



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Προσομοίωση αισθητήρων που χρησιμοποιούν laser (Bragg Sensors) ενσωματωμένους σε ελαστικούς φορείς με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ

ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΖΑΧΑΡΕΝΙΑ ΜΑΡΚΑΚΗ Α.Μ. 2010019011

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία θα ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί χωρίς την επίβλεψη, την οργάνωση και τη μεθοδικότητα του Καθηγητή μου κ. Σταυρουλάκη Γεώργιου. Τον ευχαριστώ θερμά όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την εξεταστική επιτροπή και τους καθηγητές του τμήματος μου για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα που παρακολούθησα και υπήρξα ιδιαίτερα ευχαριστημένη για το επίπεδο γνώσεων και στη συνέχεια την αδερφή μου, την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε αυτή τη προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας Εικόνων	8
Εισαγωγή.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	17
Βασικές Έννοιες Οπτικής και Παράμετροι Οπτικών Ινών	17
1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.....	17
1.2 Γεωμετρική Οπτική	18
1.2.1 Ανάκλαση	18
1.2.2 Διάθλαση.....	18
1.3 Διάθλαση μέσα σε φακό	19
1.4 Ολική ανάκλαση.....	19
1.5 Ανάκλαση φωτός με γωνία πρόσπτωσης 90° (Νόμος Fresnel)	20
1.6 Ολική ανάκλαση μέσα σε οπτική ίνα.....	22
1.7 Σκέδαση Rayleigh και φως Tyndall	22
1.8 Παράμετροι.....	23
1.8.1 Ρυθμοί Διάδοσης (Modes).....	24
1.8.1.1 Ομαλοποιημένη συχνότητα και ρυθμοί διάδοσης.....	25
1.8.1.2 Ρυθμός LP01 – Θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης και αποκοπής.....	26
1.8.2 Αριθμητικό άνοιγμα.....	26
1.8.2.1 Αριθμητικό άνοιγμα για ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη.....	27
1.8.3 Δείκτης διάθλασης ομάδας	28
1.8.4 Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης.....	28
1.8.5 Αποτελεσματική περιοχή	29
1.8.6 Διασπορά	29
1.8.6.1 Intermodal διασπορά ή modal διασπορά	30
1.8.6.2 Intramodal διασπορά ή χρωματική διασπορά	30
1.8.6.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)	31
1.8.7 Μη γραμμικά φαινόμενα.....	32

1.8.7.1 Διεγχειρόμενη σκέδαση Brillouin, SBC	32
1.8.7.2 Διεγχειρόμενη σκέδαση Raman, SRS.....	33
1.8.7.3 Self phase modulation, SPM (αυτοδιαμόρφωση φάσης)	33
1.8.7.4 Cross phase modulation, XPM (ετεροδιαμόρφωση φάσης).....	33
1.8.7.5 Μείξη τεσσάρων κυμάτων	34
1.8.8 Πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη	34
1.8.9 Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη.....	34
1.8.10 Μονότροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη	35
1.8.11 Ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς	37
1.8.12 Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	37
1.8.12.1 Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς	37
1.8.12.2 Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα από 1280-1625 (1700) nm ..	38
1.8.12.3 Ίνα αντιστάθμισης διασποράς	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	41
Βασικές αρχές λειτουργίας των οπτικών ινών.....	41
2.1 Οπτικά καλώδια	42
2.2 Πομποί.....	43
2.3 Πηγή φωτός με LED.....	44
2.4 Πηγή φωτός με Laser	44
2.5 Δέκτες.....	45
2.6 Σύνδεσμοι.....	45
2.6.1 Μόνιμοι σύνδεσμοι.....	46
2.6.2 Άλλα είδη συνδέσμων.....	46
2.6.2.1 Σύνδεσμοι SC.....	46
2.6.2.2 Σύνδεσμοι ST	46
2.7 Διακλαδωτές	47
2.8 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών	48
2.9 Μειονεκτήματα οπτικών ινών	50

2.10 Εφαρμογές οπτικών ινών σε συστήματα υψηλών τάσεων	51
2.10.1 Μέτρηση ισχυρών εντάσεων με χρήση πηνίου Rogowski και οπτικών ινών	51
2.10.2 Έλεγχος Οπτικών Ινών	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	55
Οπτικές Ίνες και Κατασκευές	55
3.1 Εφαρμογές οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό παραμορφώσεων.....	56
3.1.1 Συμβατικοί Αισθητήρες.....	57
3.1.2 Αισθητήρες των οπτικών ινών	58
3.1.2.1 Ενδογενείς Αισθητήρες (Intrinsic Sensors):	58
3.1.2.2 Εξωγενείς Αισθητήρες (Extrinsic Sensors):	58
3.2 Ταξινόμηση αισθητήρων οπτικών ινών	61
3.3 Συστήματα Παρακολούθησης Κτιρίων	63
3.4 Συστήματα Παρακολούθησης Γεφυρών.....	66
3.5 Συστήματα Παρακολούθησης Αγωγών	68
3.6 Συστήματα Παρακολούθησης στην Αεροδιαστημική και στην Άμυνα	69
3.7 Συστήματα Παρακολούθησης στην Ναυπηγική	71
3.8 Συστήματα Παρακολούθησης σε άλλους τομείς.....	72
3.9 Η αγορά των οπτικών αισθητήρων.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	76
Ευθή και Αντίστροφα Προβλήματα στην Κατασκευή	76
4.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	76
4.2 Ευθή και αντίστροφα προβλήματα στις κατασκευές	79
4.3 Γενική μεθοδολογία επίλυσης αντίστροφων προβλημάτων.....	80
4.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	82
4.4.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	83
4.4.1.1 Ορισμός του καννάβου και γενικότητες.....	83

4.4.1.2 Προσδιορισμός των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο	85
4.4.1.3 Τροπές - Τάσεις	85
4.4.1.4 Αρχή των δυνατών έργων	85
4.4.1.5 Παραδείγματα Προσομοιώσεων	88
1 ^ο Παράδειγμα id=5 Id=0.7 1 ^η οπτική ίνα	91
1 ^ο Παράδειγμα id=5 Id=0.7 2 ^η οπτική ίνα	92
2 ^ο Παράδειγμα id=2 Id=0.5 1 ^η οπτική ίνα	93
2 ^ο Παράδειγμα id=2 Id=0.5 2 ^η οπτική ίνα	94
3 ^ο Παράδειγμα id=7 Id=0.3 1 ^η οπτική ίνα	95
3 ^ο Παράδειγμα id=7 Id=0.3 2 ^η οπτική ίνα	96
4 ^ο Παράδειγμα id=9 Id=0.9 1 ^η οπτική ίνα	97
4 ^ο Παράδειγμα id=9 Id=0.9 2 ^η οπτική ίνα	98
5 ^ο Παράδειγμα id=2 Id=0.2 1 ^η οπτική ίνα	99
5 ^ο Παράδειγμα id=2 Id=0.2 2 ^η οπτική ίνα	100
6 ^ο Παράδειγμα id=12 Id=0.8 1 ^η οπτική ίνα	101
6 ^ο Παράδειγμα id=12 Id=0.8 2 ^η οπτική ίνα	102
7 ^ο Παράδειγμα id=10 Id=0.6 1 ^η οπτική ίνα	103
7 ^ο Παράδειγμα id=10 Id=0.6 2 ^η οπτική ίνα	104
Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά id και Id	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	109
Νευρωνικά Δίκτυα	109
5.1 Ιστορική αναδρομή	109
5.2 Τύποι νευρωνικών δικτύων	111
5.2.1 Νευρωνικά δίκτυα Προσοτροφodότησης	111
5.2.2 Αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (ΝΔ ανατροφodότησης)	112
5.3 Μάθηση των νευρωνικών δικτύων	113
5.4 Αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης	114
5.5 Γενίκευση	114

5.6 Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων στα αντίστροφα προβλήματα	116
Συμπεράσματα.....	152
Βιβλιογραφία	163

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.2: Σύστημα λειτουργίας της οπτικής ίνας.....	14
Εικόνα 1.3: Ιστορία οπτικών ινών και συστήματα λειτουργίας κάθε τύπου ίνας.....	15
Εικόνα 1.4: Φάσμα Συχνοτήτων.....	17
Εικόνα 1.5: Διαπερατότητα γυαλιού της ίνας	17
Εικόνα 1.6: Γεωμετρική Οπτική	18
Εικόνα 1.7: Νόμος Snell	18
Εικόνα 1.8: Διαθλαση μέσα σε φακό.....	19
Εικόνα 1.9: Ολική Ανάκλαση.....	20
Εικόνα 1.10: Νόμος Fresnel	20
Εικόνα 1.11: Νόμος Fresnel	21
Εικόνα 1.12: Συντελεστές ανάκλασης για TM και TE polarized.....	21
Εικόνα 1.13: Βασική λειτουργία της μεθόδου των οπτικών ινών.	22
Εικόνα 1.14: Σκέδαση Rayleigh	22
Εικόνα 1.15: Τρόπος μετάδοσης φωτός ανα προφίλ του δείκτη διάθλασης.....	23
Εικόνα 1.16: Ρυθμός LP01.....	26
Εικόνα 1.17: Κώνος αποδοχής	27
Εικόνα 1.18: Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη	28
Εικόνα 1.19: Δείκτης διάθλασης ομάδας	28
Εικόνα 1.20: Είδη οπτικών ινών, ανάλογα με την κατάσταση τους (mode)	29
Εικόνα 1.21: Χρωματική διασπορά.....	31
Εικόνα 1.22: Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης	32
Εικόνα 1.23: Πολύτροπη οπτική ίνα	34
Εικόνα 1.24: Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη.....	35
Εικόνα 1.25: Μονότροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη	36
Εικόνα 2.26: Μονότροπη οπτική ίνα	36
Εικόνα 2.27: Μονότροπη οπτική ίνα	36
Εικόνα 1.28: Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	37

Εικόνα 1.29: Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς	38
Εικόνα 1.30: Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα	39
Εικόνα 1.31: Σύγκριση τυπικής μονότροπης ίνας και μιας ίνας αντιστάθμισης διασποράς.	39
Εικόνα 2.1: Φάσμα Συχνοτήτων και το Ορατό φως.....	41
Εικόνα 2.2: Καλώδιο οπτικών ινών (Tight Buffer) Εικόνα 2.3: Καλώδιο οπτικών ινών (Loose Buffer)	42
Εικόνα 2.4: Οπτικό Patch cord	42
Εικόνα 2.5: LED.....	44
Εικόνα 2.6: LASER.....	44
Εικόνα 2.7: Τρόποι κατασκευής οπτικής ίνας.....	47
Εικόνα 2.8: πηνίο Rogowski	51
Εικόνα 2.9: Διάταξη μέτρησης ισχυρών εντάσεων μέσω πηνίου Rogowski και οπτικού συστήματος μετάδοσης.....	51
Εικόνα 2.10: Διάταξη μέτρησης κεραυνικού πλήγματος.....	52
Εικόνα 2.11: Καμπύλη εξασθένησης γυάλινης οπτικής ίνας.....	53
Εικόνα 2.12: Απώλειες στις επαφές σύνδεσης.....	53
Εικόνα 3.1: Τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών	60
Εικόνα 3.2: Σύνοψη των αισθητήρων οπτικών ινών με βάση τις ιδιότητες τους	62
Εικόνα 3.3: Συγκρότημα Κτιρίων στη Σιγκαπούρη με εγκατεστημένο σύστημα SHM	64
Εικόνα 3.4: Εθνικό Κέντρο Υγρου Στίβου με ενσωματωμένο σύστημα SHM	64
Εικόνα 3.5: Τοποθέτηση συστήματος SHM.....	65
Εικόνα 3.6: Εκκλησία Riga's Dome στη Λετονία με SHM.....	65
Εικόνα 3.7: Γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη	67
Εικόνα 3.8: Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών στη γέφυρα του Μανχάταν ^[39]	68
Εικόνα 3.9: Φωτογραφία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους Ikhana.....	70
Εικόνα 3.10: Θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων στις πτέρυγες του αεροσκάφους Ikhana .	71
Εικόνα 3.11: Καταγραφή παραμορφώσεων κατά το μήκος των πτερύγων.....	71
Εικόνα 3.12: Η οπτική ίνα (κίτρινου χρώματος) αντικατέστησε όλα τα υπόλοιπα καλώδια.....	71

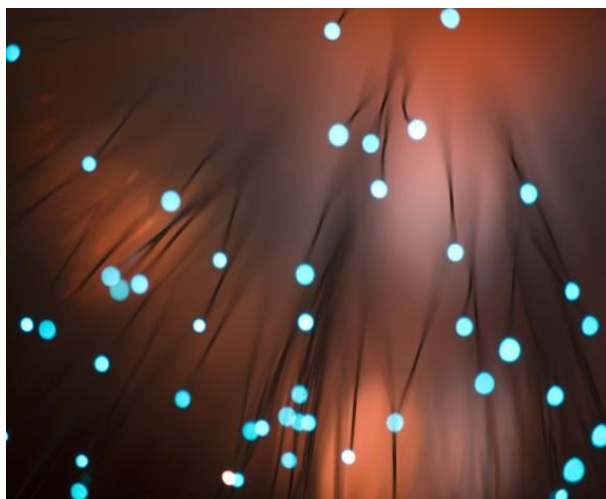
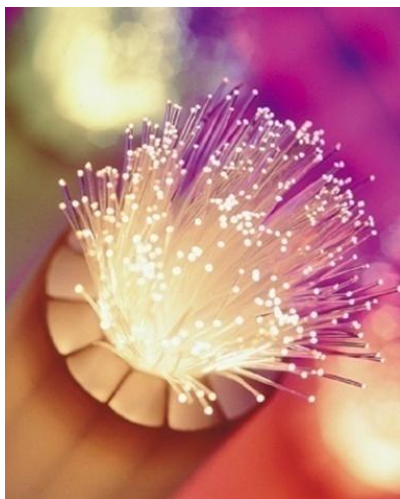
(άσπρου χρώματος)	71
Εικόνα 3.13: Το πετρελαιοφόρο Four Island στο οποίο εγκαταστάθηκε το σύστημα	72
παρακολούθησης.....	72
Εικόνα 3.14: πηνίο Rogowski	74
Εικόνα 3.15: Διάταξη μέτρησης ισχυρών εντάσεων μέσω πηνίου Rogowski και οπτικού συστήματος μετάδοσης.....	74
Εικόνα 3.16: Διάταξη μέτρησης κεραυνικού πλήγματος.....	74
Εικόνα 4.1: Γενική μεθοδολογία επίλυσης αντίστροφων προβλημάτων.....	80
Εικόνα 4.2: Σχεδίαση καννάβου στο πρόγραμμα MATLAB	84
Εικόνα 4.3: Σχεδίαση οπτικών ασητητήρων Bragg στο πρόγραμμα MATLAB	87
Εικόνα 4.4: Διάγραμματική απεικόνιση της παραμόρφωσης των δυο οπτικών ινών	88
Εικόνα 4.6: Πίνακες παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=9$ και $ld=0.9$ με και χωρίς αλλαγή υλικού	89
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα 1 ^{ης} οπτικής ίνας με και χωρίς αλλαγή υλικού.....	90
Εικόνα 4.8: Περιοχή βλάβης στο MATLAB.....	90
Για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα που δείχνει την παραμόρφωση της κάθε οπτικής ίνας και είναι της μορφής αυτής που φαίνεται παρακάτω:	91
Εικόνα 4.9: Παραμόρφωση οπτικής ίνας σε κατάσταση βλάβης.....	91
Εικόνα 4.10: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=5$ και $ld=0.7$	91
Εικόνα 4.11: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=5$ και $ld=0.7$	92
Εικόνα 4.12: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=5$ και $ld=0.7$	92
Εικόνα 4.13: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=5$ και $ld=0.7$	93
Εικόνα 4.14: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$	93
Εικόνα 4.15: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$	94
Εικόνα 4.16: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$	94
Εικόνα 4.17: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$	95
Εικόνα 4.18: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=7$ και $ld=0.3$	95
Εικόνα 4.19: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με $id=7$ και $ld=0.3$	96

Εικόνα 4.20: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=7 και ld=0.3	96
Εικόνα 4.21: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2ης οπτικής ίνας με id=7 και ld=0.3	97
Εικόνα 4.22: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=9 και ld=0.9	97
Εικόνα 4.23: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=9 και ld=0.9	98
Εικόνα 4.24: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=9 και ld=0.9	98
Εικόνα 4.25: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=9 και ld=0.9	99
Εικόνα 4.26: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2	99
Εικόνα 4.27: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2	100
Εικόνα 4.28: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2	100
Εικόνα 4.29: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2	101
Εικόνα 4.30: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=12 και ld=0.8	101
Εικόνα 4.31: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1ης οπτικής ίνας με id=12 και ld=0.8	102
Εικόνα 4.32: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=12 και ld=0.8	102
Εικόνα 4.33: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2ης οπτικής ίνας με id=12 και ld=0.8	103
Εικόνα 4.34: Πίνακας παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=10 και ld=0.6	103
Εικόνα 4.35: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1 ^{ης} οπτικής ίνας με id=10 και ld=0.6	104
Εικόνα 4.36: Πίνακας παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=10 και ld=0.6	104
Εικόνα 4.37: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2 ^{ης} οπτικής ίνας με id=10 και ld=0.6	105
Εικόνα 4.38: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικά id και ld	106
Εικόνα 4.39: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικά id και ld	107
Εικόνα 4.40: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικά id και ld	107
Εικόνα 5.1: ΝΔ προσοτροφοδότησης ενός επιπέδου με πέντε νευρώνες εξόδου	111
Εικόνα 5.2: ΝΔ χωρίς ενός επιπέδου αυτοβρόχους	112
Εικόνα 5.3: Αναδρομικό ΝΔ ενός κρυφού επιπέδου,	113
(α) Κλασσική παράσταση, (β) Παράσταση με σηματογράφημα	113
Εικόνα 5.4: Δομή του k νευρώνα εξόδου	114
Εικόνα 5.5: Γραφική παράσταση της νευρωνικής γενίκευσης	115
(α) Καλή γενίκευση(κατάλληλα προσαρμοσμένα δεδομένα),	115

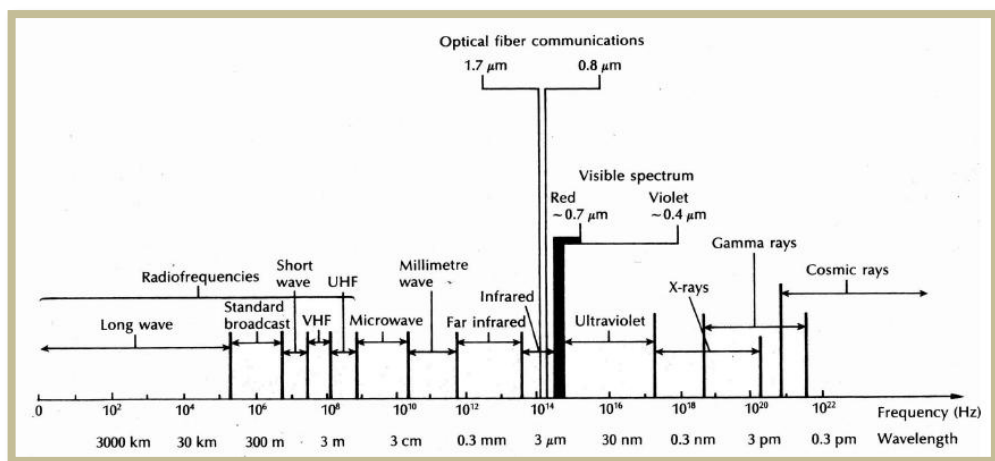
(β) Μη καλή γενίκευση (υπέρ-προσαρμοσμένα δεδομένα)	115
5.14: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για $id=0.7$	151

Εισαγωγή

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα οι οπτικές ίνες έκαναν την εμφάνισή τους χρησιμοποιώντας ως μέσο διάδοσης το φως λόγω της έντονης διάθεσης για την ανάπτυξη επικοινωνίας. Η κατεύθυνση αυτή έγινε ελκυστικότερη αργότερα με την ανακάλυψη των laser διόδων (LD), των διόδων εκπομπής φωτός (LED) και των φωτοδιόδων (photodiodes). Από το 1950 οι Vanheel, Hopkins και Karany ανέπτυξαν ένα ευέλικτο «οπτοσκόπιο» με οπτική ίνα που σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική. Την ίδια περίοδο ο Karany ανέπτυξε μία πρακτική γυάλινη ίνα με ένα είδος επιχρίσματος χρησιμοποιώντας με αυτό τον τρόπο για πρώτη φορά τον όρο οπτική ίνα (fiber optic). Στη πορεία άρχισε εκτεταμένη έρευνα πάνω στις οπτικές ίνες του βαθμιαίου δείκτη διάθλασης και το 1966 οι K.K.Kao και οι G.A. Hockman, ερευνητές στην εταιρεία Standard Telecommunications Laboratories της Αγγλίας πρότειναν ότι η οπτική ίνα θα αποτελούσε τη βάση ενός νέου τηλεπικοινωνιακού μέσου. Έτσι, η ανάγκη για τη μεταφορά φωτός χρησιμοποιώντας καλώδια για επικοινωνία οδήγησε στην εφεύρεση των οπτικών ινών (optical fiber).^[1]

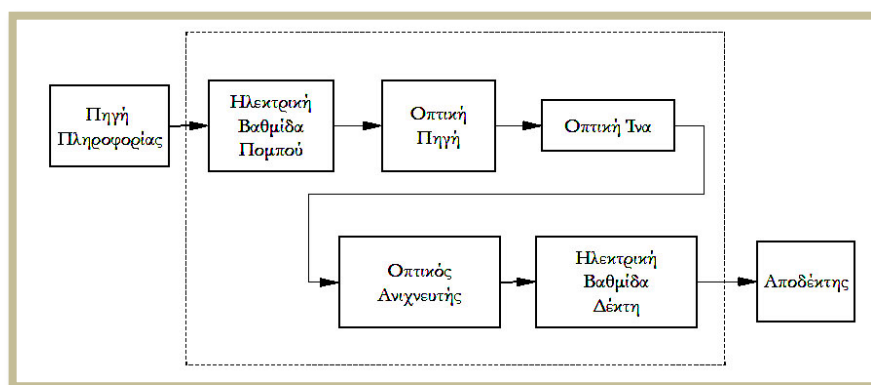


Διαμέσω της, το φως ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή μεταξύ των οπτικών συσκευών ακόμα κι αν οι φακοί αποκλίνουν το φως ενώ επιπροσθέτα οι καθρέπτες το αντανakλούν ενώ υπάρχουν περιπτώσεις που το φως χρειάζεται να ταξιδέψει μέσα από γωνίες. Με σταδιακή βελτίωση της τεχνολογίας οι ρυθμοί μετάδοσης στα 2.5Gb/s έχουν ξεπεραστεί ενώ επίσης μια τυπική τιμή απόσβεσης είναι 0.2dB/km στην περιοχή των 1.5μm. Όσον αφορά τη μετάδοση μέσω οπτικών ινών, τα βασικά πλεονεκτήματά τους έναντι των τυπικών ομοαξονικών καλωδίων αφορούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα καθώς και τις τιμές της υπέρυθρης ακτινοβολίας.



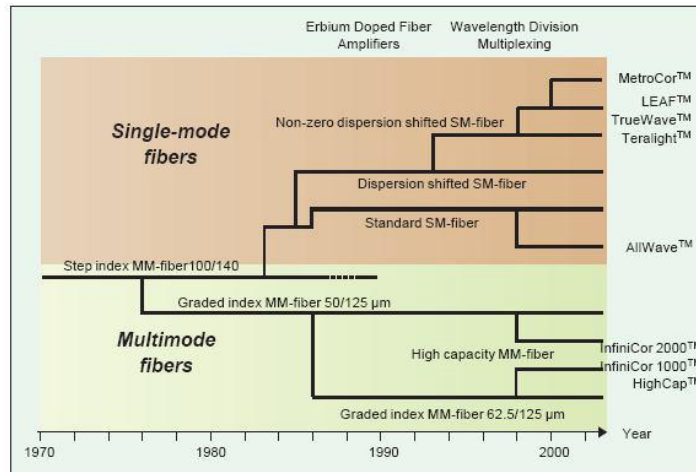
Εικόνα 1.1: Συχνότητες μετάδοσης οπτικών ινών

Η γενική ιδέα είναι ότι η πηγή της πληροφορίας παρέχει ένα ηλεκτρικό σήμα στον πομπό και το ηλεκτρικό σήμα που οδηγείται στην οπτική πηγή μέσω μίας ηλεκτρικής βαθμίδας και εν συνεχεία στην έξοδο του πομπού όπου το οπτικό φέρον εμφανίζεται διαμορφωμένο. Η οπτική πηγή παρέχει την ηλεκτροοπτική μετατροπή και συνήθως είναι κάποια laser διόδου ημιαγωγού (LD) ή LED. Το οπτικό σήμα διαδίδεται μέσα στην οπτική ίνα που αποτελεί το μέσο διάδοσης και καταλήγει σε έναν οπτικό ανιχνευτή (φωτοδίοδος) που παρέχει την οπτοηλεκτρική μετατροπή. Το ηλεκτρικό πια σήμα περνάει από την ηλεκτρική βαθμίδα του δέκτη και στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται φτάνοντας στον τελικό αποδέκτη. Η επεξεργασία της πληροφορίας γίνεται ηλεκτρικά ενώ το σύστημα μπορεί να είναι αναλογικό ή ψηφιακό. ^[2]



Εικόνα 1.2: Σύστημα λειτουργίας της οπτικής ίνας

Η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως γραμμή μεταφοράς στο δίκτυο TAT-8 και η Εικόνα 1.3 παρουσιάζει την ιστορία των οπτικών ινών και την ανάπτυξη των συστημάτων στα οποία χρησιμοποιείται κάθε τύπος ίνας.



Εικόνα 1.3: Ιστορία οπτικών ινών και συστήματα λειτουργίας κάθε τύπου ίνας

Οι οπτικές ίνες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν εκτενώς σε θέματα και προβλήματα ενός μηχανικού. Η περιοδική τακτική επιθεώρηση των κατασκευών και τεχνικών έργων είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της δομικής και λειτουργικής κατάστασής τους, την έγκαιρη διάγνωση βλαβών και την ορθή επιλογή της μεθόδου, της έκτασης και του χρόνου επισκευής τους πριν οι φθορές επηρεάσουν την ακεραιότητα και ασφάλεια τους. Συνεπώς, παρατηρείται ότι υπάρχει η ανάγκη τακτικής επιθεώρησης όλων των δομικών και λειτουργικών στοιχείων μιας κατασκευής μετρώντας μηχανικές παραμέτρους όπως η επιτάχυνση, η μετακίνηση και η παραμόρφωση επιλεγμένων θέσεων και διατομών με δίκτυα επιταχυνσιομέτρων, μετακινησιομέτρων και παραμορφωσιομέτρων. Στόχος της ενόργανης παρακολούθησης της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών υφίσταται μέσω της καταγραφής της πραγματικής στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς τους, η πειραματική αποτίμηση της διαθέσιμης ακαμψίας και αντοχής και η σύγκρισή τους με τις παραδοχές της μελέτης. Επιπλέον η τακτική επανάληψη κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου ενόργανων μετρήσεων έχει σκοπό την παρακολούθηση της εξέλιξης βασικών ιδιοτήτων των κατασκευών και να εντοπίσει και να διαγνώσει εγκαίρως τυχόν απομειώσεις και σημαντικές αλλαγές που είναι πιθανόν να οφείλονται σε δομικές βλάβες. Οι δομικές βλάβες ιδιαίτερα κατά την πρώτη εκδήλωσή τους και στη συνέχεια κατά την εξέλιξη τους είναι πολύ δύσκολο να αξιολογηθούν ως προς τις συνέπειες στη δομική και λειτουργική επάρκεια των δομικών φορέων μόνο με οπτική παρακολούθηση. Για διάφορες κατασκευές μεγάλης επικινδυνότητας (π.χ. γέφυρες, ιστοί, καλωδιοκατασκευές) έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μελέτης της δομικής ακεραιότητας.

Η χρήση τοπικών μετρήσεων όπως της μετακίνησης, ταχύτητας ή επιτάχυνσης σε επιλεγμένα σημεία έχει τα μειονεκτήματά της διότι η ποιότητα των πληροφοριών και οι δυνατότητες που παρέχουν επηρεάζονται πολύ από την επιλογή της θέσης ενώ συνήθως δεν μπορούν να εντοπίσουν βλάβες σε σημεία μακρινά και συνεπώς απαιτούνται πολλές μετρήσεις

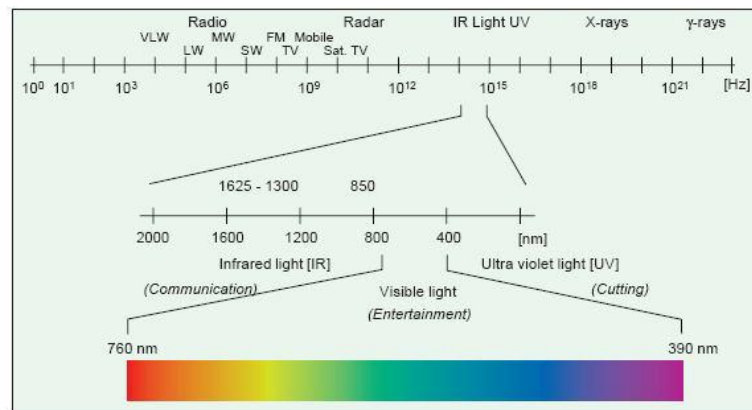
για να καλυφθούν ολόκληρες κατασκευές. Η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων τύπου Bragg οι οποίοι παρέχουν ολοκληρωτική μέτρηση κατά μήκος μιας συγκεκριμένης όδευσης παρέχει περισσότερη πληροφορία μη τοπικού χαρακτήρα, η οποία όμως μένει να αξιοποιηθεί με κατάλληλες μεθόδους επεξεργασίας του μετρούμενου σήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Βασικές Έννοιες Οπτικής και Παράμετροι Οπτικών Ινών

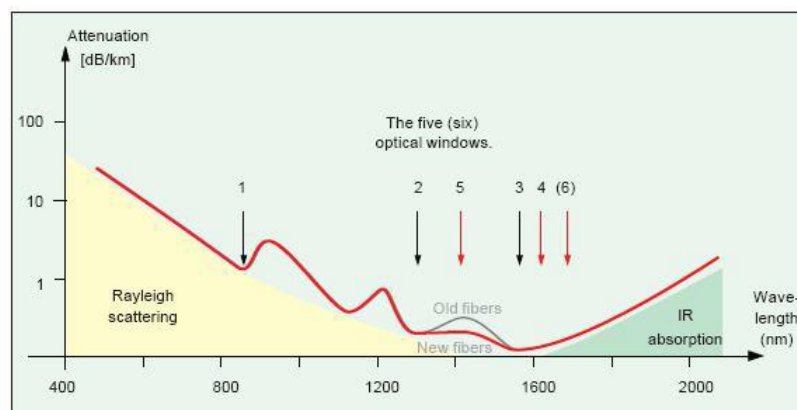
1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Το φως συμπεριφέρεται με διαφορετικούς τρόπους υπό διαφορετικές συνθήκες και για την πλήρη περιγραφή του θα πρέπει να γίνεται χρήση μιας ποικιλίας προσεγγίσεων όπως η γεωμετρική, η κυματική και η κβαντική οπτική. Το φως θεωρείται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα ή ακτινοβολία και διαδίδεται σαν κύμα ομοίως με τα ραδιοσήματα, τις ακτίνες X και την ακτινοβολία γ. Το ορατό φως βρίσκεται στο κομμάτι του φάσματος με μήκος κύματος 390-760nm. Με την έννοια φως γενικά εννοείται μόνο το ορατό που περιλαμβάνει και την υπέρυθρη και υπεριώδη ακτινοβολία και κάθε είδους ακτινοβολία που διαχειρίζεται με φακούς, πρίσματα κ.τ.λ. Αυτό το ευρύτερο φάσμα εκτείνεται από 190(UV) - 2.000nm(IR). ^[2]



Εικόνα 1.4: Φάσμα Συχνοτήτων

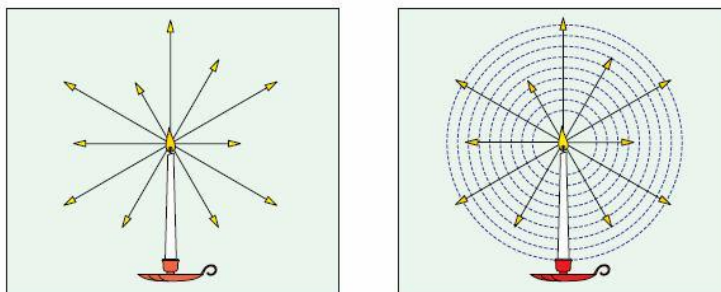
Η διαπερατότητα του γυαλιού της ίνας μπορεί να χωριστεί σε 5 παράθυρα όλα με μειωμένη εξασθένηση φωτός γύρω στα 850,1310,1390,1550,1610nm και στο μέλλον γύρω στα 1700nm.



Εικόνα 1.5: Διαπερατότητα γυαλιού της ίνας

1.2 Γεωμετρική Οπτική

Ο τομέας αυτός μελετά το φως ως αποτέλεσμα πολλών ακτινών που διασκορπίζονται από την πηγή σε ευθείες γραμμές μέσα σε ένα ομογενές περιβάλλον όπως το γυαλί, το νερό, τον αέρα ή το κενό.



Εικόνα 1.6: Γεωμετρική Οπτική

1.2.1 Ανάκλαση

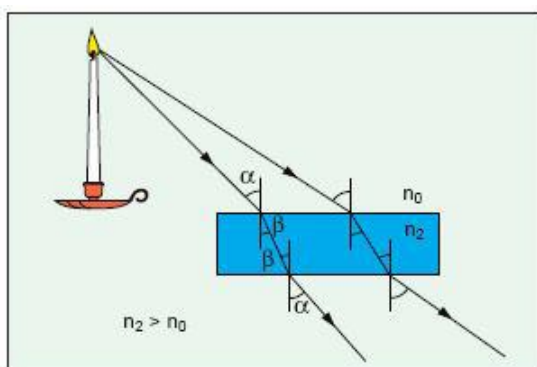
Μια ακτίνα φωτός που χτυπά πάνω σε μια ευθεία επιφάνεια ανακλάται υπό γωνία (από την ανακλώμενη ακτίνα και τον κάθετο άξονα στο σημείο πρόσπτωσης της επιφάνειας) και ισούται με τη γωνία πρόσπτωσης.

$$\text{Νόμος Ανάκλασης: Γωνία πρόσπτωσης}(i) = \text{Γωνία ανάκλασης}(r)$$

1.2.2 Διάθλαση

Μια ακτίνα φωτός διαθλάται υπό διαφορετική γωνία από αυτή της γωνίας πρόσπτωσης (οι γωνίες σχηματίζονται από τις ακτίνες και τον κάθετο άξονα στο σημείο πρόσπτωσης της επιφάνειας). Η διάθλαση ακολουθεί το νόμο του Snell ή αλλιώς νόμο διάθλασης.

$$\text{Νόμος Snell : } n_0 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$



Εικόνα 1.7: Νόμος Snell

Γενικά ο δείκτης διάθλασης n για συνηθισμένα οπτικά μέσα όπως ο αέρας(κενό)=1, νερό=1.33, γυαλί πυριτίου=1.444 και το σύνθετος γυαλί=1.52. Το φως διαθλάται λόγω του

γεγονότος ότι έχει μικρότερη ταχύτητα v σε ένα μέσο με υψηλότερο δείκτη διάθλασης δηλαδή σε πυκνότερο μέσο.

$$v = \frac{c}{n_g} \rightarrow n_g = \frac{c}{v} \rightarrow n_g \geq 1$$

Όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό (299.792.458 m/s). Ο δείκτης διάθλασης n_g εξαρτάται από το μήκος κύματος λ ως εξής:

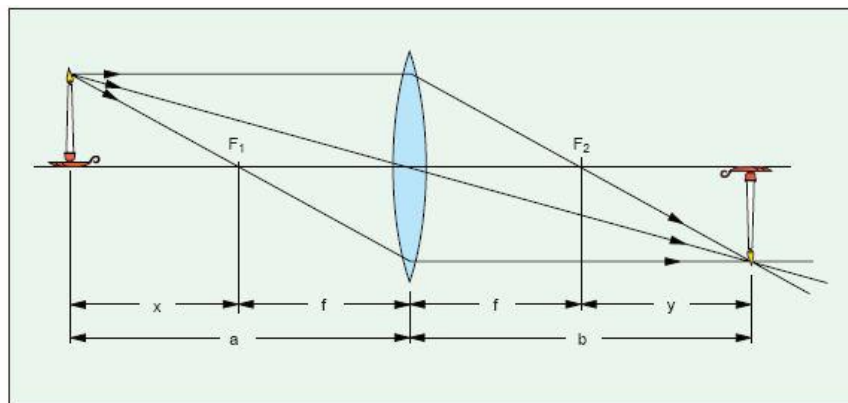
$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

1.3 Διάθλαση μέσα σε φακό

Όταν ακτίνες φωτός από μια πηγή προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός φακού ή ενός κοίλου καθρέπτη ανακλώνται ή διαθλώνται διαφορετικά ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης. Κάτω από τις πιο ιδανικές συνθήκες, οι περισσότερες ακτίνες μπορούν να εστιαστούν σε ένα και μοναδικό σημείο. Αν η πηγή βρίσκεται πολύ μακριά ή οι ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους ή και τα δύο το φως θα συγκεντρωθεί στο σημείο εστίασης (F) του φακού ή του καθρέπτη. Η απόσταση μεταξύ του κεντρικού σημείου του φακού και του σημείου εστίασης ονομάζεται πλάτος εστίασης (f).

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$x \cdot y = f^2$$



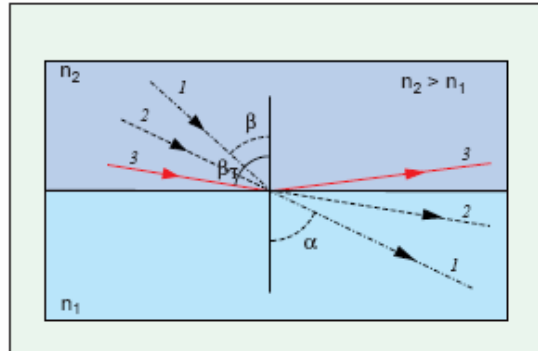
Εικόνα 1.8: Διαθλαση μέσα σε φακό

1.4 Ολική ανάκλαση

Αν μια ακτίνα που ταξιδεύει σε ένα πυκνό οπτικό μέσο n_2 πέσει σε μια διαχωριστική επιφάνεια ενός λιγότερο πυκνού μέσου n_1 ($n_2 > n_1$) και η γωνία πρόσπτωσης αυξηθεί τότε η

γωνία ανάκλασης θα πλησιάσει τις 90° . Αν η γωνία πρόσπτωσης ξεπεράσει την οριακή τιμή κατά την οποία η γωνία ανάκλασης είναι 90° τότε θα κάνει την εμφάνιση του το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης.

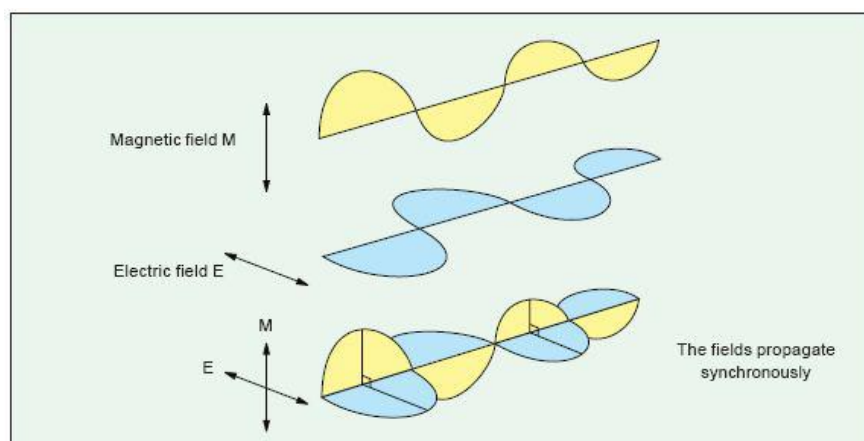
$$n_2 \sin \beta = n_1 \sin 90^\circ \Rightarrow \sin \beta = n_1 / n_2$$



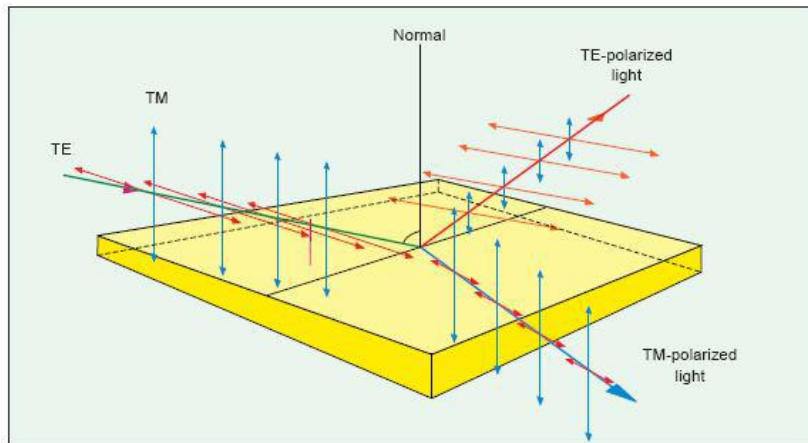
Εικόνα 1.9: Ολική Ανάκλαση

1.5 Ανάκλαση φωτός με γωνία πρόσπτωσης 90° (Νόμος Fresnel)

Ακόμα και όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια υπό γωνία 90° δεν μπορεί να τη διαπεράσει πλήρως γιατί μία μικρή ποσότητα φωτός πάντα ανακλάται. Το φως μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα κύμα αποτελούμενο από δυο πεδία κάθετα μεταξύ τους: ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό. Στο συνηθισμένο φως υπάρχουν άπειρα κάθετα μεταξύ τους πεδία που διαδίδονται προς την κατεύθυνση που ταξιδεύει το φως. Λόγω της ανάκλασης και της διάθλασης το φως μπορεί να πολωθεί. Το φως στο οποίο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει αμετάβλητη καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώνεται ονομάζεται TE-πολωμένο φως. Το φως στο οποίο η ένταση του μαγνητικού πεδίου παραμένει αμετάβλητη καθώς μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται TM-πολωμένο φως.



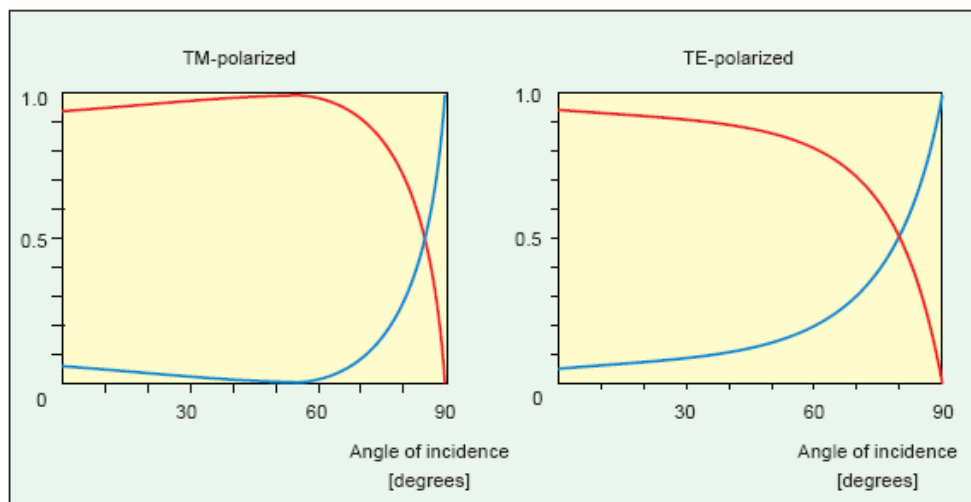
Εικόνα 1.10: Νόμος Fresnel



Εικόνα 1.11: Νόμος Fresnel

Οι δυο τύποι πόλωσης έχουν κατά κάποιο τρόπο διαφορετικούς συντελεστές ανάκλασης (νόμος ανάκλασης Fresnel). Η ένταση του ανακλώμενου φωτός αυξάνεται από 4-100% καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται από 0-90° και για τις δυο πολώσεις. Για TM-πόλωση όμως η ένταση αρχικά μειώνεται από 4-0% πριν αυξηθεί ξανά 26-100%. Η γωνία στην οποία η TM-ανάκλαση είναι μηδέν ονομάζεται γωνία Brewster. Ο συντελεστής ανάκλασης για γωνία πρόσπτωσης 90° δίνεται από τον τύπο του Fresnel:

$$R_0 = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$$

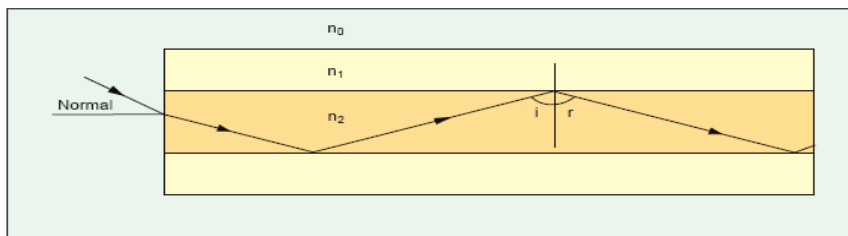


Εικόνα 1.12: Συντελεστές ανάκλασης για TM και TE polarized

Σε άλλες γωνίες, ο τύπος γίνεται αρκετά πολύπλοκος (κρύσταλλο χαλαζία με $n=1.46$ ο συντελεστής ανάκλασης είναι 3.5% στον αέρα ενώ για ειδικό γυαλί με $n=1.81$ ο συντελεστής ανάκλασης είναι 8.3%. Για το πυρίτιο που χρησιμοποιείται σαν οπτικό υλικό για IR φως, ο συντελεστής ανάκλασης είναι 31% με $n=3.5$. Από το πυρίτιο προς τον αέρα η κρίσιμη γωνία είναι 43.5°).

1.6 Ολική ανάκλαση μέσα σε οπτική ίνα

Η αρχή διάδοσης του φωτός μέσα σε μια οπτική ίνα βασίζεται στην αρχή της ολικής ανάκλασης. Μέσα σε μια οπτική ίνα υπάρχουν δυο μέσα διάδοσης (ο πυρήνας και ο μανδύας) με δείκτες διάθλασης που διαφέρουν ελάχιστα. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι $n_1 = 1.47$ και $n_2 = 1.46$ που δίνουν κρίσιμη γωνία $i = 83.8^\circ$.



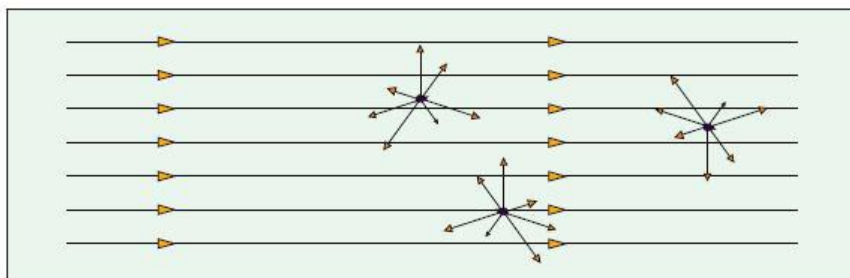
Εικόνα 1.13: Βασική λειτουργία της μεθόδου των οπτικών ινών.

1.7 Σκέδαση Rayleigh και φως Tyndall

Σε ένα άμορφο υλικό όπως είναι το γυαλί, η πυκνότητα του υλικού δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του. Υπάρχουν σημεία στα οποία εμφανίζονται τοπικές αλλαγές στην πυκνότητα και το ίδιο υφίσταται και στα αέρια και υγρά. Επιπλέον, δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα απολύτως καθαρό υλικό. Το γυαλί δεν πρόκειται ποτέ να είναι διάφανο 100%. Μια ακτίνα που ταξιδεύει μέσα σε ένα τέτοιο υλικό θα σκεδαστεί προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό που ονομάζεται σκέδαση Rayleigh οφείλεται στην παρουσία μικρών σωματιδίων στα οποία προσπίπτει το φως και σκεδάζεται προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις. Το φως που δημιουργείται λόγω αυτής της σκέδασης ονομάζεται φως Tyndall. Η υδροξυλομάδα (OH^-), τα ιόντα μετάλλων προκαλούν το παραπάνω φαινόμενο μέσα σε μια οπτική ίνα. Η σκέδαση του φωτός (S) είναι ανάλογη του μήκους κύματος (λ) ως εξής:

$$S \propto 1/\lambda^4$$

Η σκέδαση Rayleigh παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του μήκους κύματος στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών γιατί όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η σκέδαση Rayleigh. Μεγάλα σωματίδια όπως η σκόνη σκεδάζουν το φως σε μικρότερες γωνίες. Αν το σωματίδιο είναι αρκετά μεγάλο ενδέχεται να λειτουργήσει σαν καθρέπτης και να ανακλάσει το φως προς τα πίσω.



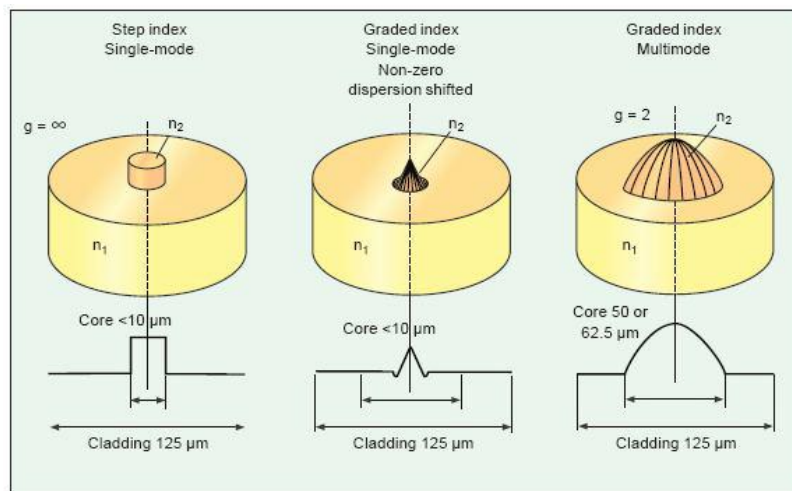
Εικόνα 1.14: Σκέδαση Rayleigh

1.8 Παράμετροι

Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού κυματοδηγού, αν θεωρηθεί σαν συνάρτηση της ακτίνας του τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο όρος «προφίλ δείκτη» που υποδηλώνει τον τρόπο που άγεται το φως μέσα στον κυματοδηγό. Το προφίλ δείκτη παρουσιάζει την αλλαγή της τιμής του δείκτη από τον κεντρικό άξονα του κυματοδηγού προς την περιφέρειά του ή την επένδυσή του. Ο δείκτης διάθλασης δίνεται συναρτήσει της ακτίνας: ^[3]

$$n = n(r)$$

Ο τρόπος μετάδοσης του φωτός μέσα σε κυματοδηγό εξαρτάται από το προφίλ του δείκτη διάθλασης.



Εικόνα 1.15: Τρόπος μετάδοσης φωτός ανα προφίλ του δείκτη διάθλασης

Ο δείκτης διάθλασης μέσα σε μια ίνα περιγράφεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο και η βασική χρήση του τύπου είναι για πρακτικές εφαρμογές και ειδικά για εφαρμογές με πολύτροπες ίνες. ^[10]

$$n(r) = n_2 [1 - \Delta(r/a)^g]$$

Ενώ για την επένδυση του πυρήνα δηλαδή τον μανδύα της οπτικής ίνας ισχύει ότι ο δείκτης διάθλασης παραμένει σταθερός και ίσος με n_1 . Για τον παραπάνω τύπο ισχύει:

n_2 : Δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας.

Δ : Σχετική διαφορά στους δείκτες διάθλασης μεταξύ πυρήνα και μανδύα (επένδυσης)

$$\{\Delta = (n_2 - n_1)/n_2\}.$$

r : Απόσταση από τον κεντρικό άξονα της ίνας σε μm .

A : Ακτίνα του πυρήνα σε μm .

g : Προφίλ δείκτη.

n_1 : Δείκτης διάθλασης του μανδύα.

Ο όρος Δ συνδέεται με το αριθμητικό άνοιγμα (NA) ή με τους δείκτες διάθλασης n_1 , n_2 ως εξής:

$$\Delta = \text{NA}^2 / 2n_2^2 = n_2^2 - n_1^2 / 2n_2^2 = n_2 - n_1 / n_2 \text{ για } \Delta \ll 1$$

Για το προφίλ δείκτη «g» υπάρχουν κάποιες ειδικές περιπτώσεις όπως:

- $g=1$ για τριγωνικό προφίλ δείκτη.
- $g=2$ για παραβολικό προφίλ δείκτη.
- $g=\infty$ για ορθογώνιο βηματικό προφίλ δείκτη.

Μόνο στην τελευταία περίπτωση ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός $n(r)=n_2$ για όλη τη διάμετρο του πυρήνα. Στις άλλες περιπτώσεις, ο δείκτης διάθλασης αλλάζει βαθμιαία από τον κεντρικό άξονα του πυρήνα προς τον μανδύα. Επίσης, βαθμιαία προφίλ δείκτη ονομάζονται τα προφίλ στα οποία ο δείκτης διάθλασης αλλάζει και ο πιο συνηθισμένος τύπος βαθμιαίου προφίλ δείκτη είναι για $g=2$ (παραβολικό) που αναφέρεται σε μια τέλεια αγωγήμη πολύτροπη ίνα.^[10]

1.8.1 Ρυθμοί Διάδοσης (Modes)

Οι ρυθμοί διάδοσης αποτελούν μαθηματικές και φυσικές μεθόδους περιγραφής της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αυθαίρετο μέσο. Η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών διάδοσης προέρχεται από τις εξισώσεις Maxwell. Ο James Clark Maxwell ήταν Σκωτσέζος μαθηματικός και φυσικός που έζησε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και με τις εξισώσεις του απέδειξε ότι η ηλεκτρική και η μαγνητική ενέργεια αποτελούν δυο μορφές της ίδιας ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, καθώς επίσης ότι η διάδοση ακολουθεί αυστηρούς κανόνες που αποτελούν τη βάση της θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού.

Ένας ρυθμός διάδοσης σποτελεί μια δεκτή λύση των εξισώσεων Maxwell και ο ακριβής αριθμός των δυνατών ρυθμών διάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει μια ίνα καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας και από τις οπτικές παραμέτρους της μεταφέροντας παράλληλα και ένα χαρακτηριστικό ποσό ενέργειας. Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα μπορεί να υποστηρίξουν μόνο ένα ρυθμό μετάδοσης (μονότροπες ίνες) ή να υποστηρίξουν αρκετές εκατοντάδες ρυθμούς διάδοσης (πολύτροπες ίνες). Ανάλογα με το μονοπάτι διάδοσης, η ενέργεια θα μεταφερθεί και θα διαχωριστεί στους διάφορους ρυθμούς διάδοσης (mode coupling) μέχρι ο καθένας από αυτούς να μεταφέρει το δικό του χαρακτηριστικό ποσό ενέργειας. Όταν το φως φτάσει στο παραπάνω στάδιο δημιουργείται και διατηρείται μια ισορροπία μεταξύ των ρυθμών διάδοσης.^[11]

1.8.1.1 Ομαλοποιημένη συχνότητα και ρυθμοί διάδοσης

Ένα σημαντικό μέτρο διάκρισης των διαφορετικών τύπων οπτικών ινών, είναι η ομαλοποιημένη συχνότητα (V) και ο αριθμός των ρυθμών διάδοσης (N). Αν:

a : η ακτίνα του πυρήνα [μm].

NA : το αριθμητικό άνοιγμα.

λ : το μήκος κύματος [μm].

k : ο αριθμός μηκών κύματος φωτός ανά μήκος 2π .

Η ομαλοποιημένη συχνότητα δίνεται από τον τύπο:

$$V=2\pi(a/\lambda)NA=k a NA$$

Ο αριθμός των ρυθμών διάδοσης που έχουν τη δυνατότητα να περάσουν μέσα από τον πυρήνα μιας ίνας εξαρτάται από την παράμετρο V και για μια ίνα βηματικού δείκτη μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο :

$$N=(V^2/2)*(g/g+2)$$

Για μια ίνα με βηματικό δείκτη και $g=\text{άπειρο}$, ο αριθμός N των ρυθμών διάδοσης μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο:

$$N=V^2/2$$

Για μια ίνα με βαθμιαίο δείκτη και $g=2$ (συνήθης ίνα παραβολικού βαθμιαίου δείκτη) ο αριθμός N προσεγγίζεται από τον τύπο :

$$N=V^2/4$$

Αν ζητείται η μείωση του αριθμού των ρυθμών διάδοσης και κατ' επέκταση της παραμέτρου V τότε κάποιες από τις παραμέτρους θα πρέπει να μεταβληθούν ώστε να δημιουργηθεί μια μονότροπη ίνα:

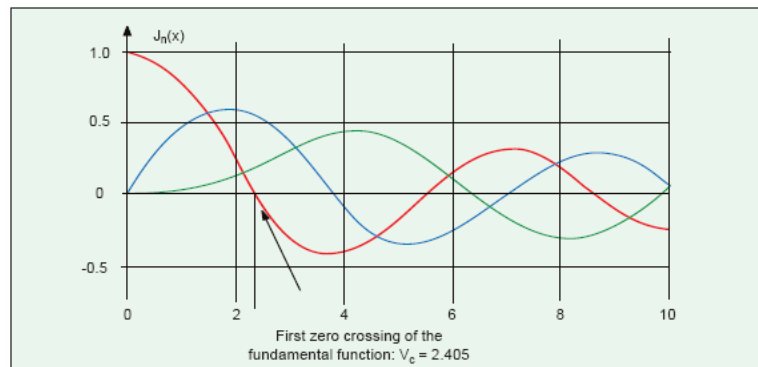
- Να μικρύνει η διάμετρος του πυρήνα.
- Να μικρύνει το αριθμητικό άνοιγμα.
- Να μεγαλώσει το μήκος κύματος του φωτός.

Οι αλλαγές αυτές όμως συνοδεύονται από ένα πλήθος περιπλοκών και εντέλει είναι δυσκολότερο και οικονομικά ασύμφορο να κατασκευαστούν διοδικά laser, LED και φωτοδιόδοι που να έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν μεγαλύτερα μήκη κύματος.

1.8.1.2 Ρυθμός LP01 – Θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης και αποκοπής

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μετάδοση φωτός με μοναδικό τρόπο, ο θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης θα πρέπει $V \leq 2.405 = V_c$, μέσα σε μια ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη ($g=\infty$). Μία ίνα που ικανοποιεί τον προηγούμενο περιορισμό ονομάζεται μονότροπη ίνα. Η σταθερά $V_c=2.405$ αποτελεί την τιμή x η οποία λαμβάνεται όταν ο θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης της συνάρτησης Bessel $J_0(x)$ μηδενίζεται για πρώτη φορά. Στη σταθερά V_c το c δηλώνει το μήκος κύματος αποκοπής. Αν επιθυμείται να υπολογιστεί το μήκος κύματος αποκοπής, η τιμή της V_c πρέπει να υπολογιστεί για το προφίλ δείκτη της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί. Για μονότροπη ίνα ισχύει $V_c=2.405$. Το μήκος κύματος αποκοπής δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_c = \pi(2a/V_c)NA = \pi(2a/2.405)NA$$



Εικόνα 1.16: Ρυθμός LP01

Έτσι, μόνο ένας ρυθμός μπορεί να διαδίδεται μέσα στον κυματοδηγό για μήκη κύματος μεγαλύτερα ή ίσα με το λ_c . Επίσης, η αποκοπή είναι συνάρτηση διαφόρων γεωμετρικών μεταβλητών. Κάτω από πραγματικές συνθήκες οι μεταβλητές αυτές επηρεάζονται. Για αυτό το λόγο κατά τη διάρκεια κατασκευής μίας οπτικής ίνας συνήθως καθορίζονται η θεωρητική αποκοπή, η αποκοπή της οπτικής ίνας και η αποκοπή του καλωδίου. Η αποκοπή καλωδίου είναι η μικρότερη και εγγύαται μονότροπη λειτουργία όταν ικανοποιούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι ρυθμοί διάδοσης συμπεριλαμβανομένου και του θεμελιώδη ρυθμού, στην πραγματικότητα αποτελούνται από δυο ρυθμούς διάδοσης οι οποίοι ταλαντώνονται κάθετα μεταξύ τους.^[10]

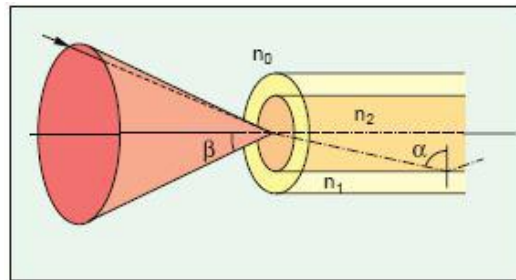
1.8.2 Αριθμητικό άνοιγμα

Όταν το φως εισέρχεται σε μια οπτική ίνα διαθλάται σε σχέση με τον κεντρικό άξονα, δημιουργώντας μια κάπως μεγαλύτερη τιμή για τη γωνία πρόσπτωσης και τη γωνία αποδοχής.

Η τιμή του ημιτόνου της γωνία αποδοχής ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα (NA) και υπολογίζεται σαν συνάρτηση των δεικτών διάθλασης των δυο υλικών:

$$\sin\beta = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

Στην πραγματικότητα το άνοιγμα μέσω του οποίου εισέρχεται το φως μέσα στην ίνα είναι τριών διαστάσεων. Έτσι, η γωνία αποδοχής είναι η γωνία ενός κώνου και ονομάζεται κώνος αποδοχής. Στην πραγματικότητα το άνοιγμα μέσω του οποίου εισέρχεται το φως μέσα στην ίνα είναι τριών διαστάσεων.



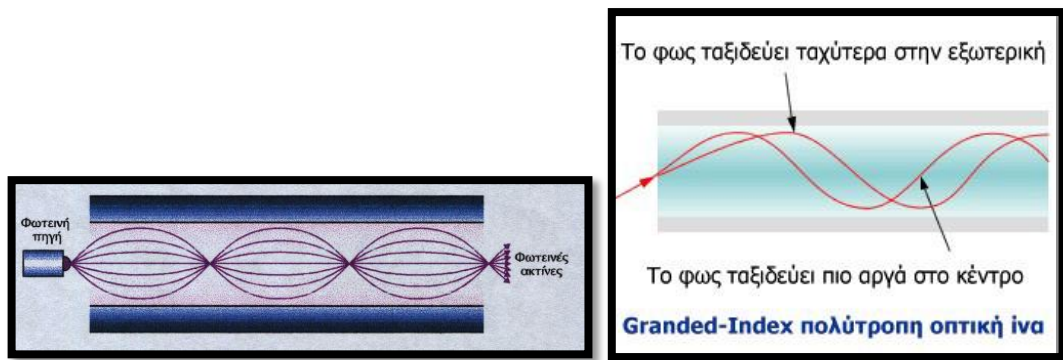
Εικόνα 1.17: Κώνος αποδοχής

1.8.2.1 Αριθμητικό άνοιγμα για ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη

Λόγω του ότι ο δείκτης διάθλασης σε μια ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη αλλάζει σε σχέση με την απόσταση από τον κεντρικό άξονα της ίνας $n(r)$, η γωνία αποδοχής του φωτός που εισέρχεται στην ίνα αλλάζει επίσης. Έτσι η γωνία αποδοχής δίνεται συνάρτησι της απόστασης r :

$$\sin\beta(r) = \sqrt{n_2^2(r) - n_1^2} = NA \sqrt{1 - (r/a)^2} \leq NA$$

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία αποδοχής πλησιάζει πολύ τον κεντρικό άξονα της ίνας καθώς μειώνεται βαθμιαία η τιμή προς τον μανδύα. Με μια πιο ενδελεχή μελέτη, παρατηρείται ότι μια ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη και διάμετρο 50μm δέχεται μόνο τη μισή ποσότητα φωτός από εκείνη που θα δεχόταν μια ίνα με την ίδια διάμετρο αλλά με βηματικό προφίλ δείκτη. Η κατανομή των ρυθμών μετάδοσης είναι τέτοια ώστε οι χαμηλής τάξης ρυθμοί να διαδίδονται κοντά στον κεντρικό άξονα, οι υψηλής τάξης ρυθμοί να διαδίδονται κοντά στο μανδύα ενώ κάποιοι ρυθμοί να χάνονται μέσα στο μανδύα. Οι τελευταίοι ρυθμοί ονομάζονται ρυθμοί διαρροής και κατά ένα βαθμό ακτινοβολούνται και κατά ένα άλλο διαδίδονται μέσα στην ίνα.



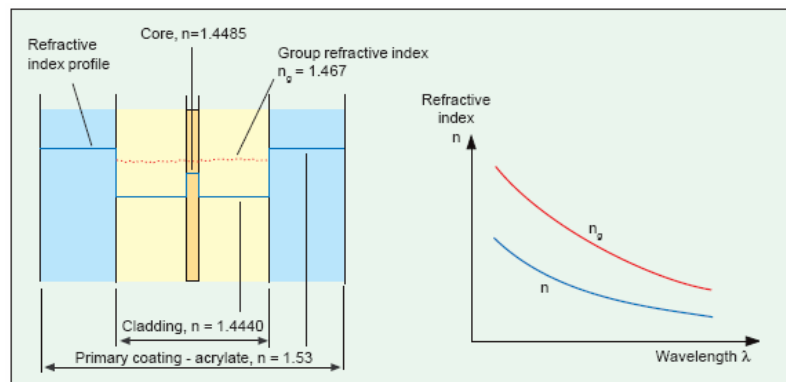
Εικόνα 1.18: Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη

1.8.3 Δείκτης διάθλασης ομάδας

Όταν ένας παλμός φωτός μεταδίδεται μέσα σε ένα μέσο χρησιμοποιείται μία διαφορετική παράμετρος που ονομάζεται δείκτης διάθλασης ομάδας. Για μια τυπική ίνα για την οποία οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα, του μανδύα και του βασικού επιστρώματος διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους, ο δείκτης διάθλασης ομάδας θα είναι κάπως μεγαλύτερος από εκείνο του πυρήνα. Το παραπάνω γεγονός υπάρχει πάντοτε όταν χρησιμοποιείται ένα οπτικό όργανο όπως το OTDR αφού η λειτουργία του βασίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός μέσα στο εξεταζόμενο μέσο. Η ταχύτητα κάθε παλμού φωτός μέσα σε μια ίνα δίνεται από τον τύπο:

$$V=c/n_g \rightarrow n_g=c/v \quad n_g=n-\lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

Όπου v είναι η ταχύτητα του παλμού του φωτός μέσα στην ίνα, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n_g ο δείκτης διάθλασης ομάδας της ίνας.

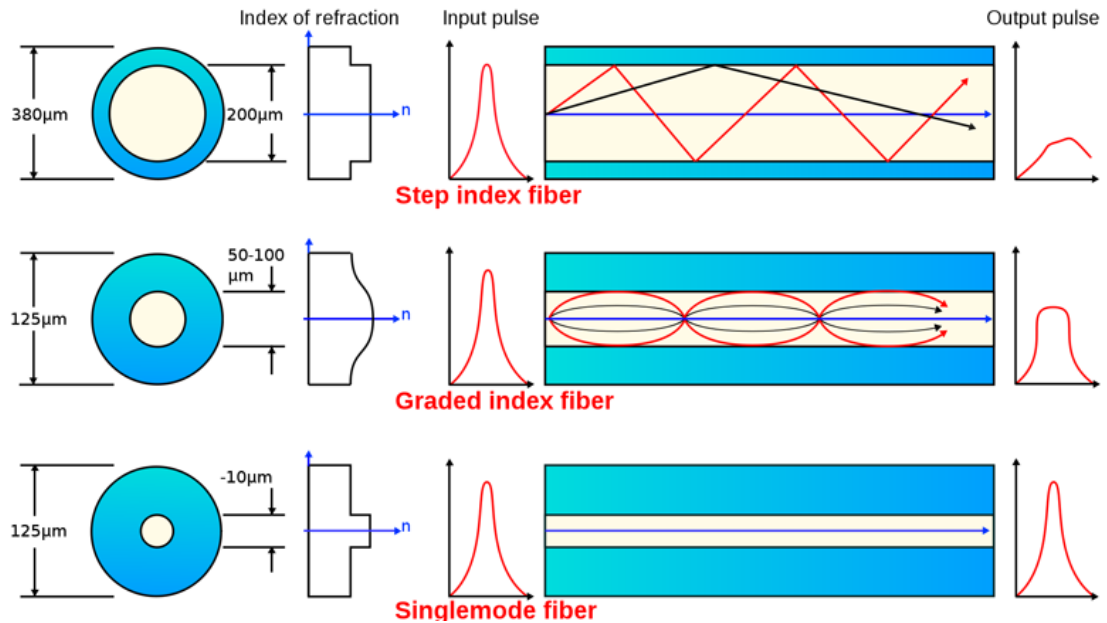


Εικόνα 1.19: Δείκτης διάθλασης ομάδας

1.8.4 Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης

Ο όρος διάμετρος πεδίου τρόπου $2w_0$ εισήχθη στην οπτική ινών προκειμένου να περιγράψει την ακτινική διάδοση του θεμελιώδους ρυθμού διάδοσης LP01 μέσα σε μια ίνα. Για να παραχθεί μια ίνα με χαμηλή εξασθένηση (step index fiber) ή αλλιώς μια ίνα με βηματικό

προφίλ δείκτη που επιτρέπει τη διάδοση του θεμελιώδους ρυθμού μόνο σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1200nm, η διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης $2w_0$ μειώνεται στα 9μm περίπου. Επιπλέον, ένας από τους βασικότερους διαχωρισμούς είναι ο αριθμός των καταστάσεων που μπορεί να υποστηρίξει μια οπτική ίνα. Διαχωρίζονται σε δύο ομάδες, τις μονότροπες ή μονής κατάστασης (single mode) και τις πολύτροπες ή πολλών καταστάσεων (multimode). Μια ίνα που επιτρέπει τη διάδοση μόνο του θεμελιώδους ρυθμού διάδοσης ονομάζεται μονότροπη ίνα.



Εικόνα 1.20: Είδη οπτικών ινών, ανάλογα με την κατάσταση τους (mode)

1.8.5 Αποτελεσματική περιοχή

Ένα μεγάλο μειονέκτημα της ίνας αυτής είναι ότι με τη χρήση της μειώνεται η αποτελεσματική περιοχή του πυρήνα. Η περιοχή αυτή αποτελεί το «κομμάτι» του πυρήνα που οδηγεί το φως μέσα στην ίνα και σχετίζεται αλλά δεν ισούται με τη διάμετρο του πεδίου του ρυθμού διάδοσης. Η αποτελεσματική περιοχή μιας συνηθισμένης μονότροπης ίνας είναι περίπου 80μm² και για μια αντίστοιχη ίνα μετατοπισμένης διασποράς είναι 55μm². Με τη χρήση των νέων laser υψηλής ισχύος μετάδοσης και των ενισχυτών EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers) η εισερχόμενη ισχύς στο σύστημα δημιούργησε αρκετά ανεπιθύμητα μη γραμμικά φαινόμενα.^[11]

1.8.6 Διασπορά

Το φως που ταξιδεύει μέσα σε ένα κυματοδηγό υπόκειται παραμόρφωση. Το εκπεμπόμενο φως διευρύνεται στο πεδίο του χρόνου και το φαινόμενο ονομάζεται διασπορά στον τομέα της οπτικής των οπτικών ινών. Υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη διασποράς:

- Η intermodal διασπορά που εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες (modal).
- Η intramodal διασπορά (χρωματική) που εμφανίζεται στις μονότροπες και στις πολύτροπες ίνες.

1.8.6.1 Intermodal διασπορά ή modal διασπορά

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υποπαλμών όπου ο καθένας διαθέτει μία χαρακτηριστική γωνία πρόσπτωσης μέσα στην ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διαφέρει λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Έτσι οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα φτάνουν στο τέλος της ίνας με ελάχιστα διαφορετικούς χρόνους. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιγραφεί ως διεύρυνση του παλμού λόγω αύξησης της διάρκειας του. Η modal διασπορά προκαλεί προβλήματα όσον αφορά τη μείωση του εύρους μετάδοσης (Mbit/s) καθώς επίσης και τη μείωση της απόστασης μετάδοσης.^[4]

Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της modal διασποράς μέσα σε μια ίνα. Ο κάθε ρυθμός διάδοσης μεταφέρει ενέργεια από και προς κάποιον άλλο. Οι ρυθμοί χαμηλής τάξης (ρυθμοί με μικρή γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετατρέπονται σε ρυθμούς υψηλής τάξης (ρυθμοί με μεγάλη γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετά τη μεταφορά ενέργειας. Το mode coupling λαμβάνει χώρα περισσότερο σε σημεία «μη καθαρότητας» του πυρήνα, σε κολλήσεις (splices) και σε απότομα λυγίσματα της οπτικής ίνας. Στις σύγχρονες ίνες ήταν δυνατό να μειωθεί το mode coupling, βελτιώνοντας την ποιότητα της ίνας. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την ουσιαστική αδρανοποίηση του παράγοντα διαφοράς του χρόνου δt. Η διαφορά αυτή δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους της ίνας αλλά σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\delta t = \sqrt{\text{fiber length}(L)}$$

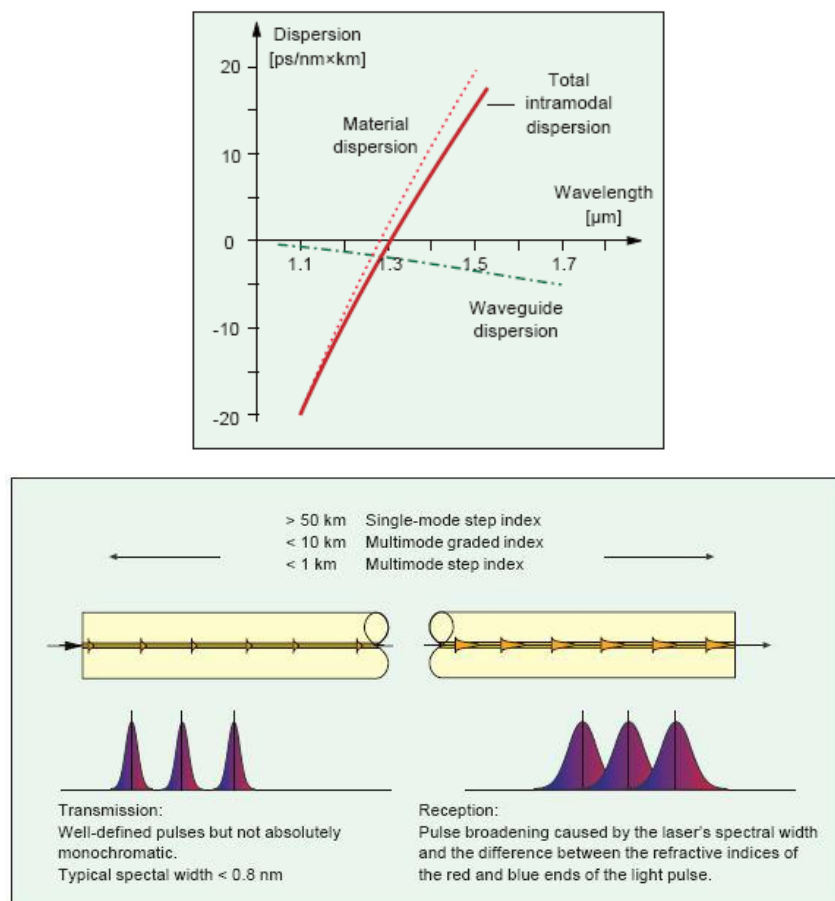
Η modal διασπορά μπορεί να αδρανοποιηθεί πλήρως, μειώνοντας τη διάμετρο του πυρήνα έτσι ώστε να διαδίδεται μέσα στην ίνα μόνο ο θεμελιώδης ρυθμός (μονότροπη οπτική ίνα).

1.8.6.2 Intramodal διασπορά ή χρωματική διασπορά

Ακόμα και αν αδρανοποιηθεί πλήρως η modal διασπορά θα συνεχίσει να υπάρχει διασπορά του συγκεκριμένου ρυθμού. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται χρωματική διασπορά μαζί με διασπορά πόλωσης ρυθμού μετάδοσης. Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310nm όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν. Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά

είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνο αν αλλάξουμε τη σύσταση του γυαλιού στον πυρήνα και στο μανδύα της ίνας.

Ο πρωτεύων λόγος εμφάνισης του φαινομένου της χρωματικής διασποράς είναι η πηγή διάδοσης του φωτός. Τα laser δεν είναι 100% μονοχρωματικά, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε παλμός που διαδίδεται περιέχει φως που ξεφεύγει από το κόκκινο και μπλε όριο (άνω και κάτω όριο) του φάσματος του συγκεκριμένου μήκους κύματος που χρησιμοποιείται. Ο παράγοντας αυτός καλείται φασματικό εύρος και για εμβέλεια μήκους κύματος 1–1.5μm, μια δίοδος laser έχει φασματικό εύρος 0.1–1nm ενώ ένα LED 50–100nm. Η χρωματική διασπορά είναι μηδέν ή περίπου μηδέν κοντά στα 1310nm για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα. Η ελάχιστη εξασθένηση της ίνας λαμβάνει χώρα γύρω στα 1550nm. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην κατασκευή ειδικών ινών, των οποίων το σημείο μηδενισμού της χρωματικής διασποράς έχει μετατοπιστεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.



Εικόνα 1.21: Χρωματική διασπορά

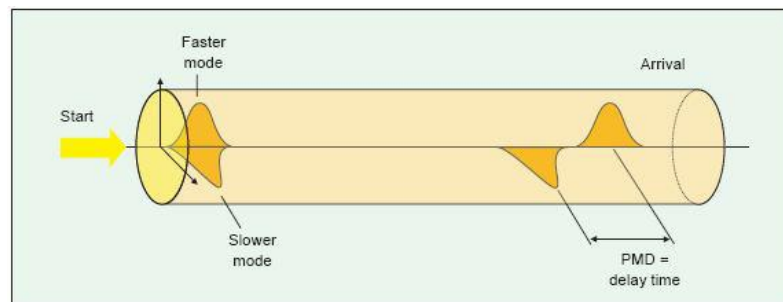
1.8.6.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)

Η μονότροπη διάδοση δεν είναι ποτέ στην πραγματικότητα μονότροπη. Υπάρχουν πάντα δυο ρυθμοί διάδοσης. Όταν το φως εισέρχεται στην ίνα από το laser, τα πεδία αυτά είναι

σύγχρονα και κάθετα μεταξύ τους. Κάθε ένα από αυτά τα πεδία αποτελεί διαφορετική πόλωση. Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης στο τέρμα της ίνας των δυο αυτών ρυθμών διαφορετικής πόλωσης, ονομάζεται διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης ή PMD και είναι της τάξης των psec. Μετρώντας για ένα χιλιόμετρο ο παράγοντας PMD μιας ίνας έχει μονάδα ps/√km. Κάποιες από τις πρώτες οπτικές ίνες και κάποιες ίνες χαμηλής ποιότητας που κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα έχουν παράγοντα PMD μέχρι και 6 ps/√km ενώ ίνες υψηλής ποιότητας έχουν παράγοντα μικρότερο από 0.2. Οι οργανισμοί τυποποίησης προτείνουν ο παράγοντας PMD μιας ίνας να μην ξεπερνά το 1/10 της περιόδου bit. Αυτό μεταφράζεται σε μέγιστο PMD 40ps για σύστημα 2.5Gbit/s και 10ps για σύστημα 10Gbit/s. Για μια ζεύξη 400km οι τιμές PMD είναι :

- $40/\sqrt{400} = 2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ για σύστημα 2.5 Gbit/s.
- $10/\sqrt{400} = 0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ για σύστημα 10 Gbit/s.

Η τιμή 0.5 είναι η τυποποιημένη τιμή που απαιτείται για οπτικά καλώδια ζεύξης. Νέες απαιτήσεις για υψηλότερα bit rate θα είναι 0.1 για σύστημα 40Gbit/s.



Εικόνα 1.22: Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης

1.8.7 Μη γραμμικά φαινόμενα

Τα μη γραμμικά φαινόμενα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

- Διεγερόμενης σκέδασης.
- Διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης.

Τα επίπεδα ισχύος στα οποία εμφανίζονται τα μη γραμμικά φαινόμενα ονομάζονται «κατώτατα όρια».

1.8.7.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin, SBC

Η διεγερόμενη σκέδαση Brillouin είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ ακουστικών κυμάτων και κυμάτων φωτός μέσα στην οπτική ίνα. Κάποιο ποσοστό του διαδιδόμενου φωτός διαδίδεται ξανά προς τα πίσω με αποτέλεσμα να «κλέβει» ισχύ από το εμπρός διαδιδόμενο φως. Έτσι μειώνεται η ισχύς που φτάνει στο δέκτη. Η SBC εμφανίζεται για ισχύ εισόδου 6–20dBm.

1.8.7.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman, SRS

Η διεγερόμενη σκέδαση Raman είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των δονήσεων των μορίων της ίνας. Η SRS σκεδάζει το φως και προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Η μετάδοση ισχύος προς τα πίσω μπορεί να μηδενιστεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό απομονωτή. Η SRS εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 27dBm, δηλαδή κοντά στο 1W. Η διεγερόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότερο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μίας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή (περίπου 1W). Τέτοια πάντως επίπεδα ισχύος στην είσοδο της οπτικής ίνας θεωρούνται υπερβολικά υψηλά ιδιαίτερα για τις μονότροπες ίνες. Γι' αυτό η διεγερόμενη σκέδαση Raman υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν εμφανίζεται σε ένα δίκτυο οπτικών ινών. Σε αντίθεση με τη σκέδαση Raman η σκέδαση Brillouin εμφανίζεται για χαμηλότερη ισχύ εισόδου αλλά η επίδραση της δεν είναι τόσο σημαντική. Γενικώς καλό είναι η ισχύς εισόδου να μην ξεπερνάει τα 6dBm για να αποφεύγονται τα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται όταν το διαδιδόμενο σήμα έχει υψηλή ισχύ.

1.8.7.3 Self phase modulation, SPM (αυτοδιαμόρφωση φάσης)

Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός φωτός στην ίδια του τη φάση. Η ίδια η ισχύς του διαδιδόμενου παλμού μπορεί να μεταβάλλει το δείκτη διάθλασης της ίνας μέσα στην οποία διαδίδεται ο παλμός με διαφορετικό τρόπο για τα διάφορα μήκη κύματος. Ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης διαμορφώνει τη φάση του μεταδιδόμενου κύματος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη διεύρυνση το φάσματος του διαδιδόμενου παλμού. Αν είναι αρκετά μεγάλη η διεύρυνση τότε μπορεί να επικαλυφθούν κανάλια σε συστήματα DWDM. Η SPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5dBm. Η αυτοδιαμόρφωση φάσης είναι ένα αρκετά σύνηθες φαινόμενο στα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν μονοτροπικές ίνες. Πέρα από τη φασματική διεύρυνση του παλμού η αυτοδιαμόρφωση φάσης μπορεί να προκαλέσει και έντονη παραμόρφωση της μορφής του παλμού. Η επίδραση του φαινομένου της αυτοδιαμόρφωσης γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ισχύς. Οπότε κρίνεται αναγκαίο κατά την διάδοση ενός παλμού μέσα από την οπτική ίνα τα επίπεδα ισχύος του να μην ξεπερνάνε αυτά στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης φάσης.

1.8.7.4 Cross phase modulation, XPM (ετεροδιαμόρφωση φάσης)

Η XPM σχετίζεται αρκετά με την SPM. Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στον εαυτό του ενώ η XPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στους παλμούς άλλων καναλιών. Η SPM μπορεί να εμφανιστεί σε μονοκάναλα και πολυκάναλα συστήματα ενώ η XPM εμφανίζεται μόνο σε πολυκάναλα συστήματα. Η XPM εμφανίζεται για

ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5dBm ενώ η επίδρασής της είναι ίδια με την SPM. Συνήθως το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες όπου κύματα διαφορετικών μηκών κύματος διαδίδονται.

1.8.7.5 Μείξη τεσσάρων κυμάτων

Ένα από τα πιο σοβαρά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η μείξη τεσσάρων κυμάτων. Εμφανίζεται όταν πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα σήματα αυτά «αναμειγνύονται» με αποτέλεσμα να παράγουν νέα κανάλια που μπορούν να «κλέψουν» ισχύ από τα ήδη υπάρχοντα κανάλια και να τα επικαλύψουν. Ο αριθμός των καναλιών-κυμάτων που δημιουργούνται υπολογίζεται από τον τύπο: $\frac{1}{2}(N^3-N^2)$ όπου N είναι ο αριθμός των αρχικών καναλιών. Η διαδικασία μείξης τεσσάρων κυμάτων αποτελεί πολύ σοβαρό ζήτημα για το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς αφού έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την προσπάθεια να διατηρηθεί η διασπορά στο ελάχιστο επίπεδο.

1.8.8 Πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη

Αν γίνει χρήση μίας ίνας με ορθογώνιο προφίλ δείκτη για τη μετάδοση φωτός χρησιμοποιώντας τον παράγοντα ολικής ανάκλασης τότε θα πρέπει ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα να είναι μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης του μανδύα. Αν ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι σταθερός σε όλη την ακτίνα του πυρήνα τότε η ίνα ονομάζεται ίνα βηματικού δείκτη (step index).

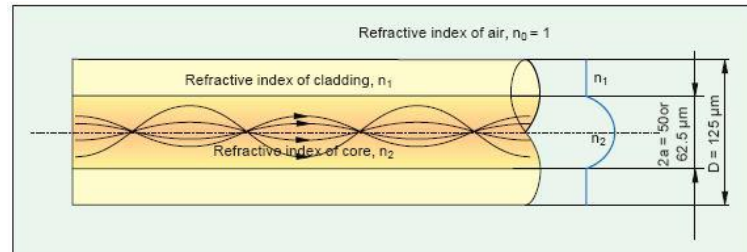


Εικόνα 1.23: Πολύτροπη οπτική ίνα

1.8.9 Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη

Μια πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη μεταδίδει ταυτόχρονα ένα μεγάλο αριθμό τρόπων, καθένας από τους οποίους έχει διαφορετικό μήκος διαδρομής μέσα στην ίνα και φτάνει στο τέλος της ίνας σε ελάχιστα διαφορετικό χρόνο (modal διασπορά). Αν ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται από το κέντρο του πυρήνα προς το μανδύα τότε η modal διασπορά μπορεί να μειωθεί αισθητά. Ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται παραβολικά, έτσι ώστε να παρουσιάζει μέγιστο στο κέντρο του πυρήνα και ελάχιστο στο σημείο ένωσης του πυρήνα με το μανδύα. Μια ίνα που ο δείκτης διάθλασης της μεταβάλλεται παραβολικά με $g=2$ ονομάζεται ίνα βαθμιαίου δείκτη. Το φως που διανύει τη μεγαλύτερη απόσταση μέσα στην ίνα είναι αυτό που

ταξιδεύει μέσα στο γυαλί με χαμηλό δείκτη διάθλασης με συνέπεια να ταξιδεύει γρηγορότερα αν και διανύει τη μεγαλύτερη απόσταση. Όσο η μεταβολή του δείκτη διάθλασης μιας ίνας πλησιάζει την παραβολική μεταβολή, τόσο πιο πολύ μειώνεται η modal διασπορά. Η διασπορά σε μια πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη προκαλεί διαφορά χρόνου μικρότερη από 1nsec σε μήκος ίνας 1km. [2] [3]



Εικόνα 1.24: Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη

Τυπικές τιμές ίνας με βαθμιαίο δείκτη :

- Διάμετρος πυρήνα 50 ή 62.5μm.
- Διάμετρος μανδύα 125μm.
- Μέγιστος δείκτης διάθλασης πυρήνα 1.46.
- Σχετική διαφοροποίησης δείκτη διάθλασης 0.010.

Τα κύματα φωτός διαδίδονται στο εσωτερικό της ίνας ακολουθώντας ελικοειδή κίνηση. Η modal διασπορά οφείλεται στη διαφοροποίηση του δείκτη από το ιδανικό παραβολικό προφίλ. Διαφοροποιήσεις όπως η τιμή του g και η σχετική διαφοροποίηση δείκτη διάθλασης εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Οι πολύτροπες ίνες γενικά χρησιμοποιούνται σε εσωτερικά δίκτυα. Η μεγαλύτερη διάμετρος του πυρήνα επιτρέπει ευκολότερη σύνδεση της ίνας στον εξοπλισμό μετάδοσης. Η ίνα αυτή χρησιμοποιείται σε δίκτυα δεδομένων, σε εφαρμογές αισθητήρων και ικανοποιεί τις απαιτήσεις των FDDI δικτύων (Fiber Distributed Data Interface).

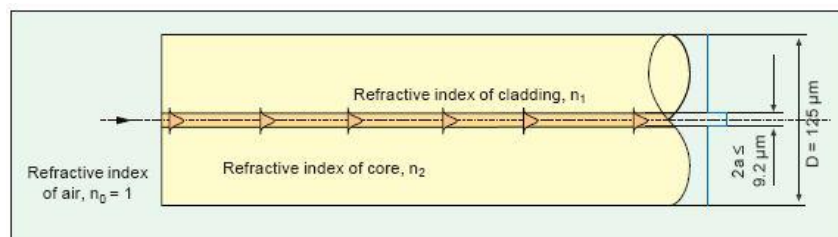
1.8.10 Μονότροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη

Οι μονότροπες ίνες συνήθως χρησιμοποιούνται σε μεγάλων αποστάσεων ζεύξεις επικοινωνιών και σε μία συνηθισμένη μονότροπη ίνα η διασπορά εμφανίζεται στα 1310nm και η μικρότερη εξασθένηση στα 1550nm. Αν συνδυαστούν οι παράμετροι, τιμή αποκοπής και διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης υπάρχει περίπτωση ένας παράγοντας να χαρακτηρίζει την ευαισθησία της ίνας στο λύγισμα. Υψηλή τιμή αποκοπής και μικρή διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης δίνουν μια ίνα αρκετά ανθεκτική στο λύγισμα. Τυπικές παράμετροι μιας μονότροπης ίνας είναι:

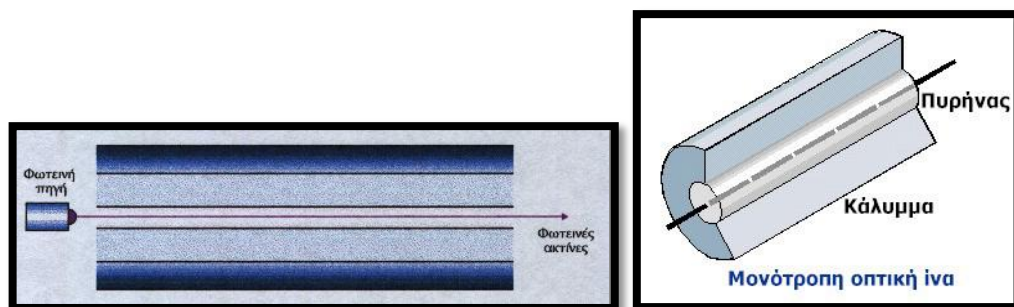
- Διάμετρος μανδύα 125nm.
- Δείκτης διάθλασης πυρήνα 1.4485.
- Δείκτης διάθλασης μανδύα 1.4440.

- Διαφοροποίηση δείκτη διάθλασης $0.003=0.3\%$.

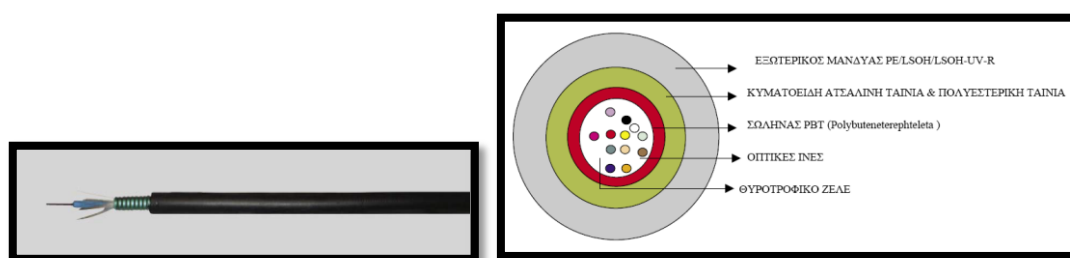
Μια ίνα με τις παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζει αριθμητικό άνοιγμα $NA= 0.11$ το οποίο δίνει γωνία αποδοχής $\beta=6^\circ$. Δεν είναι μόνο η διάμετρος του πυρήνα μιας μονότροπης ίνας που είναι μικρότερη από εκείνη της πολύτροπης. Το αριθμητικό άνοιγμα όπως και η γωνία αποδοχής είναι αρκετά μικρότερα σε μια μονότροπη ίνα. Οι προηγούμενοι τρεις παράγοντες δυσκολεύουν αρκετά την εισαγωγή φωτός μέσα στη μονότροπη ίνα. Ίνες που αποτελούν καλώδια οπτικών ινών θα έχουν χαμηλότερο μήκος κύματος αποκοπής, την τιμή αποκοπής του καλωδίου.



Εικόνα 1.25: Μονότροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη



Εικόνα 2.26: Μονότροπη οπτική ίνα



Εικόνα 2.27: Μονότροπη οπτική ίνα

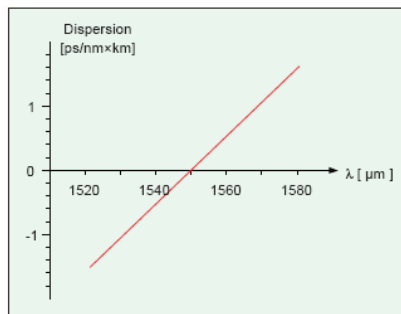
Φως με το παραπάνω μήκος κύματος (λ_c) ή με μεγαλύτερο μπορεί να διαδοθεί μέσα στην οπτική ίνα μόνο με το θεμελιώδη τρόπο μετάδοσης.

1.8.11 Ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Για μια πλειάδα εφαρμογών όπως ζεύξεις μεγάλου μήκους και χαμηλής εξασθένισης, συστήματα με EDFA (Erbium Doped Amplifiers) και συστήματα με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος, είναι απαραίτητο να μετατοπίσουμε το σημείο μηδενικής διασποράς σε άλλα μήκη κύματος (κοντά στα 1550nm). Ίνες με το προηγούμενο χαρακτηριστικό ονομάζονται ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς. Όταν μετατοπίζουμε το σημείο μηδενικής διασποράς από τα 1310 στα 1550nm έχουμε σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μιας ίνας με χαμηλότερη εξασθένιση και διασπορά. Η μετατόπιση του μηδενικού σημείου διασποράς επιτυγχάνεται με αλλαγή του προφίλ δείκτη διάθλασης της ίνας.^[10]

1.8.12 Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Η πρώτη ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς εμφανίστηκε κατά τα μέσα της δεκαετίας του '80 και παρουσίαζε μηδενική διασπορά στα 1550nm. Η μετατόπιση του σημείου μηδενισμού επιτυγχανόταν μετατρέποντας το προφίλ δείκτη του πυρήνα σε τριγωνικό ή δημιουργώντας δύο «σκαλοπάτια» στο δείκτη διάθλασης του μανδύα. Η ίνα αυτή έχει το μεγάλο μειονέκτημα, να παρουσιάζει μη γραμμικά φαινόμενα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η «παλιά» ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος (1993). Η συνήθης ίνα του παραπάνω τύπου θεωρείται πια ξεπερασμένη και έχει αντικατασταθεί στα νέα συστήματα με ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς.^[8]

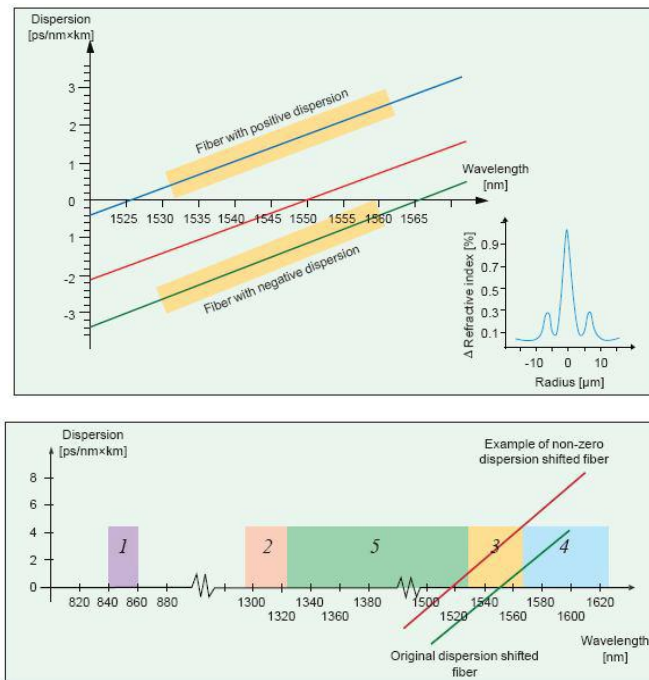


Εικόνα 1.28: Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

1.8.12.1 Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Τα σημερινά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν όλο και μεγαλύτερα bit rate προκειμένου να ικανοποιήσουν την αυξημένη ζήτηση για εύρος ζώνης μετάδοσης. Από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης των οπτικών ινών έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα για τη χρήση συγκεκριμένων μηκών κύματος που θα μπορούσαν να μεταφέρουν πολλαπλά κανάλια πληροφορίας ώστε να πολλαπλασιαστεί η χωρητικότητα των οπτικών ινών. Οι ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε συστήματα

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) στο τρίτο «παράθυρο» από 1530–1565nm. Σήμερα αρχίζουν και χρησιμοποιούνται και τα παράθυρα τέσσερα και πέντε για τέτοιου τύπου ίνες. Έτσι υπάρχουν πολλά είδη τέτοιου τύπου ινών με διαφορετικές τιμές διασποράς και αποτελεσματικής περιοχής.

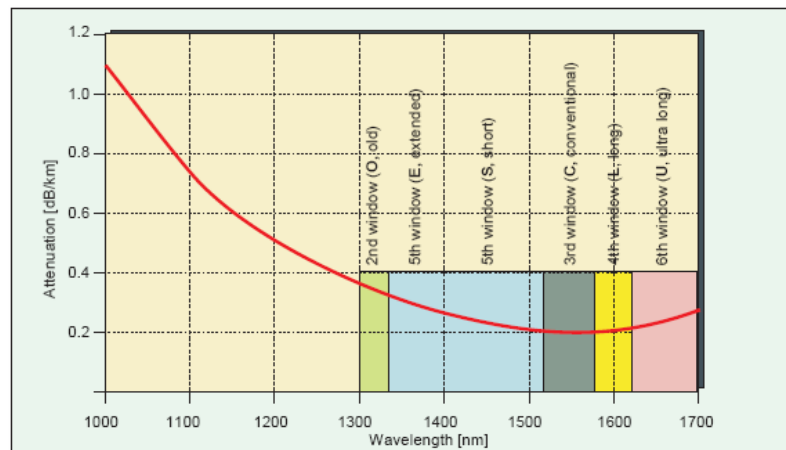


Εικόνα 1.29: Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Μη γραμμικά φαινόμενα όπως η μείξη τεσσάρων κυμάτων μπορούν να περιοριστούν χρησιμοποιώντας ίνες με μικρή διασπορά, αποφεύγοντας το σημείο μηδενισμού. Οι συνήθεις ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα WDM και σε συστήματα υψηλού bit rate που παρουσιάζουν έντονα μη γραμμικά φαινόμενα, χωρίς να χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερες τεχνικές μέθοδοι. Οι ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα για μήκη κύματος 1530–1565nm όπου παρουσιάζουν διασπορά 2–6ps/nm*km. ^[5]

1.8.12.2 Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα από 1280-1625 (1700) nm

Μια νέου τύπου ίνα αναμένεται να ανοίξει ένα νέο «παράθυρο» για μετάδοση. Αυτό το νέο παράθυρο θα ενώνει το παράθυρο των 1310nm με αυτό των 1550nm και θα δίνει τη δυνατότητα χρήσης παραπάνω από 100nm εύρους ζώνης σε σχέση με την τυπική μονότροπη ίνα. Σε αυτή την ίνα η ολική εξασθένηση στο φασματικό εύρος 1285–1625nm είναι μικρότερη από 0.4dB. Χρησιμοποιώντας ίνες τέτοιου τύπου παρέχονται ταυτόχρονα διάφορα είδη υπηρεσιών. ^[7]

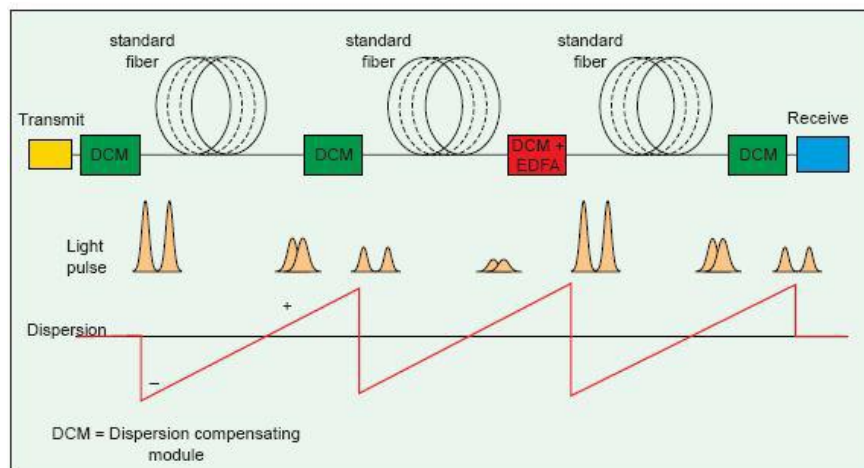


Εικόνα 1.30: Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα

1.8.12.3 Ίνα αντιστάθμισης διασποράς

Είναι οικονομικά ασύμφορο να χρησιμοποιηθεί ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων. Συνδυάζοντας τυπικές μονότροπες ίνες, ενισχυτές με ίνες ερβίου EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) και με ίνες αντιστάθμισης διασποράς επιτυγχάνονται μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης και πολύ υψηλές ταχύτητες με αρκετά μικρό κόστος. Σοβαρό τους μειονέκτημα αποτελεί η μετάδοση μηκών κύματος κοντά στα 1550nm γεγονός αφού αποκλείει τη μετάδοση στα 1310nm. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις παραμέτρους μιας τυπικής μονότροπης ίνας και μιας ίνας αντιστάθμισης διασποράς.

Type of fiber	Dispersion at 1550 nm [ps/nm × km]	Attenuation at 1550 nm [dB/km]
Standard single-mode fiber	17 - 18	0.18 - 0.21
Dispersion compensating fiber	(-65) - (-90)	0.56 - 0.60



Εικόνα 1.31: Σύγκριση τυπικής μονότροπης ίνας και μιας ίνας αντιστάθμισης διασποράς.

Όπως παρατηρείται στον πίνακα, η ίνα αντιστάθμισης διασποράς παρουσιάζει αρκετά υψηλή αρνητική τιμή διασποράς για μήκη κύματος κοντά στα 1550nm. Χρησιμοποιώντας μεθόδους αντιστάθμισης διασποράς με ίνες αντιστάθμισης ή με συνδυασμό ινών αντιστάθμισης και ενισχυτών EDFA σε οπτικά συστήματα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης καλωδίων ινών μεγάλου μήκους χωρίς να λαμβάνουν χώρα σημαντικά φαινόμενα διασποράς. Το μόνο μειονέκτημα της ίνας αντιστάθμισης διασποράς είναι ότι παρουσιάζει αρκετά υψηλή τιμή εξασθένησης (0.60 dB/km). Επιπλέον, τα παλιά συστήματα οπτικών ινών μπορούν να αναβαθμιστούν για λειτουργία σε υψηλά bit rate και καλύτερη απόδοση με προσθήκη πολυπλεκτών διαχωρισμού μήκους κύματος.^[6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

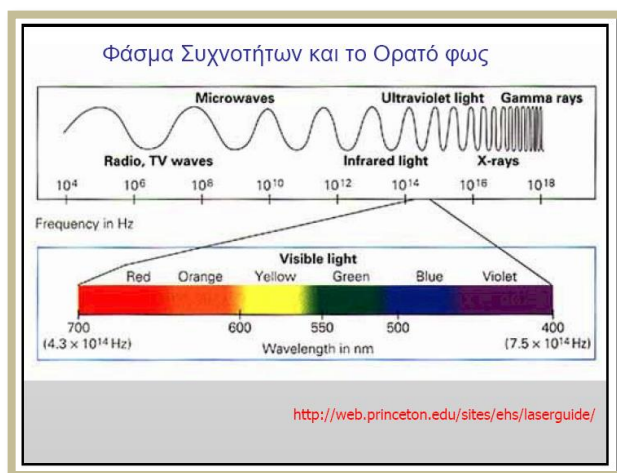
Βασικές αρχές λειτουργίας των οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες είναι ειδικά νήματα κατασκευασμένα από γυαλί διαμέτρου όσο μια ανθρώπινη τρίχα και το υλικό κατασκευής τους επιτρέπει τη μετάδοση φωτός από το εσωτερικό τους ενώ συνήθως βρίσκονται συγκεντρωμένες σε χιλιάδες δέσμες που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια. Η δομή ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι τέτοια ώστε να αποτρέπονται οι εξωτερικές φθορές καθώς και η απώλεια σήματος που θα προέκυπτε κατά τη διαδρομή της φωτεινής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του.



Αν γίνει τομή στη μέση ενός οπτικού καλωδίου εμφανίζονται τα εξής τμήματα από το κέντρο προς το εξωτερικό του και είναι τα εξής ^[22]:

- Πυρήνας: Η δέσμη των οπτικών ινών που αναλαμβάνει τη μετάδοση των φωτεινών σημάτων είναι τοποθετημένη ακριβώς στο κέντρο του καλωδίου.
- Εσωτερική επένδυση: Το εσωτερικό υλικό ανακλά εσωτερικά το φως εκμηδενίζοντας παράλληλα το ποσοστό διαφυγής του στο εξωτερικό του καλωδίου.
- Εξωτερική επένδυση: Ανθεκτικό υλικό που αποτελείται από καουτσούκ για μικρά καλώδια οικιακής χρήσης ή ατσάλι για μεγαλύτερα που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικό περιβάλλον προστατεύοντας το από ζημιές εξωτερικών παραγόντων. ^[12]



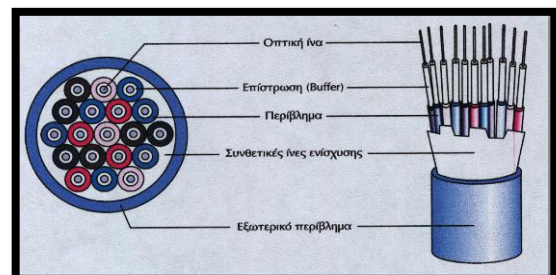
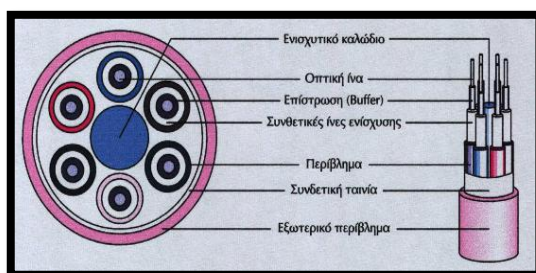
Εικόνα 2.1: Φάσμα Συχνοτήτων και το Ορατό φως

Οι επιδόσεις μίας οπτικής ίνας συνδέονται με τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα (πολύτροπη ή μονότροπη) και με το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται από την πηγή.

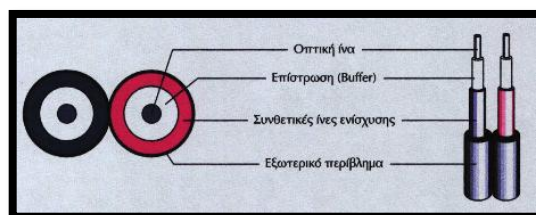
2.1 Οπτικά καλώδια

Τα οπτικά καλώδια έχουν εξελιχθεί παρά πολύ από τότε που άρχισαν να χρησιμοποιούνται και υπάρχουν είδη οπτικών καλωδίων που από μόνα τους ενισχύουν το οπτικό σήμα που ταξιδεύει στο εσωτερικό τους με τη χρησιμοποίηση ειδικών επιστρώσεων στην κεντρική ίνα, τα οποία ιονίζουν το φως αυξάνοντας την ενέργεια του καθώς αυτό περνά μέσα από τα καλώδια αυτά. Έτσι το σήμα μπορεί να ταξιδεύσει ακόμα πιο μακριά χωρίς τη χρησιμοποίηση ενισχυτών. Τέλος, τα υποθαλάσσια καλώδια αποτελούνται από έναν αριθμό οπτικών καλωδίων και ειδικών μεταλλικών ράβδων που συνήθως βρίσκονται στο κέντρο του καλωδίου και 'τρέχουν' παράλληλα με τα οπτικά καλώδια έχοντας σαν σκοπό την ενίσχυση του καλωδίου και επιτρέποντας στο καλώδιο να δεχτεί υψηλότερες πιέσεις χωρίς να σπάσει. ^[13]

Ως καλώδιο οπτικών ινών ορίζεται το καλώδιο που περιέχει μία ή περισσότερες οπτικές ίνες. Κάθε μία οπτική ίνα είναι επικαλυμμένη με πλαστική στρώση και τοποθετούνται συνολικά εντός καλωδίου που θα πρέπει να είναι κατάλληλο για το περιβάλλον τοποθέτησης τους.



Εικόνα 2.2: Καλώδιο οπτικών ινών (Tight Buffer) Εικόνα 2.3: Καλώδιο οπτικών ινών (Loose Buffer)



Εικόνα 2.4: Οπτικό Patch cord

Το εξωτερικό περίβλημα είναι συχνά χρωματισμένο προκειμένου να υποδεικνύει τον τύπο της οπτικής ίνας. Συγκεκριμένα χρώματα σε συνδυασμό με τις οπτικές ίνες στις οποίες αναφέρονται αποτελούν:

- Κίτρινο (single-mode optimal fiber).
- Πορτοκαλί (multi-mode optimal fiber).

- Θαλασσί (10 gig laser-optimized 50/125 micrometer multi-mode optimal fiber).
- Γκρι (outdated color code for multi-mode optical fiber).
- Μπλε (sometimes used to designate polarization-maintaining optical fiber).

2.2 Πομποί

Ο σκοπός του πομπού είναι η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος στο απαραίτητο ηλεκτρικό ρεύμα έτσι ώστε να λειτουργήσει μια πηγή φωτός. Τα ηλεκτρικά σήματα είναι είτε αναλογικά είτε ψηφιακά. Εάν το σήμα είναι ήδη ψηφιακό, ο πομπός πρέπει να αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο το οποίο να παρέχει ταχύτατης εναλλαγής παλμική κωδικοποίηση. Εάν το σήμα είναι αναλογικό, ο πομπός θα πρέπει να παρέχει ρεύμα σε μια πηγή φωτός έτσι ώστε να γίνει η εκπομπή των εναλλαγών του σήματος. Δύο είναι οι τύποι των πηγών φωτός που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες. Αυτοί έχουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας, χαρακτηριστικά εκπομπής φωτός και διάρκεια ζωής. Οι πηγές φωτός που χρησιμοποιούνται σε ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να είναι είτε δίοδοι εκπομπής φωτός (light emitting diodes-LED) είτε laser ημιαγωγού (semiconductor lasers). Η επιλογή του είδους της πηγής φωτός που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης βασίζεται σε αρκετούς παράγοντες όπως:

- Μήκος κύματος εκπομπής → Παράθυρο μετάδοσης ίνας.
- Σχέση ισχύος και απόστασης μετάδοσης.
- Πλάτος του εύρους των μηκών κύματος → Φαινόμενα διασποράς.
- Αποτελεσματικός τρόπος διοχέυσης του παραγόμενου φωτός στην οπτική ίνα μετάδοσης.

Οι απαιτήσεις ενός οπτικού πομπού είναι :

- Λειτουργία σε ένα από τα «παράθυρα» ελάχιστης εξασθένησης δηλαδή τα 850, 1310 ή 1550nm.
- Το εκπεμπόμενο οπτικό σήμα να είναι κατά το δυνατόν μονοχρωματικό δηλαδή το εύρος εκπομπής $\Delta\lambda$ γύρω από το κεντρικό μήκος κύματος λειτουργίας να είναι κάτω από 50nm.
- Η ισχύς εξόδου του πομπού να είναι της τάξης του 1mW.
- Να έχει τη δυνατότητα να διαμορφωθεί από ψηφιακά σήματα υψηλού ρυθμού.
- Ο λόγος σβέσης να είναι υψηλός (>8 dB).
- Λόγος σβέσης $\rightarrow 10\log(P_{out}/P(0))$
- Η επιφάνεια εκπομπής του πομπού να έχει διαστάσεις αντίστοιχες με αυτές των οπτικών ινών.
- Υψηλή αξιοπιστία.
- Χαμηλό κόστος.

2.3 Πηγή φωτός με LED

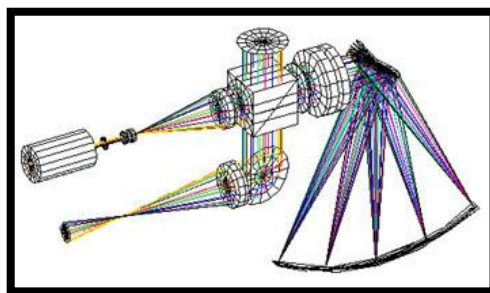
Τα LED έχουν ένα μη γραμμικό χαρακτήρα και δεν σχετίζονται άμεσα με τη θερμοκρασία αφού δεν απαιτούν έλεγχο της ενέργειας και της θερμοκρασίας. Ακόμη, είναι πιο αργά και με λιγότερη εκπομπή ενέργειας από τους πομπούς laser. Το φως που εκπέμπουν είναι ασυνεχές και έχει φάσμα πλάτους της τάξης των 60nm. Χρησιμοποιούν επαφές p-n για να εισάγουν ηλεκτρόνια και οπές στην ίδια περιοχή ενός ημιαγωγού προκειμένου να ενωθούν και να παράγουν φως μέσω του φαινομένου της αυθόρμητης εκπομπής. Η χρήση τους περιορίζεται στις πολύτροπες ίνες με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μικρές αποστάσεις διάδοσης. ^[14]



Εικόνα 2.5: LED

2.4 Πηγή φωτός με Laser

Τα laser είναι δίοδοι ημιαγωγών που εκπέμπουν μια συνεχή δέσμη φωτός με φάσμα πλάτους μικρότερο από 10nm ενώ επίσης απαιτούν εξειδικευμένο έλεγχο της θερμοκρασίας και της ενέργειας και χρησιμοποιούνται για ροή σήματος αρκετών Mbit λόγω της μεγάλης ταχύτητας εναλλαγής πολικότητας τους. Επιπλέον πάνω από ένα όριο ρεύματος, τα laser έχουν γραμμικό χαρακτήρα και είναι κατάλληλα για αναλογική μετάδοση και ειδικά τα laser ημιαγωγού είναι κατάλληλα για εφαρμογές μονότροπης ίνας λόγω μικρού μεγέθους, χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων, περιορισμένου εύρους φάσματος, ακρίβειας μήκους κύματος, ικανοποιητικής ισχύος εξόδου και μαζικής κατασκευής τους. ^[23]



Εικόνα 2.6: LASER

Τα κύρια χαρακτηριστικά των laser είναι:

1. Αστάθεια συχνότητας που οφείλεται στην εναλλαγή των τρόπων διάδοσης, στην μετατόπιση των τρόπων διάδοσης και στην εναλλαγή του μήκους κύματος.

2. Εύρος γραμμής που αποτελεί το εύρος του φάσματος του φωτός που παράγεται από το laser ενώ επίσης επηρεάζει τις αποστάσεις μεταξύ των καναλιών και τη διασπορά.
3. Εύρος συντονισμού που πρόκειται για την περιοχή μηκών κύματος που μπορεί το laser να ενισχύσει.
4. Πλήθος διαμήκων τρόπων διάδοσης που είναι ο αριθμός των μηκών κύματος που μπορεί το laser να ενισχύσει.
5. Δυνατότητα συντονισμού που έχει τη δυνατότητα ένα laser να διαθέτει σε όλα τα περιεχόμενα μήκη κύματος ή να αποτελείται από ένα σύνολο από διακριτά μήκη κύματος.
6. Χρόνος συντονισμού που είναι ο χρόνος που απαιτεί το laser για να συντονιστεί από ένα μήκος κύματος σε ένα άλλο.

2.5 Δέκτες

Οι δέκτες λαμβάνουν το σήμα από την οπτική ίνα και το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ενός φωτοανιχνευτή. Οι φωτοανιχνευτές κατασκευάζονται από υλικά όπως το γερμάνιο, το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο και το ίνδιο αρσενικό γάλλιο. Απαιτείται να έχουν:

- Ευαισθησία.
- Γρήγορη απόκριση.
- Χαμηλό θόρυβο.
- Αντίστοιχο μέγεθος με οπτικές ίνες.
- Χαμηλό κόστος.
- Μεγάλη αξιοπιστία.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δυο τύποι φωτοδίοδων ως ανιχνευτές για τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό. Οι δίοδοι PIN (positive intrinsic negative) είναι λιγότερο ευαίσθητοι στο φως και αποτελούνται από θετικά, αρνητικά και ουδέτερα υλικά τα οποία βρίσκονται σε στερεά κατάσταση. Επίσης, χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και αξιοπιστία. Οι δίοδοι χιονοστιβάδας ή αλλιώς APD (Avalance Photo Diode) είναι ακριβότεροι από τους PIN επειδή παρέχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ικανότητα ανίχνευσης, ακρίβεια, μεγάλο κόστος, υψηλές απαιτήσεις ρεύματος και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία.

2.6 Σύνδεσμοι

Με τον όρο connector νοούνται οι σύνδεσμοι που επιτυγχάνουν προσωρινή σύνδεση μεταξύ δύο οπτικών καλωδίων ή μεταξύ του καλωδίου και του πομπού ή δέκτη. Ο connector συνδέει όχι μόνο την ίνα αλλά όλο το καλώδιο. Λόγω της παραμικρής μετατόπισης της μιας έναντι της άλλης οπτικής ίνας προξενείται σημαντική εξασθένηση του σήματος ίσως και πολλές φορές ακόμα και διακοπή της μετάδοσης. Για αυτό θα πρέπει οι κεντρικές ίνες να εφάπτονται

ακριβώς η μία με την άλλη στο σημείο σύνδεσης. Επιπλέον, τα σημεία συνδέσεων των φορητών συσκευών και των οργάνων γίνονται με τη χρήση του connector που στην περίπτωση των οπτικών ινών παίζει το ρόλο της πρίζας ή του φισ στο ηλεκτρικό ρεύμα και το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του είναι η εξασθένηση που υφίσταται όταν ένα σήμα περνάει μέσα από ένα σύνδεσμο και χάνει ένα μέρος της ισχύος του.

2.6.1 Μόνιμοι σύνδεσμοι

Η λειτουργία των μόνιμων συνδέσμων (splices) είναι παραπλήσια με των connectors, αλλά χρησιμοποιούνται για μόνιμες συνδέσεις μεταξύ οπτικών ινών. Στο σημείο που επιθυμείται η επέκταση καλωδίου ή η σύνδεση του χρησιμοποιούνται splices. Επειδή προορίζονται για μόνιμες συνδέσεις κατασκευάζονται με τρόπο ώστε να εισάγουν πολύ μικρή εξασθένηση της τάξης του 0.1db.

2.6.2 Άλλα είδη συνδέσμων

Επίσης υπάρχουν και άλλα είδη συνδέσμων όπως:

2.6.2.1 Σύνδεσμοι SC:

Οι σύνδεσμοι SC που αναπτύχθηκαν από την εταιρεία Nippon Telephone and Telegraph (NTT). Σήμερα οι σύνδεσμοι αυτοί χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο στις επικοινωνίες στη μεταφορά πληροφοριών και φωνής όσο και στην καλωδιακή τηλεόραση. Τέλος οι σύνδεσμοι SC χρησιμοποιούνται ως επί των πλείστον σε single-mode οπτικές ίνες.

2.6.2.2 Σύνδεσμοι ST:

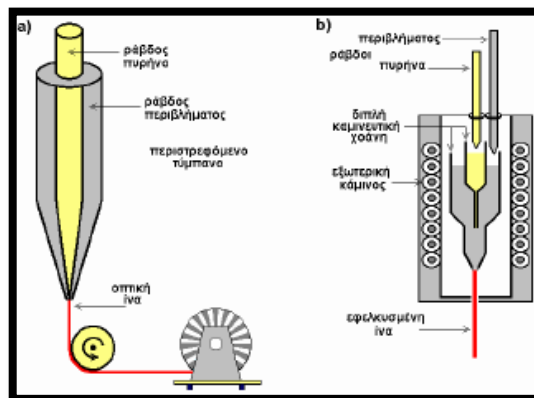
Οι σύνδεσμοι ST αναπτύχθηκαν από την αμερικάνικη εταιρεία τηλεπικοινωνιών AT&T και χρησιμοποιούνται ως επί των πλείστον σε τοπικά δίκτυα υπολογιστών (LANs) και συναντώνται σε multi-mode οπτικές ίνες ενώ οι αμερικάνικες, Bell Operating Companies τον χρησιμοποιούν και σε single-mode.

Ο τρόπος παραγωγής των οπτικών ινών εξαρτάται από την εφαρμογή που προορίζεται η ίνα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους ποικίλουν ανάλογα με το δείκτη του πυρήνα καθώς και την επιλεγείσα φασματική περιοχή ελάχιστης απορρόφησης. Η τυπική συνταγή του μίγματος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των οπτικών ινών αποτελείται από οξείδια του πυριτίου, βορίου, φωσφόρου, αλουμινίου, γερμανίου και νατρίου. Το σημαντικό στην παραγωγή της ίνας είναι ο έλεγχος καθαρότητας των προσμίξεων αυτών των υλικών.

Στην περίπτωση ινών για οπτικές εφαρμογές, η βασική τεχνική παραγωγής βασίζεται στη μέθοδο του Ράβδου-Σωλήνα (Εικόνα 2.11 περίπτωση α) όπου μπορεί ταυτόχρονα να

εφελκυστεί ένα ζεύγος συστατικών (με διαφορετικούς δ.δ.). Η χημική αντίδραση σε κατάλληλη θερμοκρασία του κλιβάνου δίνει τη μορφή της ίνας. Πρόκειται για ένα γυάλινο κύλινδρο μήκους 0.5–2m, από τον οποίο στη συνέχεια προέρχεται ένα κομμάτι συνεχούς οπτικής ίνας μήκους μερικών χιλιομέτρων. Η μορφή τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση σε «πύργο» όπου η άκρη της αρχίζει σε κατάλληλη θερμοκρασία να λιώνει. Από αυτήν την άκρη γίνεται ο εφελκυσμός της ίνας από ένα περιστρεφόμενο τύμπανο ελεγχόμενης ταχύτητας. Η μέθοδος της διπλής χοάνης (Εικόνα 2.11 περίπτωση b) χρησιμοποιείται σε ίνες, που προσδιορίζονται για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Σε αυτές τις εφαρμογές απαιτείται η βαθμιαία κατανομή του δ.δ μέσα στον πυρήνα (graded- index fiber).

Η πρώτη χοάνη περιέχει το υλικό του πυρήνα και τοποθετείται μέσα στη δεύτερη που περιέχει το υλικό περιβλήματος. Εντός της καμίνου τα υλικά τήκονται. Τα στόμια και των δυο χοανών βρίσκονται λεπτές επιστρώσεις προοδευτικά μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης των προσμίξεων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βαθμιαία κατανομή του δ.δ στον πυρήνα της ίνας. Στην ίδια κατακόρυφο και καθώς το υλικό του πυρήνα ρέει προς τα κάτω λόγω βαρύτητας, συμπαρασύρει και το υλικό του περιβλήματος δημιουργώντας την ίνα. Στις γυάλινες οπτικές ίνες, ως βασικό υλικό παραγωγής χρησιμοποιείται το οξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Η διοχέτευση και καύση του μίγματος οξυγόνου, αλογονιδίου του πυριτίου και άλλων προσμίξεων παράγουν μίγμα οξειδίων που επικάθεται στο SiO_2 δημιουργώντας ένα είδος πηλού ως πρόπλασμα. Το πρόπλασμα τήκεται μαζί με τα άλλα συστατικά και εφελκύεται ταυτόχρονα με την ίνα. Το ανάγλυφο του προπλάσματος αποτελείται από λεπτές επιστρώσεις προοδευτικά μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης των προσμίξεων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βαθμιαία κατανομή του δ.δ στον πυρήνα της ίνας.



Εικόνα 2.7: Τρόποι κατασκευής οπτικής ίνας

2.7 Διακλαδωτές

Οι διακλαδωτές (couplers) αποτελούν τη συσκευή διασύνδεσης της οπτικής ίνας με περισσότερες. Σε αντίθεση με τους connectors και τα splices που συνδέουν δύο οπτικά καλώδια, οι coupler συνδέουν τουλάχιστον τρία. Στην περίπτωση αυτή το οπτικό σήμα διερχόμενο από ένα coupler χάνει αρκετή από την ισχύ του. Αυτό έχει σαν επίπτωση τον περιορισμένο

πρακτικά αριθμό των εξόδων ενός coupler. Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί δύο τεχνολογίες διακλαδωτών. Οι παθητικοί και οι ενεργητικοί. Παθητικοί είναι αυτοί που απλώς διαβιβάζουν το οπτικό σήμα από μία είσοδο σε πολλές εξόδους. Οι ενεργητικοί βάζουν ένα δέκτη στη κεντρική είσοδο και μετά οδηγούν την ηλεκτρική πλέον έξοδο του δέκτη σε πολλούς πομπούς. Έτσι, δεν παρουσιάζεται το μειονέκτημα της εξασθένησης του σήματος. Επιπλέον και στην κατασκευή, οι ενεργητικοί είναι ευκολότεροι από ότι οι παθητικοί και διακρίνονται τους διακλαδωτές σε ακτινωτούς και T-coupler ανάλογα με τη γεωμετρία της σύνδεσης. Επίσης διακρίνονται σε κατευθυντικούς όπου το σήμα ταξιδεύει σε συγκεκριμένη κατεύθυνση και σε αμφικατευθυντικούς όπου οποιαδήποτε από τις εισόδους-εξόδους του coupler μπορεί να εκπέμπει σήμα προς όλες τις άλλες. Τέλος, υπάρχουν διακλαδωτές που διαχωρίζουν τα διαφορετικά μήκη κύματος των σημάτων εισόδου και τα δρομολογούν σε διαφορετικές εξόδους.

2.8 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών

Τα συστήματα μετάδοσης οπτικών ινών παρουσιάζουν ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τα συμβατικά ηλεκτρονικά συστήματα. Μία πρώτη σύγκριση οδηγεί στα παρακάτω σημεία ^[15]:

1) Τεράστιο εύρος ζώνης: Οι οπτικές ίνες διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, που με πολυπλεξία φθάνουν ακόμη και τα 128 Gbit/s. Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 και 10Gbps ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20, 40 και 50Gbps. Σε περίπτωση πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος, οι ταχύτητες φθάνουν στα μερικά Tbps. Η οπτική ίνα παρέχει εύρος συχνοτήτων για μετάδοση περίπου ίσο με 25THz ή 25000GHz στην φασματική περιοχή του 1.5μm. Το εύρος αυτό είναι 1000 φορές μεγαλύτερο από ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Το εύρος ζώνης σε ένα σύστημα οπτικών ινών μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την πολυπλεξία στο μήκος κύματος. Στην περίπτωση αυτή μία και μόνη ίνα μπορεί να φέρει περισσότερα από ένα διαφορετικά μήκη κύματος καθένα από τα οποία είναι διαμορφωμένο σε αρκετά GHz. Άρα, βγαίνει το συμπέρασμα ότι ένα σύστημα οπτικών ινών προσφέρει τουλάχιστον μερικές τάξεις μεγέθους βελτίωση στο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε σχέση με οποιοδήποτε τύπο χάλκινου καλωδίου ή ραδιοκυμάτων. Από την άλλη πλευρά σε ομοαξονικά καλώδια δεν αναμένονται αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικών χιλιομέτρων για ένα εύρος ζώνης που ξεπερνά τα 100MHz.

2) Μικρό μέγεθος και βάρος: Η διάμετρος των οπτικών ινών είναι μερικά ή μερικές δεκάδες μικρόμετρα και ακόμα και να συνεκτιμηθούν τα διάφορα προστατευτικά στρώματα, διαπιστώνεται ότι πάλι βάρος και το μέγεθος ενός οπτικού καλωδίου είναι πολύ μικρότερα από αυτά ενός χάλκινου.

3) Ηλεκτρική απομόνωση: Το οπτικό κύμα οδηγείται από μία γυάλινη ίνα δηλαδή ένα διηλεκτρικό. Δεν υπάρχουν βρόχοι γης, τόξα, βραχυκυκλώματα κτλ. Η οπτική ίνα είναι ιδανικό μέσο για την εγκατάσταση σε χώρους με υψηλά δυναμικά.

4) Ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές: Η μετάδοση του οπτικού κύματος μέσα στο διηλεκτρικό κυματοδηγό (ίνα) είναι απαλλαγμένη από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) καθώς και από μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Έτσι, η οπτική ίνα μπορεί να βρίσκεται σε ένα περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικού θορύβου χωρίς να χρειάζεται να ληφθούν μέτρα για την ηλεκτρομαγνητική της θωράκιση. Για το λόγο αυτό βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε περιβάλλοντα υψηλού ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Ούτε βέβαια περιμένει κανείς οπτική παρεμβολή ανάμεσα σε οπτικές ίνες που γειτνιάζουν. ^[24]

5) Ασφάλεια: Το οπτικό σήμα μέσα στην ίνα περιορίζεται κυρίως στον πυρήνα της και δεν ακτινοβολεί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να υποκλαπεί παρά μόνο στην περίπτωση που κάποιος μπορεί να έχει πρόσβαση στο φως που οδηγείται από τον πυρήνα. Το παραπάνω είναι απίθανο να συμβεί χωρίς να διακοπεί η συνέχεια της ίνας, πράγμα το οποίο γίνεται εύκολα αντιληπτό. Αυτό σημαίνει ότι η ασφάλεια που προσφέρουν τα συστήματα οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα αυξημένη καθώς είναι σχεδόν αδύνατη η εξωτερική επέμβαση για την υποκλοπή ή την παρεμβολή των μεταφερόμενων σημάτων.

6) Πολύ χαμηλές απώλειες μετάδοσης: Η οπτική ίνα σε σχέση με το χάλκινο καλώδιο παρουσιάζει περιορισμένες απώλειες γεγονός που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να είναι αναγκαία η ενδιάμεση ενίσχυση του σήματος. Αλλά ακόμα και στην περίπτωση που απαιτείται ενίσχυση και αναγέννηση του σήματος δεδομένων η διαδικασία λαμβάνει χώρα σπανιότερα.

7) Ευελιξία και αντοχή: Οι οπτικές ίνες παρά το γεγονός ότι είναι κατασκευασμένες από γυαλί χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και ευκαμψία. Ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την υγρασία, σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια που η έκθεση τους σε υγρασία μπορεί να προκαλέσει βραχυκυκλώματα ή το φαινόμενο της διαφωνίας. Σε συνδυασμό με το μικρό βάρος και όγκο εμφανίζονται γενικά πλεονεκτικότερες σε ότι αφορά την αποθήκευση, μεταφορά και εγκατάσταση σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια. Τέλος η αντοχή καθώς και η διάρκεια ζωής τους είναι τουλάχιστον συγκρίσιμες με τα προηγούμενα. Η οπτική ίνα είναι ανθεκτικότερη στον θόρυβο σε σύγκριση με το χάλκινο καλώδιο καθώς ο μανδύας της οπτικής ίνας λειτουργεί ταυτόχρονα και ως προστατευτικό ενώ το κυματοδηγούμενο οπτικό σήμα δεν επηρεάζεται από τις ποικίλες πηγές θορύβου. ^[16]

8) Αξιοπιστία και ευκολία συντήρησης: Ο αριθμός ηλεκτρονικών αναμεταδοτών είναι αρκετά περιορισμένος λόγω των πολύ μικρών απωλειών και αυτό σημαίνει αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος. Παράλληλα, η αξιοπιστία των οπτικών εξαρτημάτων και διατάξεων έχει αυξηθεί σημαντικά με αποτέλεσμα η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής να είναι 20-30 χρόνια.

9) Εν δυνάμει χαμηλό κόστος: Το κόστος των οπτικών ινών έχει μειωθεί σημαντικά προσεγγίζοντας το κόστος των μεταλλικών καλωδίων. Τα οπτικά εξαρτήματα συνεχίζουν να έχουν υψηλό κόστος όπως οι οπτικές πηγές, ανιχνευτές κτλ. Παρόλα αυτά οι επικοινωνίες οπτικών ινών προσφέρουν τον πιο αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε σημαντικές αποστάσεις λόγω του τεράστιου διαθέσιμου εύρους ζώνης.^[17]

10) Το error rate ή ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων σε καλώδια οπτικών ινών είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα κατά 3 τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης.



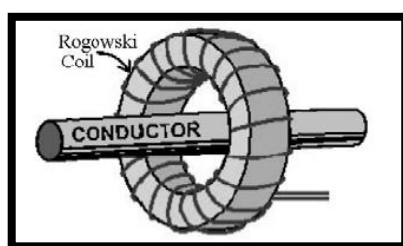
2.9 Μειονεκτήματα οπτικών ινών

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι η δυσκολία σύνδεσης των οπτικών ινών με άλλα εξαρτήματα επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής για την αποφυγή διασποράς και την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Είναι χαρακτηριστικό ότι και μικρές ακόμη αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση αυτή μπορούν να προξενήσουν μεγάλη απώλεια του φωτεινού σήματος. Επιπλέον, οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν παραμορφώσεις στο μεταδιδόμενο οπτικό σήμα εξαιτίας μη γραμμικοτήτων και διπλοθλαστικότητας. Η επίδραση όμως αυτών των φαινομένων επιλύεται χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη ίνα για αντιστάθμιση της διασποράς μειώνοντας έτσι την μεταδιδόμενη ισχύ για τις μη γραμμικότητες και φροντίζοντας να μην αλιωθεί η ίνα κατά την εγκατάσταση της για τη διπλοθλαστικότητα. Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια στον τομέα των οπτικών ινών αντιμετώπισε με επιτυχία την παραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία, αλλά η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωμένες λόγω αυξημένου κόστους των συστημάτων.^[18]

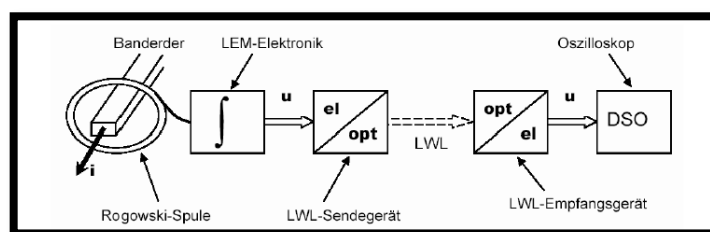
2.10 Εφαρμογές οπτικών ινών σε συστήματα υψηλών τάσεων

2.10.1 Μέτρηση ισχυρών εντάσεων με χρήση πηνίου Rogowski και οπτικών ινών

Αν ένα πηνίο τοποθετηθεί έτσι ώστε να περικλείει έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα τότε στα άκρα αυτού του πηνίου επάγεται μια τάση ανάλογη με την μεταβολή του ρεύματος di/dt . Στα άκρα ενός τέτοιου πηνίου που καλείται πηνίο Rogowski συνδέεται ένας ολοκληρωτής που δύναται να αναπαράγει την κυματομορφή του ρεύματος. Στην συνέχεια τοποθετείται ένας οπτικοηλεκτρονικός μετατροπέας, ο οποίος δέχεται το προς μέτρηση ρεύμα με το οποίο τροφοδοτεί μια πηγή φωτός (laser). Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί ως πομπός ενός διαμορφωμένου οπτικού σήματος που οδηγείται μέσω μιας οπτικής ίνας στο χώρο της χαμηλής τάσης όπου καταγράφεται η μέτρηση. Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση πριν αποτυπωθεί η κυματομορφή είναι η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό μέσω ενός οπτικού δέκτη (φωτοανιχνευτή). Το πηνίο Rogowski είναι ευαίσθητο μόνο στο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό και όχι σε παράσιτα μαγνητικά πεδία. Η σωστή χρήση του πηνίου Rogowski απαιτεί προσοχή με τη θωράκιση των καλωδίων και δύναται να έχει ταχύτερη απόκριση της τάξεως μεγέθους ns. Στην Εικόνα 2.13 φαίνονται τα βήματα της συγκεκριμένης μεθόδου μέτρησης ^[19].

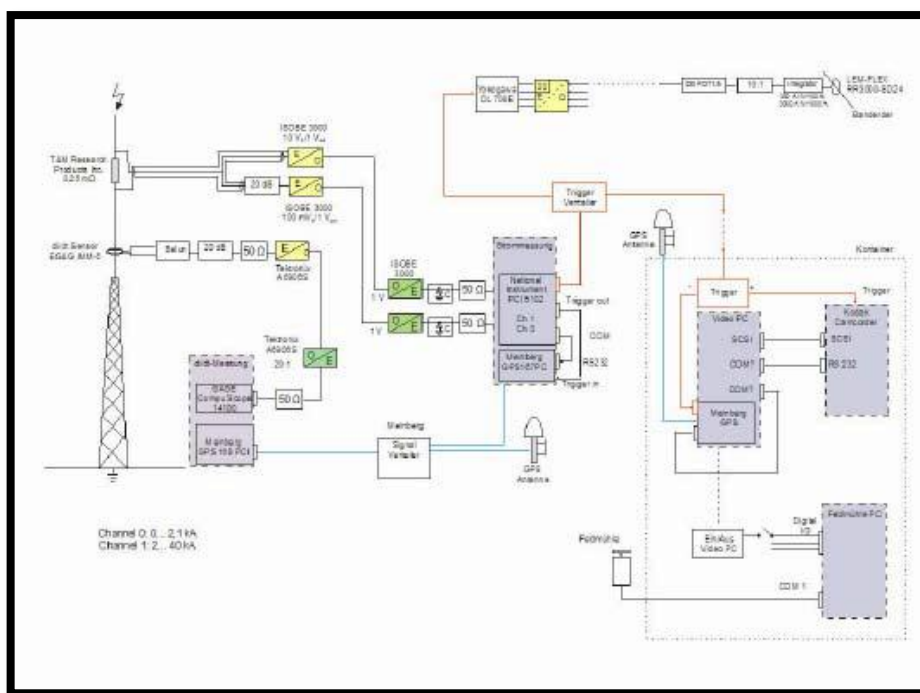


Εικόνα 2.8: πηνίο Rogowski



Εικόνα 2.9: Διάταξη μέτρησης ισχυρών εντάσεων μέσω πηνίου Rogowski και οπτικού συστήματος μετάδοσης

Η χρήση αυτής της μεθόδου έγινε κατά τη μέτρηση κεραυνικού πλήγματος στο σταθμό αναμετάδοσης της κρατικής τηλεόρασης της Αυστρίας στο Gaisberg το 2005. Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται αναλυτικά η εγκατεστημένη διάταξη μέτρησης του κεραυνού καθώς και ο αισθητήρας ρεύματος, η αρχή λειτουργίας του οποίου βασίζεται σε ένα πηνίο Rogowski (LEM-flex RR3000/SD24-36-48).



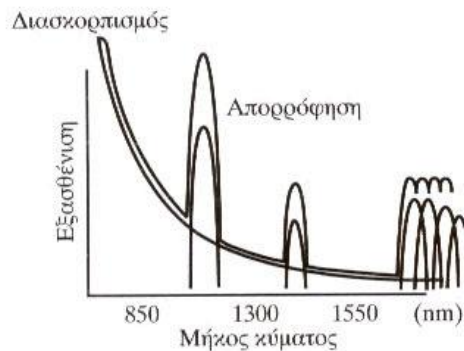
Εικόνα 2.10: Διάταξη μέτρησης κεραυνικού πλήγματος

2.10.2 Έλεγχος Οπτικών Ινών

Στις οπτικές ίνες ο έλεγχος κυρίως συμπεριλαμβάνει τη γεωμετρία ινών και την εξασθένηση ενώ επίσης η διάμετρος του πυρήνα, η διάμετρος της σύνδεσης και ο συγκεντρωτισμός είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνδεση δύο ινών. [20][21]

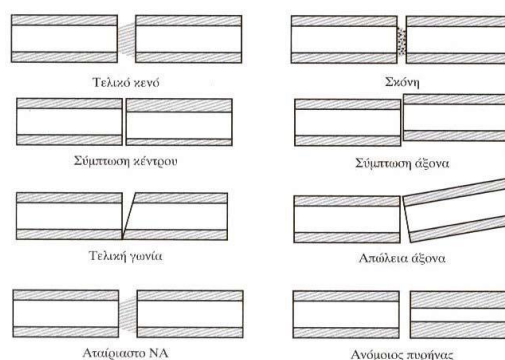
- Έλεγχος συνέχειας οπτικής ίνας: Αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα των οπτικών ινών και διεξάγεται με τη χρήση μιας πηγής ορατού φωτός συνήθως ενός Laser HeNe στα 633nm ή μιας LED ή μιας διόδου Laser στα 650nm που είναι ορατή. Έτσι προσδιορίζονται μικρές καμπές ή ρωγμές της ίνας ελέγχοντας το φως μέσω του χρωματιστού περιβλήματος.
- Έλεγχος εξασθένησης οπτικών ινών: Η εξασθένηση των οπτικών ινών είναι αποτέλεσμα δύο παραγόντων της απορρόφησης και του διασκορπισμού. Η απορρόφηση προκαλείται από την απορρόφηση του φωτός και την μετατροπή του σε θερμότητα από μόρια που βρίσκονται στο εσωτερικό του γυαλιού. Τα κυριότερα στοιχεία που απορροφούν ενέργεια ακτινοβολίας είναι το θετικό (OH^+) και οι νοθείες των υλικών στους ημιαγωγούς που χρησιμεύουν για την τροποποίηση του δείκτη διάθλασης του γυαλιού. Η απορρόφηση αυτή εμφανίζεται σε διακριτά μήκη κύματος που καθορίζονται από τα στοιχεία που απορροφούν το φως. Για το OH^+ η απορρόφηση σε πιο έντονη μορφή εμφανίζεται στα 1000nm στα 1400nm και πάνω από τα 1600nm. Ο

διασκορπισμός είναι η μεγαλύτερη αιτία εξασθένησης των οπτικών ινών. Εμφανίζεται όταν το φως έρχεται σε σύγκρουση με μεμονωμένα άτομα στο εσωτερικό του γυαλιού και είναι ανισοτροπικό. Το φως που διασκορπίζεται σε γωνίες που βρίσκονται εκτός του αριθμητικού ανοίγματος NA της ίνας θα απορροφηθεί στις συνδέσεις και θα σταλεί πίσω στην πηγή. Ο διασκορπισμός είναι επίσης έκφραση του μήκους κύματος ανάλογος προς την ανάστροφη τετάρτη δύναμη του μήκους κύματος του φωτός. Άρα αν διπλασιαστεί το μήκος κύματος του φωτός μειώνονται οι απώλειες διασκορπισμού κατά 16 φορές.



Εικόνα 2.11: Καμπύλη εξασθένησης γυάλινης οπτικής ίνας

- Έλεγχος εξαρτημάτων: Η απώλεια στις επαφές σύνδεσης προκαλείται από ένα αριθμό παραγόντων και περιορίζεται όταν οι πυρήνες των δύο ινών ευθυγραμμίζονται τελείως. Τα τελικά κενά δημιουργούν δύο ειδών προβλήματα, απώλεια εισόδου και απώλεια επιστροφής. Ο κώνος φωτός που εκπέμπεται από τον συνδετήρα θα διασκορπιστεί στον πυρήνα της ίνας λήψης και θα χαθεί.



Εικόνα 2.12: Απώλειες στις επαφές σύνδεσης

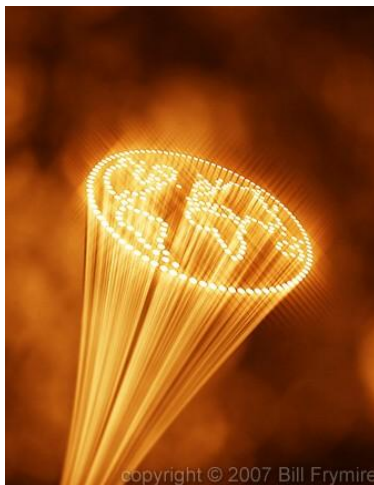
Το κενό αέρος μεταξύ των ινών προκαλεί ανάκλαση όταν το φως έρχεται αντιμέτωπο με την αλλαγή του δείκτη ανάκλασης από την γυάλινη ίνα στον αέρα. Η ανάκλαση αυτή, ονομάζεται ανάκλαση Fresnel και ανέρχεται στο 5% στους τυπικούς επίπεδους λείους συνδετήρες και σημαίνει ότι κανένας από αυτούς τους συνδετήρες με κενό δεν θα έχει απώλεια

μικρότερη από 0.3dB. Η ανάκλαση είναι γνωστή και ως επιστρεφόμενη ανάκλαση ή απώλεια οπτικής επιστροφής και μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα στα συστήματα που λειτουργούν με βάση το laser. Οι συνδετήρες χρησιμοποιούν ένα αριθμό τεχνικών λείανσης για να εξασφαλίσουν τη φυσική επαφή των άκρων των ινών και να μειώσουν την επιστρεφόμενη ανάκλαση. Στις μηχανικές συνδέσεις γίνεται να μειωθεί η επιστρεφόμενη ανάκλαση με χρήση μη κάθετων συνδέσεων που προκαλούν την απορρόφηση της ανάκλασης αυτής στο σημείο σύνδεσης της ίνας. Το άκρο της ίνας θα πρέπει να λειάζεται κατάλληλα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Δύο πηγές απώλειας έχουν σχέση με τις διαστάσεις όπως το αριθμητικό άνοιγμα (NA) και η διάμετρος του πυρήνα. Οι διαφορές σε αυτές τις δύο πηγές θα δημιουργήσουν συνδέσεις με διαφορετικές απώλειες ανάλογα με την κατεύθυνση μετάδοσης του φωτός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Οπτικές Ίνες και Κατασκευές

Η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών συνδέθηκε άμεσα με τις εξελίξεις της οπτικο-ηλεκτρονικής και των επικοινωνιών με οπτικές ίνες στις βιομηχανίες. Πολλά από τα εξαρτήματα που σχετίζονται με αυτές τις βιομηχανίες συχνά αναπτύσσονταν για εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών. Επιπλέον, καθώς οι τιμές των εξαρτημάτων έπεφταν και βελτιωνόταν η ποιότητα, η ικανότητα των αισθητήρων οπτικών ινών να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς αισθητήρες γινόταν ολοένα και πιο αισθητή τόσο για τη μέτρηση θερμοκρασίας, πίεσης, παραμόρφωσης, υγρασίας, περιστροφής, επιτάχυνσης, ακουστικής, δόνησης, ιξώδους όσο και άλλων παραμέτρων. Οι πιο εμπορικά επιτυχημένοι αισθητήρες οπτικών ινών ήταν αυτοί που στόχευαν σε αγορές που η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων ήταν ελάχιστα ανεπτυγμένη έως ανύπαρκτη. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών, όπως το μικρό βάρος και μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση, η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η μεγάλη ευαισθησία τους και η ανθεκτικότητά τους στο περιβάλλον αντιστάθμιζαν κατά πολύ τα βασικά μειονεκτήματα του υψηλού κόστους και της μη εξοικείωσης του χρήστη.



Η κατάσταση όμως άλλαξε. Οι οπτικές ίνες που κόστιζαν το 1979 \$20/m σήμερα κοστίζουν \$0.10/m και με πολύ καλύτερες οπτικές και μηχανικές ιδιότητες. Ολοκληρωμένες οπτικές συσκευές που δεν ήταν διαθέσιμες για χρήση τότε, τώρα χρησιμοποιούνται ευρέως σε μοντέλα παραγωγής. Όσο αυτές οι τάσεις συνεχίζονται, οι σχεδιαστές θα κατασκευάζουν πιο ανταγωνιστικά προϊόντα με αποτέλεσμα οι οπτικοί αισθητήρες να λαμβάνουν ολοένα και υψηλότερη θέση στην αγορά των αισθητήρων.

Σήμερα οι αισθητήρες οπτικών ινών χαίρουν μεγάλης αποδοχής στην παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM). Χρησιμοποιούνται

ολοένα και περισσότερο στα κτίρια για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ακεραιότητάς τους. Η χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών είναι τεράστιας σημασίας της ασφάλειας που μπορούν να προσφέρουν σε ακριβές και κρίσιμες κατασκευές. Στόχος λοιπόν της παρακολούθησης της ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM), είναι να εξασφαλίσει μεγαλύτερη ασφάλεια στην κατασκευή με το μικρότερο δυνατό κόστος.^[26]



Τα συστήματα SHM είναι ικανά να αποτιμούν τη δομική ακεραιότητα κατά την κατασκευή αλλά και κατά τη διάρκεια λειτουργίας, επιτρέποντας έτσι τις έγκαιρες ενέργειες συντήρησης για την αύξηση της ασφάλειας και της ζωής των κατασκευών. Στα συστήματα αυτά είναι πολύ σημαντικό να αξιολογείται η πραγματική κατάσταση μιας κατασκευής. Με την ανάπτυξη των αισθητήρων οπτικών ινών τα τελευταία χρόνια μπορούν να μετρηθούν πολλά φυσικά μεγέθη. Τα εξαιρετικά τους χαρακτηριστικά, όπως η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η ανθεκτικότητα αλλά και η ικανότητα να κατανέμονται πολλοί αισθητήρες σε μια οπτική ίνα, τους κάνουν ιδανικούς για τα SHM συστήματα^[34].

3.1 Εφαρμογές οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό παραμορφώσεων

Στο σημείο αυτό γίνεται μια παρουσίαση σημαντικών και πρόσφατων εφαρμογών αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται εφαρμογές οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό παραμορφώσεων (optical fiber strain sensors) και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τομέα που εφαρμόζονται.^[27]



Αισθητήρας είναι μία συσκευή που ανιχνεύει ένα μακροσκοπικό φυσικό μέγεθος και το μετατρέπει σε ένα μετρήσιμο μέγεθος συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Αποτελεί δηλαδή τη συσκευή που συνδέει τον ηλεκτρονικό κόσμο με το φυσικό περιβάλλον. Συνεπώς ο αισθητήρας μετατρέπει ένα φυσικό μέγεθος ή μία χημική ποσότητα όπως είναι το φως, η δύναμη, η πίεση και η θερμοκρασία σε κάποιο μετρήσιμο μέγεθος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα:

- Το πρώτο τμήμα αντιλαμβάνεται και μετατρέπει τη μετρήσιμη φυσική και χημική ποσότητα σε ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα και καλείται μετατροπέας (transducer).
- Το δεύτερο ηλεκτρικό τμήμα είναι που μετατρέπει το σήμα του μετατροπέα σε κάποιο τυποποιημένης μορφής σήμα που καλείται κύκλωμα οδήγησης (driving circuit).

Το τελευταίο χαρακτηριστικό του αισθητήρα είναι το περίβλημα (package) μέσα στο οποίο θα συναρμολογηθεί και καθορίζεται από τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος που έχει τοποθετηθεί ενώ δύναται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση του και ιδίως στο χρόνο απόκρισης του. Επίσης πολλές φορές χρειάζεται το σήμα να τροποποιηθεί πρώτου αξιοποιηθεί.^[28]

3.1.1 Συμβατικοί Αισθητήρες

Οι συμβατικοί αισθητήρες παρουσιάζουν πάρα πολλά μειονεκτήματα όπως ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και σε δονήσεις, αδυναμία πραγματοποίησης δυναμικών μετρήσεων,

υψηλό κόστος τοποθέτησης ενώ παράλληλα απαιτείται ειδική ρύθμιση από εξειδικευμένο προσωπικό, διαβρώνονται εύκολα απαιτώντας διαρκή συντήρηση, αδυνατούν σε διαδικασίες πολυπλεξίας και απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα. Επίσης οι συμβατικοί αισθητήρες είναι ευαίσθητοι σε θερμοκρασιακές μεταβολές.

3.1.2 Αισθητήρες των οπτικών ινών

Οι αισθητήρες των οπτικών ινών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους: τους ενδογενείς, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις οπτικές ίνες σαν το στοιχείο αίσθησης και τους εξωγενείς όταν η οπτική ίνα είναι το μέσο για την μεταφορά των σημάτων σε αισθητήρα ηλεκτρονικό που επεξεργάζεται τα σήματα. Οι ίνες έχουν πολλές χρήσεις σε καταναμεμημένα δίκτυα αισθητήρων αλλά και στην παρακολούθηση αισθητήρων από μεγάλες αποστάσεις, ειδικά λόγω του μικρού τους μεγέθους και του γεγονότος ότι δεν χρειάζονται ηλεκτρική παροχή στην απομακρυσμένη θέση τους.

3.1.2.1 Ενδογενείς Αισθητήρες (Intrinsic Sensors):

Οι ενδογενείς αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της πίεσης, της φόρτισης βάρους, της θερμοκρασίας, της μηχανικής τάσης και άλλες φυσικές και χημικές ποσότητες με τη διαμόρφωση των ιδιοτήτων της δέσμης φωτός που διαδίδεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας. Έτσι, κάθε αλλαγή της έντασης, της φάσης, της πόλωσης του μήκους κύματος ή του χρόνου μετάδοσης του φωτός στην ίνα που προκαλείται από την υπό μέτρηση ποσότητα καταγράφεται και από αυτήν προκύπτει η μέτρηση. Επιπλέον, απαιτείται μόνο μία πηγή και ένας ανιχνευτής φωτός ενώ παράλληλα η πιο σημαντική τους λειτουργία είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν καταναμεμημένη πληροφορία σε πολύ μεγάλες αποστάσεις^[25]. Πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι η θερμοκρασία, η μετατόπιση και η πίεση μπορούν να υπολογιστούν με την τοποθέτηση μίας και μοναδικής οπτικής ίνας.

3.1.2.2 Εξωγενείς Αισθητήρες (Extrinsic Sensors):

Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν συνήθως πολύτροπη οπτική ίνα και μεταφέρουν το φως είτε μέσω ενός διαμορφωτή που επηρεάζεται από έναν υπό μέτρηση εξωτερικό παράγοντα είτε από ένα μη οπτικό όπως ένα ηλεκτρονικό αισθητήρα που είναι συνδεδεμένος με οπτικό πομπό. Οι εξωγενείς αισθητήρες μπορούν να φτάσουν ακόμα και σε μέρη με δύσκολη πρόσβαση ενώ παράλληλα προσφέρουν μεγάλη προστασία σε σήματα μέτρησης από παράσιτα θορύβου και χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν δόνηση, περιστροφή, αλλαγή θέσης, ταχύτητα, επιτάχυνση και καμπυλότητα (εξοχές).

Οι οπτικοί αισθητήρες FBG ^{[29][30]}(Fiber Bragg Grating) χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα σε μεγάλα έργα όπως κτίρια, γέφυρες, δρόμους, φράγματα, θεμέλια τούνελ, επιβεβαίωση σχεδιαστικών υποθέσεων, έλεγχο κρίσιμων παραμέτρων κατά την εξέλιξη

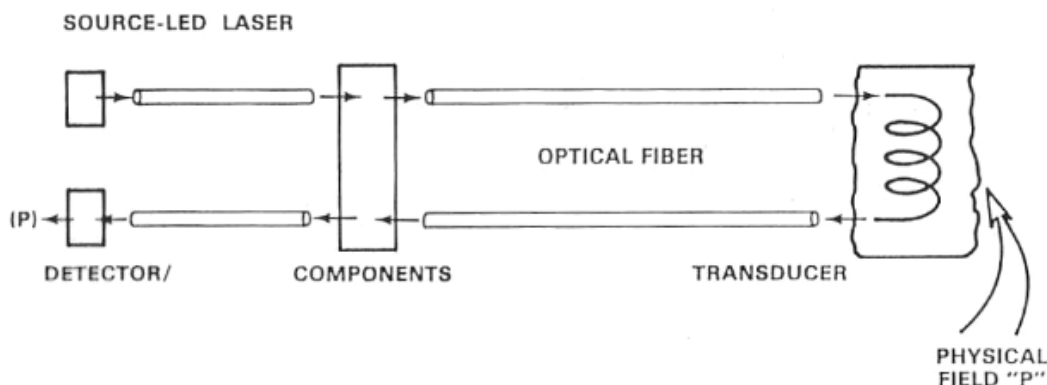
της υλοποίησης των έργων, εκτίμηση της κατάστασης της κατασκευής μετά από σεισμική δραστηριότητα, εντοπισμό «προβληματικών» σημείων μετά από ακραία φαινόμενα (σεισμοί, υπερβολικού φόρτου, υποχώρηση εδάφους, πλημμύρων) καθώς και στη συνδρομή στην ανάπτυξη νέων κατασκευαστικών υλικών τεχνολογιών και τεχνικών παρουσιάζοντας σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Απρόσβλητοι στις Ηλεκτρομαγνητικές Ακτινοβολίες: Οι αισθητήρες δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη ΗΜ πεδίων.
- Μηδενική Ενέργεια: Οι αισθητήρες δεν χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα.
- Μακροχρόνια Σταθερότητα: Δεν εμφανίζονται αλλαγές στα χαρακτηριστικά τους, γεγονός που τους κάνει κατάλληλους για μακροχρόνιες μετρήσεις χωρίς ανάγκες για καλιμπράρισμα.
- Ευκολία και Κόστος Εγκατάστασης: Συστοιχίες πολλαπλών οπτικών αισθητήρων είναι εύκολο να εγκατασταθούν με χαμηλό κόστος.
- Ενσωμάτωση σε Συνθετικά Υλικά: Διαστάσεις αισθητήρων και υλικά συμβατά με τα περισσότερα συνθετικά υλικά και διαδικασίες παραγωγής.
- Μέγεθος Αισθητήρα: Μικροσκοπικοί αισθητήρες επιτρέπουν πυκνές μετρήσεις.
- Αντοχή στο Χρόνο: Δεν έχει παρατηρηθεί αλλοίωση ή διάβρωση των αισθητήρων που ενσωματώνονται σε διάφορες δομές με την πάροδο του χρόνου.
- Δυνατότητα Πολυπλεξίας: Εκατοντάδες μετρήσεις δύναται να καταγραφούν σε ελάχιστες ίνες και να πραγματοποιηθούν από ένα και μόνο μηχάνημα.
- Παρακολούθηση από απόσταση: Η παρακολούθηση μπορεί να γίνει πολλά χιλιόμετρα μακριά από την υπό εξέταση κατασκευή χωρίς ενίσχυση.
- Λειτουργία: Δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών μεγεθών (τάση εφελκυσμού, θερμοκρασία, επιτάχυνση, πίεση) σε μια και μόνο ίνα.
- Μικρό μέγεθος περίπου 250μm και βάρος.
- Ελαστικότητα.
- Ανεπηρέαστο σε ακτινοβολίες.
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.
- Συμβατοί με τα σεισμικά στάνταρ.
- Φίλικοί προς το περιβάλλον.
- Βελτιστοποιούν τα αποτελέσματα οικονομικά και κοινωνικά.
- Μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων και δυνατότητα επανάληψης μέτρησης κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου είτε αυτό είναι σεισμός είτε ισχυρός άνεμος και πλημμύρα.
- Δεν απαιτούν ρύθμιση μετά την τοποθέτηση τους.
- Αντοχή στη διάβρωση.

- Ανεπηρέαστοι από μέτρηση σε μέτρηση.
- Μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής.
- Τροδοδοτούνται με φως και δεν υπάρχει περίπτωση κινδύνου σε εύφλεκτα υλικά και περιβάλλοντα.

Η απλή μονότροπη οπτική ίνα εκτίθεται σε συγκλίνουσες δέσμες UV laser light και οι δέσμες αυτές διασταυρώνονται παρεμβάλλοντας η μία την άλλη ενώ αλλάζουν το δείκτη διάθλασης τους περιοδικά δημιουργώντας διαφορετικές περιοχές υψηλού και χαμηλού δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της ίνας.^{[31] [32]} Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο και την προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς με τη συνεχή παρακολούθηση της δομικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων, τον έλεγχο της εξέλιξης αστοχιών στο χρόνο, της συνεχούς καταγραφής της στατικής επάρκειας, τους αυτοματοποιημένους τρόπους ενημέρωσης υπευθύνων για τη δομική ακεραιότητα των μνημείων μετά από σεισμούς καθώς και τη διατήρηση της πολιτιστικής ταυτότητας. Επιπλέον έχουν τη δυνατότητα να συνεισφέρουν σε θέματα ναυτιλίας όπως στον έλεγχο φορτο-εκφορτώσεων (hull girder stress), στις αντιδράσεις του κύτους στον κυματισμό (Slamming) στην εξέλιξη φαινομένων συντονισμού, στην κόπωση υλικών και πρόγνωσης συντηρήσεων (fatigue), στη συμπεριφορά κύτους σε παγωμένες θάλασσες καθώς και σε δεδομένα «μαύρου κουτιού».

Μία τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.1: Τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών

Όσον αφορά τη λειτουργία τους, η τροποποιημένη ζώνη της ίνας λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο ανακλώντας μία ελάχιστη ποσότητα του ευρυζωικού σήματος επιτρέποντας παράλληλα στο υπόλοιπο φως να συνεχίσει την πορεία του μέσα στην ίνα. Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στη τάση εφελκυσμού και στις μεταβολές της θερμοκρασίας.^[29]

3.2 Ταξινόμηση αισθητήρων οπτικών ινών

Υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση των κατασκευών που χρησιμοποιούνται τόσο στην ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και στις βιομηχανίες. Πανεπιστημιακά και βιομηχανικά ερευνητικά κέντρα αναπτύσσουν και παράγουν μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων για τους περισσότερους τύπους μετρήσεων και εφαρμογών. Οι αισθητήρες οπτικών ινών χωρίζονται σε πολλές υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργούν με βάση την θέση τους ως προς την οπτική ίνα, ανάλογα με την χρήση τους κ.α.^[27] Ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος του αισθητήριου στοιχείου, οι αισθητήρες οπτικών ινών ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες όπως φαίνεται παρακάτω:

- Σημειακοί αισθητήρες (point sensors): Έχουν ένα σημειακό αισθητήριο στοιχείο στο τέλος του καλωδίου της οπτικής ίνας και μοιάζουν με τους περισσότερους ηλεκτρικούς αισθητήρες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Fabry-Perot.
- Αισθητήρες πολυπλεξίας (multiplexed sensors): Διαθέτουν αρκετά αισθητήρια σημεία και έτσι επιτρέπουν τις μετρήσεις σε πολλά σημεία κατά το μήκος μίας οπτικής ίνας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Fiber Bragg Grating (FBG).
- Αισθητήρες μεγάλου μήκους (long-based sensors): Εντάσσουν τις μετρήσεις σε αισθητήρες μεγαλύτερου μήκους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου SOFO (Surveillance d'ouvrages par fibres optiques).
- Κατανεμημένοι αισθητήρες (distributed sensors): Είναι ικανοί να «νοιώθουν» σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος μιας οπτικής ίνας. Τυπικά κάθε ένα μέτρο σε οπτικές ίνες μήκους πολλών χιλιομέτρων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Brillouin και Raman Scattering.

Επίσης διαχωρίζονται σε κατηγορίες που εξαρτώνται από την ιδιότητα του φωτός που χρησιμοποιείται στους αισθητήρες οπτικών ινών για τον υπολογισμό ενός φυσικού φαινομένου. Η κατηγοριοποίηση φαίνεται παρακάτω:

- Ανάλογα με την ένταση του φωτός (intensity).
- Ανάλογα με τη διαφορά φάσης μεταξύ δυο μηκών κύματος (interferometric).
- Ανάλογα με τον συντονισμό της συχνότητας σε μια οπτική κοιλότητα (Fabry-Perot).
- Ανάλογα με τη διαφορά φάσης μεταξύ δυο μηκών κύματος (interferometric).
- Ανάλογα με τον συντονισμό της συχνότητας σε μια οπτική κοιλότητα (Fabry-Perot).^[33]

Τέλος οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται^[28]. Φυσικοί αισθητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση φυσικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η παραμόρφωση κ.α.

Χημικοί αισθητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του pH, την ανάλυση αερίων κ.α. Τέλος βιοϊατρικοί αισθητήρες είναι αυτοί που εφαρμόζονται στην βιολογία και την ιατρική για μέτρηση της ροής του αίματος, της σύστασης της γλυκόζης κ.α. Εννοείται βέβαια, πως όλοι οι προηγούμενοι τύποι αισθητήρων ανήκουν και στις κατηγορίες αισθητήρων που αναφέρθηκαν σε αυτή την παράγραφο. Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα είδη των αισθητήρων καθώς και μερικά από τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους ^[31].

	SOFO interferometric	Fabry-Perot Interferometric	Fiber Bragg Gratings	Raman scattering	Brillouin scattering
Sensor type	Long-gauge (integral strain)	Point	Point	Distributed	Distributed
Main measurable parameters	Deformation Strain Tilt Force	Strain Temperature Pressure	Strain Temperature Acceleration Water level	Temperature	Strain Temperature
Multiplexing	Parallel	Parallel	In-line and parallel	Distributed	Distributed
Measurement points in one line	1	1	10-50	10000	30000
Typical accuracy					
Strain(με)	1	1	1		20
Deformation (μm)	1	100	1		
Temperature (°C)		0.1	0.1	0.1	0.2
Tilt (μrad)	30				
Pressure (% full scale)		0.25			
Range	20 m gauge			8 km	30 km, 150 km with range extenders
Fiber Type	Single mode	Multimode	Single mode	Multimode	Single mode

Εικόνα 3.2: Σύνοψη των αισθητήρων οπτικών ινών με βάση τις ιδιότητες τους

Μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι αισθητήρες είναι ότι: α) Η ευαισθησία του αισθητήριου στοιχείου και κατ' επέκταση ολόκληρου του συστήματος ενός αισθητήρα επηρεάζεται και από άλλες μεταβλητές πέρα από την επιθυμητή μεταβλητή που μετριέται κάθε φορά. Για να αποκτήσουν «αναισθησία» στις άλλες μεταβλητές έχουν γίνει πολλές μελέτες με πολύ καλά αποτελέσματα. Η διασταύρωση της ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα διότι είναι η αιτία σφαλμάτων στο οπτικό σήμα που φτάνει στην έξοδο. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό υπάρχει και στους συμβατικούς αισθητήρες και β) το κόστος των οπτικών αισθητήρων είναι προς το παρόν, στις περισσότερες των περιπτώσεων, μεγαλύτερο από αυτών που κατασκευάζονται με την παραδοσιακή τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει ουσιαστικά λόγω του υψηλού κόστους των εξαρτημάτων και κυρίως των αισθητήριων οργάνων. Αυτό έγκειται στα χαρακτηριστικά των νέων τεχνολογιών, αλλά και μιας αγοράς που βρίσκεται στα αρχικά της στάδια.

3.3 Συστήματα Παρακολούθησης Κτιρίων

Τα πολυώροφα κτίρια, τα στάδια και τα ιστορικά μνημεία είναι πολύπλοκες κατασκευές που καταπονούνται από τα εξωτερικά φαινόμενα στα οποία εκτίθενται. Τα κτίρια ποικίλουν στο μέγεθος, την γεωμετρία, τα δομικά στοιχεία, τα υλικά κατασκευής και τον τρόπο θεμελίωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζουν την συμπεριφορά ενός κτιρίου όταν αυτό υπερφορτώνεται ή όταν καταπονείται από φυσικά φαινόμενα. Τα ιστορικά μνημεία χτίστηκαν πολλά χρόνια πριν, χρησιμοποιώντας παλιές τεχνικές και εκτέθηκαν για αρκετό διάστημα σε περιβαλλοντικές συνθήκες με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται διαφορετικά στις καταπονήσεις. Χωρίς την κατάλληλη διαχείριση, ένα ιστορικό μνημείο μπορεί εν μέρει ή εξ'ολοκλήρου να καταρρεύσει και να προκύψουν όχι μόνο θέματα ασφάλειας και οικονομίας, αλλά και μια μη αναστρέψιμη πολιτιστική απώλεια.

Η παρακολούθηση της ακεραιότητας ενός κτιρίου επιτρέπει την γρήγορη αξιολόγηση της αριότητας της κατασκευής. Η προσέγγιση αυτή έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα καλύτερα μέσα που υπάρχουν για την αύξηση της ασφάλειας και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός κτιρίου. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τα προγράμματα παρακολούθησης επιτρέπουν στους ιδιοκτήτες να βελτιώσουν τη λειτουργία, τη συντήρηση, την επισκευή και την αντικατάσταση των δομών, βασιζόμενοι σε αξιόπιστα και αντικειμενικά δεδομένα.

Η παρακολούθηση της ακεραιότητας παρέχει αξιόπιστα στοιχεία για την πραγματική κατάσταση μιας δομής, παρατηρεί την εξέλιξη της και ανιχνεύει την εμφάνιση νέων ατελειών. Το σκυρόδεμα μπορεί να ραγίσει, ενώ ο χάλυβας μπορεί να οξειδωθεί και να σπάσει λόγω κόπωσης. Η υποβάθμιση των υλικών μπορεί να οφείλεται σε μηχανικούς, παράγοντες (υψηλότερη φόρτιση) ή σε φυσικοχημικούς παράγοντες (διάβρωση του χάλυβα, διείσδυση των αλάτων και των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, πάγωμα του σκυροδέματος, κ.λπ.). Η εικόνα της τρέχουσας κατάστασης και της εξέλιξης ενός κτιρίου σε πραγματικό χρόνο μπορεί να επιτευχθεί με τη μόνιμη εγκατάσταση αισθητήρων και τη συνεχή μέτρηση των σχετικών παραμέτρων.

Το Σεπτέμβριο του 2000 στην Σιγκαπούρη, κατασκευάστηκε ίσως το μεγαλύτερο σύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας ενός συγκροτήματος πολυώροφων κτιρίων ^[40]. Τοποθετήθηκαν συνολικά πάνω από 2000 αισθητήρες οπτικών ινών στους σκελετούς των κτιρίων κατά την διάρκεια της κατασκευής τους. Το project αυτό είχε σαν στόχο την διεύρυνση της γνώσης σχετικά με την πραγματική δομική συμπεριφορά, τον έλεγχο της διαδικασίας κατασκευής, την αύξηση της ασφάλειας κατά την διάρκεια ζωής των κατασκευών, την ενίσχυση των δραστηριοτήτων συντήρησης, καθώς και την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης μετά από διάφορα γεγονότα όπως οι σεισμοί, οι απρόσμενες καιρικές συνθήκες κ.α.

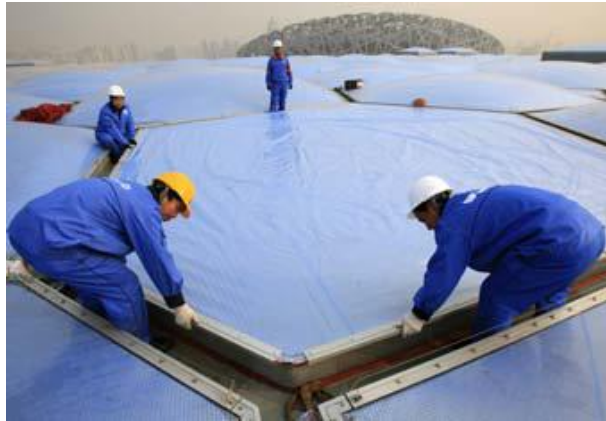


Εικόνα 3.3: Συγκρότημα Κτιρίων στη Σιγκαπούρη με εγκατεστημένο σύστημα SHM

Το Εθνικό Κέντρο Υγρού Στίβου στην Κίνα, γνωστό και ως «Water Cube», κατασκευάστηκε για τους Θερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του 2008. Στην κατασκευή ενσωματώθηκε ένα σύστημα SHM που περιελάμβανε μεταξύ άλλων, 230 αισθητήρες παραμορφώσεων και 30 αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου FBG^[41]. Μεταξύ των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν, ήταν και παραμορφώσεις που είχαν άμεση σχέση με την θερμοκρασία και το χιόνι (temperature-induced, snow-induced strains). Τα δεδομένα έδειξαν ότι οι παραμορφώσεις που προκαλούνταν από την θερμοκρασία ήταν αρκετά μεγάλες, ενώ οι παραμορφώσεις της κατασκευής που προκαλούνταν από πολύ βαρύ χιόνι ήταν σχετικά μικρές.



Εικόνα 3.4: Εθνικό Κέντρο Υγρού Στίβου με ενσωματωμένο σύστημα SHM



Εικόνα 3.5: Τοποθέτηση συστήματος SHM

Ένα παράδειγμα ιστορικού μνημείου στο οποίο εγκαταστάθηκε σύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας του, είναι ο καθεδρικός ναός Riga's Dome στην Λετονία. Χτίστηκε το 1211 και θεωρείται η μεγαλύτερη μεσαιωνική εκκλησία στα κράτη της Βαλτικής. Κατά την διάρκεια του 2005 και του 2006 πραγματοποιήθηκαν έργα αποκατάστασης στον ναό. Για να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς του ναού κατά την διάρκεια των διαφόρων φάσεων της αποκατάστασης, καθώς και η πρόγνωση πιθανής διάδοσης ρωγμών στην αρχική δομή, εγκαταστάθηκε ένα μόνιμο σύστημα 24 αισθητήρων οπτικών ινών τύπου SOFO^[42]. Παράλληλα εγκαταστάθηκαν και αισθητήρες θερμότητας για τον εσωτερικό και εξωτερικό έλεγχο της θερμοκρασίας. Οι παρακολουθήσεις από το 2005 έδειξαν αυξομειώσεις στο πάχος ήδη υπάρχουσών ρωγμών στο εσωτερικό του ναού, της τάξης των 1-2 mm τον χρόνο, ανάλογα την εποχή.



Εικόνα 3.6: Εκκλησία Riga's Dome στη Λετονία με SHM

3.4 Συστήματα Παρακολούθησης Γεφυρών

Οι γέφυρες είναι πολύπλοκες κατασκευές που αποτελούνται από πολλά στοιχεία και εξαρτήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καταπονούνται όταν εκτίθενται σε εξωτερικά φαινόμενα. Ένα επιτυχημένο πρόγραμμα παρακολούθησης μιας γέφυρας απαιτεί σωστό προγραμματισμό, σχεδιασμό και εκτέλεση. Για την πλήρη επίτευξη των στόχων ενός τέτοιου προγράμματος, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις ιδιαιτερότητες της κάθε γέφυρας. Τα συστήματα SHM επιτρέπουν την ταχύτατη αξιολόγηση της ακεραιότητας μιας γέφυρας και για την προσέγγιση αυτή έχουν αναγνωριστεί ως ένα από τα καλύτερα μέσα που υπάρχουν για την αύξηση της ασφάλειας και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης γεφυρών.^[35]

Οι κύριες λειτουργίες της παρακολούθησης είναι να εξασφαλιστεί η μακροζωία και η ασφάλεια των γεφυρών καθώς και να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση τους. Στην πραγματικότητα η κακή λειτουργία των γεφυρών μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες και σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει την απώλεια ανθρώπινων ζωών. Ακόμα όμως και αν δεν υπάρχει η απώλεια ζωής, υπάρχει μεγάλο αντίκτυπο στον πληθυσμό όταν η κατασκευή βρίσκεται εν μέρει ή πλήρως εκτός λειτουργίας. Το οικονομικό αντίκτυπο της ανεπαρκούς κατασκευής δεν ερμηνεύεται μόνο σε κόστη ανοικοδόμησης αλλά και σε απώλειες σε άλλους κλάδους της οικονομίας.

Το πρόγραμμα παρακολούθησης διαδραματίζει τεράστιο ρόλο κατά την φάση της κατασκευής, επιτρέποντας την επαλήθευση των σχεδιαστικών υποθέσεων και της πορείας της κατασκευής. Αυτή η έγκαιρη ενημέρωση, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επιταχύνει τους ρυθμούς κατασκευής, καθώς επίσης και να αυξήσει την συνολική ποιότητα μιας γέφυρας. Μαθαίνοντας πώς συμπεριφέρεται μια γέφυρα κάτω από πραγματικές συνθήκες στο φυσικό της περιβάλλον, μπορεί να βοηθήσει τους σχεδιαστές να δημιουργήσουν καλύτερες δομές στο μέλλον. Τα περισσότερα ελαττώματα ξεκινούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής και η ανίχνευση των συνεχιζόμενων ατελειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αποκλίσεων από τον αρχικό σχεδιασμό. Η παρακολούθηση δίνει επίσης μια ακριβή αξιολόγηση των επιδόσεων των νέων υλικών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της γέφυρας αλλά και στην επιδιόρθωσή της. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται εύκολα με τους αισθητήρες οπτικών ινών καθώς αυτοί ενσωματώνονται αποτελεσματικά σε νέα υλικά όπως τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες. Επιπλέον, προσαρμόζονται τέλεια για τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της συμπεριφοράς των γεφυρών αλλά και για μικρής διάρκειας παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών κάτω από κυκλοφοριακή φόρτιση.

Η εταιρία SMARTEC SA τα τελευταία χρόνια έχει χρησιμοποιήσει τους αισθητήρες οπτικών ινών για την παρακολούθηση της ακεραιότητας περισσότερων από 40 γεφυρών σε όλο τον πλανήτη^[43]. Περίπου οι μισές είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς είναι και το πιο

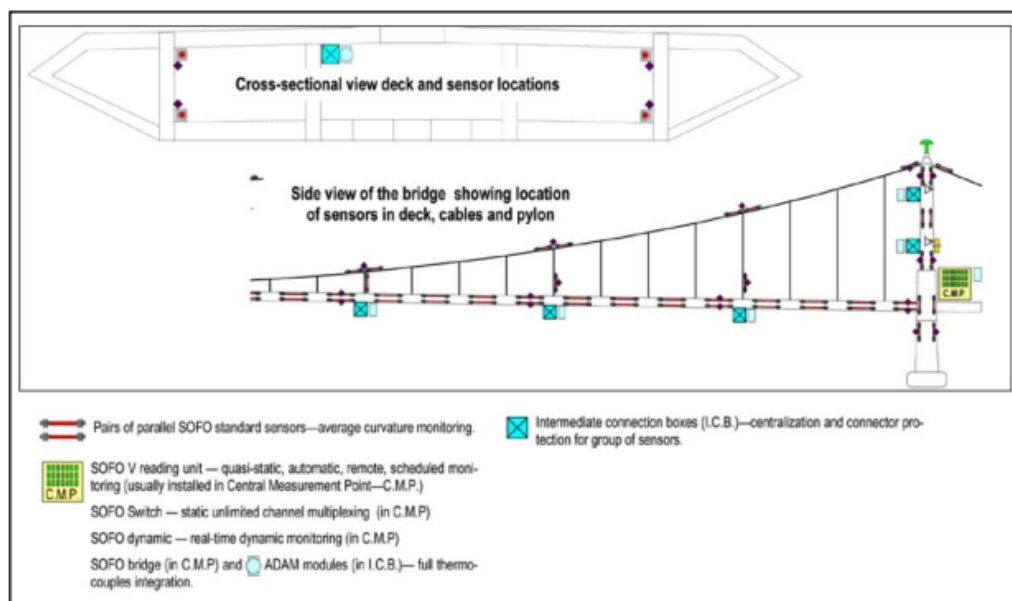
διαδεδομένο είδος γεφυρών, ενώ οι υπόλοιπες είναι με δοκούς, τοξοειδείς, κρεμαστές κ.α. Αυτό αποδεικνύει ότι η παρακολούθηση μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε οποιοδήποτε είδος γέφυρας. Οι περισσότερες εφαρμογές έγιναν σε γέφυρες που ήταν υπό κατασκευή ενώ οι υπόλοιπες σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές ή κατασκευές που επιδιορθώνονταν. Ο σκοπός των παρακολουθήσεων ήταν ο έλεγχος της κατάστασης γεφυρών με γνωστά προβλήματα για την αύξηση της διάρκειας ζωής τους, να παρέχουν πληροφορίες σε πρώτο χρόνο για την πορεία της κατασκευής, αλλά κυρίως να αντλούν πληροφορίες για τη δομική συμπεριφορά για επιβεβαίωση των σχεδιαστικών υποθέσεων. Οι περισσότερες εφαρμογές αφορούσαν τη τοποθέτηση μικρού αριθμού αισθητήρων (20 ή λιγότεροι) ενώ μερικές χρησιμοποίησαν περισσότερους από 100.^[35] Οι θέσεις που τοποθετήθηκαν ήταν κυρίως στα στοιχεία της κατασκευής που παραλάμβαναν φορτία όπως τα τόξα, τα δοκάρια και τα καλώδια. Το κόστος τοποθέτησης και παρακολούθησης κυμαινόταν από \$50k-\$500k ή και παραπάνω, ανάλογα με τον αριθμό των αισθητήρων αλλά και τη διάρκεια παρακολούθησης (μικρή, μεγάλη ή μόνιμη). Τα παραδείγματα εφαρμογών αισθητήρων οπτικών ινών σε γέφυρες είναι πάρα πολλά. Μερικά από αυτά είναι η καλωδιωτή γέφυρα στο λιμάνι της Βενετίας^[36], η γέφυρα Île d'Orléans στο Κεμπέκ^[37], η γέφυρα Versoix κοντά στην Γενεύη^[38] και η κρεμαστή γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη^[34].



Εικόνα 3.7: Γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη

Η τελευταία δόθηκε στην κυκλοφορία πριν από 102 χρόνια στις 31 Δεκεμβρίου του 1909 έχει μήκος 2.089m και συνδέει την περιοχή του Μπρούκλιν με το Μανχάταν. Στόχος ήταν η παρακολούθηση της, εξέλιξης της διάβρωσής της και γι' αυτό έπρεπε να αποκτηθούν δεδομένα για τις παραμορφώσεις, τις μετατοπίσεις και τις θερμοκρασίες του κυρίου καλωδίου της γέφυρας. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιούνταν για να εκτιμηθεί η καταγραφή των

παραμορφώσεων στα σημεία που αναφέρθηκαν, ανάλογα με τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, την ώρα της ημέρας, τις εποχές του χρόνου και τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Έτσι, εγκαταστάθηκαν 4 αισθητήρες τύπου SOFO μήκους 6m στο κύριο καλώδιο και στον σκελετό του οδοστρώματος και άλλοι 2 αισθητήρες παραμορφώσεων τύπου FBG, που είχαν ευαισθησία και στην θερμοκρασία, στον πυλώνα και σε ένα δευτερεύον καλώδιο. Με τους αισθητήρες αυτούς ήταν δυνατή η καταγραφή των παραμορφώσεων στα σημεία που αναφέρθηκαν, ανάλογα με τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, την ώρα της ημέρας, τις εποχές του χρόνου και τις κυκλοφοριακές συνθήκες.



Εικόνα 3.8: Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών στη γέφυρα του Μανχάταν [39]

3.5 Συστήματα Παρακολούθησης Αγωγών

Η διαχείριση των αγωγών παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις που είναι μοναδικές. Το μεγάλο μήκος τους, η μεγάλη τους αξία, ο υψηλός κίνδυνος και συχνά οι δύσκολες συνθήκες πρόσβασης, απαιτούν συνεχή παρακολούθηση καθώς και βελτιστοποίηση των παρεμβάσεων συντήρησης. Η κύρια ανησυχία για τους ιδιοκτήτες αγωγών προέρχεται από πιθανές διαρροές, που μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να θέσουν τον αγωγό εκτός λειτουργίας για επισκευή. Οι διαρροές μπορεί να έχουν διάφορες αιτίες, όπως οι υπερβολικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από κατολισθήσεις, σεισμούς ή συγκρούσεις κινητών αντικειμένων, από διάβρωση, φθορά, ρωγμές του υλικού ή από την εισχώρηση ξένων σωμάτων.

Στην Ιταλία σε έναν θαμμένο αγωγό φυσικού αερίου 35 ετών και μήκους 500 μέτρων, τοποθετήθηκε ένα κατανεμημένο σύστημα παρακολούθησης για τον υπολογισμό παραμορφώσεων^[48]. Παλαιότερα είχαν εγκατασταθεί 3 συμμετρικά καλώδια για την καταγραφή δονήσεων σε κάποια τμήματα του αγωγού μήκους 50 και 100 m που θεωρούνταν τα περισσότερο καταπονημένα σύμφωνα με μια τεχνική μελέτη. Οι αισθητήρες αυτοί ήταν αρκετά

βοηθητικοί, αλλά δεν μπορούσαν να καλύψουν όλο το μήκος του αγωγού, παρέχοντας μόνο τοπικές μετρήσεις. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά είδη κατανεμημένων αισθητήρων τύπου SMARTape που είναι ουσιαστικά μια θερμοπλαστική ταινία μέσα στην οποία βρίσκεται ενσωματωμένη μια οπτική ίνα. Ο τύπος αυτών των αισθητήρων έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και χημικές αντοχές, προσφέροντας τέλεια συγκόλληση μεταξύ της οπτικής ίνας και του αγωγού. Έτσι, εγκαταστάθηκαν τρεις παράλληλες γραμμές αποτελούμενες από 5 τμήματα αισθητήρων SMARTape σε όλο το μήκος του αγωγού. Τα μήκη των τμημάτων κυμαίνονταν από 71m-132m, και οι αισθητήρες ήταν τοποθετημένοι σε διεύθυνση 0° , 120° και -120° ως προς τον άξονα του αγωγού.



Οι αισθητήρες της ταινίας SMARTape παρέχουν δεδομένα για τις μέσες παραμορφώσεις, τις μέσες καμπυλότητες και για τη μετατόπιση της θέσης του αγωγού, ανά 0.25 m.

3.6 Συστήματα Παρακολούθησης στην Αεροδιαστημική και στην Άμυνα

Το τμήμα αυτό της αγοράς περιλαμβάνει τόσο τους στρατιωτικούς, όσο και τους αεροδιαστημικούς τομείς. Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάπτυξη, τον έλεγχο και την δοκιμή συστημάτων πρόωσης και συσκευών ανίχνευσης καθώς και στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας αεροσκαφών σε κρίσιμα σημεία όπως είναι οι πτέρυγες, η άτρακτος το κάθετο ουραίο κ.α.

Τα μέλη της Ένωσης Ευρωπαϊκών Ερευνητικών Ιδρυμάτων στην Αεροναυπηγική (EREA, European Research Establishments in Aeronautics) ασχολούνται από τις αρχές του 90' με την έρευνα και την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης της ακεραιότητας των κατασκευών με την χρήση οπτικών ινών^[39]. Πέρα από τα προγράμματα που απασχολούν κάθε μέλος ξεχωριστά, υπήρχε και ένα πρόγραμμα με την ονομασία AHMOS (Active Health Monitoring Systems) στο οποίο συνεργάστηκαν τα περισσότερα μέλη. Το project αυτό επιδίωκε την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης της ακεραιότητας μεγάλης κλίμακας δομών, με στόχο την μείωση του κόστους ιδιοκτησίας στρατιωτικών αεροσκαφών, ελαττώνοντας το κόστος επιθεώρησης και συντήρησης τους και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής τους. Το πρόγραμμα αυτό ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2000 και διήρκεσε 3 χρόνια με συνολικό προϋπολογισμό 9.5 εκατ. ευρώ.

Το ίδρυμα INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) στην Ισπανία και μέλος της EREA ασχολείται από το 1999 με την ενσωμάτωση αισθητήρων οπτικών ινών σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Τα κύρια ενδιαφέροντα του ήταν, η ανάπτυξη αξιόπιστων τεχνολογιών για την ενσωμάτωση οπτικών ινών σε κατασκευές από σύνθετα υλικά χωρίς να καταστρέφονται οι αισθητήρες, η αξιολόγηση του συστήματος παρακολούθησης και η μηχανική του συμπεριφορά σε υπηρεσιακές συνθήκες καθώς και η επικύρωση του συστήματος αισθητήρων οπτικών ινών ως εναλλακτικό σύστημα παρακολούθησης από εκείνο των συμβατικών ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων.

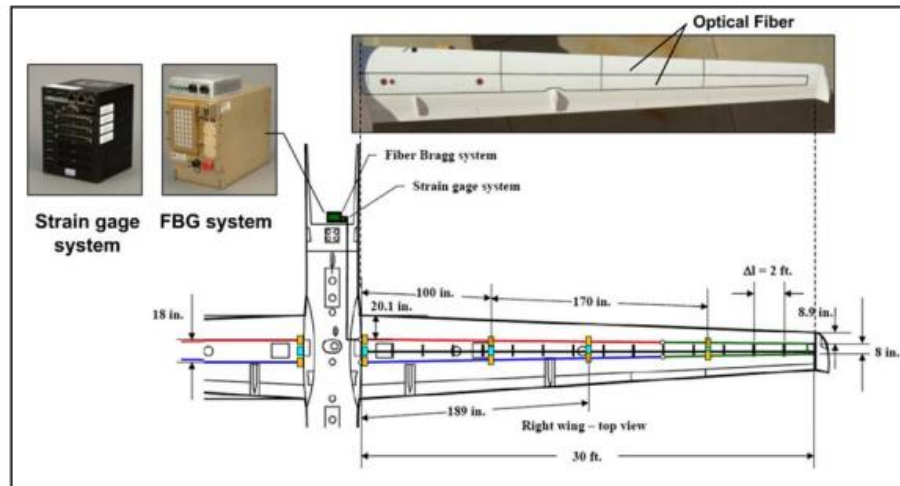
Μια άλλη σπουδαία εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε το 2008 είναι η εγκατάσταση αισθητήρων οπτικών ινών στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος με την ονομασία Ikhana. Το αεροσκάφος αυτό κατασκευάστηκε από την NASA και χρησιμοποιείται στην καταπολέμηση πυρκαγιών, στέλνοντας φωτογραφικό υλικό από τα μέτωπα πυρκαγιών στις αρμόδιες υπηρεσίες. Εκτός αυτού, το Ikhana χρησιμοποιείται και για την αξιολόγηση της προηγμένης τεχνολογίας ανίχνευσης που έχει εγκατασταθεί στα φτερά του^[45].



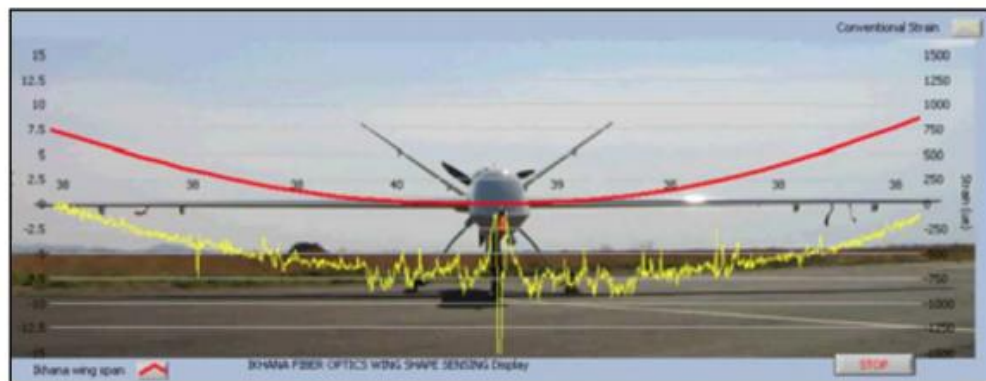
Εικόνα 3.9: Φωτογραφία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους Ikhana

Σε κάθε πτέρυγα του αεροσκάφους τοποθετήθηκαν 1440 αισθητήρες παραμορφώσεων, τύπου FBG. Στόχος της τοποθέτησης τους ήταν η αξιολόγηση των πραγματικών φορτίων που παραλαμβάνουν οι πτέρυγες κατά την πτήση, η επαλήθευση των μαθηματικών μοντέλων και των σχεδιαστικών εργαλείων των οπτικών ινών, καθώς και αξιολόγηση προσαρμογής του σχήματος της πτέρυγας. Εάν το σχήμα της πτέρυγας μπορούσε να αλλάξει κατά την πτήση, τότε η αποτελεσματικότητα και η απόδοση του αεροσκάφους θα μπορούσε να βελτιωθεί από την απογείωση και την προσγείωση μέχρι την κανονική πτήση και τους ελιγμούς.^[26]

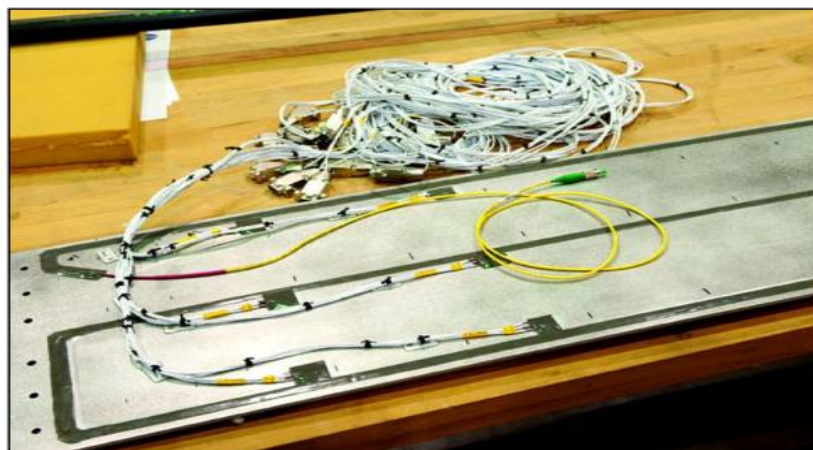
Εγκαταστάθηκαν πάνω στις πτέρυγες 6 οπτικές ίνες με συνολικό αριθμό 2880 αισθητήρων καθώς και 16 ηλεκτρικά επιμηκυνσιομέτρα για την επαλήθευση των μετρήσεων. Το βάρος του συστήματος παρακολούθησης των αισθητήρων οπτικών ινών δεν ξεπερνούσε το 1 Kg και ήταν κατά πολύ μικρότερο από ένα σύστημα που είχε εγκατασταθεί παλαιότερα με συμβατικά ηλεκτρικά επιμηκυνσιομέτρα. Έτσι, επήλθε μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων αλλά και αύξηση της εμβέλειας του αεροσκάφους.



Εικόνα 3.10: Θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων στις πτέρυγες του αεροσκάφους Ikhana



Εικόνα 3.11: Καταγραφή παραμορφώσεων κατά το μήκος των πτερύγων



Εικόνα 3.12: Η οπτική ίνα (κίτρινου χρώματος) αντικατέστησε όλα τα υπόλοιπα καλώδια (άσπρου χρώματος)

3.7 Συστήματα Παρακολούθησης στην Ναυπηγική

Τα συστήματα παρακολούθησης στα πλοία επιτρέπουν την γρήγορη εκτίμηση της κατάστασης τους. Τα δεδομένα που προκύπτουν από το πρόγραμμα παρακολούθησης, χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της φόρτωσης και εκφόρτωσης,

της συντήρησης, της επισκευής και της αντικατάστασης της κατασκευής. Η ανίχνευση ελαττωμάτων στο σκαρί ενός πλοίου ή σε άλλα κρίσιμα σημεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διακρίνει τυχόν αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιασμό. Η διάγνωση του σκάφους σε πραγματικό χρόνο σημαίνει αύξηση της ασφάλειας για τους επιβάτες και τα φορτία.

Ένα παράδειγμα πλοίου με εγκατεστημένο σύστημα παρακολούθησης είναι το πετρελαιοφόρο Four Island (περίπου 100.000 DWT), στο οποίο έχουν τοποθετηθεί 48 οπτικές ίνες τύπου SmartProfile Must^[46]. Πρόκειται για αισθητήρες που κατασκευάστηκαν ειδικά για την εφαρμογή αυτή, η οποία αποτελεί και το πρώτο σύστημα παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκε σε ένα λειτουργικό πλοίο αυτού του μεγέθους. Κύριος στόχος της παρακολούθησης ήταν η διάγνωση σε πραγματικό χρόνο της συμπεριφοράς του πλοίου, με ιδιαίτερη έμφαση σε κρίσιμα σημεία και τομείς του σκελετού. Γι' αυτό τοποθετήθηκαν κατώτατα όρια προειδοποίησης και συναγερμού σύμφωνα με τις κρίσιμες τιμές παραμόρφωσης.

Τα στοιχεία που εξήχθησαν από το σύστημα παρακολούθησης, χρησιμοποιήθηκαν για την διασταύρωση του κατασκευαστικού μοντέλου του πλοίου (FEM, Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων) καθώς και για την αξιολόγηση των κύκλων κόπωσης που προκαλούνται από τα κύματα και τις ταλαντώσεις. Τέλος, με το σύστημα οπτικών ινών αποφεύχθηκε και ο κίνδυνος έκρηξης λόγω βραχυκυκλώματος αφού αυτό λειτουργεί με οπτικό σήμα και όχι με ηλεκτρικό.



Εικόνα 3.13: Το πετρελαιοφόρο Four Island στο οποίο εγκαταστάθηκε το σύστημα παρακολούθησης

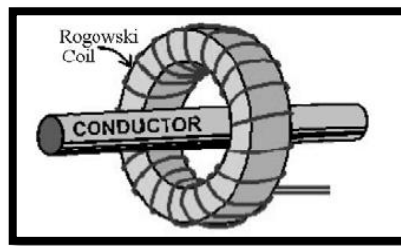
3.8 Συστήματα Παρακολούθησης σε άλλους τομείς

Διάφοροι μέθοδοι μετρήσεων μεγεθών σε συστήματα υψηλής τάσης με τη χρησιμοποίηση οπτικών ινών παρουσιάζουν υψηλή διηλεκτρική αντοχή και για αυτό το λόγο οι οπτικές ίνες συνδέουν τμήματα του κυκλώματος που βρίσκονται σε μια αντίσταση, όργανα μέτρησης κ.λ.π. με αντίστοιχα τμήματα που βρίσκονται στο δυναμικό της γης όπως καθοδικός παλμογράφος και Η/Υ. Η ύπαρξη οπτικοηλεκτρονικών συσκευών όπως L.E.D. ή Laser, οπτικών ινών χαμηλών απωλειών, φωτοδιόδων και χαμηλής κατανάλωσης ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διευκόλυνε πολύ αυτού του είδους τις μετρήσεις. Το σχήμα παρακάτω φαίνονται τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος μετρήσεως. Όλα τα στοιχεία που βρίσκονται σε υψηλή τάση (Υ.Τ) πρέπει να τροφοδοτούνται από μπαταρίες ώστε να

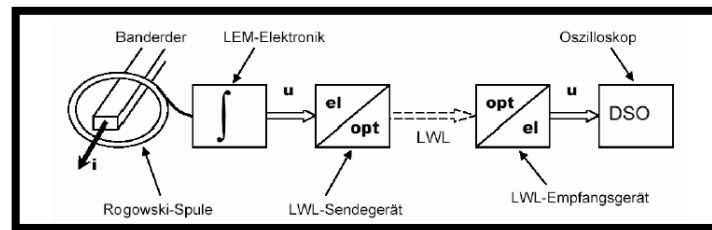
υπάρχει πλήρη απομόνωση της Υ.Τ. από την χαμηλή (Χ.Τ). Επιπλέον, μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε ώστε να υπάρχει επαρκής θωράκιση έναντι παρασίτων μαγνητικών πεδίων αφού οι απώλειες στις οπτικές ίνες είναι πολύ χαμηλές το σύστημα καταγραφής. Τελευταία στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν μια σειρά από εφαρμογές που προσπαθούν μέσω των οπτικών ινών να γεφυρώσουν τις μεγάλες διαφορές δυναμικού μεταξύ Υ.Τ. και Χ.Τ., ώστε να μετρήσουν με ακρίβεια τα ηλεκτρικά μεγέθη. Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες από αυτές τις εφαρμογές.



Η μέτρηση ισχυρών εντάσεων μπορεί να γίνει με τη χρήση του πηνίου Rogowski και οπτικών ινών. Αν ένα πηνίο τοποθετηθεί έτσι ώστε να περικλείει έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, τότε στα άκρα αυτού του πηνίου επάγεται μια τάση ανάλογη με την μεταβολή του ρεύματος di/dt . Στα άκρα ενός τέτοιου πηνίου που καλείται πηνίο Rogowski συνδέεται ένας ολοκληρωτής που δύναται να αναπαράγει την κυματομορφή του ρεύματος. Στην συνέχεια τοποθετείτε ένας οπτικοηλεκτρονικός μετατροπέας, ο οποίος δέχεται το προς μέτρηση ρεύμα με το οποίο τροφοδοτεί μια πηγή φωτός (laser). Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί ως πομπός ενός διαμορφωμένου οπτικού σήματος που οδηγείται μέσω μιας οπτικής ίνας στο χώρο της χαμηλής τάσης όπου καταγράφεται η μέτρηση. Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση πριν αποτυπωθεί η κυματομορφή είναι η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό μέσω ενός οπτικού δέκτη (φωτοανιχνευτή). Το πηνίο Rogowski είναι ευαίσθητο μόνο στο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό και όχι σε παράσιτα μαγνητικά πεδία. Η σωστή χρήση του πηνίου Rogowski απαιτεί προσοχή με τη θωράκιση των καλωδίων και δύναται να έχει ταχύτερη απόκριση της τάξεως μεγέθους ns. Στην Εικόνα 2.13 φαίνονται τα βήματα της συγκεκριμένης μεθόδου μέτρησης

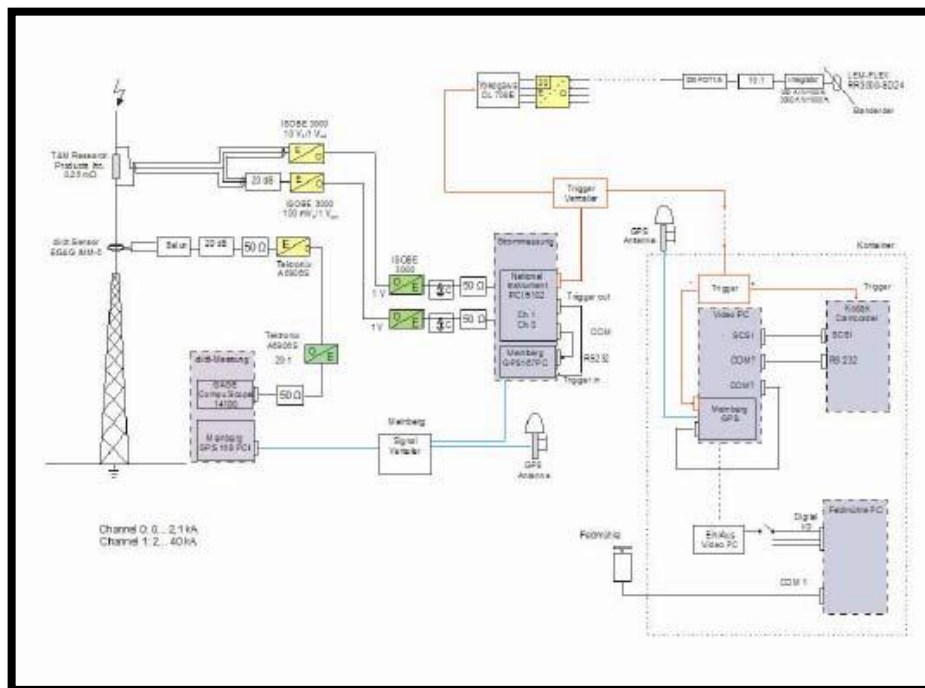


Εικόνα 3.14: πηνίο Rogowski



Εικόνα 3.15: Διάταξη μέτρησης ισχυρών εντάσεων μέσω πηνίου Rogowski και οπτικού συστήματος μετάδοσης

Η χρήση αυτής της μεθόδου έγινε κατά την μέτρηση κεραυνικού πλήγματος στον σταθμό αναμετάδοσης της κρατικής τηλεόρασης της Αυστρίας στο Gaisberg το 2005. Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται αναλυτικά η εγκατεστημένη διάταξη μέτρησης του κεραυνού καθώς και ο αισθητήρας ρεύματος, η αρχή λειτουργίας του οποίου βασίζεται σε ένα πηνίο Rogowski (LEM-flex RR3000/SD24-36-48) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά τη συγκεκριμένη μέτρηση.



Εικόνα 3.16: Διάταξη μέτρησης κεραυνικού πλήγματος

Οι εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών είναι πραγματικά αμέτρητες λόγω του μεγάλο αριθμό των τομέων που αυτοί χρησιμοποιούνται. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά μερικοί από αυτούς τους τομείς:

- Εξόρυξη (πχ. παραμόρφωση εδάφους)
- Ενέργεια (πχ. παραμορφώσεις πτερύγων ανεμογεννητριών ^[47])
- Κατασκευή τούνελ
- Φράγματα – αναχώματα
- Πυρηνικοί Σταθμοί
- Χημικά Εργοστάσια
- Έρευνα
- Ύδρευση

3.9 Η αγορά των οπτικών αισθητήρων

Το 2007 η αγορά των εσωτερικών οπτικών αισθητήρων (intrinsic) είχε αξία \$170 εκατ. και ήταν μεγαλύτερη από αυτή των εξωτερικών αισθητήρων (extrinsic) ^[48]. Με ετήσια αύξηση της τάξης του 35%, η αξία της αγοράς των εσωτερικών αισθητήρων αναμένεται να σημειώσει αύξηση που θα αγγίξει τα \$1.4 δις, μέχρι το 2014. Το κομμάτι των εξωτερικών αισθητήρων προβλέπεται ότι θα αυξηθεί σε αξία από \$65 εκατ. το 2007, σε \$219 εκατ. το 2014 με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 12% και όλα αυτά μόνο για την αγορά των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.

Ευθύ και Αντίστροφα Προβλήματα στην Κατασκευή

4.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η λύση του προβλήματος εντοπισμού ατελειών σε επίπεδη πλάκα, ομογενούς και σύνθετου υλικού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και νευρωνικών δικτύων. Η τεχνική επίλυσης που προτείνεται, εφαρμόζεται σε διάφορες παραλλαγές του ίδιου προβλήματος για την καλύτερη διερεύνησή του. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή μας ήταν το Matlab που αποτελεί μία υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού κατάλληλη στην επίλυση σύνθετων μαθηματικών συναρτήσεων και προβλημάτων.

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, τα αντίστροφα προβλήματα αποτελούν μια από τις σημαντικότερες και πιο ενδιαφέρουσες ερευνητικές περιοχές της μηχανικής. Η εξέλιξη των υπολογιστικών αριθμητικών μεθόδων και τεχνικών καθώς και η ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, τόσο σε επίπεδο υλικοτεχνικού εξοπλισμού (hardware) όσο και λογισμικού (software) έχουν καταστήσει τις αντίστροφες μεθόδους ένα ισχυρό εργαλείο για πρακτικά προβλήματα μηχανικής. Παρόλα αυτά για πολλούς ερευνητές, η αντίστροφη ανάλυση φαντάζει ακόμα κάτι απόμακρο και ξένο. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία της σύλληψης και του χειρισμού τέτοιων ιδεών.

Γενικά, τα αντίστροφα προβλήματα εντοπισμού σχηματίζονται όπως τα συνηθισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης δηλαδή από τη διαφορά μεταξύ του υπολογισμένου μεγέθους από τις μετρούμενες αποκρίσεις (πειραματικά αποτελέσματα). Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό των αποκρίσεων βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένα πλαίσια ορισμένα από την εκάστοτε κατασκευή. Στο πλαίσιο αυτό το ευθύ πρόβλημα, λαμβάνεται ως ένα επιπλέον σύνολο περιορισμών ή «κρύβεται» πίσω από τη γενική μη γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών σχεδίασης και των υπολογισμένων αποκρίσεων. Στη περίπτωση τέτοιων προβλημάτων χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος βελτιστοποίηση υπό ισορροπημένους περιορισμούς. Μαθηματικά, το πρόβλημα έχει αναμφίβολες ομοιότητες με τα κατασκευαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι απλές μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης δεν αποδίδουν συνεπώς είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί πολυπλοκότερο και συνήθως αποτελεσματικότερο λογισμικό βελτιστοποίησης. Αυτή η τεχνική υιοθετείται σε πρόσφατες έρευνες σχετικές με προβλήματα αντίστροφης ελαστοστατικής ανάλυσης εντοπισμού ατελειών. Είναι δυνατό μικρές διακυμάνσεις ενός κατασκευαστικού μεγέθους να οδηγήσουν, σε μεγάλες ή μικρές διακυμάνσεις των στατικών αποκρίσεων. Αν οι διακυμάνσεις είναι μικρές προκύπτουν πολλαπλές λύσεις για το αντίστροφο πρόβλημα, γεγονός το οποίο οφείλεται συνήθως σε περιορισμένο αριθμό μετρήσεων και το πρόβλημα θεωρείται κακώς ορισμένο (illposed). Όσον αφορά τα προβλήματα εντοπισμού ατελειών (αντίστροφα προβλήματα), οι ιδιομορφίες που

αναφέρθηκαν παραπάνω και κυρίως η έλλειψη διαφορισιμότητας οδηγούν γενικά σε μη ομαλά και πιθανόν μη κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης. Η αριθμητική επίλυση των μη διαφορισίμων προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι αρκετά δύσκολη ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένες τεχνικές. Επίσης, η πιθανή μη κυρτότητα συνδέεται με την εμφάνιση τοπικών ελαχίστων που δεν έχουν την ικανότητα να αντιμετωπιστούν εύκολα από τις στρατηγικές τοπικής βελτιστοποίησης (local optimization). Γι' αυτούς τους λόγους, αναπτύχθηκαν και συνεχίζουν να αναπτύσσονται καινοτομικοί αλγόριθμοι καθολικής βελτιστοποίησης (global optimization) όπως αυτοί που βασίζονται στα νευρωνικά δίκτυα ή στους γενετικούς αλγόριθμους.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εφαρμόζεται η μεθοδολογία εντοπισμού ατελειών σε διδιάστατα δοκίμια με ατέλειες. Όσον αφορά το υλικό της πλάκας γίνονται προσομοιώσεις με διάφορα είδη υλικών που στο εσωτερικό τους έχουν περασθεί οπτικοί αισθητήρες Bragg και ελέγχεται το σήμα τους στο τέλος της πλάκας. Οι παράμετροι που απαιτούνται ώστε να καθοριστεί η ατέλεια είναι απαραίτητως οι συντεταγμένες (x,y) του κέντρου της και ανάλογα με την υπό εξέταση περίπτωση το μέγεθός της (ακτίνα). Το ευθύ μηχανικό πρόβλημα λύνεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι μετατοπίσεις των ορίων της πλάκας στις εξωτερικά επιβαλλόμενες φορτίσεις. Η μέθοδος που επελέχθηκε για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος εντοπισμού είναι η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων. Εξετάζονται διαφοροποιήσεις του περιγραφέντος προβλήματος όσον αφορά τη γεωμετρία της ατέλειας, τις ιδιότητες του υλικού και τις φορτίσεις.

Επιπρόσθετως, τα προβλήματα εντοπισμού ατελειών ανήκουν στην κατηγορία των αντίστροφων προβλημάτων και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου. Οι μη καταστροφικές τεχνικές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση ποιότητας των κατασκευών τόσο στο στάδιο κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Πρέπει επίσης να σημειωθεί όσον αφορά τα αντίστροφα προβλήματα ότι η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ-BEM) και οι κλασικοί αλγόριθμοι ελαχιστοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση ελλειπτικών ελαττωμάτων, όπου εξετάζονται στατικά προβλήματα θερμικής αγωγιμότητας^[50]. Έχει γίνει επίσης αντίστροφη ανάλυση ελαστοστατικών προβλημάτων, με σκοπό την αναγνώριση του σχήματος της ατέλειας με οριακές μετρήσεις^{[51] [53]}. Η τριδιάστατη αναγνώριση ελαττωμάτων έχει απασχολήσει τους ερευνητές της συγκεκριμένης περιοχής^[54]. Σχετική έρευνα έχει γίνει για την αναγνώριση ελλειπτικών σε διδιάστατα ή σφαιρικών ελαττωμάτων σε τριδιάστατα προβλήματα^[55]. Στο σημείο αυτό, οι κλασικές αριθμητικές μέθοδοι ελαχιστοποίησης αντικαθίστανται από τον αλγόριθμο του φίλτρου Kalman που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Ο υπολογισμός της θέσης, του μεγέθους και των ελαστικών ιδιοτήτων ενός εσωτερικού ελαττώματος σε ένα σύνθετο υλικό γίνεται από αποτελέσματα στατικής

ανάλυσης, με χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ – FEM). Επιπλέον, οι Γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για τον αντίστροφο εντοπισμό σε ελαστοδυναμικά προβλήματα καθώς και τεχνικές βασισμένες στο φίλτρο Kalman^[55]. Έχει γίνει προσπάθεια αναγνώρισης ελαττωμάτων με ελαστομηχανική προσομοίωση μέσω της ΜΣΣ και με χρήση τοπικής και γενετικής βελτιστοποίησης^{[52] [56] [59]}. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετά προβλήματα αναγνώρισης, όπως η αναγνώριση ρωγμών με τη χρήση δεδομένων δυναμικής ανάλυσης^[57], αναγνώριση βλάβης με χρήση ιδιοσυχνοτήτων και καινοτομικού κανονικοποίησης (scaling rule) τα οποία βελτιώνουν την απόδοση του νευρωνικού δικτύου^[60]. Τα νευρωνικά δίκτυα σε συνδυασμό με τη ΜΣΣ έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμη για ελαστοστατικά προβλήματα εντοπισμού ρωγμών^{[58][59] [61]}.

Επιπλέον, έχει γίνει χρήση και άλλων φυσικών μετρήσεων για τον εντοπισμό ρωγμών και ατελειών. Τα συγκεκριμένα προβλήματα μπορεί να λυθούν είτε μέσω βελτιστοποίησης είτε μέσω περισσότερο πολύπλοκων τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν, ο καθορισμός εσωτερικών ρωγμών μέσω της αμοιβαίας συνάρτησης κενού (reciprocal gap function) ή μέσω της χρήσης δεδομένων μετάδοσης θερμότητας σε σταθερή κατάσταση, ο εντοπισμός ατελειών σε ατσάλινους σωλήνες χρησιμοποιώντας τεχνικές διαρροής του μαγνητικού πεδίου (magnetic flux leakage techniques), ο χαρακτηρισμός ελαττωμάτων χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα και δυνореύματα (eddy current) και η μελέτη του αντίστροφου προβλήματος της γεωμετρικής μετάδοσης θερμότητας.

Όσον αφορά τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών, μια από τις βασικές τεχνικές είναι οι υπέρηχοι. Οποιοδήποτε ελάττωμα σε κάποιο υλικό αντανακλά τον υπέρηχο με χαρακτηριστικό τρόπο, έτσι είναι δυνατόν να αναγνωριστεί. Η διάδοση και διασκόρπιση των υπερήχων είναι βασικές πληροφορίες για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό των ελαττωμάτων σε μια ευρεία γκάμα δομικών υλικών. Επίσης, σε πολλές έρευνες εφαρμόζονται νευρωνικά δίκτυα σε αντίστροφα προβλήματα. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση νευρωνικών δικτύων σε συνδυασμό με υπέρηχους για να αναγνωρίσουν ελαττώματα και να καθορίσουν τις ελαστικές σταθερές των υλικών^{[62][63]}. Τα νευρωνικά δίκτυα (ΝΔ) ενδείκνυνται για τέτοιου είδους προβλήματα, διάκρισης σήματος και κατηγοριοποίησης. Ένα ΝΔ μπορεί να μάθει να αντιστοιχεί τις τιμές των εισόδων με τιμές των εξόδων, μέσω μιας ομάδας δεδομένων εκπαίδευσης. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι μπορεί να αντιστοιχίσει τιμές εισόδων σε εξόδους, οι οποίες δεν βρίσκονται στην ομάδα αυτή των δεδομένων εκπαίδευσης. Έχουν χρησιμοποιηθεί ΝΔ προσοτροφodότησης για την κατηγοριοποίηση υπερηχητικών δεδομένων, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, έχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα^[64].

Τέτοιου είδους δίκτυα έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση της θέσης και του μεγέθους ζημιών μεμονωμένων μερών μιας κατασκευής, βασισμένης στις μετρούμενες αποκρίσεις της^[65]. Επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνει και η χρήση ΝΔ στην αναγνώριση

ελαττωμάτων σε συγκολλήσεις.^{[66] [67]} Άλλες συνηθισμένες τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου, πέρα των υπερήχων, είναι η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης, της απόκρισης δονήσεων και των υπέρυθρων εικόνων^[69]. Σχετικά πρόσφατα, έχουν χρησιμοποιηθεί και πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για τον εντοπισμό αποκολλήσεων σε σύνθετα υλικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη ενός μονοδιάστατου αναλυτικού μοντέλου για τον εντοπισμό αποκολλήσεων χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα και επενεργητή ενός σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ίνες.

4.2 Ευθή και αντίστροφα προβλήματα στις κατασκευές

Για τα κατασκευαστικά προβλήματα, οι μεταβλητές πεδίου είναι κυρίως οι μετατοπίσεις ενώ οι σταθερές των διαφορικών και το πεδίο ορισμού του προβλήματος είναι γνωστά. Η πηγή ή η αιτία του προβλήματος ή του φαινομένου που ορίζουν οι διαφορικές και σχετικές αρχικές και οριακές συνθήκες είναι επίσης γνωστές. Για την επίλυση ενός ευθέως προβλήματος, χρειάζεται ουσιαστικά η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που ορίζονται από το πρόβλημα.

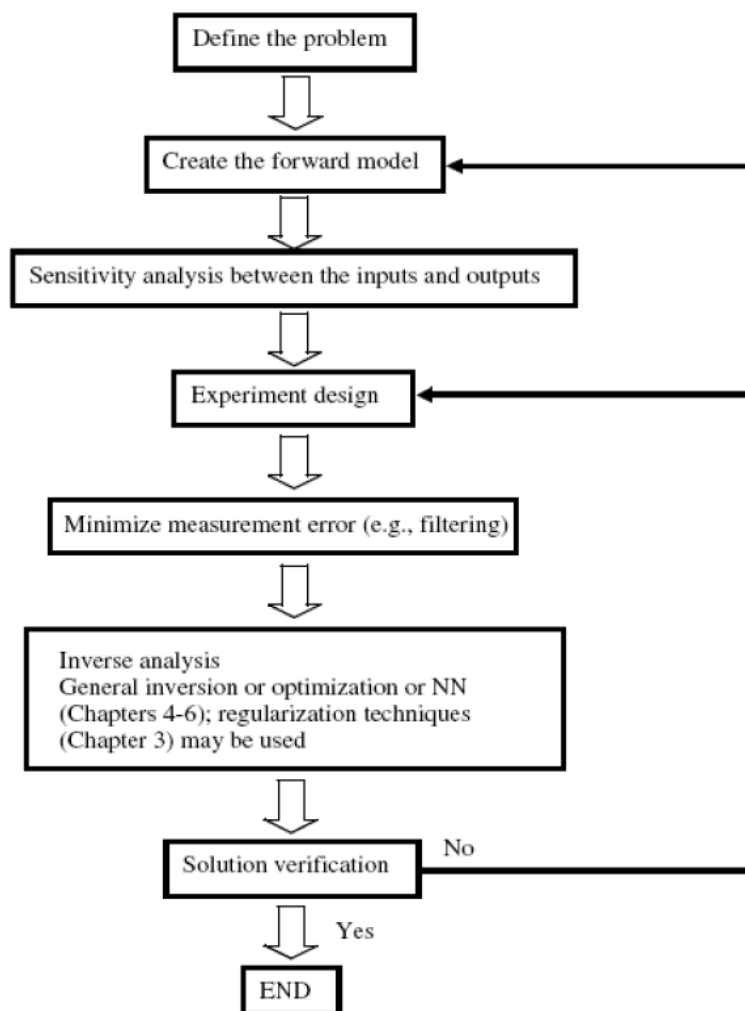
Πολλές τεχνικές επίλυσης, κυρίως υπολογιστικές, έχουν αναπτυχθεί όπως:

- Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method - FDM).
- Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM).
- Μέθοδος στοιχείων λωρίδας (Strip Element Method - SEM).
- Μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method -BEM).
- Συνδυασμός FEM/BEM.
- Μέθοδοι χωρίς πλέγμα (Mesh-free methods).
- Επιλύτες διάδοσης κύματος (Wave propagation solvers).

Οι μέθοδοι αυτές, αποτελούν πλέον την καθιερωμένη προσέγγιση για την επίλυση ευθέων προβλημάτων. Ωστόσο, οι μέθοδοι επίλυσης χωρίς πλέγμα είναι ακόμα σε πρωταρχικό στάδιο και χρήζουν περαιτέρω έρευνας. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους λαμβάνονται ως έξοδοι οι μετατοπίσεις της κατασκευής και εν συνεχεία οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της, μόνο εάν είναι γνωστές οι ιδιότητες του υλικού, οι φορτίσεις, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και η γεωμετρία της κατασκευής (είσοδοι του προβλήματος). Μια άλλη κατηγορία πρακτικών προβλημάτων που παρουσιάζεται αρκετά συχνά είναι τα αντίστροφα προβλήματα. Στα αντίστροφα προβλήματα, τα αποτελέσματα ή οι έξοδοι (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, φυσική συχνότητα κτλ.) μπορεί να είναι γνωστά μεγέθη (π.χ. μέσω πειραμάτων). Όμως, οι ιδιότητες του υλικού, οι φορτίσεις, οι αρχικές και οριακές συνθήκες, η γεωμετρία της κατασκευής που αποτελούν τις εισόδους ή συνδυασμό αυτών πρέπει να καθοριστούν. Η επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων είναι παρά πολύ χρήσιμη για πολλές εφαρμογές της μηχανικής.

4.3 Γενική μεθοδολογία επίλυσης αντίστροφων προβλημάτων

Η γενικολογία επίλυσης αντίστροφων προβλημάτων παρουσιάζεται γραφικά στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 4.1: Γενική μεθοδολογία επίλυσης αντίστροφων προβλημάτων

- Ορισμός του προβλήματος (Define the problem): Ορισμός του σκοπού και του στόχου του έργου. Αυτό περιλαμβάνει ανάλυση του διαθέσιμου προϋπολογισμού, χρόνου καθώς και των διαθέσιμων πόρων. Σε όλα τα στάδια του προβλήματος, πρέπει να γίνει προσπάθεια, πρώτον να μειωθεί ο αριθμός των άγνωστων μεταβλητών που θα καθοριστούν αντίστροφα, και δεύτερον να περιοριστούν όλες οι παράμετροι του προβλήματος στο μικρότερο δυνατό διάστημα. Όταν τα παραπάνω, λαμβάνονται υπ' όψιν από τα πρώτα κιόλας βήματα, τότε μειώνονται οι πιθανότητες το αντίστροφο πρόβλημα να είναι κακώς ορισμένο. Ως αποτέλεσμα, αυξάνονται σημαντικά οι πιθανότητες επιτυχίας και βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της αντίστροφης διαδικασίας.

- Δημιουργία του ευθέως μοντέλου (Create the forward problem): Καθορισμός ενός φυσικού μοντέλου ώστε να οριστεί καλύτερα το πρόβλημα. Οι έξοδοι του συστήματος πρέπει να είναι τόσο ευαίσθητες όσο και οι παράμετροι του συστήματος που θα καθοριστούν αντίστροφα. Οι παράμετροι πρέπει να μπορούν να επηρεάσουν τις εξόδους, χωρίς αυτό να εξαρτάται από τη μεταξύ τους σχέση. Η θεώρηση περισσότερων περιορισμών βοηθά στον καλύτερο ορισμό του προβλήματος. Αφού οριστεί πλέον πλήρως το ευθύ πρόβλημα αναπτύσσονται μαθηματικά και υπολογιστικά μοντέλα. Συνήθεις υπολογιστικές μέθοδοι αποτελούν η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων (FVM) και οι μέθοδοι χωρίς τη χρήση πλέγματος (mesh-free methods).
- Ανάλυση ευαισθησίας μεταξύ των εξόδων και των παραμέτρων (Analyze sensitivity between the effects or outputs and the parameters): Είναι αναγκαίο οι έξοδοι του προβλήματος και οι παράμετροι (συμπεριλαμβανομένων και των εισόδων), οι οποίες θα καθοριστούν αντίστροφα, να είναι σωστά ορισμένες μεταξύ τους. Η διασφάλιση υψηλής ευαισθησίας μεταξύ των εισόδων, είναι μια πολύ καλή προσέγγιση για την αποφυγή κακώς ορισμένων προβλημάτων. Η ανάλυση πρέπει να γίνει με βάση το μοντέλο που δημιουργήθηκε στα προηγούμενα βήματα. Με αυτόν τον τρόπο δεν υπάρχει ανάγκη για πειράματα, τα οποία θα οδηγήσουν σε αύξηση του προϋπολογισμού. Εφόσον ολοκληρωθεί η ανάλυση ευαισθησίας, ενδέχεται να προκύψει η ανάγκη για τροποποίηση του ευθέως μοντέλου και κάποιων παραμέτρων.
- Σχεδιασμός του πειράματος (Design the experiment): Επιλογή κατάλληλων μεθόδων μέτρησης, είδος εξοπλισμού για τον έλεγχο, την καταγραφή και την ανάλυση των δεδομένων. Το πλήθος των δοκιμών - μετρήσεων πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το πλήθος των αγνώστων που θα καθοριστούν αντίστροφα. Συνήθως, προτιμάται ένα υπέρ-ορισμένο σύστημα, ώστε να βελτιώσει τη ιδιότητα της εξίσωσης του συστήματος και να μειώσει την πιθανότητα ύπαρξης ενός κακώς ορισμένου προβλήματος. Παρόλα αυτά ένα ακραία υπέρ-ορισμένο σύστημα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα φτωχή παραγωγικότητα εξόδων, η οποία μπορεί να ελεγχτεί αργότερα.
- Ελαχιστοποίηση του θορύβου των μετρήσεων (Minimize measurement noise), π.χ. με τη χρήση φίλτρων: Επιβάλλεται τα σφάλματα των μετρούμενων μεγεθών να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι οποιαδήποτε σφάλματα υπάρχουν, ενισχύονται στην αντίστροφη επίλυση, με αποτέλεσμα πολλές φορές να οδηγούμαστε σε ασταθείς λύσεις.
- Εφαρμογή του αντίστροφου λύτη (Apply the inverse solver): Εάν το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί σε μορφή πίνακα, τότε η αντίστροφη λύση λαμβάνεται με την αναστροφή του πίνακα του συστήματος. Αυτή η μεθοδολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί για περισσότερο πολύπλοκα συστήματα, τα οποία δεν μπορούν να

διατυπωθούν με την μορφή πινάκων. Υπάρχει δυνατότητα να οριστεί όμως μια συνάρτηση σφάλματος (functional error) χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μέτρο που στη συνέχεια με τη βοήθεια τεχνικών βελτιστοποίησης/ελαχιστοποίησης επιχειρείται να μειωθεί η τιμή της στο ελάχιστο. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης κατάλληλων τεχνικών ομαλοποίησης για τα κακώς ορισμένα προβλήματα. Οι τεχνικές αυτές βοηθούν στην επίτευξη σταθερών λύσεων. Η χρήση τέτοιων τεχνικών αποτελεί την έσχατη λύση για την αντιμετώπιση των κακώς ορισμένων προβλημάτων. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα τους θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν η χρήση τους κρίνεται απαραίτητη διότι η λανθασμένη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε μη επιθυμητά αποτελέσματα.

- Επαλήθευση της λύσης (Verify the solution): Αυτό το στάδιο χρησιμεύει στο να διασφαλιστεί ότι η λύση που προέκυψε πρωτύτερα έχει φυσική σημασία. Όλες οι πιθανές μέθοδοι πρέπει να εφαρμοστούν ώστε να αποδειχθεί ότι η λύση που προκύπτει είναι αξιόπιστη. Ο έλεγχος των πινάκων παραγωγικότητας των εισόδων και των εξόδων μπορεί να δώσει κάποιες ενδείξεις όσον αφορά την ποιότητα της λύσης. Στο σημείο αυτό, ενδέχεται να προκύψει η ανάγκη για τροποποιήσεις και πολλές φορές είναι απαραίτητη η επανάληψη της διαδικασίας από το δεύτερο (ή τέταρτο) βήμα μέχρι τελικά η αντίστροφη λύση να είναι ικανοποιητική. Συνήθως, η διαδικασία της επαλήθευσης γίνεται υπολογιστικά.

4.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η δυναμικότητα των προσεγγιστικών μεθόδων που βασίζονται στα ενεργειακά θεωρήματα είναι πολύ μεγάλη και δίνει λύσεις σε σημεία που οι υπόλοιπες μέθοδοι αδυνατούν να δώσουν. Κύριο χαρακτηριστικό των προσεγγιστικών μεθόδων είναι η ανάγκη προσδιορισμού ενός παραδεκτού πεδίου με τη βοήθεια συναρτήσεων που ορίζονται σε όλο το σώμα και ικανοποιούν ορισμένες συνθήκες στα σύνορα. Με τον τρόπο αυτό το αρχικό πρόβλημα του προσδιορισμού του πεδίου των μετατοπίσεων σε κάθε σημείο του σώματος (άπειρος βαθμός ελευθερίας κίνησης) μετασχηματίζεται σε ένα υποκατάστατο πρόβλημα προσδιορισμού πεπερασμένου αριθμού άγνωστων συντελεστών (πεπερασμένος βαθμός ελευθερίας). Το υποκατάστατο πρόβλημα δίνει μια προσεγγιστική λύση στο αρχικό πρόβλημα.

Η κατασκευή των συναρτήσεων που ικανοποιούν τις συνθήκες στα σύνορα, είναι μια σχετικά εύκολη υπόθεση όταν το σύνορο του σώματος είναι απλό. Όταν όμως το σύνορο του σώματος γίνεται πολύπλοκο, η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών γίνεται σχεδόν αδύνατη. Αυτές ακριβώς οι δυσκολίες αποφεύγονται με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Σύμφωνα με αυτή, το σώμα χωρίζεται σ' έναν αριθμό περιοχών που λέγονται στοιχεία. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μέσα σε κάθε στοιχείο είναι απλές.

Όμως χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων γίνεται δυνατό να αποκτηθεί μια καλή προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να αναχθεί πάλι το αρχικό πρόβλημα σ' ένα πρόβλημα με πεπερασμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας κίνησης. Η μεθοδολογία αυτή, αν και μπορεί να υπαχθεί στις μεθοδολογίες Ritz ή Galerkin προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

A) Οι συναρτήσεις είναι απλούστερες και δεν απαιτείται η ικανοποίηση κάποιων συνθηκών στα σύνορα του σώματος.

B) Οι ολοκληρώσεις γίνονται σε κάθε στοιχείο χωριστά (οι συναρτήσεις είναι μηδέν έξω από κάθε στοιχείο). Έτσι, στις απλές περιπτώσεις το αποτέλεσμα προκύπτει εύκολα με αναλυτικό τρόπο ενώ στις πιο σύνθετες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αριθμητική ολοκλήρωση.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία από τις πιο ισχυρές μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση οριακών προβλημάτων ώστε να γίνει μια γενική περιγραφή, που θα ίσχυε για κάθε διαφορετική εξίσωση. Πραγματικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε από τους μηχανικούς στην προσπάθεια τους να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα κατασκευών. Ο στόχος τους ήταν να χρησιμοποιήσουν μια τεχνική ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιούσαν στις ραβδωτές κατασκευές. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε σαν εξέλιξη της μητρωϊκής ανάλυσης των κατασκευών. Σήμερα όμως, η μητρωϊκή ανάλυση των κατασκευών περιλαμβάνεται στις ειδικές εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

4.4.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

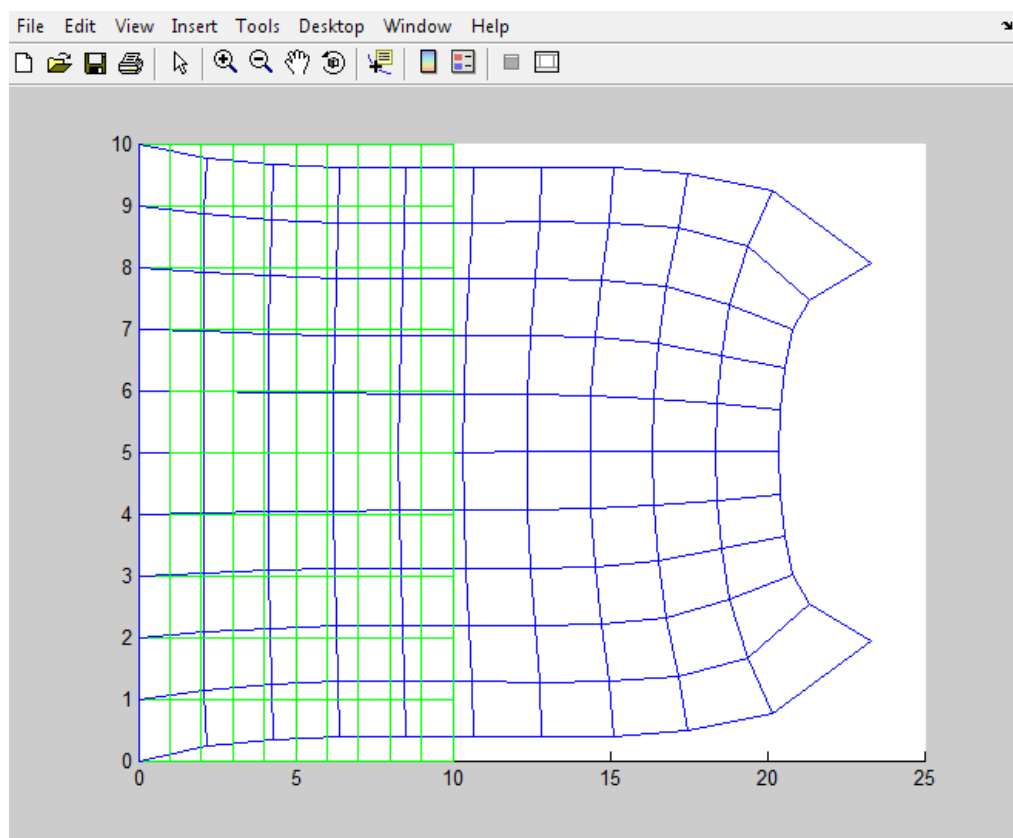
4.4.1.1 Ορισμός του καννάβου και γενικότητες

Έστω ένα ελαστικό σώμα που καταλαμβάνει τον χώρο D . Ο χώρος αυτός υποτίθεται ότι χωρίζεται με έναν κάνναβο ιδεατών επιφανειών ή γραμμών σε έναν αριθμό περιοχών, τα πεπερασμένα στοιχεία. Στην περίπτωση που ο D είναι τρισδιάστατος τότε τα πεπερασμένα στοιχεία είναι τρισδιάστατα ενώ όταν το σώμα είναι δισδιάστατο τα πεπερασμένα στοιχεία είναι δισδιάστατα. Στην περίπτωση των ραβδωτών κατασκευών υπάρχουν τα μονοδιάστατα στοιχεία. Σε μια κατασκευή είναι δυνατόν να χρειαστούν και τα τρία είδη στοιχείων.

Τα στοιχεία υποτίθεται ότι συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων, τους κόμβους οι οποίοι υπάρχει περίπτωση να βρίσκονται στο εσωτερικό κάποιου στοιχείου ή να συνδέονται με τα γειτονικούς κόμβους. Κάθε κόμβος ανάλογα με το είδος της κατασκευής έχει κάποιες δυνατότητες μετατόπισης, κάποιους δηλαδή βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Είναι κατανοητό ότι σε μια τριδιάστατη κατασκευή κάθε σημείο και κάθε κόμβος έχει τρεις β.ε., στη διδιάστατη δύο και στα δικτυώματα μία. Εμπλοκή εμφανίζεται στις καμπτόμενες κατασκευές, όπου για να προσδιορισθεί η θέση του στοιχείου δεν επαρκεί το βέλος αλλά χρειάζεται και η κλίση.

Γενικά, υπάρχουν κάποιες ιδιομορφίες στις καμπτόμενες κατασκευές. Ονομάζεται N ο συνολικός αριθμός των στοιχείων βάσει των οποίων υποδιαιρείται η κατασκευή, n ο συνολικός αριθμός των κόμβων της κατασκευής, k ο αριθμός των β.ε. κάθε κόμβου ενώ παράλληλα γίνεται η υπόθεση ότι κάθε στοιχείο έχει p κόμβους. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο δεν παύει να έχει την ίδια ελαστική συμπεριφορά με το αρχικό σώμα. Το κέρδος από αυτή την υποδιαίρεση είναι ότι το στοιχείο έχει πεπερασμένο μέγεθος και απλούστερη μορφή. Αυτές του οι ιδιότητες επιτρέπουν τη μελέτη της ένταξης του προσεγγιστικά. Έτσι, γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις των κόμβων ενός στοιχείου είναι εφικτή η παρεμβολή για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων κάθε σημείου του στοιχείου. Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και τέλος ο υπολογισμός των τάσεων. Έτσι, λαμβάνοντας αυτά τα στοιχεία είναι δυνατή η εφαρμογή των ενεργειακών θεωρημάτων από όπου θα προκύψουν k_n εξισώσεις που με τη σειρά τους προσδιορίζουν τις k_n άγνωστες μετατοπίσεις των κόμβων. Επίσης, με την υπόθεση ότι οι τάσεις στους κόμβους είναι γνωστές προκύπτει το στατικό μοντέλο.

Στη δικιά μας περίπτωση δημιουργήθηκε ένας κάνναβος που αποτελείται από $10 \times 10 = 100$ κόμβους με πράσινο χρώμα που αποτελεί την αρχική πλάκα και με μπλε χρώμα φαίνεται η παραμόρφωση της πλάκας για τις διαφορετικές φορτίσεις που δίνονται σε κάθε περίπτωση των προσομοιώσεων. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.2: Σχεδίαση καννάβου στο πρόγραμμα MATLAB

4.4.1.2 Προσδιορισμός των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο

Οι μετατοπίσεις σε κάθε σημείο του στοιχείου εκφράζονται συναρτήσει των μετατοπίσεων των κόμβων με τη βοήθεια κάποιου παρεμβολικού τύπου. Συνήθως για την παρεμβολή χρησιμοποιούνται πολυώνυμα και το πεδίο των μετατοπίσεων ορίζεται ξεχωριστά σε κάθε στοιχείο. Τα παραπάνω συνεπάγονται κάποια ελευθερία, δεν αποκλείουν όμως την ύπαρξη κάποιων προϋποθέσεων. Έτσι π.χ. δεν μπορεί να είναι οι μετατοπίσεις των στοιχείων τέτοιες που τα στοιχεία μετά την παραμόρφωση να αλληλεπικαλύπτονται. Άρα, είναι απαραίτητο ότι:

- Οι μετατοπίσεις των στοιχείων πρέπει να ορισθούν έτσι ώστε να υπάρχει συνέχεια μετατοπίσεων μεταξύ τους.
- Οι μετατοπίσεις σε κάθε στοιχείο πρέπει να είναι συνεχείς συναρτήσεις ώστε να δίνουν συνεχείς παραμορφώσεις.
- Το πεδίο των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να περιγράψει την μετακίνηση στερεού σώματος καθώς και την σταθερή, παραμόρφωση, της κατασκευής.

4.4.1.3 Τροπές - Τάσεις

Ορίζονται οι τροπές στη δυσδιάστατη, τριδιάστατη κατάσταση ή και στη μονοδιάστατη και τοποθετούνται στον κώδικα.

4.4.1.4 Αρχή των δυνατών έργων

Από τα διανύσματα των καθολικών και των επιφανειακών δυνάμεων υπολογίζεται η αρχή των δυνατών έργων και γράφεται με μητρική μορφή και έπειτα εκφράζονται οι δυνατές μετατοπίσεις και οι δυνατές τροπές εκφράζομενες με αντίστοιχες σχέσεις.

Ελαστική Συμπεριφορά: Σε όλα τα στερεά υλικά που καταπονούνται από εξωτερικά φορτία αναπτύσσονται εσωτερικές δυνάμεις, οι οποίες κατανεμημένες στην επιφάνεια της διατομής του σώματος οδηγούν στην ανάπτυξη ορθών και διατμητικών τάσεων. Οι τάσεις με τη σειρά τους προκαλούν την παραμόρφωση του στερεού σώματος, δηλαδή τη μεταβολή των διαστάσεων και/ή του σχήματος του. Όσο οι τιμές της παραμόρφωσης του σώματος διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα τότε η φύση τους είναι αντιστρεπτή (reversible). Αυτό σημαίνει ότι εάν εξαλειφθεί η αιτία που προκαλεί αυτές τις μικρές παραμορφώσεις (δηλαδή οι τάσεις), τότε οι παραμορφώσεις μηδενίζονται και το σώμα ανακτά τις αρχικές του διαστάσεις και σχήμα. Αυτού του είδους η αντιστρεπτή παραμόρφωση ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση (elastic deformation). Όλα τα στερεά υλικά εμφανίζουν ελαστική συμπεριφορά (elastic behavior) σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό.

Σχέσεις μεταξύ Τάσης και Παραμόρφωσης στην Ελαστική Περιοχή: Εάν επιθυμείται η συσχέτιση των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα σώμα με τις παραμορφώσεις που προκαλούν σε αυτό τότε πρέπει απαραίτητα να εισαχθούν οι ιδιότητες (properties) του κάθε συγκεκριμένου

υλικού. Οι μαθηματικές σχέσεις αυτής της μορφής που συσχετίζουν δηλαδή τις τάσεις με τις παραμορφώσεις σε ένα σώμα μέσω των ιδιοτήτων του υλικού του σώματος ονομάζονται καταστατικές εξισώσεις (constitutive equations). Στην ενότητα αυτή θα μας απασχολήσουν οι καταστατικές εξισώσεις σε ισότροπα ελαστικά σώματα.

- Τάση είναι ο λόγος του φορτίου που δέχεται η πλάκα F προς την επιφάνεια: $\sigma = F/A$.
- Παραμόρφωση ε είναι το πηλίκο της μεταβολής του μήκους της οπτικής ίνας προς το αρχικό μήκος της: $\varepsilon = \Delta l/l * 100\%$.
- Νόμος του Hooke: Η σχέση ανάμεσα στη τάση και την επιμήκυνση, στην ελαστική περιοχή. $\sigma = E * \varepsilon$.
- Το όριο αναλογίας τάσης και παραμόρφωσης ονομάζεται σταθερά ελαστικότητας E ή σταθερά του Young και είναι ένα μέτρο για την ακαμψία του υλικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το E τόσο πιο στιβαρό είναι ένα υλικό. $Y = ((F/A)/(\Delta L/L_0))$.
- Χρήση μητρώων.
- Ο κάρναβος $10*10=100m^2$ με σταθερά ελαστικότητας είναι $E=1000MPa \rightarrow E=1GPa=1000kN/m^2$. Δηλαδή είναι πλάκα από πολυαιθυλένιο, το φορτίο έχει μονάδες kN/m^2 επιφάνεια είναι σε m .
- Αντοχή σχεδιασμού $Nu=0.1$.

Έτσι, υπολογίζεται το μήκος της οπτικής ίνας κατά τους άξονες x και y και έπειτα το συνολικό μήκος παραμορφωμένης οπτικής ίνας. Το U_x και U_y είναι η επιμήκυνση της οπτικής ίνας κατά x και κατά y άξονα οπότε το συνολικό μήκος της παραμορφωμένης οπτικής ίνας θα ισούται με $\sqrt{U_x^2 + U_y^2}$. Επιπλέον, οι οπτικές ίνες θα πρέπει να εμφανίζονται με τη μορφή laser στο εσωτερικό του πλέγματος και για αυτό το λόγο ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία. Έτσι, υπολογίζονται τα αντίστοιχα μήκη της οπτικής ίνας κατά x και κατά y έπειτα υπολογίζεται η ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους και η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την παραμορφωμένη περίπτωση. Τόσο για την μη παραμορφωμένη όσο και για την παραμορφωμένη οπτική ίνα έχουμε τις αντίστοιχες μετρήσεις που υπολογίζονται και συλλέγονται στο τελικό άκρο της.

➤ Παραμόρφωση FBG:

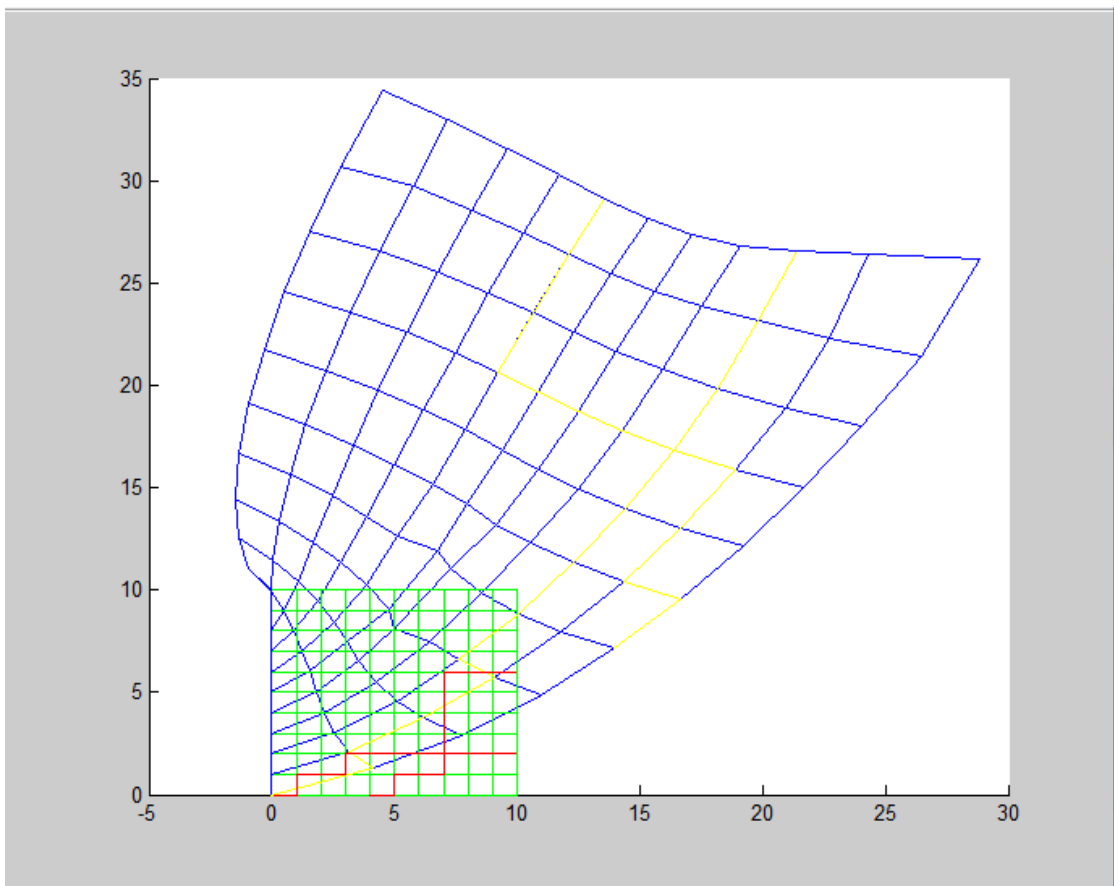
$e = (\text{συνολικό μήκος παραμορφωμένης FBG} - \text{συνολικό αρχικό μήκος FBG}) / \text{συνολικό μήκος FBG}$

modal διασπορά χρόνου = παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα στην οπτική ίνα
$\Delta t = \sqrt{(e * \text{μήκος οπτικής ίνας})}$

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υποπαλμών, ο καθένας με τη χαρακτηριστική του γωνία πρόσπτωσης μέσα στην ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διέφερε λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Έτσι οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα θα φτάσουν στο τέλος της ίνας

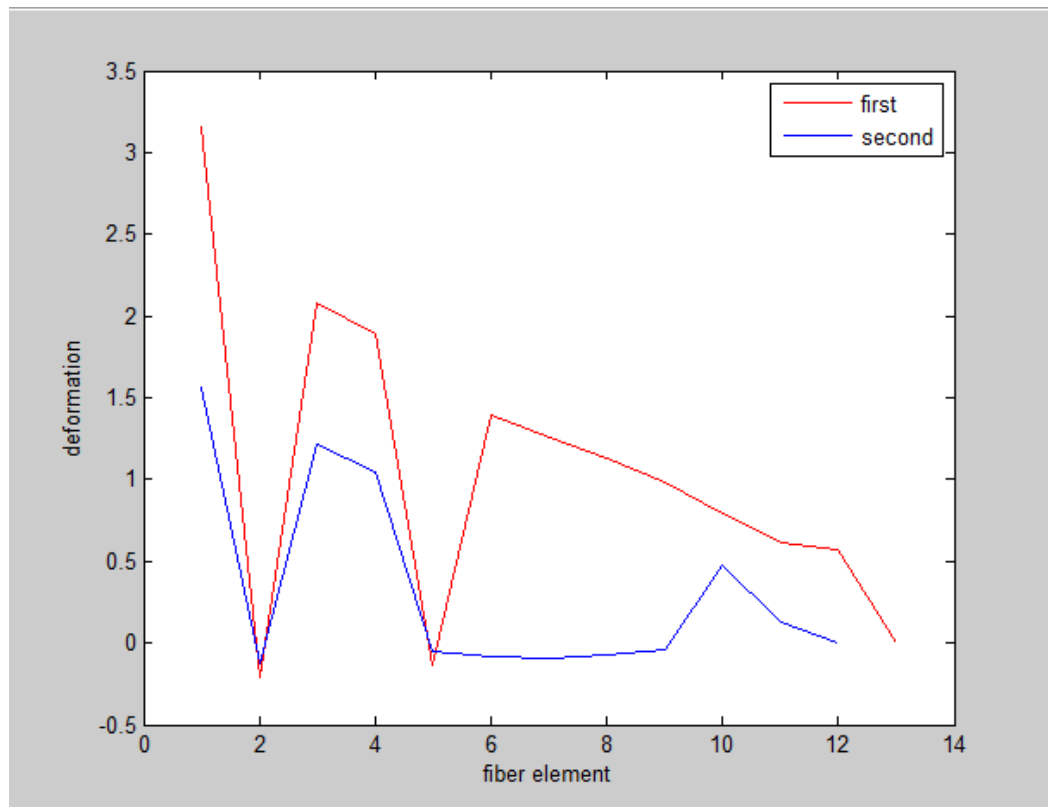
σε ελάχιστά διαφορετικούς χρόνους. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιγραφεί ως διεύρυνση του παλμού κατά τη διάρκεια διάδοσης του μέσα στην ίνα) λόγω αύξησης της διάρκειας του. Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της modal διασποράς μέσα σε μια ίνα. Ο κάθε ρυθμός διάδοσης μεταφέρει ενέργεια από και προς κάποιον άλλο. Οι ρυθμοί χαμηλής τάξης (ρυθμοί με μικρή γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετατρέπονται σε ρυθμούς υψηλής τάξης (μεγάλη γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετά τη μεταφορά ενέργειας. Το mode coupling, όπως ονομάζεται το προηγούμενο φαινόμενο, λαμβάνει χώρα περισσότερο σε σημεία «μη καθαρότητας» του πυρήνα, σε κολλήσεις (splices) και σε απότομα λυγίσματα της οπτικής ίνας. Στις σύγχρονες ίνες, ήταν δυνατό να μειώσουμε το mode coupling, βελτιώνοντας την ποιότητα της ίνας. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την ουσιαστική αδρανοποίηση του παράγοντα διαφοράς χρόνου δt. Η διαφορά αυτή δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους της ίνας.

Τα μητρώα αυτά περνούν στον κώδικα και στη συνέχεια ακολουθείται η διαδικασία τοποθέτησης των δύο οπτικών ινών γύρω από τα σημεία συγκεκριμένων κόμβων προκειμένου να παρουσιαστούν και γραφικά στη Matlab οι οπτικοί αισθητήρες Bragg. Προσθέτοντας τύπους της φυσικής και μηχανικής προκειμένου η φόρτιση να διαπερνά την οπτική ίνα και να λαμβάνεται η τελική μέτρηση.



Εικόνα 4.3: Σχεδίαση οπτικών αισθητήρων Bragg στο πρόγραμμα MATLAB

Στο παραπάνω σχήμα, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι δύο περιπτώσεις των οπτικών ινών που περνάνε από τους διάφορους κόμβους της πλάκας και με κίτρινο χρώμα παρουσιάζεται η παραμόρφωση που δέχεται η οπτική ίνα στις διάφορες φορτίσεις της πλάκας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κώδικας μας εμφανίζει παράλληλα και το διάγραμμα παραμόρφωσης για κάθε οπτική ίνα 1 και 2 αντίστοιχα. Επίσης, παράλληλα με το παραπάνω σχήμα εξάγεται και το παρακάτω διάγραμμα που φαίνονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα σήματα των οπτικών ινών για τις διάφορες φορτίσεις.



Εικόνα 4.4: Διάγραμματική απεικόνιση της παραμόρφωσης των δυο οπτικών ινών

4.4.1.5 Παραδείγματα Προσομοιώσεων

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται όλα τα ζεύγη φορτίσεων κατά την προσομοίωση της διαδικασίας τόσο για την 1^η όσο και για τη 2^η οπτική. Το id αναφέρεται στη θέση της βλάβης και το ld στο μέγεθος της βλάβης. Στον πίνακα αναφέρονται τα αποτελέσματα μετά από την επίδραση 2 φορτίσεων που δέχονται κατά χ και κατά ψ άξονα αντίστοιχα. Στον ακόλουθο πίνακα παρατηρείται πως αλλάζει το τελικό σήμα στην 1^η οπτική ίνα του παραπάνω πίνακα αν μεταβάλλουμε το υλικό της πλάκας E.

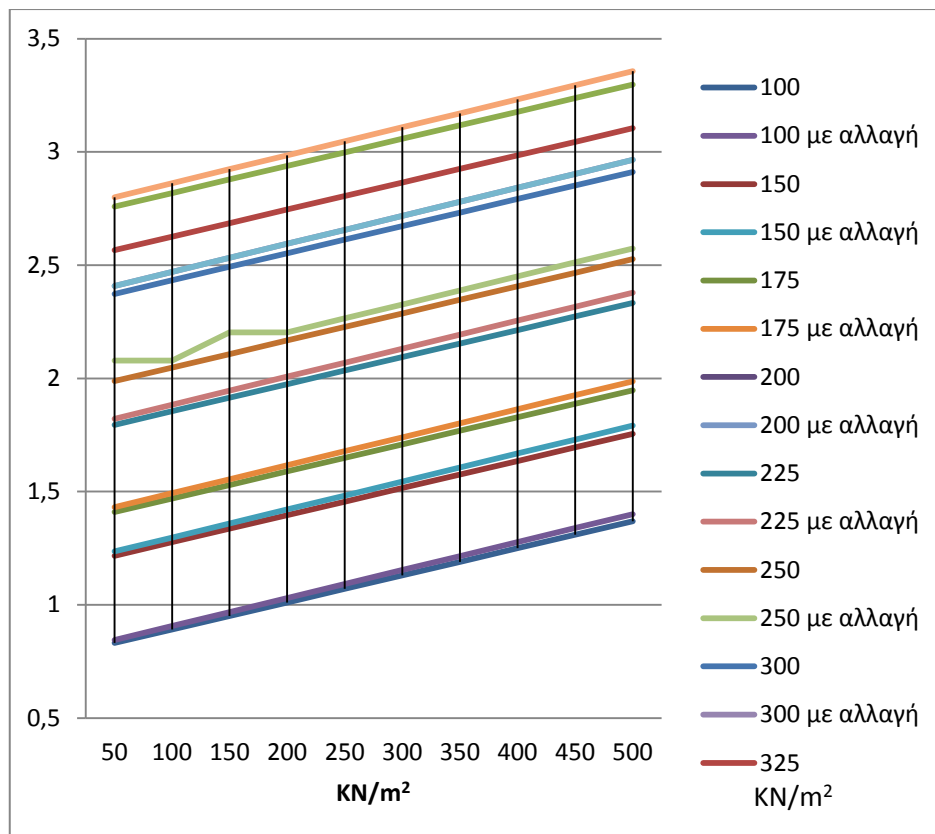
id=9 Id=0.9										
1i optiki ina	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,8309	0,8907	0,9505	1,0104	1,0702	1,13	1,1899	1,2497	1,3095	1,3694
150	1,2164	1,2762	1,3361	1,3959	1,4557	1,5156	1,5754	1,6352	1,6951	1,7549
175	1,4092	1,469	1,5288	1,5887	1,6485	1,7083	1,7682	1,828	1,8878	1,9477
200		1,6618		1,7814		1,9011		2,0208		2,1404
225	1,7947	1,8545	1,9144	1,9742	2,034	2,0939	2,1537	2,2135	2,2734	2,3332
250	1,9875	2,0473	2,1071	2,167	2,2268	2,2866	2,3465	2,4063	2,4661	2,526
300	2,373	2,4328	2,4927	2,5525	2,6123	2,6722	2,732	2,7918	2,8516	2,9115
325	2,5658	2,6256	2,6854	2,7453	2,8051	2,8649	2,9248	2,9846	3,0444	3,1042
350	2,7585	2,8184	2,8782	2,938	2,9979	3,0577	3,1175	3,1773	3,2372	3,297

id=9 Id=0.9										
1i optiki ina	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100 με αλλαγή	0,8441	0,9059	0,9677	1,0296	1,0914	1,1532	1,2151	1,2769	1,3387	1,4006
150 με αλλαγή	1,2352	1,297	1,3588	1,4207	1,4825	1,5443	1,6062	1,668	1,7298	1,7917
175 με αλλαγή	1,4307	1,4926	1,5544	1,6162	1,6781	1,7399	1,8017	1,8636	1,9254	1,9872
200 με αλλαγή		1,6881		1,8198		1,9355		2,0591		2,1828
225 με αλλαγή	1,8219	1,8837	1,9455	2,0073	2,0692	2,131	2,1928	2,2547	2,3165	2,3783
250 με αλλαγή	2,0792	2,0792	2,2029	2,2029	2,2647	2,3266	2,3884	2,4502	2,5121	2,5739
300 με αλλαγή	2,4085	2,4704	2,5322	2,594	2,6559	2,7177	2,7795	2,8414	2,9032	2,965
325 με αλλαγή	2,6041	2,6659	2,7277	2,7896	2,8514	2,9132	2,9751	3,0369	3,0987	3,1606
350 με αλλαγή	2,7996	2,8615	2,9233	2,9851	3,047	3,1088	3,1706	3,2325	3,2943	3,3561

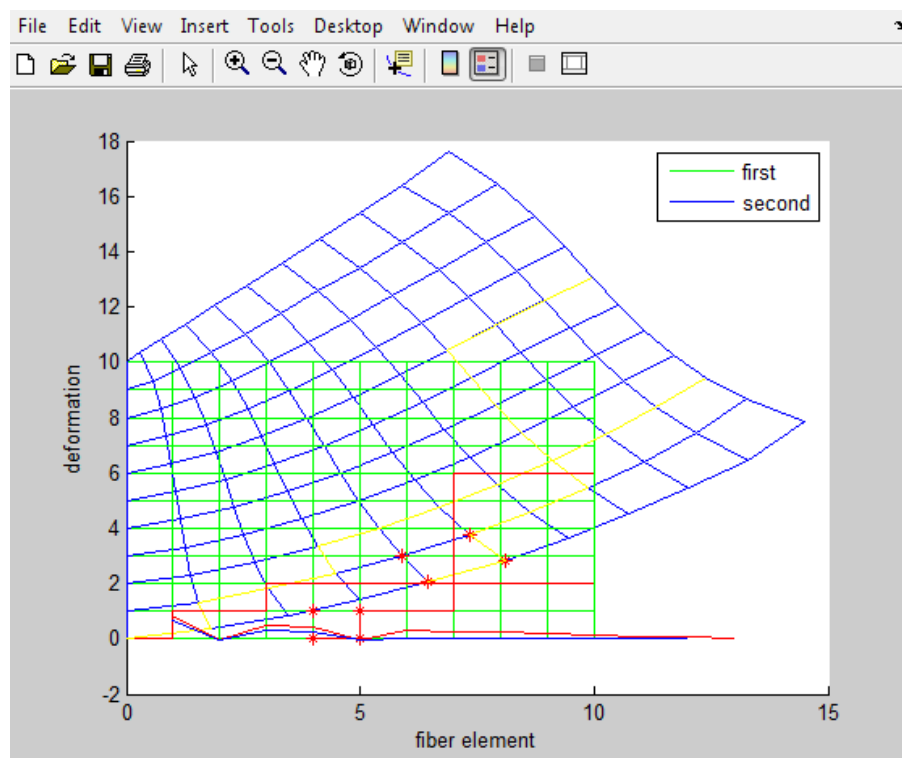
Εικόνα 4.6: Πίνακες παραμορφώσεων 1^{ns} οπτικής ίνας με id=9 και Id=0.9 με και χωρίς αλλαγή υλικού

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πιο αισθητά η διαφορά αυτή με και χωρίς αλλαγή του E όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.4.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλες τις περιπτώσεις βλαβών και η κάθε περίπτωση παρουσιάζεται όπως φαίνεται και παρακάτω με το αντίστοιχο διάγραμμα της για τις δύο οπτικές ίνες. Σ' αυτή την περίπτωση αλλάζει διαρκώς το μέγεθος και η θέση της βλάβης, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες 4.8 και 4.9.

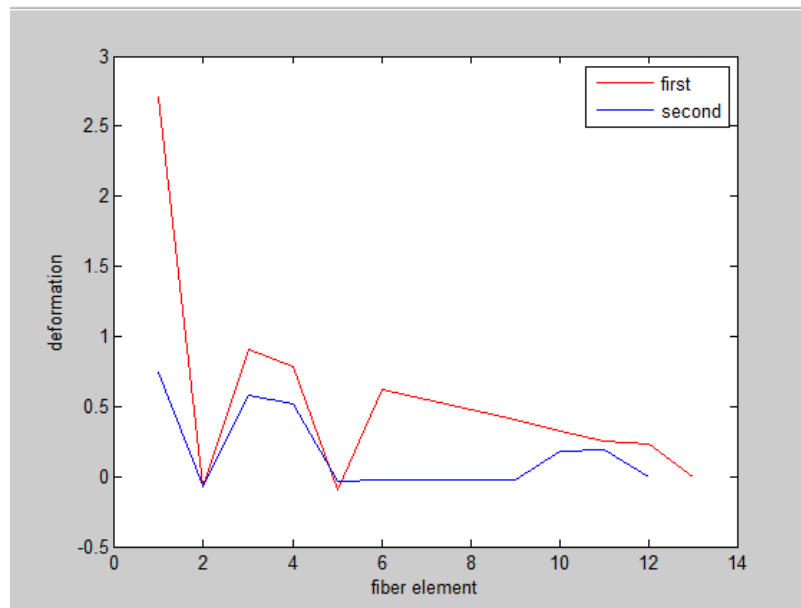


Εικόνα 4.7: Διάγραμμα 1^{ης} οπτικής ίνας με και χωρίς αλλαγή υλικού



Εικόνα 4.8: Περιοχή βλάβης στο MATLAB

Για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα που δείχνει την παραμόρφωση της κάθε οπτικής ίνας και είναι της μορφής αυτής που φαίνεται παρακάτω:



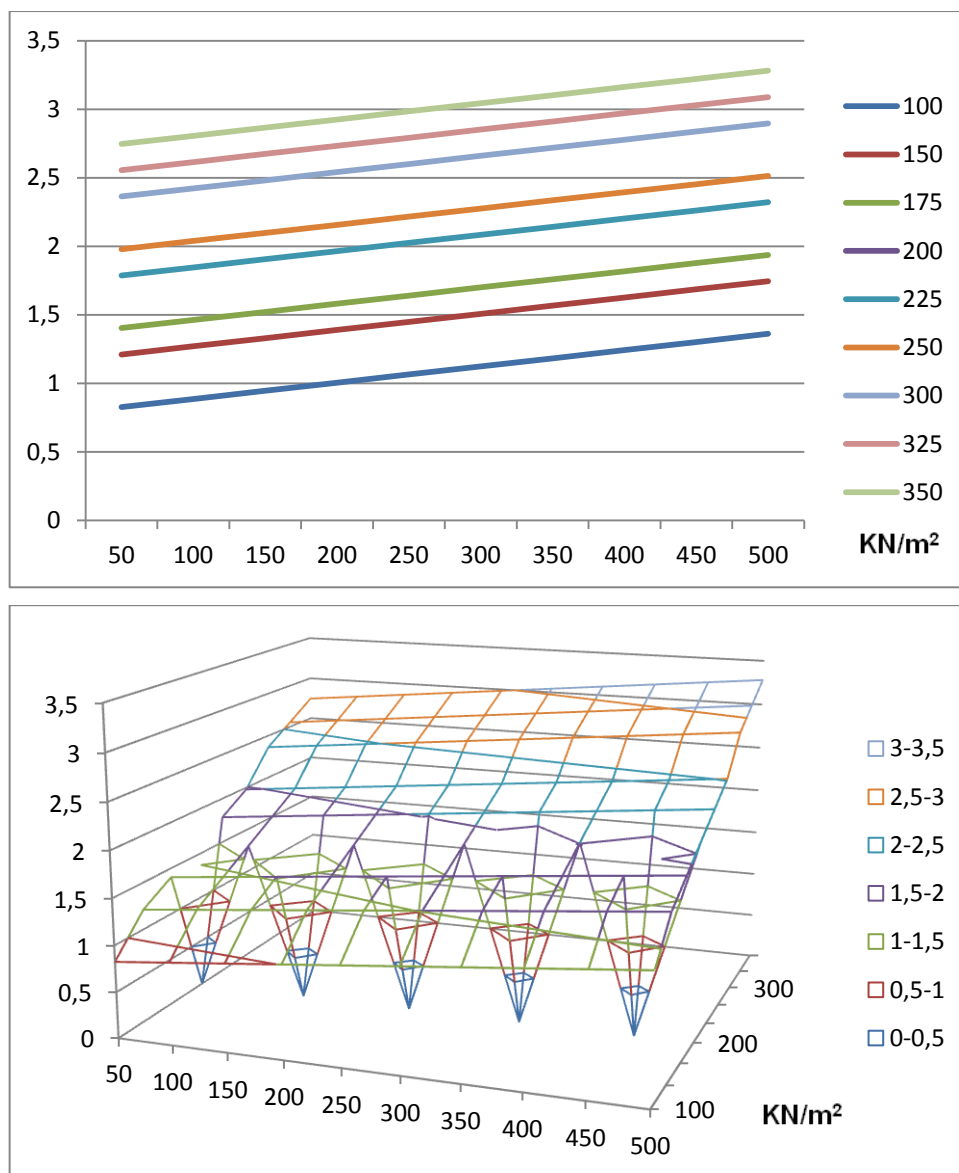
Εικόνα 4.9: Παραμόρφωση οπτικής ίνας σε κατάσταση βλάβης

Με αυτό τον τρόπο ακολουθεί μία σειρά προσομοιώσεων από τα οποία εξάγουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα. Στους πίνακες που ακολουθούν έχουμε επιλέξει διάφορες περιπτώσεις διαφορετικών φορτίσεων με κάθε φορά διαφορετικό id και ld αναφέρονται σε διαφορετική θέση και μέγεθος βλάβης.

1^ο Παράδειγμα id=5 ld=0.7 1^η οπτική ίνα

1ο paradeigma										
id=5 ld=0.7										
1i optiki ina	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,8272	0,8865	0,9458	1,0052	1,0645	1,1239	1,1832	1,2425	1,3019	1,3612
150	1,2111	1,2704	1,3298	1,3891	1,4484	1,5078	1,5671	1,6264	1,6858	1,7451
175	1,4031	1,4624	1,5217	1,5811	1,6404	1,6997	1,7591	1,8184	1,8777	1,9371
200		1,6544		1,7730		1,8917		2,0104		2,129
225	1,787	1,8463	1,9057	1,965	2,0243	2,0837	2,143	2,2023	2,2617	2,321
250	1,9789	2,0383	2,0976	2,1569	2,2163	2,2756	2,335	2,3943	2,4536	2,513
300	2,3629	2,4222	2,4815	2,5409	2,6002	2,6595	2,7189	2,7782	2,8375	2,8969
325	2,5548	2,6142	2,6735	2,7328	2,7922	2,8515	2,9108	2,9702	3,0295	3,0888
350	2,7468	2,8061	2,8655	2,9248	2,9841	3,0435	3,1028	3,1621	3,2215	3,2808

Εικόνα 4.10: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=5 και ld=0.7

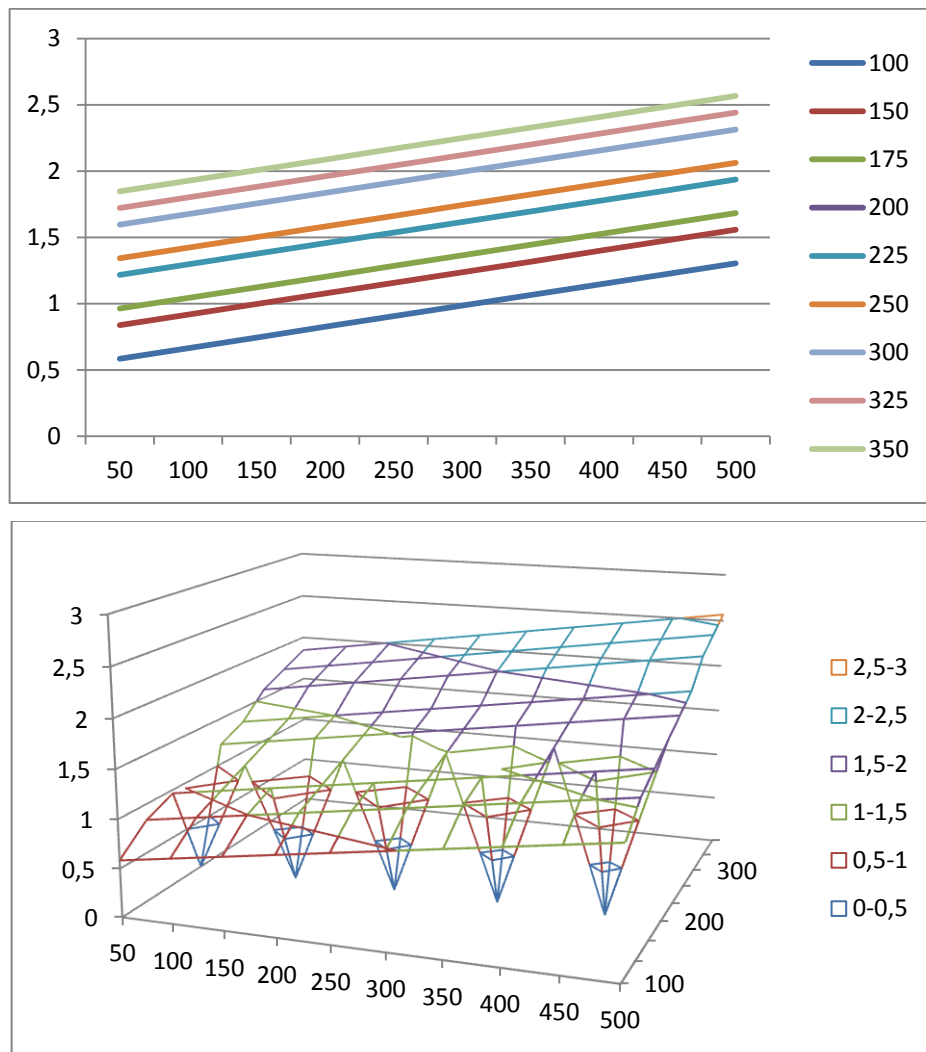


Εικόνα 4.11: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=5 και ld=0.7

1^ο Παράδειγμα id=5 ld=0.7 2^η οπτική ίνα

id=5 ld=0.7										
2 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,585	0,6649	0,7448	0,8247	0,9046	0,9845	1,0643	1,1442	1,2241	1,304
150	0,8375	0,9174	0,9973	1,0772	1,1571	1,237	1,3169	1,3968	1,4767	1,5566
175	0,9638	1,0437	1,1236	1,2035	1,2834	1,3633	1,4431	1,523	1,6029	1,6828
200		1,1699		1,3297		1,4895		1,6493		1,8091
225	1,2163	1,2962	1,3761	1,456	1,5359	1,6158	1,6957	1,7756	1,8555	1,9354
250	1,3426	1,4225	1,5024	1,5823	1,6622	1,7421	1,8219	1,9018	1,9817	2,0616
300	1,5951	1,675	1,7549	1,8348	1,9147	1,9946	2,0745	2,1544	2,2343	2,3142
325	1,7214	1,8013	1,8812	1,9611	2,041	2,1208	2,2007	2,2806	2,3605	2,4404
350	1,8476	1,9275	2,0074	2,0873	2,1672	2,2471	2,327	2,4069	2,4868	2,5667

Εικόνα 4.12: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με id=5 και ld=0.7

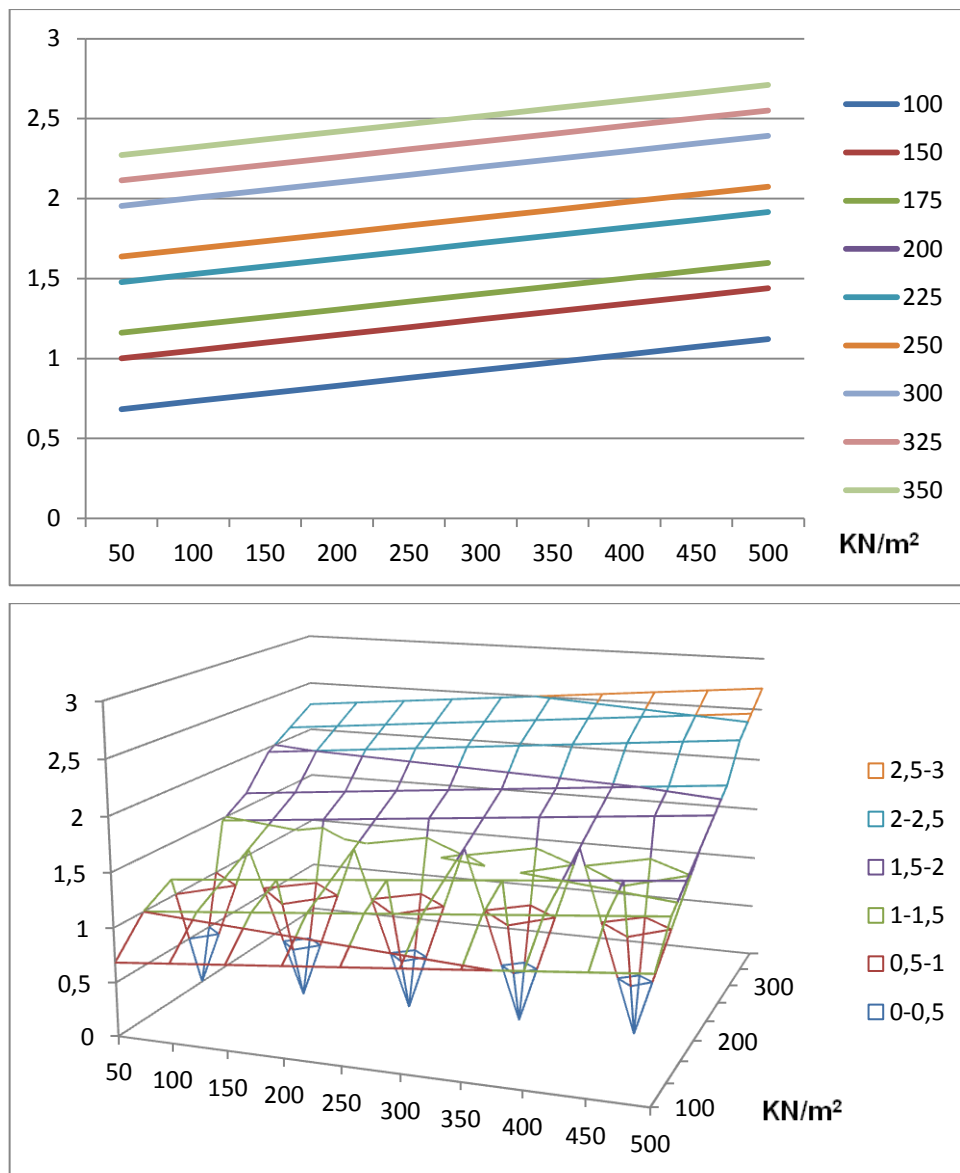


Εικόνα 4.13: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με $id=5$ και $ld=0.7$

2^ο Παράδειγμα $id=2$ $ld=0.5$ 1^η οπτική ίνα

$id=2$ $ld=0.5$										
1 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,684	0,7326	0,7812	0,8298	0,8784	0,927	0,9756	1,0242	1,0728	1,1214
150	1,0017	1,0503	1,0989	1,1475	1,1961	1,2447	1,2933	1,3419	1,3905	1,4391
175	1,1605	1,2091	1,2577	1,3063	1,3549	1,4035	1,4521	1,5007	1,5493	1,5979
200		1,368		1,4652		1,5624		1,6596		1,7567
225	1,4782	1,5268	1,5754	1,624	1,6726	1,7212	1,7698	1,8184	1,867	1,9156
250	1,6371	1,6857	1,7343	1,7829	1,8315	1,8801	1,9287	1,9773	2,0259	2,0744
300	1,9548	2,0034	2,052	2,1006	2,1492	2,1978	2,2464	2,295	2,3436	2,3921
325	2,1136	2,1622	2,2108	2,2594	2,308	2,3566	2,4052	2,4538	2,5024	2,551
350	2,2725	2,3211	2,3697	2,4183	2,4669	2,5155	2,5641	2,6127	2,6613	2,7098

Εικόνα 4.14: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$

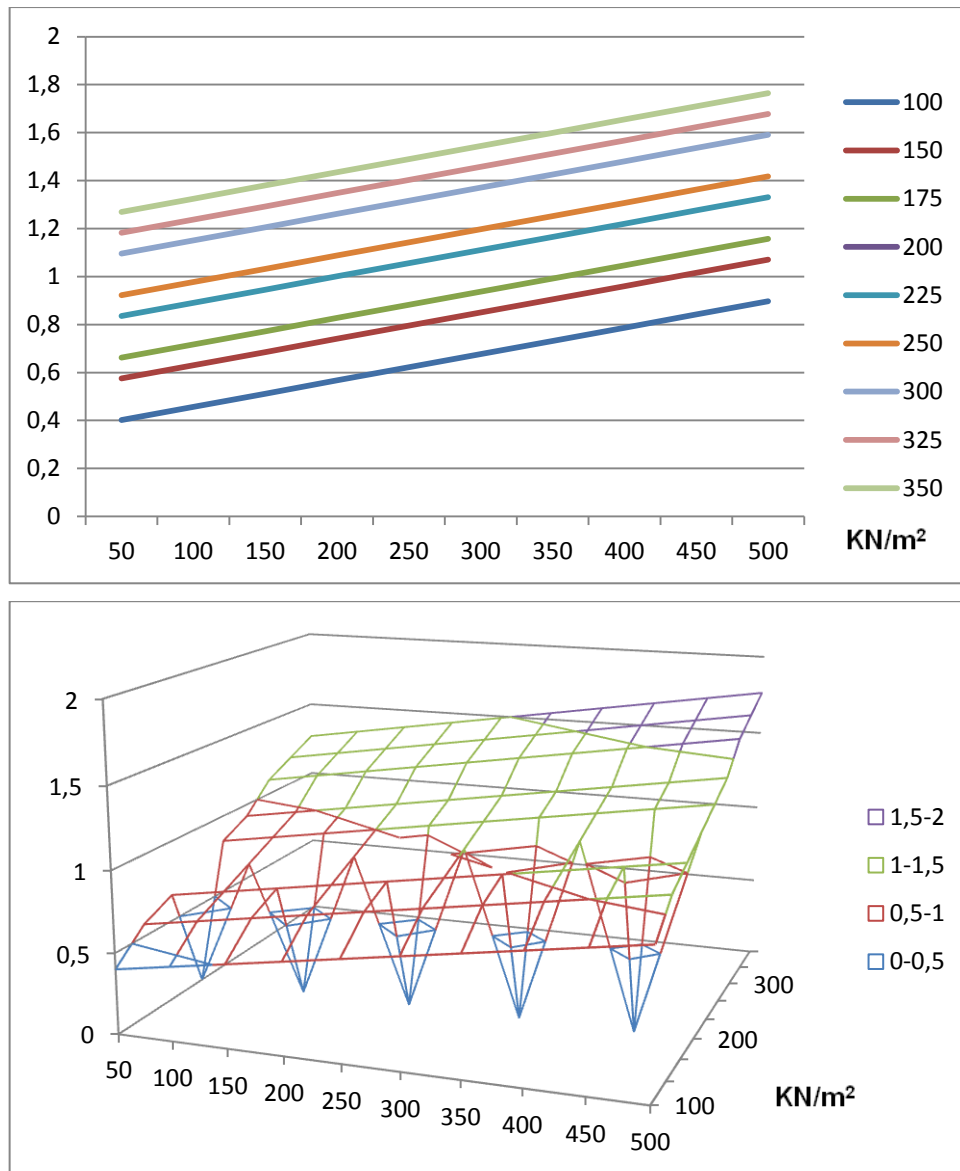


Εικόνα 4.15: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$

2^ο Παράδειγμα $id=2$ $ld=0.5$ 2^η οπτική ίνα

$id=2$ $ld=0.5$										
2i optiki ina	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,402	0,457	0,5119	0,5669	0,6219	0,6769	0,7319	0,7868	0,8418	0,8968
150	0,5755	0,6305	0,6854	0,7404	0,7954	0,8504	0,9054	0,9603	1,0153	1,0703
175	0,6622	0,7172	0,7722	0,8272	0,8822	0,9371	0,9921	1,0471	1,1021	1,157
200		0,804		0,9139		1,0239		1,1338		1,2438
225	0,8358	0,8907	0,9457	1,0007	1,0557	1,1106	1,1656	1,2206	1,2756	1,3306
250	0,9225	0,9775	1,0325	1,0874	1,1424	1,1974	1,2524	1,3074	1,3623	1,4173
300	1,096	1,151	1,206	1,2609	1,3159	1,3709	1,4259	1,4809	1,5358	1,5908
325	1,1828	1,2377	1,2927	1,3477	1,4027	1,4577	1,5126	1,5676	1,6226	1,6776
350	1,2695	1,3245	1,3795	1,4344	1,4894	1,5444	1,5994	1,6544	1,7093	1,7643

Εικόνα 4.16: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με $id=2$ και $ld=0.5$

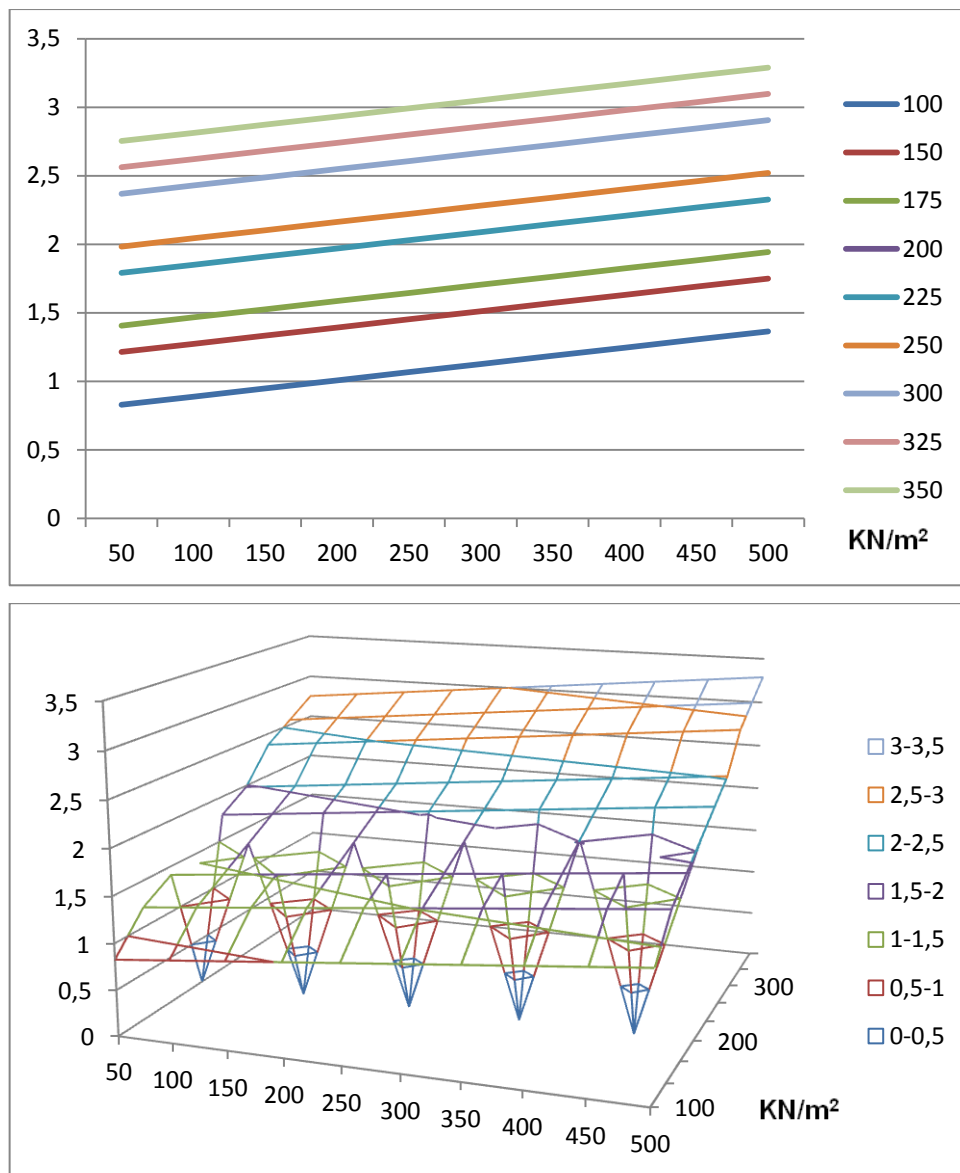


Εικόνα 4.17: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.5

3^ο Παράδειγμα id=7 ld=0.3 1^η οπτική ίνα

id=7 ld=0.3										
1 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,8293	0,8888	0,9484	1,0079	1,0674	1,127	1,1865	1,246	1,3056	1,3651
150	1,2142	1,2737	1,3333	1,3928	1,4523	1,5119	1,5714	1,6309	1,6905	1,75
175	1,4067	1,4662	1,5257	1,5853	1,6448	1,7043	1,7638	1,8234	1,8829	1,9424
200		1,6586		1,7777		1,8968		2,0158		2,1349
225	1,7915	1,8511	1,9106	1,9701	2,0297	2,0892	2,1487	2,2083	2,2678	2,3273
250	1,984	2,0435	2,1031	2,1626	2,2221	2,2817	2,3412	2,4007	2,4603	2,5198
300	2,3689	2,4284	2,488	2,5475	2,607	2,6665	2,7261	2,7856	2,8451	2,9047
325	2,5613	2,6209	2,6804	2,7399	2,7995	2,859	2,9185	2,9781	3,0376	3,0971
350	2,7538	2,8133	2,8728	2,9324	2,9919	3,0514	3,111	3,1705	3,23	3,2896

Εικόνα 4.18: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=7 και ld=0.3

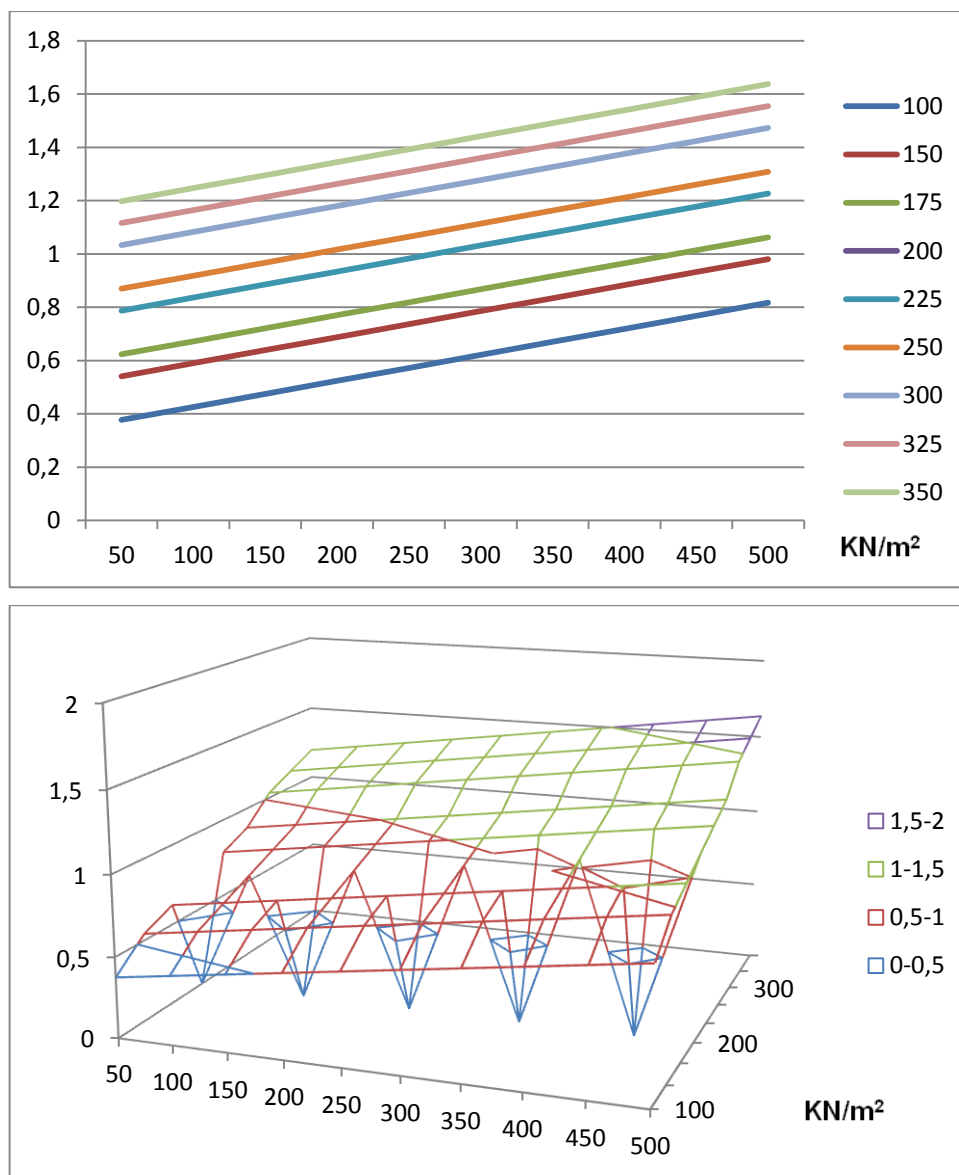


Εικόνα 4.19: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=7 και ld=0.3

3^ο Παράδειγμα id=7 ld=0.3 2^η οπτική ίνα

id=7 ld=0.3										
2 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,377	0,4258	0,4747	0,5235	0,5723	0,6211	0,6699	0,7187	0,7676	0,8164
150	0,5411	0,59	0,6388	0,6876	0,7364	0,7852	0,834	0,8829	0,9317	0,9805
175	0,6232	0,672	0,7208	0,7696	0,8185	0,8673	0,9161	0,9649	1,0137	1,0625
200		0,7541		0,8517		0,9493		1,047		1,1446
225	0,7873	0,8361	0,8849	0,9338	0,9826	1,0314	1,0802	1,129	1,1778	1,2266
250	0,8694	0,9182	0,967	1,0158	1,0646	1,1134	1,1623	1,2111	1,2599	1,3087
300	1,0335	1,0823	1,1311	1,1799	1,2287	1,2775	1,3264	1,3752	1,424	1,4728
325	1,1155	1,1643	1,2132	1,262	1,3108	1,3596	1,4084	1,4572	1,506	1,5549
350	1,1976	1,2464	1,2952	1,344	1,3928	1,4417	1,4905	1,5393	1,5881	1,6369

Εικόνα 4.20: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με id=7 και ld=0.3

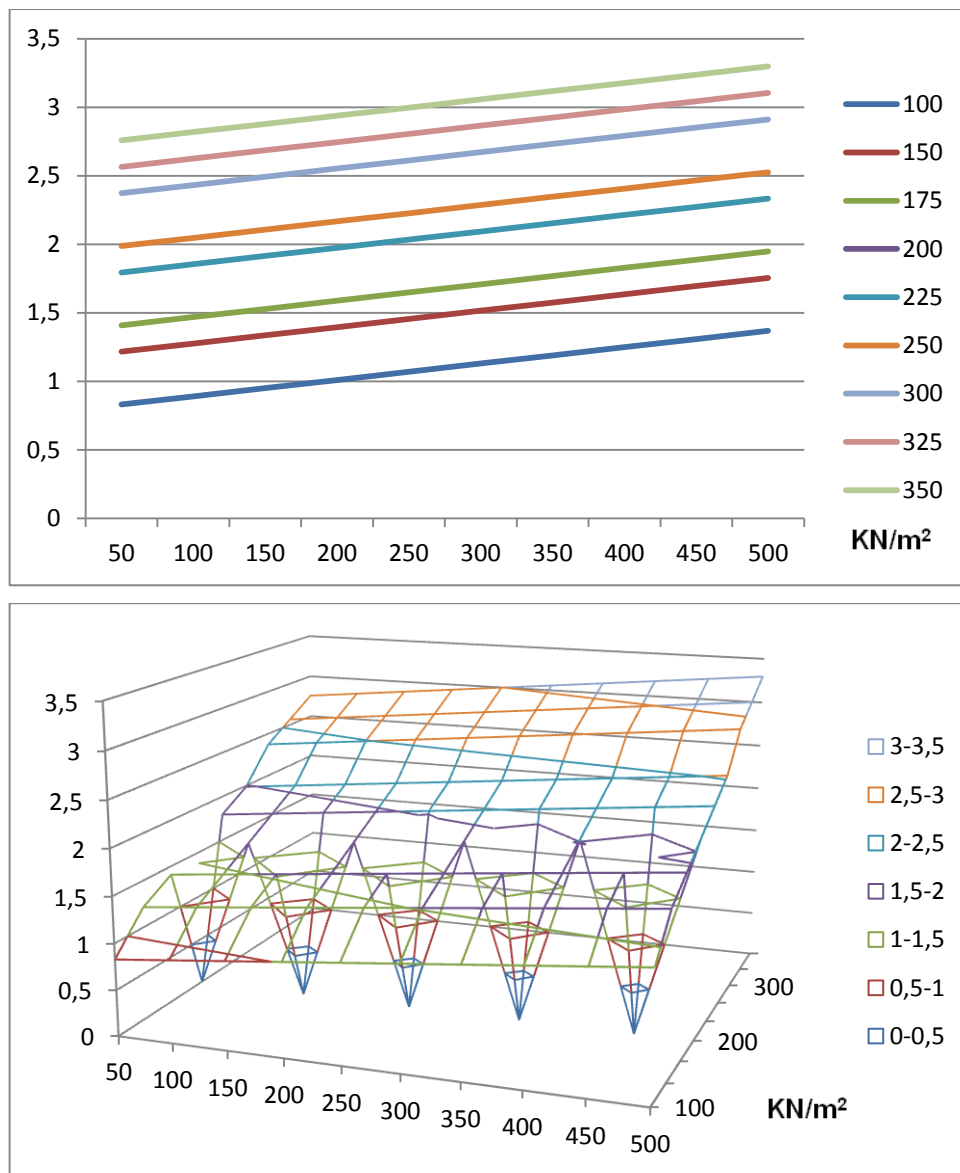


Εικόνα 4.21: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2ης οπτικής ίνας με $id=7$ και $ld=0.3$

4^ο Παράδειγμα $id=9$ $ld=0.9$ 1^η οπτική ίνα

$id=9$ $ld=0.9$										
1 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,8309	0,8907	0,9505	1,0104	1,0702	1,13	1,1899	1,2497	1,3095	1,3694
150	1,2164	1,2762	1,3361	1,3959	1,4557	1,5156	1,5754	1,6352	1,6951	1,7549
175	1,4092	1,469	1,5288	1,5887	1,6485	1,7083	1,7682	1,828	1,8878	1,9477
200		1,6618		1,7814		1,9011		2,0208		2,1404
225	1,7947	1,8545	1,9144	1,9742	2,034	2,0939	2,1537	2,2135	2,2734	2,3332
250	1,9875	2,0473	2,1071	2,167	2,2268	2,2866	2,3465	2,4063	2,4661	2,526
300	2,373	2,4328	2,4927	2,5525	2,6123	2,6722	2,732	2,7918	2,8516	2,9115
325	2,5658	2,6256	2,6854	2,7453	2,8051	2,8649	2,9248	2,9846	3,0444	3,1042
350	2,7585	2,8184	2,8782	2,938	2,9979	3,0577	3,1175	3,1773	3,2372	3,297

Εικόνα 4.22: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με $id=9$ και $ld=0.9$

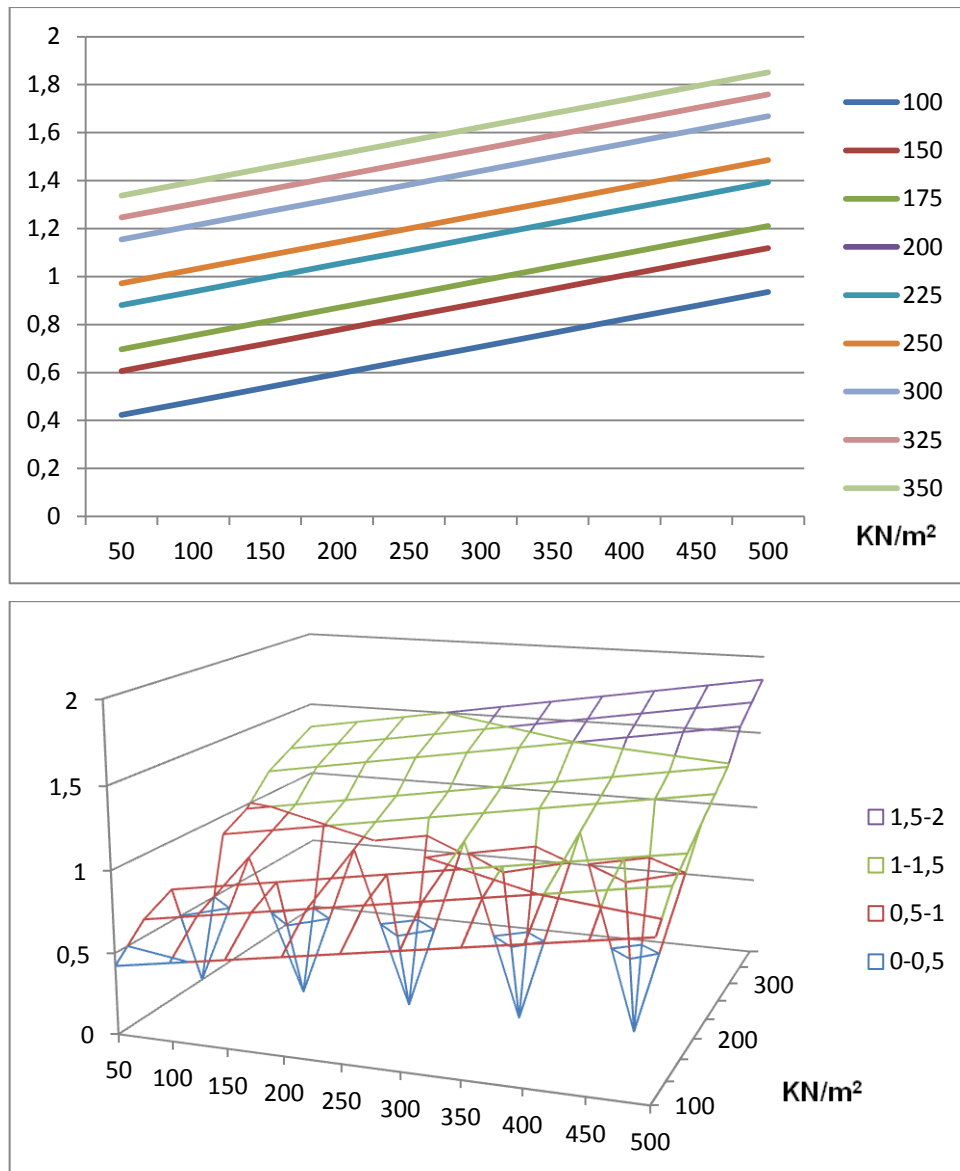


Εικόνα 4.23: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με $id=9$ και $ld=0.9$

4^ο Παράδειγμα $id=9$ $ld=0.9$ 2^η οπτική ίνα

$id=9$ $ld=0.9$										
2 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,423	0,48	0,537	0,594	0,651	0,708	0,765	0,822	0,879	0,936
150	0,606	0,663	0,72	0,777	0,834	0,891	0,948	1,005	1,062	1,119
175	0,6975	0,7545	0,8115	0,8685	0,9255	0,9825	1,0395	1,0965	1,1535	1,2105
200		0,846		0,96		1,074		1,188		1,302
225	0,8805	0,9375	0,9945	1,0515	1,1085	1,1655	1,2225	1,2795	1,3365	1,3935
250	0,972	1,029	1,086	1,143	1,2	1,257	1,314	1,371	1,428	1,485
300	1,155	1,212	1,269	1,326	1,383	1,44	1,497	1,554	1,611	1,668
325	1,2464	1,3034	1,3605	1,4175	1,4745	1,5315	1,5885	1,6455	1,7025	1,7595
350	1,3379	1,3949	1,4519	1,5089	1,566	1,623	1,68	1,737	1,794	1,851

Εικόνα 4.24: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με $id=9$ και $ld=0.9$

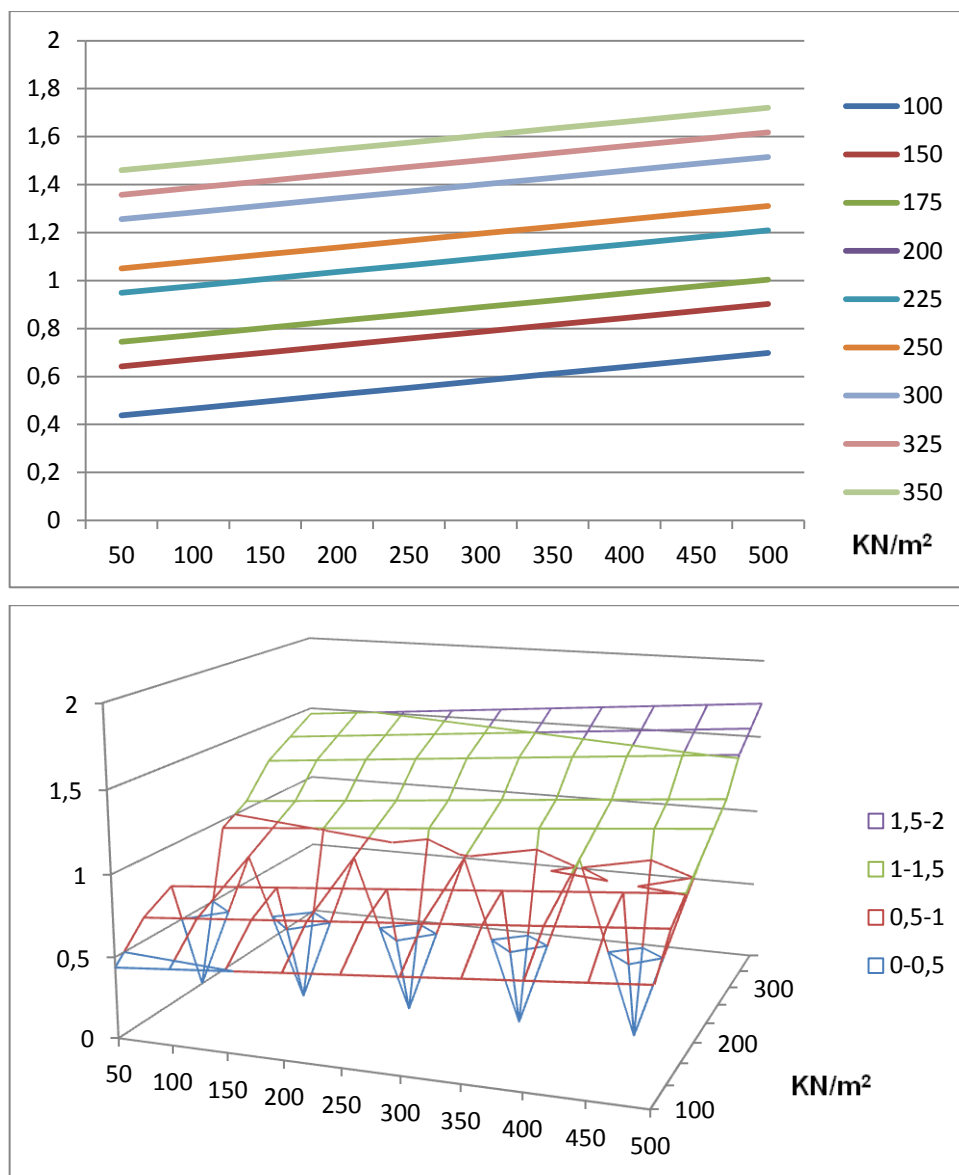


Εικόνα 4.25: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με id=9 και ld=0.9

5^ο Παράδειγμα id=2 ld=0.2 1^η οπτική ίνα

id=2 ld=0.2										
1 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,4378	0,4666	0,4955	0,5244	0,5533	0,5821	0,611	0,6399	0,6688	0,6977
150	0,6422	0,6711	0,7	0,7288	0,7577	0,7866	0,8155	0,8443	0,8732	0,9021
175	0,7444	0,7733	0,8022	0,8311	0,8599	0,8888	0,9177	0,9466	0,9754	1,0043
200		0,8755		0,9333		0,991		1,0488		1,1065
225	0,9489	0,9778	1,0066	1,0355	1,0644	1,0933	1,1221	1,151	1,1799	1,2088
250	1,0511	1,08	1,1089	1,1377	1,1666	1,1955	1,2244	1,2532	1,2821	1,311
300	1,2556	1,2844	1,3133	1,3422	1,3711	1,3999	1,4288	1,4577	1,4866	1,5154
325	1,3578	1,3867	1,4155	1,4444	1,4733	1,5022	1,531	1,5599	1,5888	1,6177
350	1,46	1,4889	1,5178	1,5466	1,5755	1,6044	1,6333	1,6621	1,691	1,7199

Εικόνα 4.26: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2

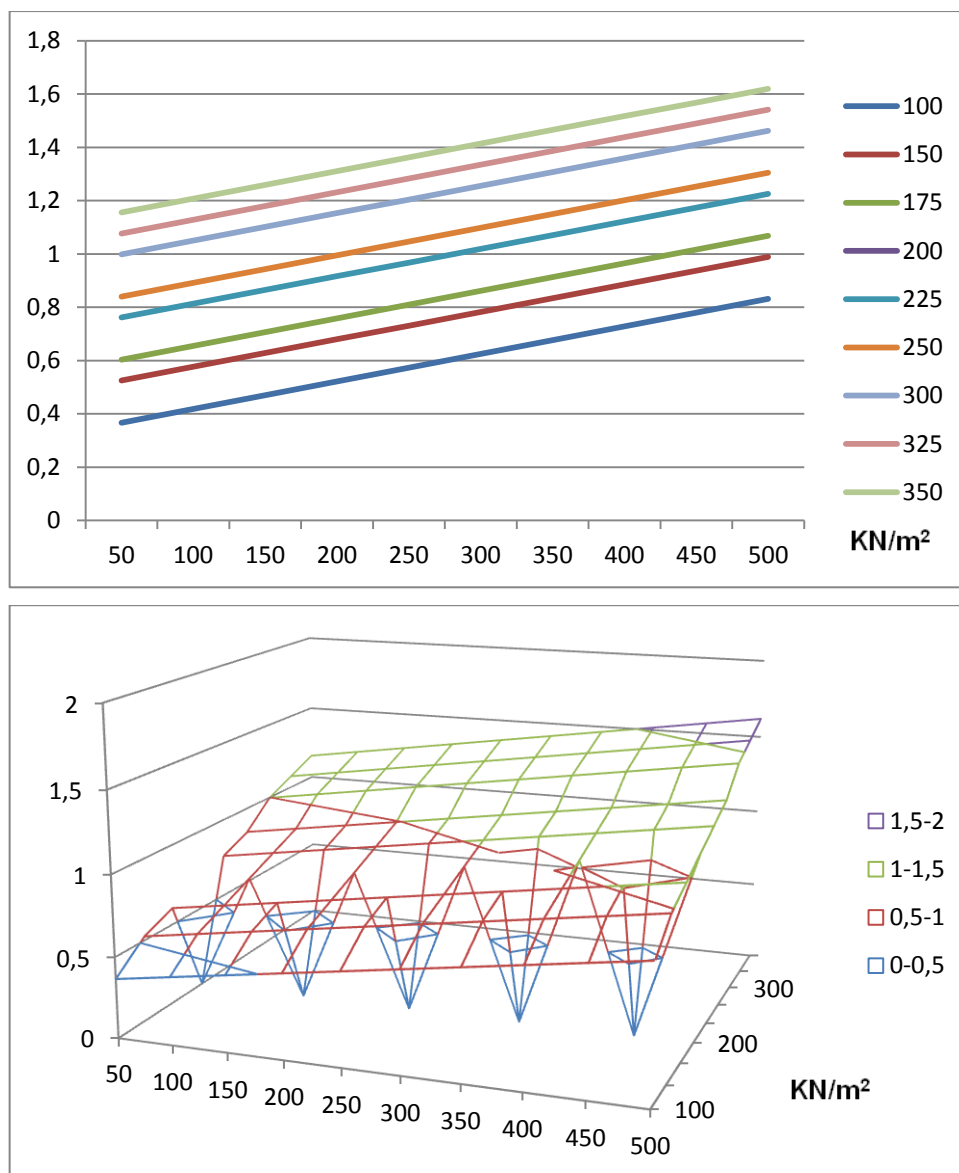


Εικόνα 4.27: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2

5^ο Παράδειγμα id=2 ld=0.2 2^η οπτική ίνα

id=2 ld=0.2										
2 ^η optiki ina	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,3671	0,4186	0,4701	0,5217	0,5732	0,6248	0,6763	0,7278	0,7794	0,8309
150	0,5248	0,5764	0,6279	0,6795	0,731	0,7825	0,8341	0,8856	0,9371	0,9887
175	0,6037	0,6553	0,7068	0,7583	0,8099	0,8614	0,9129	0,9645	1,016	1,0676
200		0,7341		0,8372		0,9403		1,0434		1,1464
225	0,7615	0,813	0,8646	0,9161	0,9676	1,0192	1,0707	1,1223	1,1738	1,2253
250	0,8404	0,8919	0,9435	0,995	1,0465	1,0981	1,1496	1,2011	1,2527	1,3042
300	0,9981	1,0497	1,1012	1,1528	1,2043	1,2558	1,3074	1,3589	1,4104	1,462
325	1,077	1,1286	1,1801	1,2316	1,2832	1,3347	1,3863	1,4378	1,4893	1,5409
350	1,1559	1,2075	1,259	1,3105	1,3621	1,4136	1,4651	1,5167	1,5682	1,6197

Εικόνα 4.28: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2

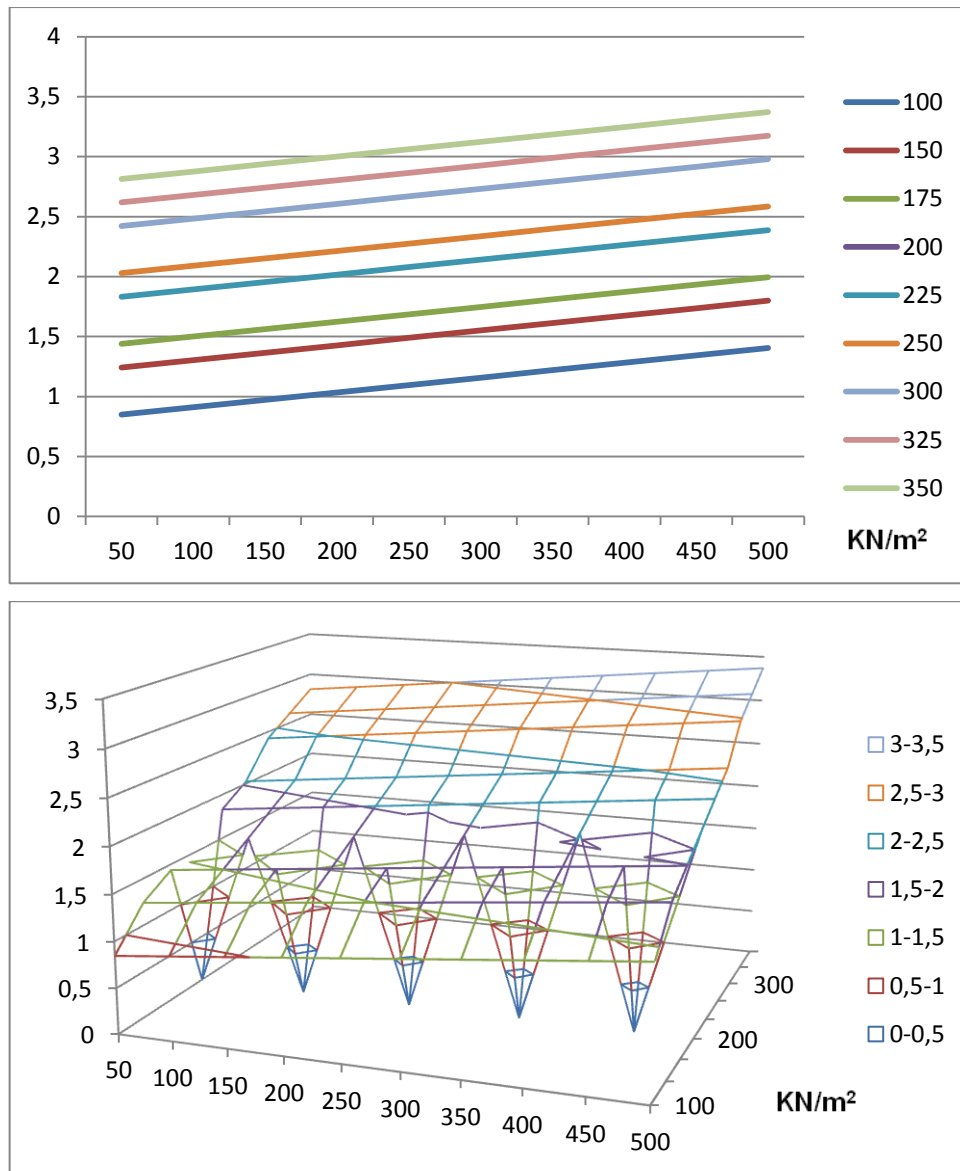


Εικόνα 4.29: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με id=2 και ld=0.2

6^ο Παράδειγμα id=12 ld=0.8 1^η οπτική ίνα

id=12 ld=0.8										
1 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,8483	0,9102	0,972	1,0339	1,0957	1,1576	1,2194	1,2813	1,3431	1,405
150	1,2415	1,3034	1,3652	1,4271	1,4889	1,5508	1,6126	1,6745	1,7364	1,7982
175	1,4381	1,5	1,5618	1,6237	1,6856	1,7474	1,8093	1,8711	1,933	1,9948
200		1,6966		1,8203		1,944		2,0677		2,1914
225	1,8314	1,8932	1,9551	2,0169	2,0788	2,1406	2,2025	2,2643	2,3262	2,388
250	2,028	2,0898	2,1517	2,2135	2,2754	2,3372	2,3991	2,4609	2,5228	2,5847
300	2,4212	2,483	2,5449	2,6068	2,6686	2,7305	2,7923	2,8542	2,916	2,9779
325	2,6178	2,6797	2,7415	2,8034	2,8652	2,9271	2,9889	3,0508	3,1126	3,1745
350	2,8144	2,8763	2,9381	3	3,0618	3,1237	3,1855	3,2474	3,3092	3,3711

Εικόνα 4.30: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με id=12 και ld=0.8

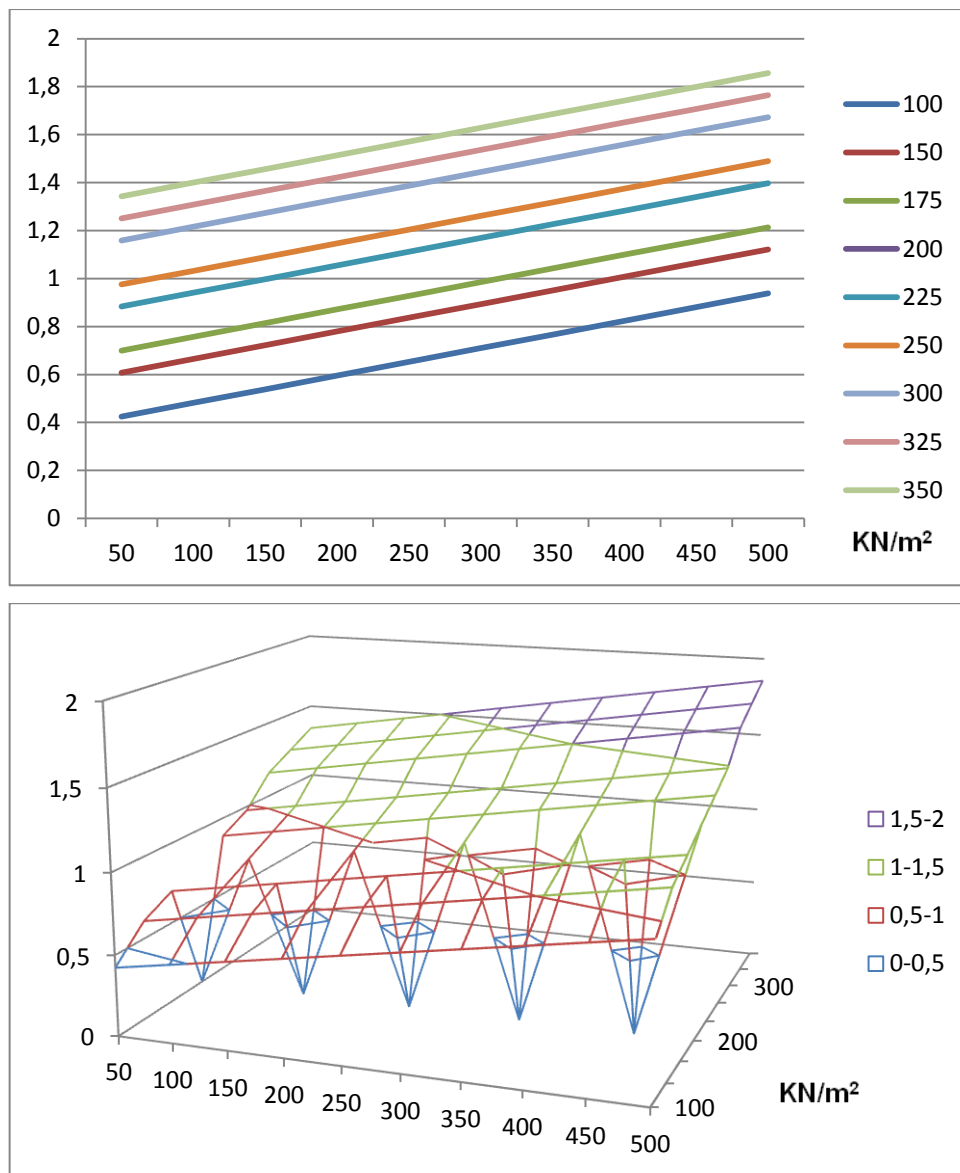


Εικόνα 4.31: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1ης οπτικής ίνας με $id=12$ και $ld=0.8$

6ο Παράδειγμα $id=12$ $ld=0.8$ 2^η οπτική ίνα

$id=12$ $ld=0.8$										
2 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,4244	0,4815	0,5386	0,5957	0,6528	0,7098	0,7669	0,824	0,8811	0,9382
150	0,608	0,6651	0,7222	0,7793	0,8364	0,8935	0,9506	1,0077	1,0648	1,1219
175	0,6999	0,757	0,814	0,8711	0,9282	0,9853	1,0424	1,0995	1,1566	1,2137
200		0,8488		0,963		1,0771		1,1913		1,3055
225	0,8835	0,9406	0,9977	1,0548	1,1119	1,169	1,2261	1,2832	1,3402	1,3973
250	0,9753	1,0324	1,0895	1,1466	1,2037	1,2608	1,3179	1,375	1,4321	1,4892
300	1,159	1,2161	1,2732	1,3303	1,3874	1,4444	1,5015	1,5586	1,6157	1,6728
325	1,2508	1,3079	1,365	1,4221	1,4792	1,5363	1,5934	1,6504	1,7075	1,7646
350	1,3426	1,3997	1,4568	1,5139	1,571	1,6281	1,6852	1,7423	1,7994	1,8565

Εικόνα 4.32: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με $id=12$ και $ld=0.8$

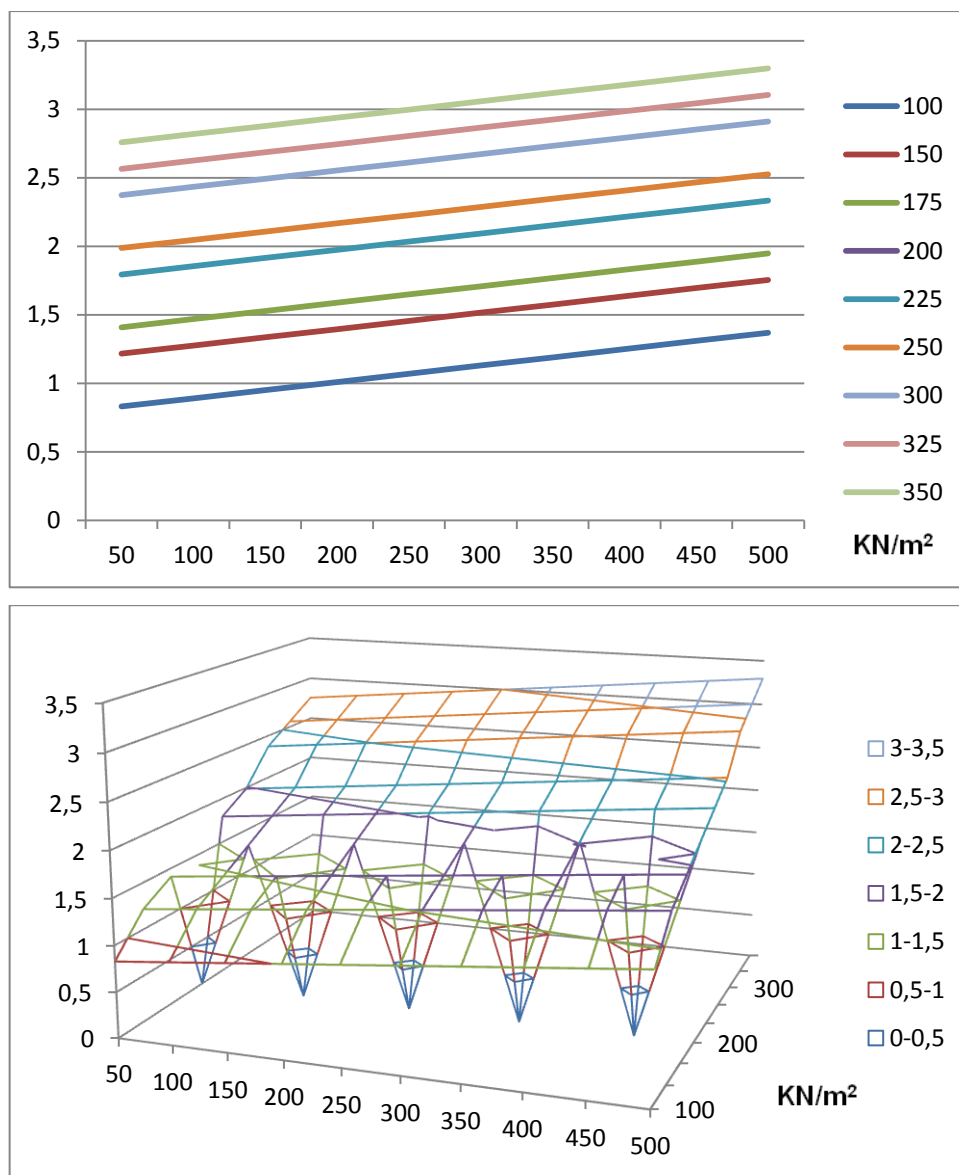


Εικόνα 4.33: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2ης οπτικής ίνας με $id=12$ και $ld=0.8$

7^ο Παράδειγμα $id=10$ $ld=0.6$ 1^η οπτική ίνα

$id=10$ $ld=0.6$										
1 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,8309	0,8907	0,9506	1,0104	1,0702	1,1301	1,1899	1,2497	1,3096	1,3694
150	1,2164	1,2763	1,3361	1,3959	1,4558	1,5156	1,5754	1,6353	1,6951	1,7549
175	1,4092	1,469	1,5289	1,5887	1,6485	1,7084	1,7682	1,828	1,8879	1,9477
200		1,6618		1,7815		1,9011		2,0208		2,1405
225	1,7947	1,8546	1,9144	1,9742	2,0341	2,0939	2,1537	2,2136	2,2734	2,3332
250	1,9875	2,0473	2,1072	2,167	2,2268	2,2867	2,3465	2,4063	2,4662	2,526
300	2,373	2,4329	2,4927	2,5525	2,6124	2,6722	2,732	2,7919	2,8517	2,9115
325	2,5658	2,6256	2,6855	2,7453	2,8051	2,865	2,9248	2,9846	3,0445	3,1043
350	2,7586	2,8184	2,8782	2,9381	2,9979	3,0577	3,1176	3,1774	3,2372	3,2971

Εικόνα 4.34: Πίνακας παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με $id=10$ και $ld=0.6$

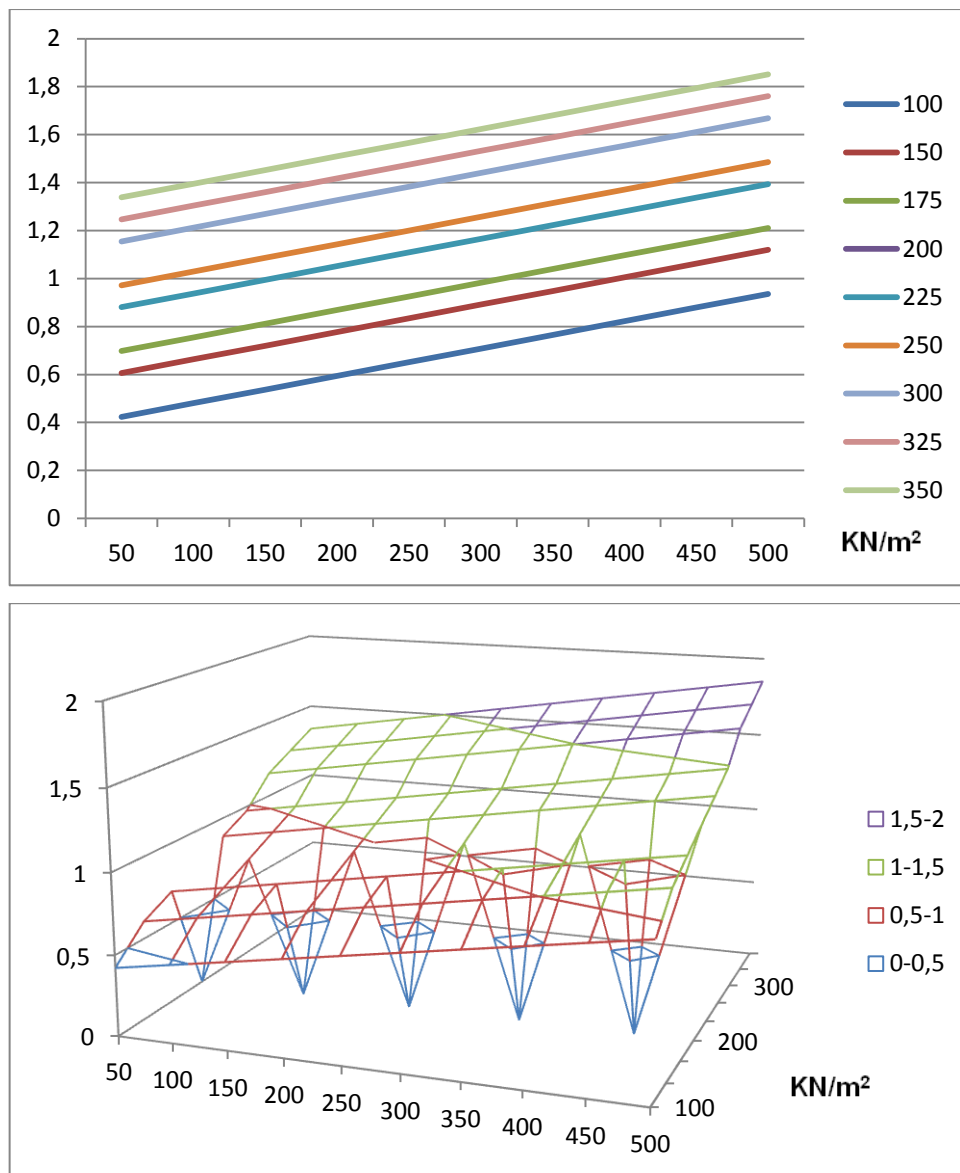


Εικόνα 4.35: Διαγράμματα παραμορφώσεων 1^{ης} οπτικής ίνας με $id=10$ και $ld=0.6$

7^ο Παράδειγμα $id=10$ $ld=0.6$ 2^η οπτική ίνα

$id=10$ $ld=0.6$										
2 ^η οπτική ίνα	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	0,4231	0,4801	0,5371	0,5941	0,6512	0,7082	0,7652	0,8222	0,8792	0,9363
150	0,6061	0,6631	0,7201	0,7772	0,8342	0,8912	0,9482	1,0053	1,0623	1,1193
175	0,6976	0,7546	0,8117	0,8687	0,9257	0,9827	1,0397	1,0968	1,1538	1,2108
200		0,8462		0,9602		1,0742		1,1883		1,3023
225	0,8806	0,9377	0,9947	1,0517	1,1087	1,1658	1,2228	1,2798	1,3368	1,3938
250	0,9722	1,0292	1,0862	1,1432	1,2002	1,2573	1,3143	1,3713	1,4283	1,4854
300	1,1552	1,2122	1,2692	1,3262	1,3833	1,4403	1,4973	1,5543	1,6114	1,6684
325	1,2467	1,3037	1,3607	1,4178	1,4748	1,5318	1,5888	1,6458	1,7029	1,7599
350	1,3382	1,3952	1,4523	1,5093	1,5663	1,6233	1,6803	1,7374	1,7944	1,8514

Εικόνα 4.36: Πίνακας παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με $id=10$ και $ld=0.6$

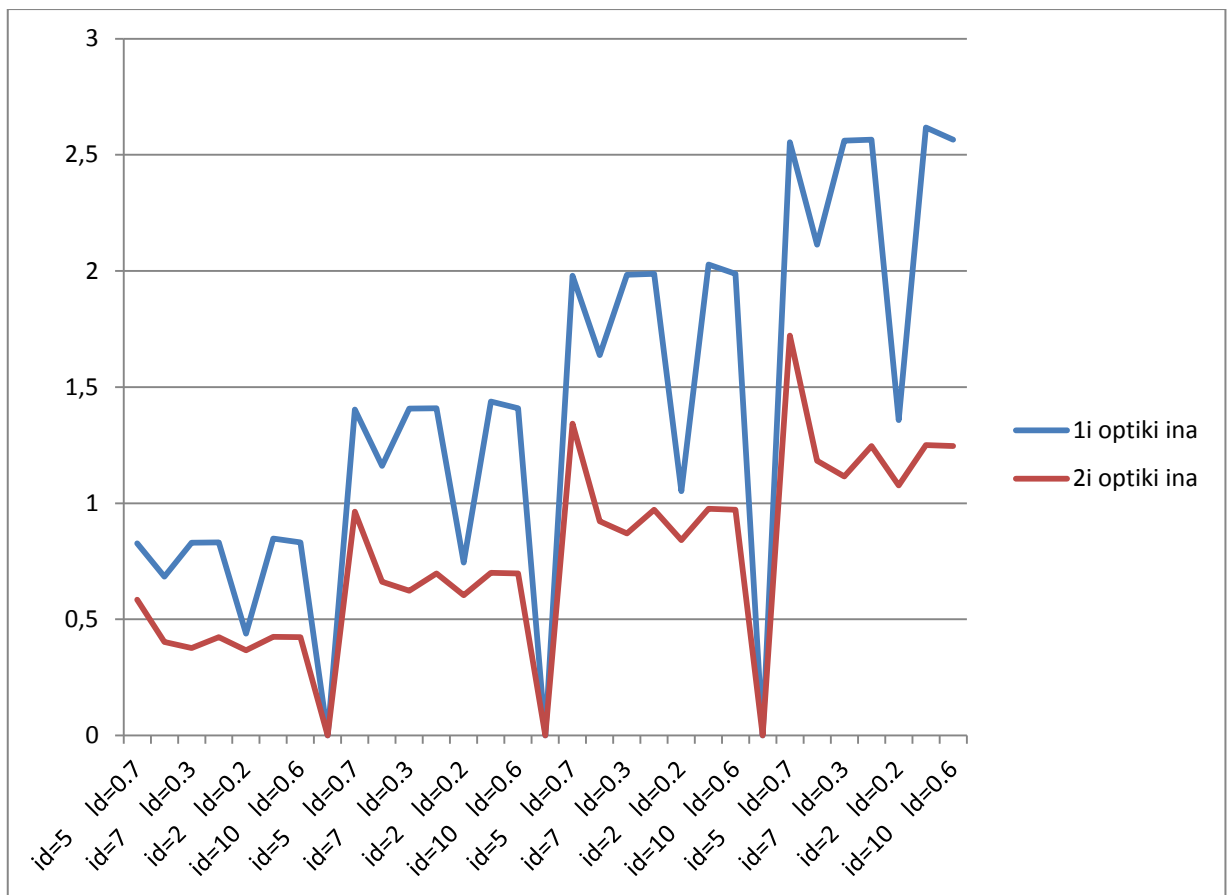


Εικόνα 4.37: Διαγράμματα παραμορφώσεων 2^{ης} οπτικής ίνας με $id=10$ και $ld=0.6$

Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά id και ld

Παρακάτω παρατίθεται η σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά id και ld για τα ακόλουθα ζεύγη φορτίσεων

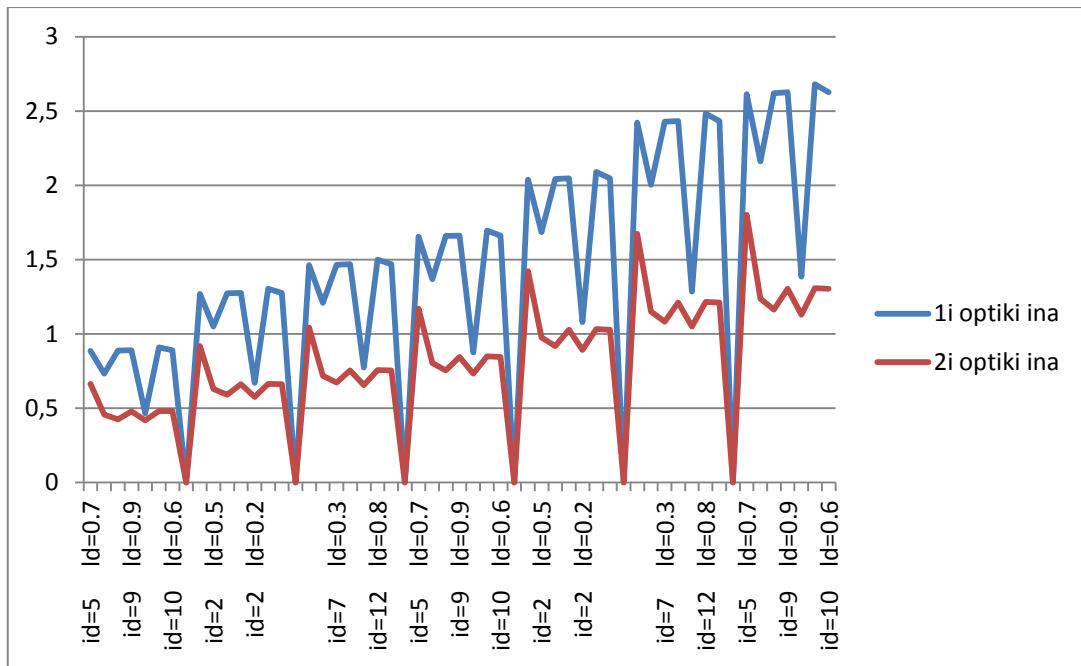
50	100
50	175
50	250
50	325



Εικόνα 4.38: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικά id και ld

Για ζεύγη φορτίσεων:

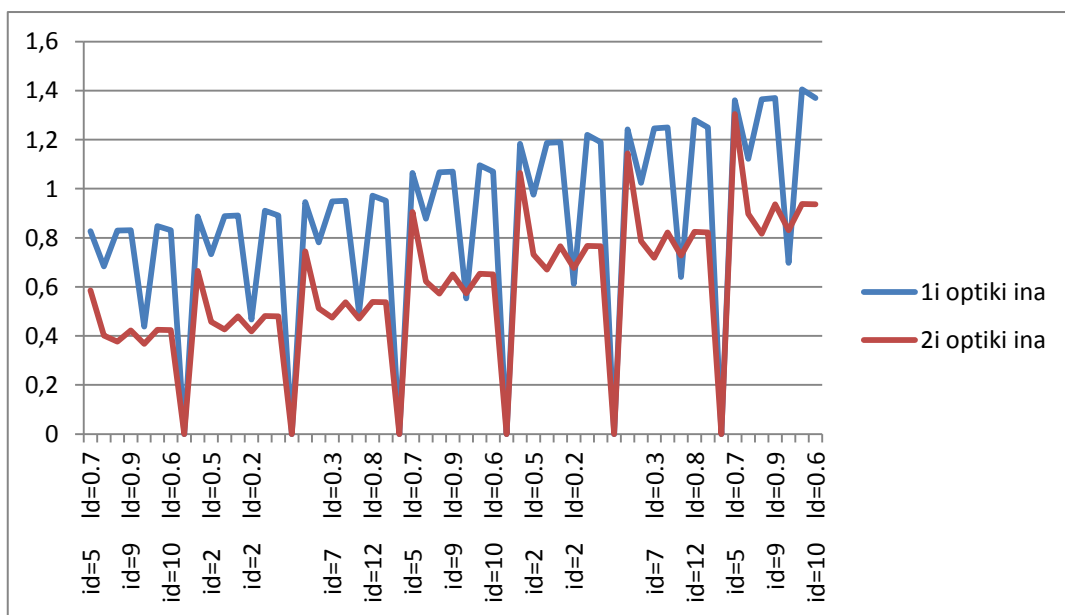
100	100
100	150
100	175
100	200
100	250
100	300
100	325



Εικόνα 4.39: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικά id και ld

Και τέλος για τα παρακάτω ζεύγη φορτίσεων:

50	100
100	100
150	100
250	100
350	100
400	100
500	100



Εικόνα 4.40: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικά id και ld

Στη συνέχεια, η διαδικασία για θέση της βλάβης από $id=1$ μέχρι $id=92$ και για μέγεθος βλάβης $ld=0.1$ μέχρι $ld=0.9$ και έτσι προέκυψαν πίνακες για την κάθε ένα ξεχωριστά που έδιναν το τελικό σήμα όλων αυτών των συνδυασμών. Τα αποτελέσματα αυτά στη συνέχεια περάστηκαν σε μία σειρά από νευρωνικά δίκτυα ώστε εκπαιδεύοντας τα να διερευνηθούν καλύτερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Νευρωνικά Δίκτυα

Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ, Artificial Neural Network (ANN)) που συχνά καλείται και Προσομοιωμένο Νευρωνικό Δίκτυο ή απλά Νευρωνικό δίκτυο (ΝΔ) είναι ένα μαθηματικό ή υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο στα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα. Αποτελείται από διασυνδεδεμένες ομάδες τεχνητών νευρώνων και επεξεργάζεται τις πληροφορίες χρησιμοποιώντας την συνδετική προσέγγιση (connectionist approach) στους υπολογισμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα ΝΔ αποτελεί ένα προσαρμόσιμο/δυναμικό σύστημα, το οποίο αλλάζει τη δομή του είτε λόγω εξωτερικών είτε λόγω εσωτερικών πληροφοριών που προκύπτουν κατά τη φάση της εκπαίδευσης.^[70]

Πρακτικά, το ΝΔ είναι ένα χρήσιμο εργαλείο όχι μόνο για την επεξεργασία πληροφοριών αλλά και για πολλές άλλες εφαρμογές. Λόγω των μοναδικών τους ιδιοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων τα οποία είτε δεν μπορούν να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους είτε το φυσικό και μαθηματικό τους μοντέλο δεν είναι γνωστά. Τα ΝΔ έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για τη μοντελοποίηση των μη γραμμικών και σύνθετων σχέσεων μεταξύ των κατασκευαστικών παραμέτρων και των δυναμικών χαρακτηριστικών του υλικού. Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό ότι τα ΝΔ είναι πολύ χρήσιμα για την επίλυση αντίστροφων προβλημάτων που σχετίζονται με τον μη καταστροφικό έλεγχο υλικών και κατασκευαστικών συστημάτων. Ως αποτέλεσμα, τα ΝΔ αποτελούν ένα τρόπο μοντελοποίησης μη γραμμικών στατιστικών δεδομένων ενώ επιλέγον αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση περίπλοκων σχέσεων μεταξύ των δεδομένων εισόδου – εξόδου.

Ορισμός:

«Παρόλο που δεν υπάρχει κάποιος καθολικά αποδεκτός ορισμός όσον αφορά τι είναι ένα ΝΔ, οι περισσότεροι θα συμφωνούσαν ότι περιλαμβάνει ένα δίκτυο από απλά επεξεργαστικά στοιχεία τους νευρώνες (neurons), οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να επιδείξουν αρκετά σύνθετη καθολική συμπεριφορά. Αυτή καθορίζεται αποκλειστικά από τις συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων και από τις παραμέτρους που τους χαρακτηρίζουν.»

5.1 Ιστορική αναδρομή

Το ανθρώπινο μυαλό αποτελεί αντικείμενο έρευνας εδώ και χιλιάδες χρόνια. Με την ανάπτυξη όμως των σύγχρονων ηλεκτρονικών ο άνθρωπος προσπάθησε να μιμηθεί τον ανθρώπινο εγκέφαλο και τις νοητικές του διεργασίες. Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη των Νευρωνικών Δικτύων έγινε το 1943 από τον νευροφυσιολόγο Warren McCulloch και τον

μαθηματικό Walter Pitts. Ο McCulloch αφιέρωσε περισσότερα από 20 χρόνια έρευνας στη μελέτη του ανθρώπινου εγκεφάλου και νευρικού συστήματος. Όταν λοιπόν συνεργάστηκε με το νεαρό Pitts έκαναν μια δημοσίευση στην οποία αρχικά παρουσίασαν ένα πιθανό σενάριο για τη λειτουργία των νευρώνων και εν συνεχεία ένα πρωταρχικό Νευρωνικό Δίκτυο (ΝΔ), το οποίο είχαν κατασκευάσει χρησιμοποιώντας απλά ηλεκτρικά κυκλώματα.

Το επόμενο μεγάλο επίτευγμα στην τεχνολογία των νευρωνικών δικτύων δεν άργησε. Μόλις, το 1949 με το βιβλίο “Η Οργάνωση της Συμπεριφοράς” (“The Organization of Behavior”) του Donald Hebb. Το βιβλίο υποστήριξε και ενίσχυσε την θεωρία των McCulloch – Pitt σχετικά με τους νευρώνες και τη λειτουργία τους. Αλλά το κύριο θέμα που έθιξε ήταν ότι οι νευρωνικοί «δρόμοι» αποκτούν δύναμη κάθε φορά που χρησιμοποιούνται. Αυτό αληθεύει και αποτελεί το κλειδί στην εκπαίδευση του δικτύου.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 η έρευνα των νευρωνικών δικτύων ουσιαστικά περνά στην αφάνεια αφού εκείνη την περίοδο οι Η/Υ αποτέλεσαν το κύριο ενδιαφέρον. Παρόλα αυτά, το 1954 ο Martin Minsky ολοκληρώνει την διδακτορική του διατριβή με τίτλο «Θεωρία Νεύρο-Αναλογικής Ενίσχυσης Συστημάτων και οι Εφαρμογές τους στο Πρόβλημα του Εγκεφαλικού Μοντέλου» («Theory of Neural-Analog Reinforcement System and its Application to the Brain-Model Problem»). Από τον ίδιο ακολούθησε και μια δημοσίευση με τίτλο «Βήματα προς την Τεχνητή Νοημοσύνη» («Steps Towards Artificial Intelligence»). Στη συγκεκριμένη δημοσίευση γίνεται πρώτη φορά αναλυτική αναφορά στην τεχνητή νοημοσύνη και στα νευρωνικά δίκτυα όπως αυτά είναι γνωστά σήμερα. Ως «επίσημη» χρονολογία έναρξης της έρευνας των νευρωνικών δικτύων όμως θεωρείται το 1959 όταν το Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence ξεκίνησε επίσημα την ερευνα στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Αρκετά χρόνια αργότερα, ο John von Neumann προσπάθησε να μιμηθεί τις υπεραπλουστευμένες λειτουργίες των νευρώνων χρησιμοποιώντας αναμεταδόσεις του

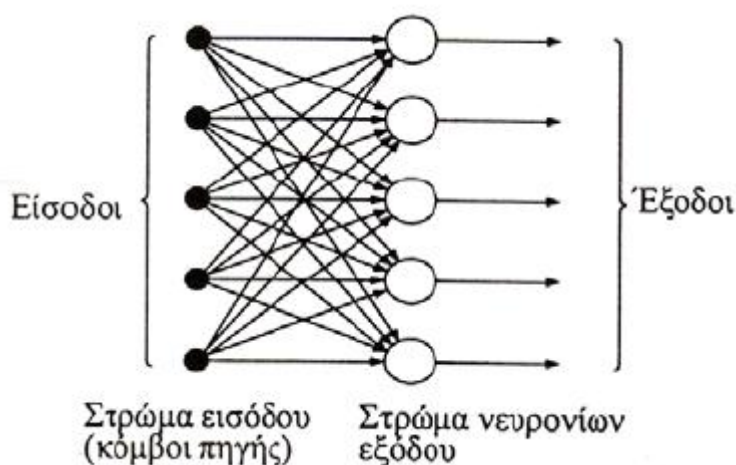
τηλεγράφου ή σωλήνες κενού. Αυτή η προσπάθεια οδήγησε στην εφεύρεση της μηχανής του von Neumann Δεκαπέντε χρόνια μετά την πρωτοποριακή δημοσίευση των McCulloch και Pitts, παρουσιάζεται μια προσέγγιση της περιοχής των νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα το 1958, ο Frank Rosenblatt, ένας νευρο-βιολόγος στο Cornell University, ξεκίνησε να ερευνά στο Perceptron. Το perceptron είναι ουσιαστικά το πρώτο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τον κάπως πρωτόγονο εξοπλισμό εκείνης της εποχής. Το perceptron βασίζεται στην έρευνα που έγινε πάνω στο μάτι της μύγας. Η διεργασία η οποία «λέει» στη μύγα να πετάξει όταν υπάρχει κίνδυνος εκτελείται στο μάτι. Το μειονέκτημα του perceptron είναι ότι έχει περιορισμένες δυνατότητες κάτι που αποδεικνύεται στο βιβλίο με τίτλο «Perceptrons» των Marvin Minsky και Seymour Papert που εκδόθηκε το 1969.

5.2 Τύποι νευρωνικών δικτύων

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι νευρωνικών δικτύων είναι:

5.2.1 Νευρωνικά δίκτυα Προσοτροφοδότησης

Στην απλούστερη περίπτωση ένα πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο έχει ένα επίπεδο εισόδου από «κόμβους πηγής» (source nodes) το οποίο προβάλλεται πάνω σε ένα επίπεδο νευρώνων εξόδου (κόμβων υπολογισμού) αλλά όχι αντίστροφα. Ένα τέτοιο ΝΔ είναι αυστηρά του τύπου «προσοτροφοδότηση» (feed forward) και καλείται «νευρωνικό δίκτυο προσοτροφοδότησης ενός επιπέδου». Το μοναδικό επίπεδο του ΝΔ αποτελεί το επίπεδο των νευρώνων (υπολογιστικών κόμβων) εξόδου πράγμα που σημαίνει ότι το επίπεδο των κόμβων πηγής (εισόδου) δεν προσμετρείται γιατί δεν λαμβάνει χώρα κανένας υπολογισμός σε αυτό.



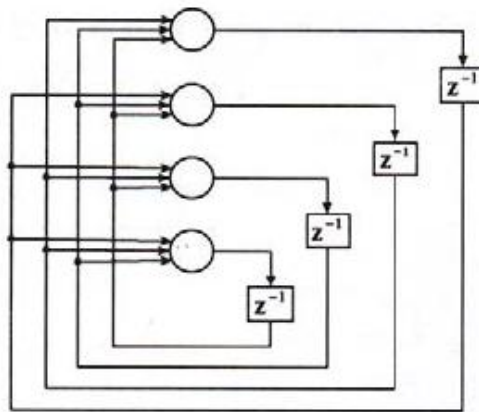
Εικόνα 5.1: ΝΔ προσοτροφοδότησης ενός επιπέδου με πέντε νευρώνες εξόδου

Ένα τυπικό παράδειγμα ΝΔ προσοτροφοδότησης ενός επιπέδου είναι η γραμμική συσχετιστική μνήμη η οποία αντιστοιχεί (συσχετίζει) σε ένα διάνυσμα (πρότυπο) εξόδου με ένα διάνυσμα (πρότυπο) εισόδου και αποθηκεύει την πληροφορία ως αλλαγές στα συνοπτικά βάρη. Στη γενική περίπτωση, ένα ΝΔ προσοτροφοδότησης περιέχει ένα ή περισσότερα «κρυφά» (ενδιάμεσα, hidden) επίπεδα, των οποίων οι υπολογιστικοί κόμβοι είναι γνωστοί ως «κρυφοί νευρώνες» ή «κρυφές μονάδες» και παρεμβαίνουν μεταξύ των εξωτερικών εισόδων και των εξόδων του ΝΔ. Στα δίκτυα αυτά που ονομάζονται «πολυεπίπεδα ΝΔ προσοτροφοδότησης», οι κόμβοι πηγής στο επίπεδο εισόδου παρέχουν τα στοιχεία του διανύσματος (πρότυπου) δράσης (εισόδου) τα οποία εισέρχονται ως είσοδοι στο πρώτο κρυφό επίπεδο υπολογιστικών κόμβων. Ομοίως, οι εξοδοί των κόμβων του πρώτου κρυφού επιπέδου εισέρχονται ως είσοδοι στους κόμβους του δεύτερου κρυφού επιπέδου, κ.ο.κ. Το τελικό επίπεδο κόμβων (επίπεδο εξόδου) δίνει τη (/τις) συνολική (-ές) απόκριση (-σεις) στα διανύσματα εισόδου (δηλαδή στα πρότυπα εξωτερικής δράσης). ^[71]

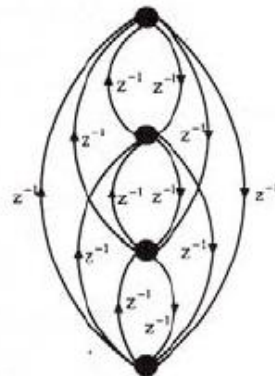
5.2.2 Αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (ΝΔ ανατροφοδότησης)

Εάν το ΝΔ περιέχει τουλάχιστο ένα βρόχο ανατροφοδότησης ο οποίος ανακυκλώνει την πληροφορία μέσω του ίδιου ή προηγούμενων επιπέδων και για αυτό το λόγο ονομάζεται «αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο» (recurrent Neural Network) ή ΝΔ ανατροφοδότησης. Το αποτέλεσμα της ανατροφοδότησης είναι ότι όταν ένα διάνυσμα (πρότυπο) εισόδου εισέρχεται στο αναδρομικό ΝΔ δεν παράγει ένα πρότυπο εξόδου σε πεπερασμένο αριθμό χρονικών βημάτων αλλά ενεργεί με κυκλικό τρόπο όπου τα ίδια επίπεδα ενεργοποιούνται επαναληπτικά. Εάν το ΝΔ είναι αφ' εαυτού ευσταθές πιθανά να ταλαντωθεί για κάποιο χρονικό διάστημα προτού φθάσει σε μια σταθερή κατάσταση στην οποία οι νευρωνικές ενεργοποιήσεις θα σταματήσουν να αλλάζουν με αποτέλεσμα να παραχθεί μια σταθερή έξοδος. Διαφορετικά εάν το ΝΔ δεν είναι ευσταθές, οι ταλαντώσεις θα συνεχίσουν αδιάκοπα. Συνεπώς όταν εκπαιδεύουμε ένα αναδρομικό ΝΔ είναι σημαντικό να βρεθεί το σύνολο των συναπτικών βαρών που του επιτρέπουν να σταθεροποιηθεί στις επιθυμητές τιμές εξόδου.^[72]

Ένα παράδειγμα αναδρομικού ΝΔ ενός επιπέδου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο δεν περιέχει αυτοβρόχους (ανατροφοδοτήσεις από κάποιον κόμβο στον εαυτό του). Οι βρόχοι ανατροφοδότησης κλείνουν μέσω μοναδιαίων καθυστερήσεων οι οποίες συμβολίζονται με z^{-1} όπου $z^{-1}y(k) = y(k-1)$ και k παριστά διακριτό χρόνο. Το z^{-1} ονομάζεται στη θεωρία συστημάτων τελεστής μοναδιαίας καθυστέρησης.



(α) Σύνθετο διάγραμμα

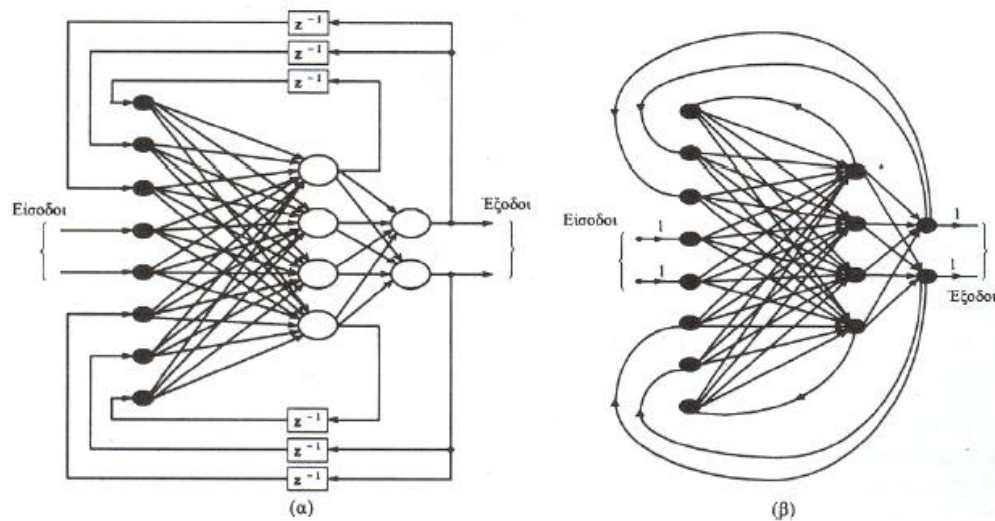


(β) Παράσταση με σηματογράφημα

Εικόνα 5.2: ΝΔ χωρίς ενός επιπέδου αυτοβρόχους

Το ΝΔ δίκτυο του σχήματος είναι μια περίπτωση των καλούμενων ΝΔ Hopfield. Ένα άλλο παράδειγμα αναδρομικού ΝΔ μπορεί να ληφθεί από το ΝΔ προστροφοδότησης 8-4-2 του σχήματος αν κλείσουν μερικοί βρόχοι όπως δείχνει το Σχήμα. Οι συνδέσεις ανατροφοδότησης μπορούν να ξεκινούν τόσο από τους κρυφούς κόμβους όσο και από τους κόμβους εξόδου.

Σημειώνεται ότι οι βρόχοι ανατροφοδότησης έχουν μια ευεργετική επίδραση πάνω στη μάθηση και τη συνολική συμπεριφορά του ΝΔ.



Εικόνα 5.3: Αναδρομικό ΝΔ ενός κρυφού επιπέδου,
(α) Κλασσική παράσταση, (β) Παράσταση με σηματογράφημα

5.3 Μάθηση των νευρωνικών δικτύων

Η μάθηση είναι μια θεμελιακή ικανότητα των ΝΔ που τους επιτρέπει να μαθαίνουν από το περιβάλλον τους και να βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους με το πέρασμα του χρόνου. Η μάθηση είναι μια γενική έννοια της επιστήμης των συστημάτων και ορίζεται με ποικίλους τρόπους ανάλογα με το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής. Στα ΝΔ, η μάθηση αναφέρεται στη διεργασία επίτευξης μιας επιθυμητής συμπεριφοράς μέσω ανανέωσης της τιμής των συναπτικών βαρών. Έτσι, ένα ΝΔ μαθαίνει για το περιβάλλον του μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας ανανέωσης (αλλαγής) των συνοπτικών βαρών και κατωφλίων.

Ο αλγόριθμος μάθησης ή εκπαίδευσης είναι κάθε προκαθορισμένο σύνολο καλά ορισμένων κανόνων επίλυσης του προβλήματος μάθησης (ή εκπαίδευσης) του ΝΔ. Γενικά, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι μάθησης στα ΝΔ, καθένας από τους οποίους έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κάθε αλγόριθμος μάθησης προσφέρει έναν άλλο τρόπο προσαρμογής (επιλογής/ανανέωσης) των συναπτικών βαρών. Ένα άλλο θέμα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ενός ΝΔ είναι το περιβάλλον στο οποίο εργάζεται το ΝΔ. Έτσι, διαφορετικά μοντέλα του περιβάλλοντος έχουν ως αποτέλεσμα την επιλογή διαφορετικών αλγορίθμων μάθησης.^[72]

Οι αλγόριθμοι μάθησης χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

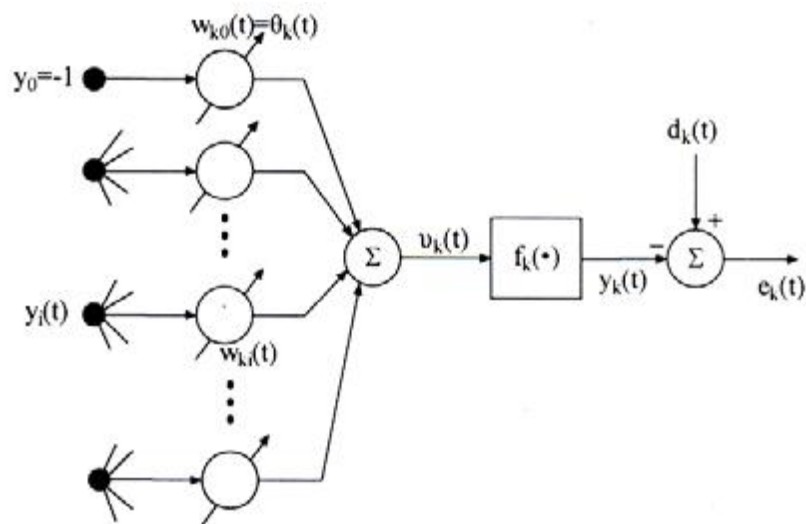
- Επιβλεπόμενη (ενεργή) μάθηση
- Μη επιβλεπόμενη (αυτο-οργανούμενη) μάθηση
- Ενισχυτική μάθηση

Οι τέσσερις βασικοί τρόποι (κανόνες) νευρωνικής μάθησης είναι οι ακόλουθοι:

- Μάθηση διόρθωσης σφάλματος
- Μάθηση Hebb
- Ανταγωνιστική μάθηση
- Μάθηση Boltzmann

5.4 Αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης

Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης (BP) είναι επέκταση του κανόνα δέλτα που χρησιμοποιείται στο απλό perceptron ή το ΝΔ δηλαδή είναι αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης που ανανεώνει τα συναπτικά βάρη έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των επιθυμητών και πραγματικών αποκρίσεων μετά από την παρουσίαση κάθε προτύπου (διανύσματος) στην είσοδο του ΝΔ. Η επέκταση συνίσταται στη χρήση της πραγματικής εξόδου κάθε νευρώνα μετά την εφαρμογή της συνάρτησης ενεργοποίησης που είναι συνεχής. Έτσι τα σφάλματα διαδίδονται μέσω των κρυφών επιπέδων προς υπολογισμό των διορθώσεων των βαρών με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που γίνεται στο επίπεδο εξόδου. Συνεπώς, τα συναπτικά βάρη ανανεώνονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κριτήριο E_p όπου η άθροιση εκτείνεται σε όλους του νευρώνες k του επιπέδου εξόδου μετά την παρουσίαση κάθε προτύπου εκπαίδευσης p στην είσοδο. Τούτο σημαίνει ότι η ελαχιστοποίηση του $() p E t$ πρέπει να γίνει διαδοχικά «πρότυπο - με - πρότυπο». Ο k νευρώνας του επιπέδου εξόδου έχει τη μορφή του σχήματος. ^[70]



Εικόνα 5.4: Δομή του k νευρώνα εξόδου

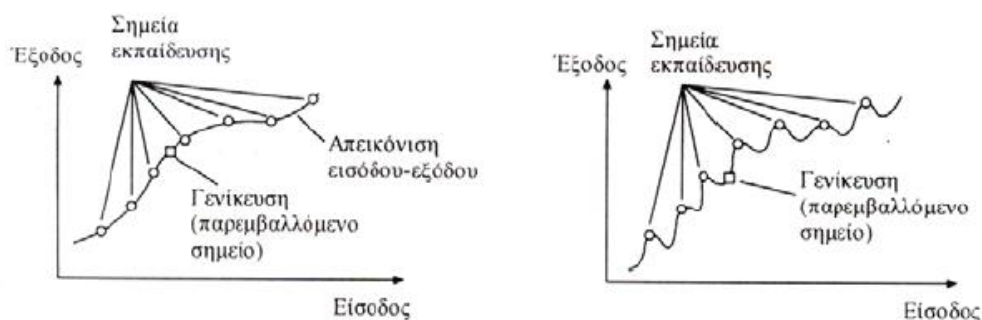
5.5 Γενίκευση

Γενίκευση (generalization) είναι η ικανότητα ενός ΝΔ να ταξινομεί πρότυπα τα οποία δεν γνώρισε ποτέ. Η γενίκευση είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των ΝΔ. Υποτίθεται βεβαία ότι οι προς ταξινόμηση είσοδοι (πρότυπα) λαμβάνονται από τον ίδιο πληθυσμό

προτύπων ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του δικτύου. Η γενίκευση επιτυγχάνεται ανιχνεύοντας ιδιότητες του προτύπου εισόδου που είναι σημαντικές και έχουν εμφυτευθεί (κωδικοποιηθεί) στους εσωτερικούς κόμβους. Ένα γνωστό πρότυπο ταξινομείται τότε μαζί με τα άλλα πρότυπα που έχουν τις ίδιες χαρακτηριστικές ιδιότητες. Έτσι, μάθηση μέσω παραδειγμάτων είναι μια καλή μέθοδος εκπαίδευσης του ΝΔ. Το ΝΔ έχει επίσης την ικανότητα να διακρίνει και να ταξινομεί (σχετικά καλά) ελλειπή, παραμορφωμένα και διαταραχθέντα με θόρυβο πρότυπα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα ΝΔ μπορεί να προβεί καλύτερα σε παρεμβολή δεδομένων εισόδου (interpolation) παρά σε πρόβλεψη (επέκταση, extrapolation/ prediction) γιατί μπορεί να ανιχνεύσει καλά ενδιάμεσες καταστάσεις παρά καταστάσεις που βρίσκονται έξω από την περιοχή στην οποία έχει εκπαιδευθεί. Αυτό γίνεται πιο κατανοητό εάν θεωρηθεί η διαδικασία εκπαίδευσης του ΝΔ ως μια διαδικασία «προσαρμογής-καμπύλης» (curve fitting). Το ΝΔ εκπαιδεύεται με ένα δεδομένο σύνολο ζευγών εισόδου - εξόδου και καλείται να ανιχνεύσει ενδιάμεσα σημεία με παρεμβολή.

Εάν το δίκτυο έχει εκπαιδευθεί κατάλληλα, τότε είναι ικανό να δώσει ένα σωστό σημείο (ζεύγος τιμών εισόδου-εξόδου) έστω και αν είναι ελαφρά διαφορετικό από τα παραδείγματα με τα οποία εκπαιδεύτηκε. Εάν όμως το δίκτυο έχει «υπερεκπαιδευτεί» (με υπερβολικά μεγάλο αριθμό σημείων / ζευγών εισόδου - εξόδου) τότε συνήθως η ικανότητα του να γενικεύει σωστά μειώνεται. Η γενίκευση ενός ΝΔ επηρεάζεται από τα ακόλουθα:

- α. Το μέγεθος και την καταλληλότητα του συνόλου εκπαίδευσης.
- β. Την αρχιτεκτονική του δικτύου.
- γ. Την πολυπλοκότητα του θεωρούμενου προβλήματος.



Εικόνα 5.5: Γραφική παράσταση της νευρωνικής γενίκευσης

- (α) Καλή γενίκευση(κατάλληλα προσαρμοσμένα δεδομένα),
- (β) Μη καλή γενίκευση (υπέρ-προσαρμοσμένα δεδομένα)

Στην πράξη γίνεται προσπάθεια για τη βελτίωση της ποιότητας της γενίκευσης επιλέγοντας το πιο κατάλληλο σύνολο εκπαίδευσης. Η καλύτερη μορφή του δικτύου επιλέγεται συνήθως με προσεκτική μελέτη του υπό εξέταση προβλήματος.

5.6 Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων στα αντίστροφα προβλήματα

Τα ΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση πολλών προβλημάτων τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με αναλυτικές μεθόδους, αποτελώντας έτσι μια πολύ καλή προσέγγιση για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Όπως ανέφερε και ο Bishop το 1994, τα ΝΔ πρέπει να χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων τα οποία έχουν ένα ή και περισσότερα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- (i) υπάρχει μεγάλο πλήθος δεδομένων για την εκπαίδευση του δικτύου.
- (ii) είναι δύσκολο να βρεθεί μια απλή πρωταρχική ή βασισμένη σε μοντέλο λύση η οποία να είναι επαρκής.
- (iii) νέα δεδομένα πρέπει να υποστούν επεξεργασία, είτε γιατί υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων που πρέπει να αναλυθούν, είτε επειδή υπάρχει ένας περιορισμός πραγματικού χρόνου.
- (iv) η μέθοδος επεξεργασίας των δεδομένων πρέπει να είναι ικανή να αντιμετωπίσει μέτρια επίπεδα θορύβου στα δεδομένα εισόδου.

Ένα καλά ορισμένο ευθύ πρόβλημα συνήθως έχει μια σταθερή λύση, αντίθετα τα αντίστροφα προβλήματα πολλές φορές οδηγούν σε μη σταθερές λύσεις όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα με θόρυβο. Αρχικά, είναι δύσκολο να γίνει αντίστροφη ανάλυση πραγματικού χρόνου λόγω της μεγάλης απαίτησης σε υπολογιστικό χρόνο όταν χρησιμοποιούνται οι κλασικές υπολογιστικές μέθοδοι για την επίλυση. Επίσης, κατάλληλες τεχνικές είναι αναγκαίες για την εξασφάλιση σταθερών λύσεων στα αντίστροφα προβλήματα. Τα ΝΔ προσφέρουν τα πλεονεκτήματα ενός υπεραποδοτικής αντίστροφης λύσης η οποία τις περισσότερες φορές δεν απαιτεί ακριβούς ευθύ λύτη πραγματικού χρόνου (forward solver online). Επιπλέον, το ΝΔ δεν επηρεάζεται εύκολα από τον κακό ορισμό (ill-posedness) των αντίστροφων προβλημάτων διότι η μερική διαφορική εξίσωση (PDE, Partial Differential Equation) δεν χρησιμοποιείται στην αντίστροφη διαδικασία.

Στη δικιά μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα νευρωνικό δίκτυο με τα εξής χαρακτηριστικά προκειμένου να επιτευχθεί η αντίστροφη διαδικασία δηλαδή από τις φορτίσεις λόγω των βλαβών να επαληθεύσουμε τις αρχικές φορτίσεις:

epoches	5000
Goal	0.1
mc	0.99

Στο νευρωνικό περάστηκαν οι τέσσερις πρώτες στήλες του παρακάτω πίνακα όπου η στήλη x και y αποτελούν τη θέση του κάθε κόμβου του κάνναβου βάσει αξόνων ενώ οι άλλες δύο στήλες περιγράφουν τη βλάβη όσον αφορά τη θέση και το σημείο που βρίσκεται καθώς και το μέγεθος της:

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
1	0	2,249863606	0.383699999	0.1
1	0	1,863353819	0.394944606	0.2
1	0	1,599078075	0.402468299	0.3
1	0	1,405178545	0.407885102	0.4
1	0	1,255960772	0.411984909	0.5
1	0	1,137103503	0.415202538	0.6
1	0	1,039928600	0.417798306	0.7
1	0	0.958838961	0.419938185	0.8
1	0	0.890046061	0.421733303	0.9
2	0	0.267926801	0.342170472	0.1
2	0	0.437769553	0.367073975	0.2
2	0	0.548818799	0.382911694	0.3
2	0	0.626675765	0.393900854	0.4
2	0	0.683993269	0.401988493	0.5
2	0	0.727744985	0.40819939	0.6
2	0	0.762088443	0.413124997	0.7
2	0	0.789654169	0.417130928	0.8
2	0	0.812186142	0.420455556	0.9
3	0	0.603894792	0.268646685	0.1
3	0	0.676394968	0.319893597	0.2
3	0	0.72151922	0.35105233	0.3
3	0	0.752253079	0.371895241	0.4
3	0	0.774497655	0.386755112	0.5
3	0	0.79132019	0.397844455	0.6
3	0	0.804472109	0.406409554	0.7
3	0	0.815025781	0.413205143	0.8
3	0	0.823674223	0.418714487	0.9
4	0	0.748668109	0.142677017	0.1
4	0	0.774807232	0.240337805	0.2
4	0	0.790995348	0.298329473	0.3
4	0	0.802038821	0.336243101	0.4
4	0	0.810073383	0.362642042	0.5
4	0	0.816193762	0.381857654	0.6
4	0	0.821019521	0.396312232	0.7
4	0	0.824927883	0.407463808	0.8
4	0	0.828161824	0.41624076	0.9
5	0	0.800543256	1.883.517.485	0.1
5	0	0.810145939	1.400.453.929	0.2
5	0	0.816087235	1.107.676.235	0.3
5	0	0.820148323	0.911634362	0.4
5	0	0.823113135	0.77145557	0.5
5	0	0.825381215	0.66643567	0.6
5	0	0.82717791	0.584963362	0.7
5	0	0.828640158	0.52002231	0.8
5	0	0.829856076	0.467123295	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
6	0	0.820184654	0.165555893	0.1
6	0	0.823565139	0.254052412	0.2
6	0	0.825652673	0.306815295	0.3
6	0	0.827080533	0.341529082	0.4
6	0	0.82812503	0.365889063	0.5
6	0	0.82892625	0.383780028	0.6
6	0	0.829562938	0.397373136	0.7
6	0	0.830082842	0.407975436	0.8
6	0	0.830516649	0.416419748	0.9
7	0	0.827685761	0.322258527	0.1
7	0	0.828695626	0.356605285	0.2
7	0	0.829316811	0.37703223	0.3
7	0	0.829741763	0.390521347	0.4
7	0	0.830053311	0.400059726	0.5
7	0	0.8302931	0.407138876	0.6
7	0	0.830484413	0.412586088	0.7
7	0	0.830641317	0.416896753	0.8
7	0	0.830772829	0.420385373	0.9
8	0	0.830335585	0.389226539	0.1
8	0	0.830503884	0.400832246	0.2
8	0	0.830608305	0.407647655	0.3
8	0	0.830680717	0.412141053	0.4
8	0	0.830734647	0.415330642	0.5
8	0	0.83077685	0.417714264	0.6
8	0	0.830811089	0.419564507	0.7
8	0	0.830839637	0.421043276	0.8
8	0	0.830863952	0.42225285	0.9
9	0	0.831031773	0.413394497	0.1
9	0	0.830972332	0.416940041	0.2
9	0	0.830941882	0.41891696	0.3
9	0	0.830923501	0.420188378	0.4
9	0	0.830911315	0.421078495	0.5
9	0	0.830902732	0.421738206	0.6
9	0	0.830896427	0.422247687	0.7
9	0	0.830891649	0.42265361	0.8
9	0	0.830887942	0.422985039	0.9
10	0	0.8309587	0.42212889	0.1
10	0	0.830933776	0.42251073	0.2
10	0	0.830918959	0.422738035	0.3
10	0	0.830909152	0.422888681	0.4
10	0	0.83090219	0.42299577	0.5
10	0	0.830896998	0.42307576	0.6
10	0	0.830892981	0.423137752	0.7
10	0	0.830889782	0.423187188	0.8
10	0	0.830887176	0.423227519	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
11	1	0.932825781	0.421444603	0.1
11	1	0.916324694	0.421720676	0.2
11	1	0.901621691	0.421973776	0.3
11	1	0.88843166	0.422205916	0.4
11	1	0.876527027	0.422419102	0.5
11	1	0.865723914	0.422615225	0.6
11	1	0.855872113	0.42279601	0.7
11	1	0.846847703	0.422963012	0.8
11	1	0.838547528	0.423117612	0.9
12	1	0.956718065	0.434118803	0.1
12	1	0.933740493	0.431621509	0.2
12	1	0.914214852	0.42969809	0.3
12	1	0.897400949	0.428177422	0.4
12	1	0.882760217	0.426949522	0.5
12	1	0.869890141	0.4259406	0.6
12	1	0.858483184	0.425099385	0.7
12	1	0.848299969	0.424389195	0.8
12	1	0.839151183	0.42378313	0.9
13	1	0.827724192	0.457430089	0.1
13	1	0.829091206	0.450649074	0.2
13	1	0.829906154	0.445093184	0.3
13	1	0.83039303	0.440450765	0.4
13	1	0.830677964	0.436509963	0.5
13	1	0.830835358	0.433120942	0.6
13	1	0.830910751	0.430174347	0.7
13	1	0.830932854	0.427588288	0.8
13	1	0.830920207	0.425300121	0.9
14	1	0.810876113	0.472646969	0.1
14	1	0.815196254	0.465218763	0.2
14	1	0.818583846	0.458249525	0.3
14	1	0.821321559	0.451823234	0.4
14	1	0.823586524	0.4459398	0.5
14	1	0.825495751	0.440565737	0.6
14	1	0.82712987	0.435656141	0.7
14	1	0.828546391	0.431164353	0.8
14	1	0.829787525	0.427046093	0.9
15	1	0.81788212	0.412471856	0.1
15	1	0.820618525	0.414693647	0.2
15	1	0.822791313	0.416488685	0.3
15	1	0.824565224	0.417968195	0.4
15	1	0.826045014	0.419208111	0.5
15	1	0.82730085	0.420262011	0.6
15	1	0.828381708	0.421168738	0.7
15	1	0.829322928	0.421957114	0.8
15	1	0.830150729	0.422648948	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
16	1	0.824162353	0.507398389	0.1
16	1	0.825570009	0.490953881	0.2
16	1	0.826690552	0.477426348	0.3
16	1	0.827607235	0.466065765	0.4
16	1	0.828373155	0.456368793	0.5
16	1	0.829023984	0.447982081	0.6
16	1	0.829584692	0.440648738	0.7
16	1	0.830073346	0.434176694	0.8
16	1	0.83050338	0.428419	0.9
17	1	0.827811282	0.428629539	0.1
17	1	0.828457175	0.428004426	0.2
17	1	0.828970431	0.427314463	0.3
17	1	0.829389744	0.426623642	0.4
17	1	0.829739715	0.425960426	0.5
17	1	0.830036826	0.425336576	0.6
17	1	0.830292597	0.424755775	0.7
17	1	0.830515346	0.424217776	0.8
17	1	0.830711252	0.423720489	0.9
18	1	0.829660298	0.414298169	0.1
18	1	0.829921499	0.416391439	0.2
18	1	0.830127569	0.41797335	0.3
18	1	0.830294956	0.419212548	0.4
18	1	0.830434008	0.420210837	0.5
18	1	0.830551598	0.421033264	0.6
18	1	0.830652491	0.42172332	0.7
18	1	0.83074011	0.422311188	0.8
18	1	0.83081698	0.42281847	0.9
19	1	0.830511622	0.416400628	0.1
19	1	0.830596076	0.418033756	0.2
19	1	0.830660817	0.419256018	0.3
19	1	0.830712198	0.420206202	0.4
19	1	0.830754072	0.420966838	0.5
19	1	0.83078892	0.421590077	0.6
19	1	0.830818415	0.42211049	0.7
19	1	0.830843733	0.422551906	0.8
19	1	0.830865722	0.422931287	0.9
20	1	0.830713889	0.424004283	0.1
20	1	0.830777784	0.423388872	0.2
20	1	0.83081159	0.423213205	0.3
20	1	0.830832927	0.423164319	0.4
20	1	0.830847817	0.423160275	0.5
20	1	0.830858902	0.423173644	0.6
20	1	0.830867531	0.4231938	0.7
20	1	0.830874472	0.42321624	0.8
20	1	0.830880197	0.423238955	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
21	2	0.874268038	0.430421655	0.1
21	2	0.867420075	0.429256957	0.2
21	2	0.861268279	0.428220638	0.3
21	2	0.855706412	0.427292204	0.4
21	2	0.850649148	0.426455379	0.5
21	2	0.846027115	0.425697057	0.6
21	2	0.841783301	0.425006555	0.7
21	2	0.837870389	0.424375071	0.8
21	2	0.834248769	0.423795281	0.9
22	2	0.880566785	0.436647624	0.1
22	2	0.871243965	0.43424282	0.2
22	2	0.8634268	0.432185146	0.3
22	2	0.856763099	0.430402823	0.4
22	2	0.851006032	0.42884308	0.5
22	2	0.845976529	0.427466096	0.6
22	2	0.841540988	0.426241168	0.7
22	2	0.837597405	0.425144202	0.8
22	2	0.834066367	0.424155995	0.9
23	2	0.864784816	0.430968903	0.1
23	2	0.858529481	0.43019994	0.2
23	2	0.853240142	0.42929561	0.3
23	2	0.848702648	0.42834754	0.4
23	2	0.844763498	0.427403271	0.5
23	2	0.841309252	0.4264873	0.6
23	2	0.838253983	0.425611667	0.7
23	2	0.835531263	0.424781537	0.8
23	2	0.833088844	0.42399825	0.9
24	2	0.834127811	0.414805003	0.1
24	2	0.833890024	0.417124892	0.2
24	2	0.833540907	0.418788142	0.3
24	2	0.833144911	0.420014177	0.4
24	2	0.832735757	0.420938195	0.5
24	2	0.832331249	0.42164728	0.6
24	2	0.831940623	0.422199584	0.7
24	2	0.831568387	0.422635124	0.8
24	2	0.831216396	0.422982149	0.9
25	2	0.825628611	0.431046339	0.1
25	2	0.826929175	0.429835806	0.2
25	2	0.827893831	0.428729722	0.3
25	2	0.828633094	0.427722245	0.4
25	2	0.829214847	0.42680461	0.5
25	2	0.829682816	0.425967534	0.6
25	2	0.830066287	0.425202195	0.7
25	2	0.830385521	0.42450059	0.8
25	2	0.830654931	0.423855616	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
26	2	0.825806519	0.443369694	0.1
26	2	0.826958566	0.439206502	0.2
26	2	0.827845083	0.435870402	0.3
26	2	0.828548273	0.433128991	0.4
26	2	0.829119703	0.430831244	0.5
26	2	0.82959331	0.42887433	0.6
26	2	0.829992323	0.42718556	0.7
26	2	0.830333165	0.425711948	0.8
26	2	0.830627769	0.424413869	0.9
27	2	0.827570286	0.44509675	0.1
27	2	0.828305517	0.440714289	0.2
27	2	0.828876862	0.437151838	0.3
27	2	0.829334065	0.43418978	0.4
27	2	0.82970854	0.431682598	0.5
27	2	0.830021106	0.42952949	0.6
27	2	0.830286109	0.427658108	0.7
27	2	0.830513762	0.426015002	0.8
27	2	0.830711532	0.424559725	0.9
28	2	0.829097788	0.424016685	0.1
28	2	0.829495283	0.424035457	0.2
28	2	0.829803735	0.423985637	0.3
28	2	0.830050303	0.423900562	0.4
28	2	0.830252087	0.423798254	0.5
28	2	0.830420396	0.423688747	0.6
28	2	0.83056301	0.423577719	0.7
28	2	0.830685459	0.423468381	0.8
28	2	0.830791785	0.42336251	0.9
29	2	0.830138858	0.418837617	0.1
29	2	0.830316083	0.419979186	0.2
29	2	0.830449191	0.420806143	0.3
29	2	0.830552801	0.421428469	0.4
29	2	0.830635736	0.421911168	0.5
29	2	0.83070363	0.422294885	0.6
29	2	0.830760246	0.422606206	0.7
29	2	0.83080819	0.422863174	0.8
29	2	0.830849324	0.423078425	0.9
30	2	0.830686554	0.428216925	0.1
30	2	0.830745808	0.426378777	0.2
30	2	0.830784455	0.425384621	0.3
30	2	0.830811594	0.424757847	0.4
30	2	0.830831699	0.424323488	0.5
30	2	0.830847203	0.424002832	0.6
30	2	0.830859534	0.423755282	0.7
30	2	0.830869586	0.42355774	0.8
30	2	0.830877945	0.423396054	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
31	3	0.853803427	0.42765795	0.1
31	3	0.85017785	0.42697473	0.2
31	3	0.846927223	0.426355893	0.3
31	3	0.843991794	0.425792951	0.4
31	3	0.841324152	0.425278824	0.5
31	3	0.838886153	0.424807564	0.6
31	3	0.836646738	0.42437414	0.7
31	3	0.834580339	0.423974269	0.8
31	3	0.832665704	0.423604287	0.9
32	3	0.861532878	0.424980065	0.1
32	3	0.855588623	0.424915016	0.2
32	3	0.850676593	0.424766735	0.3
32	3	0.846539845	0.42457372	0.4
32	3	0.843002166	0.424358305	0.5
32	3	0.839938186	0.42413372	0.6
32	3	0.837255993	0.423907881	0.7
32	3	0.834886499	0.423685514	0.8
32	3	0.83277666	0.423469384	0.9
33	3	0.855563309	0.417888904	0.1
33	3	0.850679213	0.419358199	0.2
33	3	0.846680587	0.420415077	0.3
33	3	0.843338039	0.421195637	0.4
33	3	0.840497069	0.421784424	0.5
33	3	0.83804929	0.42223624	0.6
33	3	0.835916134	0.422587862	0.7
33	3	0.834039091	0.422864701	0.8
33	3	0.832373587	0.423084754	0.9
34	3	0.843291429	0.415752995	0.1
34	3	0.840926475	0.417623592	0.2
34	3	0.838956332	0.419016321	0.3
34	3	0.837286206	0.42008309	0.4
34	3	0.835850315	0.42091922	0.5
34	3	0.834601306	0.421587213	0.6
34	3	0.83350408	0.422129555	0.7
34	3	0.832531988	0.422576001	0.8
34	3	0.831664387	0.422947929	0.9
35	3	0.833033489	0.423467928	0.1
35	3	0.832737134	0.423523591	0.2
35	3	0.83244572	0.423535815	0.3
35	3	0.832168982	0.42352183	0.4
35	3	0.831910533	0.42349193	0.5
35	3	0.831671109	0.423452473	0.6
35	3	0.831450115	0.423407483	0.7
35	3	0.831246367	0.423359554	0.8
35	3	0.831058473	0.423310372	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
36	3	0.829329403	0.43577319	0.1
36	3	0.829741347	0.433150679	0.2
36	3	0.830039144	0.431059941	0.3
36	3	0.830261336	0.42934991	0.4
36	3	0.830431445	0.427922602	0.5
36	3	0.830564509	0.426711496	0.6
36	3	0.830670506	0.425669735	0.7
36	3	0.830756272	0.424763295	0.8
36	3	0.83082662	0.423966828	0.9
37	3	0.828864179	0.437387059	0.1
37	3	0.829334587	0.434389675	0.2
37	3	0.829692927	0.432011721	0.3
37	3	0.829974373	0.430075537	0.4
37	3	0.830200922	0.428466214	0.5
37	3	0.830386997	0.427105955	0.6
37	3	0.830542426	0.425940108	0.7
37	3	0.830674123	0.424929096	0.8
37	3	0.830787085	0.424043515	0.9
38	3	0.829456974	0.431269555	0.1
38	3	0.829786113	0.429590543	0.2
38	3	0.830037706	0.428251627	0.3
38	3	0.830236055	0.427156447	0.4
38	3	0.830396329	0.426242462	0.5
38	3	0.830528468	0.425467166	0.6
38	3	0.83063925	0.424800574	0.7
38	3	0.830733447	0.424220883	0.8
38	3	0.830814514	0.423711836	0.9
39	3	0.830198816	0.425071709	0.1
39	3	0.830366747	0.424747473	0.2
39	3	0.830491295	0.424468116	0.3
39	3	0.830587086	0.424225682	0.4
39	3	0.830662904	0.42401369	0.5
39	3	0.830724325	0.423826955	0.6
39	3	0.830775046	0.423661335	0.7
39	3	0.830817613	0.423513512	0.8
39	3	0.830853831	0.423380807	0.9
40	3	0.830811405	0.429926758	0.1
40	3	0.83083198	0.427773304	0.2
40	3	0.830846929	0.426474132	0.3
40	3	0.830857671	0.425593823	0.4
40	3	0.830865558	0.424952183	0.5
40	3	0.830871501	0.424460637	0.6
40	3	0.83087609	0.424070275	0.7
40	3	0.830879712	0.423751723	0.8
40	3	0.830882627	0.423486189	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
41	4	0.845081161	0.422937839	0.1
41	4	0.842820147	0.42301499	0.2
41	4	0.840800367	0.423074836	0.3
41	4	0.838981377	0.423121725	0.4
41	4	0.837331474	0.423158815	0.5
41	4	0.83582544	0.42318843	0.6
41	4	0.834442952	0.423212302	0.7
41	4	0.833167438	0.423231737	0.8
41	4	0.831985244	0.423247729	0.9
42	4	0.851457653	0.419655121	0.1
42	4	0.847297764	0.420519022	0.2
42	4	0.843920019	0.421175648	0.3
42	4	0.841118548	0.421687031	0.4
42	4	0.838754669	0.422093384	0.5
42	4	0.836731375	0.42242178	0.6
42	4	0.83497867	0.422691025	0.7
42	4	0.833444714	0.422914539	0.8
42	4	0.832090259	0.423102113	0.9
43	4	0.850024652	0.416453916	0.1
43	4	0.846036864	0.418032091	0.2
43	4	0.842844746	0.419241591	0.3
43	4	0.840227253	0.420194222	0.4
43	4	0.838039165	0.420961368	0.5
43	4	0.836180927	0.421590609	0.6
43	4	0.834581888	0.422114798	0.7
43	4	0.833190445	0.4225573	0.8
43	4	0.831967985	0.422935149	0.9
44	4	0.844063743	0.417237006	0.1
44	4	0.841318256	0.418612424	0.2
44	4	0.839120926	0.419672342	0.3
44	4	0.837319086	0.420511931	0.4
44	4	0.835812651	0.421191942	0.5
44	4	0.834533099	0.421752902	0.6
44	4	0.833431836	0.422222839	0.7
44	4	0.832473385	0.422621724	0.8
44	4	0.831631202	0.422964156	0.9
45	4	0.837612263	0.423409511	0.1
45	4	0.836227017	0.42340774	0.2
45	4	0.835112506	0.423397106	0.3
45	4	0.83419452	0.42338138	0.4
45	4	0.833424125	0.423362811	0.5
45	4	0.832767631	0.423342777	0.6
45	4	0.832201027	0.423322136	0.7
45	4	0.831706698	0.423301429	0.8
45	4	0.831271409	0.423280994	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
46	4	0.833270969	0.430795423	0.1
46	4	0.832793748	0.429163337	0.2
46	4	0.832404561	0.427879951	0.3
46	4	0.832080431	0.426843206	0.4
46	4	0.831805905	0.42598751	0.5
46	4	0.831570161	0.425268754	0.6
46	4	0.831365365	0.424656157	0.7
46	4	0.831185694	0.424127572	0.8
46	4	0.831026721	0.423666647	0.9
47	4	0.83132645	0.434355396	0.1
47	4	0.831251379	0.431937402	0.2
47	4	0.831185077	0.430040987	0.3
47	4	0.831126456	0.428512547	0.4
47	4	0.831074448	0.427253633	0.5
47	4	0.831028106	0.426198178	0.6
47	4	0.830986621	0.42530017	0.7
47	4	0.830949308	0.424526554	0.8
47	4	0.830915599	0.423852966	0.9
48	4	0.830733395	0.432587148	0.1
48	4	0.830778754	0.430537182	0.2
48	4	0.830809914	0.428936257	0.3
48	4	0.830831993	0.427650285	0.4
48	4	0.830848027	0.426593951	0.5
48	4	0.830859905	0.425710331	0.6
48	4	0.830868846	0.424959961	0.7
48	4	0.830875667	0.4243146	0.8
48	4	0.830880925	0.423753493	0.9
49	4	0.830708859	0.429021142	0.1
49	4	0.830757082	0.427728305	0.2
49	4	0.830791149	0.426730307	0.3
49	4	0.830816156	0.42593541	0.4
49	4	0.830835087	0.425286617	0.5
49	4	0.830849785	0.424746584	0.6
49	4	0.830861443	0.424289778	0.7
49	4	0.83087086	0.423898133	0.8
49	4	0.830878586	0.423558492	0.9
50	4	0.830898739	0.42817582	0.1
50	4	0.830898367	0.426702155	0.2
50	4	0.830897329	0.425761623	0.3
50	4	0.830895756	0.425101199	0.4
50	4	0.830893924	0.424607968	0.5
50	4	0.830892015	0.42422341	0.6
50	4	0.83089013	0.423913926	0.7
50	4	0.830888321	0.42365873	0.8
50	4	0.830886612	0.423444209	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
51	5	0.840992869	0.420440411	0.1
51	5	0.839371521	0.420911336	0.2
51	5	0.837928336	0.42132555	0.3
51	5	0.836632188	0.421693134	0.4
51	5	0.83545891	0.422021903	0.5
51	5	0.834389449	0.422318008	0.6
51	5	0.833408576	0.422586358	0.7
51	5	0.832503972	0.422830916	0.8
51	5	0.831665559	0.423054921	0.9
52	5	0.846461789	0.418311855	0.1
52	5	0.843212067	0.419363599	0.2
52	5	0.840607264	0.420201063	0.3
52	5	0.838471708	0.420883214	0.4
52	5	0.836688331	0.421449254	0.5
52	5	0.8351761	0.421926249	0.6
52	5	0.833877126	0.422333485	0.7
52	5	0.832748946	0.422685073	0.8
52	5	0.8317597	0.422991573	0.9
53	5	0.846422639	0.417618858	0.1
53	5	0.843069168	0.418854949	0.2
53	5	0.840424844	0.419824252	0.3
53	5	0.838285234	0.420604321	0.4
53	5	0.836517728	0.421245349	0.5
53	5	0.835032519	0.42178125	0.6
53	5	0.833766609	0.422235761	0.7
53	5	0.832674488	0.422625988	0.8
53	5	0.831722454	0.422964568	0.9
54	5	0.843418702	0.419585122	0.1
54	5	0.840696482	0.420395112	0.2
54	5	0.838556785	0.421028384	0.3
54	5	0.836829789	0.421536847	0.4
54	5	0.835405972	0.421953915	0.5
54	5	0.8342115	0.422302066	0.6
54	5	0.833194773	0.422596978	0.7
54	5	0.832318628	0.422849916	0.8
54	5	0.831555614	0.423069186	0.9
55	5	0.839354148	0.424084526	0.1
55	5	0.837513981	0.423903603	0.2
55	5	0.836068031	0.42376234	0.3
55	5	0.834901169	0.423648886	0.4
55	5	0.833939236	0.423555686	0.5
55	5	0.833132282	0.423477694	0.6
55	5	0.832445418	0.423411419	0.7
55	5	0.831853525	0.423354362	0.8
55	5	0.831338056	0.423304694	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
56	5	0.835852579	0.429067625	0.1
56	5	0.834774366	0.427788547	0.2
56	5	0.83392679	0.426789592	0.3
56	5	0.833242524	0.425987703	0.4
56	5	0.832678215	0.425329709	0.5
56	5	0.832204656	0.424779995	0.6
56	5	0.831801447	0.424313807	0.7
56	5	0.831453895	0.423913409	0.8
56	5	0.831151148	0.423565755	0.9
57	5	0.833480139	0.432175999	0.1
57	5	0.832916163	0.430205914	0.2
57	5	0.832473127	0.428669748	0.3
57	5	0.832115627	0.427438169	0.4
57	5	0.831820904	0.426428623	0.5
57	5	0.831573651	0.425585931	0.6
57	5	0.831363181	0.424871811	0.7
57	5	0.831181804	0.42425887	0.8
57	5	0.831023843	0.423726984	0.9
58	5	0.832080127	0.432380525	0.1
58	5	0.831818195	0.430345265	0.2
58	5	0.831613296	0.4287662	0.3
58	5	0.831448505	0.427505194	0.4
58	5	0.831313018	0.426474805	0.5
58	5	0.83119961	0.425616975	0.6
58	5	0.831103259	0.42489164	0.7
58	5	0.831020367	0.424270256	0.8
58	5	0.830948283	0.423731935	0.9
59	5	0.831321176	0.430011426	0.1
59	5	0.831222031	0.42844851	0.2
59	5	0.831145889	0.427258643	0.3
59	5	0.831085537	0.42632245	0.4
59	5	0.831036502	0.425566591	0.5
59	5	0.830995859	0.424943517	0.6
59	5	0.830961615	0.42442105	0.7
59	5	0.830932364	0.42397663	0.8
59	5	0.830907083	0.423593976	0.9
60	5	0.830903908	0.425257096	0.1
60	5	0.830907395	0.424751635	0.2
60	5	0.830905813	0.424386358	0.3
60	5	0.830902744	0.424110404	0.4
60	5	0.830899335	0.423894111	0.5
60	5	0.830895994	0.42371958	0.6
60	5	0.830892868	0.423575462	0.7
60	5	0.830889998	0.42345422	0.8
60	5	0.830887385	0.42335065	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
61	6	0.83992641	0.42027049	0.1
61	6	0.838475828	0.420766629	0.2
61	6	0.837184853	0.421204165	0.3
61	6	0.836025521	0.421593316	0.4
61	6	0.834976142	0.421942033	0.5
61	6	0.834019629	0.422256604	0.6
61	6	0.833142333	0.422542061	0.7
61	6	0.832333218	0.422802486	0.8
61	6	0.831583261	0.423041224	0.9
62	6	0.844611568	0.419202143	0.1
62	6	0.841735322	0.420053926	0.2
62	6	0.839434545	0.420735544	0.3
62	6	0.837551413	0.421293335	0.4
62	6	0.835981053	0.421758185	0.5
62	6	0.834651047	0.422151483	0.6
62	6	0.833509773	0.422488515	0.7
62	6	0.832519436	0.4227805	0.8
62	6	0.831651725	0.42303586	0.9
63	6	0.844611467	0.419783394	0.1
63	6	0.841625168	0.420545051	0.2
63	6	0.839278889	0.421142295	0.3
63	6	0.837386304	0.421622989	0.4
63	6	0.835827034	0.42201807	0.5
63	6	0.834519846	0.422348426	0.6
63	6	0.833407943	0.422628666	0.7
63	6	0.832450411	0.422869315	0.8
63	6	0.831617035	0.423078151	0.9
64	6	0.842376863	0.421948485	0.1
64	6	0.839851018	0.422248147	0.2
64	6	0.837876287	0.422478919	0.3
64	6	0.836289791	0.422661704	0.4
64	6	0.834987063	0.422809789	0.5
64	6	0.83389803	0.422932006	0.6
64	6	0.83297394	0.423034453	0.7
64	6	0.83217983	0.423121463	0.8
64	6	0.831489971	0.423196204	0.9
65	6	0.839336166	0.425143004	0.1
65	6	0.837471554	0.424740259	0.2
65	6	0.836016474	0.424421744	0.3
65	6	0.834849213	0.424163221	0.4
65	6	0.833891927	0.423948997	0.5
65	6	0.833092518	0.423768446	0.6
65	6	0.832414806	0.423614113	0.7
65	6	0.831832887	0.423480606	0.8
65	6	0.831327723	0.423363925	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
66	6	0.836512832	0.428289084	0.1
66	6	0.835270444	0.427184787	0.2
66	6	0.83430126	0.426321245	0.3
66	6	0.833523957	0.425627255	0.4
66	6	0.832886576	0.425057205	0.5
66	6	0.832354373	0.424580518	0.6
66	6	0.831903229	0.424175925	0.7
66	6	0.831515884	0.423828171	0.8
66	6	0.831179654	0.423526026	0.9
67	6	0.83430696	0.430411371	0.1
67	6	0.833550468	0.428827544	0.2
67	6	0.832960776	0.42759385	0.3
67	6	0.832488092	0.426605661	0.4
67	6	0.832100664	0.425796267	0.5
67	6	0.831777279	0.425121126	0.6
67	6	0.831503231	0.42454936	0.7
67	6	0.831268	0.424058889	0.8
67	6	0.831063861	0.423633504	0.9
68	6	0.832724857	0.430913363	0.1
68	6	0.832312952	0.429197488	0.2
68	6	0.831993818	0.427868905	0.3
68	6	0.831739278	0.426809851	0.4
68	6	0.831531518	0.425945898	0.5
68	6	0.83135872	0.425227702	0.6
68	6	0.831212738	0.424621261	0.7
68	6	0.831087774	0.424102382	0.8
68	6	0.83097959	0.423653383	0.9
69	6	0.831663014	0.429293755	0.1
69	6	0.831479058	0.427874754	0.2
69	6	0.831340366	0.426802185	0.3
69	6	0.831232165	0.425963577	0.4
69	6	0.831145455	0.425290275	0.5
69	6	0.831074446	0.424738024	0.6
69	6	0.831015248	0.424277027	0.7
69	6	0.830965152	0.4238865	0.8
69	6	0.830922217	0.423551507	0.9
70	6	0.830915642	0.423340262	0.1
70	6	0.830917729	0.423456988	0.2
70	6	0.830913618	0.423466152	0.3
70	6	0.830908366	0.423443302	0.4
70	6	0.830903268	0.423411073	0.5
70	6	0.830898654	0.423377267	0.6
70	6	0.830894568	0.423344716	0.7
70	6	0.830890973	0.42331439	0.8
70	6	0.830887808	0.42328652	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
71	7	0.842310175	0.422142451	0.1
71	7	0.84048545	0.42233985	0.2
71	7	0.838856523	0.422509743	0.3
71	7	0.837390641	0.422657648	0.4
71	7	0.836062114	0.422787725	0.5
71	7	0.834850497	0.422903162	0.6
71	7	0.833739301	0.423006442	0.7
71	7	0.832715072	0.423099523	0.8
71	7	0.83176672	0.423183968	0.9
72	7	0.846025681	0.421859844	0.1
72	7	0.842962972	0.422214202	0.2
72	7	0.840477852	0.422477822	0.3
72	7	0.838417243	0.422678881	0.4
72	7	0.836678465	0.422835377	0.5
72	7	0.835189913	0.422959262	0.6
72	7	0.833900034	0.423058739	0.7
72	7	0.83277071	0.423139594	0.8
72	7	0.831773113	0.423206002	0.9
73	7	0.844648554	0.422871378	0.1
73	7	0.841749318	0.423029013	0.2
73	7	0.839441098	0.423128791	0.3
73	7	0.837556474	0.42319176	0.4
73	7	0.835986439	0.42323056	0.5
73	7	0.834656822	0.423253107	0.6
73	7	0.833515313	0.423264524	0.7
73	7	0.832523915	0.423268222	0.8
73	7	0.831654326	0.423266523	0.9
74	7	0.841461341	0.42454785	0.1
74	7	0.839192157	0.424339698	0.2
74	7	0.837400798	0.424152132	0.3
74	7	0.835948474	0.423983489	0.4
74	7	0.834745805	0.423831691	0.5
74	7	0.833732536	0.423694696	0.6
74	7	0.832866516	0.423570649	0.7
74	7	0.832117344	0.423457927	0.8
74	7	0.831462518	0.423355125	0.9
75	7	0.838312664	0.42633978	0.1
75	7	0.836697173	0.425721882	0.2
75	7	0.835429707	0.425219327	0.3
75	7	0.834407506	0.424801425	0.4
75	7	0.833564848	0.424447753	0.5
75	7	0.832857699	0.424144122	0.6
75	7	0.83225542	0.423880323	0.7
75	7	0.831736018	0.423648807	0.8
75	7	0.831283287	0.423443853	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
76	7	0.83572748	0.42778701	0.1
76	7	0.834663287	0.42682202	0.2
76	7	0.833832226	0.426058145	0.3
76	7	0.833164656	0.425437319	0.4
76	7	0.832616259	0.424922102	0.5
76	7	0.832157464	0.424487211	0.6
76	7	0.831767778	0.424114919	0.7
76	7	0.83143254	0.423792414	0.8
76	7	0.831140983	0.42351019	0.9
77	7	0.833801579	0.428580714	0.1
77	7	0.833155361	0.427411139	0.2
77	7	0.83265254	0.42649781	0.3
77	7	0.832249908	0.425764223	0.4
77	7	0.831920071	0.425161689	0.5
77	7	0.831644809	0.424657719	0.6
77	7	0.831411532	0.424229785	0.7
77	7	0.831211255	0.423861767	0.8
77	7	0.831037394	0.42354182	0.9
78	7	0.832462859	0.428601673	0.1
78	7	0.832108154	0.427402805	0.2
78	7	0.831833962	0.42647533	0.3
78	7	0.831615642	0.425736383	0.4
78	7	0.831437674	0.425133733	0.5
78	7	0.831289802	0.424632819	0.6
78	7	0.831164973	0.424209859	0.7
78	7	0.831058181	0.423847952	0.8
78	7	0.83096577	0.423534753	0.9
79	7	0.831570414	0.427562641	0.1
79	7	0.831405738	0.426538859	0.2
79	7	0.831282544	0.425769444	0.3
79	7	0.831187062	0.425170732	0.4
79	7	0.831110973	0.424691993	0.5
79	7	0.831048966	0.424300713	0.6
79	7	0.830997493	0.423975105	0.7
79	7	0.830954099	0.423700034	0.8
79	7	0.830917034	0.423464665	0.9
80	7	0.830965208	0.422952353	0.1
80	7	0.830948512	0.423192871	0.2
80	7	0.830933744	0.423273577	0.3
80	7	0.830921879	0.423299934	0.4
80	7	0.830912401	0.423304739	0.5
80	7	0.830904738	0.423300318	0.6
80	7	0.830898449	0.4232919	0.7
80	7	0.830893211	0.423281878	0.8
80	7	0.830888789	0.423271404	0.9

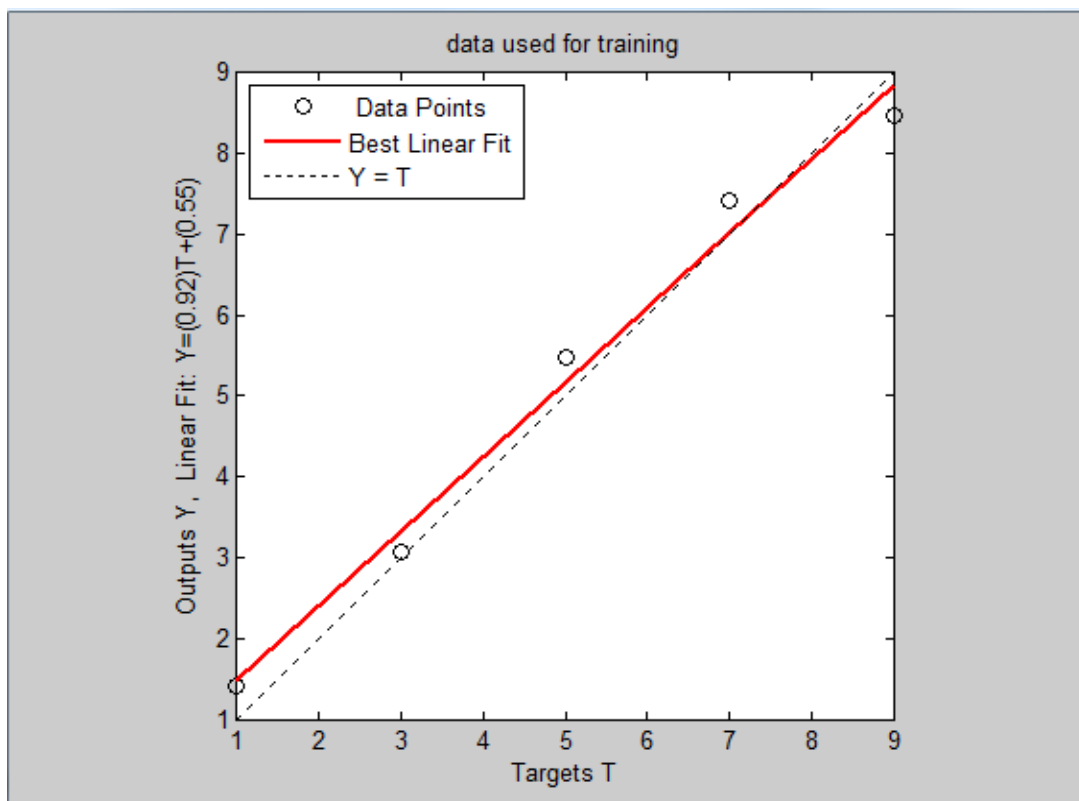
x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ.ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ.ίνας	Id
81	8	0.85145115	0.426182466	0.1
81	8	0.848124938	0.425713175	0.2
81	8	0.845163396	0.425292752	0.3
81	8	0.842507024	0.424914258	0.4
81	8	0.840108741	0.424571962	0.5
81	8	0.837930788	0.424261097	0.6
81	8	0.835942518	0.423977678	0.7
81	8	0.834118783	0.42371835	0.8
81	8	0.832438751	0.423480277	0.9
82	8	0.853195548	0.42681289	0.1
82	8	0.848906778	0.426247681	0.2
82	8	0.845348885	0.425734037	0.3
82	8	0.842342447	0.425269491	0.4
82	8	0.839764075	0.424849586	0.5
82	8	0.837525627	0.424469462	0.6
82	8	0.8355622	0.424124482	0.7
82	8	0.833824788	0.423810461	0.8
82	8	0.832275609	0.423523716	0.9
83	8	0.84692951	0.427681351	0.1
83	8	0.843737048	0.426927517	0.2
83	8	0.841131453	0.426264159	0.3
83	8	0.838957777	0.425678514	0.4
83	8	0.837112885	0.42515904	0.5
83	8	0.835524985	0.424695876	0.6
83	8	0.83414231	0.424280778	0.7
83	8	0.832926451	0.423906901	0.8
83	8	0.831848224	0.423568565	0.9
84	8	0.841328409	0.428179258	0.1
84	8	0.839204523	0.427288462	0.2
84	8	0.837489081	0.426527434	0.3
84	8	0.836069783	0.425869964	0.4
84	8	0.834873217	0.425296359	0.5
84	8	0.833849041	0.424791579	0.6
84	8	0.832961398	0.424343954	0.7
84	8	0.832183965	0.423944301	0.8
84	8	0.831496917	0.423585299	0.9
85	8	0.837239895	0.428212023	0.1
85	8	0.835919075	0.427265074	0.2
85	8	0.834863203	0.426477321	0.3
85	8	0.83399684	0.425810288	0.4
85	8	0.833271408	0.425237381	0.5
85	8	0.832654025	0.424739501	0.6
85	8	0.83212153	0.424302508	0.7
85	8	0.831657082	0.423915675	0.8
85	8	0.831248109	0.423570699	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
86	8	0.834476824	0.427810218	0.1
86	8	0.83371264	0.426892357	0.2
86	8	0.83310843	0.426148173	0.3
86	8	0.832617106	0.425530569	0.4
86	8	0.832208778	0.425008596	0.5
86	8	0.83186346	0.424560923	0.6
86	8	0.83156723	0.424172288	0.7
86	8	0.83131006	0.42383144	0.8
86	8	0.831084528	0.423529878	0.9
87	8	0.832733903	0.427077513	0.1
87	8	0.832329817	0.426264285	0.2
87	8	0.832014326	0.425621747	0.3
87	8	0.831760449	0.425099551	0.4
87	8	0.831551308	0.424665776	0.5
87	8	0.831375764	0.424299098	0.6
87	8	0.831226147	0.423984669	0.7
87	8	0.83109699	0.423711803	0.8
87	8	0.830984282	0.42347259	0.9
88	8	0.831724915	0.4262057	0.1
88	8	0.831534663	0.42554147	0.2
88	8	0.831388573	0.425030393	0.3
88	8	0.831272656	0.424624193	0.4
88	8	0.83117831	0.424293115	0.5
88	8	0.831099943	0.424017784	0.6
88	8	0.831033759	0.423785016	0.7
88	8	0.830977085	0.423585514	0.8
88	8	0.830927984	0.42341253	0.9
89	8	0.831194496	0.425416398	0.1
89	8	0.831118605	0.424893294	0.2
89	8	0.831062473	0.424504463	0.3
89	8	0.83101934	0.424204381	0.4
89	8	0.830985199	0.423965957	0.5
89	8	0.830957527	0.423772073	0.6
89	8	0.830934659	0.423611389	0.7
89	8	0.830915453	0.423476103	0.8
89	8	0.8308991	0.423360668	0.9
90	8	0.830962304	0.423339004	0.1
90	8	0.830934955	0.423409708	0.2
90	8	0.830919281	0.423401668	0.3
90	8	0.830909116	0.423378174	0.4
90	8	0.830902009	0.423353105	0.5
90	8	0.830896776	0.423329901	0.6
90	8	0.830892776	0.423309261	0.7
90	8	0.830889627	0.4232911	0.8
90	8	0.830887093	0.423275131	0.9

x	y	Παραμόρφωση 1 ^{ης} οπτ. ίνας	Παραμόρφωση 2 ^{ης} οπτικ. ίνας	Id
91	9	0.909142062	0.43888542	0.1
91	9	0.890807648	0.434755138	0.2
91	9	0.877201687	0.431882112	0.3
91	9	0.866554232	0.429745204	0.4
91	9	0.857923921	0.428082786	0.5
91	9	0.850750089	0.426747134	0.6
91	9	0.844671869	0.42564762	0.7
91	9	0.83944357	0.424725115	0.8
91	9	0.834890671	0.423939167	0.9
92	9	0.891487728	0.444596565	0.1
92	9	0.874033167	0.438338766	0.2
92	9	0.862472107	0.434251456	0.3
92	9	0.854206657	0.431353889	0.4
92	9	0.847979092	0.429182483	0.5
92	9	0.84310376	0.427488626	0.6
92	9	0.839173943	0.426126567	0.7

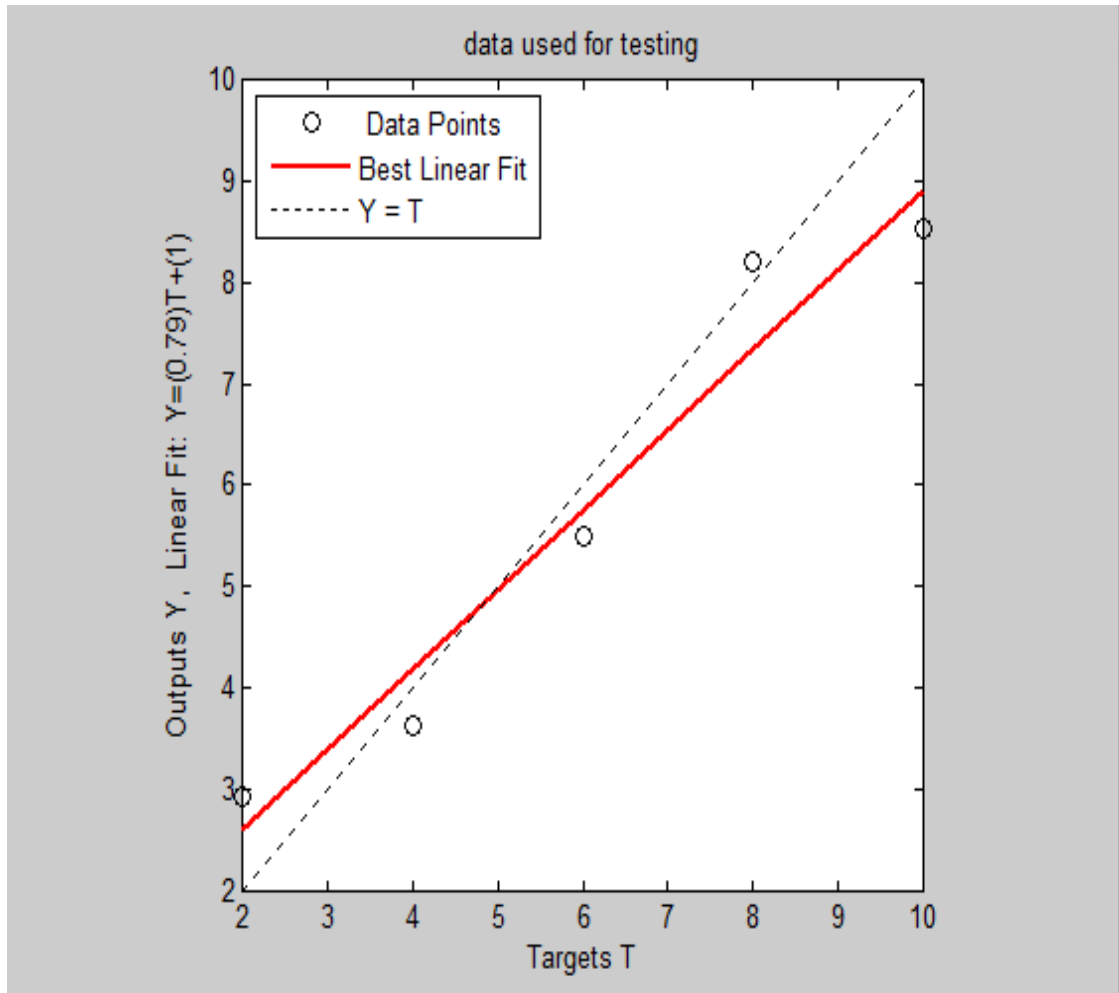
Στον πίνακα παραπάνω τοποθετήθηκαν οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου κατά χ και ψ άξονα ώστε να μελετηθεί ακριβέστερα από το νευρωνικό δίκτυο η θέση και το μέγεθος της βλάβης. Εκτελέστηκε μία σειρά από διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα και προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση:

A) Για id=0.1 που αντιστοιχεί σε 90% μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε ένα στοιχείο.



Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.1

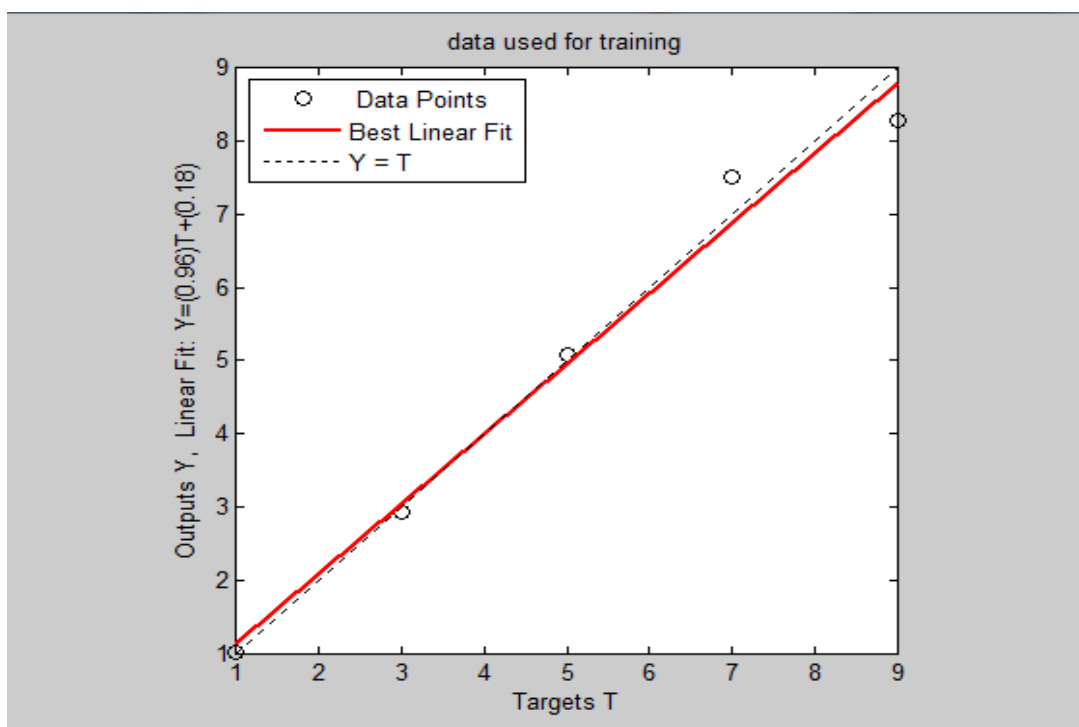
θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
0,6168	0,9961	8,2931	0,9817
2,8355	0,9991	-0,3853	0,9944
5,0369	1,0103	-0,374	0,9945
6,5941	1,0045	8,699	1,0043
8,7546	1,0028	8,7609	1,0022



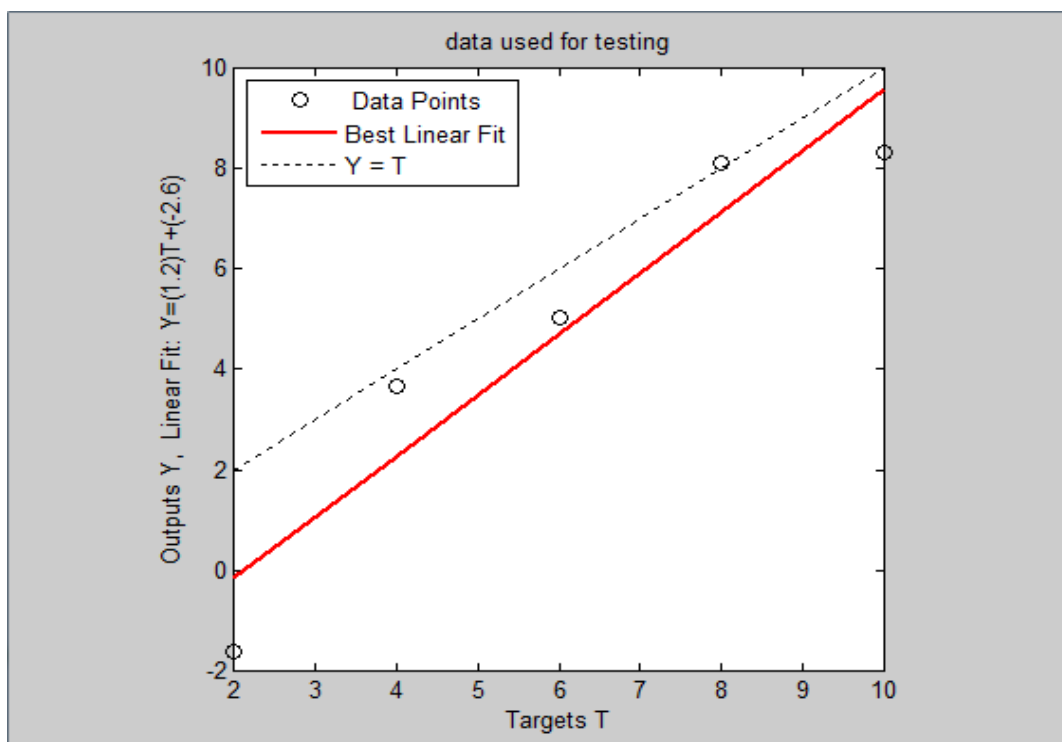
Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.1

Ομοίως προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα από το νευρωνικό δίκτυο για id=0.1. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από δύο εισόδους, δύο κρυμμένα στρώματα με 10 και 10 κόμβους και δύο εξόδους.

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
1,0045	1,0230	-1,621	0,7224
2,9350	0,8826	3,6596	0,7008
5,0781	1,1766	5,0477	0,6826
7,5048	0,9006	8,1233	0,994
8,2898	1,0235	8,3415	1,0337

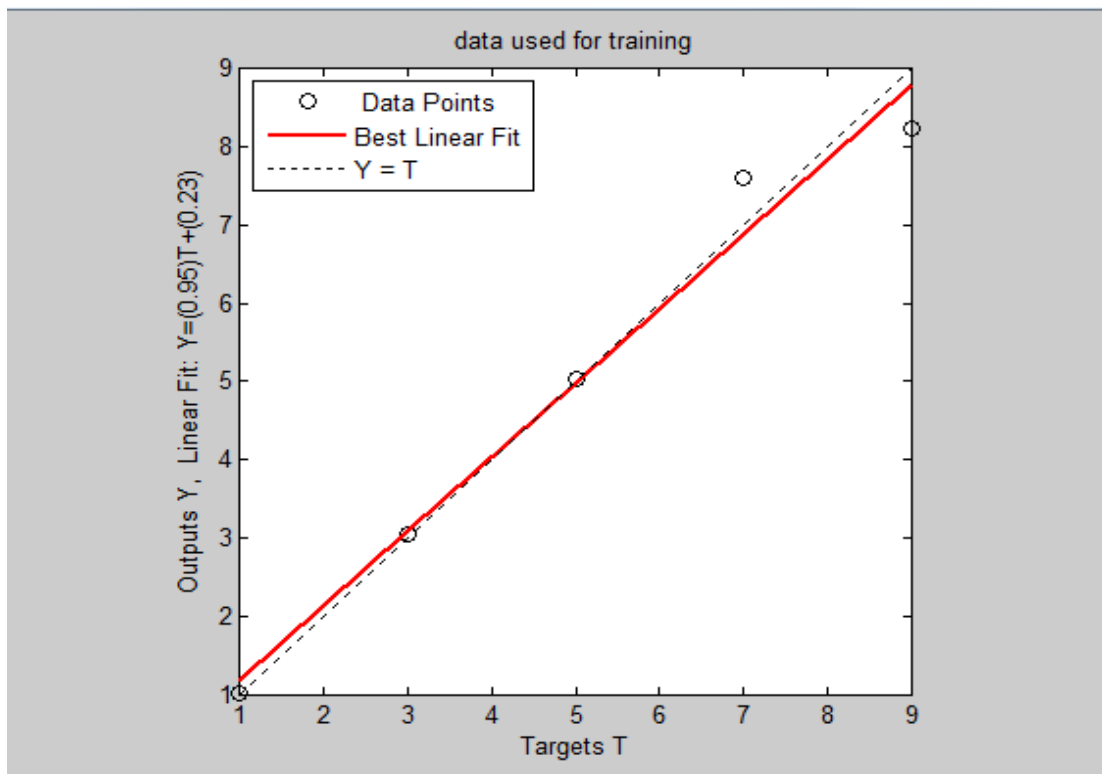


Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.1

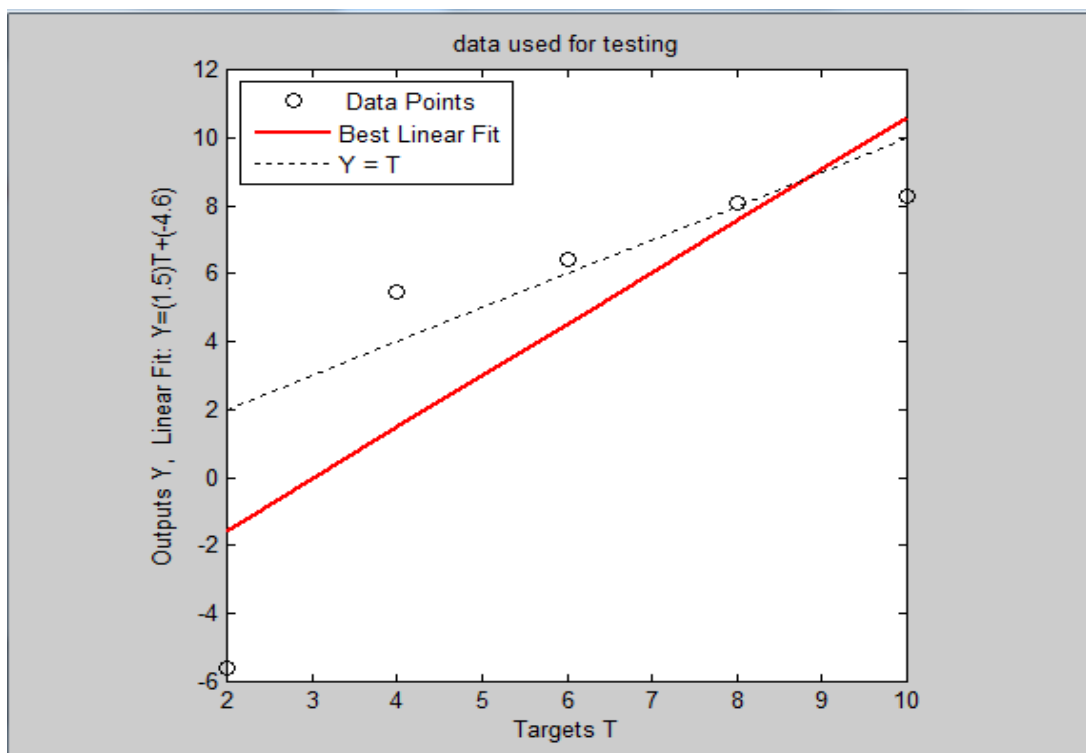


Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.1

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από δύο εισόδους με ένα κρυμμένο στρώμα από 10 κόμβους και δύο εξόδους. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στις εικόνες 5.7 και 5.8 (δίκτυο 2-10-2).



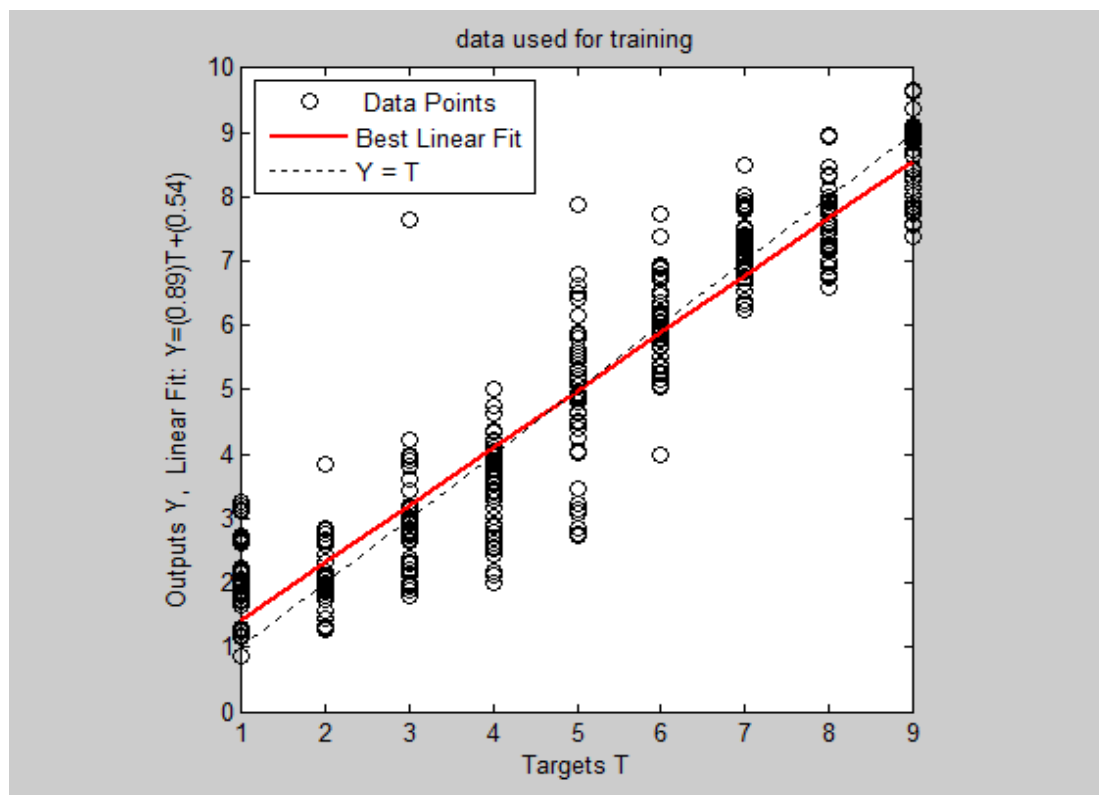
Εικόνα 5.9: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.1



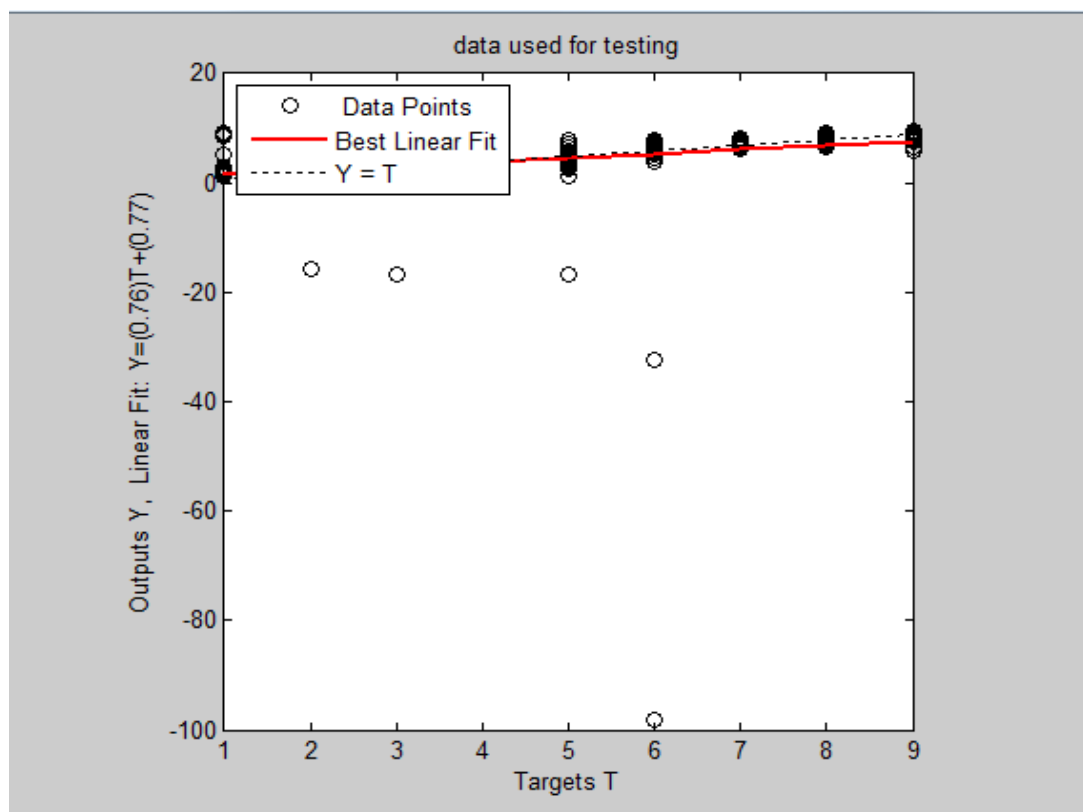
Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.1

Στις παραπάνω εικόνες φαίνονται τα διαγράμματα του νευρωνικού δικτύου που αποτελείται από δύο εισόδους, ένα κρυμμένο στρώμα με 10 κόμβους και δύο εξόδους (δίκτυο 2-10-2).

Στη συνέχεια για id=0.7 που αντιστοιχεί σε 30% μείωση του μέτρου ελαστικότητας έχουμε:



5.11: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.7



5.12: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.7

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι για όλους τους κόμβους των δικτύων χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση μεταφοράς τύπου Υπερβολική εφαπτόμενη σιγμοειδής συνάρτηση Hyperbolic tangent sigmoid transfer function. Για όλα επίσης, τα δίκτυα χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος αλγόριθμος εκπαίδευσης Levenberg-Marquardt για τον καθορισμό των βαρών στις συνδέσεις. Η σιγμοειδής είναι η πιο συνηθισμένη μορφή συνάρτησης ενεργοποίησης (στην ουσία πρόκειται για μία οικογένεια συναρτήσεων) που χρησιμοποιείται στην κατασκευή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Από τα διάφορα παραδείγματα σιγμοειδών συναρτήσεων αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι η λογιστική συνάρτηση ή απεικόνιση, και η υπερβολική εφαπτομένη. Οι συναρτήσεις αυτές τείνουν σε μορφή στη βηματική συνάρτηση, αλλά όπως προαναφέρθηκε είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες. Διακρίνεται στη λογιστική συνάρτηση (logistic) και στην υπερβολική εφαπτομένη (hyperbolic tangent). Η παράμετρος a καθορίζει την κλίση της σιγμοειδούς συνάρτησης και καλείται παράμετρος κλίσης. Όσο το a τείνει στο άπειρο, η λογιστική συνάρτηση τείνει προς τη βηματική συνάρτηση και έχουμε και πάλι το μοντέλο McCulloch-Pitts. Η χρήση των ‘μαλακών’ συναρτήσεων καταωφλιού, όπως η σιγμοειδής συνάρτηση ή η υπερβολική εφαπτομένη, δημιουργεί ομαλές επιφάνειες χωρίς απότομες μεταβολές στην τιμή ο της εξόδου του δικτύου.

Γενικά, οι σχέσεις εισόδου και εξόδου ενός νευρωνικού δικτύου μπορούν να παριστάνονται ως σχέσεις πινάκων, πράγμα που βοηθάει πάρα πολύ στην μαθηματική τους ανάλυση η οποία επί των πλείστων γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστικών συστημάτων. Επιπλέον, σε όλα τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος εκπαίδευσης που καλείται Levenberg-Marquardt για τον καθορισμό των βαρών στις συνδέσεις.

Τα διαγράμματα στις εικόνες 5.11 και 5.12 είναι τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως προβλέψεις για τη θέση και το μέγεθος της βλάβης του νευρωνικού δικτύου που αποτελείται από δύο εισόδους, δύο στρώματα με 10 και 10 κόμβους καθώς και 3 εξόδους (δίκτυο 2-10-10-3). Μετά την παρουσίαση των πινάκων με την αντιστοιχία των θέσεων και του μεγέθους της βλάβης παρουσιάζονται τα διαγράμματα του νευρωνικού δικτύου στις αντίστοιχες εικόνες 5.13 και 5.14 που αποτελείται από 2 εισόδους, 3 κρυμμένα στρώματα με 15 και 15 και 15 κόμβους καθώς και 3 εξόδους.

Όλοι οι παρακάτω πίνακες αποτελούν προβλέψεις (εξόδους) που κάνει ανάλογα με τις αντίστοιχες εισόδους που έχουμε δώσει προκειμένου να μας δώσει το αντίστοιχο νευρωνικό δίκτυο την πληροφορία τόσο για τη θέση που βρίσκεται η βλάβη όσο και για το μέγεθος της.

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
1,1773	1,275	1,1473	1,0811
1,1653	0,9927	5,2199	0,2465
1,146	1,0427	1,1668	1,2068
0,8624	1,2508	1,272	1,8863
1,2352	1,6489	-15,6039	3,9803
1,9384	0,8224	2,0832	0,7883
2,0816	0,7773	2,0794	0,7632
2,0774	0,75	2,0777	0,7513
2,0742	0,7586	2,077	0,7589
2,0481	0,967	2,9727	1,7635
2,8216	1,4082	2,7426	0,9916
2,8043	0,8945	2,9326	1,0877
3,1561	1,3582	3,0548	1,5888
3,0018	1,2347	-16,7366	1,3832
2,9462	1,3666	3,6744	1,3702
4,185	1,4353	4,2567	1,5289
3,8676	1,6447	3,6956	1,6489
4,1829	1,2119	4,435	5,2126
4,02	1,0017	3,2756	0,6624
3,983	0,9913	4,8832	1,3938
4,8789	1,2444	3,1664	-1,0635
5,1665	0,7808	6,6683	1,7085
4,3874	1,5511	-16,8954	0,9665
4,9314	0,5994	7,8435	0,2842
4,9664	0,976	-32,5053	-57,4233
6,7876	1,654	6,7621	1,7424
6,9413	1,5663	7,2807	1,3537
5,9274	0,6636	-98,298	-151,0485
5,9548	0,9603	6,8999	1,5419
6,8975	1,5835	6,9817	1,5092
7,0824	1,4302	7,3713	1,2822
8,0158	1,0776	6,9391	1,3547
7,0001	1,457	7,0467	1,4288
7,1069	1,3884	7,2192	1,3265
7,5319	1,192	7,9648	1,0651
7,9186	1,0625	7,8464	1,2528
7,1744	1,3123	7,3938	1,2067
7,782	1,0877	7,9126	1,0106
7,8103	1,0007	7,7341	1,0564
7,7778	1,1887	8,032	1,4701
8,8967	2,3786	7,5167	1,0654

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
7,7486	1,2706	7,9995	1,5
8,3163	1,8222	8,7061	2,2237
9,0976	2,5936	9,4018	2,8535
9,3648	3,2832	8,5318	4,5474
1,2858	1,9758	1,2864	1,9799
1,2621	1,8224	1,2213	1,5587
1,1873	1,3396	1,1855	1,3279
1,2945	2,0322	1,7741	5,1311
2,0298	6,4885	1,282	1,9514
1,3177	2,1818	1,3315	2,2711
1,3131	2,152	1,2748	1,9046
1,2579	1,7958	1,3583	2,444
1,7848	5,2003	2,071	6,4708
3,8356	1,7635	3,8946	1,7844
4,2158	1,8506	4,7162	2,0885
3,9912	1,3462	2,8954	0,6204
3,8956	1,8428	5,7249	3,2643
7,6452	4,8752	9,0484	-0,7133
3,0769	1,7412	4,0012	2,2107
3,9074	2,3544	3,4722	2,3095
3,3926	2,1917	3,5631	2,0738
3,5444	2,05	4,7562	2,2471
4,1825	1,5907	3,6836	1,6738
3,7012	1,6663	4,0634	1,5961
4,6577	1,4754	5,1375	1,3633
5,3007	1,3038	5,2696	1,2787
5,5027	0,9336	1,0611	-0,8231
5,2272	1,7196	4,5744	1,7175
4,0362	1,7115	3,8144	1,7394
3,9797	1,8872	4,4879	2,2747
5,2625	2,886	6,8302	3,4723
5,0873	2,763	5,1324	2,5395
5,17	2,379	5,3965	2,3445
5,8627	2,4842	6,4637	2,7932
7,0973	3,1488	7,6689	3,3192
7,8737	3,1667	6,8371	1,8173
6,9524	1,8332	7,2092	1,815
7,421	1,8376	7,3619	1,9738
7,2774	2,0441	7,4367	1,9098
8,1055	2,0402	9,3197	2,5757
7,2772	1,3567	7,6019	1,2271
7,923	1,1337	8,016	1,1188

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
7,9301	1,1718	7,8356	1,2468
7,8445	1,3178	8,105	1,5585
9,0645	2,4973	7,9585	3,3136
7,5919	2,942	8,3196	-0,838
9,0868	0,6398	9,4895	1,7071
9,6223	2,2702	9,5274	2,7504
9,0401	3,6034	8,3882	4,6317
1,7367	4,8894	1,6699	4,4576
1,6559	4,3674	1,7186	4,7723
1,8346	5,5203	1,9352	6,1425
2,0578	6,4114	2,4763	6,4032
2,7434	6,3092	1,9266	6,1159
1,8774	5,7985	1,8414	5,5652
1,8578	5,6647	1,9286	6,0233
2,1152	6,2956	2,5874	6,3318
2,75	6,3023	2,8742	6,2488
1,8018	5,31	1,828	5,4777
1,8896	5,8471	1,994	6,18
2,3023	6,3134	2,7332	6,2952
2,787	6,2765	2,7874	6,2537
3,1905	6,2966	4,7483	1,1137
3,0364	3,0496	3,1918	3,6353
3,4221	3,6505	3,6289	3,5563
3,7734	3,4621	3,7282	3,276
3,8609	2,8684	6,0803	2,3302
4,221	3,0675	4,6764	2,8954
5,0133	2,6935	5,2009	2,5064
5,4536	2,4168	5,9461	2,5339
6,613	2,8979	7,3601	3,2746
7,8726	3,243	3,6094	1,6549
4,8967	2,528	5,8427	3,2281
5,8538	3,4328	5,4871	3,3242
5,3668	3,0893	5,8012	2,8995
6,7074	3,014	7,7925	3,3607
6,0429	2,9438	6,0122	3,246
5,9245	3,4655	5,9087	3,6093
6,0575	3,6761	6,4244	3,6473
6,9424	3,5228	7,3262	3,4496
7,7909	3,55	8,299	1,9192
7,2871	3,5386	6,4561	4,7302
6,5229	4,6221	6,7443	4,3115
7,087	3,8703	7,4293	3,431

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
7,6294	3,0926	7,5758	2,9976
7,0139	2,2756	6,9021	2,5259
6,8105	2,6091	6,9811	2,4289
7,4405	2,2743	8,2751	2,3804
8,9405	2,2284	9,3604	2,1718
9,6521	2,4013	7,5074	4,319
7,7373	4,0058	7,6711	3,928
7,731	3,9076	7,8475	3,8345
7,9076	3,7827	7,9694	3,9814
8,2508	4,8297	8,7828	6,3465
1,8078	5,3478	1,8772	5,7896
1,9387	6,1384	2,013	6,34
2,187	6,4119	2,4752	6,3937
2,6466	6,3525	2,7385	6,3049
3,1032	6,2189	1,2797	1,9363
1,4429	2,9908	1,6873	4,5701
1,8742	5,7768	1,9593	6,2982
2,0628	6,4548	2,3954	6,4307
2,6496	6,3548	2,9874	6,2522
1,5608	3,7524	1,6456	4,3004
1,7881	5,2213	1,9069	5,9887
1,9657	6,3671	2,0023	6,503
2,2086	6,5002	2,5889	6,4033
2,9573	6,2723	3,8061	3,7926
3,8235	3,9049	3,8327	3,962
3,8414	3,9996	3,8754	4,0171
4,0606	3,9875	4,3855	3,9065
4,3655	4,1375	2,9645	5,9274
2,9022	6,2738	3,0288	6,2398
3,1685	6,2074	3,3168	6,1737
3,4749	6,1307	3,6718	6,0529
4,0304	5,8754	4,8366	5,5545
6,1605	5,3259	5,4957	3,2808
5,6355	3,3778	5,958	3,4383
6,4226	3,4612	6,9525	3,4768
7,3704	3,5247	7,5417	3,6289
7,7218	3,715	7,9096	3,5821
5,8782	3,4255	5,8524	3,5672
5,9853	3,6379	6,2887	3,6382
6,7152	3,5726	7,1285	3,4854
7,3735	3,4751	7,6273	3,5654
7,939	3,4648	6,3787	3,905

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
6,3881	3,7421	6,5786	3,5615
6,8347	3,4046	7,0728	3,334
7,3087	3,3799	7,6343	3,4699
7,9276	3,4535	7,8541	3,3248
6,7614	2,9412	7,1963	3,1346
7,556	3,2569	7,7986	3,302
7,9198	3,2857	7,9309	3,2247
7,844	3,1438	7,7476	3,2812
8,2652	4,926	6,4511	4,3163
7,7468	5,0685	8,0177	4,8523
7,8371	4,5008	7,7413	4,329
7,8112	4,235	7,941	4,23
8,1531	4,6411	8,6645	6,0007
1,8607	5,6901	1,9346	6,1666
1,9712	6,3863	2,0111	6,4781
2,1412	6,4921	2,3945	6,4482
2,604	6,3864	2,7945	6,3159
3,208	6,1855	1,5841	3,9029
1,752	4,9884	1,8884	5,8694
1,9564	6,3079	1,9878	6,4779
2,0791	6,5188	2,3994	6,4606
2,6801	6,3692	3,0597	6,2267
1,807	5,3432	1,8928	5,8979
1,9429	6,2213	1,9718	6,4077
1,9898	6,5069	2,0439	6,5412
2,3287	6,4916	2,6589	6,3921
2,9667	6,1999	2,151	5,9418
2,995	4,9824	2,0511	6,388
3,3526	4,6671	3,8883	4,013
4,1046	3,9762	4,4143	3,8958
3,516	5,3199	2,9878	5,8945
2,1644	6,482	2,396	6,4424
2,5623	6,3968	2,6661	6,356
2,7768	6,3154	2,9357	6,271
3,1544	6,2144	3,4429	6,0749
4,5269	5,4655	6,4043	6,4115
6,5122	6,5545	6,6675	6,7355
6,7919	6,9715	6,8222	7,2568
6,7511	7,559	6,6888	7,8267
6,9173	7,9289	7,7564	7,7552
6,1382	6,0036	6,3378	6,1727
6,4795	6,1288	6,494	5,7573

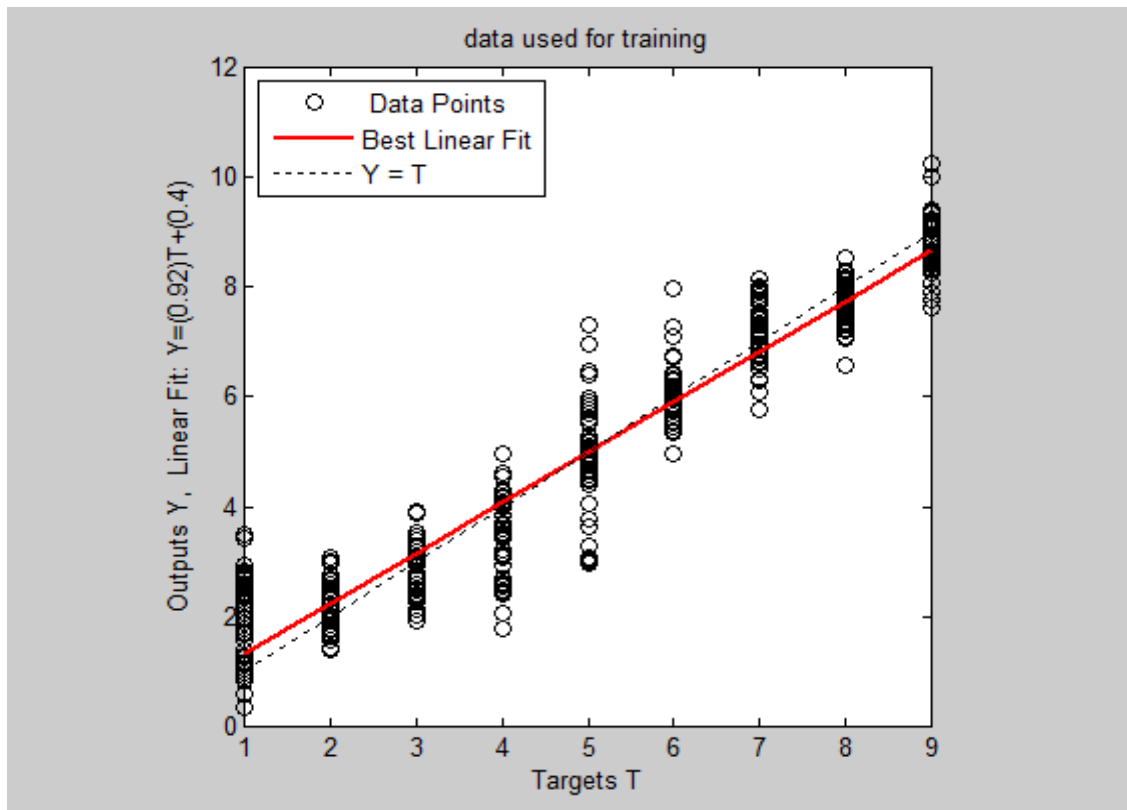
θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
6,2956	5,0677	6,2048	4,5766
6,9886	5,1752	7,844	5,6736
8,4804	5,9678	6,2938	4,3211
6,7502	4,7076	7,2892	4,9622
7,8167	5,0864	8,0147	4,9047
7,8679	4,5711	7,7433	4,3611
7,8566	4,2478	8,1658	4,6857
7,5809	4,8534	7,9383	4,8423
7,992	4,5802	7,8623	4,328
7,7384	4,1989	7,7453	4,1323
7,8532	4,0636	7,9851	4,1663
8,4208	5,3182	5,8221	3,3673
7,3856	4,6142	7,7635	4,796
7,743	4,6603	7,7895	4,5549
7,9234	4,5279	8,1086	4,7124
8,411	5,3644	8,8372	6,525
1,9613	6,3399	1,9783	6,447
1,992	6,5086	2,0274	6,5356
2,1606	6,5226	2,4139	6,4681
2,6309	6,4003	2,8316	6,3174
3,1265	6,0025	1,8743	5,7784
1,9343	6,1658	1,9675	6,3802
1,9861	6,491	2,0164	6,538
2,1844	6,5217	2,5113	6,4445
2,7505	6,3533	3,0219	6,0769
1,8908	5,8848	1,9437	6,2269
1,9715	6,4061	1,9876	6,501
2,0159	6,5429	2,1938	6,5071
3,0868	5,6571	2,7568	6,3453
2,9818	6,0317	1,9265	6,1155
1,9654	6,3667	1,9854	6,4863
2,0146	6,5348	2,1562	6,525
2,4437	6,4619	2,6645	6,3885
2,8749	6,2935	3,2131	5,8623
2,1109	6,4612	2,3456	6,4405
2,5373	6,3981	2,6409	6,3597
2,735	6,3218	2,8778	6,2799
3,0932	6,2294	3,3835	6,1354
4,2433	5,6381	3,536	7,8953
4,5119	7,8278	5,2123	7,8265
5,576	7,8707	5,6855	7,9363
5,6561	8,0078	5,6069	8,0781

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
5,7721	8,0975	6,71	7,6712
6,534	6,2684	6,5785	6,3982
6,7119	6,5601	6,8576	6,7719
6,9323	7,0543	6,8976	7,3914
6,8262	7,7236	6,9949	7,9128
7,855	7,8501	6,7656	6,06
6,8787	6,2869	7,0684	6,4817
7,2487	6,6844	7,3108	6,9305
7,2215	7,1513	7,2158	7,2984
7,9195	7,6617	8,8513	7,7435
6,7513	6,3931	6,9439	6,3757
6,9036	6,0832	6,6144	5,571
6,5983	5,3728	7,2514	5,8323
7,9515	6,1718	8,4513	6,3015
8,8536	6,7462	7,7276	4,7602
7,7593	4,7544	7,8811	4,773
8,0396	4,867	8,2202	5,0993
8,4308	5,5059	8,663	6,0578
8,8733	6,6522	9,0037	7,1564
1,9746	6,4253	1,986	6,4919
2,0008	6,5305	2,0534	6,5418
2,2191	6,5158	2,4696	6,4571
2,6639	6,3909	2,8543	6,3001
3,1369	5,8885	1,9047	5,9748
1,9529	6,286	1,978	6,4457
1,9963	6,5204	2,0698	6,5377
2,3241	6,4915	2,5998	6,4141
2,814	6,3244	3,0991	5,9795
1,8911	5,8869	1,9509	6,2728
1,979	6,4502	2,0031	6,5227
2,1142	6,5282	2,3966	6,471
2,6377	6,3962	2,8549	6,3077
3,1863	5,9543	1,9326	6,1548
1,9757	6,4228	2,0165	6,5063
2,1699	6,5037	2,4297	6,4502
2,6204	6,39	2,7847	6,3282
3,0406	6,2411	3,5595	5,8343
2,5453	6,372	2,6712	6,3434
2,7	6,3205	2,7456	6,2956
2,8472	6,2665	3,012	6,2318
3,2381	6,1889	3,5302	6,1119
4,3959	5,665	3,8244	8,1187

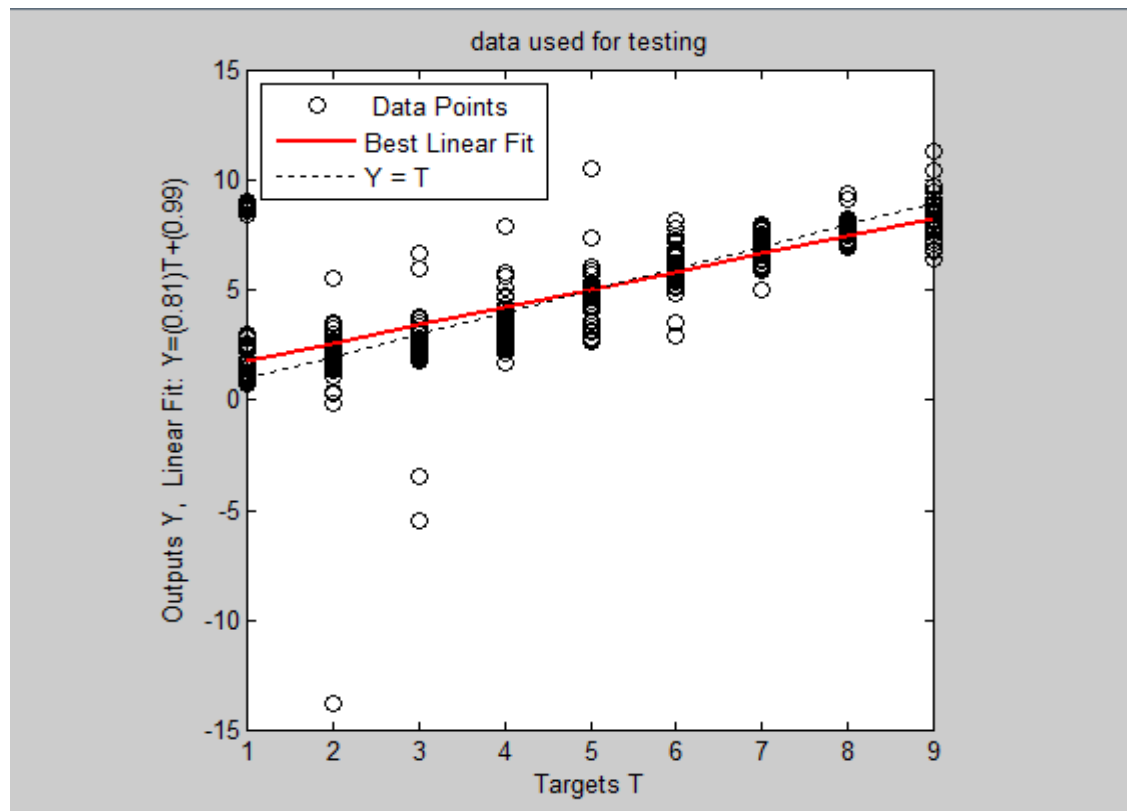
θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
4,4924	8,0825	4,9357	8,0681
5,1668	8,0763	5,2615	8,0976
5,2885	8,1244	5,3126	8,1528
5,5106	8,1396	6,4944	7,6947
5,0551	6,9514	5,5934	6,9677
6,0473	7,0784	6,361	7,2588
6,479	7,4771	6,4204	7,7013
6,3307	7,9036	6,5336	7,98
7,3646	7,6337	6,7677	6,2485
6,8557	6,427	6,9866	6,6265
7,0707	6,8825	7,0642	7,2011
7,0051	7,538	7,0326	7,8026
7,4336	7,9155	8,4148	7,9843
6,9943	6,4168	7,2032	6,6181
7,3116	6,8379	7,2678	7,041
7,1607	7,1497	7,3077	7,2883
7,9501	7,6013	8,6602	7,7247
9,0057	7,5765	8,8732	7,8024
9,016	7,7264	9,0345	7,6034
9,0409	7,5256	9,0438	7,483
9,0437	7,4634	9,0414	7,4577
9,0395	7,4563	9,0329	7,3967
1,9354	6,1725	1,9683	6,3804
1,9922	6,4773	2,0551	6,5105
2,2349	6,4903	2,4769	6,4356
2,6549	6,3745	2,8631	6,3015
3,258	6,1062	1,7933	5,2547
1,9197	6,0717	1,9694	6,3854
2,0077	6,4927	2,1546	6,5006
2,4357	6,4446	2,6429	6,3769
2,8613	6,3004	3,2798	6,1104
1,8761	5,7897	1,9558	6,3006
1,9972	6,4628	2,121	6,4927
2,3798	6,4504	2,5862	6,3918
2,7376	6,3332	2,9877	6,2607
3,4473	6,0383	2,0161	6,4146
2,2087	6,4471	2,4677	6,4097
2,6129	6,3681	2,6919	6,331
2,8051	6,2912	3,0016	6,2439
3,2987	6,1778	3,9097	5,8702
3,648	8,1125	3,8526	8,401
3,9561	8,3915	4,0933	8,3779

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
4,2564	8,3597	4,4389	8,3367
4,6373	8,309	4,8955	8,2544
5,8063	7,8386	4,1829	8,0664
4,7959	8,0307	5,1611	8,0264
5,332	8,0441	5,3862	8,0731
5,3883	8,107	5,4151	8,14
5,6871	8,101	6,7169	7,5965
5,2387	7,1684	5,8202	7,2473
6,1879	7,3904	6,3294	7,5607
6,296	7,7322	6,2009	7,8902
6,2281	8,0035	6,63	7,9228
7,4993	7,5261	6,7122	6,572
6,8591	6,7807	6,9317	7,0382
6,9138	7,3242	6,85	7,6015
6,8447	7,8222	7,0458	7,9139
7,5794	7,8644	8,4533	7,8951
7,204	6,6655	7,2747	6,9387
7,2404	7,2186	7,187	7,4281
7,2783	7,5791	7,6901	7,7786
8,3176	7,9546	8,8145	7,9117
9,0232	7,6936	7,9991	1,7422
7,563	3,8673	7,5216	5,7894
8,6522	7,7034	8,8375	7,7632
8,9358	7,7278	8,9838	7,6398
8,9716	7,4445	8,778	6,8506
5,1955	1,7841	1,8779	5,799
6,1846	1,9414	2,0003	6,3785
6,442	2,1434	2,415	6,4184
6,3685	2,6121	2,7448	6,3116
6,2166	3,1371	1,7671	5,0852
5,8102	1,88	1,9543	6,2262
6,397	2,0564	2,3078	6,4189
6,3778	2,5736	2,6763	6,335
6,2814	2,8195	3,2534	6,1885
6,2591	2,0498	2,3562	6,332
6,3126	2,6882	2,7851	6,2939
6,2821	2,7582	2,7742	6,2642
2,8983	6,236	3,1618	6,1915
3,9647	6,833	3,4742	8,3372
3,6157	8,3456	3,7798	8,3501
3,9554	8,3483	4,1378	8,3404
4,3292	8,3268	4,5339	8,3072

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
4,7605	8,2807	5,2386	8,1469
3,7504	8,1842	4,2405	8,1659
4,6459	8,1418	4,9212	8,1304
5,0825	8,1326	5,1667	8,1443
5,2157	8,1622	5,3403	8,1705
6,1596	7,8577	4,6683	7,7157
5,3475	7,7098	5,7319	7,7559
5,8786	7,8288	5,8731	7,9116
5,8079	7,9961	5,815	8,0676
6,1609	8,0131	7,1114	7,5136
6,2049	7,1711	6,4281	7,3457
6,4805	7,5307	6,4238	7,7068
6,352	7,8621	6,3866	7,9705
6,6515	7,9533	7,1802	7,7223
8,019	7,617	6,9608	7,1253
6,921	7,4054	6,8693	7,647
6,8817	7,822	7,0228	7,9046
7,3266	7,8992	7,7889	7,8766
8,3522	7,9066	8,8438	7,8678
7,2056	7,2718	7,2163	7,397
7,4953	7,5655	7,9801	7,7675
8,4505	7,8691	8,777	7,8371
8,9559	7,7338	9,0308	7,6231
9,0429	7,5367	8,0487	7,4434
8,7234	7,8579	8,9428	7,823
9,0106	7,7186	9,0309	7,6316
9,0358	7,5696	9,0375	7,5235
9,0371	7,4633	8,9197	7,1064
1,9674	6,3798	1,9256	6,1097
1,8299	5,4914	1,7216	4,792
1,7225	4,7973	1,8486	5,6097
1,9702	6,2803	2,3176	6,4217
2,6981	6,3253	1,9661	6,3717
1,9136	6,0323	1,8716	5,7583
1,9151	5,9541	2,1425	6,2269
2,6666	6,2663	2,8041	6,2574



5.13: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.7



5.14: Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για id=0.7

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
1,0324	0,9616	1,0326	0,9621
1,0338	0,9643	1,0362	0,969
1,038	0,9723	1,043	0,9816
1,1038	1,1309	1,1306	1,6591
1,0266	1,9379	11,2272	4,3037
2,0057	0,9902	0,347	0,0727
1,9938	1,023	3,437	1,3134
2	0,9832	11,929	4,577
1,9979	1,0038	-13,8336	-6,6888
2,0005	1,0002	2,2134	6,7863
3,0091	1,0239	2,879	0,9664
2,9972	0,9361	3,1119	0,8251
2,98	0,9649	2,8478	1,2111
2,9678	1,0525	3,3667	1,043
3,2661	0,814	3,4153	0,9303
3,7116	1,0982	4,0206	1,1351
4,2927	1,1364	4,3459	0,5193
4,1969	0,933	4,8126	1,1559
4,0004	1,0001	3,3315	34,4386
4	1	5,2482	0,9666
5,0313	0,9859	4,9044	0,7282
4,9648	1,014	5,1072	2,1549
4,8031	1,0175	4,3396	1,4791
5,0854	1,1268	5,2076	1,1124
5,2749	1,1269	5,5176	1,0451
5,8398	0,9571	6,0421	1,1554
5,9939	0,8827	7,8286	1,5072
5,7997	0,774	5,5881	0,9912
5,8678	0,9051	6,1112	0,9019
6,2873	1,1502	6,3358	0,7977
6,721	1,1632	7,9935	1,5097
7,6891	1,2839	6,47	0,678
6,7332	0,9209	6,857	0,5797
7,1485	0,8762	7,8522	1,2168
7,9769	1,4856	7,6219	1,1748
7,5838	1,1121	8,1383	1,5496
7,9198	1,0809	7,9232	1,3811
7,4004	0,8899	7,1729	0,6391
7,3103	0,7519	7,6514	1,0373
8,0494	1,3535	8,2921	1,5779
8,5151	1,6417	8,1211	1,3472

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
8,4891	1,6714	8,5577	1,7714
8,587	1,7851	8,6785	1,7675
8,8134	1,7144	8,9566	1,641
9,067	1,762	9,0613	2,7226
1,1011	1,7745	1,0625	1,8718
1,0417	1,9117	1,0607	1,8781
1,1479	1,6711	1,4573	1,1548
1,6692	2,398	3,0023	0,5157
2,3839	6,4563	0,369	1,4929
1,7232	2,009	1,5838	2,467
1,6798	1,8943	1,9326	0,9679
1,571	1,8322	1,3628	3,5839
2,224	2,225	2,1676	6,5434
2,3277	1,6666	5,9734	2,5405
2,9584	2,1869	-5,5077	-0,4253
3,0422	1,8514	-3,4671	-5,1565
3,5251	1,421	6,6986	3,2584
3,9177	1,7522	2,3873	2,0781
2,9926	1,9971	7,9313	3,2858
3,9773	2,0108	1,7311	1,6254
4,1537	2,5563	4,7968	2,5057
4,6215	2,1278	5,6862	2,7532
3,858	1,6632	4,033	1,9494
4,1935	2,1522	4,3461	2,2224
4,5026	2,1189	4,6521	1,9092
4,7386	1,7819	4,7139	1,7478
5,0894	2,291	4,828	2,6916
5,0177	1,9975	10,5379	3,3924
5,0523	2,0231	3,5318	2,0596
6,0398	2,7161	6,4953	3,463
6,7664	3,8394	6,8696	4,7914
4,9786	2,5885	5,136	2,4157
5,3336	2,2746	5,6262	2,2411
5,9861	2,4014	6,3565	2,878
7,1248	2,6638	7,7804	3,6003
7,4169	2,9459	5,9849	2,2945
6,9779	2,3426	7,5977	2,3343
7,8475	2,3463	7,9096	2,3784
7,9168	2,4549	7,9593	2,5562
8,1298	2,5328	8,3176	2,063
7,8192	1,5082	8,0296	1,649
7,9346	1,5756	7,825	1,4745

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
7,8231	1,4721	7,9386	1,5758
8,1374	1,7389	8,3088	1,8394
8,4124	1,7076	8,077	4,0796
9,3604	2,6314	8,7445	4,2452
8,8785	1,7856	8,8793	1,6375
8,9109	1,678	8,9503	1,8986
8,9711	2,4416	8,9486	3,4774
1,2322	3,0936	0,7721	4,8099
0,3258	4,2117	0,8902	5,314
1,2894	6,2357	1,5232	6,5168
1,6923	6,641	2,1942	6,5498
2,9284	6,3261	1,6837	6,5526
2,106	3,2722	2,3551	3,2128
2,6414	2,7985	2,6423	3,6925
2,4235	6,3147	2,3251	8,1946
1,9437	6,5404	3,0181	6,2689
1,7685	2,7326	2,1992	3,7742
2,5724	3,5361	2,6765	4,0296
3,0911	2,6422	3,8405	-1,0876
3,3867	3,1888	3,1558	7,7923
3,4633	6,1095	3,722	0,7058
3,158	3,0036	3,4456	3,3966
3,6729	3,0285	3,837	2,9658
4,0415	2,9789	3,9247	4,3176
3,8484	3,9618	5,8039	2,3674
4,1804	3,2974	4,6865	2,9955
4,9718	2,6371	5,2073	2,3397
5,5322	2,2001	5,9579	2,3384
6,4129	2,9841	7,4492	2,9471
7,3023	2,5722	4,2566	2,6197
5,1906	2,7162	5,2011	2,7092
4,9363	2,4083	4,851	2,227
5,4661	3,2579	5,8809	3,1321
6,7298	3,4657	7,8548	3,5029
5,3755	2,7276	5,8914	2,9952
5,9412	3,1514	5,7183	3,0569
5,4406	2,7693	6,0906	4,2274
6,3431	3,9737	7,0909	3,9456
7,9452	3,4637	7,4123	2,4545
7,3358	2,7075	7,3682	3,17
7,4436	3,6975	6,7345	2,4645
6,7796	2,7879	7,034	3,1793

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
8,2047	2,973	9,4507	3,0657
7,6006	2,5954	7,7204	2,7078
7,7268	2,8494	7,7328	2,9794
7,806	3,0247	7,9716	2,9082
8,155	2,5815	8,3182	2,1114
8,6674	1,6325	7,33	4,9434
7,6435	4,5132	7,7613	4,3978
8,0776	3,4771	8,1503	3,8034
8,2502	4,2385	7,8345	3,609
8,2456	4,8878	8,9212	5,1698
0,976	5,479	1,1976	5,885
1,4034	6,2755	1,5383	6,5038
1,6671	6,6123	1,9255	6,6051
2,3763	6,4913	2,8547	6,3451
3,4888	6,1199	1,4423	3,1233
1,407	3,7081	1,5687	3,93
2,0933	4,1094	1,6947	6,6167
1,9806	6,6014	2,4148	6,4878
2,7634	6,3884	3,2964	6,1583
1,839	4,0167	1,8603	4,5671
1,9224	5,1458	1,9677	6,2454
2,2835	6,3479	2,4876	6,3941
2,5132	6,4605	2,6471	6,4447
2,7894	6,1264	2,7349	3,6461
3,0297	3,8373	3,5784	3,2613
3,7083	3,2565	3,6231	3,5571
3,4657	4,0128	3,3992	4,4619
3,5927	4,6383	2,5533	6,3921
3,2098	6,2077	3,3717	6,1433
3,4985	6,0988	3,5762	6,0913
3,6302	6,1333	3,5847	6,642
4,0539	5,9495	5,1434	6,2364
6,9683	5,944	6,0652	3,3058
5,9022	3,2623	5,7483	3,1118
6,488	4,6688	6,6674	4,4347
7,1165	4,2567	7,4875	4,2717
7,9918	3,3657	8,2152	4,2524
5,9644	3,1583	5,767	3,0976
5,515	2,8604	5,9992	4,026
6,2102	4,1405	6,6157	3,9824
7,1668	4,0032	7,8045	3,2039
8,1418	4,0758	5,0704	2,3254

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
5,7795	3,8238	5,905	3,682
6,2856	3,6379	6,7874	3,7046
7,1511	3,9564	7,7744	3,1246
8,0523	3,8392	7,7257	3,5256
6,596	3,3192	7,2818	2,6702
7,622	3,1998	7,8692	3,687
8,0215	4,0268	7,3549	2,6299
7,6896	3,581	8,1224	4,6576
9,1195	4,4497	7,8513	5,3219
7,7645	4,6908	7,8993	4,6151
7,9171	4,4992	8,1906	3,6297
8,4314	4,0634	8,5333	4,5205
8,0775	4,0302	8,454	5,313
1,7894	5,8163	1,8189	6,4992
2,0645	6,5049	2,3252	6,4664
2,5074	6,4423	2,5997	6,4399
2,724	6,4119	3,0002	6,2858
2,6728	6,0336	2,1173	3,2977
2,0108	4,5518	1,9087	6,1932
2,2098	6,3406	2,4487	6,3758
2,5088	6,436	2,5283	6,476
2,7685	6,3975	2,4992	6,0299
2,2163	5,1732	2,0457	5,5181
2,1251	5,9683	2,3044	6,1989
2,405	6,3059	2,3998	6,3695
2,464	6,3225	2,7858	6,1257
2,7123	5,5437	2,424	4,8552
2,4649	5,3579	2,8654	4,9611
3,1148	4,6402	3,1444	4,6403
3,1331	4,7681	3,2292	4,888
3,5291	4,7973	2,6819	5,8581
2,4548	6,4616	2,5855	6,44
2,6859	6,4188	2,8248	6,3738
3,0135	6,2948	3,1535	6,1768
3,0192	6,0427	2,6769	6,9822
4,9735	5,256	5,207	5,0221
5,7786	5,6665	5,7446	5,9675
5,9719	6,1456	6,2279	6,3848
6,405	6,8887	6,6335	7,6824
7,2964	8,14	7,2449	7,7266
5,9876	4,942	7,3659	5,4577
5,783	5,2696	2,9585	2,0397

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
5,962	4,9842	7,5378	6,3095
7,487	6,4393	7,2721	6,8144
7,9216	5,4725	7,742	3,974
7,3565	4,2718	7,7546	5,0001
7,7658	4,6855	7,8911	4,6264
7,9223	4,5193	8,2009	3,6565
8,5584	4,3043	8,0961	4,0586
7,4716	5,1925	7,5298	4,8074
7,7204	4,6344	7,8494	4,5355
7,9397	4,1789	8,1529	3,6093
8,2957	3,9849	7,9166	3,4819
8,3369	5,0331	7,9528	4,471
7,7883	4,3921	6,8559	3,6041
7,761	3,6658	9,1493	5,1852
9,204	5,3703	8,5235	4,6282
8,4001	4,8765	8,6369	5,4206
2,2588	6,2188	2,3799	6,2939
2,4242	6,3686	2,4077	6,4376
2,3933	6,4744	2,4568	6,4479
2,6679	6,3351	2,9256	6,0846
1,9387	7,375	1,981	5,5675
2,0954	5,9696	2,2797	6,2006
2,3967	6,3043	2,4005	6,3752
2,4162	6,3631	2,5848	6,2299
2,9689	5,9736	2,2566	6,6148
2,095	5,4295	2,1388	5,8394
2,3002	6,0991	2,4478	6,1127
2,5144	6,0479	2,5925	5,9254
2,788	5,7592	3,173	5,5205
2,3729	6,6673	2,0709	5,9948
2,28	6,2208	2,4045	6,3256
2,4029	6,4141	2,3913	6,4456
2,4881	6,3819	2,7559	6,2212
2,9374	5,8777	2,8888	4,8171
2,068	6,5805	2,3796	6,4969
2,5922	6,4395	2,7561	6,3918
2,9513	6,3239	3,1826	6,2236
3,274	6,0977	3,0933	6,1522
4,4067	5,4649	4,9491	6,7495
5,1964	7,6723	5,0029	7,7455
5,1681	7,7639	5,4554	7,8286

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
5,7825	8,0272	6,1542	8,5182
6,0314	6,889	6,6975	8,13
5,9489	5,7712	5,4879	4,4897
5,9894	6,0553	6,0997	6,2804
6,4444	6,5904	6,6853	7,0577
6,7713	7,6768	6,998	7,8032
7,2207	7,5284	7,402	7,8784
7,3071	6,3984	7,8553	6,8397
8,0231	6,4623	8,0007	7,1299
7,7707	7,6299	7,5333	7,1824
7,1996	6,8956	7,0485	6,9801
8,2466	6,0255	7,8413	6,2861
7,9652	5,7614	8,199	5,1745
7,9519	5,8025	7,317	7,0661
7,2141	6,8121	7,6167	7,1202
8,8573	6,2258	6,4774	2,9975
8,9718	5,8303	9,7987	6,6625
9,3772	6,2641	8,4449	4,6745
8,4751	4,9581	8,5871	5,4293
8,6472	5,5586	8,9334	7,3818
2,3248	6,2078	2,397	6,2701
2,4136	6,3138	2,4133	6,3241
2,4519	6,2819	2,5791	6,1793
2,8364	6,0215	3,0596	5,6857
2,7273	5,2762	2,0223	5,787
2,1927	6,1594	2,3663	6,2782
2,4111	6,3741	2,3886	6,4321
2,4366	6,3989	2,657	6,2536
2,9874	5,965	2,1078	7,0084
1,9782	5,8848	2,2021	6,216
2,3978	6,3106	2,4386	6,4048
2,4061	6,4786	2,4483	6,4787
2,6678	6,3713	2,8921	6,1036
2,1282	6,8196	2,0067	6,3745
2,3258	6,3904	2,4961	6,4077
2,5295	6,447	2,56	6,4654
2,6956	6,4273	2,9172	6,308
2,6167	6,0467	3,0776	5,2534
1,7891	6,5982	2,1134	6,5472
2,4643	6,4559	2,7742	6,3629
3,0736	6,2637	3,3821	6,1597
3,6214	6,0911	3,6531	6,1641

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
4,6459	5,7907	4,6552	8,3764
4,4808	7,9192	4,54	7,9137
4,8137	7,8784	5,1798	7,8735
5,5662	7,957	5,9056	8,2798
5,6795	6,6399	5,9351	11,2193
5,6705	7,0501	6,2306	7,8131
6,1002	8,0257	6,2737	8,0871
6,1993	7,5157	6,0069	6,991
6,5092	8,1297	7,3897	9,1043
7,1834	7,7436	6,143	6,0246
6,6261	6,7023	6,5824	6,8512
6,8664	7,1381	7,0956	7,4831
7,0915	7,8349	7,1364	7,6328
7,3569	7,4148	7,2342	7,7021
7,8815	7,1117	8,0614	6,201
8,1276	6,5719	7,9282	7,3601
7,7223	7,3461	7,3104	7,3879
7,2011	6,8868	6,8287	6,3408
8,6366	7,2613	9,5381	10,5945
9,2453	7,5432	9,2012	7,1328
9,1648	6,7987	9,1513	6,6302
9,1417	7,0692	8,9507	8,2232
8,7398	8,6311	8,7442	7,2201
1,9913	6,4001	2,2276	6,4091
2,4185	6,4063	2,5169	6,4217
2,5448	6,4495	2,5911	6,4567
2,7567	6,4039	2,9499	6,2309
2,1662	6,8502	1,9393	5,0187
1,8985	6,3977	2,2097	6,4252
2,4485	6,4174	2,5426	6,4367
2,5899	6,4523	2,7514	6,4054
2,9792	6,2315	2,2769	6,7283
1,7425	6,1446	1,9409	6,5118
2,2577	6,4788	2,485	6,4462
2,5946	6,4393	2,7076	6,416
2,9345	6,3284	3,042	6,1258
2,3591	7,5529	1,7667	6,6457
2,0258	6,597	2,3325	6,5124
2,5851	6,4387	2,807	6,3689
3,0699	6,2764	3,3647	6,1585
3,4275	6,0799	3,7558	5,8897
3,196	8,3977	3,4527	8,3742

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
3,8332	8,329	4,2816	8,243
4,7428	8,109	4,2505	6,2314
3,7769	7,8268	4,0995	7,0047
5,0247	7,5039	4,7406	7,8971
4,5807	7,881	4,7411	7,8612
5,0402	7,8415	5,391	7,8822
5,7374	8,0491	6,079	8,5145
5,743	7,0295	6,1567	10,992
5,9853	7,645	5,8161	7,8231
6,0121	7,9707	6,2149	8,022
6,1711	7,7463	6,3913	8,18
7,161	9,1744	6,8934	7,1037
7,1257	8,1368	5,9667	6,0439
6,1025	6,2816	6,4292	6,5735
6,6633	6,9651	6,7502	7,4423
6,8718	7,7955	7,0887	7,7202
7,0958	7,0399	7,2177	8,0154
7,5611	7,3986	7,6935	7,7786
7,6348	8,0253	7,5026	7,8625
7,3251	7,3886	7,1543	6,9816
7,4835	7,6698	7,111	7,2591
9,2157	7,4257	11,3162	6,7109
10,2495	5,2727	10,5017	7,1881
10,0188	9,2057	9,4817	9,0486
9,132	8,3576	8,9504	7,5717
8,8761	6,7282	8,8619	5,8645
0,5896	8,6009	1,26	7,1681
1,5726	6,5916	1,6747	6,642
1,87	6,6327	2,222	6,5437
2,5868	6,4383	2,9496	6,3209
3,4062	6,0984	1,1282	5,9229
1,3866	6,3136	1,5312	6,5073
1,6402	6,6157	1,8361	6,6279
2,2106	6,5405	2,6269	6,4194
3,0714	6,272	3,5396	6,0881
2,3282	6,4267	2,4741	6,7232
2,4142	7,7101	2,5019	8,2116
2,7888	8,2655	2,465	6,4281
2,9792	6,2693	3,5282	6,1017
3,8917	6,1705	2,7632	9,8918
3,0761	8,8156	3,3221	8,3579
3,5961	8,2996	4,0071	8,2378

θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης	θέση βλάβης	μέγεθος βλάβης
4,5361	8,1381	5,0991	8,0178
4,3085	8,6236	3,7056	11,8039
4,0728	8,8994	4,186	8,0484
4,2787	8,0022	4,5387	7,9518
4,9056	7,9066	5,3284	7,9105
5,7169	8,0665	5,3599	6,7321
5,8476	9,9199	5,3261	7,6302
5,1862	7,7044	5,3494	7,7443
5,6082	7,8348	5,8795	8,0362
6,1822	8,4304	6,648	9,1338
6,4034	7,0249	6,8814	8,5334
6,1494	8,074	6,3059	7,9839
6,115	7,2673	6,0051	6,9661
6,3293	7,7115	7,0884	8,7757
7,5415	8,7715	7,1572	7,5354
7,0559	8,939	6,6228	6,8137
6,7849	7,2134	6,8235	7,6241
6,929	7,7849	6,9691	7,735
7,5741	7,9632	7,1664	7,2937
7,2438	7,9044	9,1736	9,2256
7,6464	7,7882	7,5182	7,295
7,0705	7,477	7,2295	6,9339
7,4621	7,6367	6,9994	6,9058
7,5739	7,2664	9,1762	7,2285
9,1127	7,8676	7,123	12,0121
8,6195	9,7569	9,5427	8,7115
9,4115	8,2356	9,1393	8,536
8,8926	8,8844	8,7598	8,5612
8,7496	7,547	8,8065	6,2531
0,9047	9,0445	0,856	9,3146
0,8415	8,8604	1,2133	2,5385
1,2835	6,282	1,2363	5,9695
1,5516	6,5343	1,8956	6,6213
2,779	6,3745	-0,1396	26,5397
1,9705	9,008	2,4288	3,6994
1,8953	8,9746	1,331	16,4534
2,6711	9,1718	5,556	-9,2686

Συμπεράσματα

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπόρεσαν να υπολογίσουν με ακρίβεια τις παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν μέσω του προγράμματος της Matlab και μας έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζουν σχετικά μια ταύτιση με τις μετρήσεις που πήραμε από το νευρωνικό πράγμα που σημαίνει ότι ήταν ικανοποιητικές. Οι αισθητήρες οπτικών ινών διαθέτουν τεράστια πλεονεκτήματα, αν αναλογιστεί κανείς το πλήθος των εφαρμογών που αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε αντίθεση με τους συμβατικούς αισθητήρες (strain gages) και ειδικά σε θέματα όπως τις παρούσες διπλωματικής διατριβής που απαιτούσε να γίνει έλεγχος σε συγκεκριμένα σημεία της πλάκας που σε αντίστοιχη περίπτωση δεν θα μπορούσε να ελεγχθεί με άλλο είδος αισθητήρων. Ο τύπος των αισθητήρων οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκε εστιάζει σε πιο τοπικά φαινόμενα, σε σχέση με τους συμβατικούς αισθητήρες χάρη στο πολύ μικρό μήκος αναφοράς τους. Με τη χρήση τους ήταν εφικτός ο υπολογισμός παραμορφώσεων και τον έλεγχο βλαβών.

Έγινε έτσι αντιληπτό, ότι οι οπτικοί αισθητήρες τοποθετούνται σε σημεία που είναι αδύνατον να τοποθετηθούν οι συμβατικοί αισθητήρες. Η απογύμνωση των συγκεκριμένων οπτικών ινών από το εξωτερικό τους περίβλημα είναι εφικτή, εφόσον αυτή πραγματοποιηθεί με ιδιαίτερη προσοχή. Με τη διαδικασία αυτή, μειώνεται αισθητά το πάχος των οπτικών ινών (περίπου 3 φορές) και δίνεται η δυνατότητα σε αυτές να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος με τέτοιο τρόπο, ώστε να επηρεάζουν λιγότερο τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στο οποίο εισέρχονται.

Από την σύγκριση των πλακών με διαφορετικό υλικό παρατηρήθηκε ότι δεν διαφέρουν αρκετά τα αποτελέσματα πράγμα που σημαίνει ότι η τοποθέτηση των αισθητήρων οπτικών ινών μέσα στη πλάκα δεν επηρεάζει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος, ελαττώνοντας με κάποιο τρόπο το φορτίο αστοχίας του. Οδηγούμαστε έτσι στο συμπέρασμα ότι οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά εύκολα για την παρατήρηση των μεταβολών των παραμορφώσεων και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως είναι μια σύνθετη κατασκευή ή ένα μέσο. Γι' αυτό άλλωστε η χρήση τους, θεωρείται ιδανική για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (SHM).

Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.sff.net/people/jeff.hecht/chron.html>
- [2] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, «Optical networks: A practical perspective», Academic Press Inc. , NT, 2nd Ed. , 2002.
- [3] G. P. Agrawal , «Fiber Optic Communication Systems», 3rd Ed. , John Wiley & Sons Inc. , NY, 2002.
- [4] K. M. Sivalingam and S. Subramaniam, «Optical WDM Networks Principles and Practice», Kluwer Academic Publishers, NY, 2000.
- [5] G. P. Agrawal , «Nonlinear Fiber Optics», 3rd Ed. , Academic Press Inc. , CA, 2001
- [6] Roger L. Freeman, «Fiber Optic Systems for Telecommunications», John Wiley and Sons, NewYork, 2002.
- [7] Harry J. R. Dutton, «Understanding Optical Communications», 1998.
- [8] Ηρακλής Αβραμόπουλος, «Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες» ,Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [9] <http://ine.uaf.edu/autc/files/2011/08/Y.Dong-Final-Report-309036.pdf>.
- [10] Leo Setian, Applications in Electro-Optics, Prentice Hall, 2002.
- [11] Ray Tricker, Optoelectronics and Fiber Optic Technology , Newnes, 2002.
- [12] Djafar K. Mynbaev and Lowell L. Scheiner, Fiber-Optic Communications Technology, PrenticeHall, 2001.
- [13] Debra Cameron, Optical Networking, A Wiley Tech Brief , Wiley, 2002.
- [14] David Greenfield, The Essential Guide to Optical Networks, Prentice Hall PTR, 2002.
- [15] Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd Ed., Wiley, 2002.
- [16] Gunther Mahlke and Peter Gossing, Fiber Optic Cables , 4th Ed., PublicisMCD, 2001.
- [17] Jeff Hecht, Understanding Fiber Optics , 4th Ed., Prentice Hall, 2002.
- [18] Michael Bass and Eric Van Stryland, «Fiber Optics Handbook—Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications», McGraw-Hill, 2002.
- [19] Optical fiber communications Principles & Practice J.M.Senior 3rd Edition
- [20] «Recommended Practices for Optical Fiber Construction and Testing» , 2nd Ed., SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineers), 2001.
- [21] Robert C. Elsenpeter and Toby J. Velte, «Optical Networking: A Beginner's Guide» , McGraw-Hill/Osborne .
- [22] Rocencher & Vindrer Optoelectronics Cambridge University Press 2002, 20
Αρχές των LASERS O. Svelto Εκδ. Συμμετρία, 2002.
- [23] Roger L. Freeman, Fiber Optic Systems for Telecommunications , JohnWiley and Sons, NewYork, 2002.
- [24] Fiber optic sensors. F.Yu,S.Yin, Marcel-Dekker, 2002.
- [25] Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Udd, E. (Editor), Wiley-Interscience, New York, NY, 2nd Edition, 2006
- [26] Health Monitoring of airspace structures, W.Staszewski, C.Boller, G.Tomlinson, John Wiley & Sons Inc., 2004
- [27] Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, Jose Miguel Lopez-Higuera, John Wiley & Sons Inc., 2002
- [28] Fiber Optic Sensors, Bahareh Gholamzadeh, and Hooman Nabovati, World Academy of Science, Engineering and Technology 2008
- [29] Fiber Optic Sensors For Structural Control Daniele Inaudi and Andrea del Grosso 2008
- [30] Optical fiber sensors-Principles and components. Dakin and B.Culshaw, Vol.I, Artech House, Boston

- [31] Fiber Optic Methods For Structural Health Monitoring, Branko Glisic and Daniele Inaudi, John Wiley & Sons , Ltd,2007
- [32] Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, Jose Miguel Lopez-Higuera, John Wiley & Sons Inc., 2002.
- [33] Fabry-Pérot Fiber-Optic Sensors for Physical Parameters Measurement in Challenging Conditions , Éric Pinet R & D Department, FISO Technologies inc. 2009
- [34] FISO Technologies Inc.: www.fiso.com, SMARTEC S.A.: www.smartec.ch or Roctest Ltd.: www.roctest.com
- [35] Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects, Daniele Inaudi, Smartec SA, Switzerland, Roctest Ltd, Canada 2007
- [36] Monitoring with Fiber Optic Sensors of a Cable-Stayed Bridge in the Port of Venice, Del Grosso, A. Torre, G. Brunetti, D. Inaudi, A. Pietrogrande, 2006
- [37] Stress measurements in the main cable of a suspension bridge under dead and traffic loads, M. Talbot & J.F. Laflamme, B. Glišić, 2007
- [38] Monitoring of Concrete Bridges with Long-Gage Fiber Optic Sensors, Daniele Inaudi, Samuel Vupillot, 2000
- [39] Structural Monitoring of the Manhattan cable stayed bridge, Manhattan, New York, 2005-2007, Micron Optics, Smartec
- [40] Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors, B. Glišić & D. Inaudi Smartec SA, J.M. Lau, Y.C. Mok & C.T. Ng Housing & Development Board (HDB), Singapore 2005
- [41] Case Study: Application of Structural Health Monitoring technology in civil structures in mainland China, Hui Li, Zhiming Guo, Jinping Ou, Zonglian Guo
- [42] Monitoring Program Criteria Development for Evaluation of Groined Masonry Arch Stability, A. Korjakins, K. Bondars, 2008
- [43] Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing, Daniele Inaudi, Branko Glisic, Smartec SA, Canada, 2006
- [44] Structural health monitoring R&D at the “European Research Establishments in Aeronautics” (EREA), Daniel L. Balageas,2002
- [45] Fiber Optic Wing Shape Sensing on NASA’s Ikhana UAV, L.Richards, A.R.Parker, W.L.Ko , A. Piazza, NASA,2008
- [46] Case study – Marine: Four Island Tanker, Must System, Vinashin shipyard (Vietnam), Micron Optics, Smartec SA, 2007
- [47] Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blade, M.A. Rumsey, J.A. Paquette, Sandia National Laboratories, 2008
- [48] Fiber Optic Sensors, Technical market report from BCC Research, fall 2008
- [49] Evolution Chassis and Software, MAN-00079 R2, Fiso technologies Inc., 2007
- [50] Mitra A.K., Das S., Solution of inverse problems by using the boundary element method, in: C.A. Brebbia and M.S. Ingber, eds., Boundary Element Technology VII (Computational Mechanics Pub1 and Elsevier Appl. Science, 1992), 721-731.
- [51] Tanaka M., Masuda Y., An integral equation approach to inverse problems in structural mechanics, in: G. Yagawa and S.N. Atluri, eds., Computational Mechanics 86, Vol. 2 (Springer Verlag, 1986) X1-15, X1-24.
- [52] Tanaka M., Nakamura M., Nakano T., Ishikawa H., Identification of defects by the elastodynamic boundary element method using noisy additional information. In: Brebbia, C. A.; Gipson, G.S. (eds), Boundary Elements XIII, (1991), 799-810, Computational Mechanics Publ. and Elsevier Appl. Science.

- [53] Nishimura N., Kobayashi S., A boundary integral equation method for an inverse problem related to crack detection, *Inter. J. Numer. Methods Engrg.* 32 (1991) 1371-1387
- [54] Mellings S.C., Aliabadi M.H., Three dimensional flaw identification using sensitivity analysis. In: Brebbia, C. A. (ed), *Boundary Element Method XVI*, (1994), 149-156, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston.
- [55] Tosaka N., Utani A., Takahashi H., Unknown defect identification in elastic field by boundary element method with filtering procedure. *Eng Anal Boundary Elem* 15, (1995), 207-215.
- [56] Weijiang C., Chuntu L., A BIEM optimization method for fracture dynamics inverse problem, *Acta Mech. Sinica* 12, (1996), 263-271.
- [57] Oishi A., Yamada K., Yoshimura A., Yagawa G., Quantitative nondestructive evaluation with ultrasonic method using neural networks and computational mechanics. *Comput Mech* 15, (1995), 521-533.
- [58] Stavroulakis G.E., *Inverse and Crack Identification Problems in Engineering Mechanics*, Kluwer Academic Publishers.
- [59] Stavroulakis G.E., Antes H., *Neural crack identification in steady state elastodynamics*, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 1998.
- [60] Yoshimura S., Matsuda A., Yagawa G., New regularization by transformation for neural network based inverse analyses and its application to structure identification. *Int J Num Meth Eng* 39, (1996), 3953- 3968.
- [61] Ingham D.B., Wrobel L.C., (eds.), *Boundary integral formulations for inverse analysis*. Southampton: Computational Mechanics Publications, (1997).
- [62] Achenbach J.D., Quantitative nondestructive evaluation, *Int. J. Solids Struct.* 37 (2000) 13-27.
- [63] McNab I., Dunlop A., Review of artificial intelligence applied to ultrasonic defect evaluation, *Insight* 37 (1), (1995), 11-16.
- [64] Damarla T.R., Karpur P., Bhagat P.K., A self-learning neural net for ultrasonic signal analysis, *Ultrasonics* 30 (5), (1992), 317-324
- [65] Wu X., Ghaboussi J., Garrett J.H., Use of neural networks in detection of structural damage, *Comput. Struct.* 42 (4), (1992), 649-659.
- [66] Masnata M., Neural network classification of flaws detected by ultrasonic means, *NDT&E Int.* 29 (2), (1996), 87-93.0
- [67] Song S.J., Schmerr L.W., Ultrasonic flow classification in weldments using probabilistic neural networks, *J. Nondestr. Eval.* 11 (2), (1992), 69-77.
- [68] Todoroki A., The effect of number of electrodes and diagnostic tool for monitoring the delamination of CFRP laminates by changes in electrical resistance. *Composites Science and Technology* 61, (2001), 1871-1880
- [69] Sakagami T., Ogura K., New flaw inspection technique based on infrared thermal images under joule effect heating. *JSME International Journal Series A* 37, (1994), 380-388.
- [70] http://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neural_network
- [71] Yoshimura S., Matsuda A., Yagawa G., New regularization by transformation for neural network based inverse analyses and its application to structure identification. *Int J Num Meth Eng* 39, (1996), 3953- 3968.
- [72] Αντωνιάδης Ι., Προβατίδης, Χ., *Πρόχειρες Σημειώσεις του Μαθήματος Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές*, Αθήνα 2004.