700S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η μετατόπιση της ίνας στους 120°C είναι 22% μεγαλύτερη από ότι στους 30°C. Εξίσου είναι εμφανές πως με την αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει μεγαλύτερη αξονική μετατόπιση της ίνας.



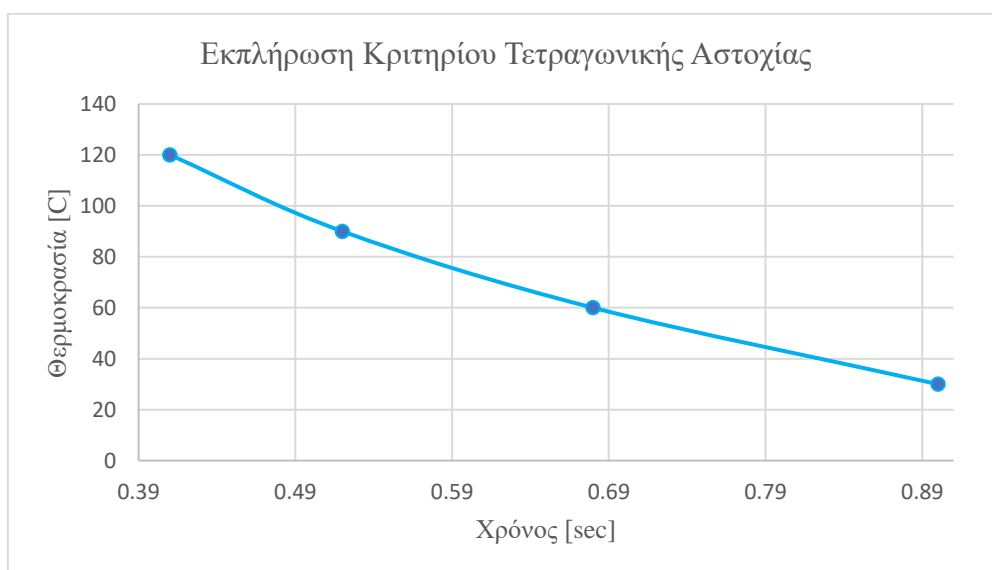
Εικόνα 35 : Οπτικό αποτέλεσμα παραμόρφωσης για 120oC για PS-T700S.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας σε αυτή την περίπτωση δίνει τα εξής αποτελέσματα :



Διάγραμμα 22 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

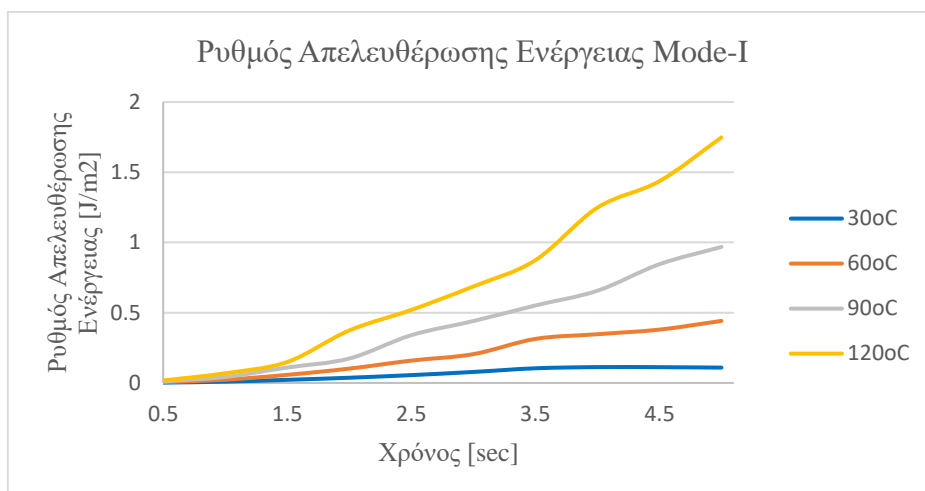
Έχει την αναμενόμενη συμπεριφορά, καθώς παρατηρείται πως η συντομότερη έναρξη της ρωγμής συμβαίνει για τη θερμοκρασία των 120°C. Κάτι το οποίο φαίνεται πιο αναλυτικά στο παρακάτω διάγραμμα :



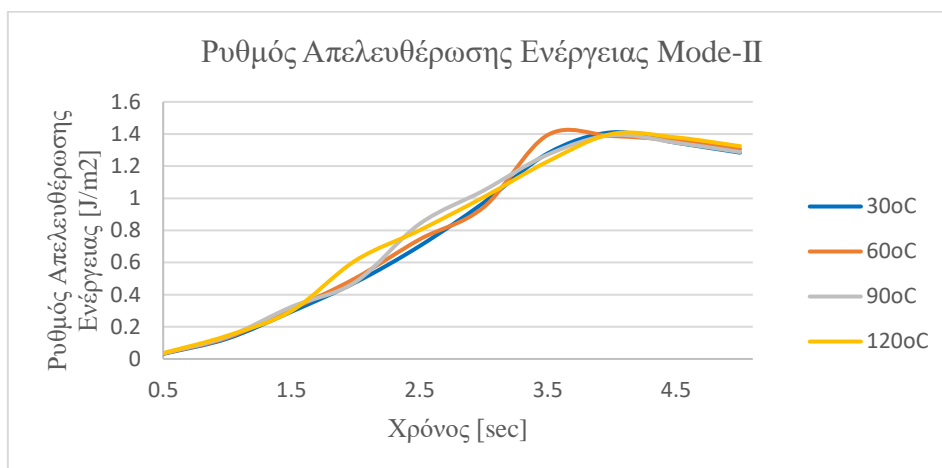
Διάγραμμα 23 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Εξίσου με την αύξηση της θερμοκρασίας εκπληρώνεται πιο γρήγορα το κριτήριο.

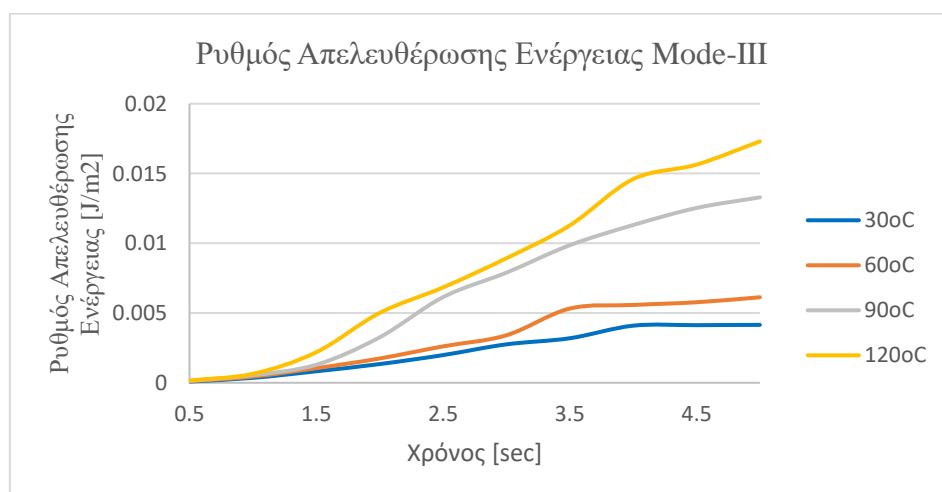
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 24 : PS-T700S / ERR GI για διαφορετικές θερμοκρασίες.



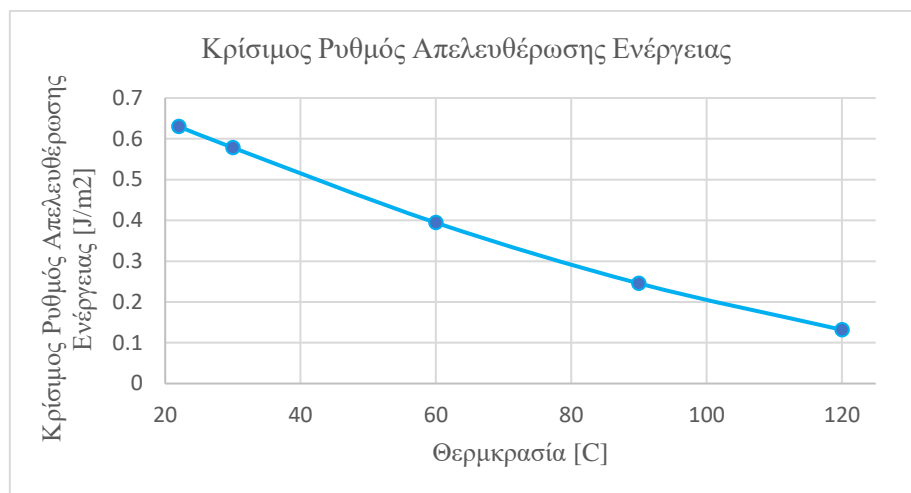
Διάγραμμα 25 : PS-T700S / ERR GII για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 26 : PS-T700S / ERR GIII για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όπως και στον προηγούμενο συνδυασμό υλικών έτσι και εδώ, τα διαγράμματα των ERR GI, GII, GIII έχουν σχεδόν ίδιες τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διαφορές των ινών άνθρακα T300 και T700S είναι πολύ μικρές.

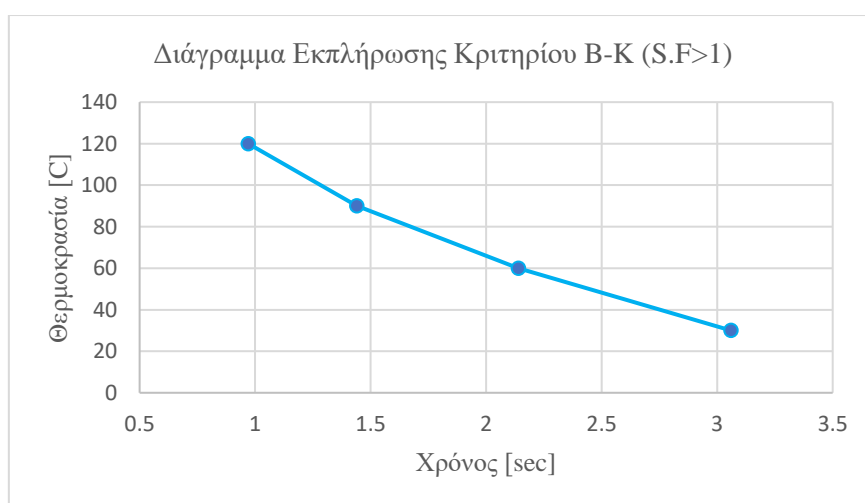
Το διάγραμμα του κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας έχει την παρακάτω μορφή :



Διάγραμμα 27 : PS-T700S / Κρίσιμη τιμή ERR για όλες τις θερμοκρασίες.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ έχει την αναμενόμενη η καμπύλη καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη κρίσιμη ενέργεια παραμόρφωσης.

Τέλος, απαραίτητη γραφική παράσταση είναι η εκπλήρωση του κριτηρίου Benzeggagh Kenane καθώς και η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό :

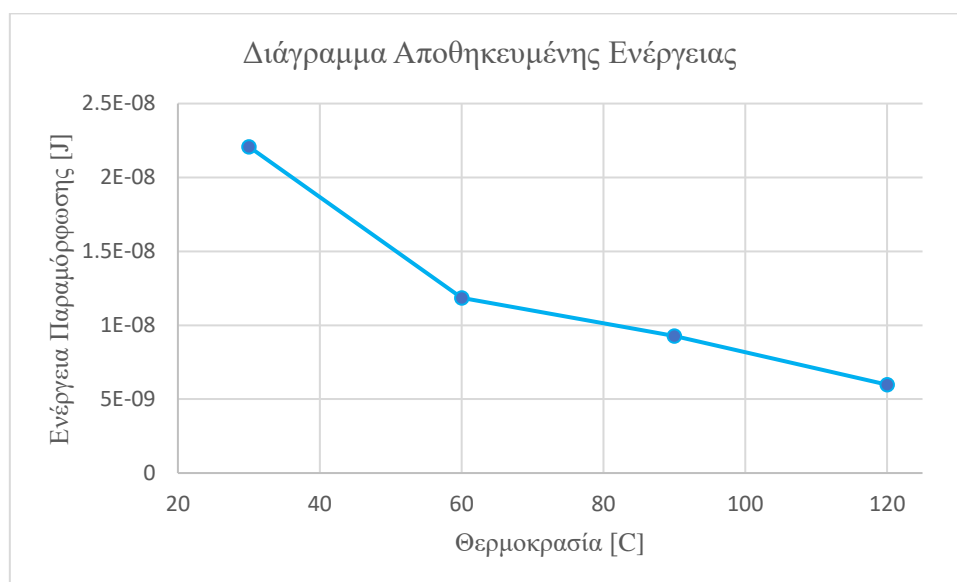


Διάγραμμα 28 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα πιο σύντομα θα διαδοθεί η ρωγμή για την θερμοκρασία των 120°C. Ωστόσο, οι ενέργειες που αποθηκεύονται στο σύστημα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

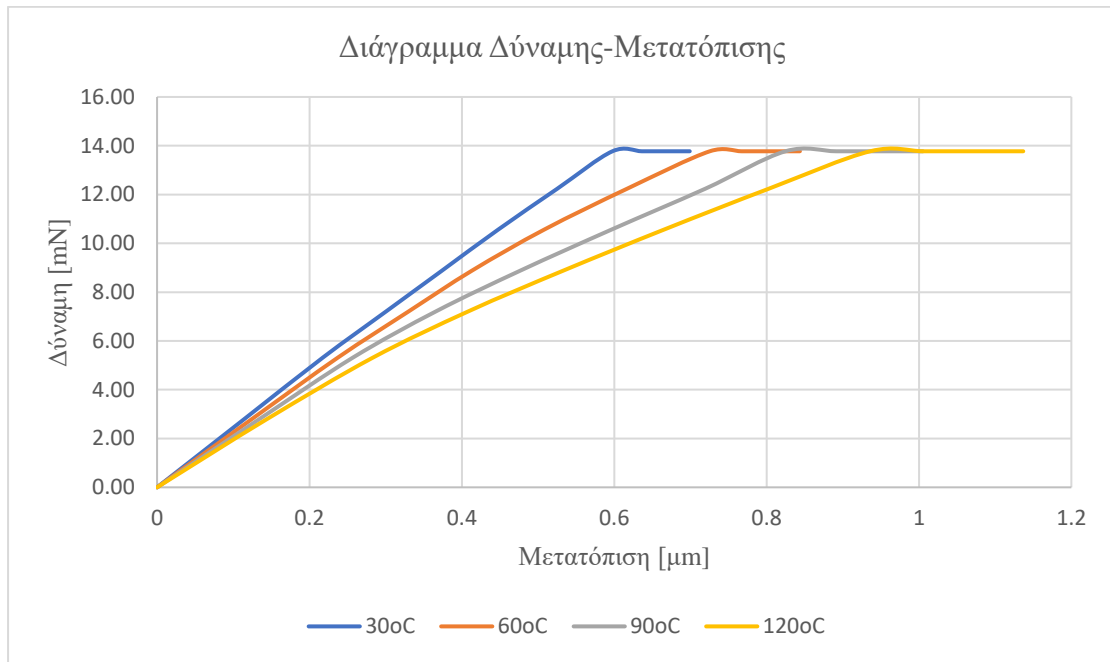
Πίνακας 11 : PS-T700S / Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Θερμοκρασίες	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
30°C	3.06 sec	2.21E-08 [J]
60°C	2.14 sec	1.18E-08 [J]
90°C	1.44 sec	9.27E-09 [J]
120°C	0.97 sec	5.98E-09 [J]



Διάγραμμα 29 : PS-T700S / Αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή διάδοσης της ρωγμής σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως στη θερμοκρασία των 120°C η αποθηκευμένη ενέργεια παραμόρφωσης στο σύστημα είναι η μικρότερη. Επομένως, η ενεργειακά βέλτιστη περίπτωση για τον διαχωρισμό της ίνας από την μήτρας, είναι στους 120°C.



Διάγραμμα 30 : PS-T700S / Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ξανά πως με την αύξηση της θερμοκρασίας οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας είναι μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια του χρόνου. Μια τέτοια συμπεριφορά είναι λογική καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας πέφτουν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Ωστόσο, οι μετατοπίσεις αυτές έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές με την περίπτωση συνδυασμού PS-T300. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα παρόμοια χαρακτηριστικά των ινών και το ίδιο μέτρο ελαστικότητας.

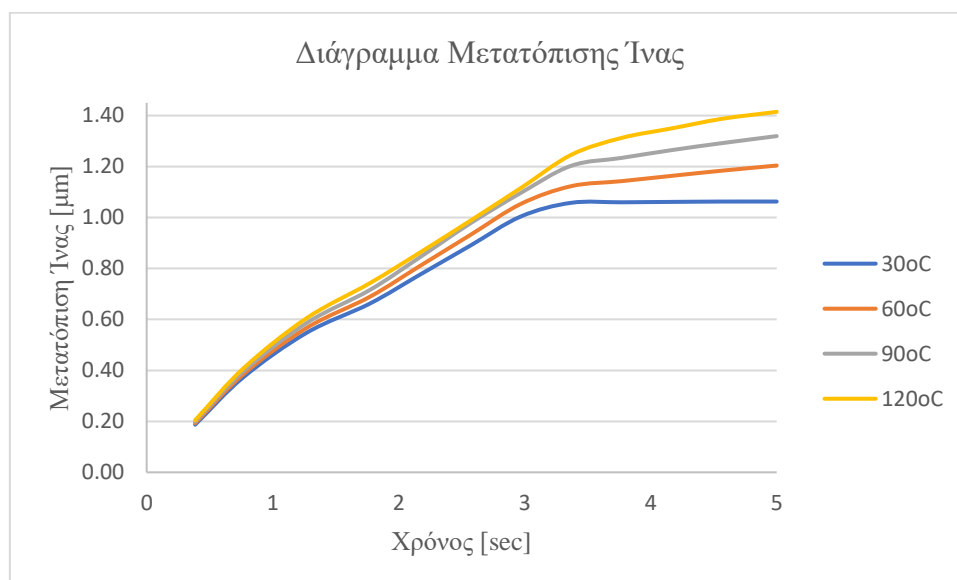
Πίνακας 12 : PS-T700S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
30°C	62.87
60°C	47.35
90°C	35.33
120°C	26.09

Από τον παραπάνω πίνακα είναι ξανά εμφανές πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, οι τιμές που προέκυψαν είναι ίδιες με τις τιμές όπου είχαν προκύψει στον προηγούμενο συνδυασμό υλικών, γεγονός το οποίο οφείλεται στα κοινά χαρακτηριστικά των ινών όπου τα αποτελούν.

2.1.4 Matrix : ABS – Fiber : T800S (294 GPa)

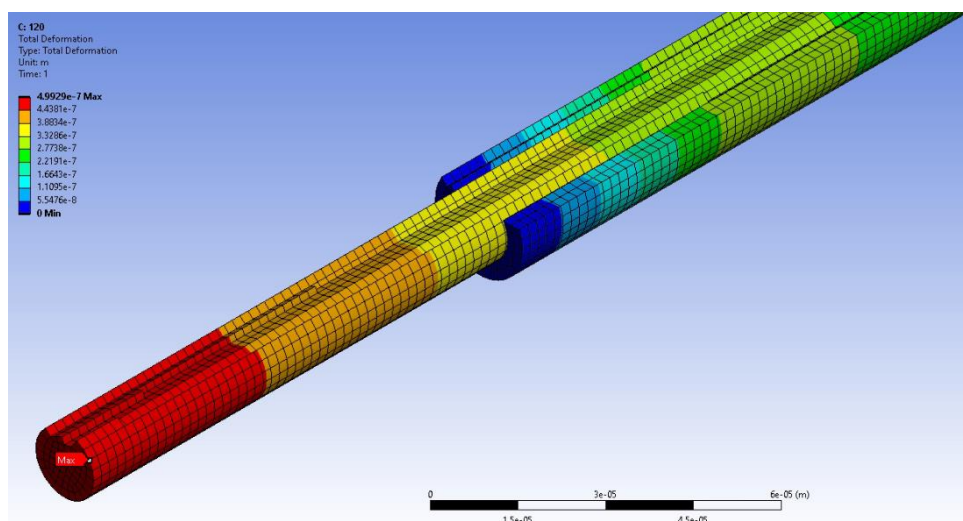
Αλλάζοντας το υλικό της μήτρας σε Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για την συμπεριφορά των συνδυασμών του είναι τα παρακάτω.



Διάγραμμα 31 : ABS-T800S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η μετατόπιση της ίνας στους 120°C είναι 23% μεγαλύτερη από ότι στους 30°C.

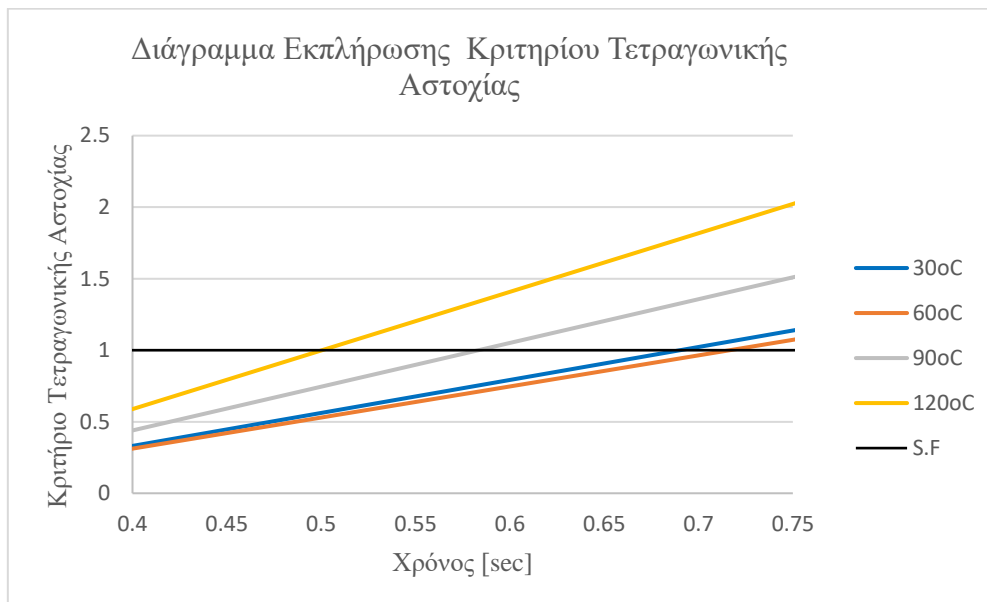
Το οπτικό αποτέλεσμα της μέγιστης παραμόρφωσης για τους 120°C είναι το εξής :



Εικόνα 36 : Οπτικό αποτέλεσμα παραμόρφωσης για 120oC για ABS-T800S.

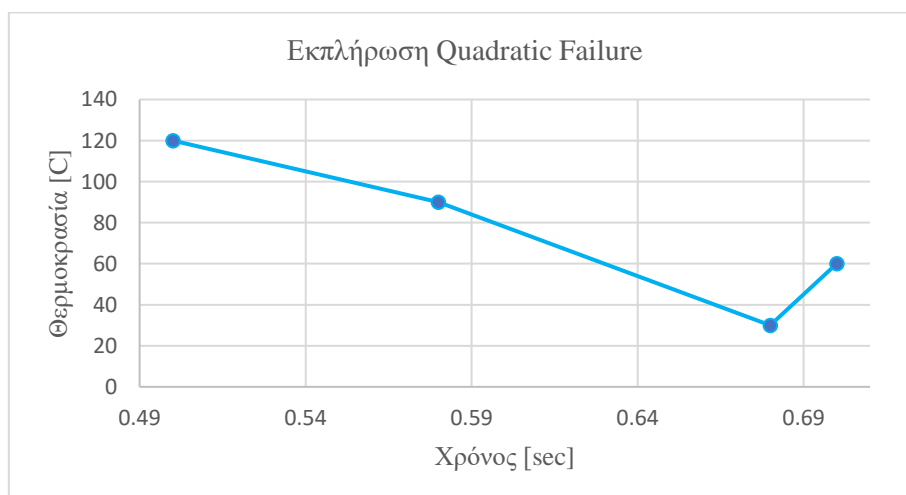
Ακόμα ένα σημαντικό κριτήριο είναι ο χρόνος έναρξης της ρωγμής, ο οποίος μας δίνεται μέσω της σχέσης Τετραγωνικής Αστοχίας. Όπως ειπώθηκε και στο θεωρητικό υπόβαθρο, συντελεστής ασφαλείας του κριτηρίου είναι το 1.

Επομένως, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :



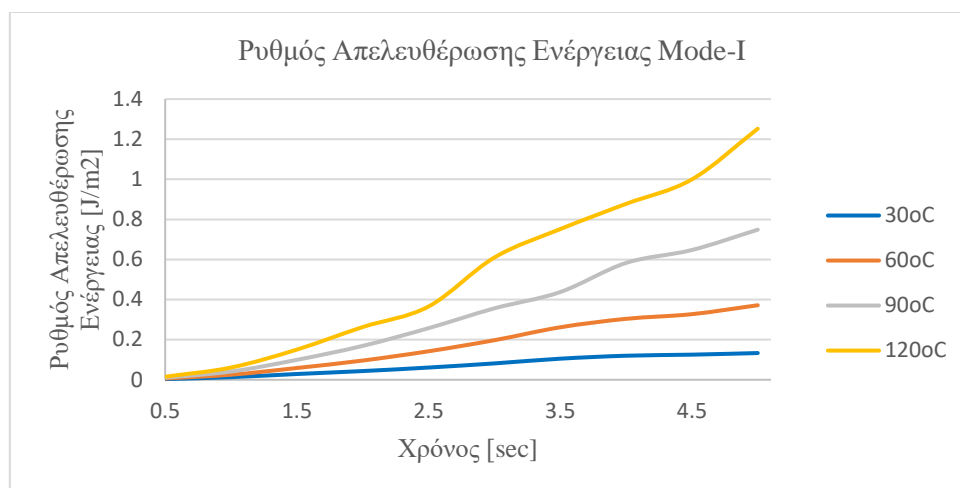
Διάγραμμα 32 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

Είναι εμφανές πως στη θερμοκρασία των 120°C η ρωγή ξεκινάει πολύ συντομότερα έναντι της θερμοκρασίας των 30°C, ωστόσο, η ρωγή θα ξεκινήσει ελαφρώς συντομότερα στη θερμοκρασία των 30°C έναντι των 60°C. Το ίδιο φαίνεται αναλυτικά και στο παρακάτω διάγραμμα.

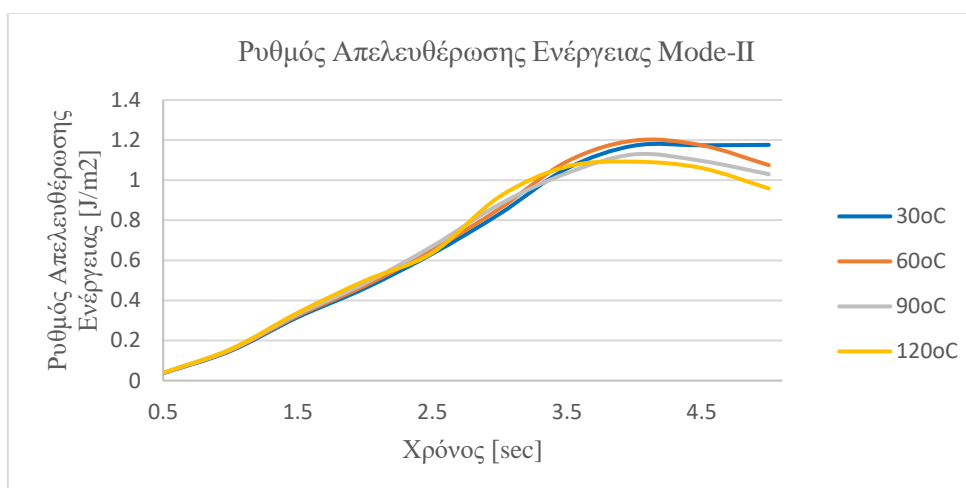


Διάγραμμα 33 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές θερμοκρασίες.

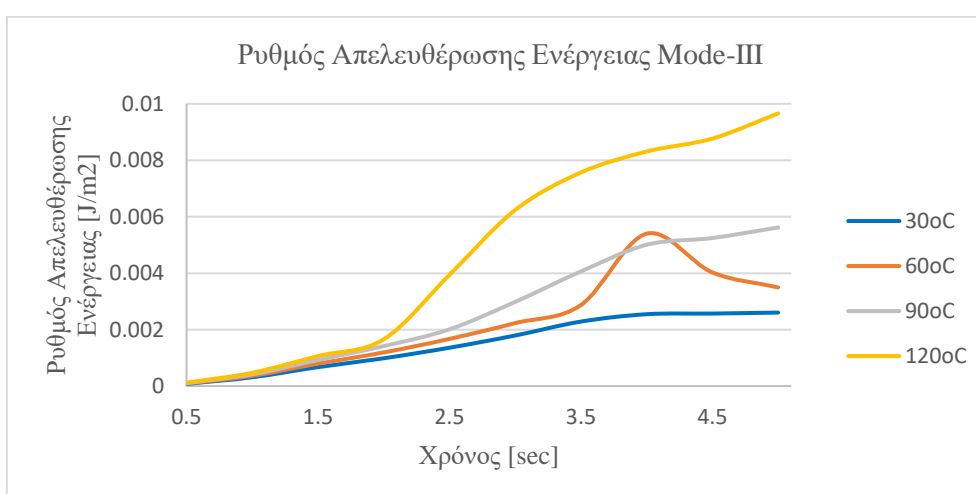
Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης κατά τα Mode-I,II,III είναι :



Διάγραμμα 34 : ABS-T800S / ERR GI για διαφορετικές θερμοκρασίες.



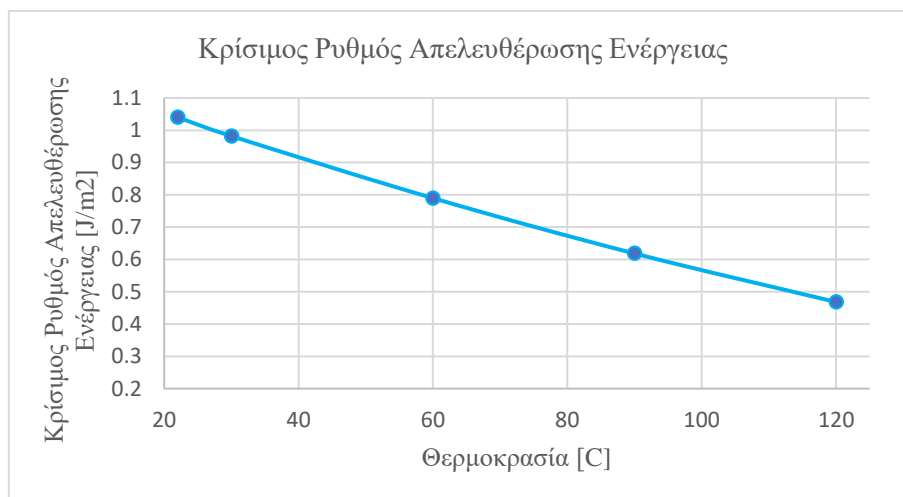
Διάγραμμα 35 : ABS-T800S / ERR GII για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 36 : ABS-T800S / ERR GIII για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Παρατηρείται πως σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχουν μεγαλύτερες τιμές του ERR, επομένως μεγαλύτερο ρυθμό παραμόρφωσης, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς και στην προηγούμενη περίπτωση συνδυασμού με ένα T800S παρατηρήσαμε μια αντίστοιχη συμπεριφορά.

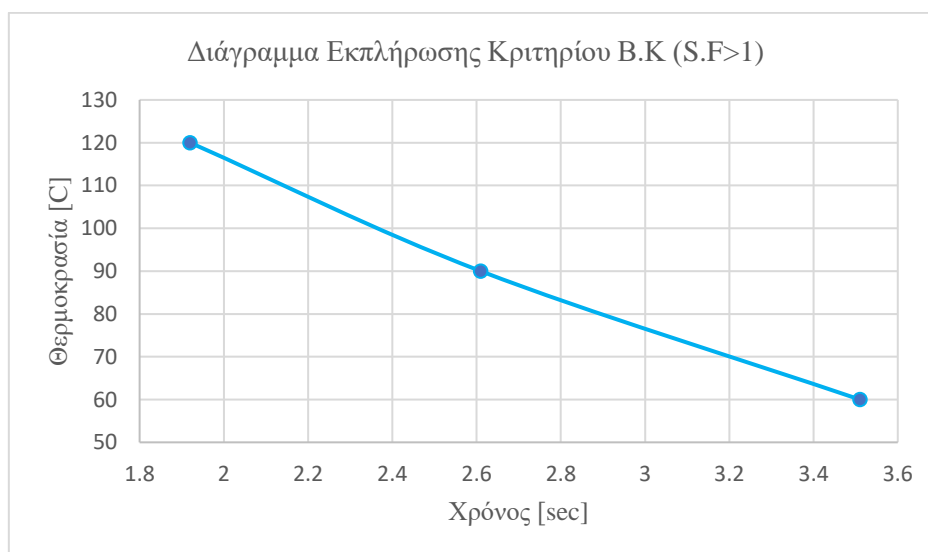
Η κρίσιμη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας προέκυψε ως εξής :



Διάγραμμα 37 : ABS-T800S / Κρίσιμη τιμή ERR για όλες τις θερμοκρασίες.

Μια τέτοια μορφή στη παραπάνω καμπύλη ήταν αναμενόμενη, καθώς όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο πιο εύκολα δημιουργείται η ρωγμή, άρα τόσο λιγότερη κρίσιμη ενέργεια παραμόρφωσης απαιτείται.

Τέλος, παρατίθεται το κριτήριο Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που καταναλώνεται μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.

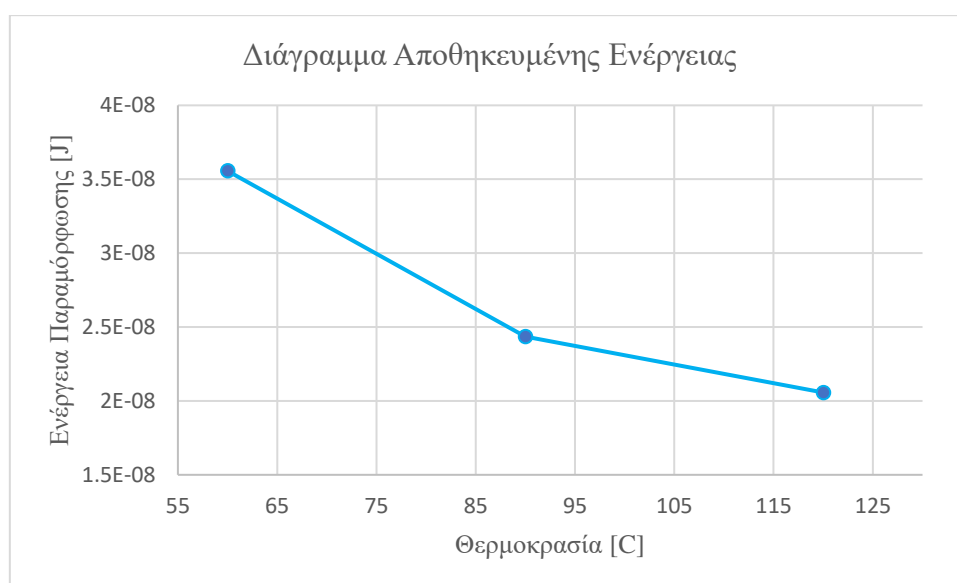


Διάγραμμα 38 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, πιο σύντομα θα διαδοθεί η ρωγή για την θερμοκρασία των 120°C, ωστόσο, δεν εκπληρώνεται για τη θερμοκρασία των 30°C.

Πίνακας 13 : ABS-T800S/Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγής.

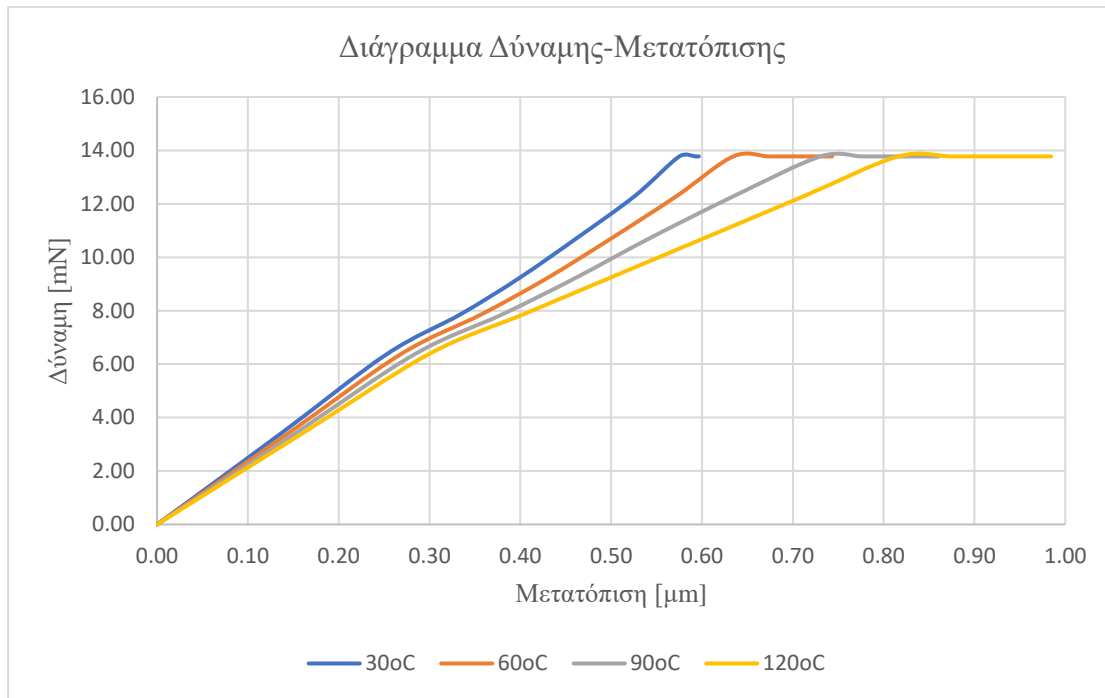
Θερμοκρασίες	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
30°C	Not Fulfilled	-
60°C	3.51 sec	3.56E-08 [J]
90°C	2.61 sec	2.43E-08 [J]
120°C	1.92 sec	2.06E-08 [J]



Διάγραμμα 39 : ABS-T800S / Αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή διάδοσης της ρωγής σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Για τη θερμοκρασία των 30°C το κριτήριο δεν εκπληρώνεται το κριτήριο, το οποίο σημαίνει πως στο συνδυασμό αυτό απαιτούνται παραπάνω από 5 sec έως ότου να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγής.

Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως στη θερμοκρασία των 120°C εμφανίζεται η ελάχιστη αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγής. Επομένως, η ενεργειακά βέλτιστη περίπτωση για τον διαχωρισμό της ίνας από την μήτρας, είναι στους 120°C.



Διάγραμμα 40 : ABS-T800S / Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης είναι εμφανές πως και σε αυτή την περίπτωση με την αύξηση της θερμοκρασίας οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες, το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας η διάδοση της ρωγμής θα γίνει γρηγορότερα. Οι μετατοπίσεις του συνδυασμού αυτού παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερες από ότι ο συνδυασμός PS-T800S, γεγονός το οποίο δείχνει πως το υλικό μήτρας ABS προσδίδει υψηλότερη στιβαρότητα.

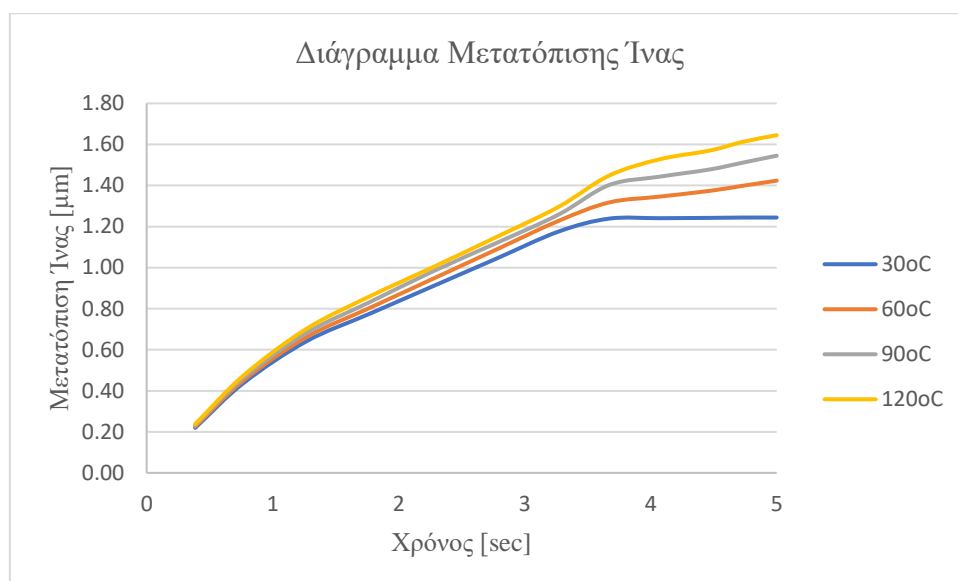
Πίνακας 14 : ABS-T800S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
30°C	-
60°C	69.73
90°C	56.04
120°C	45.54

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εξίσου εμφανές πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, η τιμή του μεγέθους αυτού δεν μπορεί να υπολογιστεί για τη θερμοκρασία των 30°C καθώς στο διάστημα των 5 sec δεν υπάρχει χρονική στιγμή έναρξης ρωγμής. Επίσης, επειδή οι τιμές σε αυτή την περίπτωση είναι υψηλότερες από ότι στους προηγούμενους συνδυασμούς, φαίνεται πως το υλικό μήτρας ABS προσδίδει μεγαλύτερη στιβαρότητα.

2.1.5 Matrix : ABS – Fiber : T300 (230 GPa)

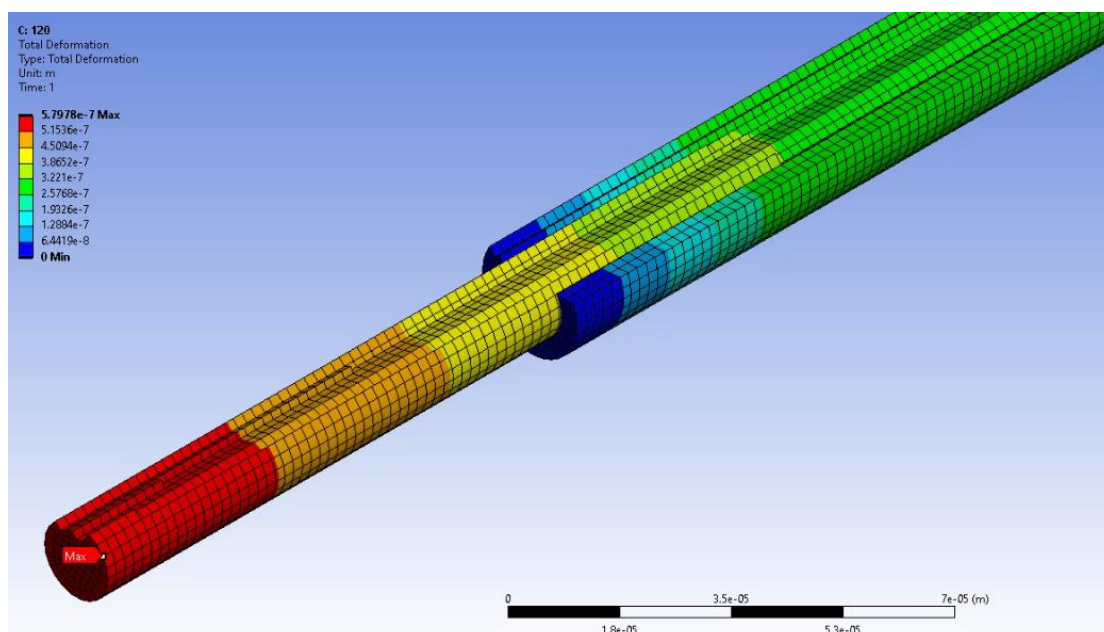
Ως υλικό μήτρας παραμένει το ABS, και αλλάζει η ίνα του άνθρακα σε T300.



Διάγραμμα 41 : ABS-T300 / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

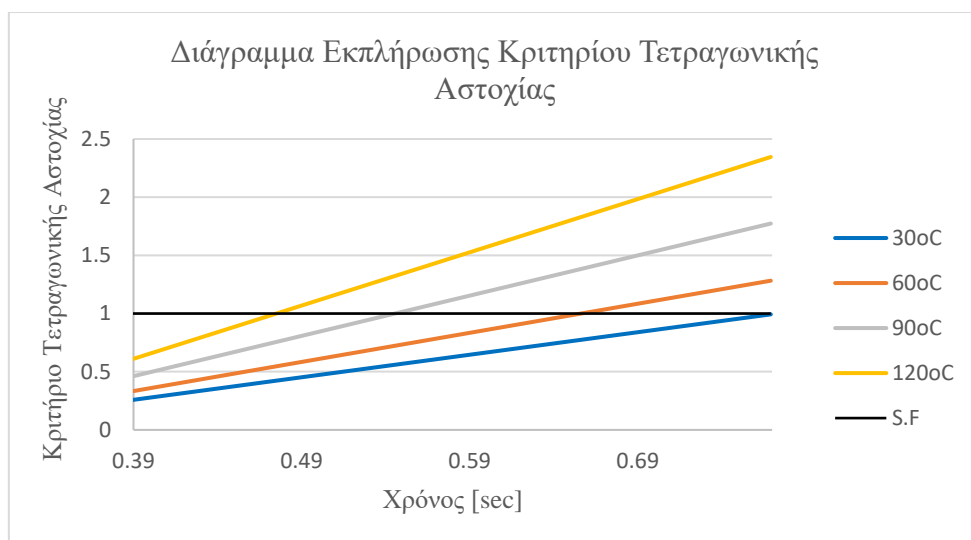
Η μετατόπιση της ίνας στους 120°C είναι 22% μεγαλύτερη από ότι στους 30°C.

Οπτικά η παραμόρφωση είναι ως εξής :



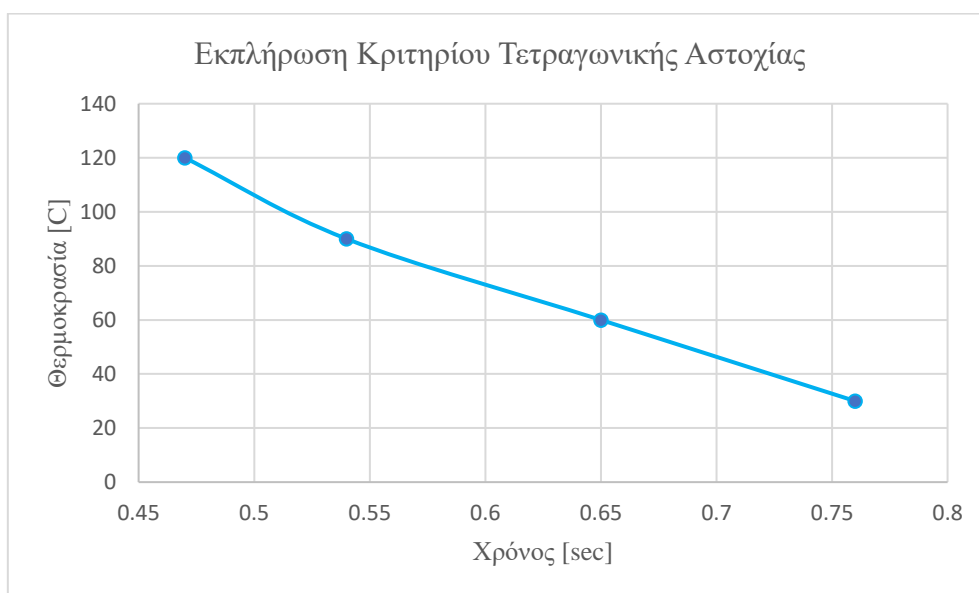
Εικόνα 37 : Οπτικό αποτέλεσμα παραμόρφωσης για 120oC για ABS-T300.

Όσο αναφορά το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας, τα αποτελέσματα έδειξαν το εξής:



Διάγραμμα 42 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου *Quadratic Failure*.

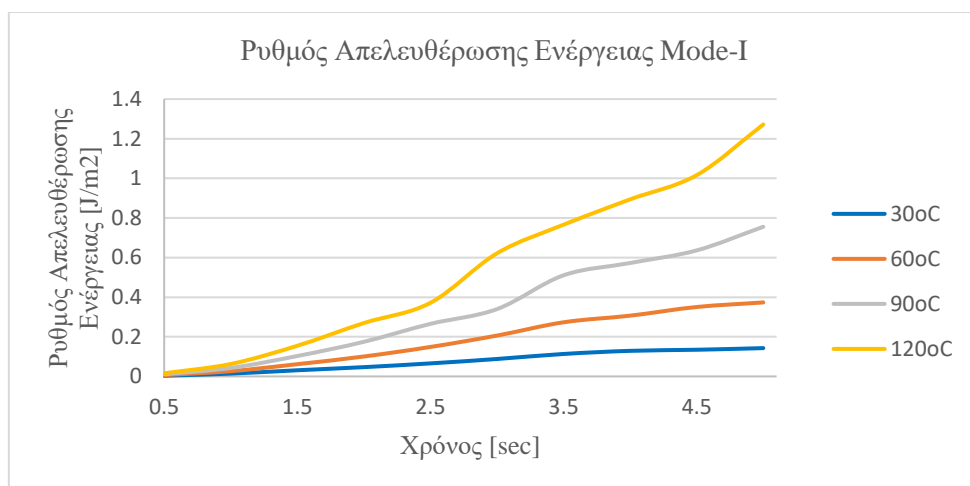
Εξίσου, όπως είναι αναμενόμενο παρατηρείται πως η έναρξη της ρωγμής συμβαίνει γρηγορότερα στη θερμοκρασία των 120°C, κάτι το οποίο φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα :



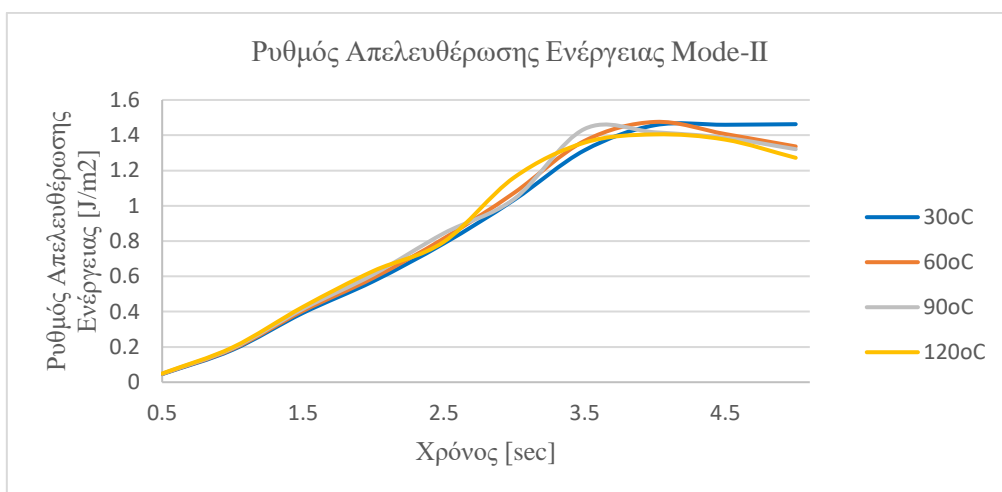
Διάγραμμα 43 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Είναι ξανά εμφανές πως με την αύξηση της θερμοκρασίας εκπληρώνεται πιο σύντομα το κριτήριο.

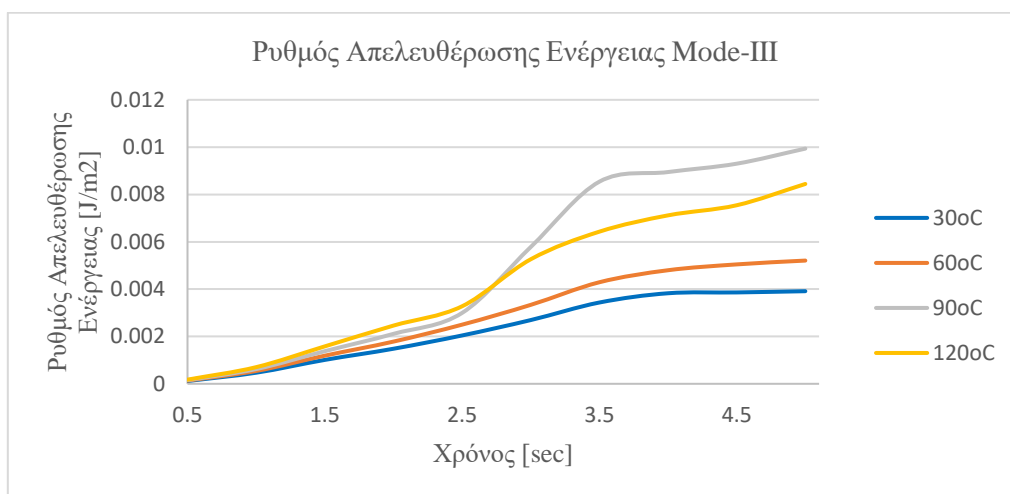
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 44 : ABS-T300 / ERR GI για διαφορετικές θερμοκρασίες.



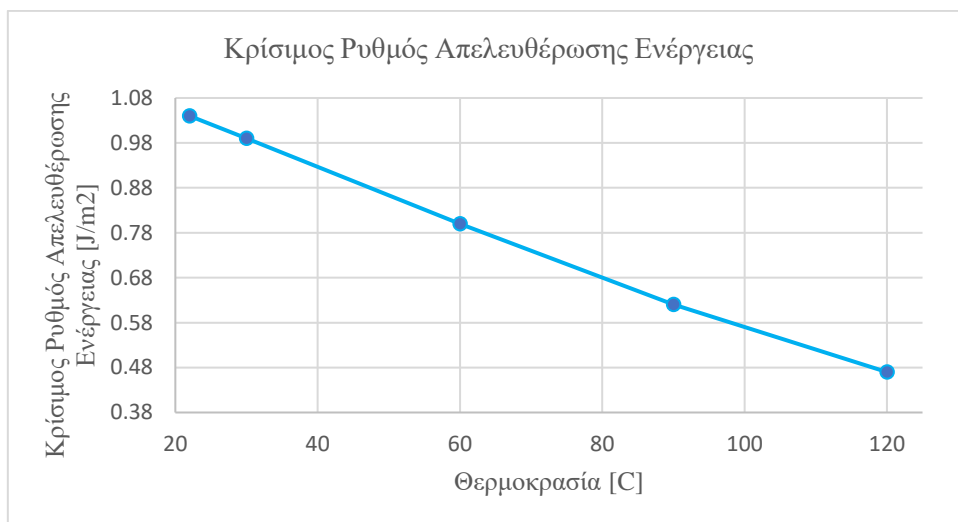
Διάγραμμα 45 : ABS-T300 / ERR GII για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 46 : ABS-T300 / ERR GIII για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Σε υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές του ERR, επομένως γρηγορότερος και μεγαλύτερος ρυθμός παραμόρφωσης, κάτι το οποίο είναι λογικό. Στο Mode-III στην θερμοκρασία των 90°C ο ρυθμός παραμόρφωσης θα είναι μεγαλύτερος έναντι των υπόλοιπων θερμοκρασιών.

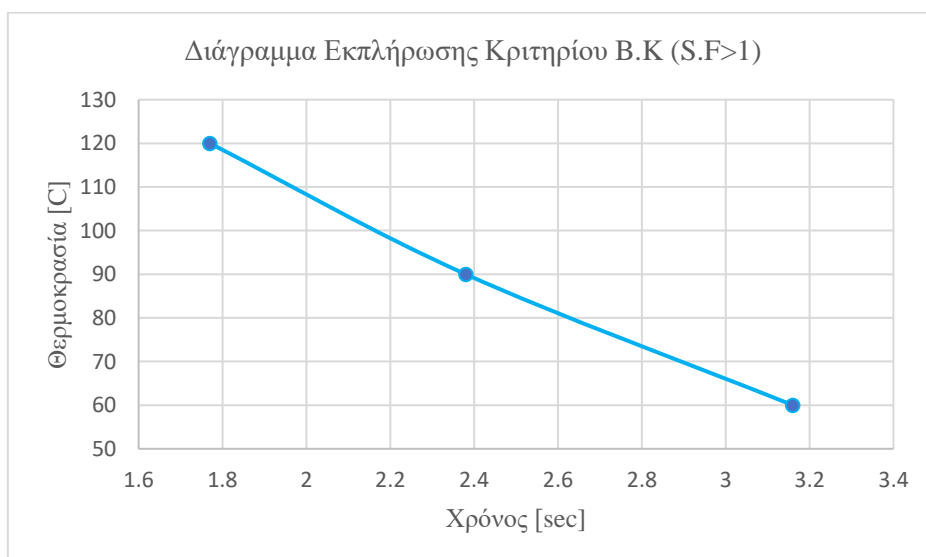
Η κρίσιμη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας είναι η εξής :



Διάγραμμα 47 : ABS-T300 / Κρίσιμη τιμή ERR για όλες τις θερμοκρασίες.

Εξίσου μια αναμενόμενη μορφή στη καμπύλη αυτή, διότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο πιο εύκολα γίνεται η πραγματοποίηση της ρωγμής.

Τέλος, παρατίθεται το κριτήριο Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που καταναλώνεται μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.

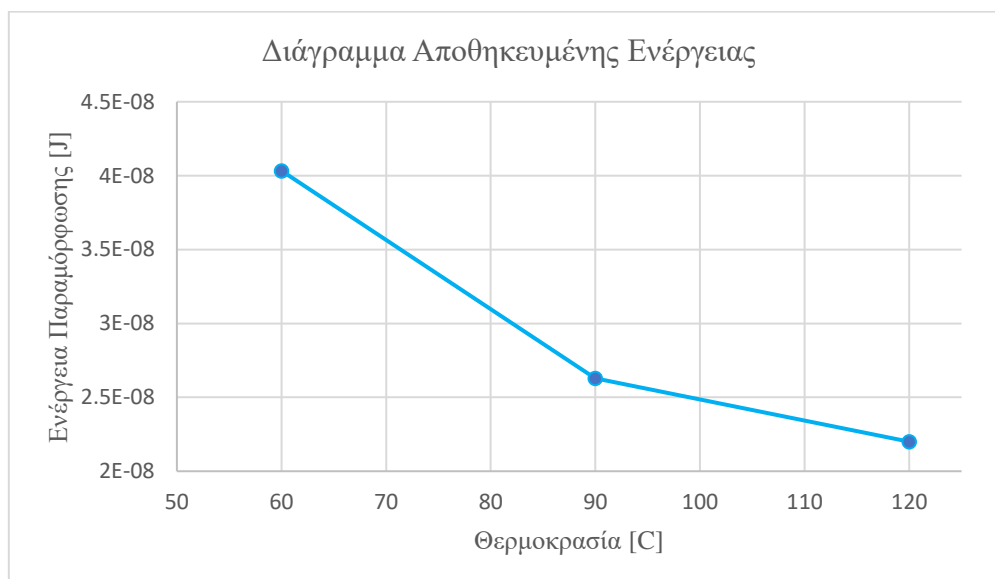


Διάγραμμα 48 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στους 30°C δεν θα εκπληρωθεί το κριτήριο, ενώ πιο σύντομα θα διαδοθεί η ρωγμή για την θερμοκρασία των 120°C. Ωστόσο, οι ενέργειες που αποθηκεύονται στο σύστημα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 15 : ABS-T300/Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

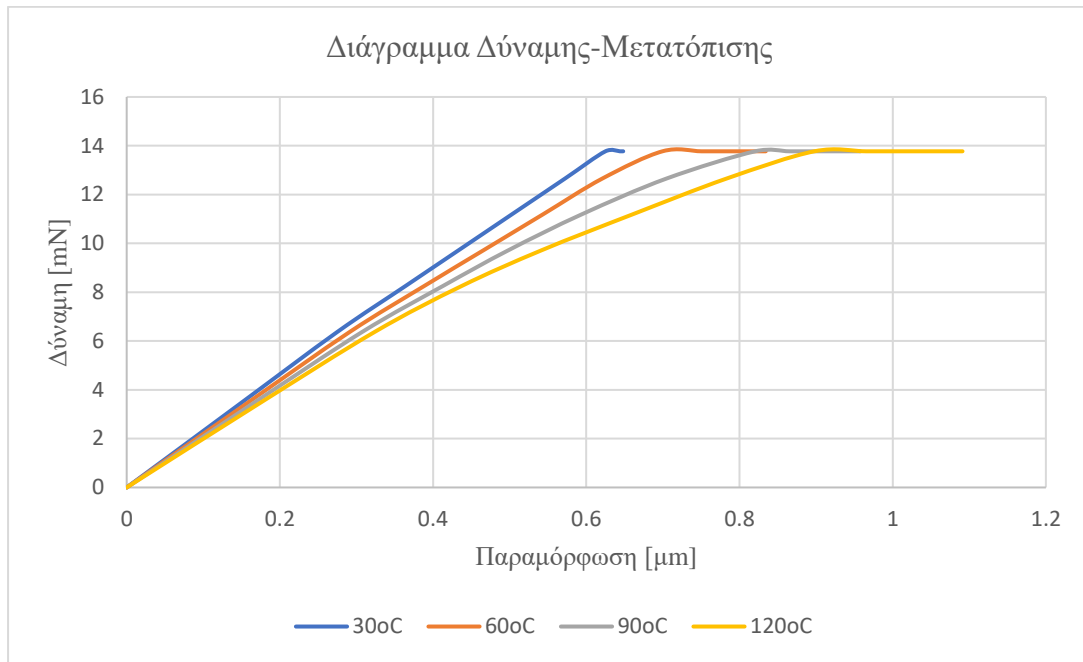
Θερμοκρασίες	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
30°C	Not Fulfilled	-
60°C	3.16 sec	4.03E-08 [J]
90°C	2.38 sec	2.62E-08 [J]
120°C	1.77 sec	2.19E-08 [J]



Διάγραμμα 49 : ABS-T300 / Αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή διάδοσης της ρωγμής σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως στη θερμοκρασία των 30°C δεν εκπληρώνεται το κριτήριο. Δηλαδή, η ενέργεια που θα αποθηκευτεί στο σύστημα μέχρι να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής είναι πολύ μεγάλη καθώς επίσης θα χρειαστούν παραπάνω από 5 sec μέχρι να ξεκινήσει η ρωγμή. Είναι λογικό καθώς οι 30°C είναι χαμηλή θερμοκρασία το οποίο σημαίνει πως θα είναι δυσκολότερη η εκρίζωση της ίνας.

Ωστόσο, στους 120°C εμφανίζεται η ελάχιστη αποθηκευμένη ενέργεια παραμόρφωσης στο σύστημα μέχρι να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής. Επομένως, η ενεργειακά βέλτιστη περίπτωση για τον διαχωρισμό της ίνας από την μήτρας, είναι στους 120°C.



Διάγραμμα 50 : ABS-T300 / Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ξανά πως η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί και μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο σημείο ένωσης ίνας-μήτρας. Ωστόσο, είναι εμφανές πως οι τιμές είναι υψηλότερες σε σχέση με τον προηγούμενο συνδυασμό, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφορά της τιμής του μέτρου ελαστικότητας της ίνας άνθρακα.

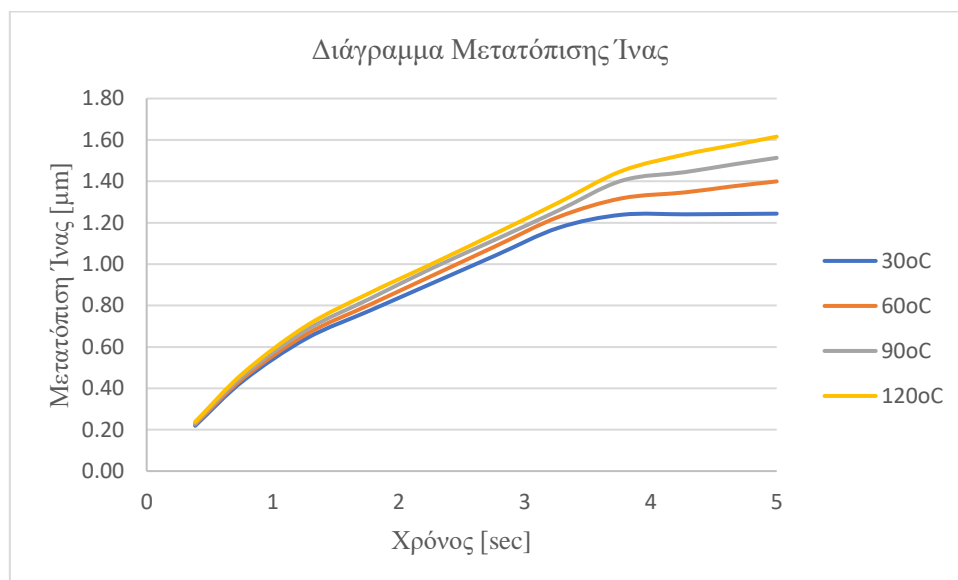
Πίνακας 16 : ABS-T300 / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
30°C	-
60°C	65.89
90°C	54.84
120°C	45.75

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εξίσου εμφανές πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, ούτε σε αυτό τον συνδυασμό υλικών εκπληρώνεται το κριτήριο B-K πριν την χρονική στιγμή των 5 sec, επομένως, δεν μπορεί να υπολογιστεί ο όρος αυτός για τη θερμοκρασία των 30°C.

2.1.6 Matrix : ABS – Fiber : T700S (230 GPa)

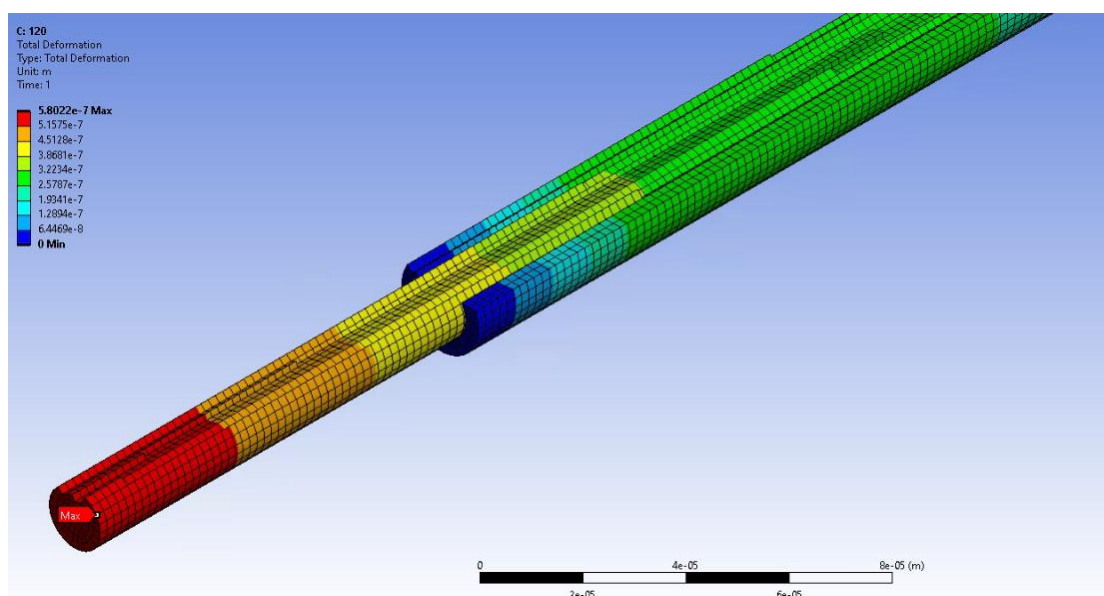
Εξίσου και σε αυτό τον συνδυασμό παραμένει το υλικό της μήτρας ως ABS και αλλάζει η ίνα του άνθρακα σε T700S.



Διάγραμμα 51 : ABS-T700S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές θερμοκρασίες.

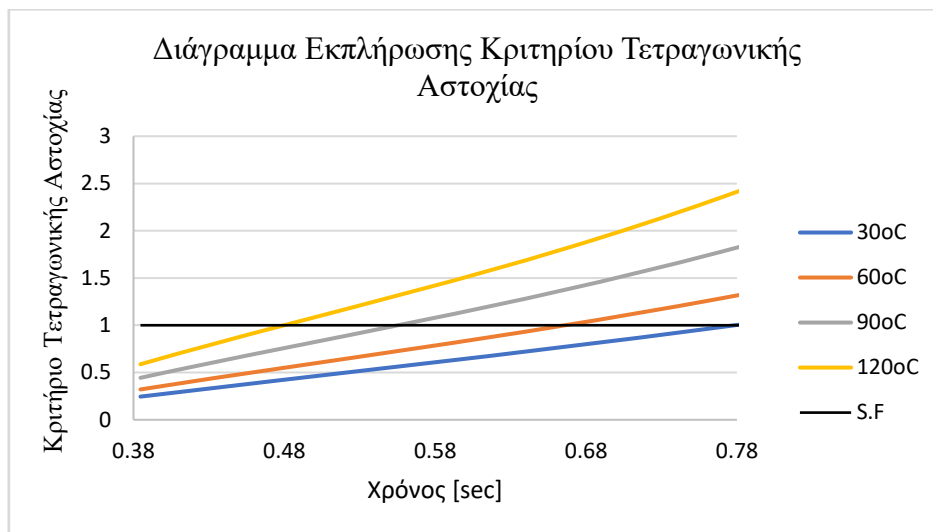
Η μετατόπιση της ίνας στους 120°C είναι 22% μεγαλύτερη από ότι στους 30°C.

Το οπτικό αποτέλεσμα της παραμόρφωσης είναι το παρακάτω :



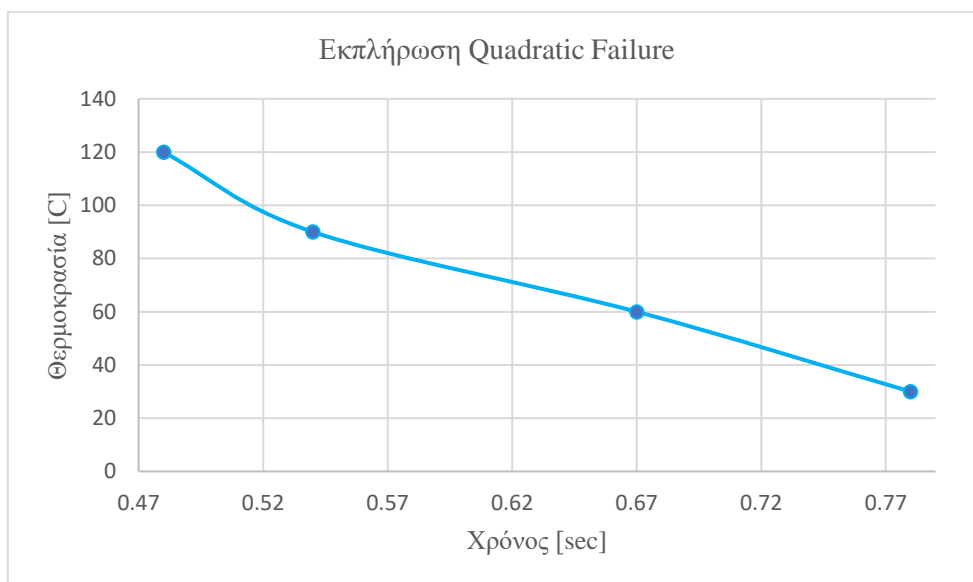
Εικόνα 38 : Οπτικό αποτέλεσμα παραμόρφωσης για 120oC για ABS-T700S.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας σε αυτή την περίπτωση δίνει τα εξής αποτελέσματα :



Διάγραμμα 52 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

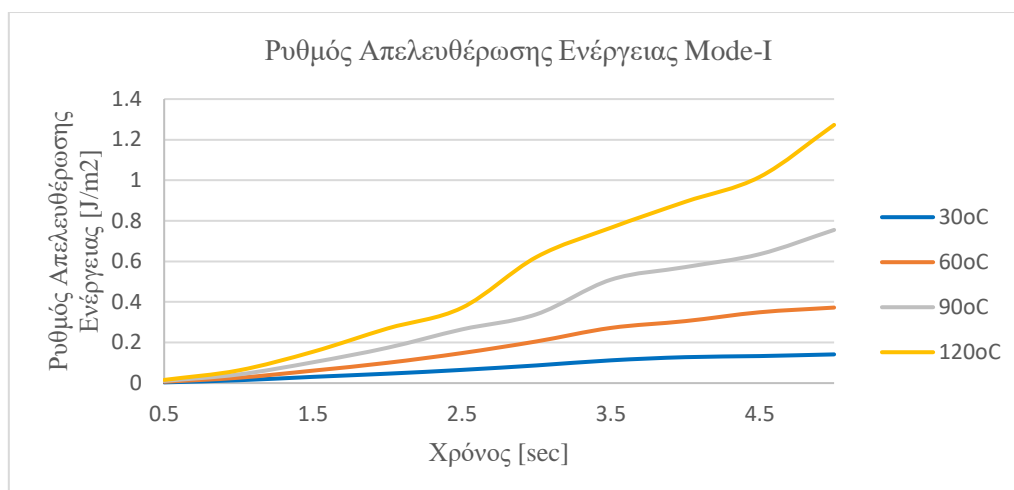
Έχει την αναμενόμενη συμπεριφορά, καθώς η συντομότερη έναρξη της ρωγμής συμβαίνει για τη θερμοκρασία των 120°C. Κάτι το οποίο φαίνεται πιο αναλυτικά στο παρακάτω διάγραμμα :



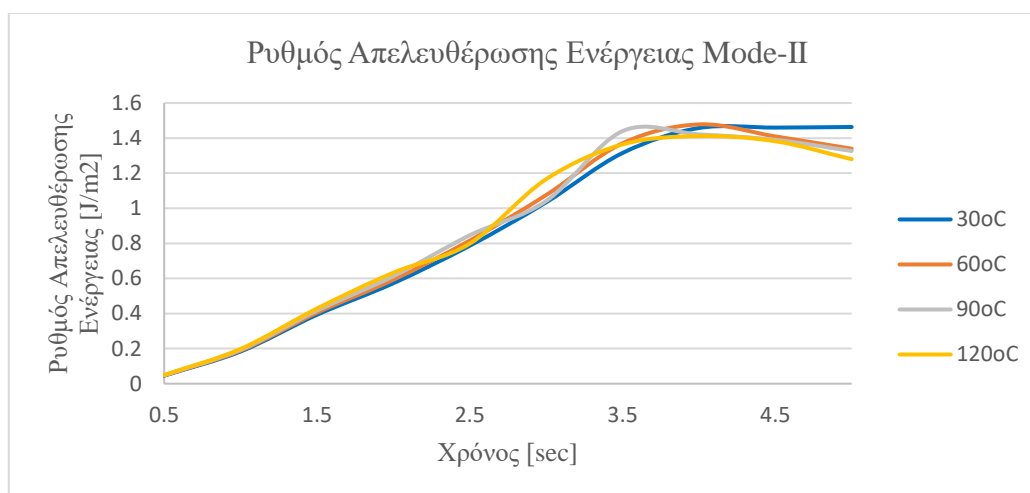
Διάγραμμα 53 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Επίσης είναι εμφανές πως με την αύξηση της θερμοκρασίας εκπληρώνεται πιο γρήγορα το κριτήριο.

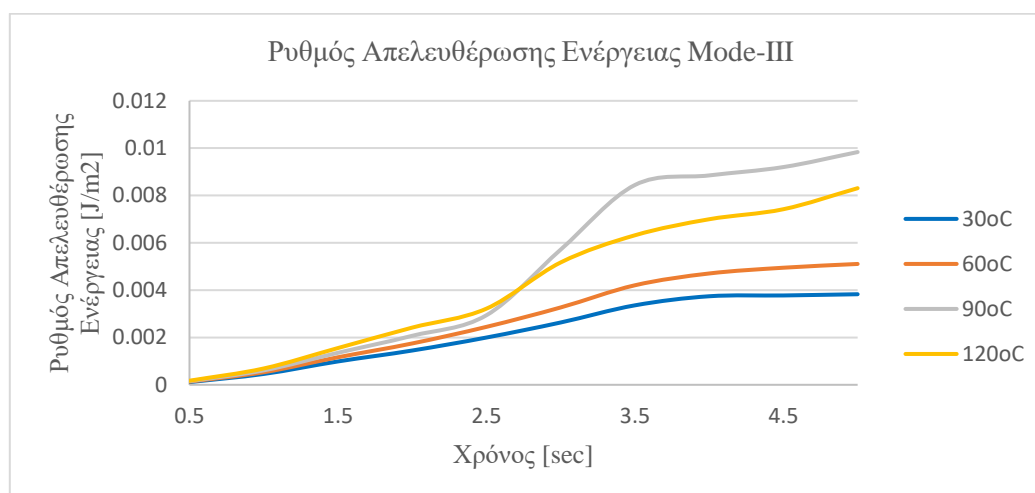
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 54 : ABS-T700S / ERR GI για διαφορετικές θερμοκρασίες.



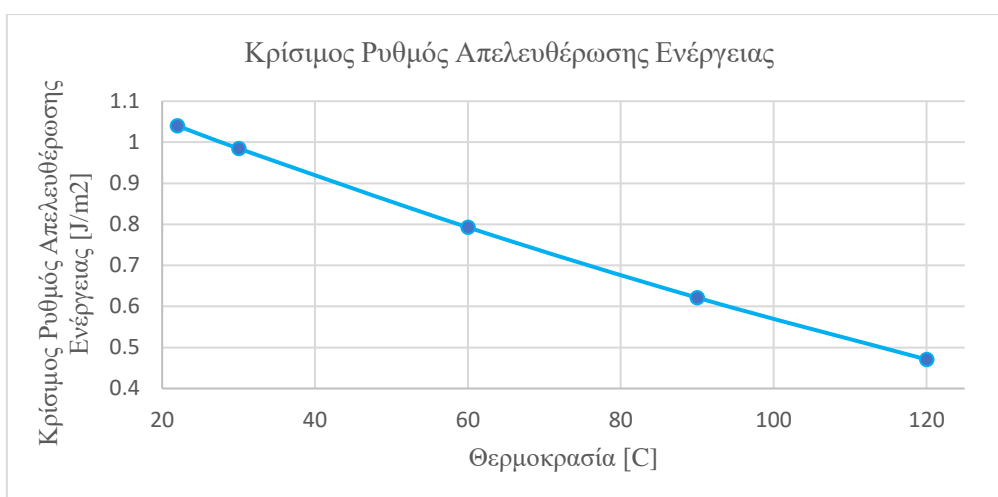
Διάγραμμα 55 : ABS-T700S / ERR GII για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 56 : ABS-T700S / ERR GIII για διαφορετικές θερμοκρασίες.

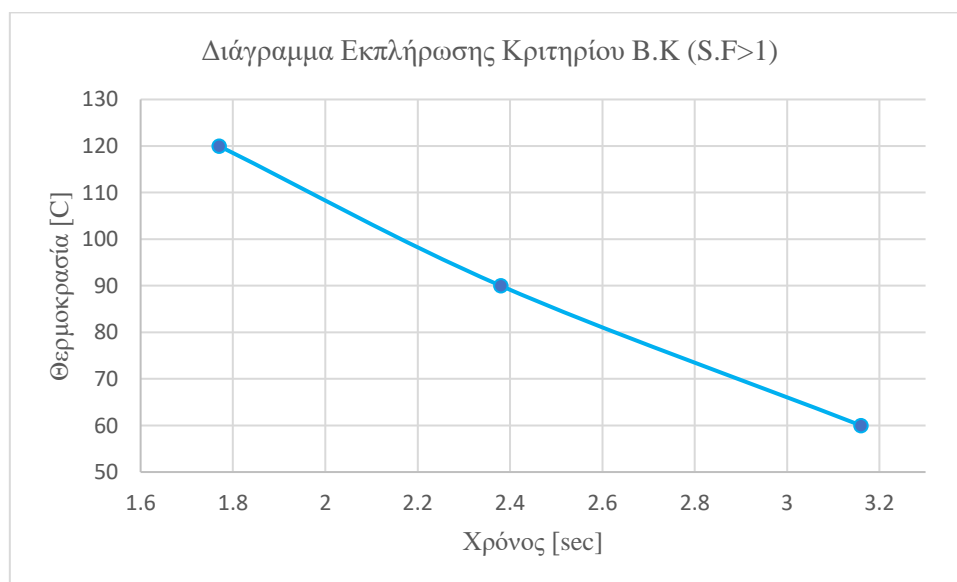
Είναι εμφανές πως όπως και στον προηγούμενο συνδυασμό υλικών έτσι και εδώ, τα διαγράμματα των ERR GI, GII, GIII έχουν σχεδόν ίδιες τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διαφορές των ινών άνθρακα T300 και T700S είναι πολύ μικρές. Το ίδιο συνέβη και στους συνδυασμούς υλικών με υλικό μήτρας το PS.

Η κρίσιμη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης παραμορφωσιακής ενέργειας έχει την παρακάτω μορφή :



Διάγραμμα 57 : ABS-T700S / Κρίσιμη τιμή ERR για όλες τις θερμοκρασίες.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.

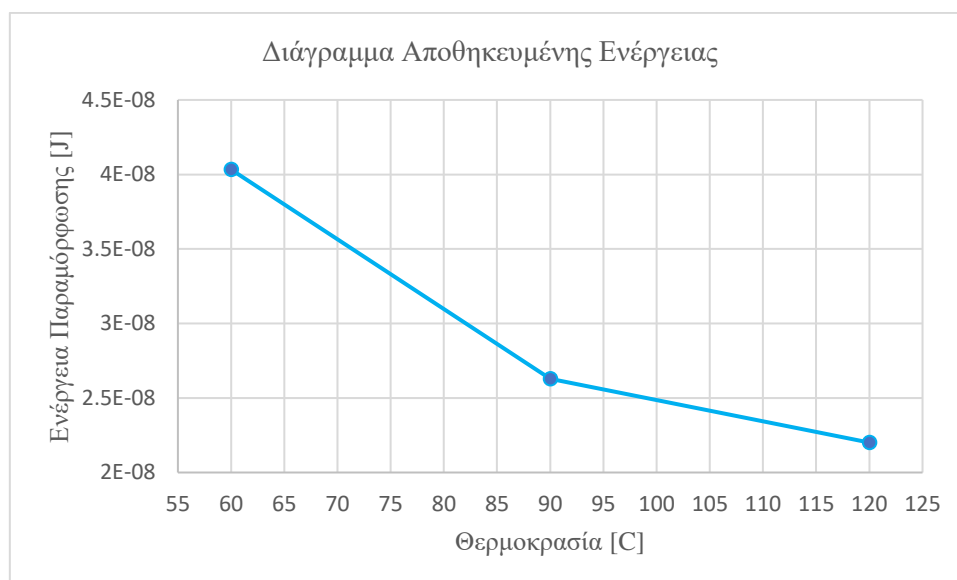


Διάγραμμα 58 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, στους 30°C δεν θα εκπληρωθεί το κριτήριο, ενώ πιο σύντομα θα διαδοθεί η ρωγμή για την θερμοκρασία των 120°C. Ωστόσο, οι ενέργειες που χρειάζονται φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 17 : ABS-T700S/Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

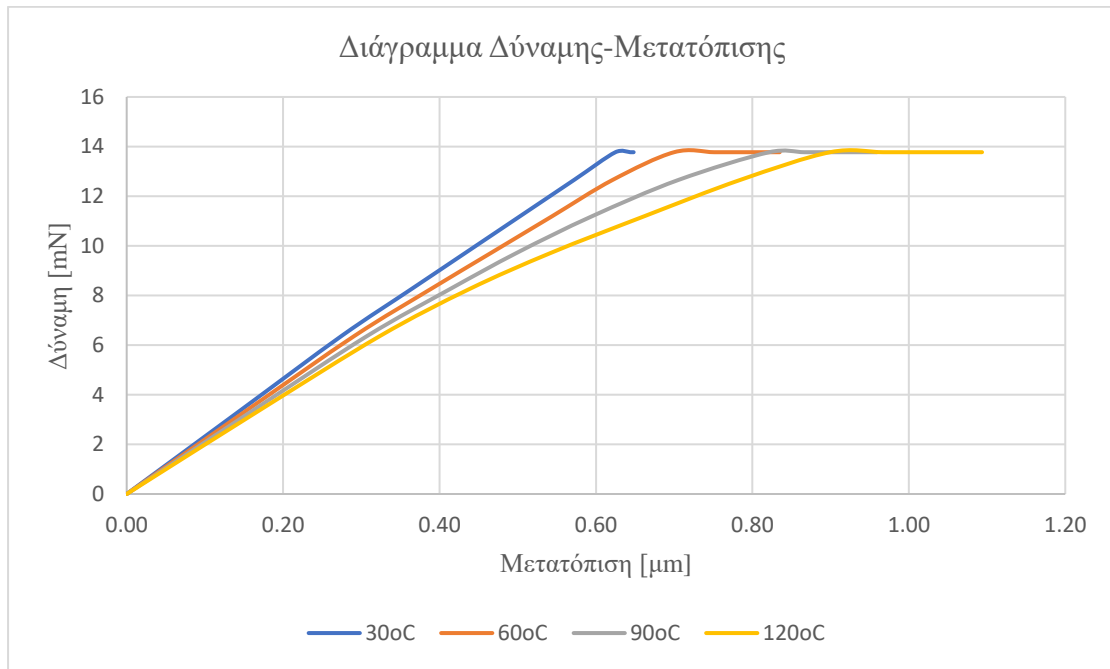
Θερμοκρασίες	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
30°C	Not Fulfilled	-
60°C	3.16 sec	4.03E-08 [J]
90°C	2.38 sec	2.63E-08 [J]
120°C	1.77 sec	2.20E-08 [J]



Διάγραμμα 59 : ABS-T700S / Αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή διάδοσης της ρωγμής σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από το παραπάνω διάγραμμα αλλά και από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως στη θερμοκρασία των 30°C δεν εκπληρώνεται το κριτήριο. Δηλαδή, η ενέργεια που θα αποθηκευτεί στο σύστημα μέχρι να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής είναι πολύ μεγάλη, δηλαδή, θα χρειαστούν παραπάνω από 5 sec μέχρι να ξεκινήσει η ρωγμή. Είναι λογικό καθώς οι 30°C είναι χαμηλή θερμοκρασία το οποίο σημαίνει πως θα είναι δυσκολότερη η εκρίζωση της ίνας.

Ωστόσο, φαίνεται πως στους 120°C θα έχουμε την ελάχιστη αποθηκευμένη παραμορφωσιακή ενέργεια στο σύστημα μέχρι να ξεκινήσει η διάδοση της ρωγμής. Επομένως, η ενεργειακά βέλτιστη περίπτωση για τον διαχωρισμό της ίνας από την μήτρας, είναι στους 120°C.



Διάγραμμα 60 : ABS-T700S / Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πως και σε αυτή την περίπτωση οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις θα συμβούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Επίσης, είναι εμφανές πως σε σχέση με τον προηγούμενο συνδυασμό υλικών οι τιμές της μετατόπισης είναι παρόμοιες, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ίδιο μέτρο ελαστικότητας της ίνας και τα παρόμοια χαρακτηριστικά αυτών.

Πίνακας 18 : ABS-T700S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
30°C	-
60°C	65.90
90°C	54.84
120°C	45.75

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εξίσου εμφανές πως η διατμητική αντοχή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, οι τιμές σε αυτή την περίπτωση είναι ίδιες με τις τιμές του προηγούμενου συνδυασμού υλικών, γεγονός το οποίο οφείλεται στα κοινά χαρακτηριστικά των ινών άνθρακα.

Συμπεράσματα

Αρχικά, παρατηρείται πως οι συνδυασμοί που περιέχουν ως ίνα την T800S (294 GPa) παρουσιάζουν τις μικρότερες παραμορφώσεις, έναντι των συνδυασμών με ίνες T300, T700S (230 GPa). Η συμπεριφορά αυτή είναι λογική καθώς η ίνα με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας παραμορφώνεται δυσκολότερα. Επίσης, όλες οι μετατοπίσεις της ίνας έδειξαν πως για μεγαλύτερη θερμοκρασία συμβαίνει και μεγαλύτερη μετατόπιση, το οποίο είναι λογικό καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας.

Από τα κριτήρια Τετραγωνικής Αστοχίας και Benzeggagh-Kennane φάνηκε πως τόσο η έναρξη της ρωγμής αλλά και η διάδοσή της θα συμβούν γρηγορότερα στις υψηλές θερμοκρασίες. Τέτοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη καθώς στις υψηλότερες θερμοκρασίες συμβαίνει και ευκολότερη αποκόλληση της ίνας από την μήτρα.

Όσον αφορά τα ενεργειακά κριτήρια των ERR σε όλα τα διαγράμματα Mode-II τις υψηλότερες τιμές τις παρουσιάζει η μικρότερη θερμοκρασία και έπειτα η αμέσως μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει καθώς η εκρίζωση της ίνας τείνει να προκαλέσει ολίσθηση ανάμεσα στα υλικά της ίνας και της μήτρας, επομένως, είναι λογικό να απαιτείται περισσότερη ενέργεια παραμόρφωσης στις χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Επιπλέον, φάνηκε πως οποιοσδήποτε συνδυασμός υλικών δεν παρουσιάζει βέλτιστη ενεργειακή επιλογή τη θερμοκρασία των 30°C ή 60°C, το οποίο είναι λογικό καθώς σε αυτή τη θερμοκρασία η εκρίζωση της ίνας απαιτεί πολύ ενέργεια μέχρι να συμβεί. Επίσης, οι συνδυασμοί με υλικό μήτρας ABS παρουσιάζουν την βέλτιστη ενεργειακά επιλογή μόνο στη θερμοκρασία των 120°C, το οποίο συμβαίνει καθώς σε αυτή τη θερμοκρασία η αποκόλληση γίνεται ευκολότερα άρα απαιτεί και λιγότερη ενέργεια. Ωστόσο, στους συνδυασμούς υλικών με μήτρα το PS η βέλτιστη ενεργειακά επιλογή συμβαίνει στις θερμοκρασίες των 90°C και 120°C. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει επειδή το υλικό PS είναι λιγότερο στιβαρό από το υλικό ABS.

Τέλος, από το διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης φάνηκε πως μεγαλύτερες μετατοπίσεις θα συμβούν στις υψηλότερες θερμοκρασίες καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας. Επίσης, ο όρος της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας φαίνεται πως μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, το οποίο είναι λογικό καθώς η υψηλές θερμοκρασίες υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας.

2.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για διαφορετικές Ακτίνες Ίνας

Εισαγωγή

Η δημιουργία σύνθετων υλικών ενισχυμένα με ίνες είναι μια τεχνολογία η οποία μελετάται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχοντας σκοπό τη βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες. [(Meng & Chang, International Journal of Solids and Structures, 2020); (Frikha, Nouri, Guessasma, Roger, & Bradai, 2017); (Yang, Qin, & Peng, 2003)]

Εκτενείς μελέτες έχουν διεξαχθεί για την κατασκευή τέτοιων σύνθετων υλικών, με τις πιο πρόσφατες αυτών να χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία για να εξετάσουν τις διάφορες συμπεριφορές που παρουσιάζουν οι υπό-μελέτη συνδυασμοί (Meng & Chang, International Journal of Solids and Structures, 2020). Όσον αφορά τις μελέτες με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, μεγάλη σημασία δίνεται στην κατασκευή του πλέγματος ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό, χωρίς να απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος (Υπερεκτιμημένο), ούτε όμως να είναι ελλιπές (Υποεκτιμημένο).

Η εκκρίωση της ίνας έχει αποδειχτεί πως είναι η πιο αποτελεσματική προσέγγιση για τη μέτρηση της αντοχής διεπιφανειακής σύνδεσης μεταξύ ενισχυτικών ινών και πολυμερούς μήτρας [(Miller, Muri, & Rebenfeld, 1987); (Zhandarov, Mader, Yurkevich, & Adhes, 2002); (Tanaka, Minoshima, Grela, & Komai, 2002)]

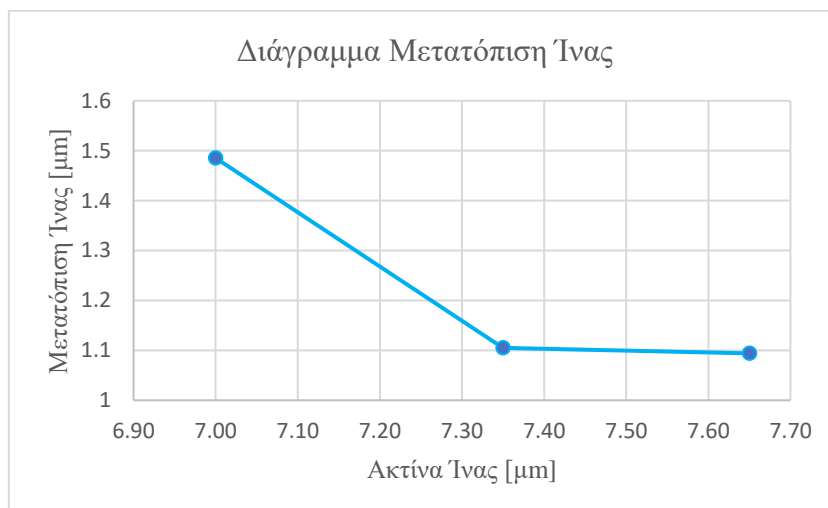
Σχεδιασμός Προσομοίωσης

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν ήταν για διαφορετικά ογκομετρικά κλάσματα αναλογίας ίνας-μήτρας. Αλλάζοντας κάθε φορά την ακτίνα της ίνας λαμβάνεται και ένα διαφορετικό ποσοστό στο ογκομετρικό κλάσμα. Τα ποσοστά αυτά στα ογκομετρικά κλάσματα προέκυψαν αλλάζοντας κάθε φορά την ακτίνα της ίνας. Δηλαδή, με ακτίνα ίνας $r=7[\mu\text{m}]$ γίνεται $V_f=0.45$, $r=7.35[\mu\text{m}]$ γίνεται $V_f=0.49$ και με $r=7.65[\mu\text{m}]$ γίνεται $V_f=0.53$.

Οι θερμοκρασίες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε η μελέτη αυτή είναι οι θερμοκρασίες που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση που είχαν πραγματοποιηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δηλαδή, επιλέγεται ο συνδυασμός υλικών ο οποίος παρουσίαζε βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.

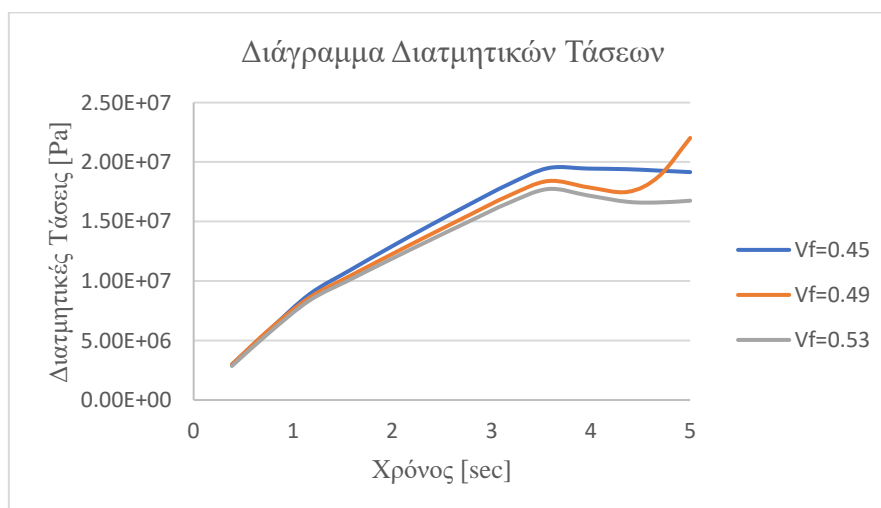
2.2.1 Matrix : PS – Fiber : T800S (294 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 61 : PS-T800S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

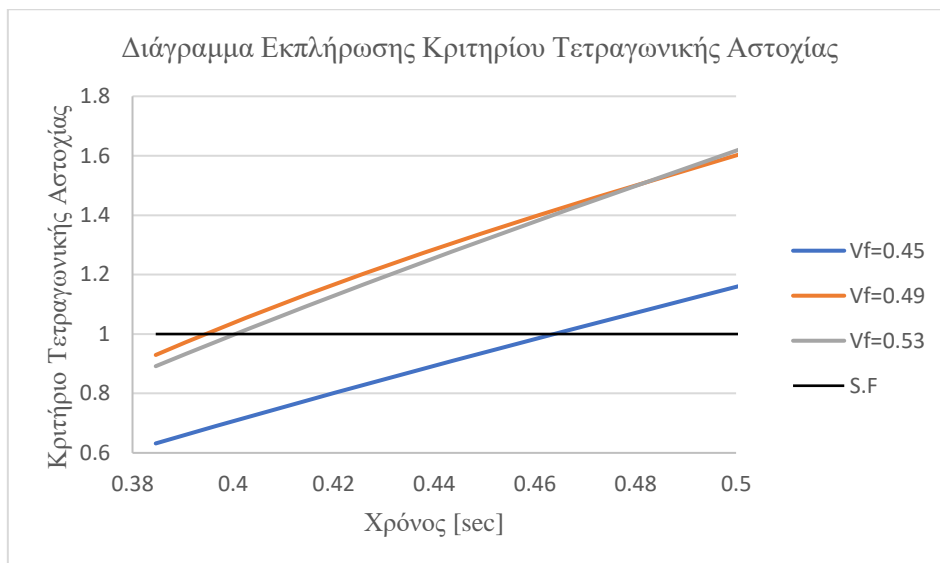
Παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερη η ακτίνα της ίνας τόσο μικρότερη και η μετατόπισή της. Η αξονική μετατόπιση της ίνας με ακτίνα 7 [μm] είναι κατά 25% μεγαλύτερη από ότι της ακτίνας 7.65 [μm]. Ήταν αναμενόμενο καθώς όσο πιο παχιά είναι η ίνα τόσο πιο δύσκολα μετατοπίζεται.



Διάγραμμα 62 : PS-T800S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

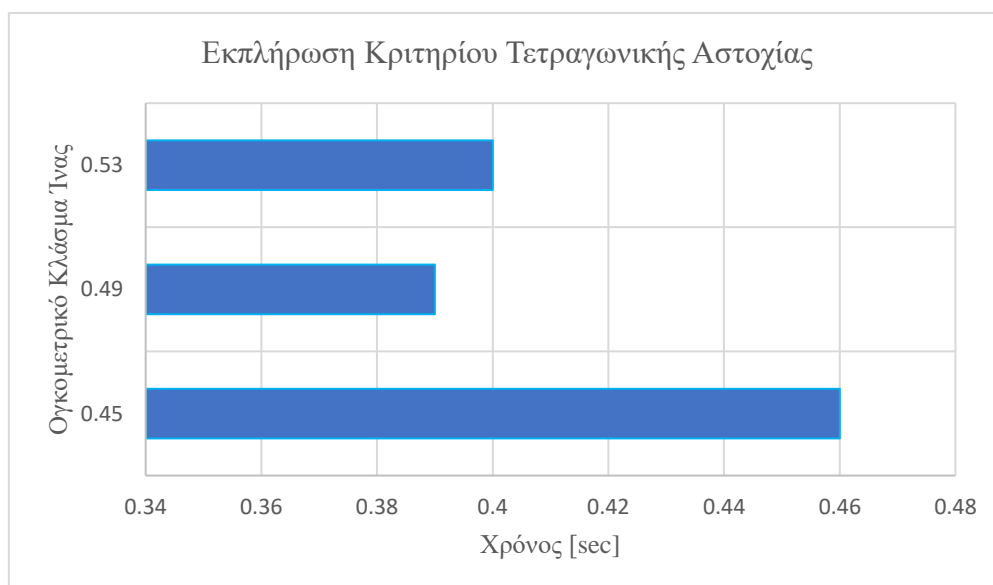
Οι διατμητικές τάσεις του διαγράμματος είναι αυτές που εμφανίζονται πάνω στην ίνα. Φαίνεται πως όσο μεγαλύτερη η διάμετρος της ίνας τόσο μικρότερες διατμητικές τάσεις παρουσιάζει. Κατά το πέρας του χρόνου ωστόσο τις υψηλότερες τάσεις τις παρουσιάζει η αναλογία Vf=0.49.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



Διάγραμμα 63 : PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

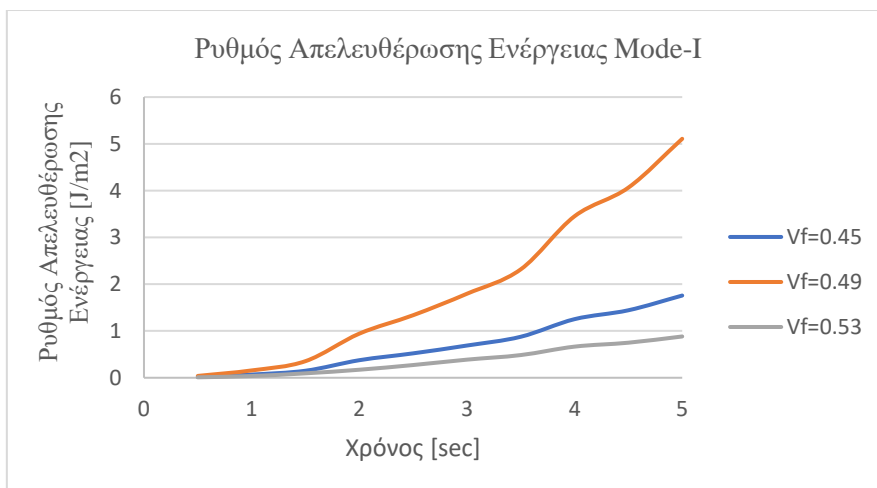
Με τον συντελεστή ασφαλείας 1 που ορίζει το κριτήριο αυτό, λαμβάνεται ένα διάγραμμα που δείχνει την χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμής σε κάθε μια από τις διαφορετικές ακτίνες. Παρατηρείται πως συντομότερα θα ξεκινήσει η ρωγμή στην αναλογία Vf=0.49. Το ίδιο φαίνεται αναλυτικότερα και στο παρακάτω διάγραμμα.



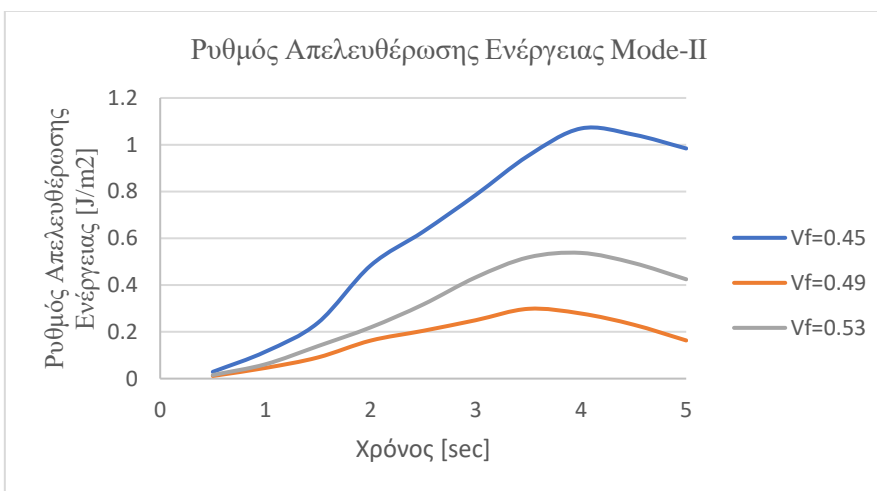
Διάγραμμα 64 : PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Γρηγορότερη έναρξη ρωγμής θα συμβεί στην αναλογία Vf=0.49 ενώ βραδύτερη στη Vf=0.45.

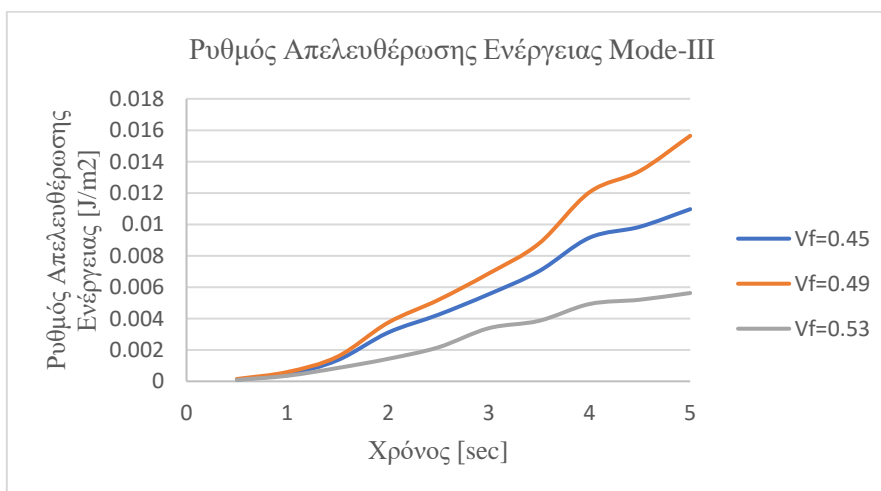
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 65 : PS-T800S / ERR GI για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



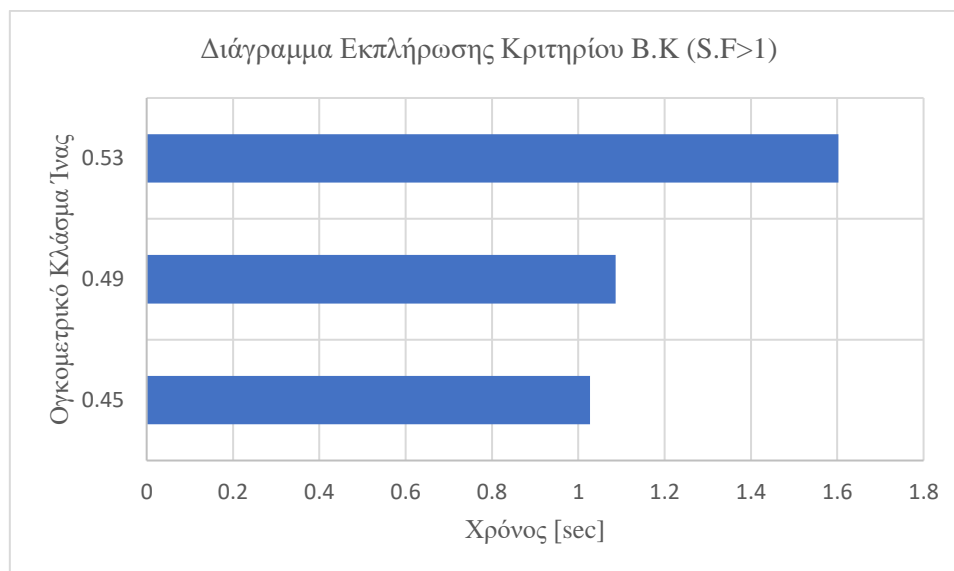
Διάγραμμα 66 : PS-T800S / ERR GII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



Διάγραμμα 67: PS-T800S / ERR GIII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Κατά τα Mode-I, III η περίπτωση με $V_f=0.49$ θα εκλύσει την περισσότερη ενέργεια κατά την αποκόλληση σε σχέση με τους άλλους συνδυασμούς.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



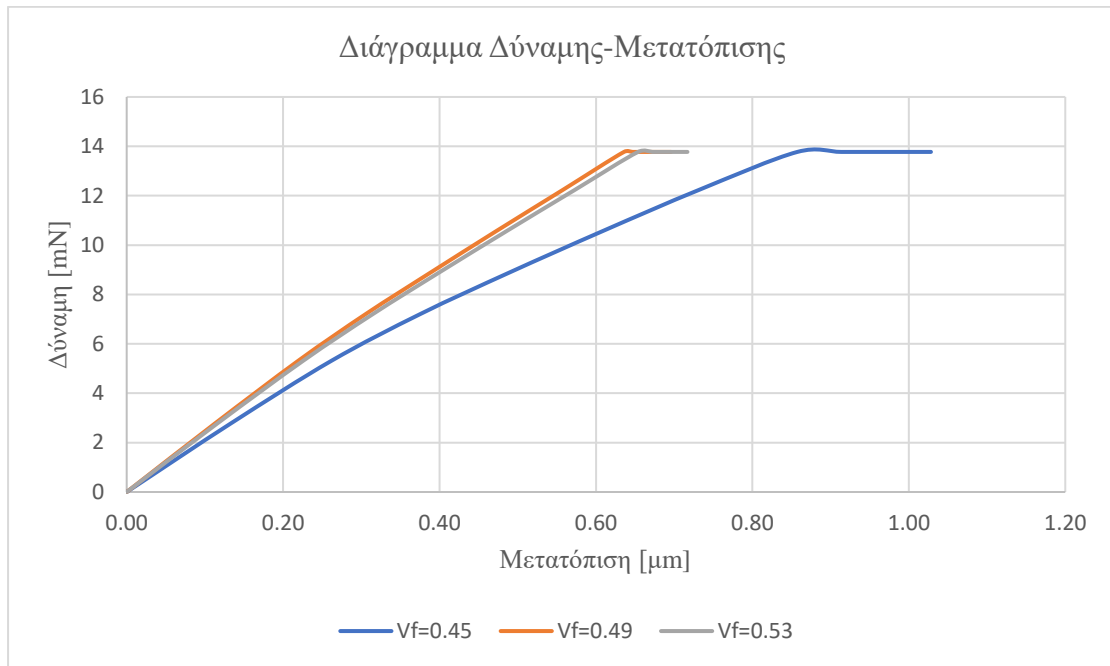
Διάγραμμα 68 : PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από το διάγραμμα φαίνεται πως γρηγορότερα εκπληρώνεται για το κλάσμα των $V_f=0.45, 0.49$, ωστόσο η ενέργεια που απαιτείται φαίνεται παρακάτω :

Πίνακας 19 : PS-T800S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Ογκομετρικά Κλάσματα	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
$V_f=0.45$	1.02 sec	5.69E-09 [J]
$V_f=0.49$	1.08 sec	7.29E-09 [J]
$V_f=0.53$	1.60 sec	1.42E-08 [J]

Επομένως, φαίνεται πως η λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, είναι για το ογκομετρικό κλάσμα $V_f=0.45$. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλη είναι η ίνα σε ένα σύνθετο υλικό τόσο περισσότερη ενέργεια θα αποθηκευτεί σε αυτό έως να γίνει η θραύση του.



Διάγραμμα 69 : PS-T800S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως για μεγαλύτερες ακτίνες ίνας οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας θα είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με την αρχική ακτίνα. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλη η ίνα τόσο πιο στιβαρό γίνεται και το δοκίμιο, επομένως, οι μετατοπίσεις θα παρουσιάζουν μικρότερες τιμές.

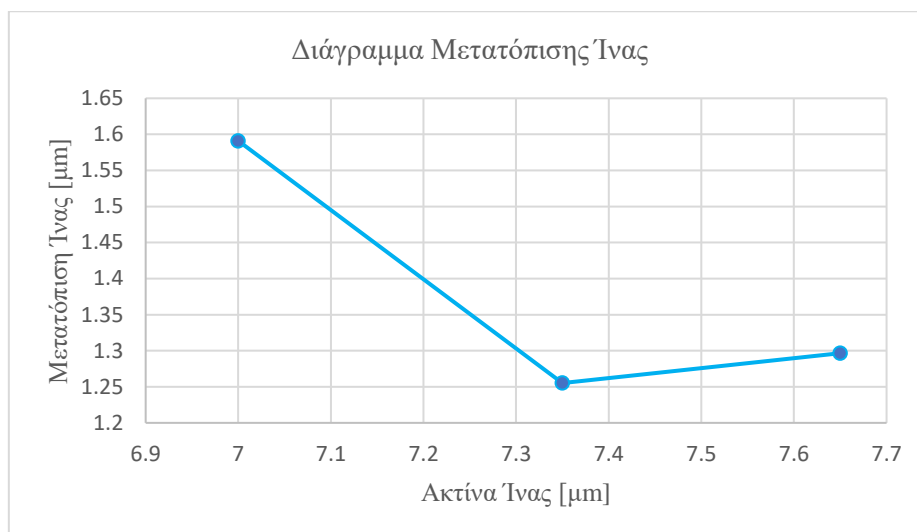
Πίνακας 20 : PS-T800S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
Vf=0.45	27.38
Vf=0.49	28.53
Vf=0.53	38.23

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας της ίνας, ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς για μεγαλύτερες ακτίνες ίνας σε ένα σύνθετο υλικό επέρχεται και υψηλότερη αντοχή.

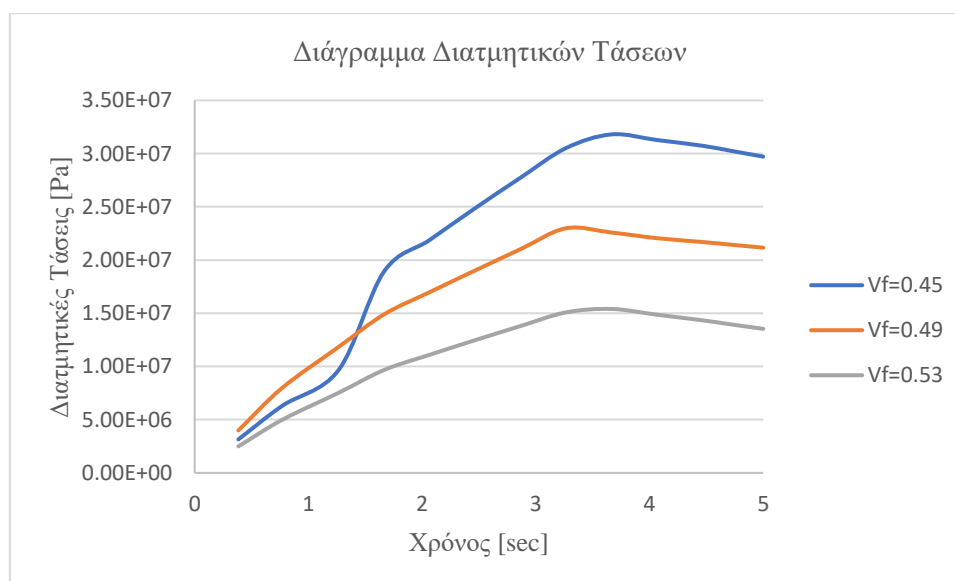
2.2.2 Matrix : PS – Fiber : T300 (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 90°C.



Διάγραμμα 70 : PS-T300 / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

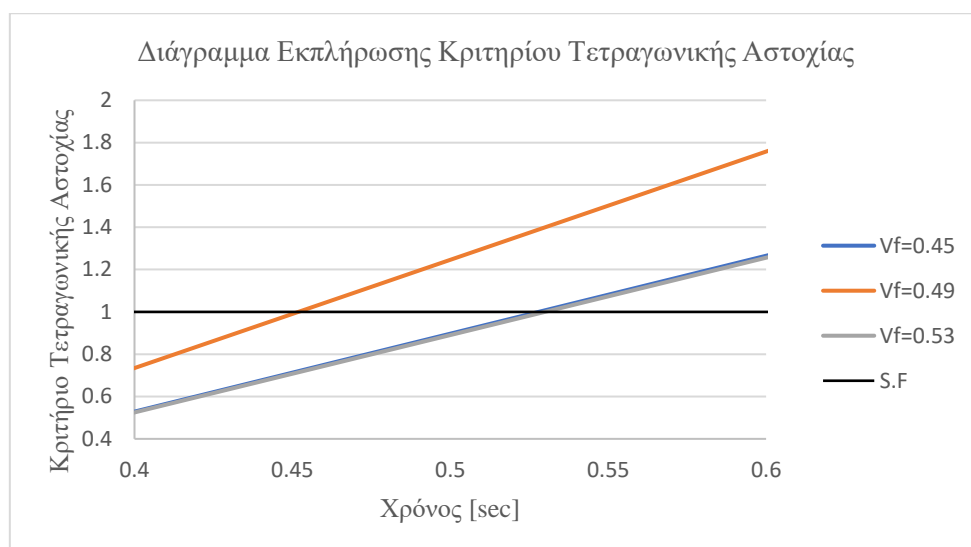
Για μεγαλύτερη ακτίνα ίνας, παρατηρείται και μικρότερη μετατόπιση. Η διαφορά της μετατόπισης της ίνας μεταξύ των ακτίνων 7 [μm] και 7.65 [μm] είναι 20%, το οποίο είναι σχετικά υψηλό.



Διάγραμμα 71 : PS-T300 / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

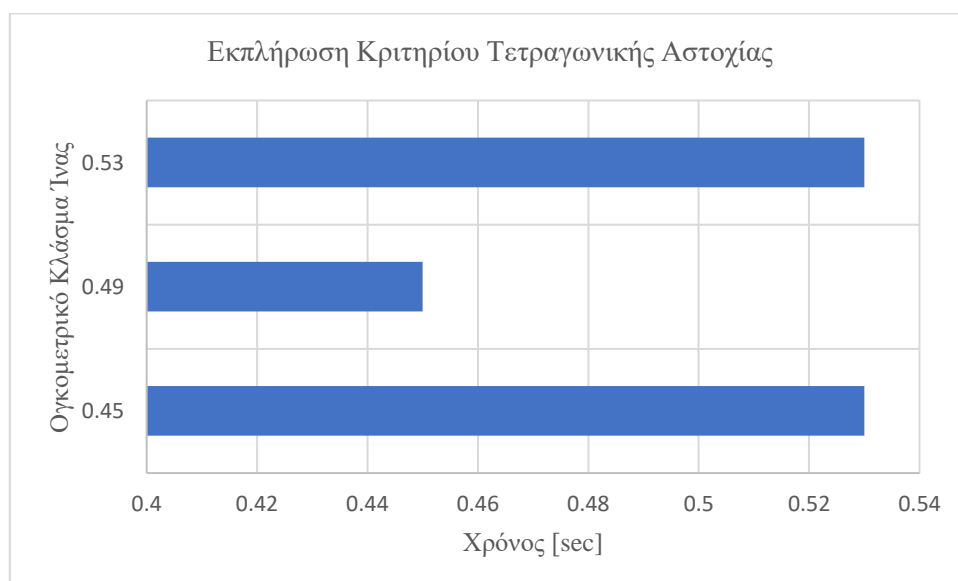
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της ίνας τόσο μικρότερες διατμητικές τάσεις θα εμφανιστούν. Μια τέτοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη καθώς όσο πιο μεγάλη σε διάμετρο είναι η ίνα ενός σύνθετου υλικού τόσο πιο δύσκολα παραμορφώνεται.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



Διάγραμμα 72 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

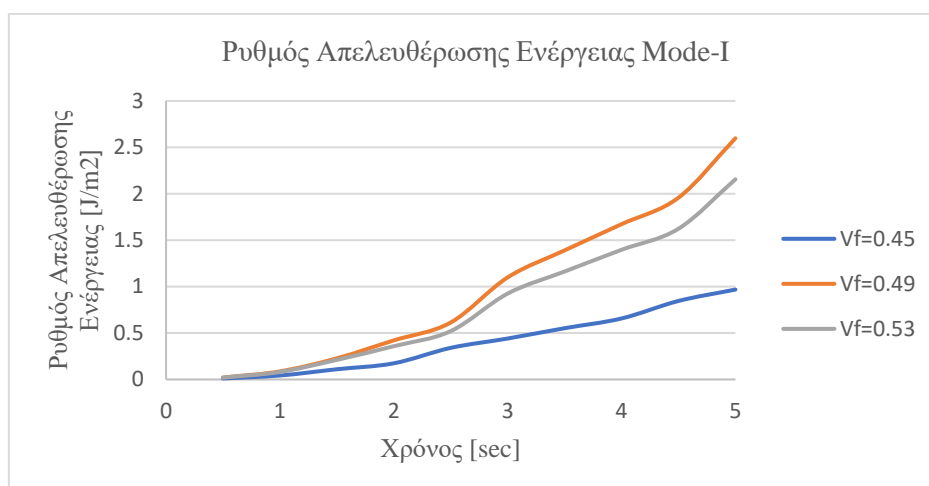
Για τις περιπτώσεις των Vf=0.45, 0.53 η ρωγή θα ξεκινήσει την ίδια χρονική στιγμή σε σχέση με την αναλογία Vf=0.49. Μια τέτοια συμπεριφορά είχε εμφανιστεί και στην προηγούμενη περίπτωση. Επίσης, το διάγραμμα που θα μας την χρονική στιγμή έναρξης της ρωγής είναι το παρακάτω :



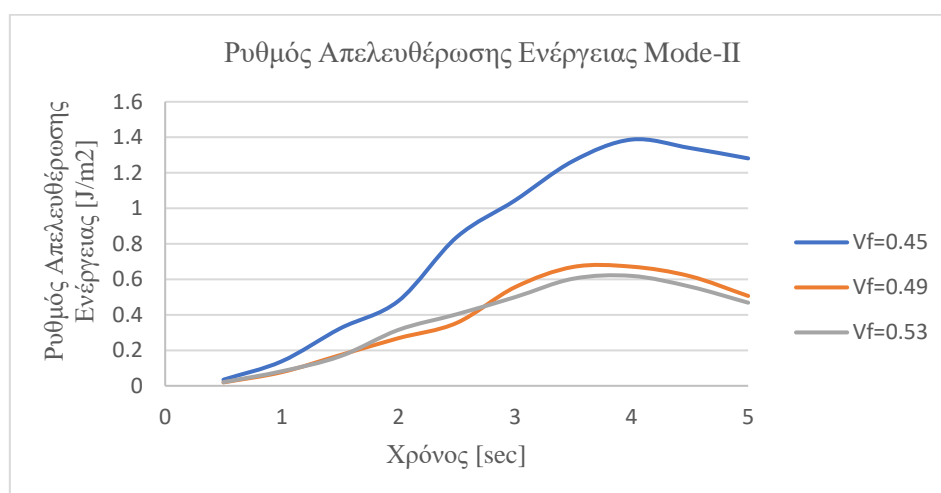
Διάγραμμα 73 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Γρηγορότερη έναρξη της ρωγής θα συμβεί στην αναλογία Vf=0.49 ενώ βραδύτερη στην αναλογία των Vf=0.45, 0.53.

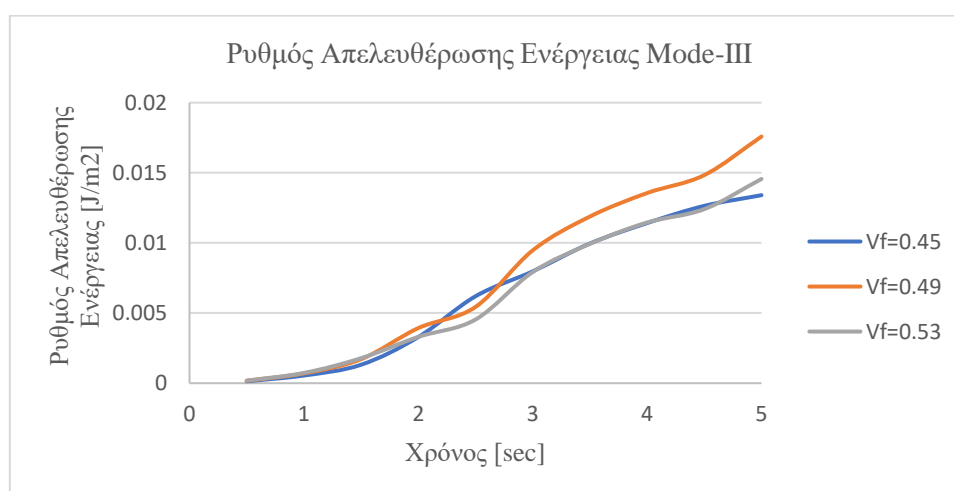
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 74 : PS-T300 / ERR GI για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



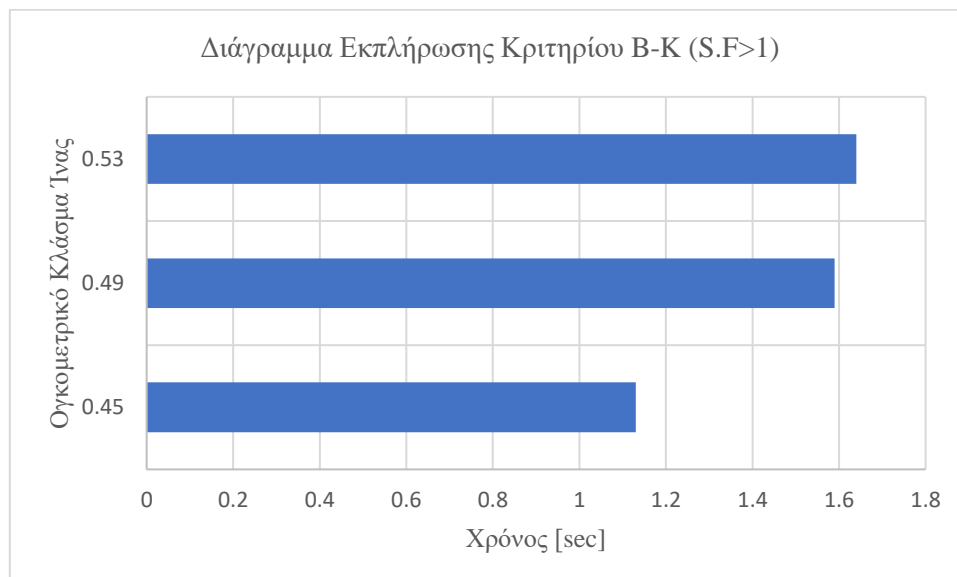
Διάγραμμα 75 : PS-T300 / ERR GII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



Διάγραμμα 76 : PS-T300 / ERR GIII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Παρατηρείται πως κατά το Mode-I, III η περίπτωση του $V_f=0.49$ θα εκλύσει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας κατά την αποκόλληση σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



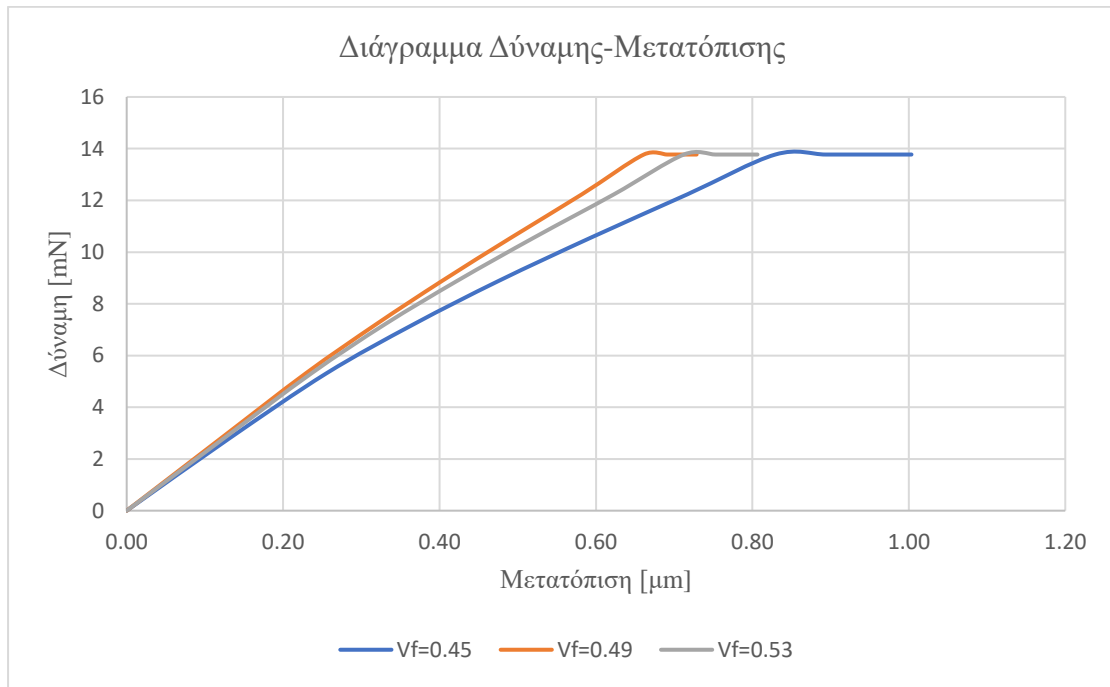
Διάγραμμα 77 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως γρηγορότερα εκπληρώνεται το κριτήριο για την περίπτωση $V_f=0.45$ ενώ την ίδια χρονική στιγμή εκπληρώνεται στις υπόλοιπες περιπτώσεις, ωστόσο, η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 21 : PS-T300 / Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Ογκομετρικά Κλάσματα	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
$V_f=0.45$	1.13 sec	6.91E-09 [J]
$V_f=0.49$	1.59 sec	2.06E-08 [J]
$V_f=0.53$	1.64 sec	2.97E-08 [J]

Φαίνεται πως η λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, άρα και ενεργειακά βέλτιστη επιλογή, είναι για την αναλογία ίνας $V_f=0.45$. Εξίσου, και σε αυτή την περίπτωση ήταν ένα αποτέλεσμα που το περιμέναμε καθώς όσο πιο μεγάλη η ίνα σε ένα σύνθετο υλικό τόσο πιο δύσκολα θα φτάσει στη θραύση.



Διάγραμμα 78 : PS-T300 / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως για μεγαλύτερες ακτίνες ίνας οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής θα είναι μικρότερες, το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς μια αντίστοιχη συμπεριφορά έδειξε και ο προηγούμενος συνδυασμός υλικών. Ωστόσο, οι μετατοπίσεις είναι ελαφρώς μικρότερες σε σχέση με τον προηγούμενο συνδυασμό υλικών, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφορά του μέτρου ελαστικότητας της ίνας άνθρακα των συνδυασμών αυτών.

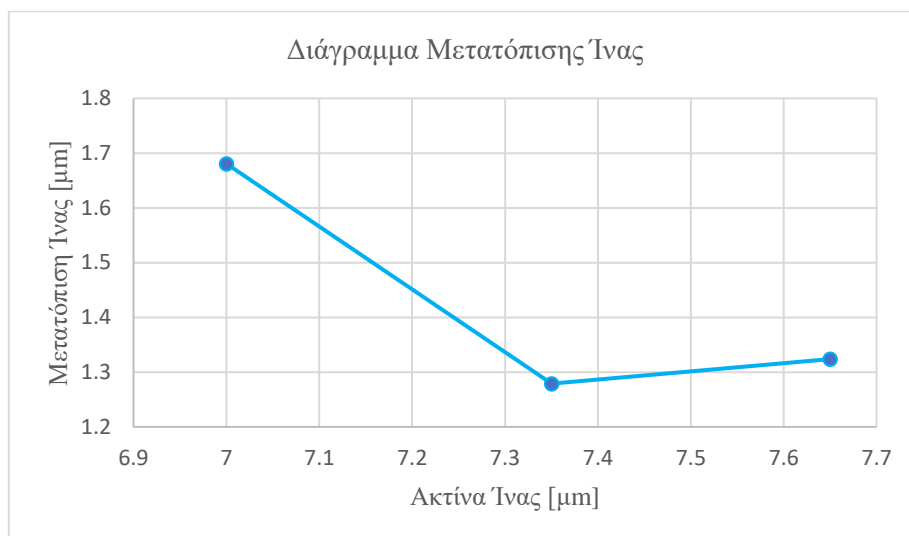
Πίνακας 22 : PS-T300 / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
Vf=0.45	29.36
Vf=0.49	38.01
Vf=0.53	38.86

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ξανά πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας της ίνας, ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς για μεγαλύτερες ακτίνες ίνας σε ένα σύνθετο υλικό επέρχεται και υψηλότερη αντοχή. Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές είναι μεγαλύτερες, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία προσομοίωσης είναι στους 90°C.

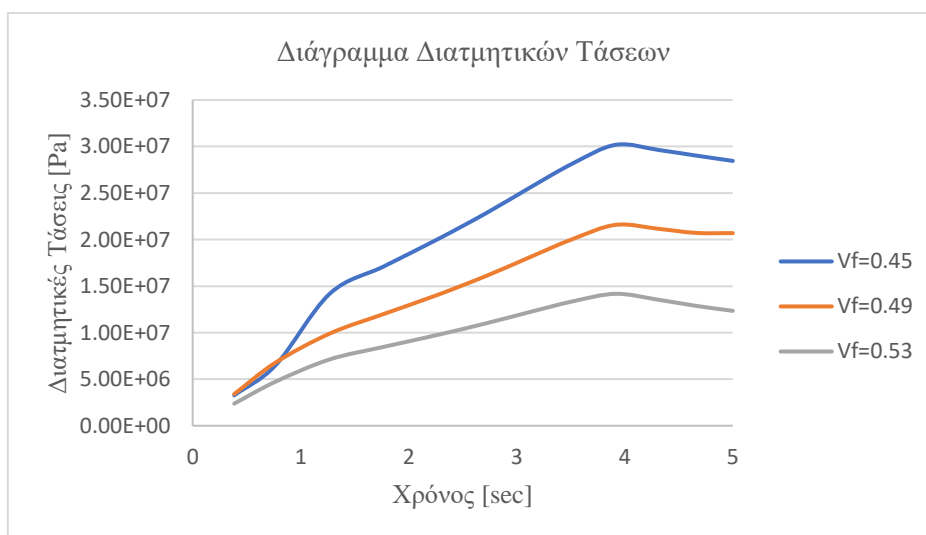
2.2.3 Matrix : PS – Fiber : T700S (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C.



Διάγραμμα 79 : PS-T700S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

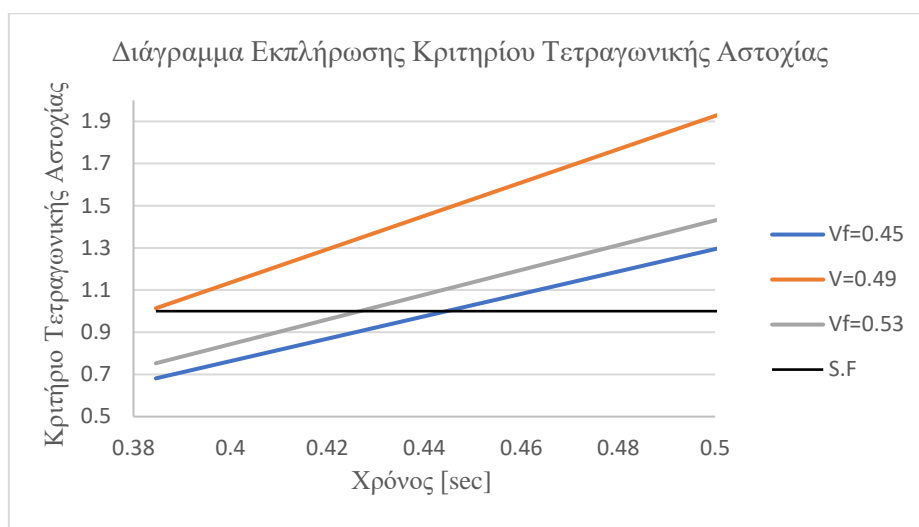
Είναι εμφανές πως και σε αυτή την περίπτωση όσο μεγαλύτερη η ακτίνα της ίνας τόσο μικρότερη θα είναι και η μετατόπισή της κατά την διάρκεια της εκρίζωσης. Η διαφορά μεταξύ των ακτινών 7 [μm] και 7.65 [μm] είναι 22%.



Διάγραμμα 80 : PS-T700S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

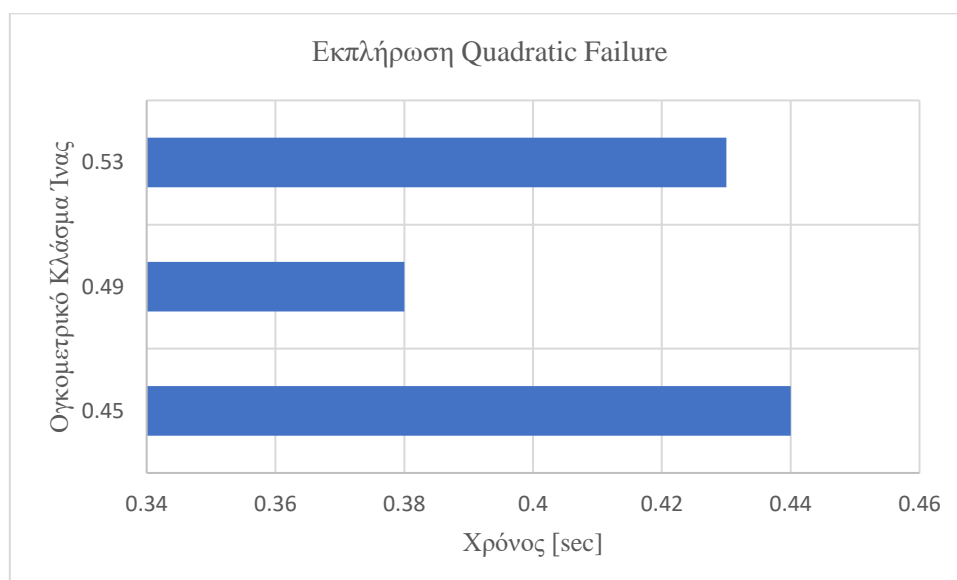
Από το παραπάνω διάγραμμα βγαίνει το συμπέρασμα πως όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα της ίνας τόσο μικρότερες είναι οι διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται στο σύστημα.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



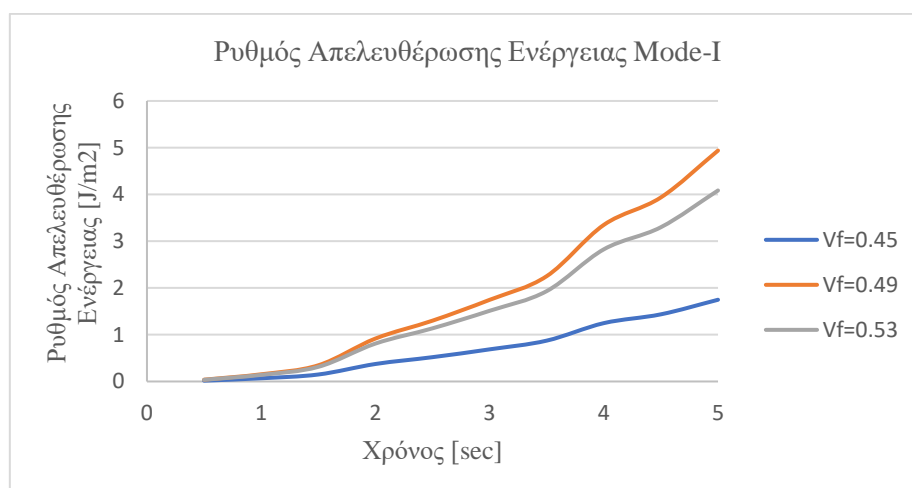
Διάγραμμα 81 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ παρατηρούμε πως η περίπτωση του $V_f=0.49$ εκπληρώνεται συντομότερα, ενώ οι άλλες δύο περιπτώσεις εκπληρώνονται την ίδια χρονική στιγμή σχεδόν. Το ίδιο μας δείχνει αναλυτικότερα το παρακάτω διάγραμμα :

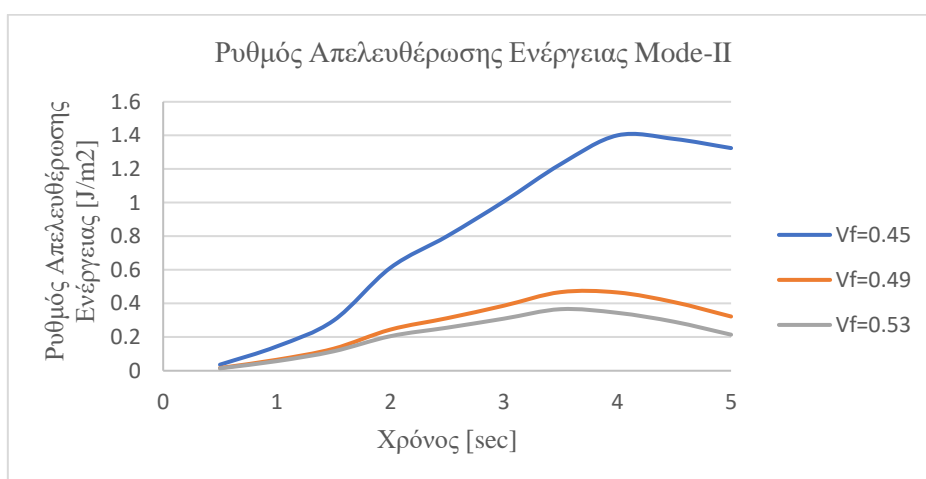


Διάγραμμα 82 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

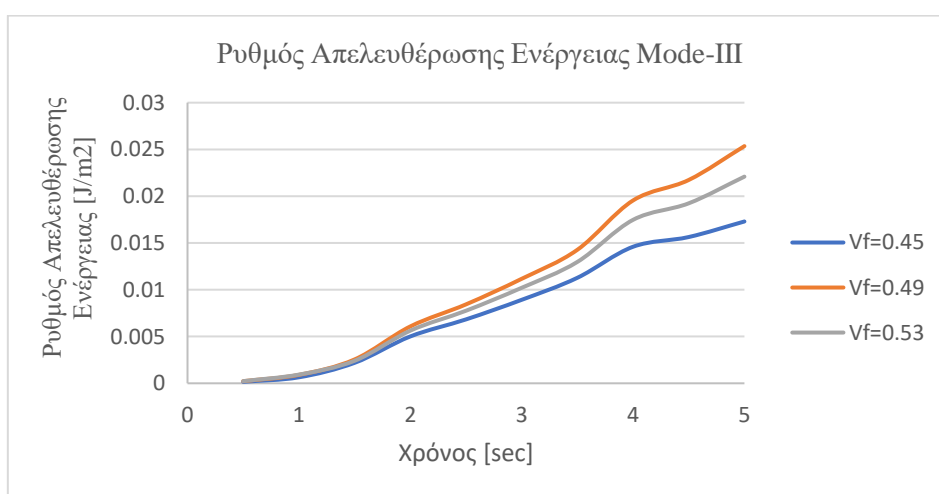
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 83 : PS-T700S / ERR Mode-I για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



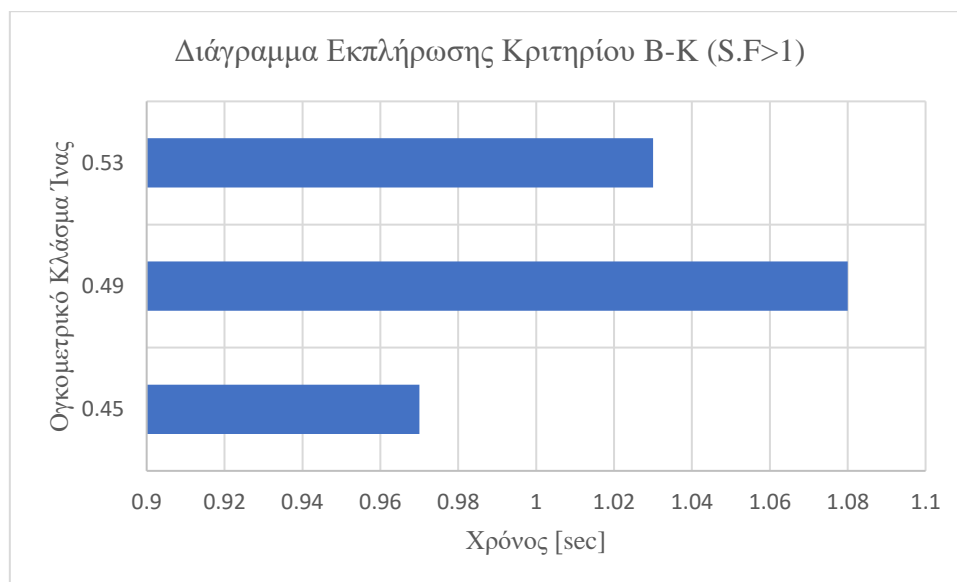
Διάγραμμα 84 : PS-T700S / ERR Mode-II για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



Διάγραμμα 85 : PS-T700S / ERR Mode-III για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως κατά το Mode-I, III η περίπτωση του $V_f=0.49$ θα εκλύσει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας κατά την αποκόλληση σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



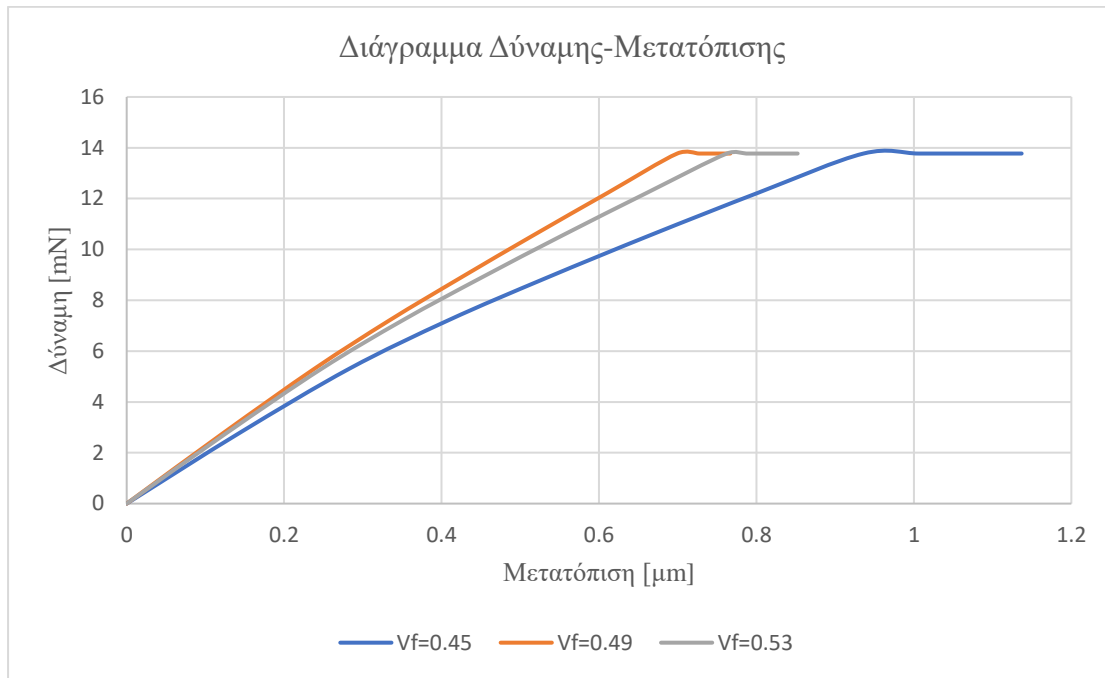
Διάγραμμα 86 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Παρατηρείται πως βραδύτερα εκπληρώνεται για τις περιπτώσεις των $V_f=0.49, 0.53$ ωστόσο η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα σε κάθε περίπτωση φαίνεται παρακάτω :

Πίνακας 23 : PS-T700S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Ογκομετρικά Κλάσματα	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
$V_f=0.45$	0.97 sec	5.98E-09 [J]
$V_f=0.49$	1.08 sec	1.57E-08 [J]
$V_f=0.53$	1.03 sec	1.46E-08 [J]

Επομένως, φαίνεται πως η λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, άρα και ενεργειακά βέλτιστη επιλογή, είναι για την αναλογία ίνας $V_f=0.45$. Εξίσου, και σε αυτή την περίπτωση ήταν ένα αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλη η ίνα σε ένα σύνθετο υλικό τόσο πιο δύσκολα θα φτάσει στη θραύση.



Διάγραμμα 87 : PS-T700S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει εξίσου πως οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας κατά τη διάρκεια της εκρίζωσης θα είναι μικρότερες για συνδυασμούς με ακτίνες ίνας μεγαλύτερες από την αρχική. Μια παρόμοια συμπεριφορά έχουν δείξει και οι δύο προηγούμενοι συνδυασμοί υλικών. Ωστόσο, είναι εμφανές πως οι τιμές τις μετατόπισης σε αυτό τον συνδυασμό είναι υψηλότερες σε σχέση με τον προηγούμενο, παρόλο που οι συνδυασμοί αυτοί έχουν ίνα άνθρακα με παρόμοια χαρακτηριστικά. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η εκρίζωση συμβαίνει σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Επομένως, σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχουν και μεγαλύτερες μετατοπίσεις, το οποίο είναι λογικό καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

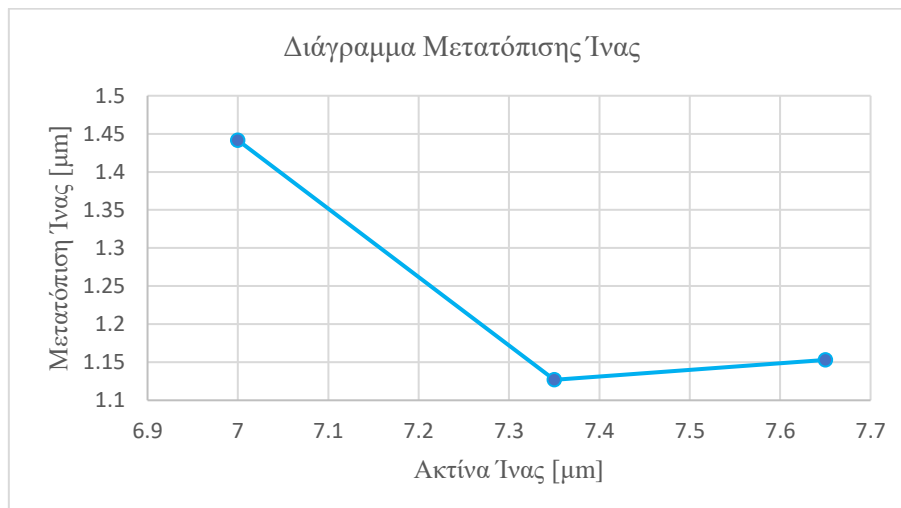
Πίνακας 24 : PS-T700S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
Vf=0.45	26.09
Vf=0.49	28.40
Vf=0.53	27.44

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται πως για την αναλογία του Vf=0.49 υπάρχει και ελαφρώς υψηλότερη τιμή διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας. Ένα τέτοιο μοτίβο έχει παρουσιάσει αυτός ο συνδυασμός και στα προηγούμενα αποτελέσματα.

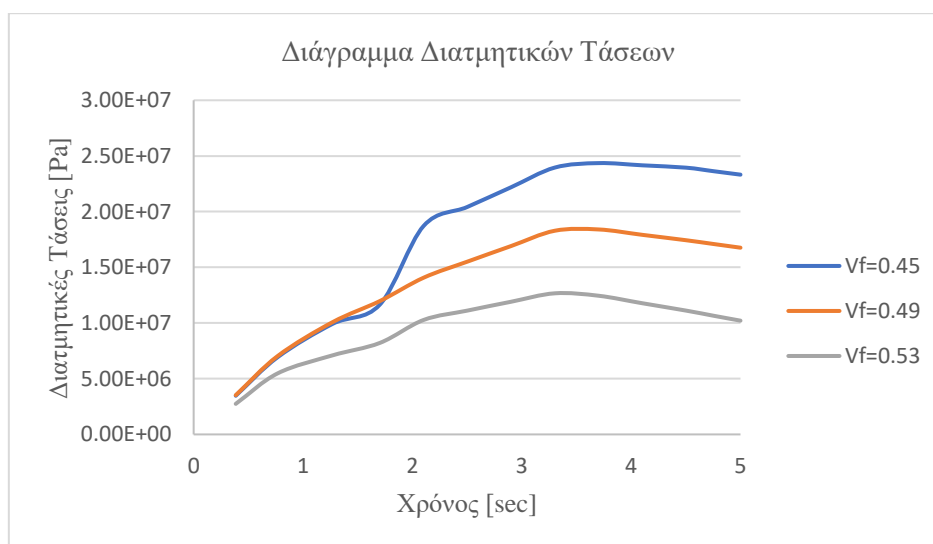
2.2.4 Matrix : ABS – Fiber : T800S (294 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου εξίσου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 88 : ABS-T800S / Μετατόπιση της Ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

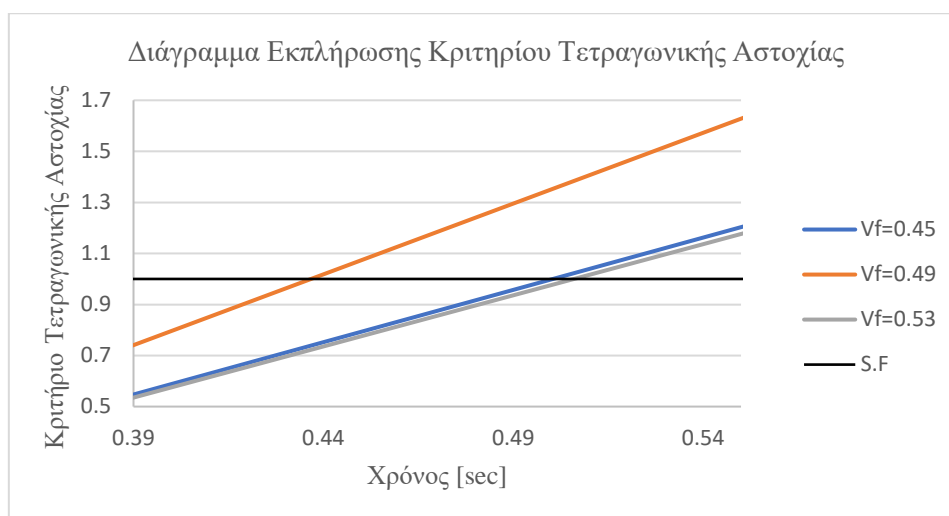
Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση πως όσο μεγαλύτερη η ακτίνα της ίνας τόσο μικρότερη θα είναι και η μετατόπιση της κατά την διάρκεια της εκρίζωσης. Η διαφορά μεταξύ των ακτινών 7 [μm] και 7.65 [μm] είναι 20%.



Διάγραμμα 89 : ABS-T800S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

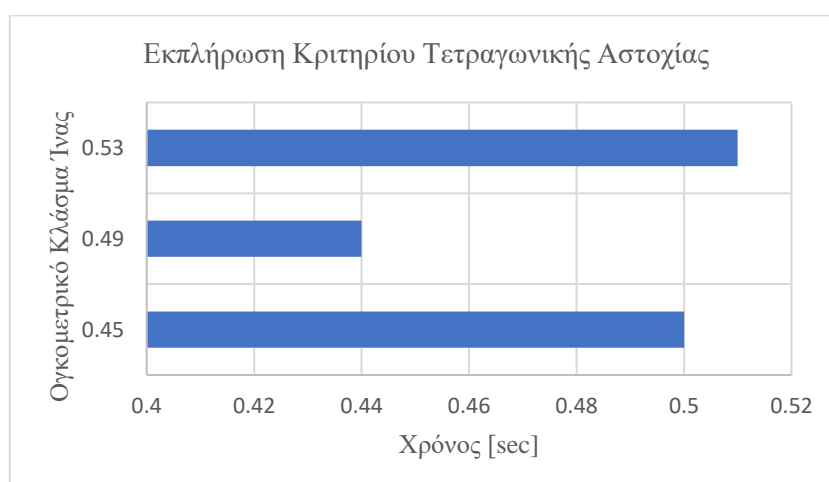
Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της ίνας τόσο μικρότερες διατμητικές τάσεις θα εμφανίσει. Μια τέτοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη καθώς όσο πιο μεγάλη σε διάμετρο είναι η ίνα ενός σύνθετου υλικού τόσο πιο δύσκολα παραμορφώνεται.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



Διάγραμμα 90 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

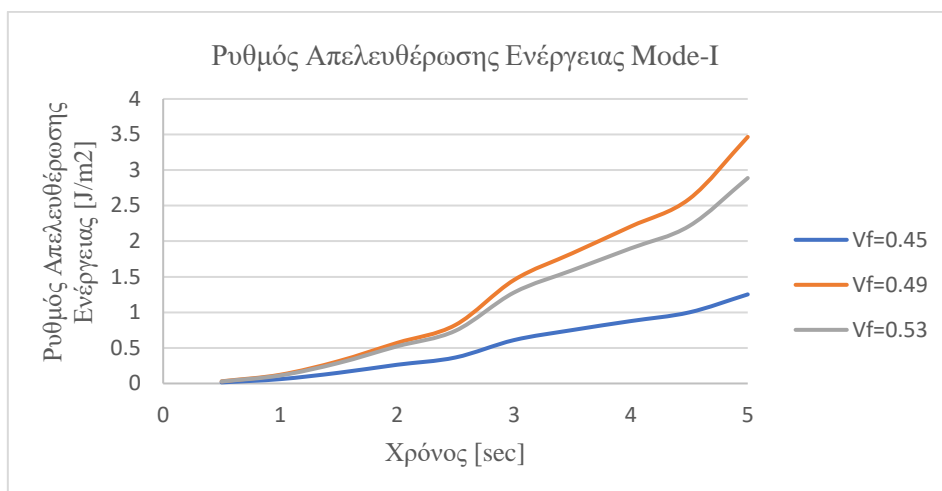
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ φαίνεται πως η περίπτωση του Vf=0.49 εκπληρώνεται συντομότερα, ενώ οι άλλες δύο περιπτώσεις εκπληρώνονται την ίδια χρονική στιγμή σχεδόν. Το ίδιο δείχνει αναλυτικότερα το παρακάτω διάγραμμα :



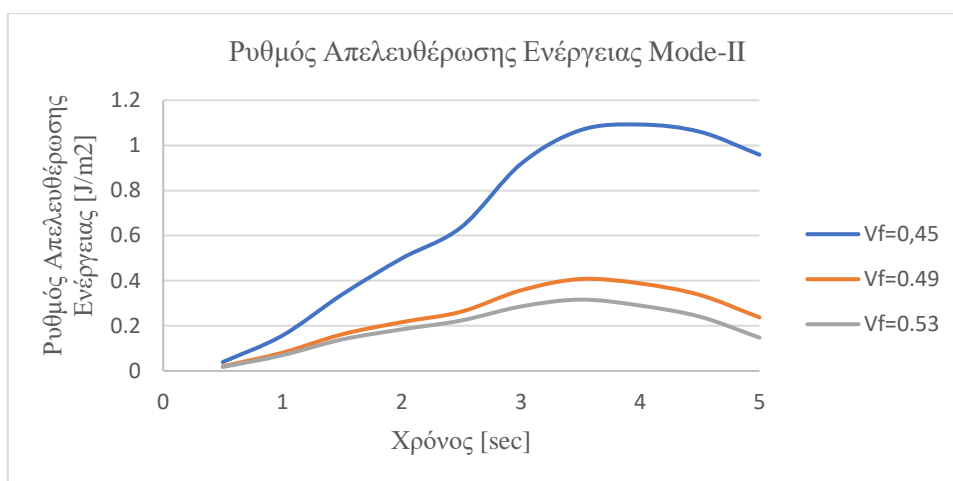
Διάγραμμα 91 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Παρατηρείται πως γρηγορότερη έναρξη ρωγμής θα συμβεί στην αναλογία Vf=0.49 ενώ βραδύτερη στην αναλογία των Vf=0.45, 0.53.

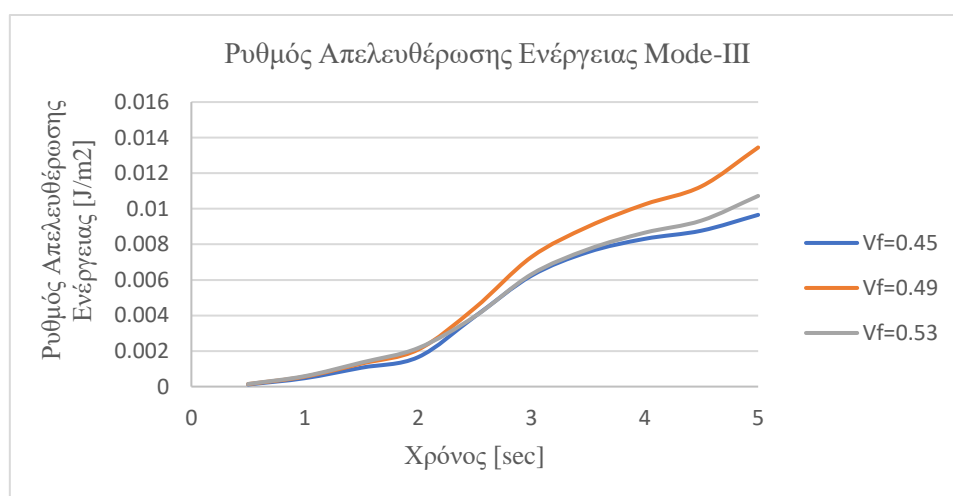
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 92 : ABS-T800S / ERR GI για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



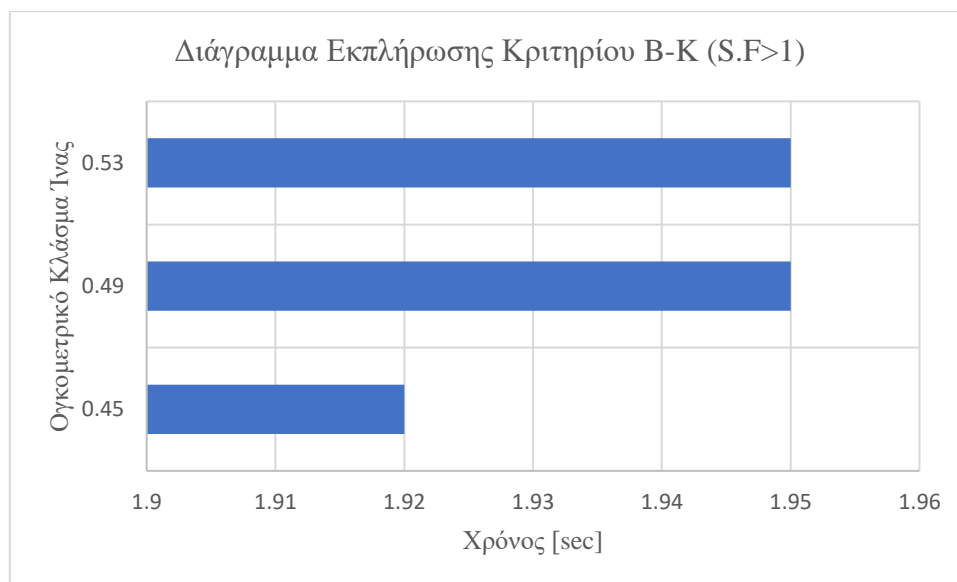
Διάγραμμα 93 : ABS-T800S / ERR GII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



Διάγραμμα 94 : ABS-T800S / ERR GIII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται πως κατά το Mode-I, III η αναλογία του $V_f=0.49$ θα εκλύσει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας κατά την αποκόλληση σε σχέση με τις υπόλοιπες αναλογίες.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



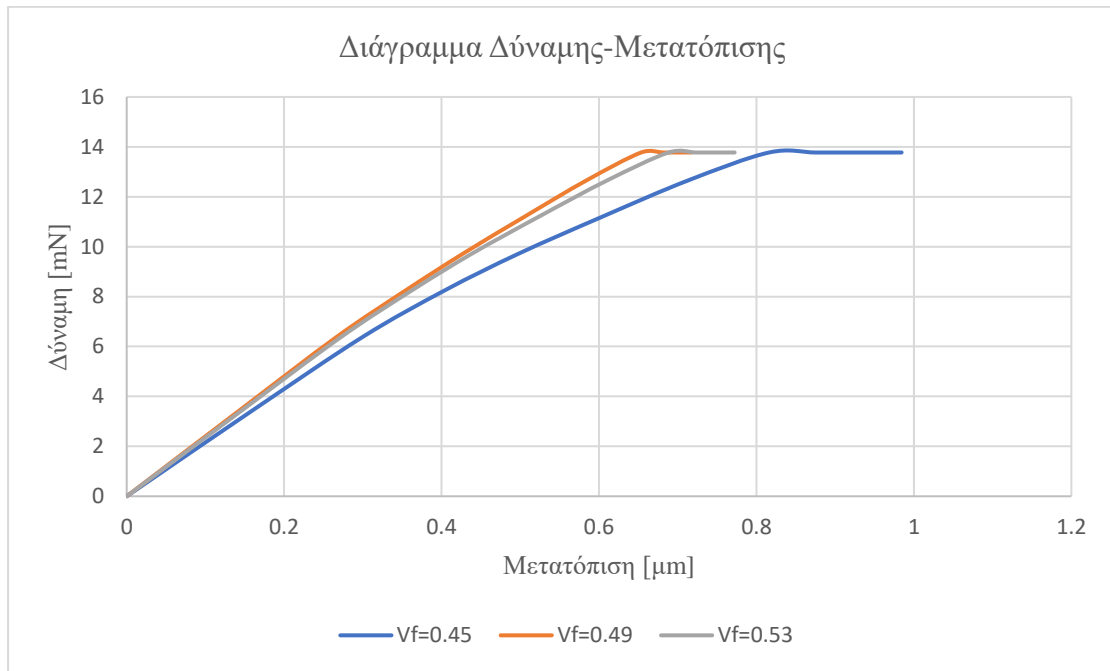
Διάγραμμα 95 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Το κριτήριο εκπληρώνεται σε κοντινές χρονικές στιγμές. Ωστόσο, οι ενέργειες που αποθηκεύονται στο σύστημα κάθε φορά είναι οι παρακάτω :

Πίνακας 25 : ABS-T800S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Ογκομετρικό Κλάσμα	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
$V_f=0.45$	1.92 sec	2.06E-08 [J]
$V_f=0.49$	1.95 sec	2.52E-08 [J]
$V_f=0.53$	1.95 sec	2.35E-08 [J]

Επομένως, φαίνεται πως η λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, άρα και ενεργειακά βέλτιστη επιλογή, είναι για την αναλογία ίνας $V_f=0.45$. Εξίσου, και σε αυτή την περίπτωση ήταν ένα αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλη η ίνα σε ένα σύνθετο υλικό τόσο πιο δύσκολα θα φτάσει στη θραύση.



Διάγραμμα 96 : ABS-T800S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές πως οι χαμηλότερες μετατοπίσεις θα εμφανιστούν για τις μεγαλύτερες ακτίνες ίνας. Ωστόσο, είναι εξίσου εμφανές πως οι τιμές αυτών είναι σχετικά μικρότερες σε σχέση με τον συνδυασμό υλικών με υλικό μήτρας το PS. Το γεγονός αυτό δείχνει πως οι συνδυασμοί με υλικά μήτρας το ABS παρουσιάζουν και ελαφρώς μεγαλύτερη στιβαρότητα.

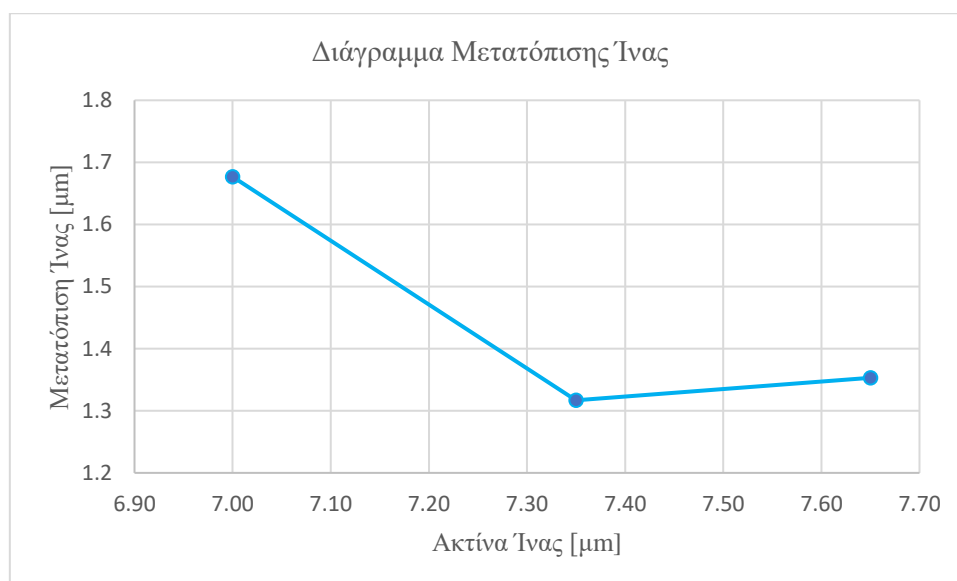
Πίνακας 26 : ABS-T800S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
Vf=0.45	48.13
Vf=0.49	55.87
Vf=0.53	63.30

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ξανά πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας της ίνας, ωστόσο, οι τιμές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, γεγονός το οποίο οφείλεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού της μήτρας ABS.

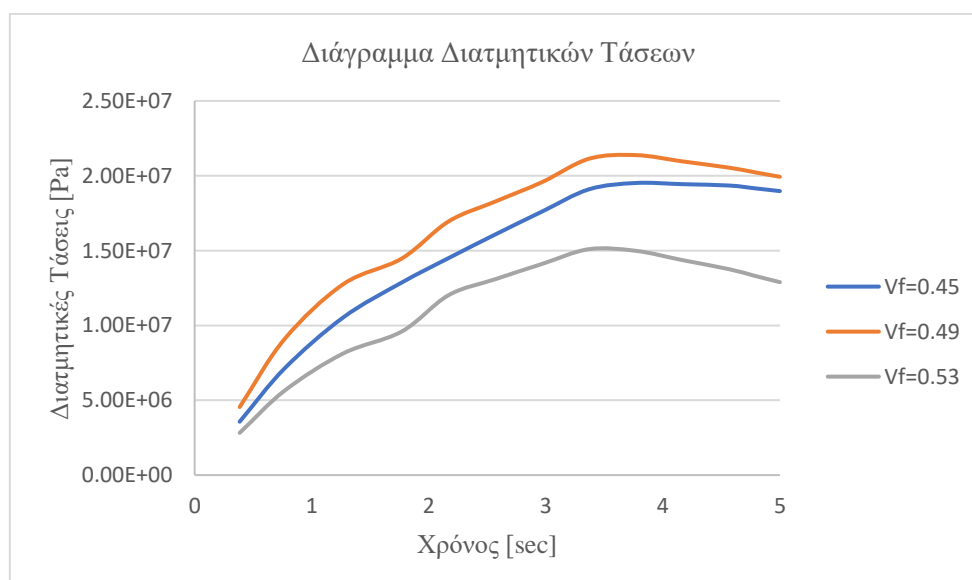
2.2.5 Matrix : ABS – Fiber : T300 (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C.



Διάγραμμα 97 : ABS-T300 / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικές ακτίνες.

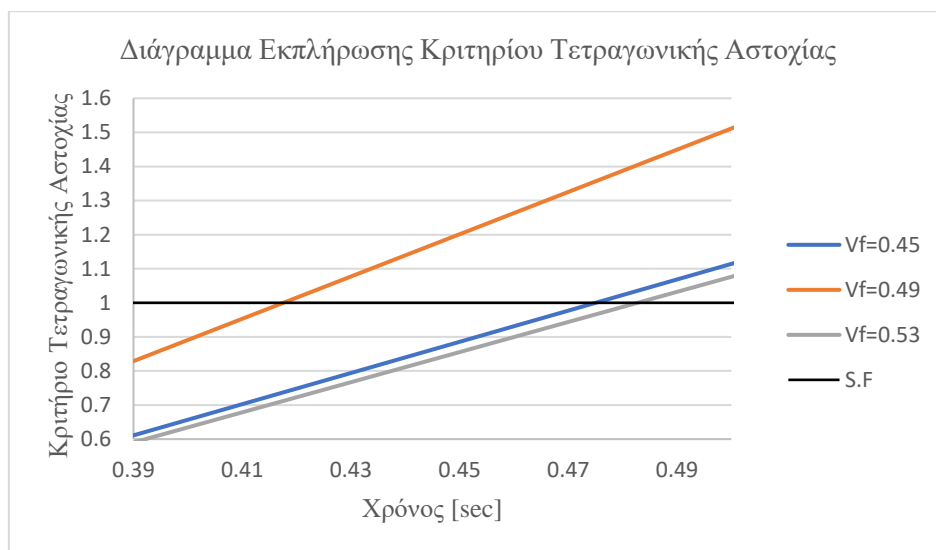
Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση πως όσο μεγαλύτερη η ακτίνα της ίνας τόσο μικρότερη θα είναι και η μετατόπισή της κατά την διάρκεια της εκρίζωσης. Η διαφορά μεταξύ των ακτινών 7 [μm] και 7.65 [μm] είναι 19%.



Διάγραμμα 98 : ABS-T300 / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

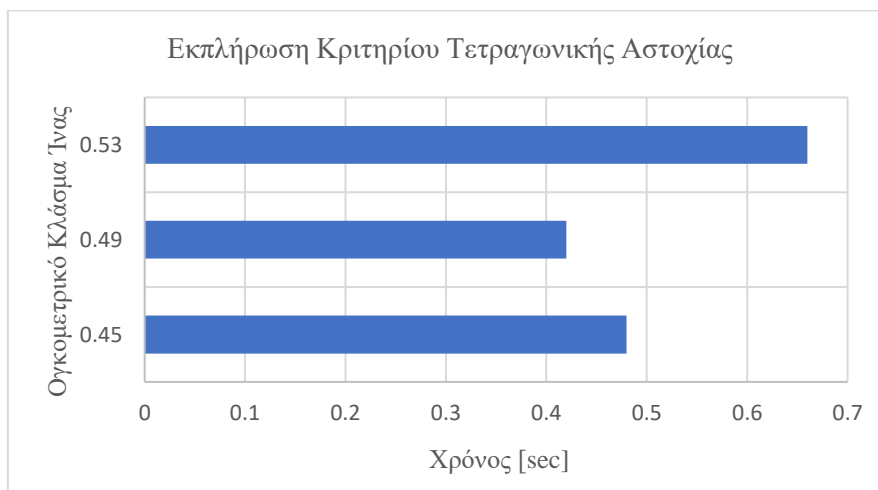
Οι υψηλότερες διατμητικές τάσεις παρουσιάζονται στην αναλογία της Vf=0.49.

Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



Διάγραμμα 99 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου *Quadratic Failure*.

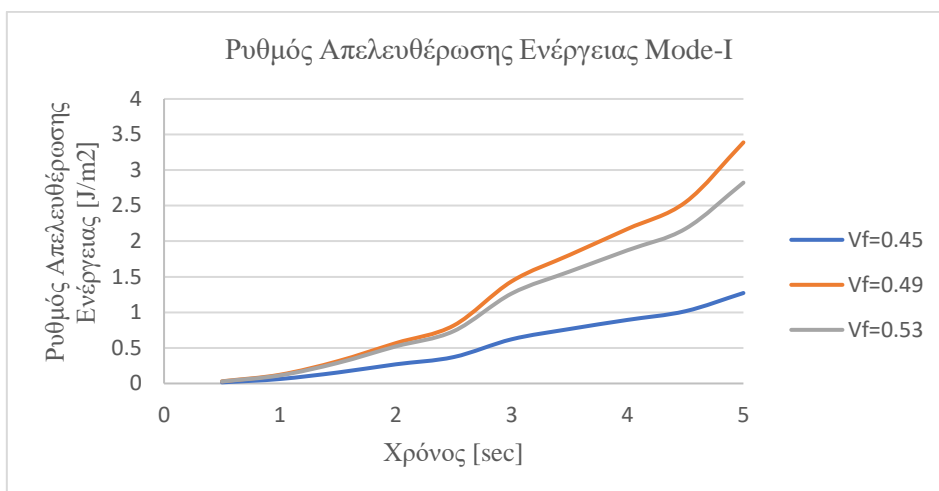
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ φαίνεται πως στη περίπτωση του $V_f=0.49$ εκπληρώνεται συντομότερα, ενώ οι άλλες δύο περιπτώσεις εκπληρώνονται την ίδια χρονική στιγμή σχεδόν. Το ίδιο δείχνει αναλυτικότερα το παρακάτω διάγραμμα :



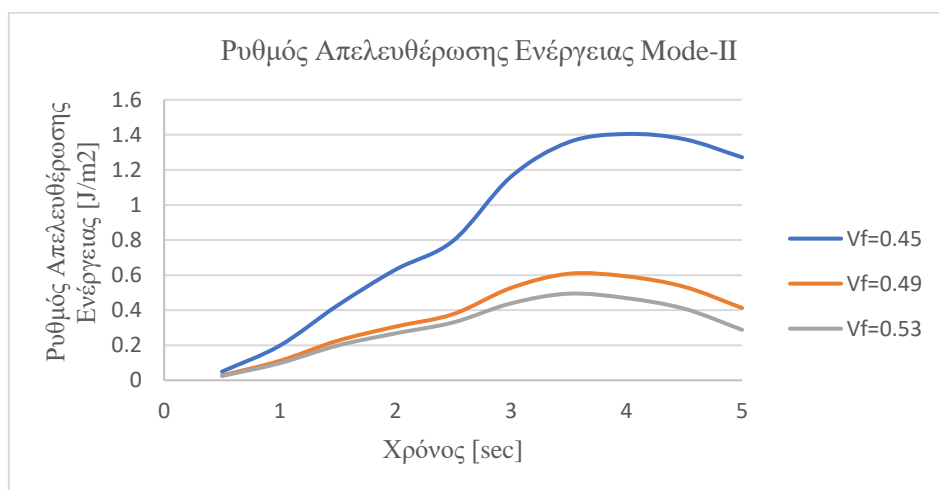
Διάγραμμα 100 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές ακτίνες.

Γρηγορότερη έναρξη ρωγμής θα συμβεί στην αναλογία $V_f=0.49$ ενώ βραδύτερη στην αναλογία των $V_f=0.45, 0.53$.

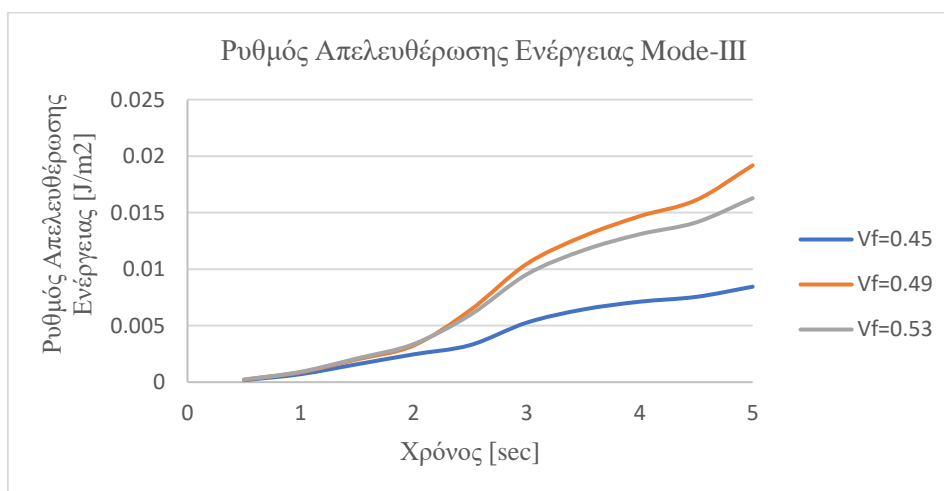
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 101 : ABS-T300 / ERR GI για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



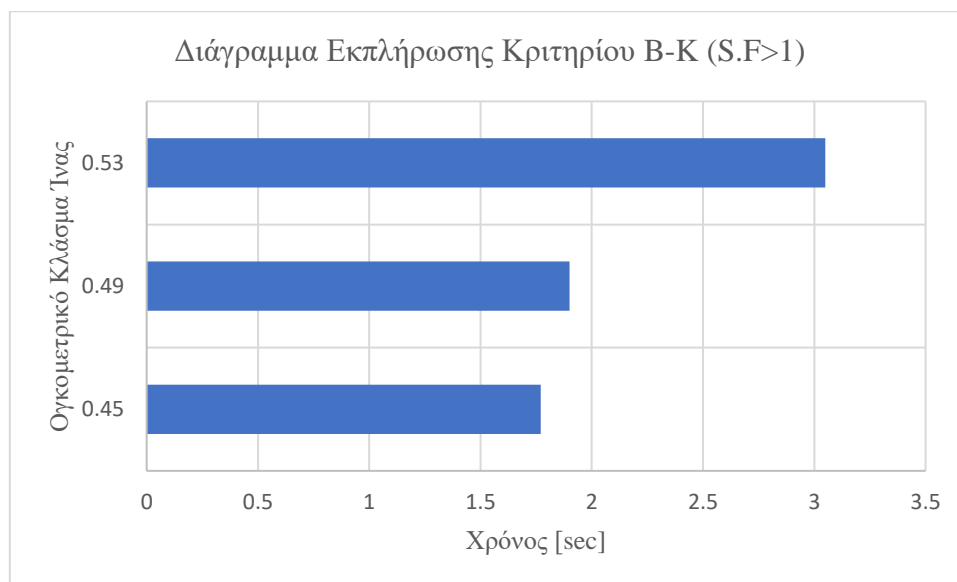
Διάγραμμα 102 : ABS-T300 / ERR GII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



Διάγραμμα 103 : ABS-T300 / ERR GIII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση πως κατά το Mode-I, III η αναλογία του $V_f=0.49$ θα εκλύσει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας κατά την αποκόλληση σε σχέση με τις υπόλοιπες αναλογίες.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



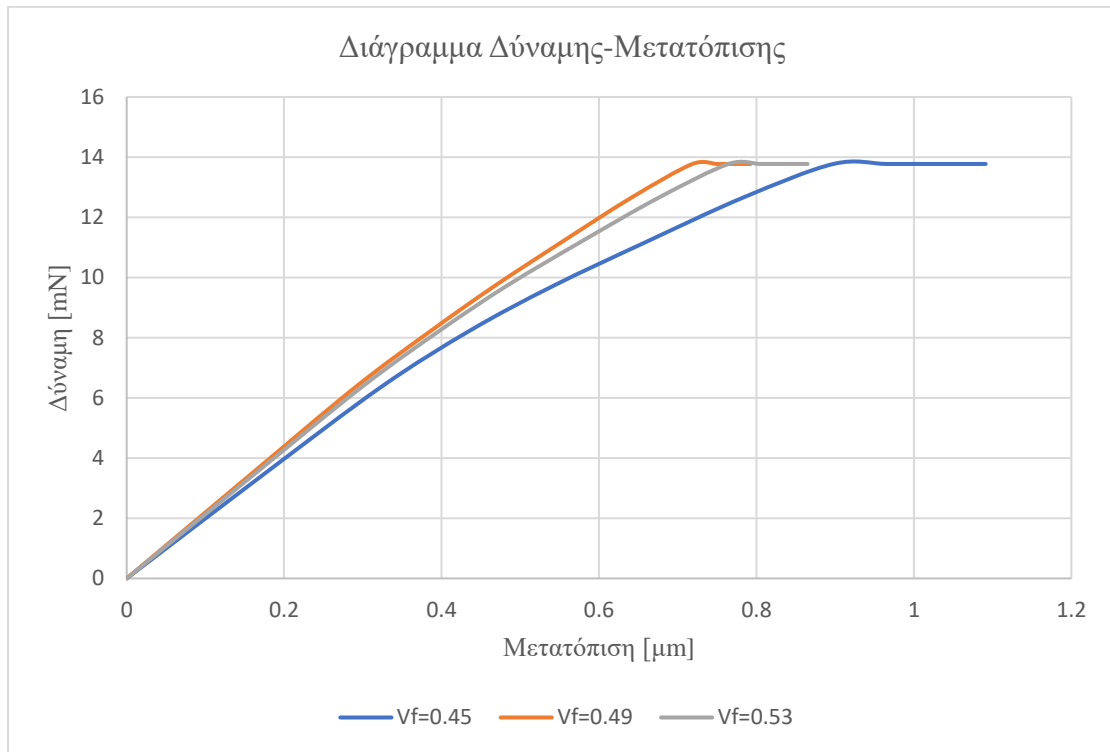
Διάγραμμα 104 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Το κριτήριο εκπληρώνεται σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή. Ωστόσο, οι ενέργειες που αποθηκεύονται στο σύστημα κάθε φορά είναι οι παρακάτω :

Πίνακας 27 : ABS-T300 /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Ογκομετρικό Κλάσμα	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
$V_f=0.45$	1.77 sec	1.27E-08 [J]
$V_f=0.49$	1.90 sec	2.63E-08 [J]
$V_f=0.53$	3.05 sec	2.47E-08 [J]

Επομένως, φαίνεται πως η λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, άρα και ενεργειακά βέλτιστη επιλογή, είναι για την αναλογία ίνας $V_f=0.45$. Εξίσου, και σε αυτή την περίπτωση ήταν ένα αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλη η ίνα σε ένα σύνθετο υλικό τόσο πιο δύσκολα θα φτάσει στη θραύση.



Διάγραμμα 105 : ABS-T300 / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Όπως και στους προηγούμενους συνδυασμούς υλικών, έτσι και εδώ, είναι εμφανές πως υψηλότερες μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας θα υπάρξουν για μικρές ακτίνες ίνας. Επίσης, καθώς η μελέτη αυτή προσομοιώθηκε στη θερμοκρασία των 120°C, όπως και η προηγούμενη, παρατηρείται πως οι μετατοπίσεις έχουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με τον προηγούμενο συνδυασμό. Γεγονός το οποίο δείχνει πως η διαφορά των διαφορετικών χαρακτηριστικών στην άνθρακα παίζει σημαντικό ρόλο.

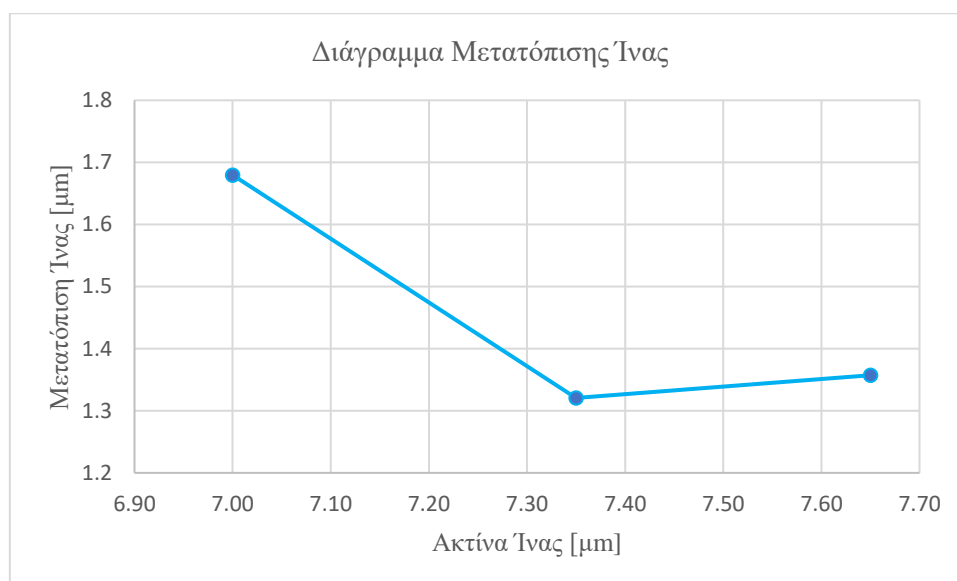
Πίνακας 28 : ABS-T300 / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
Vf=0.45	45.75
Vf=0.49	47.68
Vf=0.53	64.65

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ξανά πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας της ίνας.

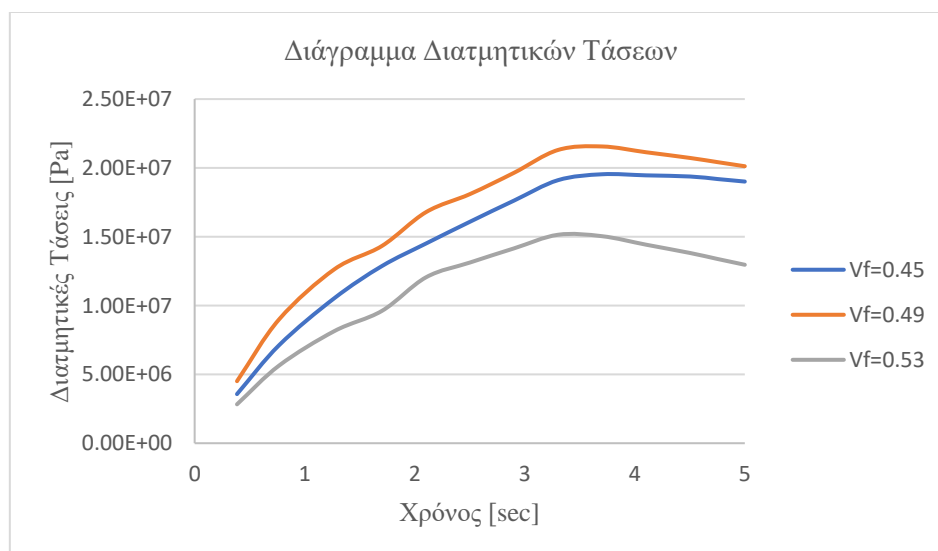
2.2.6 Matrix : ABS – Fiber : T700S (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C.



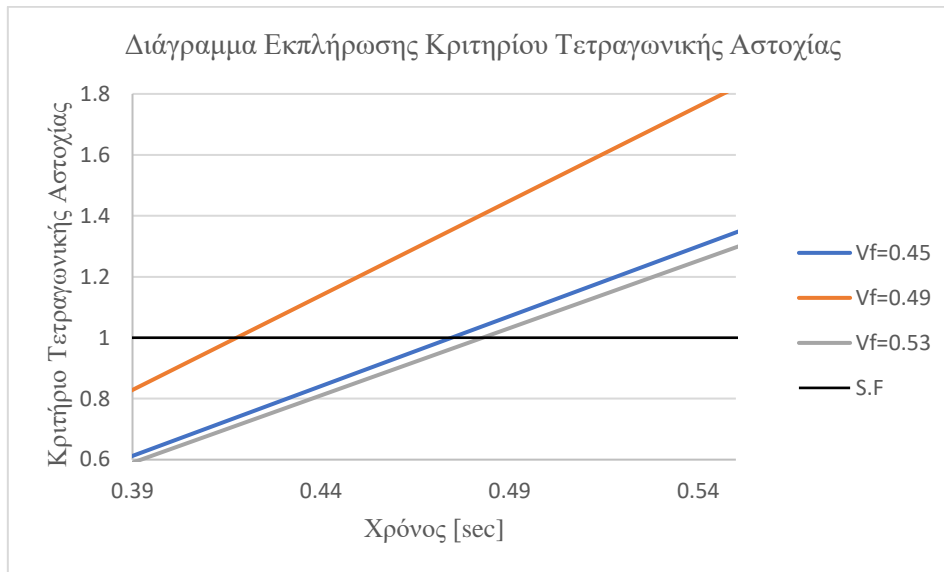
Διάγραμμα 106 : ABS-T700S / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικές ακτίνες.

Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση πως όσο μεγαλύτερη η ακτίνα της ίνας τόσο μικρότερη θα είναι και η μετατόπιση της κατά την διάρκεια της εκρίζωσης. Η διαφορά μεταξύ των ακτινών 7 [μm] και 7.65 [μm] είναι 20%.



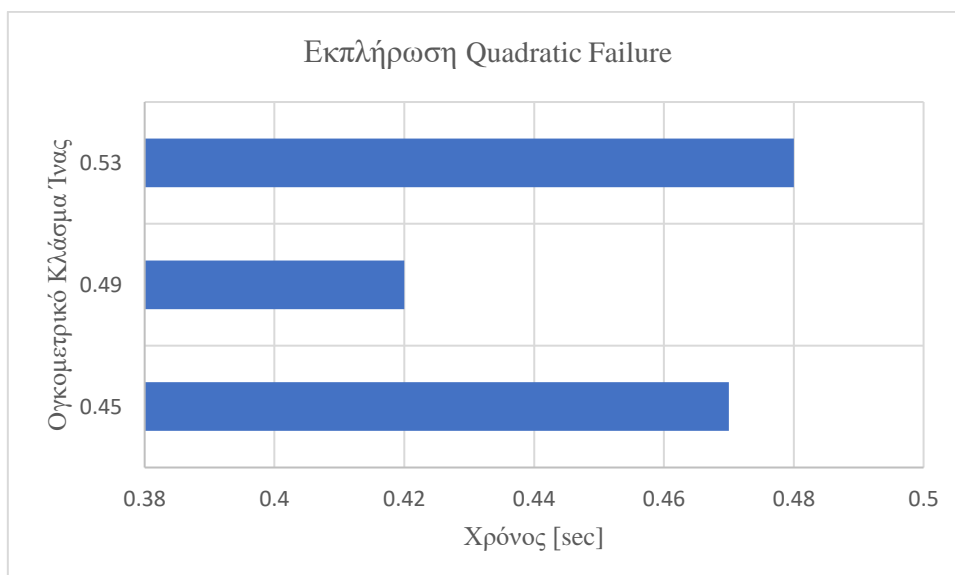
Διάγραμμα 107 : ABS-T700S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικές αναλογίες ίνας.

Οι υψηλότερες διατμητικές τάσεις παρουσιάζονται στην αναλογία της Vf=0.49. Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



Διάγραμμα 108 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure.

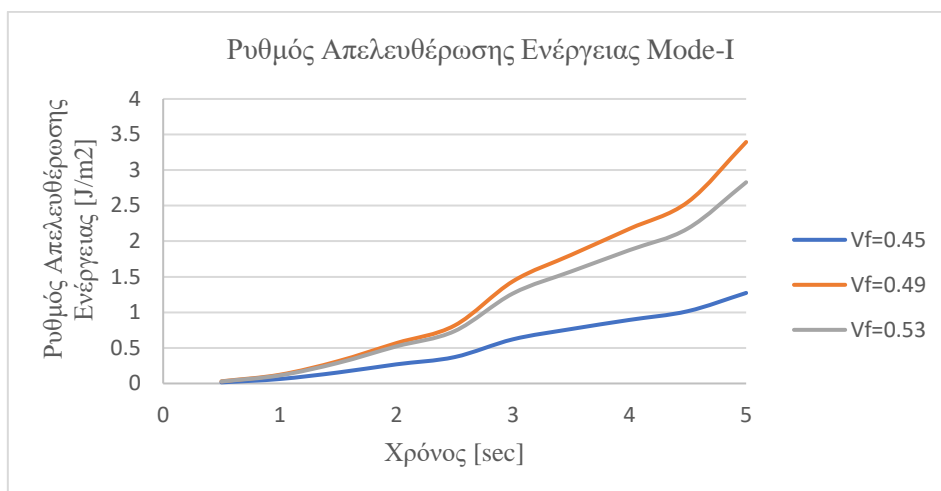
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ φαίνεται πως στη περίπτωση του $V_f=0.49$ εκπληρώνεται συντομότερα, ενώ οι άλλες δύο περιπτώσεις εκπληρώνονται την ίδια χρονική στιγμή σχεδόν. Το ίδιο δείχνει αναλυτικότερα το παρακάτω διάγραμμα :



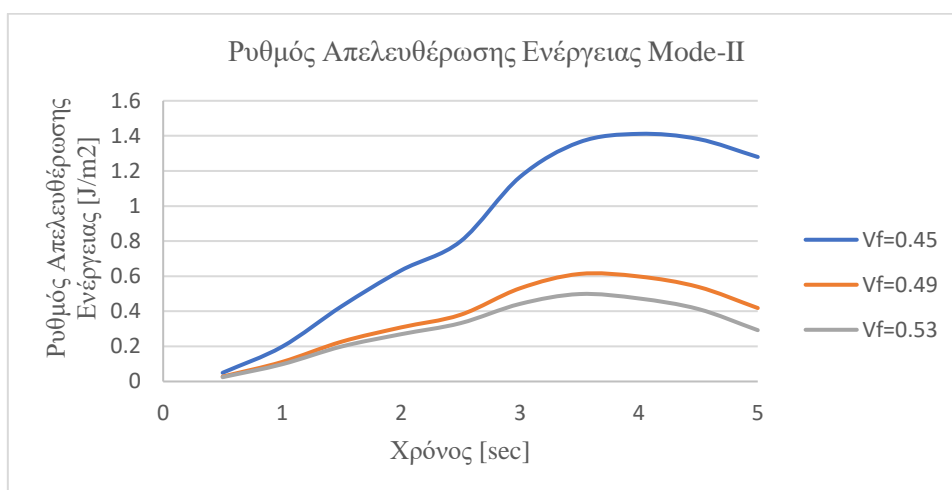
Διάγραμμα 109 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Φαίνεται πως γρηγορότερη έναρξη ρωγμής θα συμβεί στην αναλογία $V_f=0.49$ ενώ βραδύτερη στην αναλογία των $V_f=0.45, 0.53$.

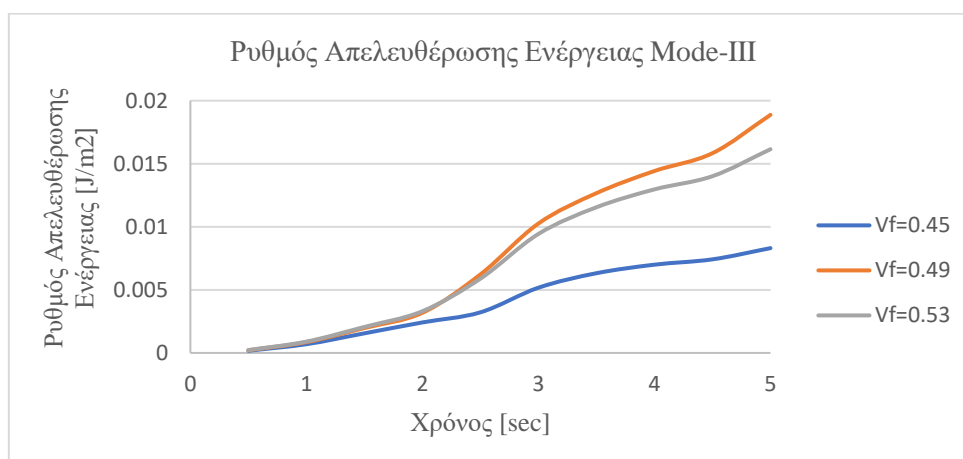
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 110 : ABS-T700S / ERR GI για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

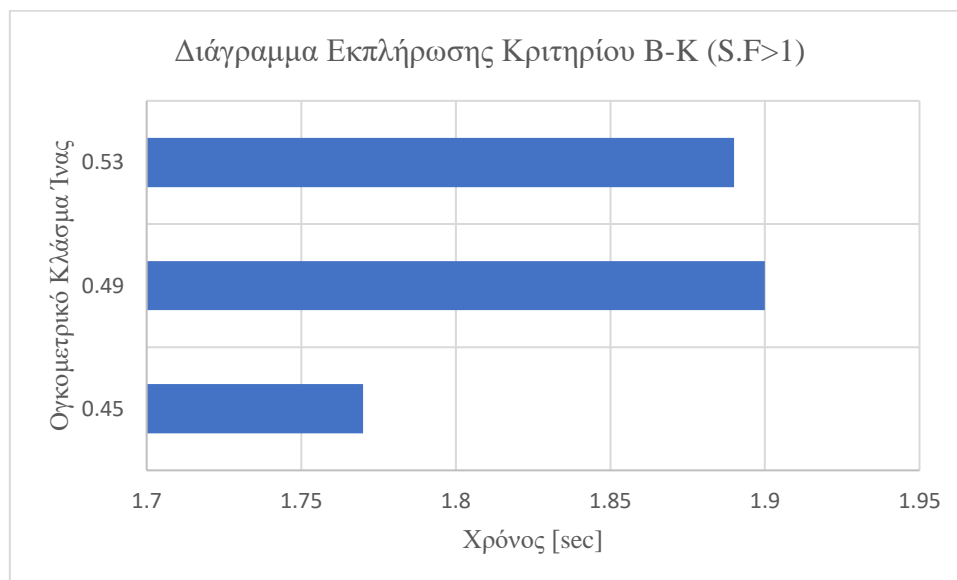


Διάγραμμα 111 : ABS-T700S / ERR GII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.



Διάγραμμα 112 : ABS-T700S / ERR GIII για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από τα παραπάνω (Καϊουργίος, και συν., 2017) διαγράμματα παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση πως κατά το Mode-I, III η αναλογία του $V_f=0.49$ θα εκλύσει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας κατά την αποκόλληση σε σχέση με τις υπόλοιπες αναλογίες. Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



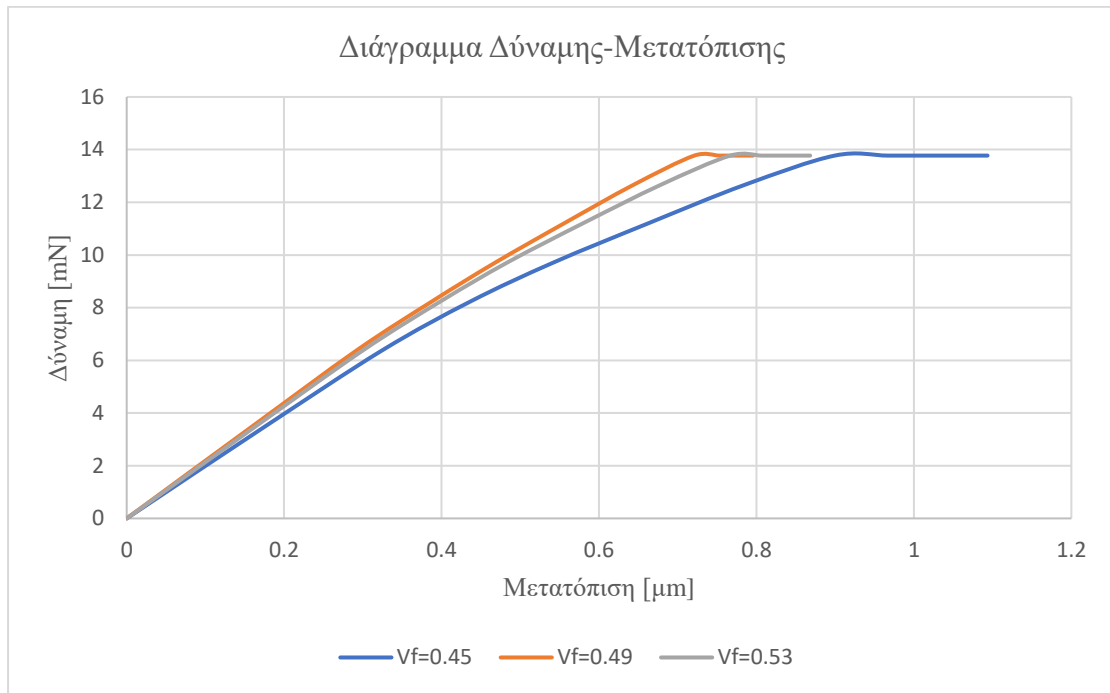
Διάγραμμα 113 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Το κριτήριο εκπληρώνεται σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή. Ωστόσο, οι ενέργειες που αποθηκεύονται στο σύστημα κάθε φορά είναι οι παρακάτω :

Πίνακας 29 : ABS-T700S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής.

Ογκομετρικά Κλάσματα	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
$V_f=0.45$	1.77 sec	1.27E-08 [J]
$V_f=0.49$	1.90 sec	2.64E-08 [J]
$V_f=0.53$	1.89 sec	2.47E-08 [J]

Επομένως, φαίνεται πως η λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, άρα και ενεργειακά βέλτιστη επιλογή, είναι για την αναλογία ίνας $V_f=0.45$. Εξίσου, και σε αυτή την περίπτωση ήταν ένα αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλη η ίνα σε ένα σύνθετο υλικό τόσο πιο δύσκολα θα φτάσει στη θραύση.



Διάγραμμα 114 : ABS-T700S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως οι τιμές της μετατόπισης στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας έχουν σχεδόν την ίδια τιμή με τις μετατοπίσεις του προηγούμενου συνδυασμού υλικών, γεγονός το οποίο οφείλεται στα κοινά χαρακτηριστικά των ινών άνθρακα των συνδυασμών αυτών. Ο λόγος που παρατηρείται αυτό το φαινόμενο είναι επειδή η προσομοίωση της μελέτης αυτής γίνεται εξίσου για τη θερμοκρασία των 120°C.

Πίνακας 30 : ABS-T700S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικές ακτίνες ίνας.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
Vf=0.45	45.75
Vf=0.49	47.68
Vf=0.53	54.97

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές για ακόμη μια φορά πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας της ίνας.

Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παραπάνω μελέτη προκύπτουν εξής παρατηρήσεις. Ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια, με την αύξηση της ακτίνας της ίνας συνεπάγεται μικρότερη μετατόπιση αυτής καθώς όσο πιο μεγάλος ο όγκος της ίνας τόσο μεγαλύτερη η αντοχή του σύνθετου υλικού. Επίσης, οι συνδυασμοί υλικών με ίνα την T800S παρουσιάζουν μικρότερες μετατοπίσεις σε σχέση με τους συνδυασμούς με ίνα T300, T700S, το οποίο οφείλεται στη διαφορά της τιμής του μέτρου ελαστικότητας αυτών.

Όσον αφορά τις διατμητικές τάσεις, στις περισσότερες περιπτώσεις τις υψηλότερες τις εμφανίζει η βασική αναλογία $V_f=0.45$, ωστόσο, και σε κάποιες άλλες περιπτώσεις φάνηκε πως τις υψηλότερες τάσεις τις εμφανίζει η αναλογία του $V_f=0.49$.

Η εκπλήρωση του κριτηρίου τετραγωνικής αστοχίας, δηλαδή η έναρξη της ρωγμής, παρατηρήθηκε πως στις περισσότερες περιπτώσεις ξεκινάει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Σε όλα τα διαγράμματα ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας κατά το Mode-II τις υψηλότερες τιμές τις παρουσιάζει η μικρότερη αναλογία και έπειτα η αμέσως μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει καθώς η εκρίζωση της ίνας τείνει να προκαλέσει ολίσθηση ανάμεσα στα υλικά της ίνας και της μήτρας, επομένως, είναι λογικό να απαιτείται περισσότερη ενέργεια παραμόρφωσης στις μικρότερες αναλογίες μήτρας-ίνας.

Η αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα έως τη διάδοση της ρωγμής, εξαρτάται από την ακτίνα της ίνας, καθώς για μικρότερες ακτίνες ίνας υπήρχε στο σύστημα λιγότερη αποθηκευμένη ενέργεια.

Από τα διαγράμματα Δύναμης Μετατόπισης προέκυψε το συμπέρασμα πως και οι διαφορές στις ακτίνες της ίνας αλλά και οι διαφορές στο υλικό της ίνας και της μήτρας επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

Τέλος, ο όρος της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας φάνηκε να αυξάνονται με την αύξηση της ακτίνας της ίνας, το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς μεγαλύτερη ακτίνα ίνας σε ένα σύνθετο υλικό σημαίνει και μεγαλύτερη αντοχή/στιβαρότητα αυτού.

2.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης για διαφορετικά Μήκη Ίνας

Εισαγωγή

Στο παρόν μέρος της εργασίας, γίνεται μελέτη για την επίδραση του μήκους της ίνας στη διεπιφανειακή συμπεριφορά του δοκιμίου, κατά την εκρίζωση της ίνας.

Σημαντικό ρόλο θα παίζει τόσο η θερμοκρασία όσο και οι ιδιότητες των υλικών. Όλη η παρούσα μελέτη στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με ιδιαίτερη έμφαση να έχει δοθεί στο πλέγμα που αποτελεί το σημείο ένωσης μεταξύ ίνας και μήτρας (δηλαδή την διεπιφάνεια).

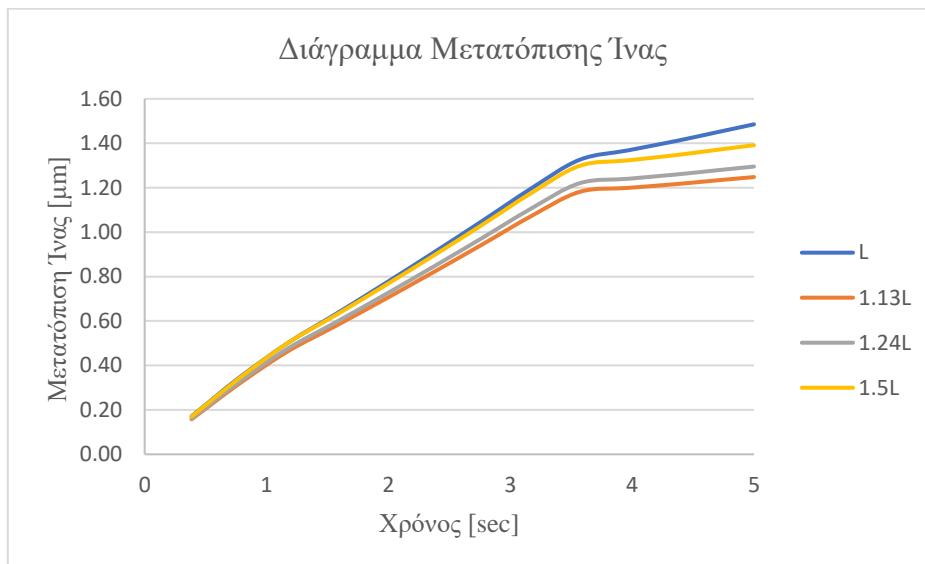
Η μελέτη δείχνει πως το μήκος μιας ίνας σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να επηρεάσει την θερμομηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου, καθώς αντίστοιχη μελέτη έχει γίνει από τους [(Yang, Qin, & Peng, 2003)]

Σχεδιασμός Προσομοίωσης

Στη παρακάτω μελέτη, το μήκος του δοκιμίου μεταβάλλεται, πιο συγκεκριμένα γίνεται αύξηση του μήκους αυτού κάθε φορά. Στις προηγούμενες μελέτες είχε θεωρηθεί πως το μήκος του δοκιμίου ήταν ίσο με $L = 500$ [μm]. Επομένως, μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, την περίπτωση όπου το μήκος είναι κατά 13% μεγαλύτερο, $L = 1.13 L = 565$ [μm], την περίπτωση όπου το μήκος είναι κατά 24% μεγαλύτερο, $L = 1.24 L = 620$ [μm] καθώς και την περίπτωση όπου το μήκος είναι κατά 50% μεγαλύτερο $L = 1.5L = 750$ [μm]. Οι αναλογίες των ογκομετρικών κλασμάτων δεν επηρεάστηκαν καθώς το μήκος μεγαλώνει το ίδιο και για τη μήτρα και για την ίνα.

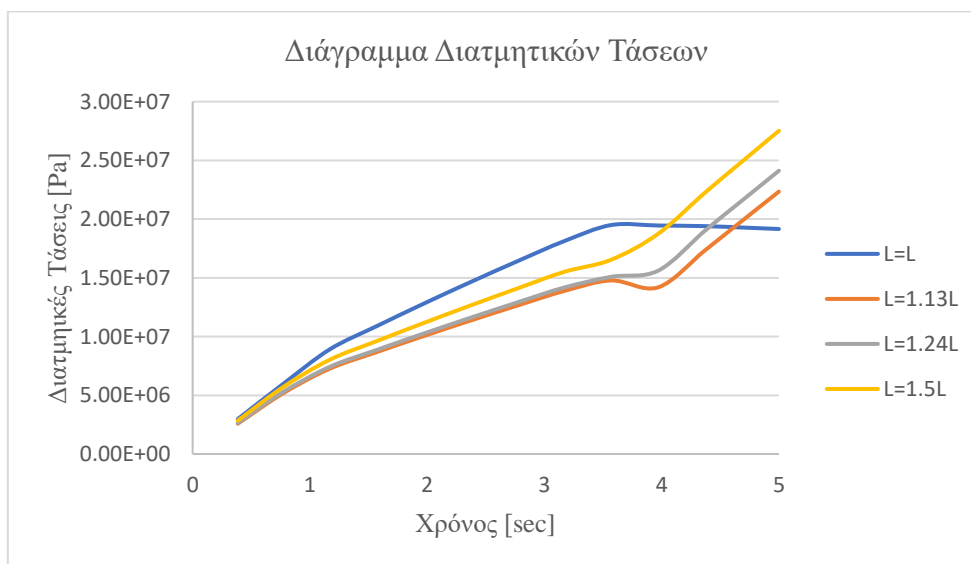
2.3.1 Matrix : PS – Fiber : T800S (294 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 115 : PS-T800S / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικά μήκη.

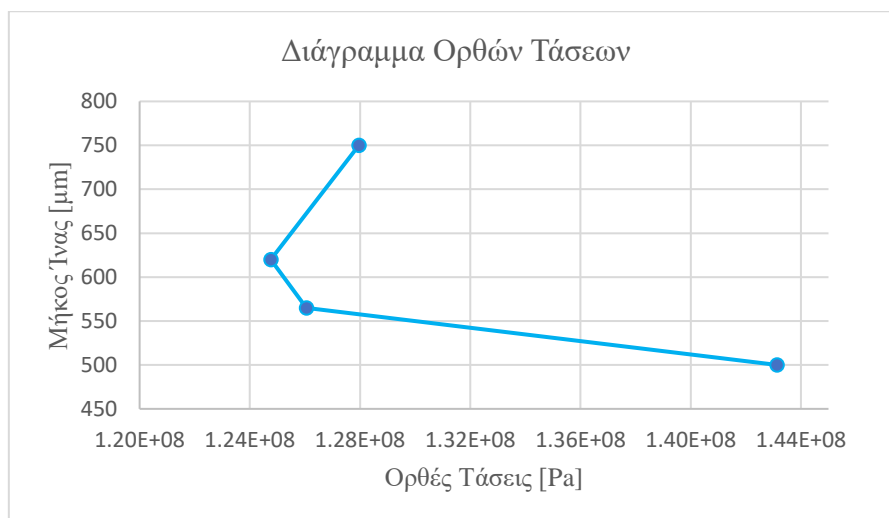
Δεν υπάρχει συγκεκριμένο μοτίβο με το οποίο μετατοπίζονται οι ίνες, ωστόσο, την μεγαλύτερη μετατόπιση φαίνεται πως την έχει το μικρότερο μήκος ίνας.



Διάγραμμα 116 : PS-T800S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μήκος είναι αυτό που παρουσιάζει και τις υψηλότερες διατμητικές τάσεις.

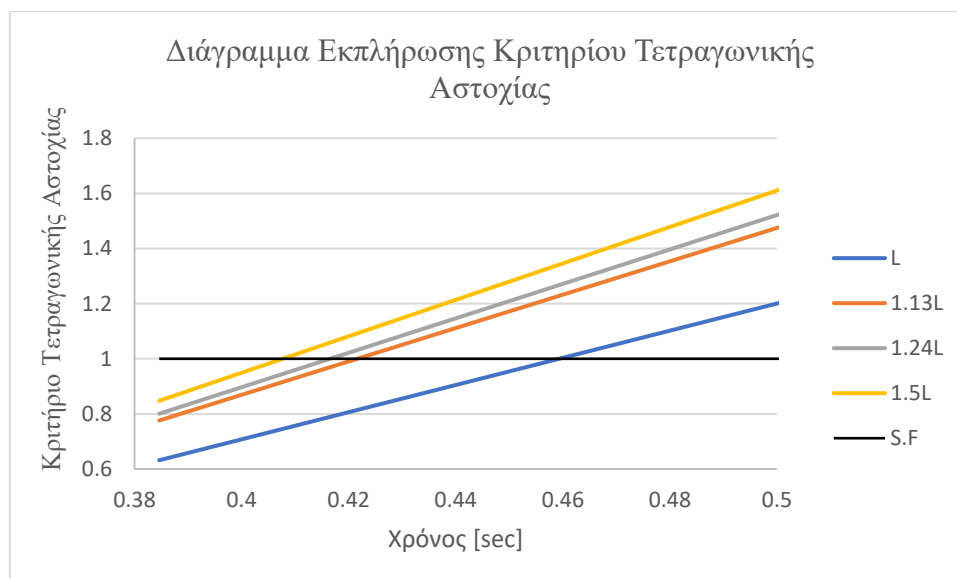
Επίσης, οι ορθές τάσεις για διαφορετικό μήκος φαίνονται από το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 117 : PS-T800S / Διάγραμμα ορθών τάσεων για διαφορετικό μήκος.

Παρατηρείται πως με την αύξηση του μήκους της ίνας οι ορθές τάσεις μειώνονται, και έπειτα να αυξάνονται ξανά, με τις χαμηλότερες να παρουσιάζονται για μήκος ίνας κατά 24% μεγαλύτερο από το αρχικό.

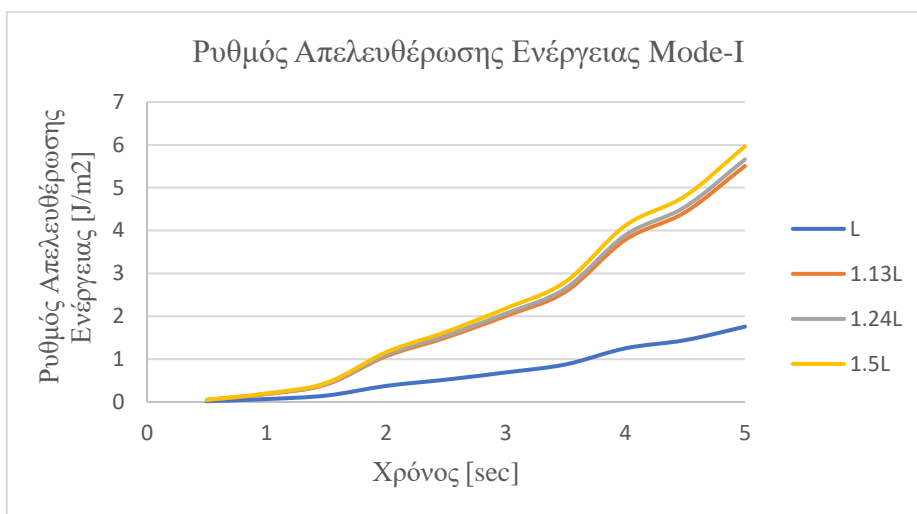
Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



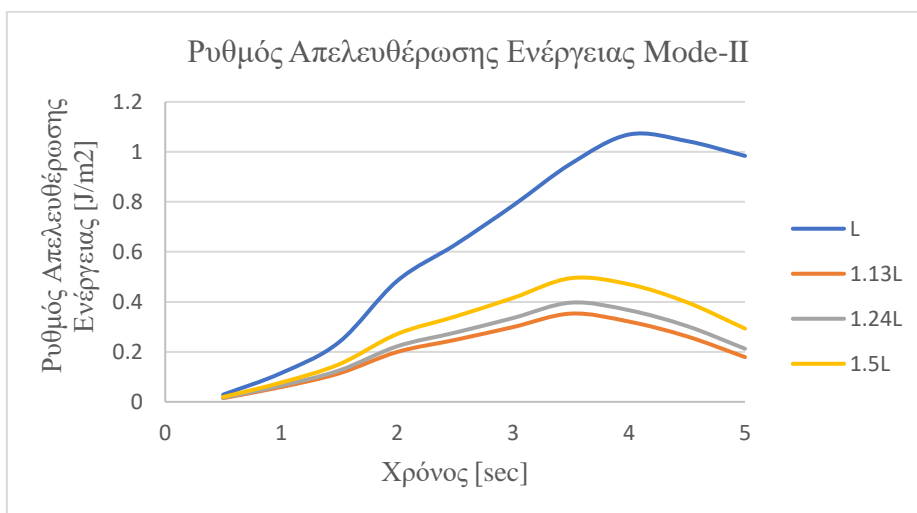
Διάγραμμα 118 : PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως όσο μεγαλύτερο το μήκος του δοκιμίου τόσο πιο σύντομα θα ξεκινήσει η ρωγμή.

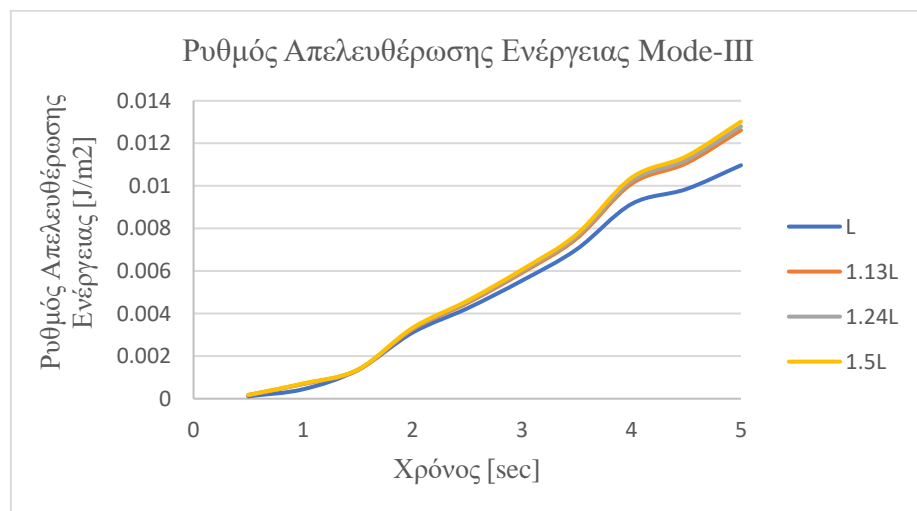
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 119 : PS-T800S / ERR GI για διαφορετικά μήκη.

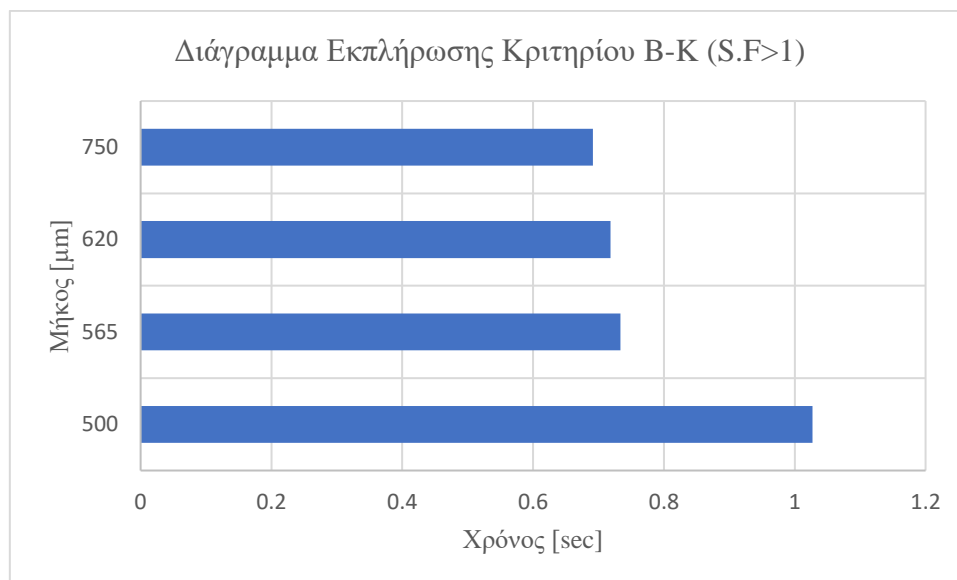


Διάγραμμα 120 : PS-T800S / ERR GII για διαφορετικά μήκη.



Διάγραμμα 121 : PS-T800S / ERR GIII για διαφορετικά μήκη.

Από τα διαγράμματα των ERRs είναι εμφανές για πως μεγαλύτερο μήκος με το πέρας του χρόνου υπάρχει και υψηλότερη εκλυόμενη ενέργεια κατά την διάδοση της ρωγμής κατά τα Mode-I,III. Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



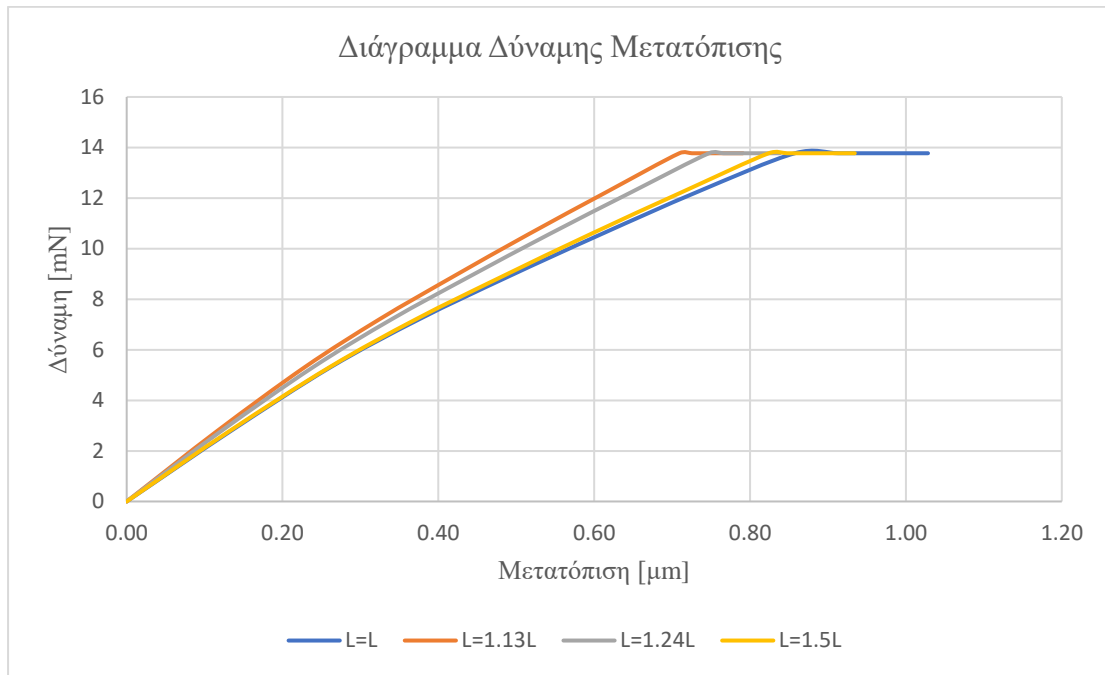
Διάγραμμα 122 : PS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικά μήκη.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για μεγαλύτερο μήκος δοκιμίου ξεκινάει συντομότερα η έναρξη διάδοσης της ρωγμής. Ωστόσο, οι απαιτούμενες ενέργειες που χρειάζονται είναι οι εξής :

Πίνακας 22 : PS-T800S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής για διαφορετικά μήκη.

Μήκος Ίνας	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
L=L	1.02 sec	2.79E-09 [J]
L=1.13 L	0.73 sec	2.32E-09 [J]
L=1.24 L	0.71 sec	2.45E-09 [J]
L=1.50 L	0.69 sec	2.68E-09 [J]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τη λιγότερη ενέργεια θα την αποθηκεύσει το μήκος ίνας L=1.13L. Επομένως, βέλτιστη ενεργειακά λύση θα είναι η περίπτωση όπου το μήκος της ίνας είναι κατά 13% μεγαλύτερο.



Διάγραμμα 123 : PS-T800S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας θα υπάρξουν για το αρχικό μήκος και το μήκος κατά 50% μεγαλύτερο. Ενώ για τα ενδιάμεσα μήκη οι μετατοπίσεις θα είναι μικρότερες.

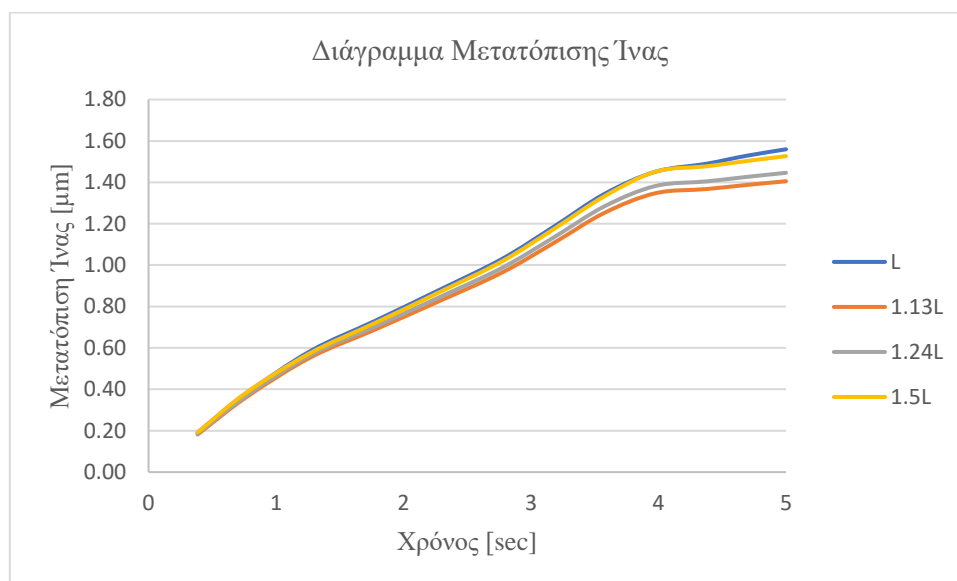
Πίνακας 31 : PS-T800S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικά μήκη.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
L=L	27.38
L=1.13L	17.50
L=1.24L	15.51
L=1.5L	12.18

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται πως η διατμητική αντοχή διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση του μήκους του δοκιμίου. Καθώς σε κάθε περίπτωση διαφορετικού μήκους, το μήκος στο οποίο είναι προσκολλημένη η ίνα με την μήτρα (Embedded Length) αυξάνεται και αυτό. Επομένως, το γεγονός προκαλεί μείωση του μεγέθους αυτού.

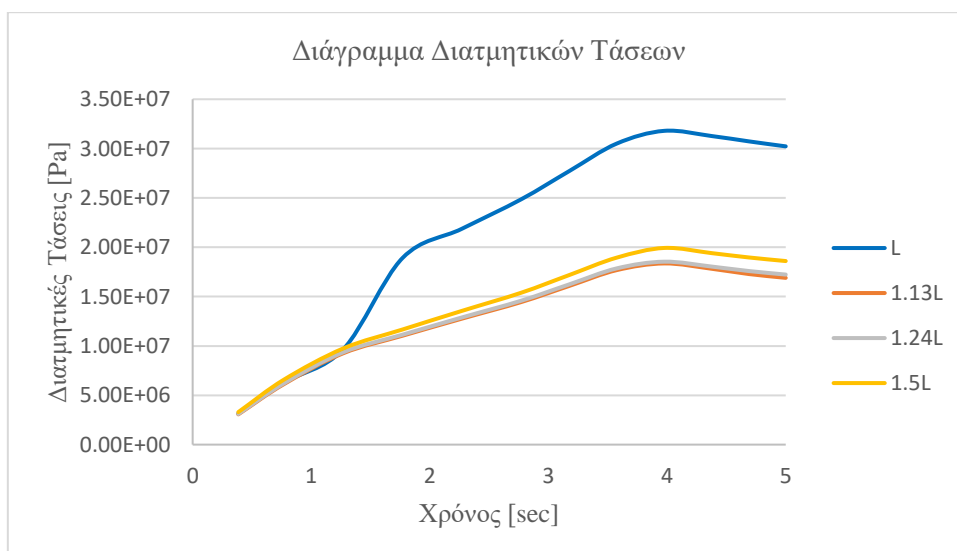
2.3.2 Matrix : PS – Fiber : T300 (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 90°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



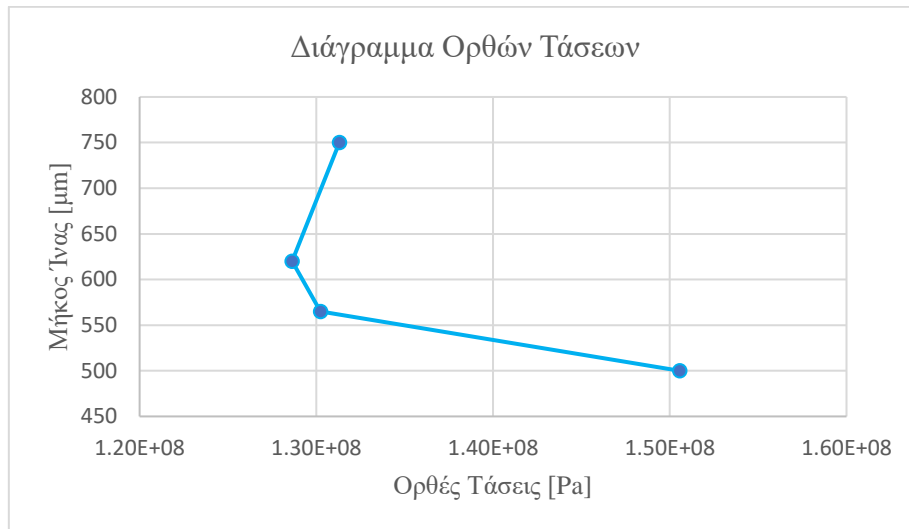
Διάγραμμα 124 : PS-T300 / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικά μήκη.

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ δεν υπάρχει συγκεκριμένο μοτίβο με το οποίο μετατοπίζονται οι ίνες, ωστόσο, την μεγαλύτερη μετατόπιση φαίνεται πως την παρουσιάζει το μικρότερο μήκος δοκιμίου.



Διάγραμμα 125 : PS-T300 / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικά μήκη.

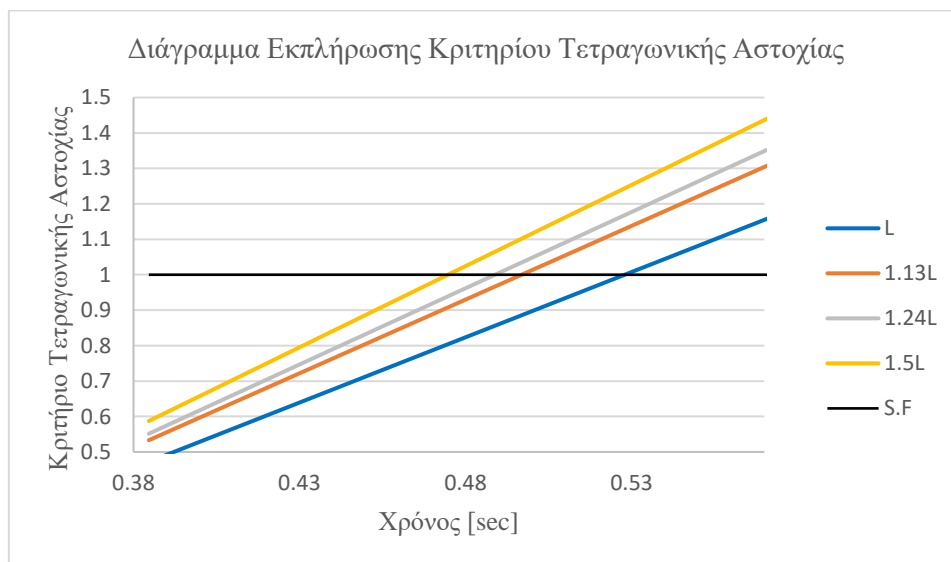
Παρατηρείται πως για το αρχικό μήκος $L=L$ οι διατμητικές τάσεις είναι οι υψηλότερες. Επίσης, οι ορθές τάσεις για διαφορετικό μήκος φαίνονται από το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 126 : PS-T300 / Διάγραμμα ορθών τάσεων για διαφορετικό μήκος.

Με την αύξηση του μήκους οι ορθές τάσεις μειώνονται, με υψηλότερες να είναι αυτές στο αρχικό μήκος $L=L$. Ένα αντίστοιχο μοτίβο φάνηκε και από το διάγραμμα διατμητικών τάσεων.

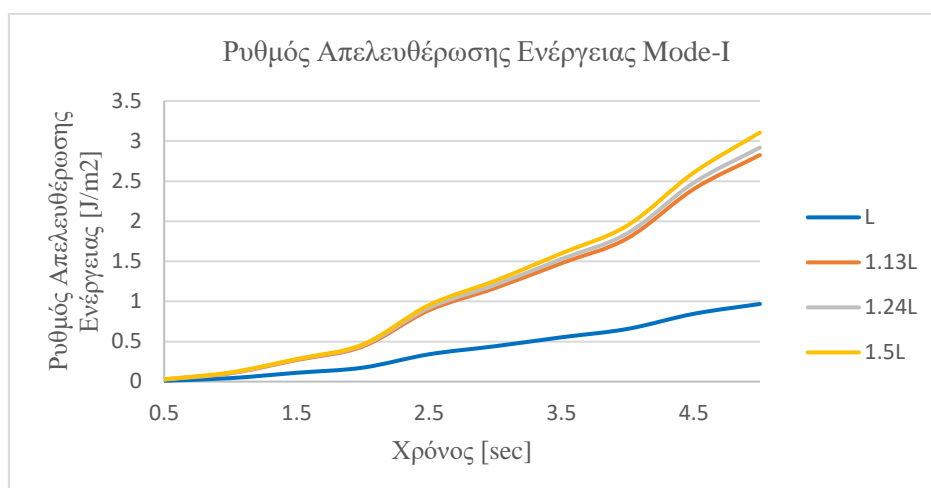
Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



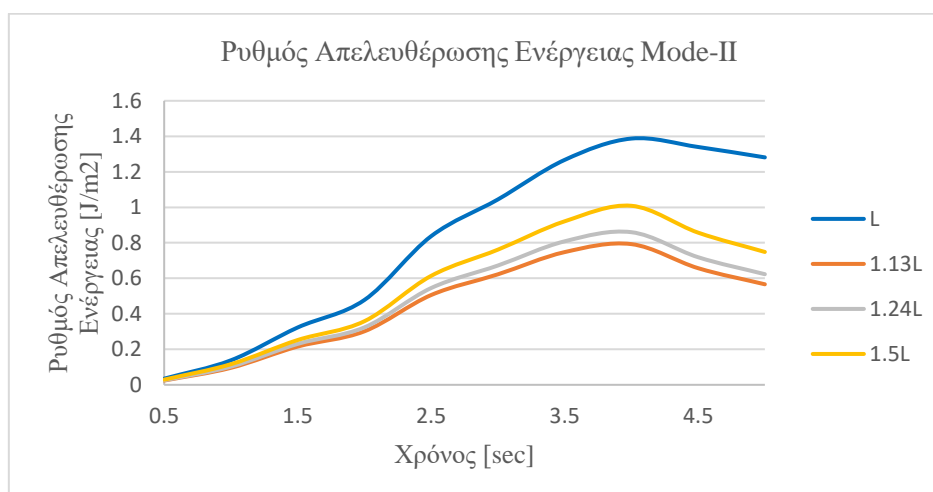
Διάγραμμα 127 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως όσο μεγαλύτερο το μήκος του δοκιμίου τόσο νωρίτερα θα ξεκινήσει και η ρωγμή. Το ίδιο φάνηκε και στην προηγούμενη περίπτωση.

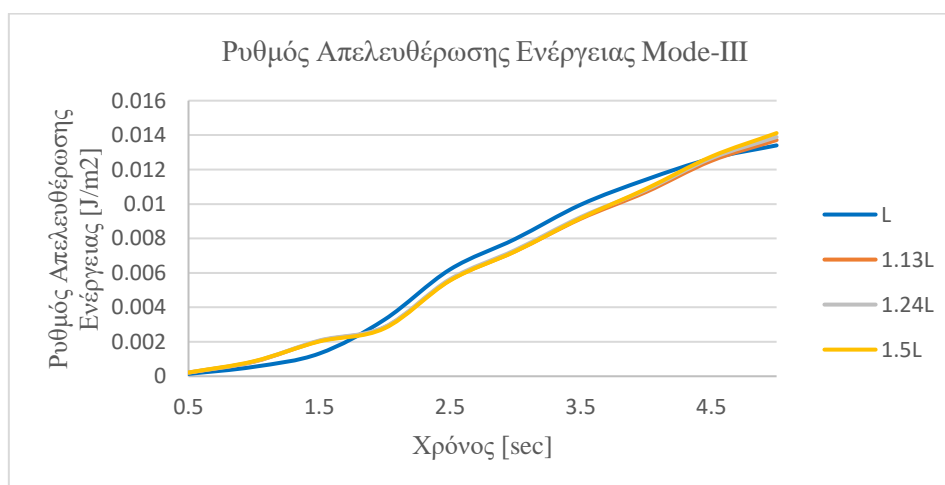
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 128 : PS-T300 / ERR Mode-I για διαφορετικά μήκη.



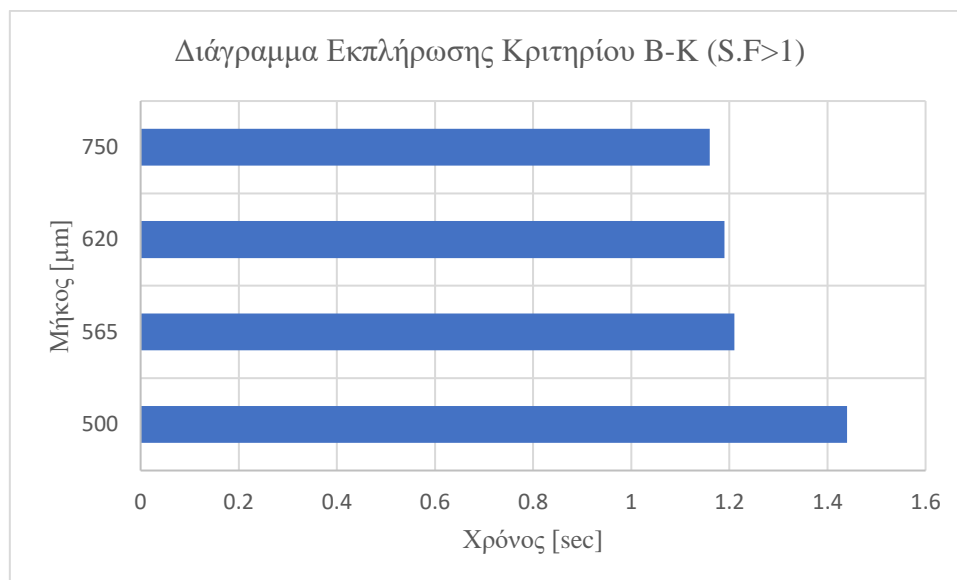
Διάγραμμα 129 : PS-T300 / ERR Mode-II για διαφορετικά μήκη.



Διάγραμμα 130 : PS-T300 / ERR Mode-III για διαφορετικά μήκη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές πως κατά το Mode-III οι εκλυόμενες ενέργειες κατά την παραμόρφωση έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές για όλα τα διαφορετικά μήκη του συστήματος.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



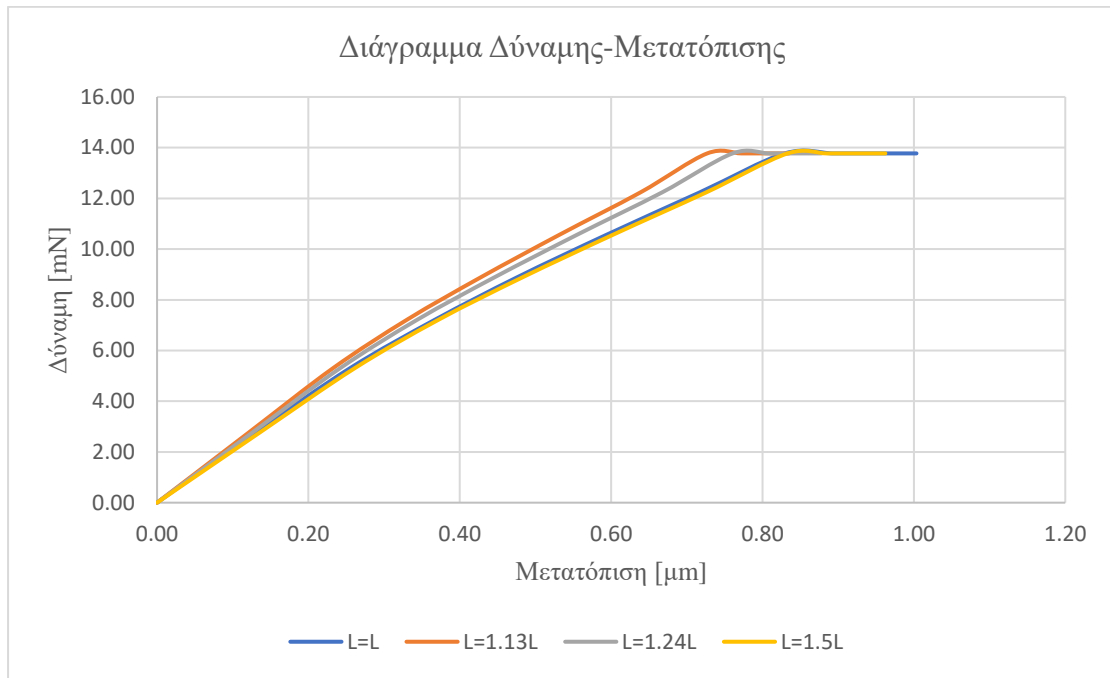
Διάγραμμα 131 : PS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικά μήκη.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για μεγαλύτερο μήκος δοκιμίου ξεκινάει συντομότερα η έναρξη διάδοσης της ρωγμής. Ωστόσο, οι απαιτούμενες ενέργειες που χρειάζονται είναι οι εξής :

Πίνακας 23 : PS-T300 /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής για διαφορετικά μήκη.

Μήκος Ίνας	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
L=L	1,44 sec	8.21E-09 [J]
L=1.13 L	1,21 sec	1.05E-08 [J]
L=1.24 L	1,19 sec	1.10E-08 [J]
L=1.50 L	1,16 sec	1.18E-08 [J]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τη λιγότερη ενέργεια παραμόρφωσης θα την αποθηκεύσει το μικρότερο μήκος ίνας, επομένως ως βέλτιστη ενεργειακή λύση θα ληφθεί η περίπτωση όπου το μήκος του συστήματος δεν έχει δεχτεί κάποια επέκταση.



Διάγραμμα 132 : PS-T300 / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικά μήκη.

Το παραπάνω διάγραμμα εμφανίζει ένα μοτίβο μετατοπίσεων ίδιο με του προηγούμενου συνδυασμού. Ωστόσο, παρατηρείται πως οι μετατοπίσεις έχουν μικρότερη τιμή από ότι στον προηγούμενο συνδυασμό, το γεγονός οφείλεται στη διαφορετική θερμοκρασία στην οποία προσομοιώνεται ο συνδυασμός αυτός. Καθώς οι υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών παρατηρούνται υψηλότερες μετατοπίσεις σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

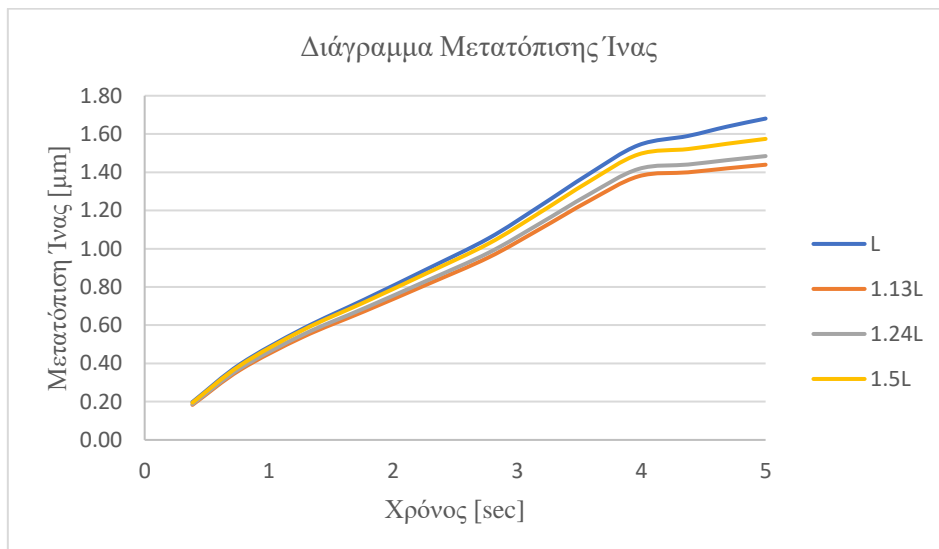
Πίνακας 32 : PS-T300 / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικά μήκη.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
L=L	35.33
L=1.13L	27.00
L=1.24L	24.09
L=1.5L	19.24

Από τον παραπάνω πίνακα είναι ξανά εμφανές πως η τιμή της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση του μήκους, ωστόσο, οι τιμές είναι μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση, γεγονός το οποίο οφείλεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία προσομοίωσης του συνδυασμού αυτού (90°C).

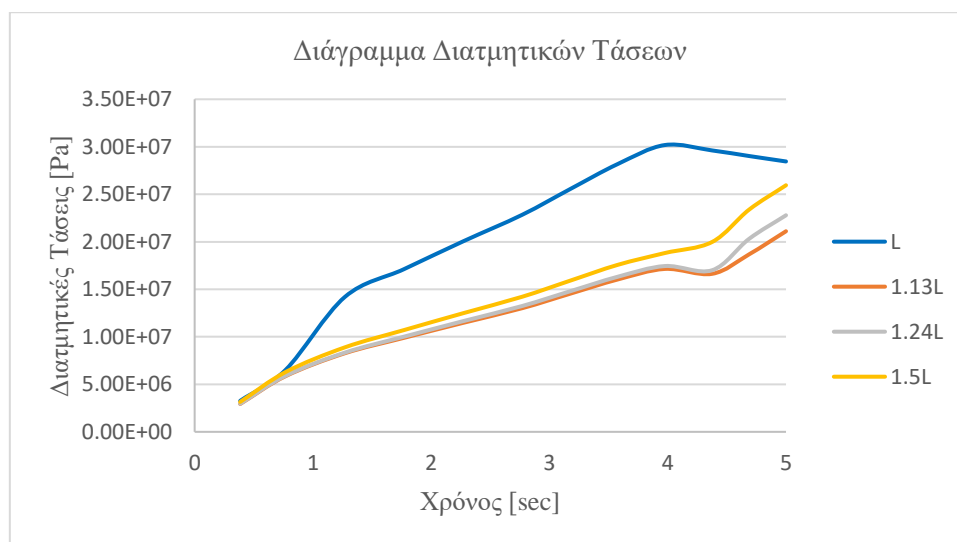
2.3.3 Matrix : PS – Fiber : T700S (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 133 : PS-T700S / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικά μήκος.

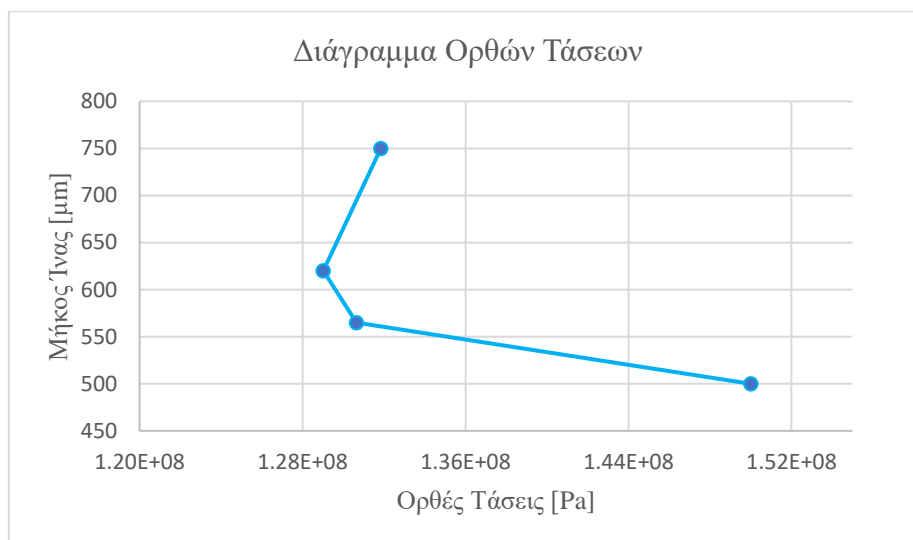
Η διαφορά μετατόπισης της ίνας μεταξύ των μηκών L και 1.13L είναι 14%, το οποίο δείχνει όπως και στη προηγούμενη περίπτωση πως δεν είναι σημαντική διαφορά.



Διάγραμμα 134 : PS-T700S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικά μήκη.

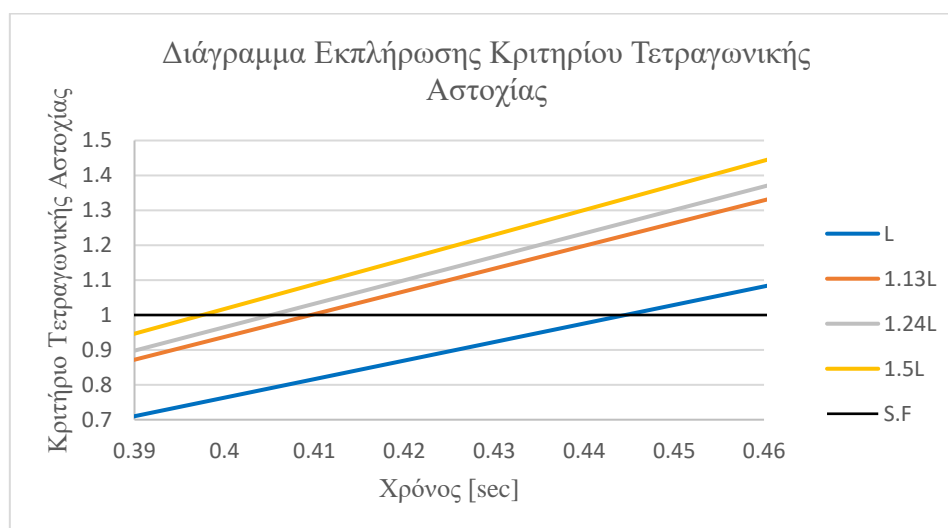
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ τις υψηλότερες διατμητικές τάσεις τις εμφανίζει το μικρότερο μήκος δοκιμίου. Μια τέτοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη καθώς οι ίνες T300 και T700S έχουν σχεδόν ίδια χαρακτηριστικά.

Επίσης, οι ορθές τάσεις για διαφορετικό μήκος φαίνονται από το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 135 : PS-T700S / Διάγραμμα ορθών τάσεων για διαφορετικό μήκος.

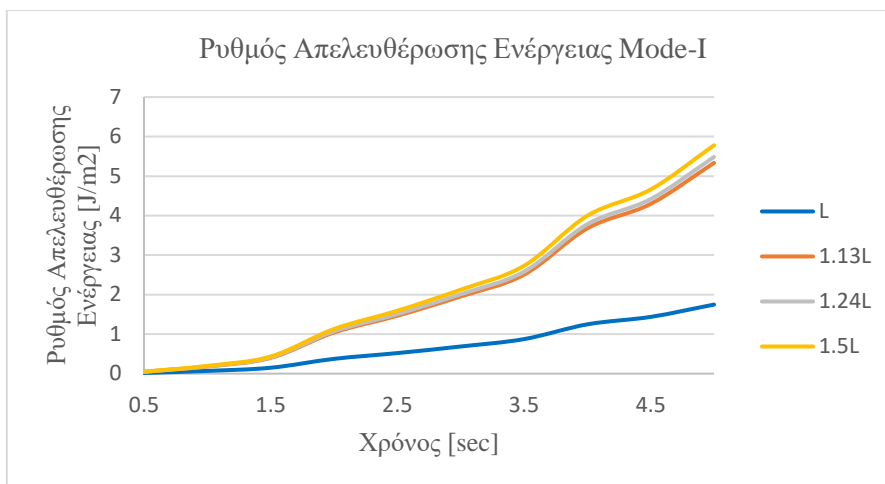
Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ με την αύξηση του μήκους οι ορθές τάσεις μειώνονται, με υψηλότερες να είναι αυτές στο αρχικό μήκος $L=L$. Ένα παρόμοιο μοτίβο έδειξαν και οι διατμητικές τάσεις. Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



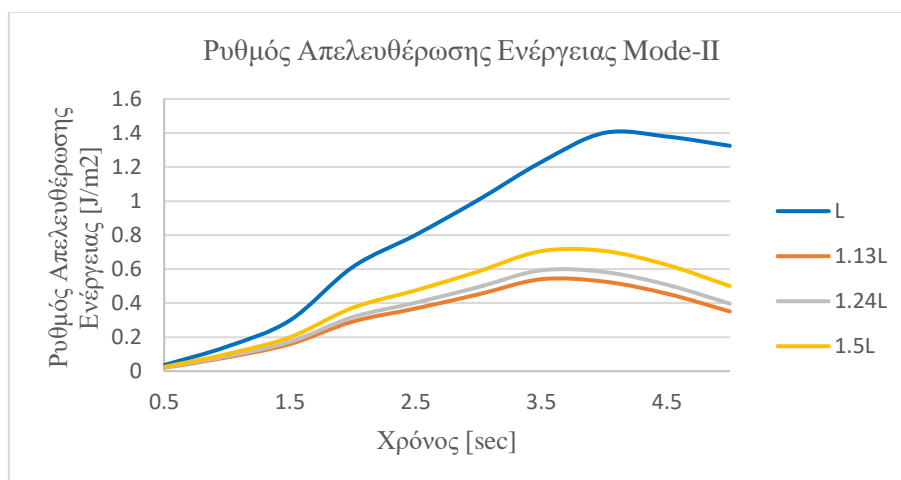
Διάγραμμα 136 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure για διαφορετικά μήκη.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ φαίνεται πως όσο μεγαλύτερο το μήκος του δοκιμίου τόσο νωρίτερα θα ξεκινήσει και η ρωγμή.

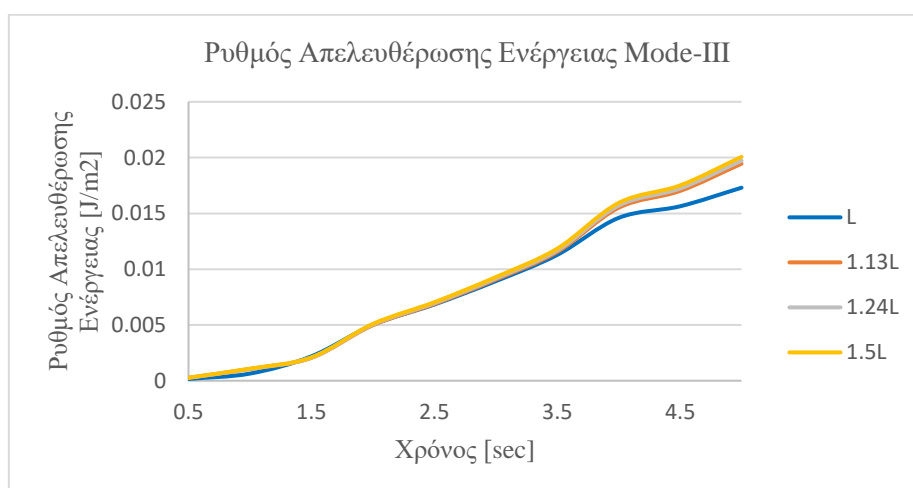
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 137 : PS-T700S / ERR GI για διαφορετικά μήκη.



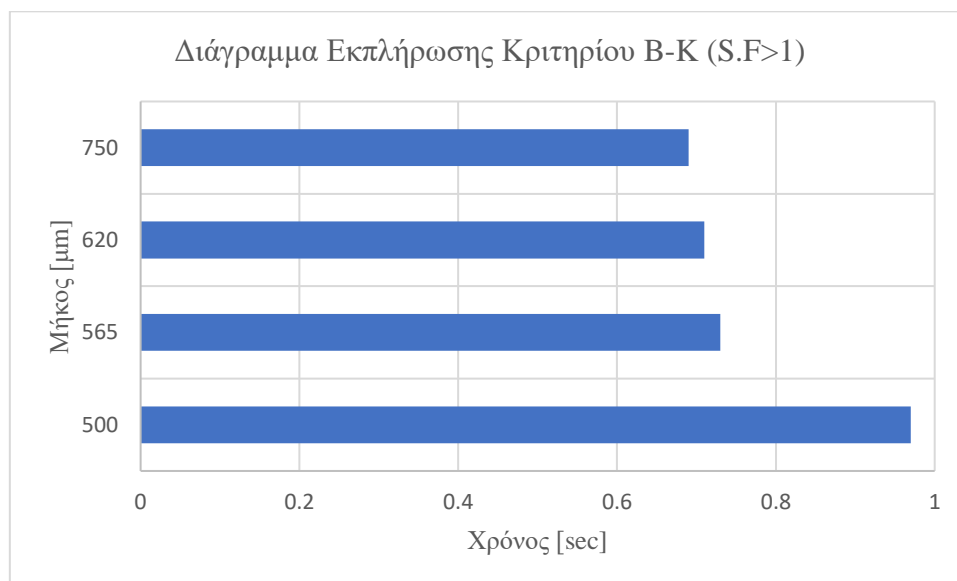
Διάγραμμα 138 : PS-T700S / ERR GII για διαφορετικά μήκη.



Διάγραμμα 139 : PS-T700S / ERR GIII για διαφορετικά μήκη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές πως για το Mode-III οι εκλυόμενες ενέργειες κατά την παραμόρφωση έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές για όλα τα διαφορετικά μήκη του συστήματος. Την ίδια συμπεριφορά είχε το διάγραμμα αυτό και στην προηγούμενη περίπτωση, το γεγονός αυτό οφείλεται ξανά στην ομοιότητα των ινών αυτών.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



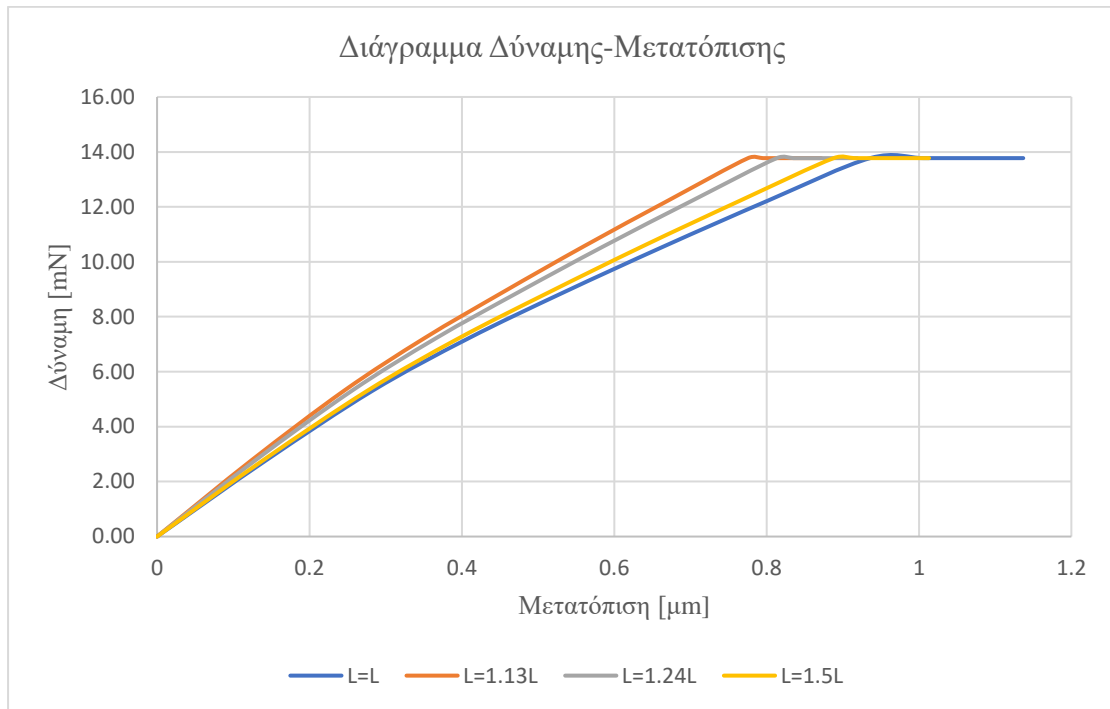
Διάγραμμα 140 : PS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικά μήκη.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για μεγαλύτερο μήκος δοκιμίου ξεκινάει συντομότερα η έναρξη διάδοσης της ρωγμής ακριβώς όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Ωστόσο, οι απαιτούμενες ενέργειες που χρειάζονται είναι οι εξής :

Πίνακας 24 : PS-T700S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής για διαφορετικά μήκη.

Μήκος Ίνας	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
L=L	0.97 sec	4.93E-09 [J]
L=1.13 L	0.73 sec	3.02E-09 [J]
L=1.24 L	0.71 sec	3.13E-09 [J]
L=1.50 L	0.69 sec	3.51E-08 [J]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τη λιγότερη ενέργεια την αποθηκεύσει το μήκος ίνας ίσο με το αρχικό. Επομένως, το μήκος αυτό αποτελεί και την βέλτιστη επιλογή.



Διάγραμμα 141 : PS-T700S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικά μήκη.

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει ίδιο μοτίβο κατανομής μετατοπίσεων όπως και οι προηγούμενοι συνδυασμοί. Ωστόσο, είναι εμφανές πως σε σχέση με τον συνδυασμό PS-T800S οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας είναι μεγαλύτερες, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφορά του μέτρου ελαστικότητας της ίνας άνθρακα που περιέχουν. Καθώς και οι δύο αυτοί συνδυασμοί προσομοιώνονται για τη ίδια θερμοκρασία των 120°C μπορεί να γίνει αυτή η παρατήρηση.

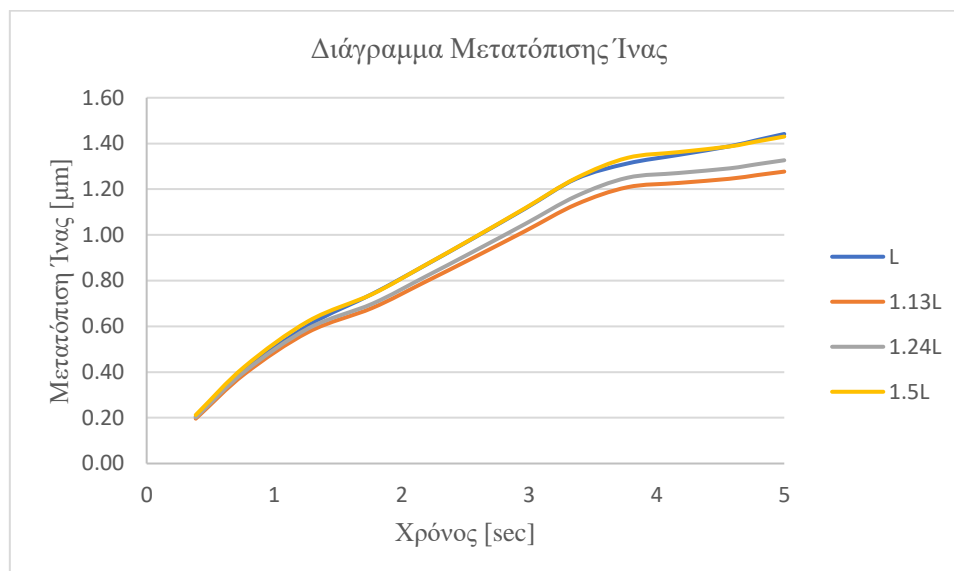
Πίνακας 33 : PS-T700S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικά μήκη.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
L=L	26.09
L=1.13L	17.42
L=1.24L	15.33
L=1.5L	12.16

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εξίσου εμφανές πως η τιμή του όρου διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση του μήκους. Οι τιμές σε αυτή την περίπτωση είναι ελαφρώς μικρότερες σε σχέση με την πρώτη περίπτωση (PS-T800S), γεγονός το οποίο οφείλεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά της ίνας του άνθρακα, δεδομένου πως προσομοιώνονται και οι δύο συνδυασμοί στην ίδια θερμοκρασία (120°C).

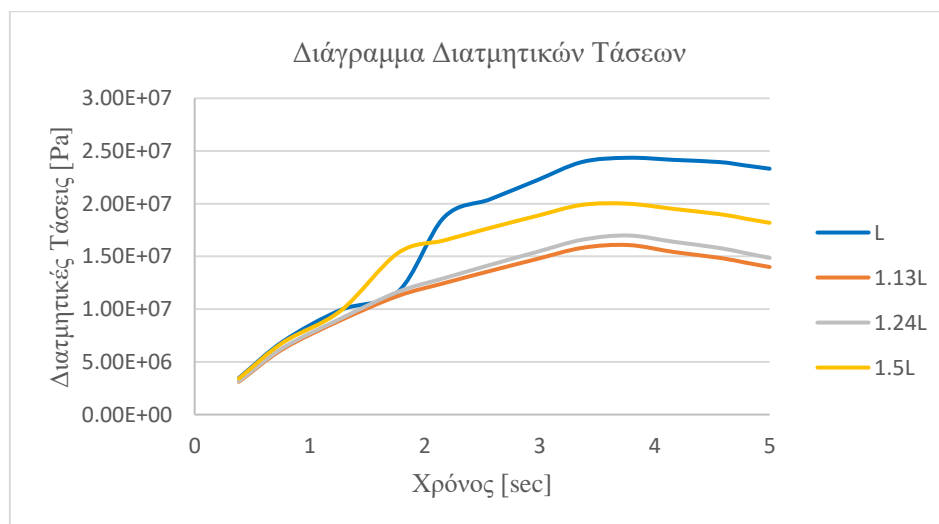
2.3.4 Matrix : ABS – Fiber : T800S (294 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 142 : ABS-T800S / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικά μήκη.

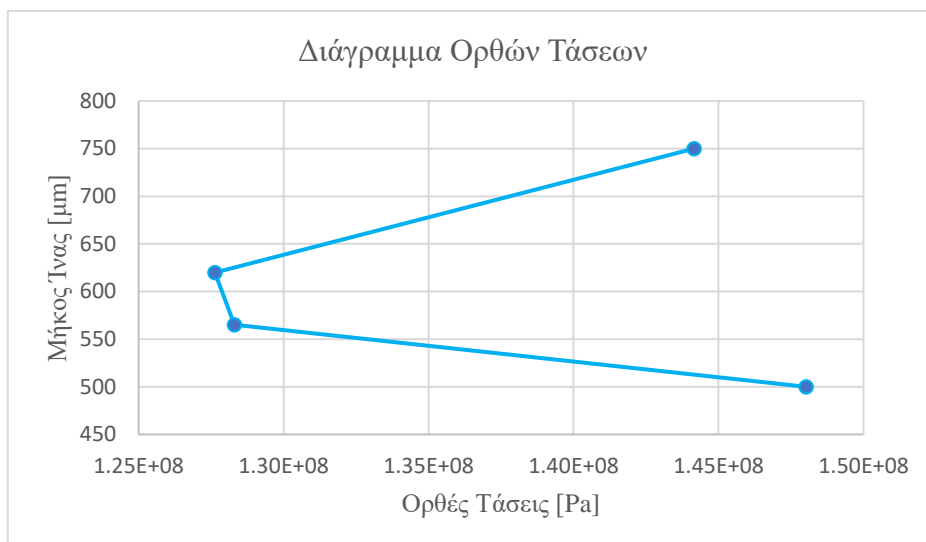
Η διαφορά μετατόπισης της ίνας μεταξύ των μηκών L και 1.13L είναι 10%, το οποίο δείχνει όπως και στη προηγούμενη περίπτωση πως δεν αποτελεί σημαντική διαφορά.



Διάγραμμα 143 : ABS-T800S / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικά μήκη.

Παρατηρείται πως για το αρχικό μήκος L=L οι διατμητικές τάσεις είναι οι υψηλότερες.

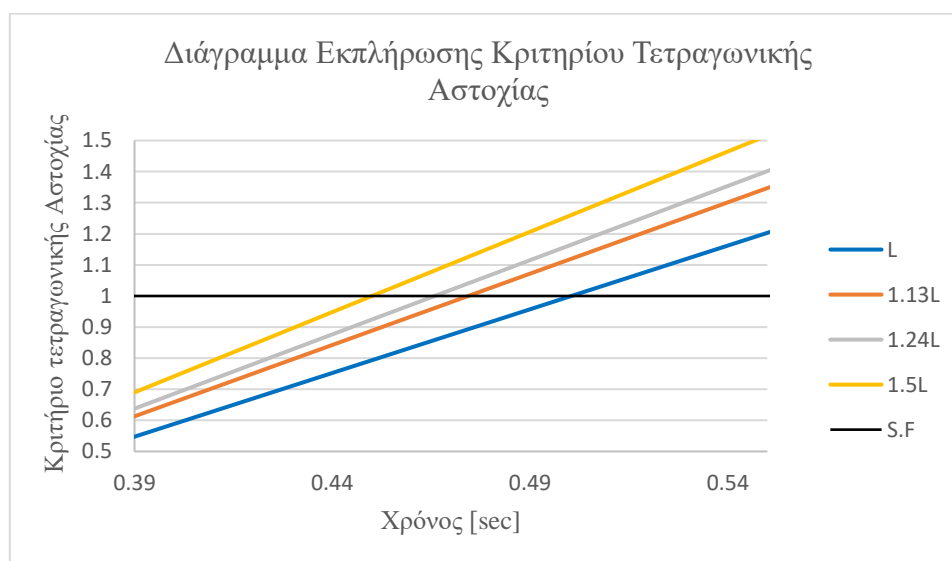
Επίσης, οι ορθές τάσεις για διαφορετικό μήκος φαίνονται από το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 144 : ABS-T800S / Διάγραμμα ορθών τάσεων για διαφορετικό μήκος.

Για το αρχικό μήκος και το μεγαλύτερο μήκος παρατηρούνται οι υψηλότερες ορθές τάσεις. Ένα τέτοιο μοτίβο είχε και το διάγραμμα των διατμητικών τάσεων.

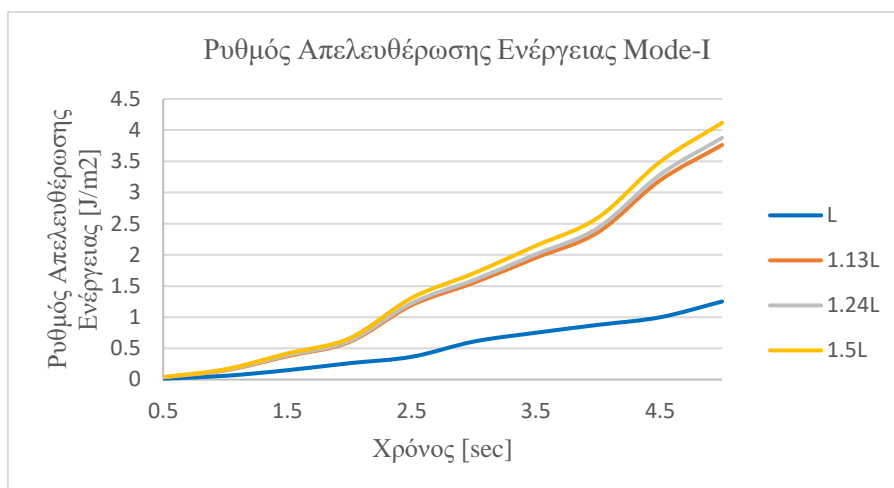
Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



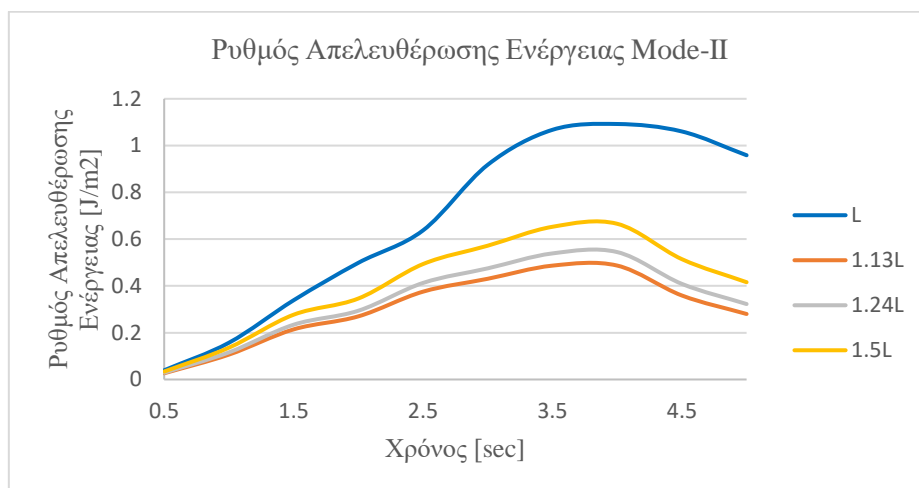
Διάγραμμα 145 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure για διαφορετικά μήκη.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, παρόλο που το υλικό της μήτρας είναι διαφορετικό, για μεγαλύτερο μήκος δοκιμίου συμβαίνει και συντομότερη έναρξη ρωγμής.

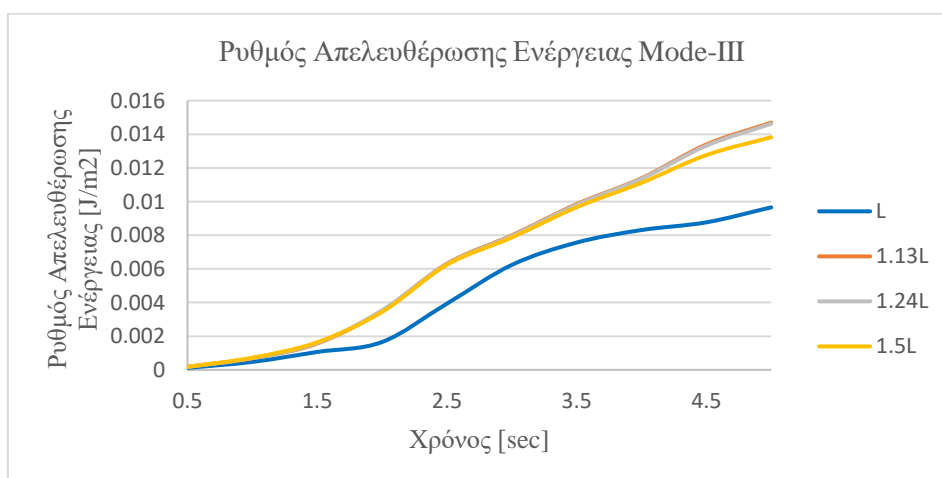
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 146 : ABS-T800S / ERR GI για διαφορετικά μήκη.

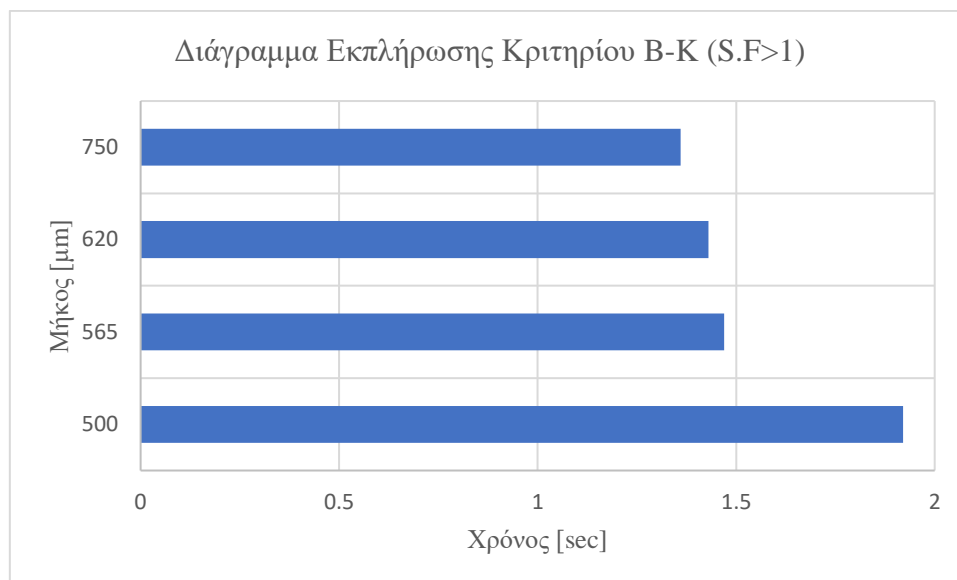


Διάγραμμα 147 : ABS-T800S / ERR GII για διαφορετικά μήκη.



Διάγραμμα 148 : ABS-T800S / ERR GII για διαφορετικά μήκη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται πως κατά το Mode-III το αρχικό μήκος ίνας εκλύει 34% λιγότερη παραμορφωσιακή ενέργεια σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kenane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



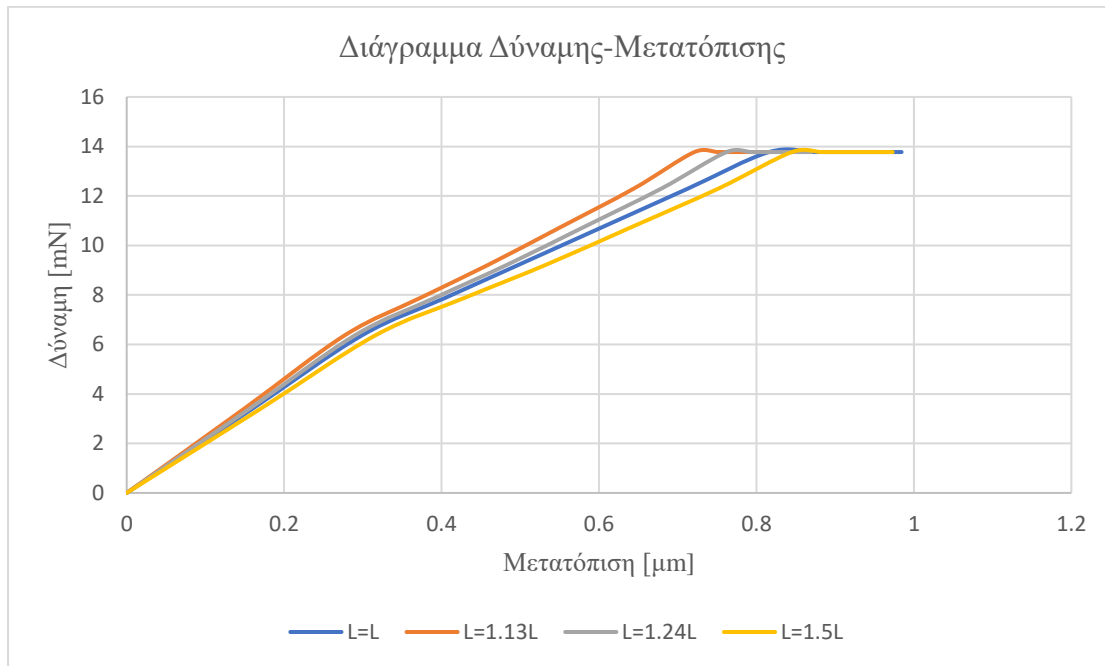
Διάγραμμα 149 : ABS-T800S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικά μήκη.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για μήκος ίσο με το αρχικό έχουμε ελαφρώς αργότερη στιγμή διάδοσης ρωγμής. Ωστόσο, οι αποθηκευμένες ενέργειες του συστήματος είναι οι εξής :

Πίνακας 25 : ABS-T800S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής για διαφορετικά μήκη.

Μήκος Ίνας	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
L=L	1.92 sec	1.89E-08 [J]
L=1.13 L	1,47 sec	1.46E-08 [J]
L=1.24 L	1,43 sec	1.52E-08 [J]
L=1.50 L	1,36 sec	1.68E-08 [J]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τη λιγότερη ενέργεια θα την αποθηκεύσει η περίπτωση μήκους κατά 13% μεγαλύτερο, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς ολοκληρώνεται συντομότερα το κριτήριο B-K. Επομένως, αποτελεί την ενεργειακά βέλτιστη επιλογή.



Διάγραμμα 150 : ABS-T800S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως οι περιπτώσεις μήκους δοκιμίου ίσο με το αρχικό και κατά 50% μεγαλύτερο εμφανίζουν σχεδόν τις ίδιες τιμές μετατόπισης στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας. Επίσης, καθώς και ο συνδυασμός αυτός προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C φαίνεται πως σε σχέση με τον συνδυασμό με διαφορετικό υλικό μήτρας (PS) και ίδια ίνα (T800S) οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες. Το φαινόμενο αυτό δείχνει πως το υλικό μήτρας ABS παρουσιάζει μεγαλύτερη στιβαρότητα.

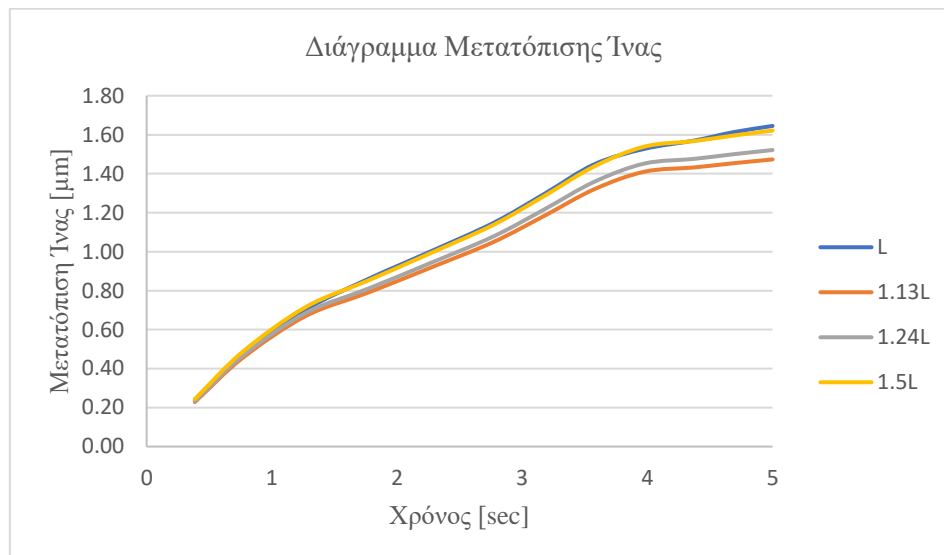
Πίνακας 34 : ABS-T800S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικά μήκη.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
L=L	45.54
L=1.13L	34.39
L=1.24L	30.59
L=1.5L	24.22

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές πως και σε αυτή την περίπτωση η τιμή της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας μειώνεται. Ωστόσο, είναι επίσης εμφανές πως οι τιμές του όρου αυτού σε αυτή την περίπτωση είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Γεγονός το οποίο οφείλεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά της μήτρας ABS.

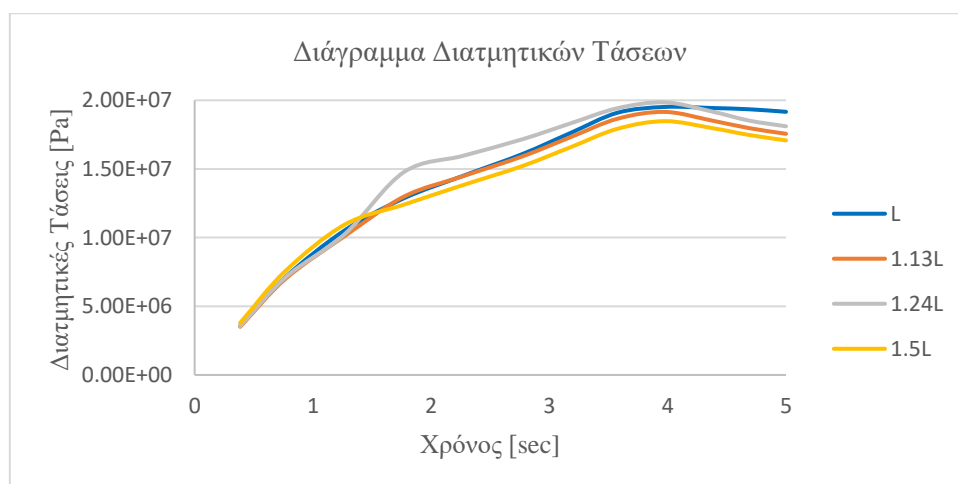
2.3.5 Matrix : ABS – Fiber : T300 (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 151 : ABS-T300 / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικά μήκη.

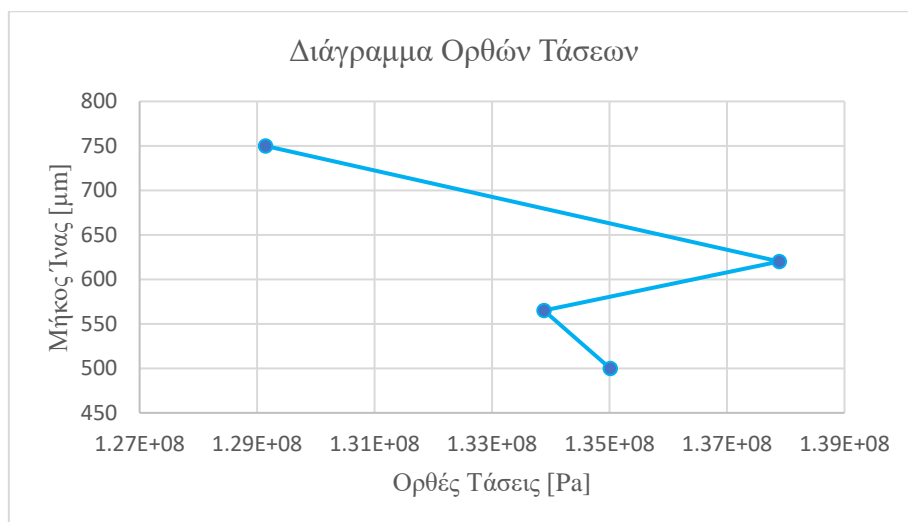
Η διαφορά μετατόπισης της ίνας μεταξύ των μηκών L και 1.13L είναι 10%, το οποίο δείχνει όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις πως δεν είναι σημαντική διαφορά.



Διάγραμμα 152 : ABS-T300 / Διατμητικές Τάσεις ίνας για διαφορετικά μήκη.

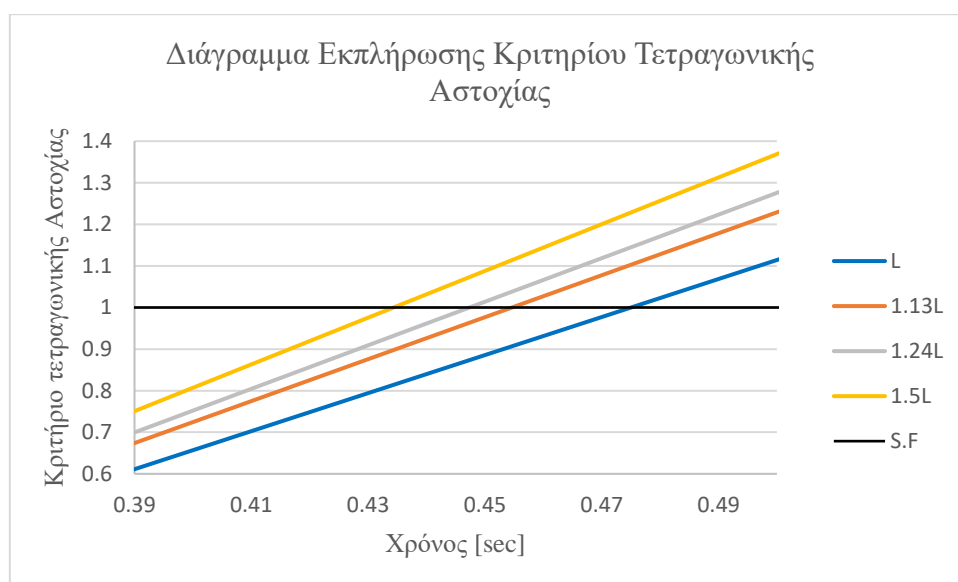
Σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, σε αυτό τον συνδυασμό υλικών φαίνεται πως οι διατμητικές τάσεις έχουν κοντινές τιμές με τις υψηλότερες να τις παρουσιάζει η περίπτωση μήκους ίσο με το αρχικό.

Επίσης, οι ορθές τάσεις για διαφορετικό μήκος φαίνονται από το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 153 : ABS-T300 / Διάγραμμα ορθών τάσεων για διαφορετικό μήκος.

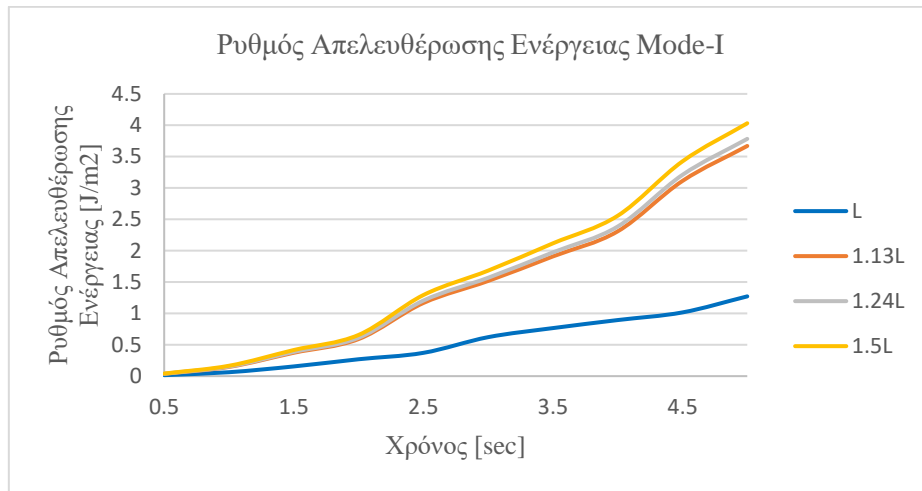
Με την αύξηση του μήκους οι ορθές τάσεις αυξομειώνονται, με υψηλότερες να είναι αυτές στη περίπτωση μήκος $L=1.24L$. Ένα αντίστοιχο μοτίβο φάνηκε και από το διάγραμμα διατμητικών τάσεων. Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



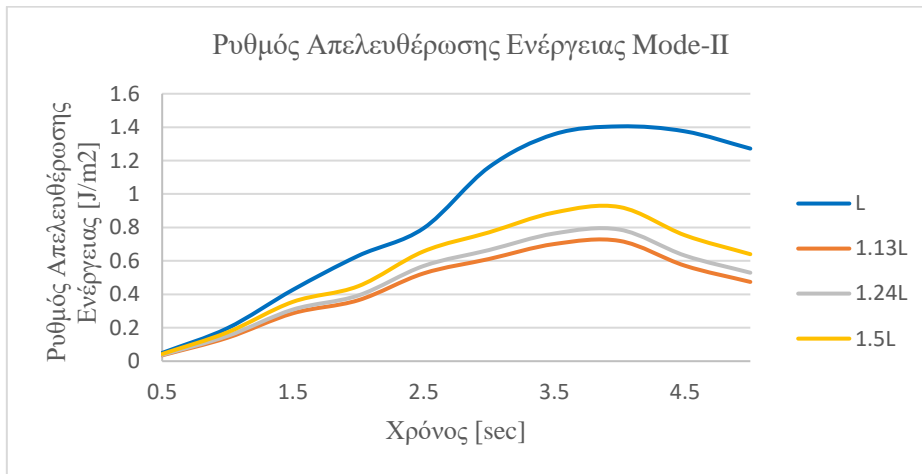
Διάγραμμα 154 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure για διαφορετικά μήκη.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ είναι εμφανές πως όσο μεγαλύτερο το μήκος του δοκιμίου τόσο νωρίτερα θα ξεκινήσει και η ρωγή.

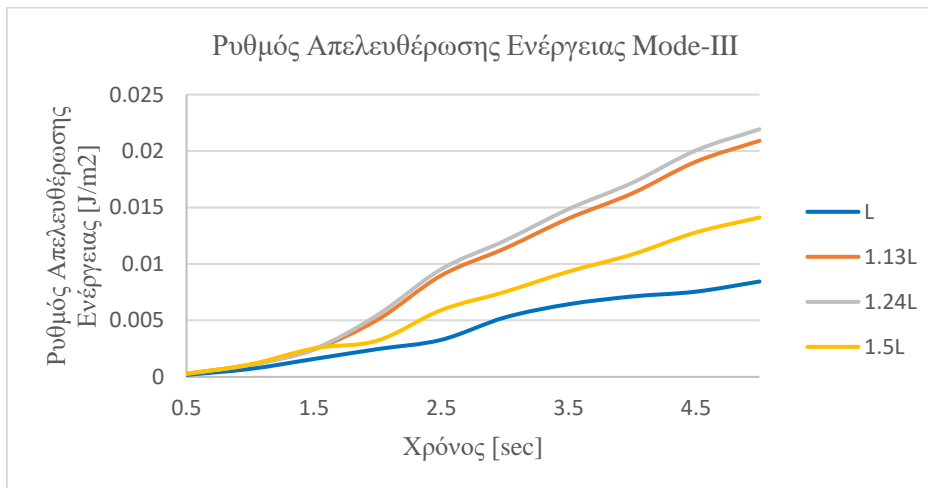
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 155 : ABS-T300 / ERR GI για διαφορετικά μήκη.

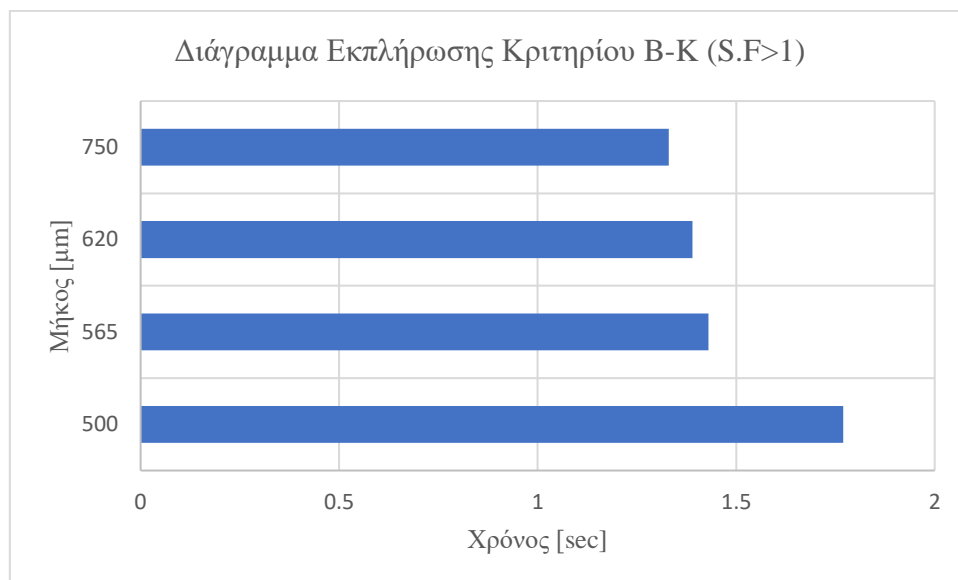


Διάγραμμα 156 : ABS-T300 / ERR GII για διαφορετικά μήκη.



Διάγραμμα 157: ABS-T300 / ERR GIII για διαφορετικά μήκη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα των ERRs φαίνεται πως κατά το Mode-III το αρχικό μήκος όπως και το μέγιστο παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές έκλυσης ενέργειας κατά την παραμόρφωση. Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



Διάγραμμα 158 : ABS-T300 / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικά μήκη.

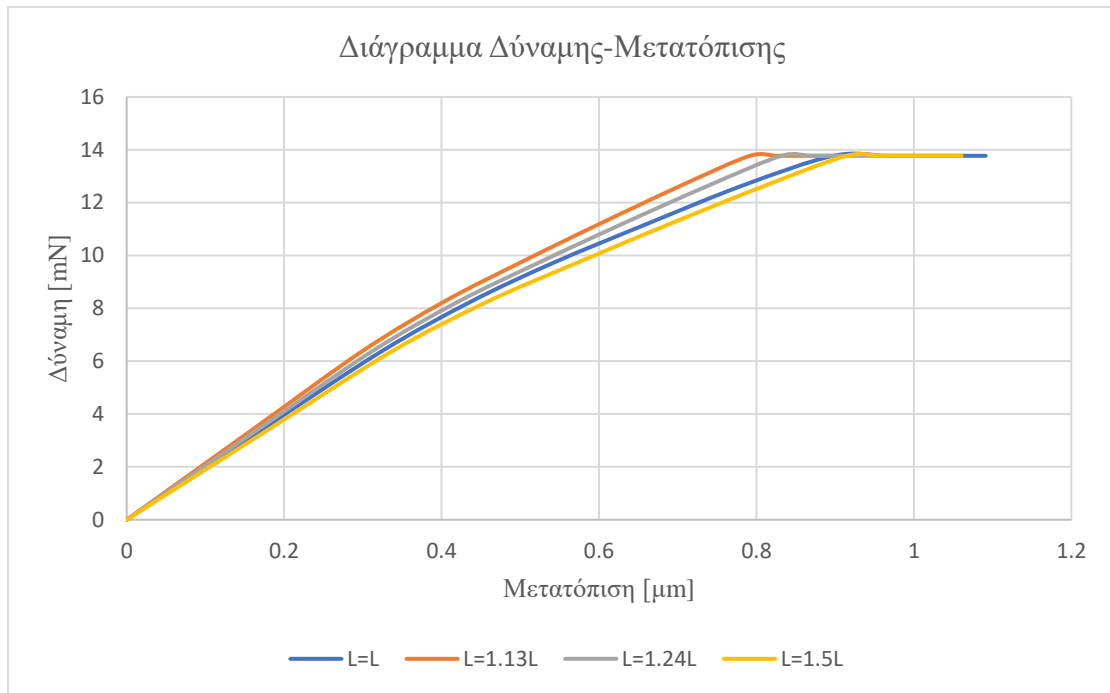
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για μήκος ίσο με το αρχικό συμβαίνει ελαφρώς αργότερα η διάδοση της ρωγμής.

Ωστόσο, οι αποθηκευμένες ενέργειες του συστήματος είναι οι εξής :

Πίνακας 26 : ABS-T300 /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής για διαφορετικά μήκη.

Μήκος Ίνας	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
L=L	1.77 sec	1.93E-08 [J]
L=1.13 L	1.43 sec	1.49E-08 [J]
L=1.24 L	1.39 sec	1.56E-08 [J]
L=1.50 L	1.33 sec	1.71E-08 [J]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τη λιγότερη ενέργεια θα την αποθηκεύσει η περίπτωση μήκους κατά 13% μεγαλύτερο, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς ολοκληρώνεται συντομότερα το κριτήριο B-K. Επομένως, αποτελεί την ενεργειακά βέλτιστη επιλογή.



Διάγραμμα 159 : ABS-T300 / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ένα μοτίβο μετατοπίσεων παρόμοιο με τον προηγούμενο συνδυασμό υλικών. Ωστόσο, οι μετατοπίσεις έχουν ελαφρώς υψηλότερη τιμή, το γεγονός αυτός οφείλεται στη διαφορά των χαρακτηριστικών των ινών άνθρακα όπου περιέχουν οι δύο αυτοί συνδυασμοί.

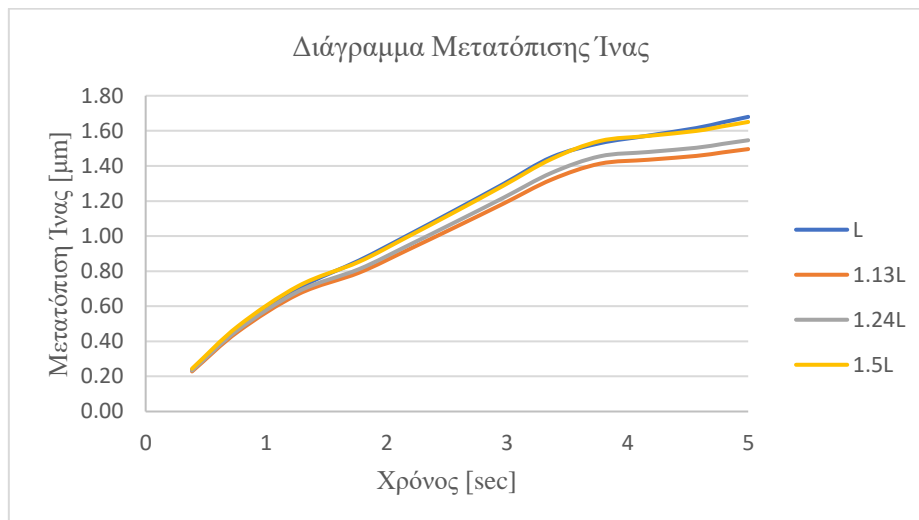
Πίνακας 35 : ABS-T300 / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικά μήκη.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
L=L	45.75
L=1.13L	35.29
L=1.24L	31.28
L=1.5L	24.74

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές πως και σε αυτή την περίπτωση η τιμή της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας μειώνεται. Ωστόσο, είναι εξίσου εμφανές πως οι τιμές του όρου αυτού σε αυτή την περίπτωση είναι μικρότερες συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Γεγονός το οποίο οφείλεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά της ίνας άνθρακα T300.

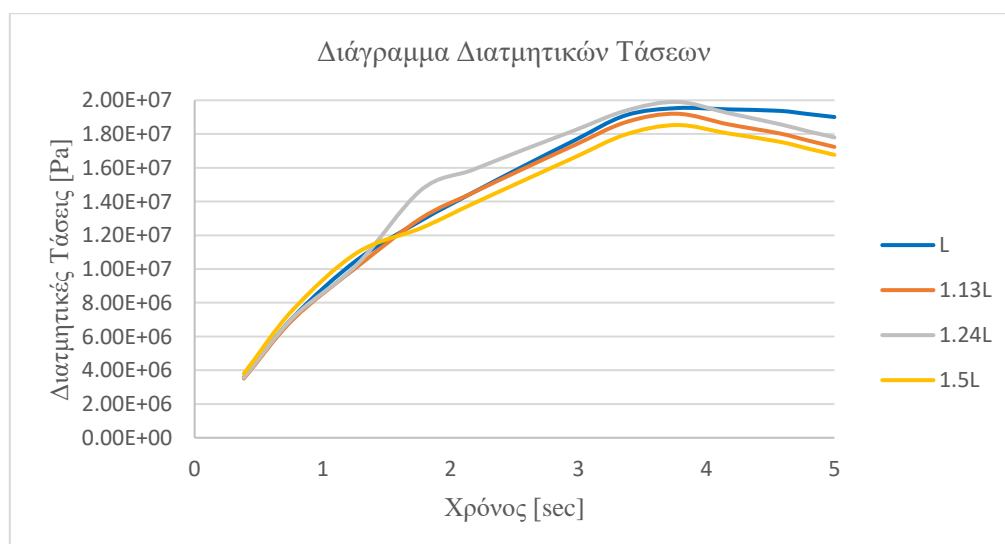
2.3.6 Matrix : ABS – Fiber : T700S (230 GPa)

Ο συνδυασμός των υλικών αυτών προσομοιώνεται για τη θερμοκρασία των 120°C, όπου προέκυψε από την βελτιστοποίηση των θερμοκρασιών που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



Διάγραμμα 160 : ABS-T700S / Μετατόπιση της ίνας για διαφορετικά μήκη.

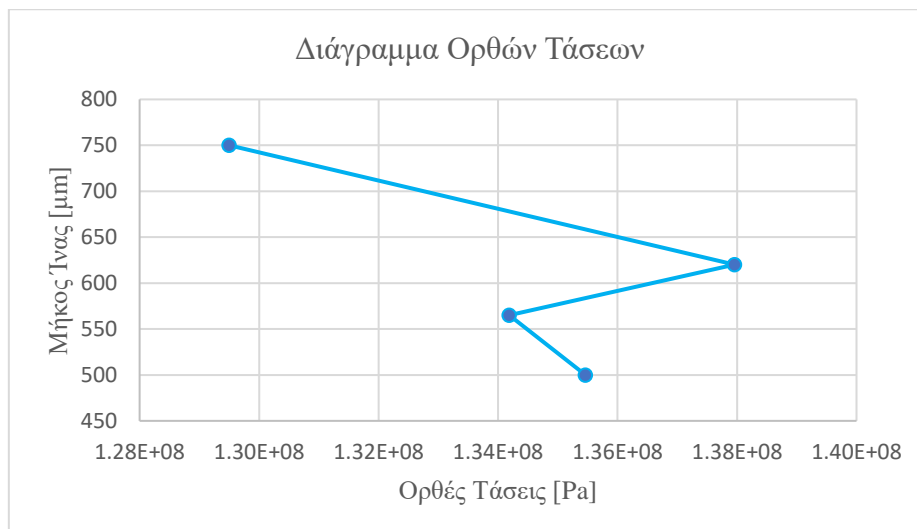
Η διαφορά μετατόπισης της ίνας μεταξύ των μηκών L και 1.13L είναι 10%, το οποίο δείχνει όπως και στη προηγούμενη περίπτωση πως δεν είναι σημαντική διαφορά.



Διάγραμμα 161 : ABS-T700S / Διατμητικές τάσεις ίνας για διαφορετικά μήκη.

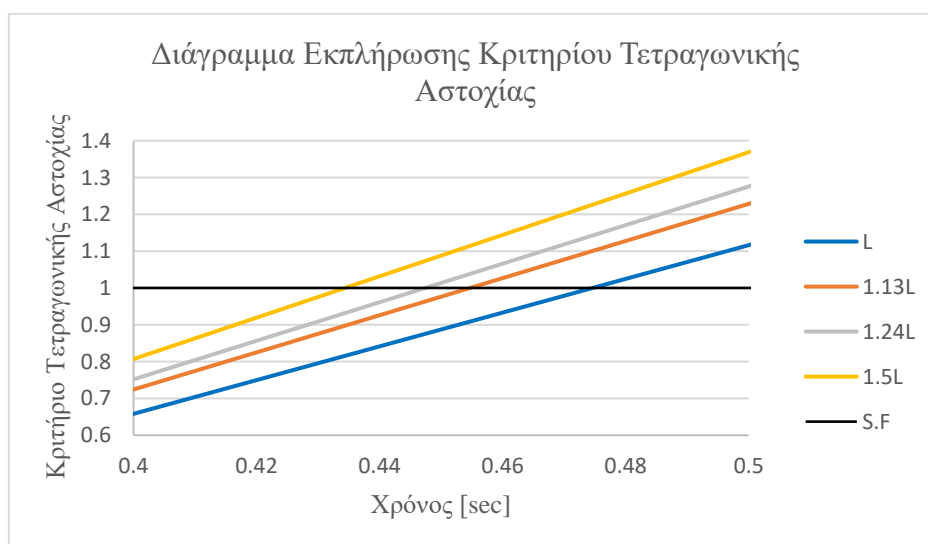
Όπως στη προηγούμενη περίπτωση έτσι και σε αυτό τον συνδυασμό υλικών φαίνεται πως οι διατμητικές τάσεις έχουν κοντινές τιμές με τις υψηλότερες να τις παρουσιάζει η περίπτωση μήκους ίσο με το αρχικό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι ίνες T300 και T700S έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Επίσης, οι ορθές τάσεις για διαφορετικό μήκος φαίνονται από το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 162 : ABS-T700S / Διάγραμμα ορθών τάσεων για διαφορετικό μήκος.

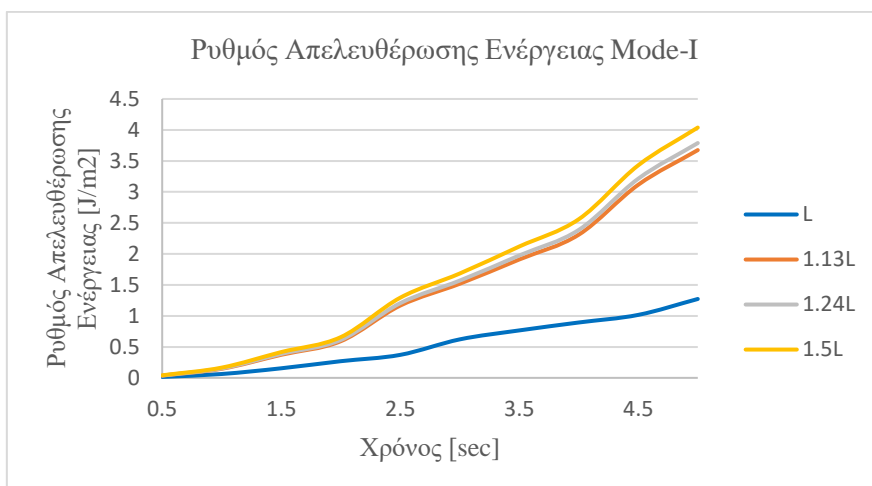
Με την αύξηση του μήκους οι ορθές τάσεις αυξομειώνονται, με υψηλότερες να είναι αυτές στη περίπτωση μήκος $L=1.24L$. Ένα αντίστοιχο μοτίβο φάνηκε και από το διάγραμμα διατμητικών τάσεων. Το ίδιο μοτίβο παρατηρήσαμε και στη προηγούμενη περίπτωση, το οποίο οφείλεται ξανά στα κοινά χαρακτηριστικά των ινών αυτών. Το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας (Quadratic Failure) παίζει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα εξής :



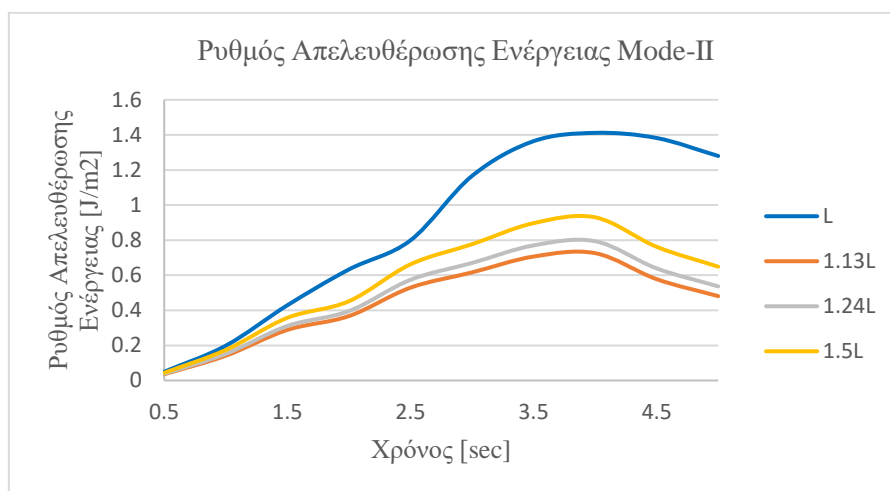
Διάγραμμα 163 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου Quadratic Failure για διαφορετικά μήκη.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ φαίνεται πως όσο μεγαλύτερο το μήκος του δοκιμίου τόσο νωρίτερα θα ξεκινήσει και η ρωγμή.

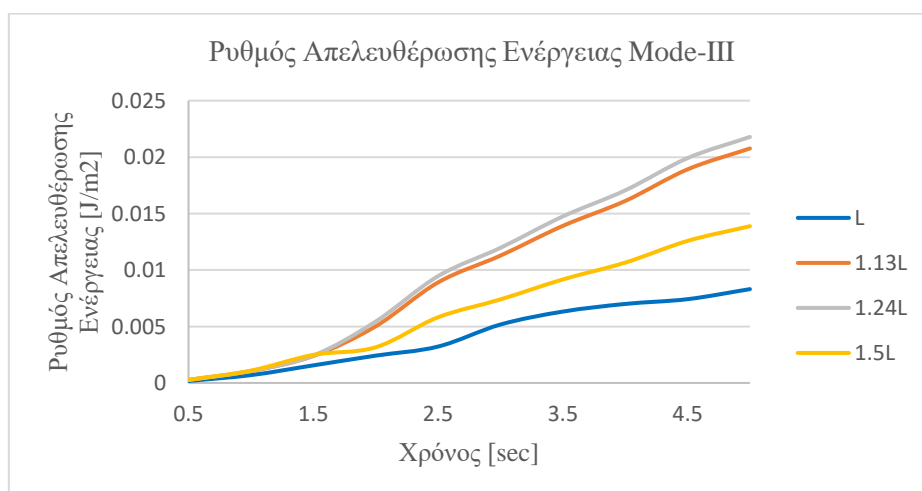
Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για τα Mode-I,II,III :



Διάγραμμα 164 : ABS-T700S / ERR GI για διαφορετικά μήκη.



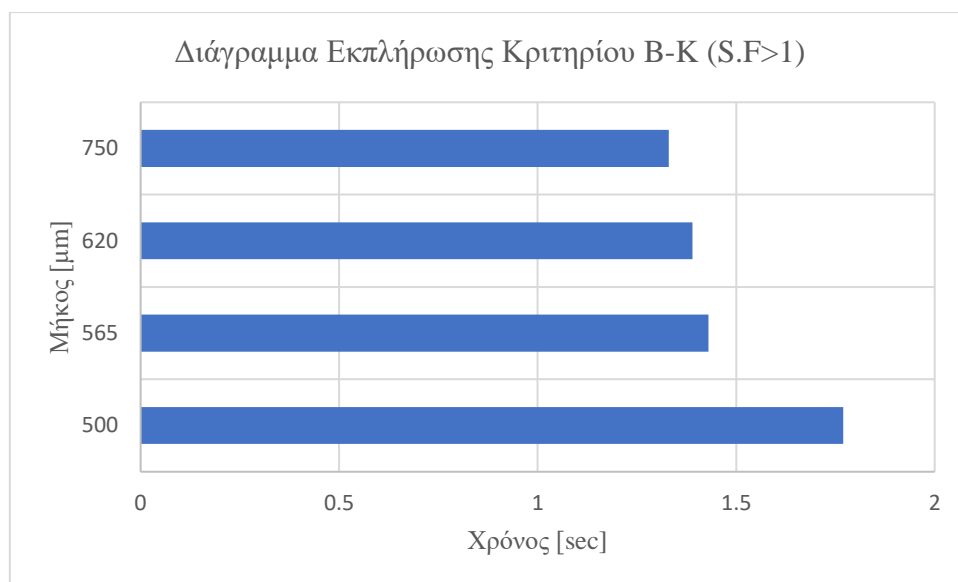
Διάγραμμα 165 : ABS-T700S / ERR GII για διαφορετικά μήκη.



Διάγραμμα 166 : ABS-T700S / ERR GIII για διαφορετικά μήκη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα των ERRs φαίνεται πως κατά το Mode-III το αρχικό μήκος όπως και το μέγιστο παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές έκλυσης ενέργειας κατά την παραμόρφωση. Αντίστοιχα, και στη προηγούμενη περίπτωση είδαμε ένα αντίστοιχο μοτίβο στα παραπάνω διαγράμματα.

Τέλος, λήφθηκε το διάγραμμα εκπλήρωσης του κριτηρίου Benzeggagh Kennane καθώς και η ενέργεια που κατανάλωσε το σύστημα μέχρι να εκπληρωθεί το κριτήριο αυτό.



Διάγραμμα 167 : ABS-T700S / Χρόνος εκπλήρωσης κριτηρίου B-K για διαφορετικά μήκη.

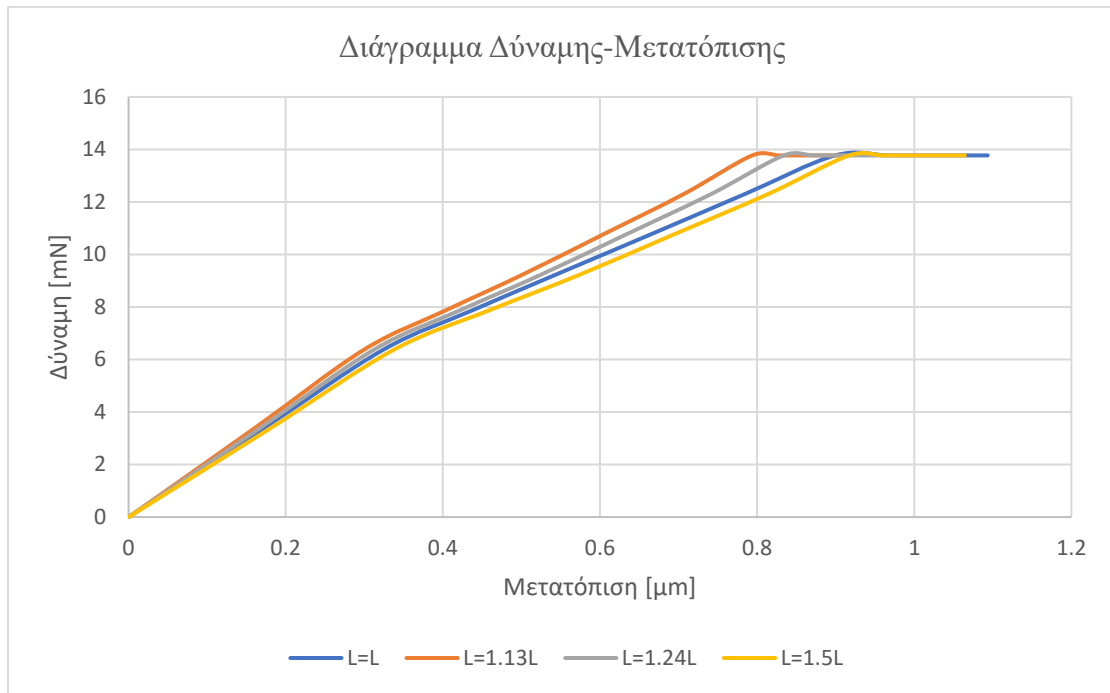
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για μήκος ίσο με το αρχικό συμβαίνει ελαφρώς αργότερα η διάδοση της ρωγμής.

Ωστόσο, οι αποθηκευμένες ενέργειες του συστήματος είναι οι εξής :

Πίνακας 27 : ABS-T800S /Αποθηκευμένες ενέργειες έως την στιγμή διάδοσης της ρωγμής για διαφορετικά μήκη.

Μήκος Ίνας	Χρόνος Εκπλήρωσης	Απαιτούμενη Ενέργεια
L=L	1.77 sec	1.93E-08 [J]
L=1.13 L	1.43 sec	1.49E-08 [J]
L=1.24 L	1.39 sec	1.56E-08 [J]
L=1.50 L	1.33 sec	1.71E-08 [J]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τη λιγότερη ενέργεια θα την αποθηκεύσει η περίπτωση μήκους κατά 13% μεγαλύτερο, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς ολοκληρώνεται συντομότερα το κριτήριο B-K. Επομένως, αποτελεί την ενεργειακά βέλτιστη επιλογή.



Διάγραμμα 168 : ABS-T700S / Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης για διαφορετικά μήκη.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως οι μετατοπίσεις στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας ακολουθούν το ίδιο μοτίβο με όλους τους προηγούμενους συνδυασμούς αυτής της μελέτης. Επίσης, παρατηρείται πως οι τιμές της μετατόπισης είναι παρόμοιες με αυτές του προηγούμενου συνδυασμού, το οποίο συμβαίνει επειδή οι ίνες του άνθρακα που χρησιμοποιούν έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Ωστόσο, παρατηρείται επίσης πως σε σχέση με τον συνδυασμό υλικών PS-T700S όπου προσομοιώνεται εξίσου για τους 120°C, οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες. Φαινόμενο το οποίο δείχνει πως το υλικό μήτρας ABS παρέχει υψηλότερη στιβαρότητα.

Πίνακας 36 : ABS-T700S / Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας τ_s για διαφορετικά μήκη.

Διατμητική Αντοχή Διεπιφάνειας (Interfacial Shear Strength)	Units (kPa)
L=L	43.50
L=1.13L	33.86
L=1.24L	30.11
L=1.5L	23.93

Από τον παραπάνω πίνακα είναι ξανά εμφανές πως η τιμή της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση του μήκους, ωστόσο, οι τιμές του όρου αυτού είναι παρόμοιες με τις τιμές στην προηγούμενη περίπτωση. Κάτι το οποίο οφείλεται στα κοινά χαρακτηριστικά των ινών άνθρακα T300 με T700S.

Συμπεράσματα

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε παρατηρήθηκε πως το μήκος του δοκιμίου δεν παρουσιάζει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο, ωστόσο, είναι εμφανές πως οι συνδυασμοί με ίνα άνθρακα T800S παρουσιάζουν ελαφρώς μικρότερες μετατοπίσεις. Γεγονός το οποίο οφείλεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά της ίνας αυτής σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται, τόσο τις διατμητικές όσο και τις ορθές, σε όλες τις περιπτώσεις δεν παρουσιάζουν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Ωστόσο, οι συνδυασμοί με ίνες άνθρακα τις T300 και T700S είχαν σχεδόν τις ίδιες τιμές, κάτι το οποίο συμβαίνει επειδή τα χαρακτηριστικά τους είναι σχεδόν ίδια.

Επίσης σημαντική παρατήρηση είναι πως το κριτήριο Τετραγωνικής Αστοχίας, δηλαδή η χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμής, εκπληρώνεται σε κάθε περίπτωση συντομότερα για τα μεγαλύτερα μήκη δοκιμίου και βραδύτερα για τα μικρότερα μήκη δοκιμίου.

Τα διαγράμματα των ρυθμών απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης έδειξαν πως στις περισσότερες περιπτώσεις την μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης κατά την διάδοση της ρωγμής την εκλύουν τα μεγαλύτερα μήκη ίνας, μόνο όμως κατά την διάδοση ρωγμής Mode-I. Στη περίπτωση έκλυσης ενέργειας κατά Mode-III δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά για τις τιμές των διαφορετικών μηκών.

Όσον αφορά την ελάχιστη αποθηκευμένη ενέργεια, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις την επιτυγχάνει η περίπτωση μήκους κατά 13% μεγαλύτερο του αρχικού, το οποίο σημαίνει ότι τέτοιο μήκος δοκιμίου είναι πολύ εύθραυστο σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Από τα διαγράμματα δύναμης μετατόπισης παρατηρείται πως οι περιπτώσεις μήκους ίσου με το αρχικό και κατά 50% μεγαλύτερο έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές μετατόπισης στο σημείο επαφής ίνας-μήτρας. Ενώ οι συνδυασμοί με μήκος δοκιμίου κατά 13% και κατά 24% μεγαλύτερο εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερες μετατοπίσεις. Επίσης, οι συνδυασμοί υλικών με ίνα άνθρακα T800S και με υλικό μήτρας ABS παρουσιάζουν τις μικρότερες μετατοπίσεις, το οποίο δείχνει πόσο στιβαροί συνδυασμοί είναι σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Τέλος, ο όρος της διατμητικής αντοχής διεπιφάνειας μειώνεται με την αύξηση του μήκους. Παρατηρείται πως οι συνδυασμοί με υλικό μήτρας το ABS έχουν και υψηλότερες τιμές διατμητικής αντοχής στη διεπιφάνεια, γεγονός το οποίο τους καθιστά πιο στιβαρούς συνδυασμούς.

3.1 Συμπεράσματα/Προτάσεις

Οι συνδυασμοί με υλικό μήτρας το πλαστικό ABS παρουσιάζουν τους στιβαρότερους συνδυασμούς, καθώς στη μελέτη επιβολής διαφορετικών θερμοκρασιών προκύπτει πως οι συνδυασμοί αυτοί αποθηκεύουν κατά 85% περισσότερη παραμορφωσιακή ενέργεια έως τη χρονική στιγμή έναρξης διάδοσης της ρωγμής. Επίσης, φαίνεται πως οι συνδυασμοί αυτοί έχουν ελαφρώς μικρότερες μετατοπίσεις της ίνας σε σχέση με τους συνδυασμούς με υλικό μήτρας PS.

Οι συνδυασμοί με υλικό ίνας T800S (294 GPa) παρουσιάζουν κατά 13% μικρότερες μετατοπίσεις στην ίνα σε σχέση με τους συνδυασμούς με ίνα T700S (230 GPa) και T300 (230GPa).

Επιπλέον μελέτες όπου θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με σκοπό να γίνει εμφανής ο ρόλος που παίζουν οι θερμομηχανικές ιδιότητες των υλικών σε ένα αντίστοιχο πείραμα για συνδυασμούς σύνθετων υλικών είναι οι εξής :

- Διατήρηση της ίνας του σύνθετου υλικού (π.χ. T300, T700S, T700H, CF κ.α.) και εφαρμογή πέντε διαφορετικών υλικών ως μήτρα (π.χ. Πολυεστερική Ρητίνη, Ρητίνες, Πλαστικά κ.α.). Σκοπός της έρευνας αυτής θα είναι η παρατήρηση του ρόλου που παίζει σε ένα σύνθετο υλικό το υλικό της μήτρας δεδομένου πως το υλικό της ίνας παραμένει σταθερό. Από την έρευνα αυτή θα είναι εμφανής η επίδραση που θα έχει η θερμοκρασία στην μήτρα του σύνθετου υλικού.
- Διατήρηση της μήτρας του σύνθετου υλικού (π.χ. Πολυεστερική Ρητίνη, Ρητίνες, Πλαστικά κ.α.) και εφαρμογή πέντε διαφορετικών υλικών ως ίνα (π.χ. T300, T700S, T700H, CF κ.α.). Σκοπός της έρευνας αυτής θα είναι η παρατήρηση του ρόλου που παίζει σε ένα σύνθετο υλικό το υλικό της ίνας δεδομένου πως το υλικό της μήτρας παραμένει σταθερό. Από την έρευνα αυτή θα είναι εμφανής η επίδραση που θα έχει η θερμοκρασία στην ίνα του σύνθετου υλικού.
- Διατήρηση της μήτρας του σύνθετου υλικού (π.χ. Πολυεστερική Ρητίνη, Ρητίνες, Πλαστικά κ.α.) και εφαρμογή του ίδιου υλικού ίνας όμως με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας (π.χ. CF-395 GPa, CF-290 GPa, CF-230 GPa κ.α.). Σκοπός της έρευνας αυτής θα είναι η παρατήρηση του κατά πόσο το μέτρο ελαστικότητας μιας ίνας παίζει ρόλο στις θερμικές και στατικές καταπονήσεις.

Βιβλιογραφία

- Anderson, T. (2005). *Fracture Mechanics* (3η εκδ.). New York, USA: Taylor & Francis Group.
- ANSYS. (2022). Ανάκτηση από <https://www.ansys.com/academic/students>
- Arain, M. F., Mingxue, W., Jianyong, C., & Zhang, H. (2019). *Experimental and numerical study on tensile behavior of surface modified PVA fiber reinforced strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC)*. Ανάκτηση Οκτόβρης 4, 2022, από https://www.researchgate.net/figure/Single-Fiber-Pull-out-Test-set-up-Ref12_fig3_333245219
- Asp, L. E. (1998, Απρίλιος 28). The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite. *Composites Science and Technologies*, σσ. 967-977.
- Bhatt, P., & Goe, A. (2017). *Carbon Fibers : Production, Properties and Potensial use*. India.
- Christina Scheffler. (2021, Σεπτέμβριος 9). SINGLE FIBER PUL OUT TEST Characterization of fiber-matrix adhesion. *ipf*. Ανάκτηση από https://www.ipfdd.de/fileadmin/user_upload/ax/OEA/Infoblaetter/Single_Fiber_Pul-Out_Test_Characterization_of_fibre-matrix_adhesion.pdf
- Daricik, F. (2019, Απρίλιος 12). Mesh size sensitivity analysis for interlaminar fracture of the fiber-reinforced laminated composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, σσ. 1-6.
- DiFrancia, C., Ward, T., & Claus, R. (1996, Σεπτέμβριος 9). 1: Review and interpretation. *The single-fiber pull-out test.*, σσ. 597-598. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X9500069E>
- EngMorph. (2022). Ανάκτηση από Aspect Ratio calculation for 2D Elements: <https://www.engmorph.com/2d-element-aspect-ratio-calc>
- Fatih, D. (2019, Οκτώβρης 4). Mesh size sensitivity analysis for interlaminar fracture of the fiber-reinforced laminated composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, σσ. 1-6. Ανάκτηση 2022
- Frikha, M., Nouri, H., Guessasma, S., Roger, F., & Bradai, C. (2017, Απρίλιος 28). Interfacial Behavior from pull-out tests of steel and aluminum fibers in unsaturated polyester matrix. *Journal of Materials Science : Composites*, σσ. 13829-13840.
- Gedeon, M. (2014, Μάιος 4). Stress Intensity and Fracture Toughness. *MATERION BRUSH PERFORMANCE ALLOYS, TECHNICAL TIDBITS(68)*.
- Ghaffari, S., Seon, G., & Makeev, A. (2021, Ιούλιος 15). In-situ SEM based method for assesing fiber-matrix interface shear strength in CFRPs. *Materials and Design*.
- Hibbeler, R. C., & Yap, B. K. (2018). *Mechanics of Materials*. Harlow : Pearson.
- Hongxiao , W., Xiahui , Z., Yugang , D., & Lingjie, M. (2018, Μάρτιος 29). Experimental and Numerical Study of the Interfacial Shear Strength in Carbon Fiber/Epoxy Resin Composite under Thermal Loads. *International Journal of Polymer Science*, σσ. 3 - 5.

- Jia, Y., Yan, W., & Liu, H.-Y. (2012, Μάιος 26). Carbon Fiber pullout under the influence of residual thermal stresses in polymer matrix composites. *Computational Materials Science*, σσ. 79-86.
- Kainourgios, P., Kartsonakis, I. A., Dragatogiannis, D. A., Koumoulos, E. P., Goulis, P., & Charitidis, K. A. (2017). Electrochemical surface functionalization of carbon fibers for chemical affinity improvement with epoxy resins. *Applied Surface Science*, σσ. 593-604.
- Kavouras, P., Dragatogiannis, D. A., Batsouli, D. I., & Charitidis, C. A. (2017). Effect of local microstructure on the indentation induced damage of a fiber reinforced composite. *Polymer Testing*, σσ. 197-204.
- Krueger, R. (2004, Απρίλιος 5). Virtual crack closure technique: History, Approach, and Applications. Virginia.
- Logan, D. L. (2011). *A first course in the finite element method*. .
- Meng, Q., & Chang, M. (2020, Ιούλιος 15). Interfacial crack propagation between a rigid fiber and a hyperelastic elastomer: Experiments and Modeling. *International Journal of Solids and Structures*, σσ. 141-154.
- Meng, Q., & Chang, M. (2020, Απρίλιος 28). *International Journal of Solids and Structures*. Ανάκτηση από ELSEVIER.
- Miller, B., Muri, P., & Rebenfeld, L. (1987, Απρίλιος 28). A microbond method for determination of the shear strength of fiber/resin interface. *Composite Science Technology*, σσ. 17-32.
- Ogihara, S., & Koyanagi, J. (2010). *ScienceDirect*. Ανάκτηση Οκτώβρης 4, 2022, από <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353809003546>
- Q.V. Bui. (2011, Ιούλιος 11). A Modified Benzeggagh-Kennane Fracture Criterion for Mixed-mode Delamination. *Journal of Composite Materials*, σσ. 389-413.
- Soboyejo, W. O. (2003). *Mechanical Properties of Engineered Materials*. New York: Marcel Dekker.
- Suresh, S. (1992). *Fatigue of Materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tanaka, K., Minoshima, K., Grela, W., & Komai, K. (2002, Απρίλιος 28). Characterization of the aramid/epoxy interfacial properties by means of pull-out test and influence of water absorption. *Science Technology*, σσ. 2169-2177.
- Twisp. (2008). *WIKIMEDIA COMMONS*. Ανάκτηση Οκτώβρης 4, 2022, από https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fracture_modes_v2.svg#/media/File:Fracture_modes_v2.svg
- Wang, H., Zhang, X., Duan, Y., & Meng, L. (2018). Experimental and Numerical Study of the Interfacial. *International Journal of Polymer Science*.
- Weisberg, D. E. (2008). Analysis Companies. Στο D. E. Weisberg, *The Engineering Design Revolution* (σσ. 22-1 - 22-6).

- Yang, Q.-S., Qin, Q.-H., & Peng, X.-R. (2003, Απρίλιος 30). Size effects in the fiber pullout test. *Composite Structures*, σσ. 193-198.
- Zehnder, & Alan. (2012). *Fracture Mechanics*. London: Springer Science+Business Media.
- Zhandarov, F. S., Mader, E., Yurkevich, R. O., & Adhes, J. (2002, Απρίλιος 28). Indirect estimation of fiber/polymer bond strength and interfacial friction from maximum load values recorded in the microbond and pull-out tests. Part I local bond strength. *Science Technology*, σσ. 1171-1200.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The finite Element Method : It's Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann.
- Βουθούνης, Π. (2017). *Μηχανική Παραμορφώσιμου Στερεού*. Αθήνα: ΑΝΔΡΟΜΑΧΗ ΒΟΥΘΟΥΝΗ.
- Γεώργιος Ζαβερδινός. (2021). Computational Study of Temperature Dependent Fiber/Matrix Interfacial Debonding in GFRPs.
- Γιαννακόπουλος, Χ. (2010). *Η εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) στην εμβιομηχανική της Σπονδυλικής Στήλης*.
- Καρίδης. (2006, Φεβρουάριος 20). *Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Βασικές έννοιες*.
- Κωνσταντίνος, Β. (2017). *Λογισμικά Πεπερασμένων Στοιχείων με ελεύθερη άδεια χρήσης*. Ηράκλειο: Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
- Μακρής, Π., & Ψυλάκης, Γ. (2015, Φεβρουάριος 20). Μελέτη αντοχής μηχανολογικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. σσ. 19-20.
- Μανολάκος, Δ. (2005, Μάρτιος 3). *Σύνθετα Υλικά (Composites)*. σσ. 1-25.
- Στούρας, Α. Δ. (2015, μάρτιος 23). *Προσομοίωση Ανεμογεννήτριας Κάθετου Άξονα με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (ANSYS)*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Φραγκίσκος, Β. (2018). *Μελέτη της μορφολογίας και των ιδιοτήτων πολυμερικών μεμβράνων ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα*. Πάτρα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
- ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ, Θ., & ΚΑΡΑΟΥΛΗΣ, Σ. (2015, Ιούλιος 7). *ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ*.