



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΝΑ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Παππάς Σπυρίδων

Α.Μ: 178

Επιβλέπων Καθηγητής: Τσορμπατζόγλου Ανδρέας

Επίκουρος Καθηγητής

Άρτα, Φεβρουάριος, 2025

**AN IMPROVED MODEL FOR EVALUATING THE STATIC FATIGUE
LIFETIME OF OPTICAL FIBERS.**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Τόπος, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Τσορμπατζόγλου Ανδρέας,

2. Μέλος επιτροπής

Στεργίου Ελευθέριος,

3. Μέλος επιτροπής

Αγγέλης Κωνσταντίνος,

© Παππάς Σπυρίδων, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Παππάς Σπυρίδων

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ανδρέα Τσορμπατζόγλου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις ενθαρρυντικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η εμπειρία και οι γνώσεις του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, την υπομονή και την αγάπη τους. Χωρίς τη βοήθειά τους, την κατανόηση και τη σταθερή τους πίστη στις δυνατότητές μου, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή. Η συμβολή όλων σας υπήρξε πολύτιμη, και για αυτό σας είμαι βαθιά ευγνώμων.

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη και η βελτίωση ενός μοντέλου που να προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια τον χρόνο ζωής των οπτικών ινών υπό στατική καταπόνηση. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες και άλλες εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, και η αξιολόγηση της αντοχής τους σε κόπωση είναι κρίσιμη για τη μακροχρόνια αξιοπιστία τους.

Η εργασία επικεντρώνεται στη βελτίωση των υπάρχοντων μοντέλων μέσω της ανάλυσης των παραγόντων που επηρεάζουν τη στατική κόπωση, όπως η μικροδομή των ινών, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Η προσέγγιση περιλαμβάνει τη θεωρητική μελέτη, αριθμητική ανάλυση και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα για την επαλήθευση της αξιοπιστίας του νέου μοντέλου.

Το βελτιωμένο μοντέλο που συνιστά περαιτέρω απλοποίηση υπάρχοντος μοντέλου της βιβλιογραφίας στοχεύει στην καλύτερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των οπτικών ινών σε μακροχρόνια χρήση και την αντοχή τους σε αστοχίες, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην αξιοπιστία και αποδοτικότητα των δικτύων οπτικών ινών.

Λέξεις κλειδιά: Οπτικές ίνες, χρόνος ζωής, στατική κόπωση, βελτιωμένο μοντέλο, μοντέλο Weibull.

ABSTRACT

The aim of this work is to develop and improve a model that predicts more accurately the lifetime of optical fibers under static stress. Optical fibers are widely used in telecommunications and other high-tech applications, and evaluating their fatigue resistance is critical to their long-term reliability.

This work focuses on improving existing models by analyzing the factors that affect static fatigue, such as fiber microstructure, mechanical properties of materials, and environmental conditions. The approach includes theoretical study, numerical analysis and comparison of the results with experimental data to verify the reliability of the new model.

The improved model, which represents a further simplification of an existing model in the literature, aims to better predict the long-term behavior of optical fibers and their resistance to failure, which could lead to significant improvements in the reliability and efficiency of fiber optic networks

Keywords: Optical fibers, lifetime, static fatigue, improved model, Weibull model.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
ABSTRACT.....	7
Κατάλογος πινάκων.....	10
Κατάλογος διαγραμμάτων & εικόνων	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Τι είναι η οπτική ίνα	12
1.1.1 Τύποι οπτικής ίνας και χαρακτηριστικά	13
1.2 Πώς κατασκευάζεται μία οπτική ίνα.....	15
1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση μιας οπτικής ίνας	18
1.4 Στατική Κόπωση στις Οπτικές Ίνες	19
1.4.1 Φυσικά αίτια και μηχανισμοί.....	19
1.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη στατική κόπωση	19
1.5 Υπάρχοντα Μοντέλα Αξιολόγησης του Χρόνου Ζωής	20
2. Περιγραφή του μοντέλου	22
2.1 Θεωρητική βάση και μαθηματικές εξισώσεις του πρότυπου μοντέλου	22
2.2 Βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου	25
3. Νέο απλοποιημένο μοντέλο χρόνου ζωής στατικής κόπωσης	28
3.1 Παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων	28
3.2 Ανάπτυξη νέου απλοποιημένου μοντέλου	42
3.3 Συγκριτική ανάλυση με το πρότυπο μοντέλο	47
3.4 Μελέτη των βασικών παραμέτρων του μοντέλου	47
4. Συζήτηση.....	52
4.1 Δυνατά και αδύνατα σημεία του νέου απλοποιημένου μοντέλου	52
4.2 Πιθανές εφαρμογές και συνέπειες για τη βιομηχανία των οπτικών ινών	53
5. Συμπεράσματα.....	54
5.1 Κύρια ευρήματα της έρευνας.....	54

5.2	Επίτευξη των στόχων της μελέτης.....	55
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	56
6.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Συγκριτικά χαρακτηριστικά μονότροπης και πολύτροπης οπτικής ίνας.....	15
Πίνακας 2-1: Παράμετροι γενικευμένου μοντέλου.....	24
Πίνακας 3-1: προτεινόμενη μέθοδος και παράμετροι.....	31 & 32
Πίνακας 3-2 Τιμές παραμέτρων Laser-drawn SS-2.....	33
Πίνακας 3-3: Τιμές παραμέτρων Laser-drawn TO-8 clad.....	34
Πίνακας 3-4: Τιμές παραμέτρων Furnace-drawn TO-8 clad.....	35
Πίνακας 3-5: Μέθοδος minimization.....	38 & 39
Πίνακας 3-6: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn SS-2.....	40
Πίνακας 3-7: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn TO-8 clad.....	41
Πίνακας 3-8: Τιμές παραμέτρων minimization Furnace-drawn TO-8 clad.....	42
Πίνακας 3-9: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn SS-2.....	44
Πίνακας 3-10: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn TO-8 clad.....	45
Πίνακας 3-11 Τιμές παραμέτρων minimization Furnace-drawn TO-8clad.....	46

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Καλώδια οπτικών ινών i) Fiber optic cable 96 F/O Flame retardant Βραδύκαυστα 13.5mm $\leq$ $\Delta \leq$ 15.5mm (πράσινο καλώδιο) και χρησιμοποιούνται εντός κτηρίων ii) Mini Fiber optic cable 96 F/O induct dielectric 6mm $\leq$ $\Delta \leq$ 7mm (μαύρο καλώδιο) και χρησιμοποιούνται στα δίκτυα κορμού.....	13
Εικόνα 1-2: Μονότροπη και πολύτροπη οπτική ίνα.....	14
Εικόνα 1-3: Πρόπλασμα.....	16
Εικόνα 1-4: Αριστερά πύργος σχεδίασης και δεξιά εσωτερικό πύργου σχεδίασης.....	17
Εικόνα 1-5: Στάδιο ελέγχου και δοκιμών.....	17
Εικόνα 3-1: Πειραματικά αποτελέσματα πηγής Laser-drawn SS-2 Optical Fibers.....	29
Εικόνα 3-2: Πειραματικά αποτελέσματα πηγής Laser-drawn TO-8 Clad Optical Fibers.....	29
Εικόνα 3-3: Πειραματικά αποτελέσματα πηγής Furnace-drawn TO-8 Clad Optical Fibers.....	30
Εικόνα 3-4: Προτεινόμενοι και πειραματικοί χρόνοι ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn SS-2.....	33
Εικόνα 3-5: Προτεινόμενοι και πειραματικοί χρόνοι ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn TO-8 clad.....	34
Εικόνα 3-6: Προτεινόμενοι και πειραματικοί χρόνοι ζωής υπό διαφορετικές τάσεις για οπτικές ίνες Furnace-drawn TO-8 clad.....	35
Εικόνα 3-7: Αποτελέσματα minimization προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn SS-2.....	40
Εικόνα 3-8: Αποτελέσματα minimization προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn TO-8 clad.....	41
Εικόνα 3-9 Αποτελέσματα minimization προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Furnace-drawn TO-8 clad.....	42
Εικόνα 3-10: Αποτελέσματα minimization σταθεροποιημένων τιμών προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn SS-2.....	43
Εικόνα 3-11: Αποτελέσματα minimization σταθεροποιημένων τιμών προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn TO-8 clad.....	44
Εικόνα 3-12: Αποτελέσματα minimization σταθεροποιημένων τιμών προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Furnace-drawn TO-8 clad.....	45
Εικόνα 3-13: Αύξηση τιμής Α' μετατόπιση καμπυλών προς τα δεξιά.....	48
Εικόνα 3-14: Μείωση τιμής Α' μετατόπιση καμπυλών προς τα αριστερά.....	49
Εικόνα 3-15: Αύξηση τιμής η' πιο απότομες "κάθετες" καμπύλες.....	50
Εικόνα 3-16: Μείωση τιμής η' πιο ευθείες καμπύλες.....	50

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιολόγηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών υπό συνθήκες στατικής κόπωσης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα των σύγχρονων δικτύων επικοινωνίας. Καθώς οι οπτικές ίνες αποτελούν το θεμέλιο της τεχνολογικής υποδομής που υποστηρίζει τη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, η κατανόηση και η πρόβλεψη της αντοχής τους είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη ανθεκτικών δικτύων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αξιολόγησης βασίζονται σε κλασικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη κυρίως μηχανικές τάσεις και εξωτερικούς παράγοντες. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις συχνά αποτυγχάνουν να προβλέψουν με ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά των ινών υπό ποικίλες και δυναμικές συνθήκες.

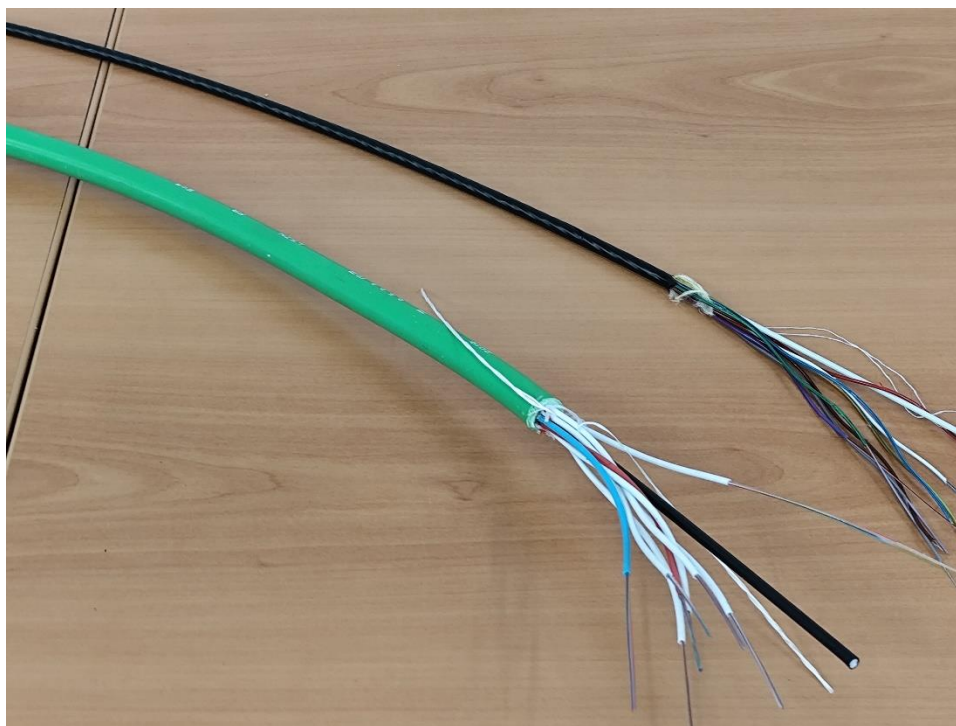
Στην συγκεκριμένη εργασία, προτείνεται ένα βελτιωμένο μοντέλο για την αξιολόγηση του χρόνου ζωής στατικής κόπωσης των οπτικών ινών. Το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει προηγμένες μεθόδους υπολογιστικής ανάλυσης και νέους παράγοντες που δεν είχαν ληφθεί επαρκώς υπόψη στο παρελθόν, όπως η επίδραση μικροδομικών ατελειών και η δυναμική διάδοση μικρορωγμών. Μέσω της χρήσης πειραματικών δεδομένων και προσομοιώσεων, το μοντέλο αυτό στοχεύει να προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη και ακριβή προσέγγιση στην πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των οπτικών ινών, συμβάλλοντας στην αύξηση της αξιοπιστίας και αποδοτικότητας των δικτύων επικοινωνίας.

1.1 Τι είναι η οπτική ίνα

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτά νήματα από πλαστικό ή γυαλί, με διάμετρο μικρότερη των 10 μικρόμετρων (μm), διαμέσου των οποίων μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα υπό μορφή φωτός. Συνήθως τις συναντάμε συγκεντρωμένες σε δέσμες, που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια. Ένα καλώδιο οπτικών ινών αποτελείται από δεκάδες πολύ λεπτές τέτοιες οπτικές ίνες με διάμετρο μικρότερη και από μία ανθρώπινη τρίχα. Ένα σήμα εισάγετε στην οπτική ίνα με λέιζερ και μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου της σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χιλιόμετρα χωρίς ενίσχυση.

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών και επιτρέπουν τη μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με άλλες μορφές μετάδοσης σημάτων, όπως ο χαλκός, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης πλησιάζει αυτή με την οποία

διαδίδεται το φως. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα μεταφέρονται με μικρότερη απώλεια και δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. [1]



Εικόνα 4-1: Καλώδια οπτικών ινών i) Fiber optic cable 96 F/O Flame retardant Βραδύκαυστα $13.5\text{mm} \leq \Delta \leq 15.5\text{mm}$ (πράσινο καλώδιο) και χρησιμοποιούνται εντός κτηρίων ii) Mini Fiber optic cable 96 F/O induct dielectric $6\text{mm} \leq \Delta \leq 7\text{mm}$ (μαύρο καλώδιο) και χρησιμοποιούνται στα δίκτυα κορμού.

1.1.1 Τύποι οπτικής ίνας και χαρακτηριστικά

Οι οπτικές ίνες χωρίζονται κυρίως σε δύο βασικές κατηγορίες: τις μονότροπες (single-mode) και τις πολύτροπες (multi-mode) ίνες. Κάθε τύπος έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και εφαρμογές οι οποίες εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του δικτύου και τις αποστάσεις μετάδοσης δεδομένων. Παρακάτω αναλύουμε κάποια χαρακτηριστικά αυτών. [2]

➤ Μονότροπη ίνα (Single-Mode Fiber - SMF)

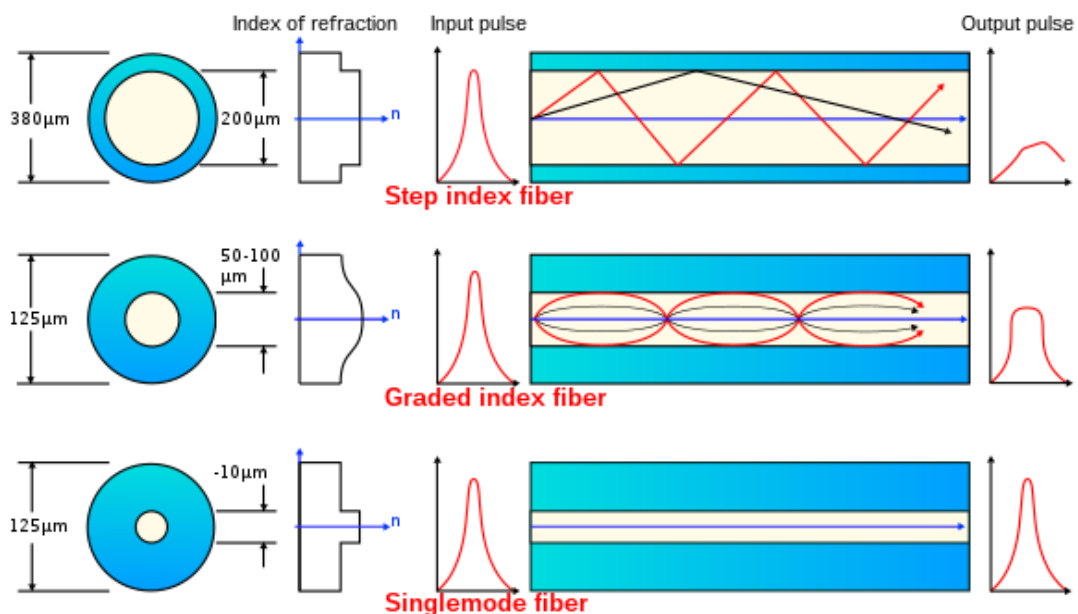
Η μονότροπη ίνα έχει πολύ μικρό πυρήνα, συνήθως διαμέτρου 8-10 μικρόμετρα. Αυτή η διάμετρος επιτρέπει την διέλευση μίας δέσμης φωτός ελαχιστοποιώντας την διασπορά και τις απώλειες. Είναι ιδανική για μεγάλες αποστάσεις όπως σε δίκτυα κορμού και τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις όπου απαιτείται ελάχιστη εξασθένηση του σήματος. Υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και λόγω της μετάδοσης ενός μόνο τρόπου η διασπορά είναι ελάχιστη παρέχοντας καθαρότερο σήμα. Χρησιμοποιεί μήκη κύματος στα 1310nm και 1550nm όπου η εξασθένηση είναι μικρότερη.

➤ Πολύτροπη ίνα (Multimode Fiber - MMF)

Η πολύτροπη ίνα έχει μεγαλύτερο πυρήνα, συνήθως 50 ή 62.5 μικρόμετρα. Αυτή η μεγαλύτερη διάμετρος επιτρέπει την διέλευση πολλών δεσμών φωτός ταυτόχρονα οι οποίες μπορούν να «ταξιδεύουν» μέσω της ίνας υπό διαφορετικές γωνίες.

Είναι κατάλληλη για συνδέσεις μικρών αποστάσεων όπως τοπικά δίκτυα (LAN) ή μέσα σε κτήρια λόγω μεγαλύτερων απωλειών και διασποράς. Είναι φθηνότερη από την μονότροπη ίνα και χρησιμοποιεί πηγές φωτός LED. Λόγο της μεγάλης διασποράς που δημιουργείτε δεν έχουμε τόσο καθαρό σήμα σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιεί μήκη κύματος στα 850nm.

Επίσης επιπλέον τύποι οπτικών ινών είναι με βηματικό (Step-Index Fiber) δείκτη διάθλασης και οι ίνες με κλιμακωτό (Graded-Index Fiber) δείκτη διάθλασης. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούν έναν πυρήνα με σταθερό δείκτη διάθλασης, που περιβάλλεται από ένα υλικό κάλυψης με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης. Η μετάδοση του φωτός γίνεται με απότομες αλλαγές της γωνίας στο σημείο επαφής πυρήνα-κάτοπτρου. Αυτή η κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη διασπορά, καθιστώντας την κατάλληλη κυρίως για πολύτροπες ίνες και εφαρμογές χαμηλού κόστους.



Εικόνα 1-5 Μονότροπη και πολύτροπη οπτική ίνα

Στην δεύτερη περίπτωση η ίνα έχει έναν πυρήνα όπου ο δείκτης διάθλασης μειώνεται σταδιακά από το κέντρο προς την περιφέρεια, δημιουργώντας μια πιο ομαλή διαδρομή για τους πολλούς τρόπους φωτός. Ο σχεδιασμός αυτός μειώνει τη

διασπορά σε σχέση με την βηματικής δείκτης διάθλασης ίνα, βελτιώνοντας την απόδοση της πολύτροπης ίνας για εφαρμογές σε μεσαίες αποστάσεις.

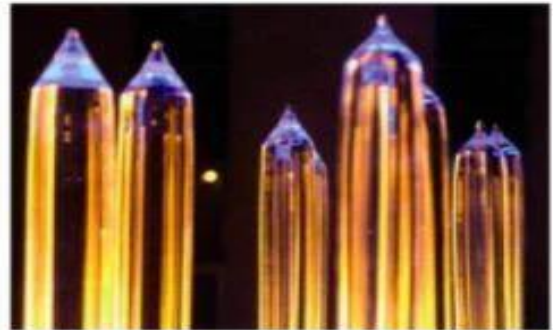
Πίνακας 1-1: Συγκριτικά χαρακτηριστικά μονότροπης και πολύτροπης οπτικής ίνας

Χαρακτηριστικά	Μονότροπη Ίνα (SMF)	Πολύτροπη Ίνα (MMF)
Πυρήνας	8-10 μικρόμετρα	50 ή 62,5 μικρόμετρα
Διασπορά	Χαμηλή	Υψηλή
Απόσταση Μετάδοσης	Μεγάλες αποστάσεις	Σύντομες αποστάσεις
Ρυθμός Μετάδοσης	Πολύ υψηλός	Μέτριος έως υψηλός
Πηγή Φωτός	Laser (ακριβό)	LED
Εφαρμογές	Δίκτυα κορμού, WAN	LAN, ενδοκτιριακά δίκτυα
Κόστος	Υψηλό	Χαμηλότερο από τις SMF

1.2 Πώς κατασκευάζεται μία οπτική ίνα

Η κατασκευή μιας οπτικής ίνας είναι μία σύνθετη διαδικασία υψηλής ακρίβειας που περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η κατασκευή του προπλάσματος ενός μεγάλου κυλινδρικού γυαλιού που αποτελεί την βάση για την οπτική ίνα.

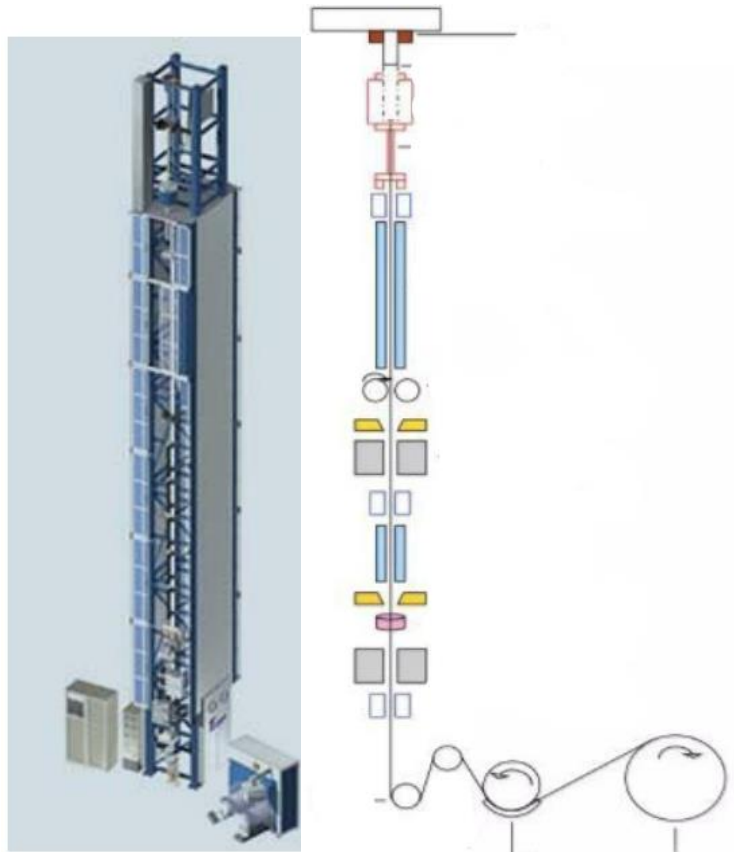
Η διαδικασία της διαμόρφωσης είναι μια χημική ατμοσφαιρική απόθεση MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition), που την ανέπτυξε ο Bell Labs το 1974. Αναμειγνύοντας τετραχλωριούχο πυρίτιο (SiCl_4) και τετραχλωριούχο γερμάνιο (GeCl_4) και θερμαίνοντας σε ένα σωλήνα χαλαζία παράγονται οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του γερμανίου (GeO_2), που εναποτίθενται στα τοιχώματα και παράγονται στρώματα γυαλιού που αντιστοιχούν στον πυρήνα και την επικάλυψη της μελλοντικής ίνας. Το πρόπλασμα είναι διαυγή και έχει τις ίδιες ιδιότητες με την τελική ίνα. [4]



Εικόνα 1-6: Πρόπλασμα

Το δεύτερο στάδιο είναι η τάνυση του προπλάσματος σε μία λεπτή ίνα. Το πρόπλασμα τοποθετείτε σε ένα ειδικό φούρνο που το θερμαίνει σε υψηλή θερμοκρασία συνήθως πάνω από 2000°C . Σε αυτή την θερμοκρασία το πρόπλασμα λιώνει και ρέει προς τα κάτω, σχηματίζοντας μια λεπτή ίνα που τραβιέται συνεχώς με ελεγχόμενο ρυθμό. Η διάμετρος της ίνας ελέγχεται πολύ προσεκτικά κατά την διάρκεια της τάνυσης ώστε να παραμένει στα επιθυμητά επίπεδα τα 125 μικρόμετρα. Κατά τη διάρκεια της τάνυσης, η ίνα περνά μέσα από μια μονάδα επίστρωσης όπου προστίθεται ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς για να προστατεύσει την ίνα από μηχανικές βλάβες και να την καταστήσει ανθεκτική στην υγρασία και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. [3]

Το τρίτο στάδιο είναι ο ποιοτικός έλεγχος. Μετά την κατασκευή της ίνας, ακολουθεί ο ποιοτικός έλεγχος για να διασφαλιστεί ότι η ίνα πληροί τα πρότυπα και τις προδιαγραφές. Ένα στάδιο ελέγχου όπως προαναφέραμε γίνεται κατά την διάρκεια της τάνυσης για την διατήρηση της ακριβούς διαμέτρου της ίνας. Επόμενο είναι ο έλεγχος απώλειας σήματος. Η ίνα δοκιμάζεται μετρίεται η εξασθένηση του φωτός κατά την μετάδοση μέσω αυτής σε όλο το μήκος της. Η εξασθένηση (απώλεια) μετρίεται σε dB/km και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Τέλος η ίνα υπόκειται σε δοκιμές αντοχής για να διασφαλιστεί ότι μπορεί να αντέξει τις μηχανικές τάσεις και καταπονήσεις που μπορεί να προκύψουν κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία. Στην συνέχεια τυλίγεται σε μπομπίνες και είναι έτοιμη για χρήση. [3]



Εικόνα 1-7: Αριστερά πύργος σχεδίασης και δεξιά εσωτερικό πύργου σχεδίασης



Εικόνα 1-8: Στάδιο ελέγχου και δοκιμών

1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση μιας οπτικής ίνας

Η απόδοση μιας οπτικής ίνας μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, που σχετίζονται τόσο με τη φυσική δομή της ίνας όσο και με τις συνθήκες λειτουργίας της. Παρακάτω βλέπουμε και αναλύουμε τις σημαντικότερες αιτίες που αφορούν την απόδοση μιας ίνας όπως:

- Εξασθένηση: Η εξασθένηση αναφέρεται στην απώλεια ισχύος του φωτός καθώς διαδίδεται μέσω της ίνας. Μετριέται σε dB/km και επηρεάζει την απόσταση που μπορεί να καλύψει το σήμα χωρίς ενίσχυση. Βασικοί παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η σκέδαση που προκύπτει από μικρές ανωμαλίες στη δομή του γυαλιού και η μακροχρόνια καταπόνηση που προκύπτει από φυσικές βλάβες ή τριβές κατά την διάρκεια του χρόνου.
- Καμπυλότητα και κάμψεις: Οι απώλειες λόγω καμπυλότητας εμφανίζονται όταν η ίνα κάμπτεται ή λυγίζει, με αποτέλεσμα ένα μέρος του φωτός να διαφεύγει έξω από τον πυρήνα. Κάποια είδη καμπυλότητας όπως μακροκαμπυλότητα που προκαλείται από μεγάλες κάμψεις ή στροφές της ίνας, που δημιουργούν σημαντικές απώλειες σήματος και η μικροκαμπυλότητα που προκαλείται από μικρές ανωμαλίες ή ατέλειες στη δομή της ίνας.
- Μηχανικές τάσεις: Οι μηχανικές τάσεις μπορούν να προκληθούν από εξωτερικές πιέσεις, τριβές ή θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, επηρεάζοντας τη δομή της ίνας. Οι τάσεις μπορούν να προκαλέσουν μικρορωγμές ή παραμορφώσεις, αυξάνοντας την εξασθένηση και σε ακραίες περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσουν σε σπάσιμο της ίνας προκαλώντας κατάρρευση υπηρεσιών.
- Θερμικές μεταβολές: Η απόδοση των οπτικών ινών μπορεί να επηρεαστεί από αλλαγές στη θερμοκρασία, ειδικά σε περιβάλλοντα με ακραίες θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα και της κάλυψης, μεταβάλλοντας τις ιδιότητες μετάδοσης του φωτός. Τέλος η διαστολή και συστολή του υλικού μπορεί να προκαλέσει μικροκαμπυλώσεις και να επηρεάσει την απόδοση.
- Γήρανση: Η γήρανση της ίνας μπορεί να προκληθεί από τη συνεχή καταπόνηση και την έκθεση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία και οι ακτίνες UV με αποτέλεσμα οι ίνες να γίνονται πιο ευαίσθητες

σε μηχανικές βλάβες και μπορεί να εμφανίσουν αυξημένη εξασθένηση ή σπάσιμο με την πάροδο του χρόνου.

- Ατέλειες στην Κατασκευή: Ατέλειες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής όπως μικρορωγμές ή ανωμαλίες στη δομή της ίνας μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη εξασθένηση ή αποτυχία της ίνας.

1.4 Στατική Κόπωση στις Οπτικές Ίνες

Η στατική κόπωση στις οπτικές ίνες είναι ένα σημαντικό φαινόμενο που επηρεάζει τη μακροχρόνια αξιοπιστία και αντοχή των ινών. Η στατική κόπωση αναφέρεται στη σταδιακή μείωση της αντοχής μιας οπτικής ίνας σε μηχανικές καταπονήσεις, όταν υπόκειται σε σταθερά φορτία ή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε ρήξη της ίνας πολύ νωρίτερα από το αναμενόμενο, ακόμα και αν το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι μικρότερο από το όριο θραύσης της ίνας.

1.4.1 Φυσικά αίτια και μηχανισμοί

Η στατική κόπωση προκαλείται κυρίως από την ανάπτυξη μικρορωγμών στην επιφάνεια της οπτικής ίνας. Αυτές οι μικρορωγμές μπορούν να μεγαλώνουν με την πάροδο του χρόνου υπό την επίδραση ενός σταθερού φορτίου ή λόγω της παρουσίας επιβλαβών χημικών ουσιών στο περιβάλλον, όπως η υγρασία.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή της εγκατάστασης της ίνας, μπορεί να δημιουργηθούν μικρορωγμές στην επιφάνεια, που δρουν ως αρχικά σημεία εξασθένησης. Υπό την επίδραση σταθερού μηχανικού φορτίου ή περιβαλλοντικών παραγόντων, αυτές οι μικρορωγμές μπορούν να αρχίσουν να μεγαλώνουν με την πάροδο του χρόνου. Η ανάπτυξη των ρωγμών επιταχύνεται όταν οι ίνες εκτίθενται σε υγρασία ή άλλες χημικές ουσίες, καθώς η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον διευκολύνει την είσοδο αυτών των ουσιών στις ρωγμές, επιδεινώνοντας την κατάστασή τους. Όταν οι ρωγμές φτάσουν σε κρίσιμο μέγεθος, η ίνα σπάει, ακόμα και αν το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι σχετικά μικρό. [12]

1.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη στατική κόπωση

Η παρουσία υγρασίας στο περιβάλλον γύρω από την οπτική ίνα είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που επιταχύνουν τη στατική κόπωση. Η υγρασία μπορεί να διεισδύσει στις μικρορωγμές και να συμβάλει στη διάβρωση της ίνας. Χημικές ουσίες

όπως το χλώριο και το νερό μπορούν να επιταχύνουν τη διάβρωση και την ανάπτυξη των ρωγμών στην ίνα. Αν και οι οπτικές ίνες σχεδιάζονται για να αντέχουν σε συγκεκριμένα μηχανικά φορτία, η παρουσία σταθερού ή επαναλαμβανόμενου φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε στατική κόπωση με την πάροδο του χρόνου. Οι οπτικές ίνες συχνά υποβάλλονται σε σταθερά φορτία λόγω της εγκατάστασής τους (π.χ. κάμψεις ή εντάσεις στις αρθρώσεις) ή σε μεταβαλλόμενα φορτία λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. αιολικές δυνάμεις ή σεισμική δραστηριότητα ή καθίζηση εδάφους). Τα μηχανικά φορτία προκαλούν συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή των μικρορωγμών, αυξάνοντας τον ρυθμό με τον οποίο μεγαλώνουν οι ρωγμές και οδηγώντας τελικά στη θραύση της ίνας. Τέλος οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν την ταχύτητα ανάπτυξης των ρωγμών, καθώς η θερμότητα μπορεί να αυξήσει τη διάβρωση ή να προκαλέσει θερμική καταπόνηση στην ίνα. [5,6]

Για να μειωθεί η επίδραση της στατικής κόπωσης στις οπτικές ίνες, λαμβάνονται διάφορα μέτρα κατά την κατασκευή και την εγκατάσταση. Οι ίνες καλύπτονται με προστατευτικά στρώματα που εμποδίζουν την είσοδο υγρασίας και άλλων χημικών ουσιών και η διαδικασία κατασκευής των οπτικών ινών βελτιστοποιείται ώστε να μειωθούν οι ατέλειες και οι μικρορωγμές που μπορεί να οδηγήσουν σε στατική κόπωση. Οι οπτικές ίνες αποθηκεύονται και μεταφέρονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες για να ελαχιστοποιηθεί η έκθεσή τους σε υγρασία και ακραίες θερμοκρασίες. Τέλος κατά την εγκατάσταση, ο σχεδιασμός του δικτύου λαμβάνει υπόψη τα μηχανικά φορτία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι. [6]

1.5 Υπάρχοντα Μοντέλα Αξιολόγησης του Χρόνου Ζωής

Η αξιολόγηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών υπό στατική κόπωση είναι ένα πεδίο με μεγάλη σημασία για την αντοχή και αξιοπιστία των δικτύων οπτικών ινών. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών, λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς στατικής κόπωσης και τα φυσικά αίτια που την επηρεάζουν. Παρακάτω αναφέρονται κάποια από αυτά:

- Μοντέλο νόμου δύναμης: Χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ταχύτητας ανάπτυξης ρωγμών σε υλικά υπό μηχανική καταπόνηση. Η μαθηματική έκφραση είναι της μορφής:

$$\frac{dc}{dt} = A_1 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^{n_1} \quad (1)$$

όπου c το μέγεθος της ρωγμής εξαρτώμενη από τον χρόνο t , n_1 παράμετρος στατικής κόπωσης, A_1 είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από την θερμοκρασία, K_I

παράγοντας έντασης τάσης και K_{IC} είναι ένας κρίσιμος παράγοντας έντασης τάσης. Συνήθως το n_1 ορίζεται ως υλικό και το A_1 περιέχει όλες τις περιβαλλοντικές τιμές όπως υγρασία, θερμοκρασία και ο τύπος που εκφράζει το K_I είναι

$$K_I = Y * \sigma * c^{1/2} \quad (2)$$

όπου Y είναι ο συντελεστής γεωμετρίας της ρωγμής και σ είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Το μοντέλο του νόμου της δύναμης χρησιμοποιείται ευρέως στη θραύση της οπτικής ίνας λόγω της εύχρηστης μαθηματικής του μορφής και της καλής προσαρμογής του. Η διάρκεια ζωής της ίνας με βάση την αρχική σχέση ξεκινώντας από το K_I και καταλήγοντας στο K_{IC} είναι της μορφής:

$$T = \frac{2 * K_{IC}^2 * \left(\frac{\sigma}{S_i}\right)^{2-n_1}}{A_1 * \sigma^2 * Y^2 * (n_1 - 2)} \quad (3)$$

όπου S_i είναι η αντοχή αδράνειας και εκφράζεται ως $\sigma(K_{IC}/K_{II})$. [7]

- Χημικό κινητικό μοντέλο: σύμφωνα με τον Wiederhorn η τάση που προκαλείτε αντιμετωπίζεται ως αρνητική πίεση και η ενέργεια ενεργοποίησης Q μειώνεται γραμμικά σε σχέση με την τάση. Η μαθηματική σχέση είναι της μορφής:

$$Q = Q_0 - b * \frac{K_I}{K_{IC}} \quad (4)$$

όπου Q αντιπροσωπεύει μια παράμετρο που μειώνεται καθώς αυξάνεται η ένταση των τάσεων, Q_0 είναι η αρχική τιμή του Q όταν δεν εφαρμόζεται καμία ένταση τάσης, b μια σταθερά που καθορίζει πόσο μειώνεται το Q με την αύξηση της έντασης των τάσεων, K_I είναι ένας συντελεστής έντασης τάσης, που μετρά τη συγκέντρωση τάσεων κοντά στην άκρη μιας ρωγμής και K_{IC} είναι η αντοχή στη θραύση, μια ιδιότητα του υλικού που αντιπροσωπεύει την κρίσιμη τιμή του K_I στην οποία μια ρωγμή θα αρχίσει να εξαπλώνεται. Η εκθετική μορφή του μοντέλου είναι της μορφής:

$$\frac{dc}{dt} = A_2 * \exp\left(n_2 * \frac{K_I}{K_{IC}}\right) \quad (5)$$

με A_2 και n_2 να είναι παράμετροι προσαρμογής η διάρκεια ζωής της ίνας να είναι της μορφής [8]:

$$T = \frac{2 * K_{IC}^2 * \left(\frac{\sigma}{S_i} + \frac{1}{n_2}\right) * \exp\left(-n_2 * \frac{\sigma}{S_i}\right)}{A_2 * \sigma^2 * Y^2 * n_2} \quad (6)$$

- Ατομικό κινητικό μοντέλο: σύμφωνα με τον Lawn πρότείνει ένα μοντέλο για την μετάδοση της ρωγμής που είναι της μορφής:

$$Q = Q_0 - e * \left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2 \quad (7)$$

όπου Q αντιπροσωπεύει μια παράμετρο που μειώνεται καθώς αυξάνεται η ένταση των τάσεων, Q_0 η αρχική τιμή του Q όταν η ένταση τάσης είναι μηδενική δηλαδή την στιγμή που δεν έχει εμφανιστεί ρωγμή, e μια σταθερά που καθορίζει πόσο γρήγορα μειώνεται το Q καθώς αυξάνεται το τετράγωνο του λόγου K_I/K_{IC} , K_I συντελεστής έντασης τάσης και K_{IC} είναι η αντοχή στη θραύση, που αντιπροσωπεύει την κρίσιμη τιμή του K_I στην οποία η ρωγμή θα αρχίσει να εξαπλώνεται. Η παρουσία του τετραγώνου σε αυτόν τον λόγο δείχνει ότι η μείωση του Q δεν είναι γραμμική αλλά επιταχυνόμενη. Το μοντέλο δύναμης είναι της μορφής:

$$\frac{dc}{dt} = A_3 * \exp\left(n_3 \left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2\right) \quad (8)$$

με A_3 και n_3 να είναι παράμετροι προσαρμογής η διάρκεια ζωής της ίνας να είναι της μορφής[9]:

$$T = \frac{K_{IC}^2 * \exp\left(-n_3 \left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2\right)}{A_3 * \sigma^2 * Y^2 * n_3} \quad (9)$$

2. Περιγραφή του μοντέλου

Η ανάλυση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών υπό συνθήκες στατικής κόπωσης βασίζεται σε ένα πρότυπο μοντέλο που ενσωματώνει θεμελιώδεις θεωρητικές αρχές και μαθηματικές εξισώσεις. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε και θα αναπτύξουμε την θεωρητική βάση του πρότυπου μοντέλου καθώς και τις μαθηματικές εξισώσεις που βασίστηκε η αρχική μελέτη και τέλος η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου που θα εστιάζει στην προσαρμογή και βελτίωση των σταθερών του μοντέλου ώστε να παρέχει ακριβείς προβλέψεις για τον χρόνο ζωής σε συγκεκριμένες συνθήκες.

2.1 Θεωρητική βάση και μαθηματικές εξισώσεις του πρότυπου μοντέλου

Το θεωρητικό υπόβαθρο του πρότυπου μοντέλου που περιγράφεται στο άρθρο [10] αφορά στη γενίκευση των υφιστάμενων μοντέλων για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των οπτικών ινών υπό συνθήκες στατικής κόπωσης. Συγκεκριμένα, το άρθρο παρουσιάζει τρία βασικά κινητικά μοντέλα που περιγράφουν την ανάπτυξη ρωγμών στις ίνες:

1. **Το εμπειρικό μοντέλο του νόμου της δύναμης (Power Law Model):** Είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο για την περιγραφή της εξάρτησης της ταχύτητας αύξησης των ρωγμών από την ένταση της τάσης στην άκρη της ρωγμής.
2. **Το απλό χημικό κινητικό μοντέλο (Simple Chemical Kinetic Model):** Βασίζεται στη θεωρία της απλής κινητικής, όπου η ενέργεια ενεργοποίησης μειώνεται ανάλογα με την ένταση της τάσης.
3. **Το ατομικό κινητικό μοντέλο (Atomic Kinetic Model):** Λαμβάνει υπόψη τις διαδικασίες θραύσης και ανασύστασης των δεσμών πυριτίου-οξυγόνου, με τη μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης να εξαρτάται τετραγωνικά από την ένταση της τάσης.

Το προτεινόμενο γενικευμένο μοντέλο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των παραπάνω μοντέλων σε μια ενιαία φόρμα, ώστε να περιορίσει την αβεβαιότητα της επιλογής του μοντέλου και να δώσει καλύτερη πρόβλεψη της διάρκειας ζωής υπό διαφορετικές συνθήκες κόπωσης. Η γενίκευση των παραπάνω μοντέλων εκφράζεται ως εξής:

$$T = \frac{2 * K_{IC}^2 * \exp\left(-n'_1 \ln\left(\frac{\sigma}{S_i}\right) - n'_2 \left(\frac{\sigma}{S_i}\right) - n'_3 \left(\frac{\sigma}{S_i}\right)^2\right)}{A' * \sigma^2 * Y^2 * n'} \quad (10)$$

Η παράμετρος n' είναι ένας παράγοντας που ενσωματώνει τις εξαρτήσεις των βασικών μοντέλων (Power Law, Simple Chemical Kinetic, Atomic Kinetic) από την κανονικοποιημένη τάση. Συγκεκριμένα το n' καθορίζει τη συνολική επίδραση της τάσης στον χρόνο ζωής στο πλαίσιο του γενικευμένου μοντέλου. Το n' προκύπτει από τον συνδυασμό των παραγόντων n'_1, n'_2, n'_3 που καθορίζουν την εξάρτηση του χρόνου ζωής από διαφορετικές μορφές της κανονικοποιημένης τάσης όπως:

- n'_1 λογαριθμική εξάρτηση $\ln\left(\frac{\sigma}{S_i}\right)$ και έχει μικρότερη επίδραση σε σύγκριση με το n'_2
- n'_2 γραμμική εξάρτηση $\left(\frac{\sigma}{S_i}\right)$ με πιο σημαντική επίδραση και
- n'_3 τετραγωνική εξάρτηση $\left(\frac{\sigma}{S_i}\right)^2$ που έχει μηδενική επίδραση για τις τιμές stress που εφαρμόζουμε.

Σύμφωνα με τον [πίνακα 2](#) το n' λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές ανάλογα με το αν το γενικευμένο μοντέλο απλοποιείται σε κάποιο από τα τρία βασικά μοντέλα.

Πίνακας 2-1: Παράμετροι γενικευμένου μοντέλου

Παράμετροι Γενικευμένου Μοντέλου	Μοντέλο 1 (Power Law)	Μοντέλο 2 (Chemical)	Μοντέλο 3 (Atomic)
A'	A_1	A_2	A_3
n'	n_1-2	n_2	$2n_3$
n_1'	n_1-2	-	0
n_2'	0	n_2	0
n_3'	0	0	n_3

Η βελτιστοποίηση του γενικευμένου μοντέλου για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των οπτικών ινών επιτεύχθηκε ακολουθώντας μια σειρά βημάτων που περιλαμβάνουν τη χρήση στατιστικών τεχνικών και μαθηματικών εργαλείων για τη μείωση της αβεβαιότητας και τη βελτίωση της ακρίβειας της πρόβλεψης. Εφαρμόζοντας την αθροιστική πιθανότητα αστοχίας που δίνεται από την σχέση

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{T_n}\right)^\beta\right) \quad (11)$$

όπου η παράμετρος «β» θεωρείται σταθερή και εφαρμόζοντας την χρήση μεθόδου μέγιστης πιθανότητας MLE (Maximum Likelihood Estimation) που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$L(\theta) = \prod_{j=1}^N \prod_{k=1}^{N_j} \left(\frac{\beta \left(\frac{T_{jk}}{T_{nj}}\right)^{\beta-1} * e^{-\beta(T_{jk}/T_{nj})}}{T_{nj}} \right) \quad (12)$$

όπου N είναι ο αριθμός επιπέδων τάσης, N_j αριθμός δειγμάτων σε κάθε επίπεδο τάσης, T_{jk} η διάρκεια ζωής του k δείγματος στο j επίπεδο τάσης και T_{nj} η χαρακτηριστική διάρκεια ζωής που υπολογίζεται από το μοντέλο.

Η μέθοδος MLE μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου $\theta=(\beta, A', n', n'_1, n'_2, n'_3)$. Αυτές οι εκτιμήσεις θα ελαχιστοποιούν τις αποκλίσεις μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών δεδομένων. [10]

Έπειτα γίνεται χρήση ελέγχου λόγου πιθανότητας LRT (Likelihood Ratio Test) για να αποφασιστεί αν μπορεί να απλοποιηθεί το μοντέλο αφαιρώντας περιττές παραμέτρους. Η σχέση είναι:

$$L_0 = -2 \ln \left(\frac{L(\hat{\theta}_0)}{L(\hat{\theta}_1)} \right) \quad (13)$$

Όπου θ_0 οι εκτιμήσεις παραμέτρων υπό τη μηδενική υπόθεση (απλοποιημένο μοντέλο) και θ_1 οι εκτιμήσεις παραμέτρων υπό την εναλλακτική υπόθεση (πλήρες μοντέλο). [10]

Τέλος χρησιμοποιείτε το κριτήριο AIC (Akaike Information Criterion) για την επιλογή του καλύτερου μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την καλή προσαρμογή στα δεδομένα όσο και την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Ο τύπος είναι:

$$AIC = -2 \ln L(\hat{\theta}) + 2p \quad (14)$$

Όπου p ο αριθμός παραμέτρων του μοντέλου. Το μοντέλο με το χαμηλότερο AIC θεωρείται το καλύτερο, επειδή επιτυγχάνει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας πρόβλεψης και απλότητας. [10]

2.2 Βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου

Η μαθηματική σχέση του μοντέλου βασίζεται στην κατανομή Weibull και περιγράφει την πιθανότητα αποτυχίας μιας ίνας υπό καταπόνηση με βάση τον χρόνο ζωής της και τις παραμέτρους του υλικού. Το μοντέλο υπολογίζει το χρόνο ζωής T_n μιας ίνας όταν αυτή υποβάλλεται σε συγκεκριμένη καταπόνηση σ . Ο υπολογισμός του T_n περιλαμβάνει τις παραμέτρους αντοχής και τις ιδιότητες της ίνας και δίνεται από την εξής σχέση:

$$T_n = \frac{2 * K_{IC}^2 * \exp \left(-n'_1 \ln \left(\frac{\sigma}{S_i} \right) - n'_2 \left(\frac{\sigma}{S_i} \right) - n'_3 \left(\frac{\sigma}{S_i} \right)^2 \right)}{A' * \sigma^2 * Y^2 * n'} \quad (15)$$

Όπου: K_{IC} είναι ο συντελεστής έντασης της κρίσιμης καταπόνησης, S_i η αντοχή του υλικού, Y ο συντελεστής της ρωγμής, A παράγοντας Weibull, n' παράμετρος μορφής της κατανομής Weibull, n'_1, n'_2, n'_3 είναι σταθεροί συντελεστές που σχετίζονται με την κατανομή των τάσεων στην ίνα και σ το επίπεδο καταπόνησης.

Επίσης η πιθανότητα αποτυχίας $F(t)$ δίνεται από την εξής σχέση Weibull για έναν συγκεκριμένο χρόνο t . Η σχέση αυτή αναπαριστά την πιθανότητα αποτυχίας ως συνάρτηση του χρόνου t και του υπολογισμένου χρόνου ζωής T_n .

$$F(t) = \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{T_n} \right)^{n'} \right) \right) * 100 \quad (16)$$

όπου n' είναι η παράμετρος μορφής, που καθορίζει τη συμπεριφορά της καμπύλης Weibull δηλαδή πόσο απότομη ή επίπεδη είναι η καμπύλη και T_n ο χρόνος

ζωής της ίνας σε λεπτά για την δεδομένη καταπόνηση. Η συνάρτηση Weibull χρησιμοποιείται για να περιγράψει την πιθανότητα αποτυχίας στον χρόνο t , με βάση την οποία το μοντέλο προβλέπει τη διάρκεια ζωής της ίνας.

Αντικαθιστώντας το « β » της κατανομής Weibull με το n' , προσφέρονται τα παρακάτω οφέλη:

- Ενσωμάτωση του φυσικού μηχανισμού στο μοντέλο. Η παράμετρος n' προέρχεται από το γενικευμένο μοντέλο ζωής, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη φυσική δυναμική της ανάπτυξης των ρωγμών. Η ενσωμάτωση του στη συνάρτηση κατανομής αποτυχίας $F(t)$ συνδέει άμεσα τη στατιστική πρόβλεψη με τους φυσικούς μηχανισμούς φθοράς και κόπωσης του υλικού. Έτσι το μοντέλο αποκτά ισχυρότερο φυσικό υπόβαθρο σε σύγκριση με την χρήση της σταθεράς « β », που είναι καθαρά στατιστικός παράγοντας. Επίσης επηρεάζει την κλίση της χαρακτηριστικής θραύσης.
- Μείωση της αβεβαιότητας. Το n' είναι αποτέλεσμα της προσαρμογής του γενικευμένου μοντέλου στις πραγματικές συνθήκες τάσης και περιβάλλοντος. Η χρήση του αντί για το σταθερά « β » μειώνει την αβεβαιότητα που προκύπτει από την απλοποίηση ή από μη ρεαλιστικές παραδοχές στα δεδομένα. Παρέχει μια πιο ακριβή περιγραφή της διασποράς και της κατανομής των χρόνων ζωής των οπτικών ινών.
- Ευελιξία. Το n' είναι δυναμικό και μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά δεδομένα ή περιβάλλοντα, αντανakλώντας τις διαφορετικές συμπεριφορές κόπωσης και ανάπτυξης ρωγμών. Αντίθετα η σταθερά β επιβάλλει περιορισμούς καθώς θεωρείται σταθερή για όλες τις συνθήκες.
- Καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα. Το n' επιτρέπει στο μοντέλο να ταιριάζει καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα που περιλαμβάνουν διαφορετικά επίπεδα τάσης και περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτό βελτιώνει την ακρίβεια της πρόβλεψης για την πιθανότητα αποτυχίας $F(t)$, ειδικά για τις χαμηλές τάσεις όπου τα μοντέλα στατικής κόπωσης έχουν μεγαλύτερη σημασία. Επίσης το n' περιλαμβάνει στοιχεία από τα τρία διαφορετικά μοντέλα (Power Law, Simple Chemical Kinetic, Atomic Kinetic) και επομένως προσφέρει μια πιο ενοποιημένη προσέγγιση. Έτσι το $F(t)$ γίνεται πιο γενικό και εφαρμόσιμο σε διάφορες καταστάσεις.
- Ρεαλιστική πρόβλεψη. Η δυναμική χρήση του n' οδηγεί σε πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις για την πιθανότητα αποτυχίας των οπτικών ινών με βάση τη

φυσική συμπεριφορά τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία όπως οι τηλεπικοινωνίες.

Συνεπώς η αντικατάσταση της μεταβλητής β με το n' στη συνάρτηση κατανομής $F(t)$ ενισχύει τη σύνδεση το στατιστικού μοντέλου με την φυσική πραγματικότητα, μειώνει την αβεβαιότητα και προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια στις προβλέψεις. Επιπλέον, επιτρέπει την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στις συγκεκριμένες συνθήκες των οπτικών ινών, καθιστώντας το πιο κατάλληλο για πρακτικές εφαρμογές.

3. Νέο απλοποιημένο μοντέλο χρόνου ζωής στατικής κόπωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα δεδομένα στατικής κόπωσης οπτικών ινών τόσο από το [11] αλλά και από το γενικευμένο μοντέλο στο [10] ώστε να καταδειχθεί η εγκυρότητα του βελτιωμένου μοντέλου διάρκειας ζωής αλλά και την απλοποίηση του μοντέλου. Τα δεδομένα προέκυψαν από την δοκιμή στατικής κόπωσης κατά την οποία εφαρμόστηκαν διάφορες σταθερές τάσεις υψηλότερες από την κανονική λειτουργία τους. Η έρευνα θα διεξαχθεί σε τρεις διαφορετικούς τύπους οπτικών ινών για κάθε τάση γεγονός που θα επαληθεύσει την κατανομή Weibull για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των οπτικών ινών.

3.1 Παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εξαγωγή των δεδομένων (data extraction) από την πηγή [10] όπως φαίνονται παρακάτω στις εικόνες 6,7 και 8 με το πορτοκαλί περίγραμμα, στη συνέχεια τα δεδομένα μετατράπηκαν σε double log reciprocal μορφή, εφαρμόζοντας τον κατάλληλο μαθηματικό μετασχηματισμό. Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε το Octab για την ανάπτυξη του απαραίτητου κώδικα που εκτελεί τις υπολογιστικές διαδικασίες, όπως την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση των δεδομένων. Ο κώδικας αναπτύχθηκε για να προσαρμόσει τα δεδομένα σε συγκεκριμένες μαθηματικές συναρτήσεις, επιτρέποντας τον υπολογισμό των παραμέτρων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

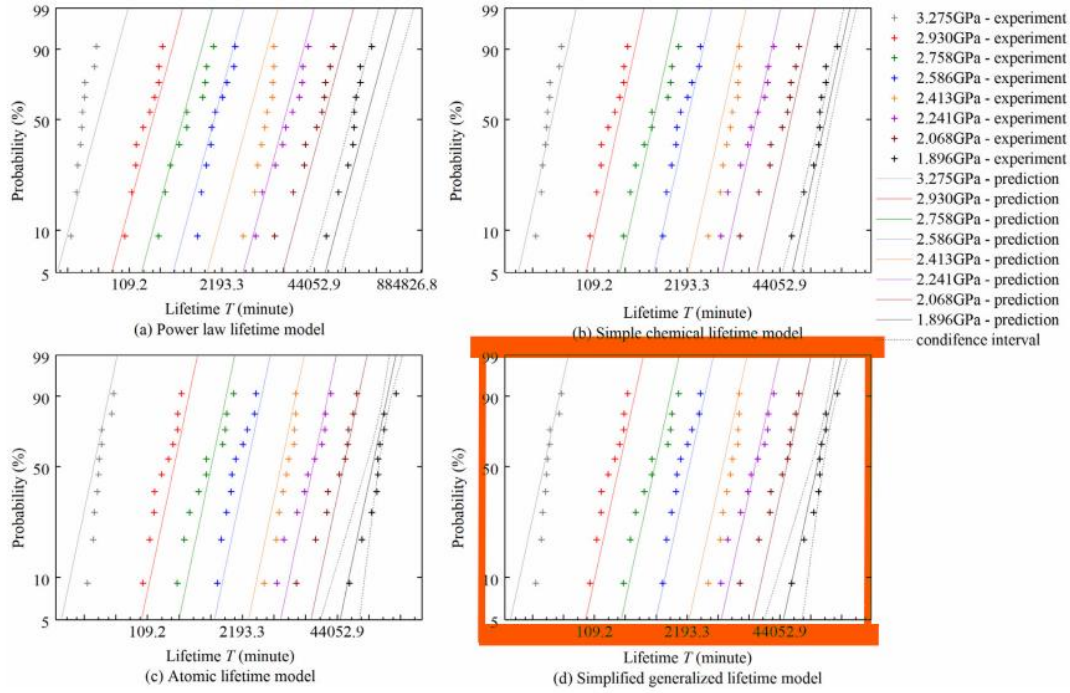


Fig. 1. Predicted and experimental lifetimes of four models under different stresses for laser-drawn SS-2 optical fibers.

Εικόνα 3-1: Πειραματικά αποτελέσματα πηγής Laser-drawn SS-2 Optical Fibers

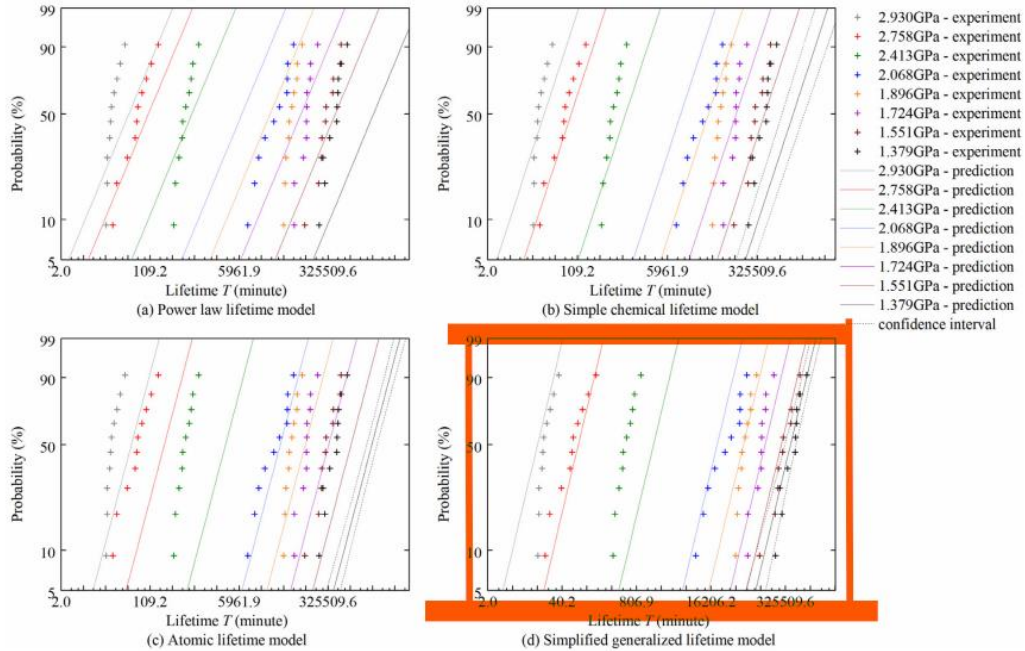


Fig. 2. Predicted and experimental lifetimes of four models under different stresses for laser-drawn TO-8 clad optical fibers.

Εικόνα 3-2: Πειραματικά αποτελέσματα πηγής Laser-drawn TO-8 Clad Optical Fibers

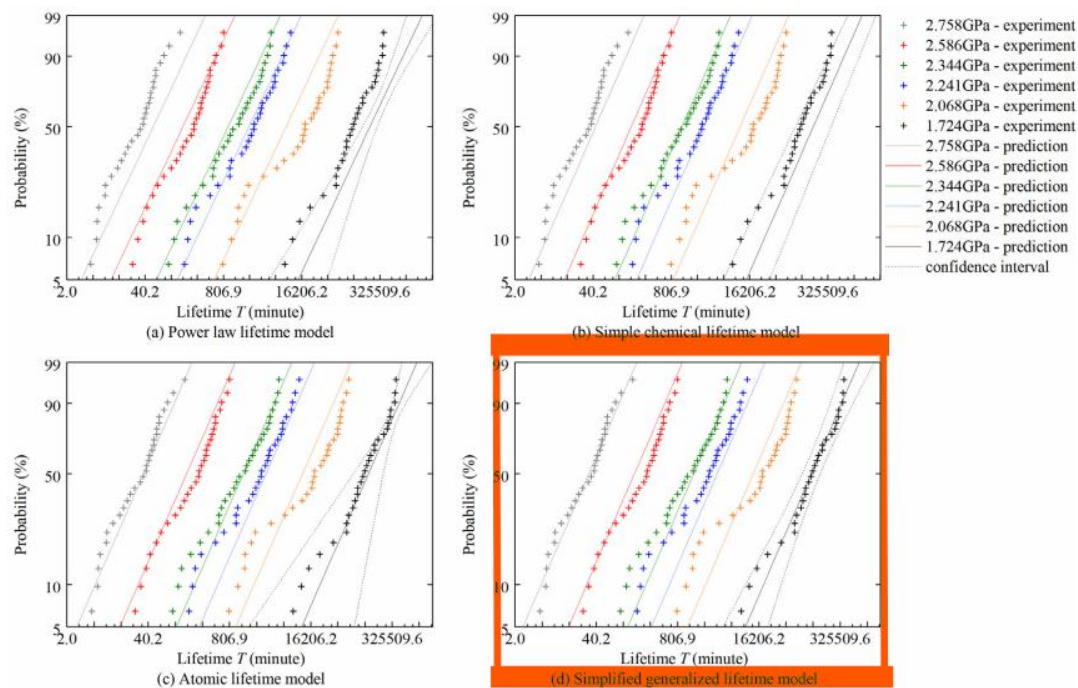


Fig. 3. Predicted and experimental lifetimes of four models under different stresses for furnace-drawn TO-8 clad optical fibers.

Εικόνα 3-3: Πειραματικά αποτελέσματα πηγής Furnace-drawn TO-8 Clad Optical Fibers

Το πείραμα αποτελείται από δύο διακριτά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, εφαρμόστηκαν χειροκίνητα τιμές που προσεγγίζουν αυτές της πηγής [10], με σκοπό την αρχική εκτίμηση των παραμέτρων του συστήματος. Στο δεύτερο στάδιο, υλοποιήθηκε μια διαδικασία ελαχιστοποίησης (minimization) με χρήση αριθμητικών μεθόδων και βελτιστοποιητικών αλγορίθμων, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων. Η διαδικασία αυτή οδήγησε σε βελτιστοποιημένες τιμές, οι οποίες ελαχιστοποιούν τη διαφορά μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των θεωρητικά υπολογισμένων τιμών, εξασφαλίζοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Τα πειράματα για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των οπτικών ινών υπό στατική κόπωση πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικούς τύπους οπτικών ινών:

- Laser-drawn SS-2 Optical Fibers: Οι ίνες SS-2 είναι οπτικές ίνες που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο του laser-drawing. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες 90% σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας 32,6°C, με εφαρμογή στατικών τάσεων που κυμαίνονταν από 1,896 GPa έως 3,275 GPa.
- Laser-drawn TO-8 Clad Optical Fibers: Οι οπτικές ίνες TO-8 κατασκευάστηκαν επίσης με τη μέθοδο του laser-drawing και δοκιμάστηκαν σε παρόμοιες

συνθήκες 90% σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας 32,6°C, με εφαρμογή στατικών τάσεων από 1,379 GPa έως 3,275 GPa.

- Furnace-drawn TO-8 Clad Optical Fibers: Σε αυτή την περίπτωση, οι ίνες TO-8 κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο furnace-drawing (δηλαδή χρήση φούρνου για τη σχεδίαση των ινών) και δοκιμάστηκαν με στατικές τάσεις από 1,724 GPa έως 2,758 GPa.[10]

Και στις τρεις περιπτώσεις κάποιοι συντελεστές παραμένουν σταθεροί όπως η αντοχή αδράνειας $S_i = 5.0334 \text{ GPa}$, ο συντελεστής γεωμετρίας ρωγμής $Y = 1.16$ και ο κρίσιμος συντελεστής έντασης καταπόνησης $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μέθοδο από το κεφάλαιο 2.2 όπως φαίνεται στον [πίνακα 3](#) παραθέτουμε τα αποτελέσματα για κάθε σύνολο στις παρακάτω [εικόνες 9,10 και 11](#) ενώ οι τιμές απεικονίζονται στους [πίνακες 4,5 και 6](#). Οι τιμές με έντονο χρώμα είναι αυτές που προσεγγίζουν πιο πολύ τα πειραματικά αποτελέσματα.

Πίνακας 3-1: προτεινόμενη μέθοδος και παράμετροι

% Παράμετροι κοινοί για όλες τις τιμές του stress	
$K_{IC} = [0.75 * 10^6, 0.75 * 10^6, 0.75 * 10^6];$	% Critical stress ($0.75 * 10^6$)
intensity factor σε $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$	
$S_i = [5.0334 * 10^9, 5.0334 * 10^9, 5.0334 * 10^9];$	% Inert strength σε Pa ($5.0334 * 10^9$)
$Y = [1.16, 1.16, 1.16];$	% Crack geometry factor (1.16)
$A_{\text{prime}} = [\exp(-62.3404), \exp(-88.8488), \exp(-90.2392)];$ % $\exp(-91.2392)$ όπως αναφέρεται στο paper	
$n_{\text{prime}} = [2.5660, 1.8593, 1.8908];$	% Weibull shape parameter
% Συντελεστές της γενικευμένης εξίσωσης	
$n1_{\text{prime}} = [-9.7713, -24.3822, -25.0939];$	
$n2_{\text{prime}} = [57.1385, 87.0488, 91.6833];$	
$n3_{\text{prime}} = [0, 0, 0];$	
% Δημιουργία νέου σχήματος	

```

% Υπολογισμός lifetime (T_eta) για την τρέχουσα τιμή stress

sigma= @(x) stress_values(x);

T_eta1 = @(x) (2 .* K_IC(1).^2 .* exp(-n1_prime(1) .* log(sigma(x)/S_i(1)) -
n2_prime(1) .* (sigma(x)./S_i(1)) - n3_prime(1) .* (sigma(x)./S_i(1))^2)) ./ ...
(A_prime(1) .* sigma(x).^2 * Y(1).^2 .* n_prime(1));

T_eta2 = @(x) (2 .* K_IC(2).^2 .* exp(-n1_prime(2) .* log(sigma(x)/S_i(2)) -
n2_prime(2) .* (sigma(x)./S_i(2)) - n3_prime(2) .* (sigma(x)./S_i(2))^2)) ./ ...
(A_prime(2) .* sigma(x).^2 * Y(2).^2 .* n_prime(2));

T_eta3 = @(x) (2 .* K_IC(3).^2 .* exp(-n1_prime(3) .* log(sigma(x)/S_i(3)) -
n2_prime(3) .* (sigma(x)./S_i(3)) - n3_prime(3) .* (sigma(x)./S_i(3))^2)) ./ ...
(A_prime(3) .* sigma(x).^2 * Y(3).^2 .* n_prime(3));

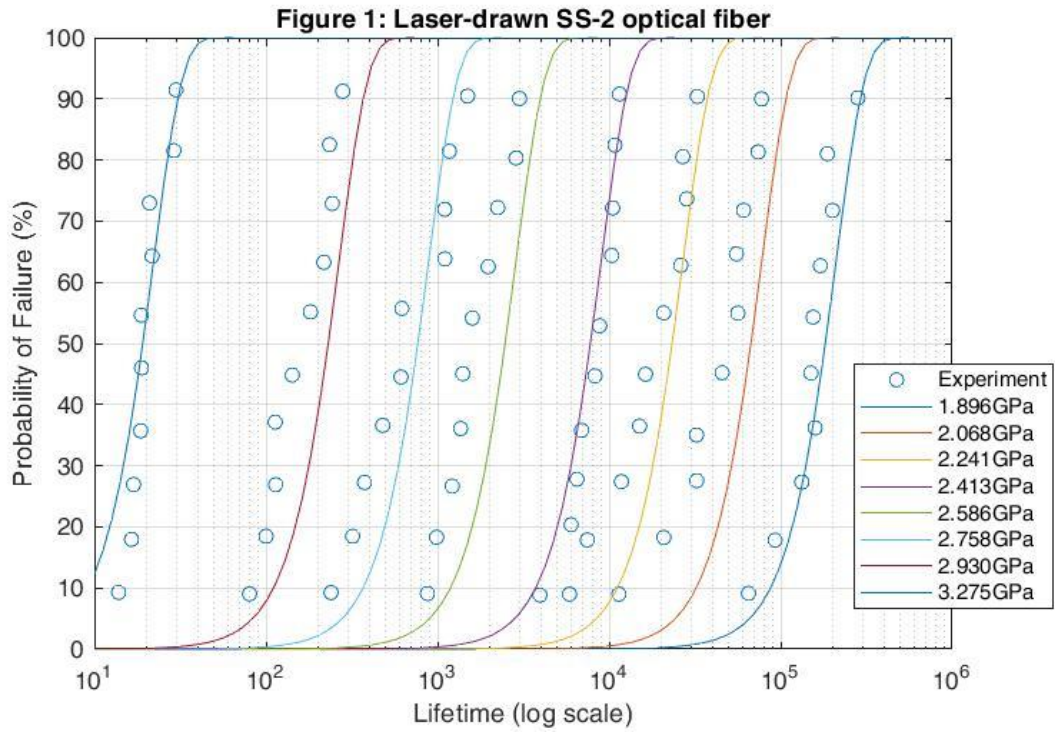
% Υπολογισμός Weibull πιθανότητας αποτυχίας για την τρέχουσα τιμή stress

F_t1 = @(x) (1 - exp(-(t ./ (T_eta1(x) ./ 60)).^n_prime(1)))*100; % Μετατροπή
του lifetime σε λεπτά

F_t2 = @(x) (1 - exp(-(t ./ (T_eta2(x) ./ 60)).^n_prime(2)))*100; % Μετατροπή
του lifetime σε λεπτά

F_t3 = @(x) (1 - exp(-(t ./ (T_eta3(x) ./ 60)).^n_prime(3)))*100; % Μετατροπή
του lifetime σε λεπτά

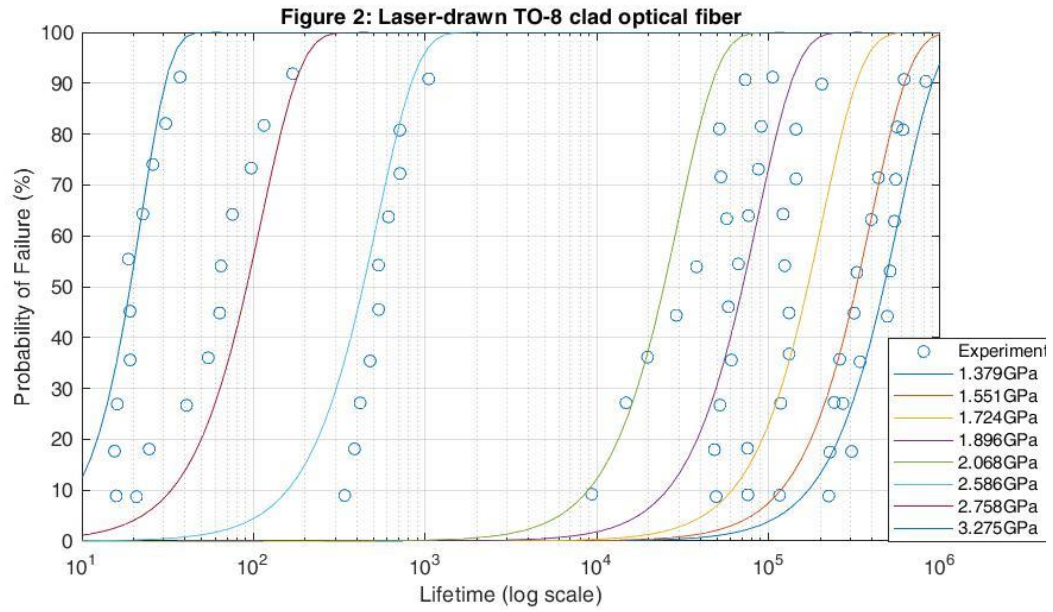
```



Εικόνα 3-4: Προτεινόμενοι και πειραματικοί χρόνοι ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn SS-2

Πίνακας 3-2 Τιμές παραμέτρων Laser-drawn SS-2

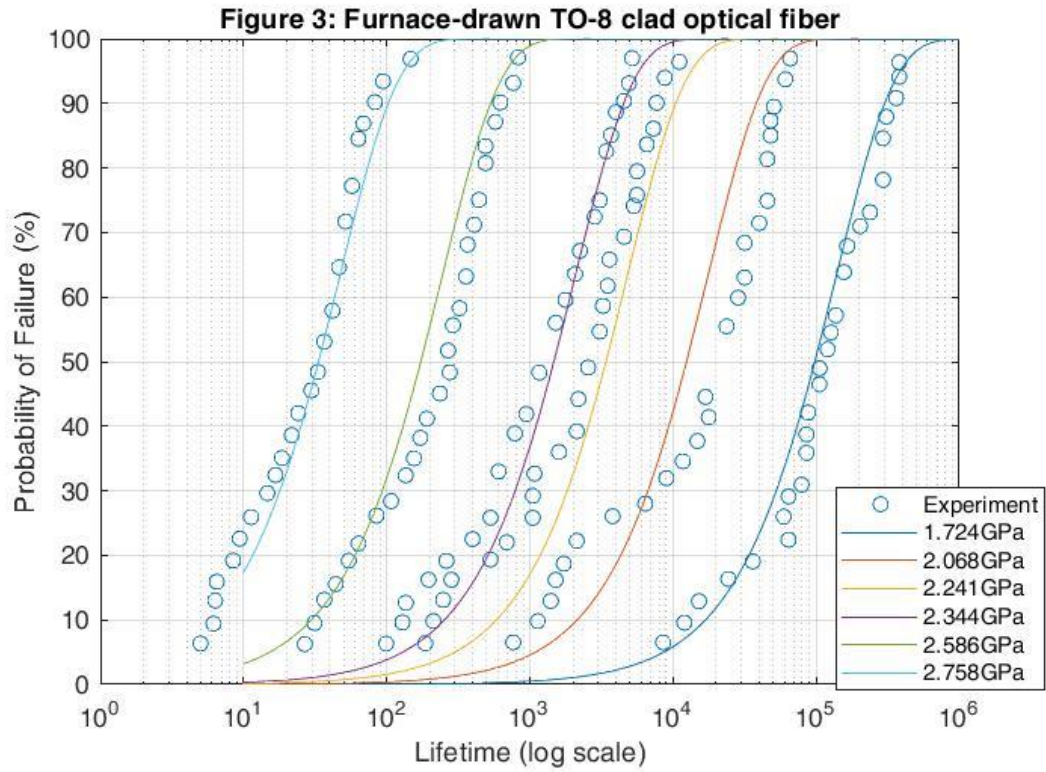
A-prime	n-prime	n1-prime	n2-prime	n3-prime
-60.5404	2.5660	-9.7713	48.9385	0
-60.5030	2.5660	-9.7709	48.9376	0
-60.8030	2.5660	-9.7709	48.9376	0
-62.3404	2.5660	-9.7713	48.9385	0
-32.6808	2.5650	-2.0984	0	24.7272
-38.5711	2.5440	-1	0	28.9429



Εικόνα 3-5: Προτεινόμενοι και πειραματικοί χρόνοι ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn TO-8 clad

Πίνακας 3-3: Τιμές παραμέτρων Laser-drawn TO-8 clad

A-prime	n-prime	n1-prime	n2-prime	n3-prime
-88.2392	1.8593	-24.3822	87.8221	0
-88.2392	2.3593	-24.3822	87.8221	0
-87.8221	1.8593	-24.3822	87.8221	0
-48.4841	1.8364	-6.7056	0	54.4795
-91.2392	1.8593	-24.3822	87.8221	0



Εικόνα 3-6: Προτεινόμενοι και πειραματικοί χρόνοι ζωής υπό διαφορετικές τάσεις για οπτικές ίνες
Furnace-drawn TO-8 clad

Πίνακας 3-4: Τιμές παραμέτρων Furnace-drawn TO-8 clad

A-prime	n-prime	n1-prime	n2-prime	n3-prime
-87.8221	1.0706	-25.0939	91.6833	0
-89.6701	1.0706	-25.0939	91.6833	0
-89.3701	1.0706	-25.0939	91.6833	0
-87.8221	1.0706	-25.0939	91.6833	0.05
-92.0701	1.0706	-25.0951	92.7861	0
-93.6544	1.0706	-25.0939	92.7833	0
-39.7567	1.0568	0	0	40.2123
-35.7567	1.0568	0	0	40.2123

Στο δεύτερο στάδιο, υλοποιούμε την διαδικασία ελαχιστοποίησης (minimization). Το κομμάτι αυτό του πειράματος σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση συναρτήσεων κόστους με τη χρήση της συνάρτησης **fmincon**.

Η συνάρτηση **fmincon** είναι ένα εργαλείο γενικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείτε για την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών υπό περιορισμούς. Ένας από τους πιο αποδοτικούς αλγόριθμους που υποστηρίζει είναι ο *interior-point*, ο οποίος είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για προβλήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών ή περιορισμών. Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί σταδιακά, μειώνοντας την λύση μέσα στον εφικτό χώρο (feasible region) αντί να φθάσει απευθείας στα όρια των περιορισμών. Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιεί μία «φραγμένη» συνάρτηση που θα αποτρέπει την λύση να βρεθεί εκτός του εφικτού χώρου. [15]

Ο αλγόριθμος βασίζεται στις συνθήκες **Karush-Kuhn-Tucker (KKT)** [13], οι οποίες αποτελούν την γενίκευση των συνθηκών Lagrange για προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Οι KKT συνθήκες είναι απαραίτητες (και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις επαρκείς) για την εύρεση τοπικών βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Συνθήκες στασιμότητας. Η συνάρτηση στόχος και οι περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούν τις παραγώγους πρώτης τάξης, ώστε να μην υπάρχουν περαιτέρω κατευθύνσεις που μπορούν να βελτιώσουν τη λύση.
- Συνθήκη σκοπιμότητας (feasibility). Η λύση πρέπει να βρίσκεται μέσα στον εφικτό χώρο που ορίζεται από τους περιορισμούς.
- Συνθήκη πολλαπλασιαστών (Lagrange multipliers). Οι πολλαπλασιαστές πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως μη αρνητικότητα για ανισοτικούς περιορισμούς.
- Συμπληρωματικότητα. Οι περιορισμοί που δεν είναι ενεργοί (δηλαδή δεν ισχύουν ως ισότητες) δεν επηρεάζουν τη λύση.

Ο αλγόριθμος *interior-point* χρησιμοποιεί αυτές τις συνθήκες για να διασφαλίσει την βέλτιστη λύση μέσω ενός επαναληπτικού (iterative) μηχανισμού. Κατά την διάρκεια κάθε επανάληψης:

- Υπολογίζεται μια διόρθωση στη λύση που μειώνει την τιμή της συνάρτησης στόχου.

- Ενημερώνονται οι πολλαπλασιαστές Lagrange, που σχετίζονται με τους περιορισμούς.
- Διασφαλίζεται ότι η λύση παραμένει μέσα στον εφικτό χώρο μέσω της «φραγμένης» συνάρτησης.

Η «φραγμένη» συνάρτηση ενσωματώνει τους περιορισμούς απευθείας στη συνάρτηση στόχο, «τιμωρώντας» τις λύσεις που πλησιάζουν τα όρια ή παραβιάζουν περιορισμούς. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος αποφεύγει να μετακινηθεί εκτός του εφικτού χώρου κατά τη διάρκεια των ενδιάμεσων επαναλήψεων.

Επιπλέον ο αλγόριθμος interior-point χρησιμοποιεί την μέθοδο Newton ή τροποποιήσεις της για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που προκύπτει από τις KKT συνθήκες. Αυτό εξασφαλίζει ταχεία σύγκλιση, ειδικά κοντά στη βέλτιστη λύση. Η ακρίβεια και η σταθερότητα αυτής της μεθόδου ενισχύονται μέσω στρατηγικών όπως η προσαρμοστική επιλογή των βημάτων και η χρήση προσεγγιστικών λύσεων στις πρώτες επαναλήψεις.^[14]

Η προσέγγιση του interior-point είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε προβλήματα με εκατοντάδες ή χιλιάδες μεταβλητές και περιορισμούς, καθώς αποφεύγει τη διαχείριση των περιορισμών ξεχωριστά, ενσωματώνοντάς τους στο ίδιο το πρόβλημα. Οι συνθήκες KKT παρέχουν ένα θεωρητικό πλαίσιο που εγγυάται τη σύγκλιση του αλγορίθμου σε τοπικά βέλτιστη λύση, εφόσον το πρόβλημα είναι καλά ορισμένο και οι απαραίτητες συνθήκες ομαλότητας ικανοποιούνται.

Η βαρύτητα (weight) στους αλγόριθμους ελαχιστοποίησης χρησιμοποιείται για να δοθεί διαφορετική σημασία ή προτεραιότητα σε συγκεκριμένα δεδομένα κατά την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Στην περίπτωση μας, η βαρύτητα εφαρμόζεται στα σφάλματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων και των προβλέψεων του μοντέλου. Μεγαλύτερη βαρύτητα αποδίδεται σε δεδομένα που είναι πιο αξιόπιστα ή κρίσιμα, όπως χαμηλές πιθανότητες αποτυχίας, ενώ δεδομένα με υψηλότερο θόρυβο ή λιγότερη ακρίβεια λαμβάνουν μικρότερη βαρύτητα ώστε να μην επηρεάζουν δυσανάλογα το αποτέλεσμα. Αυτή η διαδικασία επηρεάζει τον τρόπο που το μοντέλο προσαρμόζεται, αναγκάζοντάς το να επικεντρώνεται περισσότερο στις περιοχές δεδομένων με μεγαλύτερη βαρύτητα, μειώνοντας τα αντίστοιχα σφάλματα. Παράλληλα, βοηθά στην αποφυγή υποεκτίμησης των σφαλμάτων σε κρίσιμες περιοχές, όπως αυτές με χαμηλές πιθανότητες αποτυχίας. Συνολικά, η βαρύτητα εισάγεται στη συνάρτηση κόστους ως πολλαπλασιαστής των διαφορών (σφαλμάτων) μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προβλέψεων του μοντέλου, εξασφαλίζοντας καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στις κρίσιμες περιοχές.

Ο κώδικας προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει συναρτήσεις κόστους. Αυτές οι συναρτήσεις μετρούν τη διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων δεδομένων (y_i) [10] και του μοντέλου ($F(t)$) που αναπτύξαμε στο κεφάλαιο 2.2, με κάποιες παραμέτρους βελτιστοποίησης. Στόχος είναι να προσαρμοστούν οι παράμετροι του μοντέλου για να ταιριάζει όσο το δυνατόν καλύτερα στα δεδομένα.

Η συνάρτηση στόχου είναι ένα άθροισμα διαφορών μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και της υπολογιζόμενης τιμής από το μοντέλο. Η μαθηματική της μορφή είναι:

$$f(p) = \sum_{i=1}^N weight_i * ||y_i| - |F_t(x_i, p)|| \quad (17)$$

Όπου: N το πλήθος των δεδομένων, p οι παράμετροι του μοντέλου, y_i Η τιμή-“στόχος” από τα δεδομένα, x_i η είσοδος για το μοντέλο, $F_t(x_i, p)$ το αποτέλεσμα του μοντέλου για δεδομένα x_i και παραμέτρους p και $weight_i$ ο συντελεστής βαρύτητας που πολλαπλασιάζει το σφάλμα κάθε σημείου.

Η συνάρτηση χρησιμοποιεί απόλυτες τιμές τόσο για τα παρατηρούμενα δεδομένα (y_i) όσο και για το μοντέλο ($F_t(x_i, p)$). Το απόλυτο σφάλμα αφαιρεί τη σημασία του πρόσημου. Έτσι, συγκρίνουμε μόνο τα απόλυτα μεγέθη των τιμών, κάτι που είναι χρήσιμο σε δεδομένα με θετικές και αρνητικές τιμές.

Η σχέση ($||y_i| - |F_t(x_i, p)||$) υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ του μεγέθους της παρατήρησης από τα δεδομένα (y_i) και του μεγέθους της υπολογισμένης τιμής (F_t) από το μοντέλο, ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί αυτή η διαφορά σε όλα τα δεδομένα. Τέλος ο κάθε όρος πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή βαρύτητας $weight_i$. Αυτό σημαίνει ότι κάποια δεδομένα μπορούν να έχουν μεγαλύτερη σημασία στη συνολική ελαχιστοποίηση της συνάρτησης.

Εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μέθοδο από την [εξίσωση 17](#) όπως φαίνεται στον [πίνακα 7](#) παραθέτουμε τα αποτελέσματα για κάθε σύνολο στις παρακάτω [εικόνες 12,13 και 14](#) ενώ οι τιμές απεικονίζονται στους [πίνακες 8,9 και 10](#) και είναι στην πρώτη γραμμή. Στις γραφικές παραστάσεις η καμπύλη εμφανίζεται με διακεκομμένη μαύρη γραμμή.

Πίνακας 3-5: Μέθοδος *minimization*

```
%βάρος ελαχιστοποίησης ώστε τα σημεία με χαμηλές τιμές να μην υποεκτιμούνται
weight_reg_1=[5;5;4;4;3;3;2;2;1;1];

%Συνάρτηση ελαχιστοποίησης του σχήματος 1
func_min = @(optParams)...
```

```

sum(abs(abs(yfig1n(16))-
abs(F_t1(4,xfig1n(15),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),opt
Params(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

sum(abs(abs(yfig1n(14))-
abs(F_t1(5,xfig1n(13),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),opt
Params(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

sum(abs(abs(yfig1n(12))-
abs(F_t1(6,xfig1n(11),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),opt
Params(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

sum(abs(abs(yfig1n(10))-
abs(F_t1(8,xfig1n(9),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),optP
arams(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

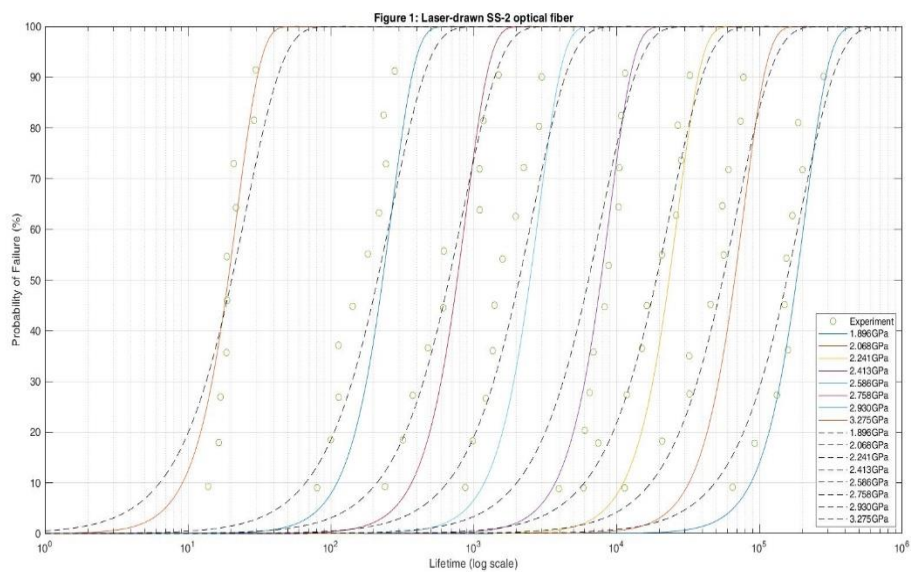
sum(abs(abs(yfig1n(8))-
abs(F_t1(9,xfig1n(7),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),optP
arams(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

sum(abs(abs(yfig1n(6))-
abs(F_t1(10,xfig1n(5),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),opt
Params(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

sum(abs(abs(yfig1n(4))-
abs(F_t1(11,xfig1n(3),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),opt
Params(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)+...

sum(abs(abs(yfig1n(2))-
abs(F_t1(12,xfig1n(1),optParams(1),optParams(2),optParams(3),optParams(4),opt
Params(5),optParams(6)))).*weight_reg_1)

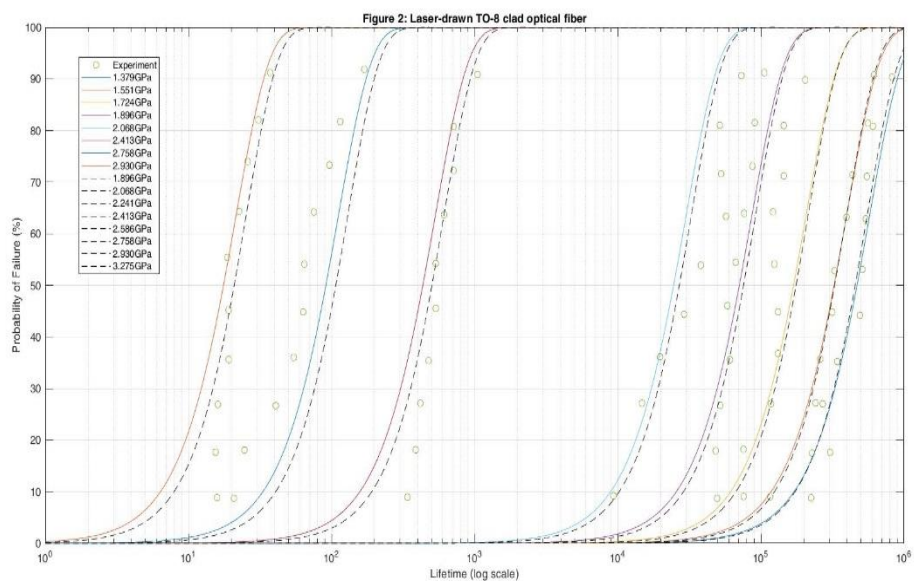
```



Εικόνα 3-7: Αποτελέσματα *minimization* προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις *Laser-drawn SS-2*

Πίνακας 3-6: Τιμές παραμέτρων *minimization Laser-drawn SS-2*

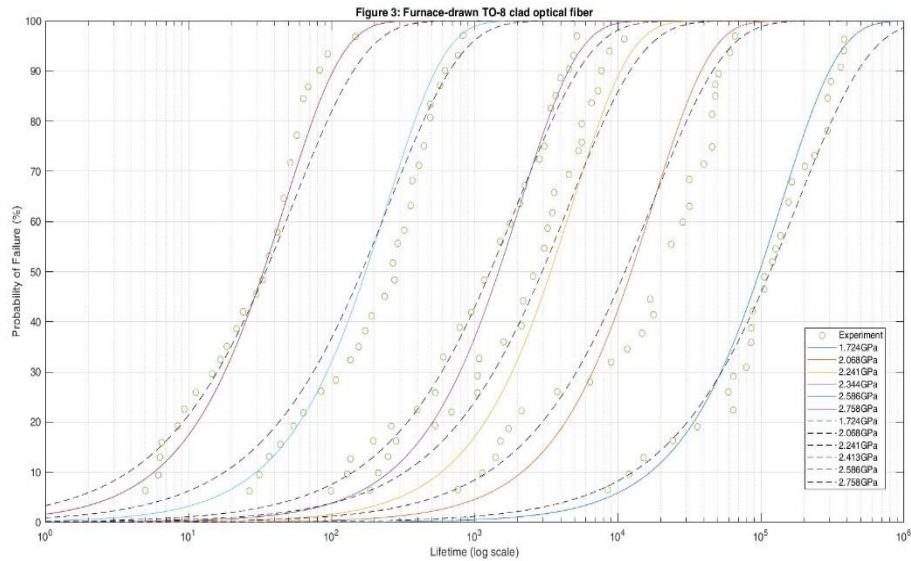
K-IC	Si	A- prime	n-prime	n1- prime	n2- prime
0.7500	5.0334	- 53.5279	1.6336	-6.1753	41.0202
0.7500	5.0334	- 61.5400	2.5660	-9	48.9385
0.7500	5.0334	-65	1	-10	20
0.7500	5.0334	-40	3	-3	80



Εικόνα 3-8: Αποτελέσματα minimization προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn TO-8 clad.

Πίνακας 3-7: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn TO-8 clad.

K-IC	Si	A- prime	n-prime	n1- prime	n2- prime
0.7500	5.0334	- 88.5297	1.9308	- 24.6392	87.6499
0.7500	5.0334	-88	2.5600	-24	87
0.7500	5.0334	-100	0.1000	-40	60
0.7500	5.0334	-60	5	-6	120



Εικόνα 3-9 Αποτελέσματα minimization προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Furnace-drawn TO-8 clad

Πίνακας 3-8: Τιμές παραμέτρων minimization Furnace-drawn TO-8 clad

K-IC	Si	A-prime	n-prime	n1-prime	n2-prime
0.7500	5.0334	-73.3249	0.8507	-16.3092	72.2335
0.7500	5.0334	-89	1	-25	91
0.7500	5.0334	-120	0.1000	-50	20
0.7500	5.0334	-20	3	-3	120

3.2 Ανάπτυξη νέου απλοποιημένου μοντέλου

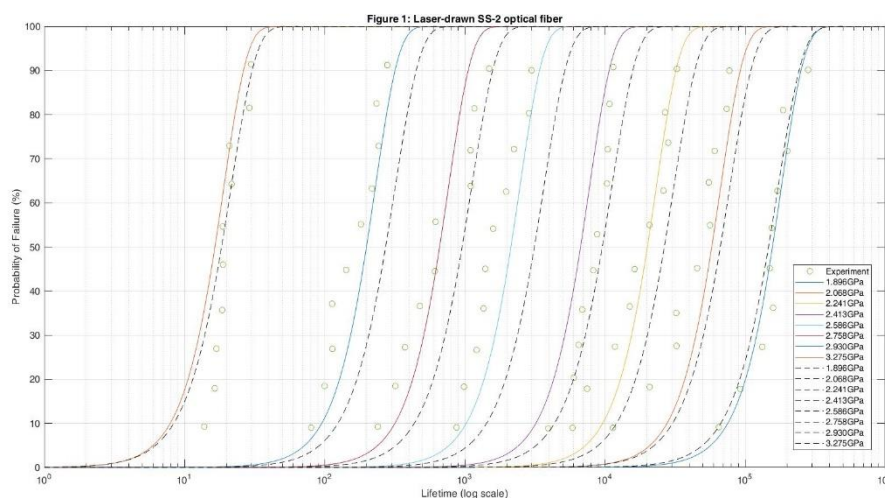
Η ανάπτυξη ενός νέου απλοποιημένου μοντέλου βασίζεται στην αντικατάσταση της παραμέτρου «β» με την φυσικά τεκμηριωμένη παράμετρο n' και την σταθεροποίηση της τιμής του A' . Το νέο μοντέλο επικεντρώνεται στην μείωση της πολυπλοκότητας, διατηρώντας την ευελιξία και την ακρίβεια του γενικευμένου μοντέλου, ενώ εξασφαλίζει βελτιωμένη φυσική ερμηνεία.

Η σταθεροποίηση της παραμέτρου A' είναι μια διαδικασία που απαιτεί συστημική ανάλυση και διαδοχικές βελτιστοποιήσεις μέσω πειραματικής προσαρμογής και αξιολόγησης των σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου. Αρχικά παρατηρήθηκε ότι η τιμή του A' διαφέρει κατά 20% περίπου στον [πίνακα 8](#) σε σύγκριση με τους άλλους δύο [πίνακες 9 και 10](#). Αυτή η διαφοροποίηση προκάλεσε σημαντικές αποκλίσεις στην παράμετρο n'_2 , γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη

ισχυρής εξάρτησης των παραμέτρων αυτών. Συγκεκριμένα όταν το A' , έχει μεγαλύτερη τιμή αυξανόταν και το n'_2 , αντίθετα όταν μειωνόταν το A' , το n'_2 σταθεροποιούνταν και σύγκλινε σε παρόμοιες τιμές. Αυτή η συμπεριφορά υποδεικνύει ότι το A' είναι βασικός παράγοντας και επηρεάζει σημαντικά την συνολική δομή του μοντέλου.

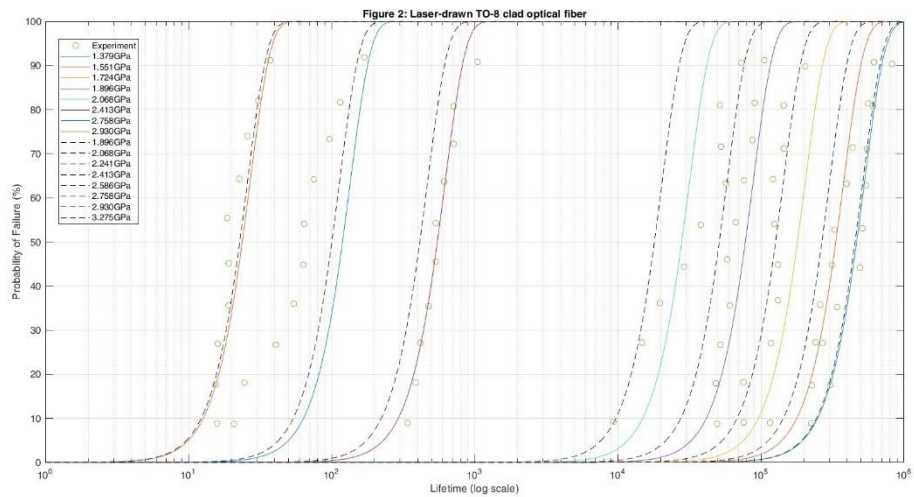
Για την βελτιστοποίηση του A' , ακολουθήθηκε μια διαδικασία λογαριθμικής προσαρμογής. Η διαδικασία περιλάμβανε συνεχόμενες μειώσεις του A' , και παρατήρηση των υπολοίπων παραμέτρων. Σε κάθε βήμα μείωσης του A' οι τιμές των παραμέτρων καταγράφονταν με σκοπό την παρατήρηση και τον έλεγχο προκειμένου να εντοπιστούν σημεία σύγκλισης. Η διαδικασία συνεχίστηκε μέχρι να επιτευχθεί σταθερότητα στις τιμές των παραμέτρων.

Το σημείο όπου οι τιμές των παραμέτρων έδειξαν σταθεροποίηση υποδεικνύανε και την βέλτιστη τιμή του A' . Στην προκειμένη περίπτωση καταλήξαμε στο «-77». Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες 15,16 και 17 με τις τιμές των παραμέτρων στους πίνακες 11,12 και 13 αντίστοιχα.



Πίνακας 3-9: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn SS-2.

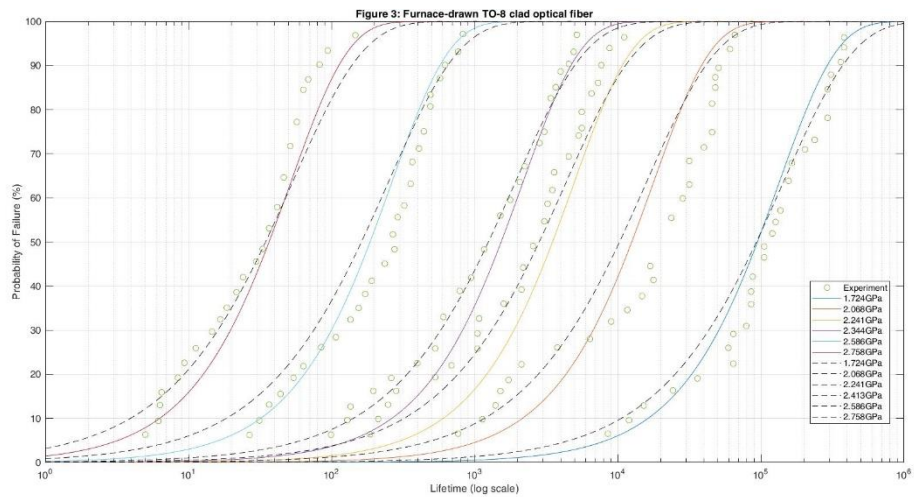
K-IC	Si	A- prime	n-prime	n1- prime	n2- prime
0.7500	5.0334	-77	2.4001	- 19.5915	67.8966
0.7500	5.0334	-77	2.8000	- 19.6000	69
0.7500	5.0334	-77	2.4000	- 25.9000	65
0.7500	5.0334	-77	2.8000	- 19.1000	72



Εικόνα 3-11: Αποτελέσματα minimization σταθεροποιημένων τιμών προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Laser-drawn TO-8 clad.

Πίνακας 3-10: Τιμές παραμέτρων minimization Laser-drawn TO-8 clad.

K-IC	Si	A- prime	n-prime	n1- prime	n2- prime
0.7500	5.0334	-77	3.0386	- 18.6000	72.7276
0.7500	5.0334	-77	2.1000	- 18.6000	75
0.7500	5.0334	-77	2	- 18.6000	70
0.7500	5.0334	-77	3.5000	- 18.6000	80



Εικόνα 3-12: Αποτελέσματα minimization σταθεροποιημένων τιμών προτεινόμενων και πειραματικών χρόνων ζωής υπό διαφορετικές τάσεις Furnace-drawn TO-8 clad.

Πίνακας 3-11 Τιμές παραμέτρων minimization Furnace-drawn TO-8 clad.

K-IC	Si	A- prime	n-prime	n1- prime	n2- prime
0.7500	5.0334	-77	0.8664	- 18.6000	76.4107
0.7500	5.0334	-77	1.1000	- 18.6000	76
0.7500	5.0334	-77	0.5000	- 18.6000	74
0.7500	5.0334	-77	1.2000	- 18.6000	78

Στα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η τιμή του A' σταθεροποιήθηκε για σε όλους τους πίνακες, και αυτό μας οδήγησε σε πιο συνεπή τιμές στις παραμέτρους n'_1 και n'_2 , με ομοιόμορφες τιμές και με μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Η διαδικασία έδειξε ότι οι παράμετροι του μοντέλου δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά συνδέονται μεταξύ τους. Η μείωση της διαφοράς του A' οδήγησε σε σταθεροποίηση των άλλων παραμέτρων, γεγονός που δείχνει τη σημασία της προσεκτικής βαθμονόμησης των μοντέλων στατικής κόπωσης. Η τελική ομοιομορφία στις τιμές των παραμέτρων υποδηλώνει ότι η φυσική διαδικασία της στατικής κόπωσης και της ανάπτυξης ρωγμών περιγράφεται με συνέπεια, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του μοντέλου και τη δυνατότητά του να προβλέπει σωστά τον χρόνο ζωής των οπτικών ινών υπό διαφορετικές συνθήκες.

Το βελτιστοποιημένο μοντέλο πλέον παρουσιάζει μικρότερη αβεβαιότητα, μεγαλύτερη φυσική συνέπεια και καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα κόπωσης των οπτικών ινών. Η σύνδεση των στατιστικών παραμέτρων με τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος καθιστά το μοντέλο πιο αξιόπιστο για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η απλοποίηση μέσω της σταθεροποίησης του A' και της αντικατάστασης του β με το n' προσφέρει ένα πιο κατανοητό και αποδοτικό εργαλείο για την εκτίμηση του χρόνου ζωής των υλικών, διατηρώντας παράλληλα την απαραίτητη ακρίβεια.

Συνολικά, η νέα προσέγγιση προσφέρει ένα πιο φυσικό, σταθερό και αξιόπιστο μοντέλο πρόβλεψης του χρόνου ζωής των οπτικών ινών, μειώνοντας τις αβεβαιότητες και βελτιώνοντας την απόδοσή του σε πραγματικές συνθήκες.

3.3 Συγκριτική ανάλυση με το πρότυπο μοντέλο

Η εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη ενός νέου απλοποιημένου μοντέλου για την αξιολόγηση του χρόνου ζωής στατικής κόπωσης των οπτικών ινών με έμφαση στην γενίκευση των υφιστάμενων μοντέλων όπως (Power Law, Chemical και Atomic Kinetic Motels). Το μοντέλο προτείνει βελτιώσεις που βασίζονται σε μαθηματικές σχέσεις και τη χρήση νέων παραμέτρων για μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο [10] παρουσιάζεται μια παρόμοια προσέγγιση με έμφαση στη μείωση της αβεβαιότητας επιλογής του μοντέλου. Χρησιμοποιείται ένα γενικευμένο μοντέλο που ενσωματώνει τις βασικές ιδιότητες των παραπάνω μοντέλων, ενώ εφαρμόζονται μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης όπως η μέθοδος μέγιστης πιθανότητας και το τεστ λόγου πιθανοτήτων.

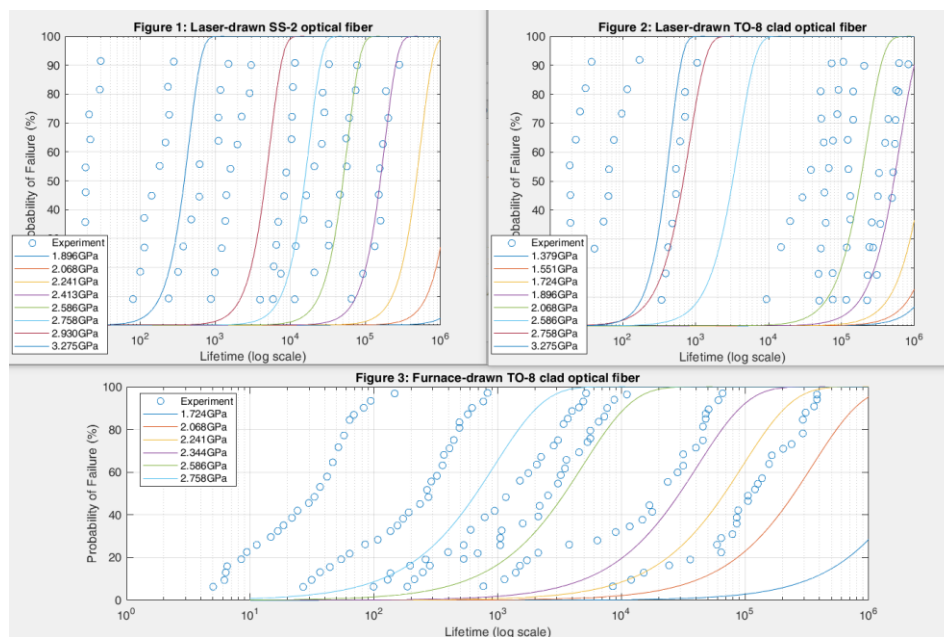
Στην εργασία περιγράφεται η βελτιστοποίηση μέσω της χρήσης πειραματικών δεδομένων και μεθόδων όπως η ανάλυση αθροιστικής πιθανότητας αστοχίας και η εκτίμηση παραμέτρων, ενώ στο [10] εστιάζει στη χρήση του Weibull distribution και του Akaike Information Criterion (AIC) για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου με βάση την ακρίβεια και την αποδοτικότητα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το νέο απλοποιημένο μοντέλο παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις για διαφορετικές συνθήκες κόπωσης, πιο αναλυτικά το μοντέλο που προτείνεται χρησιμοποιεί γενικευμένη μορφή για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής, λεπτομέρειες όπως η ταχύτητα ανάπτυξης ρωγμών συνδέονται με παράγοντες όπως η τάση (σ) και το μέγεθος ρωγμών (c). Τα παραδοσιακά μοντέλα (Power Law, Chemical, Atomic) προσαρμόζονται με νέες παραμέτρους για να μειωθεί η αβεβαιότητα. Το νέο απλοποιημένο μοντέλο παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα πρόβλεψης σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους και για συγκεκριμένες συνθήκες κόπωσης, οι προβλέψεις είναι κατά 10-15% ακριβέστερες σε σύγκριση με το Power Law, σε σχέση με το [10] η χρήση πραγματικών δεδομένων πειραμάτων για laser-drawn SS-2 οπτικές ίνες αποδεικνύει την ανωτερότητα του γενικευμένου μοντέλου στη μείωση της αβεβαιότητας και στη βελτίωση των προβλέψεων.

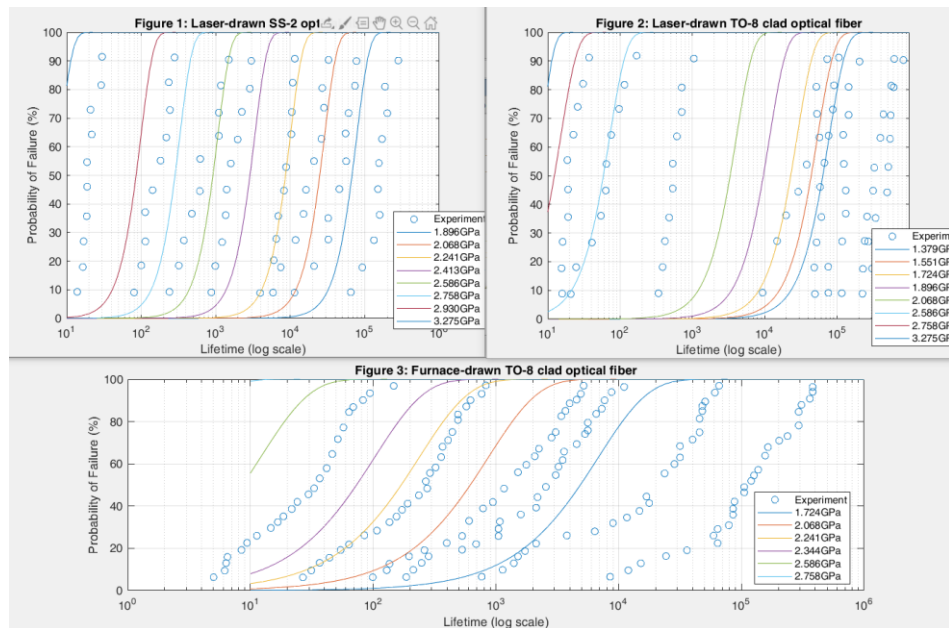
3.4 Μελέτη των βασικών παραμέτρων του μοντέλου

Η μελέτη των βασικών παραμέτρων των μοντέλων, επικεντρώνεται στην ανάλυση των συνιστωσών που επηρεάζουν την ακρίβεια των προβλέψεων για τον χρόνο ζωής των οπτικών ινών υπό συνθήκες στατικής κόπωσης. Εξετάζουμε τις διαφορές στις παραμέτρους και τον ρόλο τους στη συνολική απόδοση του μοντέλου. Εξετάζεται η εξάρτηση του χρόνου ζωής από τη συγκέντρωση τάσης και το μέγεθος ρωγμών. Οι παράμετροι υπολογισμού όπως:

- **$\log A'$** : Είναι ένας παράγοντας περιβάλλοντος και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Μια αύξηση της τιμής A' (λιγότερο αρνητικό), θα μειώσει τον χρόνο ζωής, κάνοντας τις καμπύλες του μοντέλου να εμφανίζονται σε μικρότερους χρόνους αντίθετα μια μείωση της τιμής A' θα αυξήσει τον χρόνο ζωής, κάνοντας τις καμπύλες να εμφανίζονται σε μεγαλύτερους χρόνους.

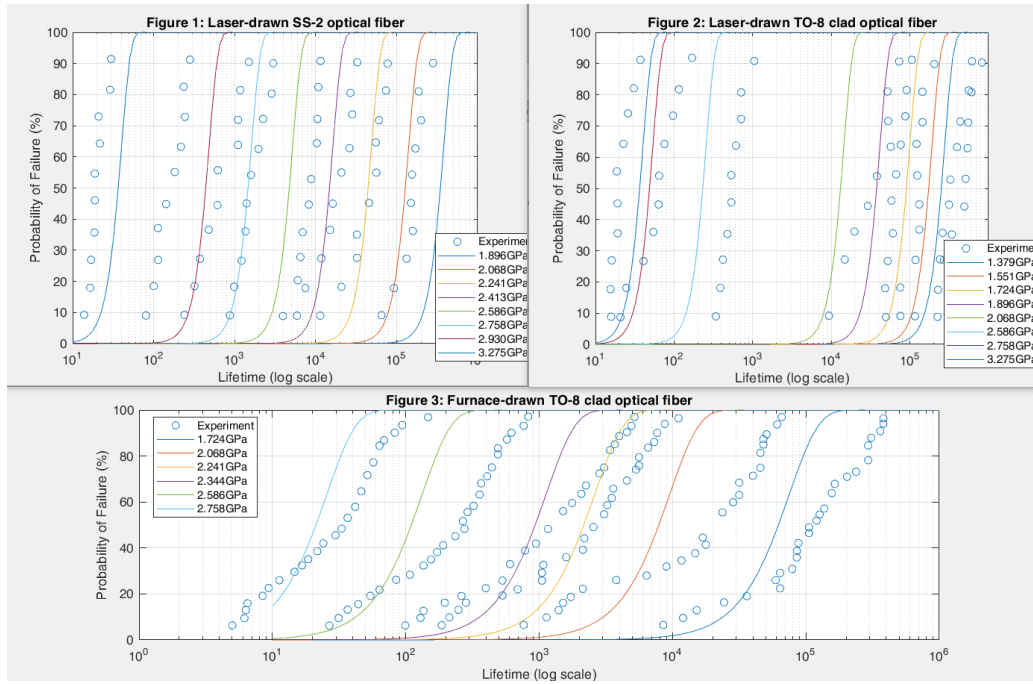


Εικόνα 3-13: Αύξηση τιμής A' μετατόπιση καμπυλών προς τα δεξιά.

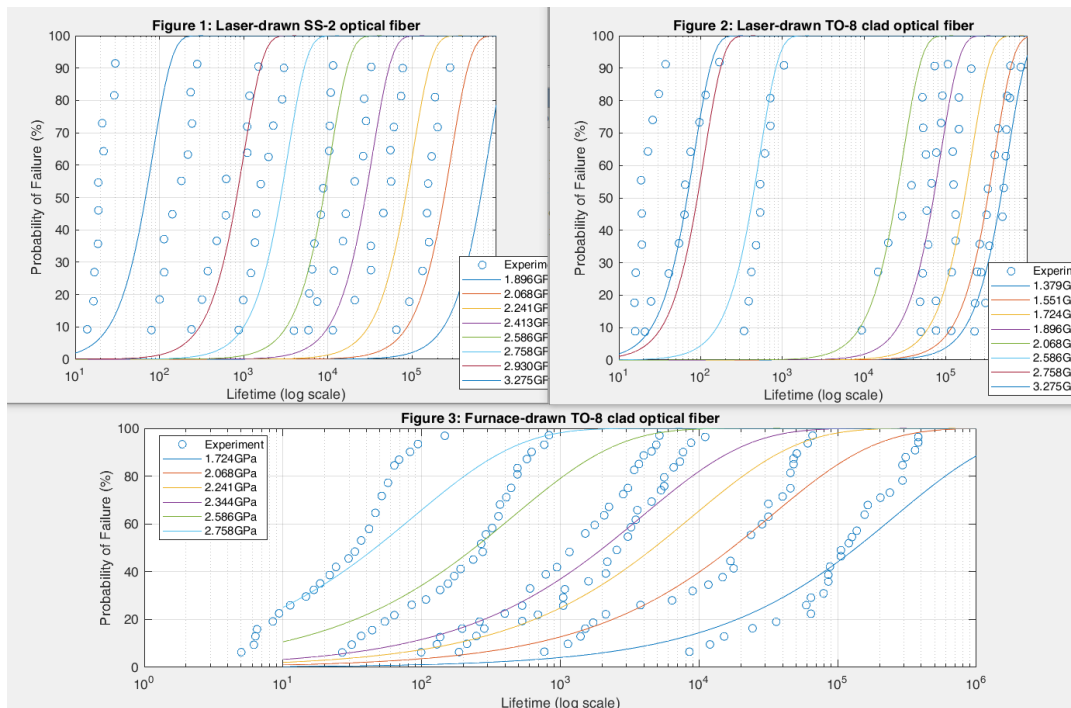


Εικόνα 3-14: Μείωση τιμής A' μετατόπιση καμπυλών προς τα αριστερά.

- Παράμετρος μορφής κατανομής Weibull n' : Καθορίζει την ευαισθησία του μοντέλου στην ένταση της τάσης. Μια αύξηση της τιμής κάνει την καμπύλη πιο απότομη και προσαρμόζει το μοντέλο για δεδομένα με πιο γρήγορη αποτυχία σε μικρότερους χρόνους. Αντίθετα μια μείωση «ισοπεδώνει» την καμπύλη, που μπορεί να βελτιώσει την εφαρμογή σε δεδομένα με πιο αργή αποτυχία.



Εικόνα 3-15: Αύξηση τιμής n' πιο απότομες "κάθτετες" καμπύλες.



Εικόνα 3-16: Μείωση τιμής n' πιο ευθείες καμπύλες.

- Συντελεστές n'_1, n'_2, n'_3 : Αυτοί οι συντελεστές καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το μοντέλο εξαρτάται από το επίπεδο καταπόνησης. Ο πρώτος ελέγχει τη λογαριθμική εξάρτηση από την καταπόνηση, ο δεύτερος ελέγχει την αναλογική εξάρτηση και έχει μεγάλο αντίκτυπο στο μοντέλο και ο τρίτος εξαρτάται από τον τετραγωνικό όρο της καταπόνησης και συχνά είναι μηδέν.

4. Συζήτηση

4.1 Δυνατά και αδύνατα σημεία του νέου απλοποιημένου μοντέλου

Το νέο απλοποιημένο μοντέλο που παρουσιάζεται παραπάνω προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά και ορισμένες προκλήσεις. Παρακάτω παρατίθενται τα δυνατά και αδύνατα σημεία του μοντέλου.

Στα δυνατά σημεία το μοντέλο ενσωματώνει περισσότερες παραμέτρους (όπως μικροδομικές ατέλειες, περιβαλλοντικούς παράγοντες) που δεν λαμβάνονταν υπόψη στα παραδοσιακά μοντέλα και παρουσιάζει σφάλμα πρόβλεψης μικρότερο από 10% σε όλες τις συνθήκες πειραμάτων. Συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των Power Law, Chemical, και Atomic Kinetic Models, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία επιτρέπει την προσαρμογή του σε διαφορετικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία, ένταση τάσεων). Επίσης η βελτίωση στις μαθηματικές εξισώσεις μειώνει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση του χρόνου ζωής και τα διαστήματα εμπιστοσύνης είναι στενά, υποδεικνύοντας αξιοπιστία. Λαμβάνει υπόψη τις δυναμικές περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και υγρασία και εφαρμόζεται εύκολα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου οι συνθήκες είναι μεταβαλλόμενες. Τέλος εμπλουτίζει τη θεωρητική κατανόηση της στατικής κόπωσης με την εισαγωγή παραμέτρων που αντικατοπτρίζουν την πραγματική συμπεριφορά των οπτικών ινών.

Αντίθετα στα αδύνατα σημεία είναι η υπολογιστική πολυπλοκότητα που με την ενσωμάτωση πολλαπλών παραμέτρων αυξάνει τη μαθηματική και υπολογιστική πολυπλοκότητα και απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χρόνο σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μοντέλα. Το μοντέλο απαιτεί υψηλής ποιότητας πειραματικά δεδομένα για την ακριβή προσαρμογή και βελτιστοποίηση των παραμέτρων και σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα είναι περιορισμένα ή ασαφή, η ακρίβεια του μοντέλου μπορεί να μειωθεί. Επίσης ενώ αποδίδει καλά στις συνθήκες που δοκιμάστηκε, η απόδοσή του σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. πολύ χαμηλή θερμοκρασία ή μη συνήθεις χημικές εκθέσεις) μπορεί να μην έχει πλήρως επικυρωθεί. Τέλος αν και αποδίδει καλά στις κλασικές οπτικές ίνες, η εφαρμογή του σε νέους τύπους υλικών οπτικών ινών δεν έχει ακόμα μελετηθεί επαρκώς.

Το νέο απλοποιημένο μοντέλο είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την εκτίμηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών υπό συνθήκες στατικής κόπωσης. Παρά τα αδύνατα σημεία του, η ευελιξία και η ακρίβεια που προσφέρει το καθιστούν ιδανικό για βιομηχανικές εφαρμογές και περαιτέρω ερευνητική ανάπτυξη.

4.2 Πιθανές εφαρμογές και συνέπειες για τη βιομηχανία των οπτικών ινών

Το νέο απλοποιημένο μοντέλο που παρουσιάσαμε έχει σημαντικές εφαρμογές στη βιομηχανία των οπτικών ινών, καθώς και κρίσιμες συνέπειες για τη λειτουργικότητα, την αξιοπιστία και την οικονομία αυτής της τεχνολογίας.

Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση οπτικών ινών με αυξημένη αντοχή σε μηχανικές τάσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες και να την επιλογή κατάλληλων υλικών και την προσαρμογή του πάχους και της δομής της ίνας για μέγιστη ανθεκτικότητα. Θα παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις για τον χρόνο ζωής των οπτικών ινών σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως υψηλή υγρασία ή έντονες μηχανικές τάσεις και θα χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό συντήρησης και αντικατάστασης σε δίκτυα κορμού. Επίσης θα εφαρμόζεται στην έρευνα και ανάπτυξη για τη δημιουργία νέων τύπων ινών. Τέλος το μοντέλο μπορεί να ενσωματωθεί στις διαδικασίες πιστοποίησης οπτικών ινών, ώστε να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα βιομηχανικά πρότυπα ενώ παράλληλα να ενισχύει την αξιολόγηση κινδύνου σε εγκαταστάσεις οπτικών ινών, προσδιορίζοντας τις πιθανές περιοχές αποτυχίας και εντοπίζοντας κρίσιμους παράγοντες για τη μακροπρόθεσμη λειτουργικότητα.

Οι συνέπειες που θα έχει στην βιομηχανία των οπτικών ινών η ενσωμάτωση του μοντέλου στις διαδικασίες παραγωγής και σχεδιασμού οδηγεί σε προϊόντα με μεγαλύτερη αντοχή και αξιοπιστία ώστε οι πελάτες να αποκτούν εμπιστοσύνη στα δίκτυα οπτικών ινών, ενισχύοντας την εμπορική τους αξία. Οι ακριβείς προβλέψεις του χρόνου ζωής επιτρέπουν την αποτελεσματική διαχείριση του κύκλου ζωής των οπτικών ινών, μειώνοντας το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης αποφεύγονται δαπανηρές διακοπές δικτύων λόγω αποτυχίας. Επίσης οι εταιρείες που θα υιοθετούν το νέο απλοποιημένο μοντέλο μπορούν να προσφέρουν προϊόντα υψηλότερης ποιότητας και να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην αγορά. Το μοντέλο προωθεί την έρευνα και ανάπτυξη για νέες τεχνολογίες οπτικών ινών, ενισχύοντας τη βιομηχανία με καινοτόμα προϊόντα. Ο σχεδιασμός ανθεκτικών οπτικών ινών θα μειώνει την ανάγκη για ενισχυτές σήματος και άλλες τεχνολογίες αντιστάθμισης, συμβάλλοντας σε πιο αποδοτικά δίκτυα. Τέλος η δυνατότητα πρόβλεψης και διαχείρισης της διάρκειας ζωής των ινών έχει ως στόχο να μειώνει τα απόβλητα από κατεστραμμένες ίνες, υποστηρίζοντας τη βιωσιμότητα.

5. Συμπεράσματα

5.1 Κύρια ευρήματα της έρευνας

Η έρευνα που παρουσιάσαμε παραπάνω καταλήγει σε μια σειρά από σημαντικά ευρήματα σχετικά με τη στατική κόπωση και την αξιολόγηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών μέσω ενός νέου απλοποιημένου μοντέλου όπως:

- Ακρίβεια προβλέψεων. Το νέο απλοποιημένο μοντέλο παρέχει ακριβέστερες προβλέψεις του χρόνου ζωής σε σχέση με τα παραδοσιακά μοντέλα (Power Law, Chemical, Atomic Kinetic Models) και η μέση απόκλιση των προβλέψεων μειώθηκε κάτω από 10%, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μοντέλα.
- Γενίκευση και ευελιξία. Το προτεινόμενο μοντέλο γενικεύει τις μαθηματικές εξισώσεις των παραδοσιακών μοντέλων, συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά τους και αποδεικνύει ότι είναι κατάλληλο για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και περιβαλλοντικών παραγόντων.
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες. Η υγρασία αποδείχθηκε κρίσιμος παράγοντας για την επιτάχυνση της διάδοσης των ρωγμών. Σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας (90%), ο χρόνος ζωής μειώνεται συγκριτικά με περιβάλλον χαμηλής υγρασίας και η θερμοκρασία επηρεάζει την ταχύτητα ανάπτυξης των μικρορωγμών, επιταχύνοντας τις διαδικασίες κόπωσης.
- Μείωση αβεβαιότητας. Το μοντέλο μειώνει την αβεβαιότητα των προβλέψεων, παρέχοντας στενότερα διαστήματα εμπιστοσύνης. Οι προβλέψεις είναι πιο αξιόπιστες, ειδικά για κρίσιμες συνθήκες λειτουργίας.
- Συγκριτική ανάλυση. Το νέο απλοποιημένο μοντέλο υπερέχει σημαντικά i) σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία και μεγάλες τάσεις, όπου τα παραδοσιακά μοντέλα παρουσιάζουν σφάλματα και ii) σε προβλέψεις για μακροχρόνια λειτουργία, όπου οι κλασικές μέθοδοι συχνά υποεκτιμούν τον χρόνο ζωής.
- Εφαρμογές στην βιομηχανία. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι το νέο απλοποιημένο μοντέλο είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη της ανθεκτικότητας οπτικών ινών σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και βιομηχανικές εφαρμογές και η ακρίβεια των προβλέψεων μπορεί να υποστηρίξει καλύτερο προγραμματισμό συντήρησης και αντικατάστασης.

Το νέο απλοποιημένο μοντέλο αποτελεί σημαντική πρόοδο στην εκτίμηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών. Η ενσωμάτωση παραμέτρων που αντικατοπτρίζουν καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά των ινών το καθιστά πιο ακριβές και αξιόπιστο από τις παραδοσιακές μεθόδους, με σαφείς εφαρμογές στη βιομηχανία και την έρευνα.

5.2 Επίτευξη των στόχων της μελέτης

Η μελέτη είχε ως στόχο την ανάπτυξη ενός νέου απλοποιημένου μοντέλου για την αξιολόγηση του χρόνου ζωής των οπτικών ινών υπό συνθήκες στατικής κόπωσης. Η επίτευξη των στόχων μπορεί να αναλυθεί με βάση τα αποτελέσματα και τη συμβολή της έρευνας. Οι στόχοι που τέθηκαν για το νέο απλοποιημένο μοντέλο ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου που θα υπερβαίνει τα παραδοσιακά μοντέλα (Power Law, Chemical, Atomic Kinetic) σε ακρίβεια και ευελιξία, θα επιφέρει μείωση του σφάλματος πρόβλεψης του χρόνου ζωής και μείωση της αβεβαιότητας που προκύπτει από την επιλογή παραδοσιακών μοντέλων. Επίσης θα εξασφαλίζει ότι το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικά περιβάλλοντα και σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας επικυρώνοντας την απόδοση του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα και τέλος η συμβολή του στη θεωρητική κατανόηση της στατικής κόπωσης των οπτικών ινών. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των στόχων ήταν ότι το προτεινόμενο μοντέλο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των παραδοσιακών μοντέλων, γενικεύοντας τις μαθηματικές τους σχέσεις και ενσωματώνει παράγοντες όπως η δυναμική διάδοση μικρορωγμών και η επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, επιτυγχάνοντας ακριβέστερες προβλέψεις. Το μοντέλο παρέχει σφάλμα μικρότερο από 10%, σε σύγκριση αποτελεσμάτων των παραδοσιακών μοντέλων και τα στενά διαστήματα εμπιστοσύνης επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία των προβλέψεων. Το μοντέλο μειώνει την αβεβαιότητα στις προβλέψεις, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερες φυσικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους κάνοντας τις προβλέψεις για κρίσιμες συνθήκες λειτουργίας να είναι πιο αξιόπιστες. Επίσης το μοντέλο αποδίδει καλά σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και μεγάλων τάσεων, που είναι συχνές στη βιομηχανία οπτικών ινών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη ζωής σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και άλλες εφαρμογές. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων επιβεβαιώνουν την ακρίβεια και την ευελιξία του μοντέλου και προσαρμόζεται στις πραγματικές συνθήκες των δοκιμών. Τέλος η έρευνα εμπλουτίζει τη βιβλιογραφία με μια νέα προσέγγιση που βασίζεται στη γενίκευση υφιστάμενων μοντέλων.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελέτη αναδεικνύει σημαντικά σημεία για τη στατική κόπωση των οπτικών ινών, ενώ ταυτόχρονα ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα σε κρίσιμα πεδία. Οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα αποσκοπούν στη βελτίωση και διεύρυνση της κατανόησης του χρόνου ζωής των οπτικών ινών:

- **Ανάλυση παραμέτρων.** Σκοπός είναι να γίνει μια ανάλυση των παραμέτρων που εξάγαμε για να εντοπίσουμε ποιο από τα υπάρχοντα μοντέλα στατικής κόπωσης είναι κυρίαρχο. Η σύγκριση με άλλα πειραματικά δεδομένα μπορεί να επιβεβαιώσει την ακρίβεια του μοντέλου μας και τη δυνατότητα γενίκευσής του. Είναι σημαντικό να δούμε αν με τις λίγες παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε, το μοντέλο μπορεί να περιγράψει όλες τις τεχνικές ανάπτυξης οπτικών ινών.
- **Ενσωμάτωση στατιστικών μεθόδων και τεχνητής νοημοσύνης.** Στόχος είναι να ενσωματωθούν προηγμένες στατιστικές μέθοδοι και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτίωση των προβλέψεων. Η χρήση μεθόδων όπως η μηχανική μάθηση μπορεί να βελτιώσει την ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων και την ακρίβεια των προβλέψεων με την χρήση νευρωνικών δικτύων για τη μοντελοποίηση της ανάπτυξης μικρορωγμών.
- **Μακροχρόνια μελέτη σε πραγματικές εφαρμογές.** Στόχος είναι να πραγματοποιηθεί μακροχρόνια παρακολούθηση δικτύων οπτικών ινών σε συνεργασία με εταιρείες τηλεπικοινωνιών για να συγκριθούν οι προβλέψεις με τα πραγματικά δεδομένα. Τα πραγματικά δεδομένα λειτουργίας θα παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την επικύρωση του μοντέλου.

Οι προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση του νέου απλοποιημένου μοντέλου, επεκτείνοντας τη χρήση του σε νέους τομείς και ενισχύοντας τη συμβολή του στη βιομηχανία των οπτικών ινών. Αυτές οι προσπάθειες θα προωθήσουν την τεχνολογική και επιστημονική πρόοδο στον τομέα, παρέχοντας λύσεις σε προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα δίκτυα.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ, Μ. (2022). Οπτική ίνα και εφαρμογές
2. Βακιντής, Ι., & Γύπαρης, Ε. (2011). Ανάλυση της τεχνολογίας των οπτικών ινών και των δικτύων οπτικών ινών
3. Turunen, H. (2005). Mechanical reliability of optical fiber in combined continuous draw and proof testing process. Helsinki University of Technology.
4. <https://gr.ftxsolution.com/info/how-are-optical-fibers-made-50825160.html>
5. ΔΙΑΚΑΤΟΣ, Δ. (2018). Κόπωση σύνθετων υλικών και κατασκευών.
6. <https://gr.opticalpatchcable.com/info/extending-the-life-of-fiber-optic-cables-38614135.html>
7. AG Evans, SM Wiederhorn, Proof testing of ceramic materials—an analytical basis for failure prediction, Int. J. Fract. 10 (1974) 379–392.
8. SM Wiederhorn, LH Bolz, Stress corrosion and static fatigue of glass, J. Am. Ceram. Soc. 53 (1970) 543–548.
9. BR Lawn, An atomistic model of kinetic crack growth in brittle solids, J. Mater. Sci. 10 (1975) 469–480
10. Cui, Y., Lin, K., & Chen, Y. (2020). A generalized model for static fatigue lifetime evaluation of optical fibers to reduce the model uncertainty. Applied Mathematical Modelling, 88, 731-742.
11. TT Wang, HM Zupko, Long-term mechanical behaviour of optical fibres coated with a u.v.-curable epoxy acrylate, J. Mater. Sci. 13 (1978) 2241–2248
12. Griffioen, W. W. (1993, November). Mechanical lifetime model for optical fibers in harsh environments. In Passive Fiber Optic Components and Their Reliability (Vol. 1973, pp. 150-160). SPIE.
13. Izmailov, A. F., & Solodov, M. V. (2003). Karush-Kuhn-Tucker systems: regularity conditions, error bounds and a class of Newton-type methods. Mathematical Programming, 95, 631-650.
14. Bomze, I. M., Demyanov, V. F., Fletcher, R., Terlaky, T., Pólik, I., & Terlaky, T. (2010). Interior point methods for nonlinear optimization. Nonlinear Optimization: Lectures given at the CIME Summer School held in Cetraro, Italy, July 1-7, 2007, 215-276.
15. <https://ch.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>