

# ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΟ ΔΗΜΑΡΧΕΙΟ ΚΟΡΔΕΛΙΟΥ ΕΥΟΣΜΟΥ

ΚΑΡΑΜΙΧΑΗΛ ΜΙΧΑΛΗΣ 20110038

ΚΑΡΑΜΙΧΑΗΛ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ 20130087

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Παρασκευή Μεντζέλου

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται το θέμα των οπτικών ινών και τη χρήση τους στον τομέα των πολιτικών μηχανικών. Πρόκειται για ένα σχετικά νέο επίτευγμα, καθώς εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1960 και έκτοτε εφαρμόζεται σε όλο και περισσότερους τομείς. Ειδικότερα, οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων στις τηλεπικοινωνίες και το διαδίκτυο, στις εφαρμογές ιατρική και σε έργα υποδομής. Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι πολλά και για αυτόν τον λόγο επιλέγονται από τους ειδικούς σε διάφορους τομείς.

Σε ότι αφορά τους πολιτικούς μηχανικούς χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες σε πολλά έργα ανά τον κόσμο, όπως είναι οι γέφυρες και οι αυτοκινητόδρομοι με απώτερο σκοπό την ασφάλεια των χρηστών και κατ' επέκταση τα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη, καθώς εντοπίζονται μέσω αυτών ζημιές και προβλήματα ήδη από τα πρώτα στάδια εμφάνισής τους, ώστε να αποκατασταθούν άμεσα.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας παρουσιάζονται διάφορες έρευνες και μελέτες που έχουν λάβει χώρα επί του θέματος . Επίσης παρουσιάζεται η περίπτωση εγκατάστασης οπτικών ινών στη Θεσσαλονίκη και πιο συγκεκριμένα στο Δημαρχείο Κορδελιού – Ευόσμου με τη χρήση εικόνων και σχημάτων.

**Λέξεις/ φράσεις κλειδιά:** οπτικές ίνες, αισθητήρες οπτικών ινών, τομέας πολιτικών μηχανικών, καλώδια χαλκού

## **SUMMARY**

This thesis deals with the subject of optical fibers and their use in civil engineering. This is a relatively new achievement, as it appeared in the 1960s and has since been applied in more and more fields. In particular, optical fibers are used, among others, in telecommunications and the internet, in medical applications and in infrastructure projects. The advantages of optical fibers are many and for this reason they are chosen by the experts in various fields.

As far as civil engineers are concerned, they use optical fibers in many projects around the world, such as bridges and highways, with the ultimate goal of user safety and, by extension, economic and social benefits, as damages and problems are identified through them as early as the first stages of their appearance, so that they can be restored immediately.

In the context of this work, various researches and studies that have taken place on the subject are presented and the case of the installation of optical fibers in Thessaloniki and more specifically in the City Hall of Kordelio - Evosmos is presented using images and diagrams.

**Key words/phrases:** fiber optics, fiber optic sensors, civil engineering, copper cables

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	9
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	9
1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	10
1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ.....	15
1.4 ΠΡΟΦΙΛ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ.....	16
1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	18
1.6 ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ .....	20
1.7 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΗΣ.....	22
1.8 ΡΟΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΣΕ ΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΙ ΙΝΕΣ .....	25
1.8.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΙΝΩΝ .....	26
1.8.2 ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	33
2.1 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	33
2.2.1 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	42
2.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ .....	46
3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ (ΣΗΜ) ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (DOFS) ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ .....	64
3.2.1 Εργαστηριακές Δοκιμές.....	64
3.2.2 Γεωτεχνικές Κατασκευές .....	73
Κεφάλαιο 4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ .....	75
4.1 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΗΜΑΡΧΕΙΟΥ ΚΟΡΔΕΛΙΟΥ – ΕΥΟΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΑΤΕΙΑ ΤΟΥ ΕΥΟΣΜΟΥ .....	75
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 - Διάδοση φωτός σε πολυλειτουργική οπτική ίνα διαβαθμισμένου δείκτη (που έχει ομοιογενή επένδυση).....	14
Εικόνα 2 - Γεωμετρία μιας τυπικής πολυτροπικής οπτικής ίνας (π000ου έχει κυκλική διατομή) .....	15
Εικόνα 3 - Γεωμετρία μιας τυπικής μονοτροπικής οπτικής ίνας (που έχει κυκλική διατομή) 16	
Εικόνα 4 - Καλώδια πολλαπλών ινών με πολλά ζεύγη ινών που περιβάλλουν ένα κεντρικό μέλος αντοχής .....	22
Εικόνα 5 - Καλώδια πολλαπλών ινών με μορφή καλωδίων με κορδέλα .....	23
Εικόνα 6 - Εσωτερικός χώρος καλωδίου .....	24
Εικόνα 7 - Διαφορά χρησιμοποιούμενων χρωμάτων για καλώδια 1-12 κλώνων ινών .....	24
Εικόνα 8 - Καλώδια διασύνδεσης .....	25
Εικόνα 9 - Μέρη οπτικής ίνας .....	33
Εικόνα 10 - Διαδρομή του μηνύματος δεδομένων μέσω πολλών διεργασιών .....	34
Εικόνα 11 - Εξαρτήματα οπτικού πομπού .....	37
Εικόνα 12 - Εξαρτήματα οπτικού δέκτη .....	38
Εικόνα 13 - Διάδοση φωτός σε πολύτροπη ίνα .....	40
Εικόνα 14 - Ανάκλαση και διάθλαση.....	40
Εικόνα 15 - Διάθλαση του νόμου Snels.....	41
Εικόνα 16 - Ορισμός πεδίου λειτουργίας .....	41
Εικόνα 17 - Οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου .....	43
Εικόνα 18 - Η γέφυρα Versoix .....	47
Εικόνα 19 - Το σχηματικό διάγραμμα της θέσης συμβολόμετρων SOFO στη γέφυρα Versoix .....	48
Εικόνα 20 - Διαφορετικά σχέδια κηλίδων στο σχισμένο άκρο του πολύτροπης οπτικής ίνας .....	50
Εικόνα 21 - Μια ανιχνευτική ράβδος ενίσχυσης από χάλυβα με αισθητήρα καταπόνησης FBG και θερμοστοιχείο.....	51
Εικόνα 22 - Σχηματικό διάγραμμα της σημειακής συσκευασίας FRP Αισθητήρες FBG. α) αισθητήρα καταπόνησης και β) αισθητήρα θερμοκρασίας .....	52
Εικόνα 23 - Σχηματικό διάγραμμα του έξυπνου καλωδίου, το οποίο αποτελείται ένα καλώδιο FRP-FBG στη μέση και έξι χαλύβδινα σύρματα σε σπείρα .....	53
Εικόνα 24 - Σχηματικό διάγραμμα της κατασκευής του FRP FBG .....	54
Εικόνα 25 - Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα καταπόνησης FBG με αυτοαντιστάθμιση θερμοκρασίας .....	55
Εικόνα 26 - Το DFOS είναι μια τεχνολογία για ολόκληρο τον κύκλο ζωής της μονάδας μιας δομής.....	56
Εικόνα 27 - Αλλαγή στις δημοσιεύσεις DFOS στην Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών 57	
Εικόνα 28 - Η διάταξη ινών και το δείγμα δοκιμής.....	59
Εικόνα 29 - Σχηματικό σχέδιο δοκιμής διάταξης ινών και φόρτωσης.....	59
Εικόνα 30 - Μετρημένη κατανομή καταπόνησης κατά μήκος της ίνας: Brillouin ( αριστερά ) και Rayleigh ( δεξιά ) . .....	60
Εικόνα 31 - Επιτευχθείσα μετατόπιση (εκτροπή) κατά μήκος της ίνας: Brillouin ( αριστερά ) και Rayleigh ( δεξιά ) επαληθευμένη με μετρήσεις μετατόπισης .....	61
Εικόνα 32 - Μετρήσεις μετατόπισης (θήκη χωρίς αξονική δύναμη). .....	62
Εικόνα 33 - Μετρήσεις μετατόπισης, εγκατεστημένη ίνα (αριστερά) και εργοστάσιο (δεξιά) 62	

Εικόνα 34 - Μετρήσεις μετατόπισης: δεδομένα κλίσεων και οπτικών ινών .....	63
Εικόνα 35 - Γεωμετρία του αυλακιού στην όψη λεπτομέρειας της ράβδου ( a ) του άκρου της συνδεδεμένης ζώνης ( b ).....	65
Εικόνα 36 - ( α ) Κατανομές θλιπτικής και ( β ) τάσης εφελκυσμού που μετρώνται από κατανεμημένους αισθητήρες Brillouin .....	66
Εικόνα 37 – Διαμόρφωση προτεινόμενου Συστήματος Δομικής Παρακολούθησης Υγείας..	67
Εικόνα 38 - Σύγκριση του σχεδίου πραγματικής διατμητικής ρωγμής ( a ) και λήφθηκε από το σύστημα OBR ( b ).....	68
Εικόνα 39 - ( α ) Λεπτομέρειες των οργάνων διατομής στο μέσο άνοιγμα της δοκού (διαστάσεις σε mm). ( β ) Εικόνα της δοκού με όργανα πριν από την έκχυση σκυροδέματος .....	69
Εικόνα 40 - Προφίλ καταπόνησης που παρέχονται από το σύστημα DOFS για φορτίο κάμψης 20 kN: ( α ) Στη ζώνη συμπίεσης στο επίπεδο οργάνων 1 και ( β ) στη ζώνη τάνυσης στο επίπεδο οργάνων 3 .....	70
Εικόνα 41 - Προφίλ εφελκυσμού που καταγράφηκαν από το DOFS με βάση τη σκέδαση Rayleigh για διάφορα φορτία κάμψης άνω των 50 kN (προσαρμοσμένο .....	70
Εικόνα 42 - (α) Διάγραμμα δοκού προβόλου που χρησιμοποιείται για μετρήσεις καταπόνησης. Η ίνα κολλήθηκε στη δοκό σε διπλό βρόχο και τα δύο άκρα συνδέθηκαν σε καλώδια από ίνα με μήκη 10 m και 797 m αντίστοιχα. ( β ) Καταπόνηση στον πρόβολο όπως μετράται και από τις δύο εισόδους ινών .....	71
Εικόνα 43 - Δοκιμαστικό αντικείμενο για μέτρηση σε υψηλές θερμοκρασίες με ισχυρή θερμική κλίση.....	72
Εικόνα 44 - Θερμοκρασία σε σχέση με τη θέση για την ίνα σε θερμαινόμενη μεταλλική ράβδο (η ίνα εισέρχεται στη ράβδο περίπου στα 4,8 m) .....	72
Εικόνα 45 - Το διάγραμμα του κατανεμημένου συστήματος παρακολούθησης οπτικών ινών που βασίζεται σε BOTDR για κλίσεις .....	73
Εικόνα 46 - Διάταξη της ίνας ανίχνευσης BOTDA στην κλίση του μοντέλου (μονάδα: mm) .	74
Εικόνα 47 - Χάνδακας σε ασφαλτοστρωμένη οδό.....	76
Εικόνα 48 - Χάνδακας επί πεζοδρομίου.....	77
Εικόνα 49 - Φρεάτιο 0,90m X 0,90m X 0,80m .....	77
Εικόνα 50 - Φρεάτιο 1,30m X 0,80m X 0,80m.....	78
Εικόνα 51 - Φρεάτιο 0,70m X 0,70m X 0,80m.....	79
Εικόνα 52 - Φρεάτιο 0,60m X 0,60m X 0,80m.....	79
Εικόνα 53 - Φρεάτιο 0,50m X 0,50m X 0,80m.....	80
Εικόνα 54 - Φάση 1 και Φάση 4 του έργου.....	82
Εικόνα 55 - Φάση 10 του έργου .....	83
Εικόνα 56 - Φάσεις του έργου και σήμανση.....	84

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 - Δείκτης διάθλασης ορισμένων ουσιών στους 20°C .....	17
Πίνακας 2 - Διάνοξη χανδάκων και εγκατάσταση οπτικών ινών ανά δρόμο .....	75
Πίνακας 3 - Δρόμοι διάνοξης φρεατίων .....	80

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα πρόσφατο πεδίο αποτελεί το πεδίο των οπτικών ινών, προσελκύνοντας το ενδιαφέρον των ερευνητών. Πρόκειται για ένα σημαντικό επίτευγμα στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων καθώς επίσης και στον τομέα των συστημάτων μετάδοσης δεδομένων. Η μεταφορά πληροφοριών λαμβάνει χώρα με τρόπο παρόμοιο με τη χρήση ραδιοκυμάτων. Οι οπτικές ίνες είναι ένα από τα σημαντικά επιστημονικά επιτεύγματα τον περασμένου αιώνα. Ειδικότερα, παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον γιατί αντιπροσωπεύουν τον καλύτερο σημερινό τρόπο μεταφοράς ψηφιακών πληροφοριών.

Κατά τη δεκαετία του 1960 εμφανίστηκαν στο προσκήνιο τα λέιζερ αλλά και τα πλεονεκτήματα της μετάδοσης πληροφοριών από οπτικές ίνες, τα οποία είναι πολλαπλά συγκριτικά με άλλα μέσα επικοινωνίας. Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, καθώς είναι ελαφρύτερες και οικονομικότερες σε σχέση με τα συμβατικά καλώδια και χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων στην ιατρική, στο φωτισμό και στο σύστημα οδικών μεταφορών.

Οι οπτικές ίνες αξιοποιούνται και στον τομέα των πολιτικών μηχανικών. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται σε διάφορα έργα όπως σε γέφυρες και σε αυτοκινητόδρομους. Οι αισθητήρες οπτικών ινών εγκαθίστανται σε έργα υποδομών σε όλο τον κόσμο, παρακολουθώντας τις παγκόσμιες και τοπικές μηχανικές συμπεριφορές όπως επίσης και διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως είναι μεταξύ άλλων η θερμοκρασία και η υγρασία. Ακόμη, εγκαθίστανται ενσωματωμένοι αισθητήρες οπτικών ινών με σκοπό τη μέτρηση της καμπυλότητας αλλά και την έναρξη της ρωγμής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και καταγραφή σημαντικών στοιχείων που αφορούν τις οπτικές ίνες και τη χρήση τους από τους πολιτικούς μηχανικούς αξιοποιώντας τη μέθοδο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Αναφορικά με τη δομή της εργασίας, αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται βασικές πληροφορίες και στοιχεία των οπτικών ινών, όπως τα μέρη που αποτελούνται, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογής των οπτικών ινών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση των οπτικών ινών σε έργα πολιτικής μηχανικής, όπως σε γέφυρες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η περίπτωση εγκατάστασης οπτικών ινών για το Δημαρχείο Κορδελιού – Ευόσμου στην πλατεία του Ευόσμου.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα και η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την περάτωση της παρούσας εργασίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Οι οπτικές ίνες ανήκουν σε ένα σχετικά νέο πεδίο. Εκτελείται μεγάλος όγκος ερευνητικής εργασίας σε όλα τα μέρη του κόσμου για την προώθηση της τεχνολογίας οπτικών ινών. Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες εξελίξεις τα τελευταία χρόνια στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και των συστημάτων μετάδοσης δεδομένων είναι η χρήση οπτικών ινών για τη μεταφορά πληροφοριών με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα και μικροκύματα. Αξιόπιστες και ευρέως διαδεδομένες πηγές για τη μεταφορά ακτινών λέιζερ σε απόσταση, οι οπτικές ίνες διατίθενται σε πολλές μορφές (Rezgui, 2021).

Οι οπτικές ίνες είναι ένα από τα σημαντικά επιστημονικά επιτεύγματα τον περασμένο αιώνα. Ειδικότερα, παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον γιατί αντιπροσωπεύουν τον καλύτερο σημερινό τρόπο μεταφοράς ψηφιακών πληροφοριών. Οι ανάγκες σε αυτόν τον τομέα είναι πιθανό να αυξηθούν πολύ έντονα στο μέλλον.

Ήδη από τη δεκαετία του 1940 οι μηχανικοί και οι επιστήμονες άρχισαν να θεωρούν ότι οι τηλεπικοινωνίες στο μακρινό μέλλον θα πραγματοποιούνταν μέσω οπτικών καναλιών. Η ιδέα της χρήσης οπτικών ινών για τη μετάδοση πληροφοριών εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 με την εμφάνιση των λέιζερ και τα πλεονεκτήματα της μετάδοσης πληροφοριών από οπτικές ίνες είναι πολλαπλές σε σύγκριση με άλλα μέσα επικοινωνίας. Είναι αξιoσημείωτο, πως οι οπτικές ίνες είναι πολύ ελαφρύτερες και πιο λεπτές σε σύγκριση με τα συμβατικά καλώδια χαλκού και είναι φθηνότερες από τα χάλκινα σύρματα. Ένα ζεύγος οπτικών ινών έχει ρυθμό 10 φορές ισχυρότερο από 250 ζεύγη χάλκινων συρμάτων. Χάρη στην άνεση και την εξοικονόμηση ενέργειας που παρέχουν οι οπτικές ίνες είναι ιδανικές για (Rezgui, 2021):

- Εφαρμογές ιατρικής
- Πεδίο φωτισμού
- Σύστημα οδικών μεταφορών
- Διάφορες στρατιωτικές εφαρμογές που απαιτούν εξοπλισμό υψηλής ποιότητας.

Το 1966 ξεκίνησε η ιδέα της μεταφοράς οπτικών σημάτων (πάνω από μια ίνα) σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά χρειάστηκαν αρκετά χρόνια για να κυριαρχήσουν οι διαδικασίες κατασκευής και να ελεγχθεί η σύνθεση των υλικών που επηρεάζουν καθοριστικά τις απώλειες των εκπεμπόμενων σημάτων. Στη συνέχεια θα είναι δυνατό να ληφθούν

εξασθενήσεις που είναι αρκετά μικρές ώστε να καθιστούν δυνατή τη μετάδοση σημάτων σε αποστάσεις αρκετά μεγάλες ώστε να καταστήσει την οπτική τεχνική ανταγωνιστική. Ξεκινώντας το 1960 στα 1.000 ντεσιμπέλ ανά χιλιόμετρο (dB/km), η εξασθένιση μειώθηκε στα 20 dB/km το 1975 και στη συνέχεια στα 0,2 dB/km το 1984. Οι οπτικές ίνες γίνονται γρήγορα το μέσο μετάδοσης της επιλογής για νέες τηλεπικοινωνίες (Alferness, 1986).

Διαδραμάτισαν βασικό ρόλο στο να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη των επικοινωνιών παγκοσμίως που έχει σημειωθεί τα τελευταία 25 χρόνια και είναι ζωτικής σημασίας για την πολλαπλασιαστική χρήση του Διαδικτύου. Ωστόσο, όλο και περισσότερο, οι οπτικές ίνες γίνονται δημοφιλείς σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και έχουν αντίκτυπο και σοβαρές εμπορικές εισβολές σε άλλους τομείς εκτός από τις επικοινωνίες, όπως στη βιομηχανική ανίχνευση, τα βιοιατρικά συστήματα διανομής λέιζερ, τους στρατιωτικούς γυροσκοπικούς αισθητήρες, καθώς και στο φωτισμό και έλεγχο αυτοκινήτου. Η οπτική ίνα είναι ένα νέο μέσο, στο οποίο οι πληροφορίες (φωνή, δεδομένα ή βίντεο) μεταδίδονται με υψηλή ταχύτητα, ακολουθώντας τη σειρά μετάδοσης (Méndez and Morse, 2007; Teja et al., 2012).

## 1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Μια οπτική ίνα ή ένα καλώδιο οπτικών ινών είναι ένας κυλινδρικός, με τυπική μορφή, διηλεκτρικός κυματοδηγός κατασκευασμένος από υλικά χαμηλής απώλειας. Είναι ένας λεπτός κύλινδρος από γυαλί, που υποτίθεται ότι εκτείνεται άπειρα κατά μήκος του άξονα διάδοσής του, που συμβολίζεται με OZ. Μια οπτική ίνα είναι εύκαμπτη και διαφανής ίνα που επιτρέπει τη μετάδοση κυμάτων φωτός σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερο εύρος ζώνης (ρυθμοί δεδομένων) από άλλες μορφές τηλεπικοινωνιών. Χρησιμοποιείται, επίσης, για τη διάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας προς την ορατή περιοχή του φάσματος (Teja et al., 2012).

α) Βασική κατασκευή οπτικής ίνας Μια οπτική ίνα αποτελείται κυρίως από 4 στοιχεία (στρώσεις) (Yeh, 1990; Rezgui, 2021; Kaur et al., 2022):

- Πυρήνας
- Επένδυση
- προστατευτική επίστρωση
- Jacket

Ο πυρήνας είναι η πιο εσωτερική περιοχή της ίνας, κέντρο της δομής. Είναι η περιοχή για τη διάδοση των ακτινών φωτός και μεταφέρει το σήμα. Ο πυρήνας μιας οπτικής ίνας είναι το

μικρότερο συστατικό της ίνας που μεταδίδει το φως. Το γυαλί ή το πλαστικό είναι επίσης αποδεκτά υλικά για τον πυρήνα. Στον πυρήνα χρησιμοποιείται γυαλί διοξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Μερικά πρόσμικτα, όπως το Germania, το πεντοξείδιο του φωσφόρου ή η αλουμίνα, χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αναμόρφωσης για την ενίσχυση του δείκτη διάθλασης. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται, οι πυρήνες διατίθενται σε διάφορες διαμέτρους. Υπάρχουν πυρήνες 50 μ και 62,5 μ σε επικοινωνία. Διατίθενται επίσης οπτικές ίνες μονής και πολλαπλής λειτουργίας. Το φως ταξιδεύει με μια ορισμένη συχνότητα προς το κέντρο σε έναν μόνο τρόπο λειτουργίας. Το μέγεθος πυρήνα για πολλαπλές λειτουργίες είναι είτε 50 είτε 62,5 microns.

Ο πυρήνας της οπτικής ίνας, που μεταφέρει το φως, είναι το πιο μικροσκοπικό τμήμα. Αν και οι περισσότεροι πυρήνες οπτικών ινών αποτελούνται από γυαλί, άλλοι είναι κατασκευασμένοι από πλαστικό. Το γυαλί που χρησιμοποιείται στον πυρήνα είναι εξαιρετικά καθαρό διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), το οποίο είναι τόσο διαυγές που θα μπορούσε κανείς να κοιτάξει επίμονα μέσα από 5 χιλιόμετρα και να νομίζει ότι κοιτά μέσα από ένα παράθυρο.

Πρόσθετα όπως το Germania, το πεντοξείδιο του φωσφόρου ή η αλουμίνα χρησιμοποιούνται στη διαδικασία παραγωγής για την ενίσχυση του δείκτη διάθλασης υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Οι πυρήνες οπτικών ινών διατίθενται σε διάφορες διαμέτρους για να ταιριάζουν σε μια ποικιλία εφαρμογών.

Η επένδυση είναι ο εξωτερικός μανδύας, ζώνη που περιβάλλει τον πυρήνα, κατασκευασμένη από υλικό του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι χαμηλότερος από τον δείκτη του πυρήνα, ώστε να περιορίζεται η διάδοση των ακτινών φωτός και να διατηρείται ο πυρήνας καθαρός. Η επένδυση είναι το πιο εξωτερικό στρώμα του πυρήνα. Η επένδυση περιβάλλει τον πυρήνα και μειώνει τον δείκτη διάθλασης, επιτρέποντας στη λειτουργία της οπτικής ίνας. Όταν χρησιμοποιείτε γυάλινη επένδυση, η επένδυση και ο πυρήνας κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό με βάση το διοξείδιο του πυριτίου και είναι μόνιμα συγχωνευμένα. Για να διατηρηθεί μια διαφορά 1% στους δείκτες διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης, η διαδικασία κατασκευής προσθέτει διαφορετικές ποσότητες προσμείξεων στον πυρήνα και την επένδυση.

Στα 1300 nm, ένας τυπικός πυρήνας έχει δείκτη διάθλασης 1,49, ενώ η επένδυση έχει δείκτη διάθλασης 1,47. Αυτά τα στοιχεία εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Σε διαφορετικά μήκη κύματος και ο πυρήνας της ίδιας ίνας θα έχει ποικίλο δείκτη διάθλασης.

Η επένδυση, όπως και ο πυρήνας, κατασκευάζεται σε τυπικές διαμέτρους. Για να λειτουργήσει σωστά η οπτική ίνα, ο δείκτης διάθλασης της πρέπει να είναι χαμηλότερος από τη γυάλινη επένδυση του πυρήνα που κατασκευαζόταν χωριστά από τον πυρήνα και την επένδυση, αλλά από τότε, το SiO<sub>2</sub> αναμειγνύεται μόνιμα σε υγρή μορφή. Για να επιτευχθεί μια αλλαγή 1% στον δείκτη διάθλασης, ενώνεται ο πυρήνα και η επένδυση μεταξύ τους. Ο δείκτης διάθλασης ενός πυρήνα 1300 nm είναι 1,49, ενώ αυτός της επένδυσης είναι 1,47, ανάλογα με τη συχνότητα. Η επένδυση αποτελείται συνήθως από 125 m και 140 m. Πυρήνες πάχους 9 μικρομέτρων, 50 microns και 62,5 microns μπορούν να υποστηρίξονται με επένδυση πάχους έως και 140 μικρομέτρων. Ομοίως, πυρήνες πάχους 100 μικρών υποστηρίζονται από επένδυση 140 μικρών.

Η προστατευτική επίστρωση είναι ένα πρωτεύον ρυθμιστικό υλικό που χρησιμοποιείται για την προστασία του πυρήνα και της επένδυσης από φυσική υποβάθμιση και για την προστασία από την τριβή, την υγρασία, τους διαλύτες και άλλους ρύπους.

Είναι κρίσιμο για την κατασκευή των εσωτερικών στρωμάτων οπτικών ινών. Προστατεύει την επένδυση από εγχοπές, κοψίματα, υγρασία και κραδασμούς που διαφορετικά μπορεί να προκαλέσουν αστοχία. Χωρίς προστατευτικό κάλυμμα, η οπτική ίνα είναι ένα εύθραυστο υλικό. Μπορεί να προκύψει θραύση οπτικής ίνας χωρίς επίστρωση όταν κάμπτεται λόγω μιας μικρής εγχοπής. Οι ίνες γυαλιού δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι να επικαλυφθούν. Ο σκοπός του είναι η προστασία των εσωτερικών στρωμάτων. Δεν έχει καμία σχέση με το αποτέλεσμα. Οι οπτικές ίνες σε επιστρώσεις δράσης μπορεί να έχουν εξωτερική διάμετρο 250 m ή 500 m. Για να τα ξεχωρίσουν, επικαλύπτονται σε μια συγκεκριμένη απόχρωση. Η επίστρωση της οπτικής ίνας επιλέγεται με βάση το περιβάλλον. Το ακρυλικό είναι το πιο κοινό είδος. Συνήθως, μια επίστρωση αποτελείται από δύο ξεχωριστά στρώματα. Όταν οι οπτικές ίνες κάμπτονται, η πρώτη (πρωτογενής) επίστρωση λειτουργεί ως μαξιλάρι, καθώς είναι λίγο σαθρές. Το δεύτερο στρώμα είναι λίγο πιο δύσκολο από το πρώτο. Σύνθετα υλικά όπως το πολυϊμίδιο και το πολυανθρακικό χρησιμοποιούνται συχνά σε απαιτητικά περιβάλλοντα όπως το διάστημα ή τα αεροσκάφη.

Η επίστρωση είναι το μελλοντικό προστατευτικό στρώμα της οπτικής ίνας. Οι κραδασμοί, οι εγχοπές, οι γρατσουνιές, ακόμη και η υγρασία που θα μπορούσαν να βλάψουν την επένδυση απορροφώνται από την επίστρωση. Η οπτική ίνα είναι εξαιρετικά εύθραυστη χωρίς την επίστρωση. Όταν η οπτική ίνα είναι λυγισμένη, ένα μικρό τρύπημα στην επένδυση μπορεί να προκαλέσει τη θραύση της.

Η επίστρωση χρησιμεύει μόνο ως φράγμα. Δεν έχει καμία διαφορά στην ικανότητα της οπτικής ίνας να μεταφέρει φως με οποιονδήποτε τρόπο. Το κάλυμμα είναι συνήθως άχρωμο. Ωστόσο, σε άλλες εφαρμογές, η επίστρωση είναι χρωματισμένη για να επιτρέπει την αναγνώριση μεμονωμένων οπτικών ινών σε μια ομάδα.

Μια επίστρωση οπτικών ινών επιλέγεται για ένα συγκεκριμένο είδος απόδοσης ή περιβάλλοντος. Το ακρυλικό είναι μια από τις πιο δημοφιλείς μορφές επίστρωσης. Συνήθως, αυτή η επίστρωση τοποθετείται σε δύο στρώσεις. Η κύρια επίστρωση εφαρμόζεται αμέσως στην επένδυση. Αυτή η μαλακή επίστρωση λειτουργεί ως μαξιλάρι για την οπτική ίνα όταν είναι λυγισμένη. Η δευτερεύουσα επίστρωση είναι παχύτερη και πιο ανθεκτική από την κύρια επίστρωση, παρέχοντας μια σκληρή εξωτερική επιφάνεια. Το ακρυλικό, από την άλλη πλευρά, έχει περιορισμούς θερμοκρασίας. Ένα κοινό ακρυλικό μπορεί να αντέξει θερμοκρασίες έως και 125 βαθμούς Κελσίου.

Επιστρώσεις όπως το πυρίτιο, ο άνθρακας και το πολυϊμίδιο μπορούν να βρεθούν σε οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται σε σοβαρές καταστάσεις όπως αυτές που βρίσκονται στην αεροηλεκτρονική, την αεροδιαστημική και το διάστημα.

Το Jacket είναι ένα πρόσθετο εξωτερικό στρώμα που συγκρατεί μία ή περισσότερες ίνες σε ένα καλώδιο, χρησιμοποιείται για την αποφυγή ζημιών και την αύξηση της αντοχής της ίνας.

Τόσο ο πυρήνας όσο και η επένδυση είναι κατασκευασμένα από γυαλί, αλλά ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι ελαφρώς υψηλότερος από αυτόν της επένδυσης. Η διαφορά στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πυρήνα και της επένδυσης δημιουργεί μια εξαιρετικά ανακλαστική επιφάνεια στο σημείο στο οποίο διασυνδέονται. Η προστατευτική επίστρωση και το τζάκετ δεν έχουν άμεσο ρόλο στον περιορισμό του φωτός.

Ο ρόλος τους, ωστόσο, είναι να παρέχουν μηχανική υποστήριξη και προστασία για τον εσωτερικό πυρήνα και τα στρώματα επένδυσης. Το φως μεταδίδεται μέσω του πυρήνα, αλλά σε μικρό βαθμό, ταξιδεύει μέσα στην επένδυση και έτσι η οπτική διαύγεια της επένδυσης εξακολουθεί να είναι σημαντική. Ένα τυπικό καλώδιο οπτικών ινών περιλαμβάνει συνήθως πολλές οπτικές ίνες γύρω από ένα κεντρικό καλώδιο από χάλυβα. Εφαρμόζονται διάφορα προστατευτικά στρώματα, ανάλογα με τη σκληρότητα του περιβάλλοντος όπου θα τοποθετηθεί το καλώδιο (Rezgui, 2021).

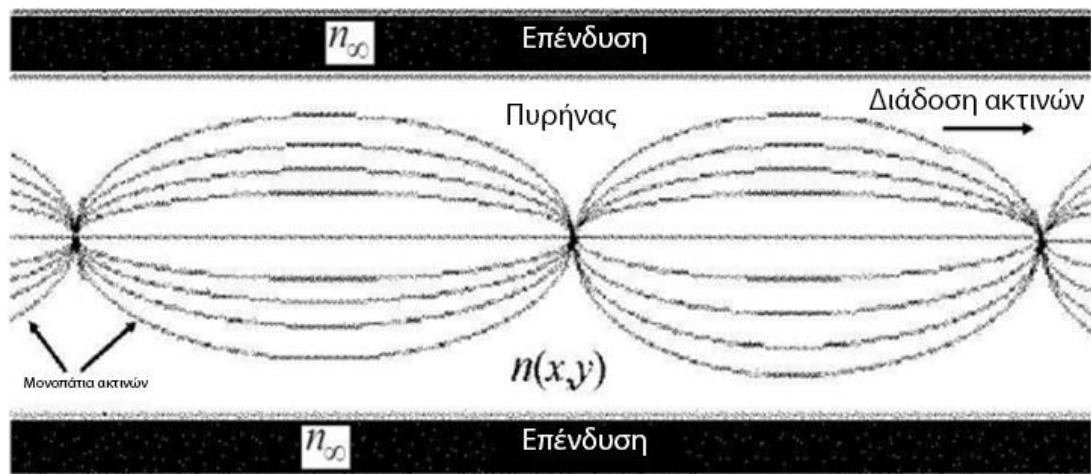
## β) Είδη οπτικών ινών

Γενικά, οι οπτικές ίνες είναι δύο τύπων (Yeh, 1990):

- Πρώτος τύπος: Μονής λειτουργίας (SMF)
- Δεύτερος τύπος: Multi-mode (MMF)

Ο απλούστερος τύπος οπτικής ίνας ονομάζεται μονοτροπική ίνα. Έχει έναν πολύ λεπτό πυρήνα με διάμετρο περίπου 5 – 10  $\mu\text{m}$ . Υποστηρίζει μόνο μία λειτουργία. Σε μια ίνα μονής λειτουργίας, όλα τα σήματα ταξιδεύουν κατευθείαν στη μέση χωρίς να αναπηδούν τους άκρες. Τα σήματα καλωδιακής τηλεόρασης, διαδικτύου και τηλεφώνου μεταφέρονται γενικά από ίνες μονής λειτουργίας, τυλιγμένες μεταξύ τους σε μια τεράστια δέσμη. Καλώδια τους αυτό μπορούν να στείλουν πληροφορίες για πάνω από 100 km (60 μίλια).

Ο δεύτερος τύπος οπτικής ίνας ονομάζεται πολυτροπική ίνα. Κάθε οπτική ίνα σε ένα καλώδιο πολλαπλών λειτουργιών είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από μία σε ένα καλώδιο τους λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι οι δέσμες φωτός μπορούν να ταξιδέψουν μέσα στον πυρήνα ακολουθώντας μια ποικιλία διαφορετικών μονοπατιών, με άλλα λόγια, σε πολλαπλούς διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Τα καλώδια πολλαπλών λειτουργιών μπορούν να στείλουν πληροφορίες μόνο σε σχετικά μικρές αποστάσεις και χρησιμοποιούνται και για τη σύνδεση δικτύων υπολογιστών μεταξύ τους.



Εικόνα 1 - Διάδοση φωτός σε πολυλειτουργική οπτική ίνα διαβαθμισμένου δείκτη (που έχει ομοιογενή επένδυση)

Πηγή: Rezgui, 2021

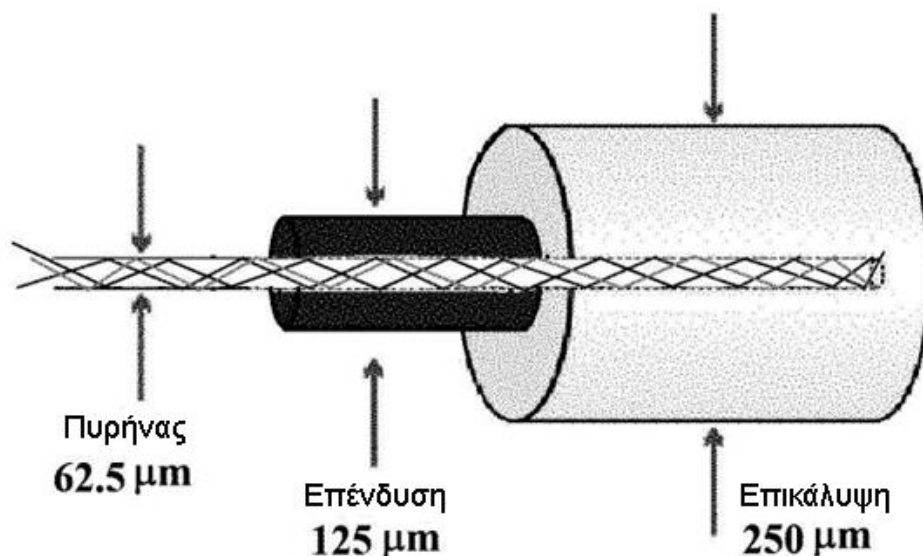
Οι πολυτροπικές οπτικές ίνες είναι διηλεκτρικοί κυματοδηγοί που μπορούν να έχουν πολλούς τρόπους διάδοσης. Το φως σε αυτούς τους τρόπους λειτουργίας ακολουθεί διαδρομές που μπορούν να αναπαρασταθούν με λοξές ακτίνες (Εικόνα 1). Η επένδυση έχει δείκτη διάθλασης  $n_\infty$ , μια παράμετρο που σχετίζεται με τη διηλεκτρική σταθερά, η οποία είναι ελαφρώς χαμηλότερη από τον δείκτη διάθλασης της περιοχής του πυρήνα (Johnson, 2009).

Οι ίνες πολλαπλών λειτουργιών δεν χρησιμοποιούνται πλέον σε τηλεπικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων (> 10 km) λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων απόδοσης που προσφέρουν τα συστήματα απλής λειτουργίας. Πολλές εφαρμογές βραχείας σύνδεσης, για τις οποίες η διατροφική διασπορά δεν αποτελεί πρόβλημα, εξακολουθούν να χρησιμοποιούν ίνες πολλαπλών τρόπων λειτουργίας (Rezgui, 2021).

### 1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

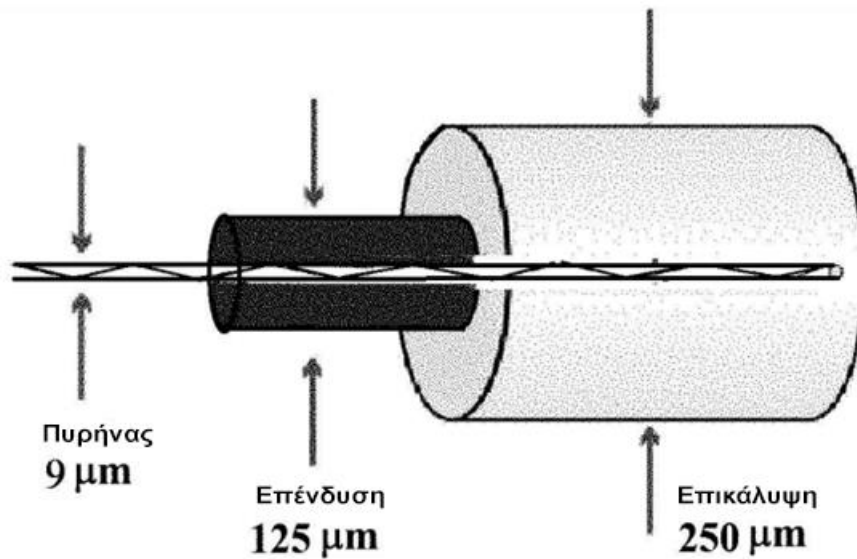
Τα καλώδια οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για τηλεφωνικά δεδομένα από το 1980. Έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια μια εξαιρετικά ελκυστική μέθοδος μεταφοράς δεδομένων (Trasatti, 1989). Έχουν μεγάλο αριθμό εφαρμογών, χρησιμοποιούνται ως (Rezgui, 2021):

- Οδηγοί φωτός στην ιατρική.
- Φωτισμός.
- Απεικόνιση οπτικών.
- Αεροδιαστημική βιομηχανία.
- Βιομηχανικό εργαλείο.
- Άλλες εφαρμογές.



Εικόνα 2 - Γεωμετρία μιας τυπικής πολυτροπικής οπτικής ίνας (που έχει κυκλική διατομή)

Πηγή: Rezgui, 2021



Εικόνα 3 - Γεωμετρία μιας τυπικής μονοτροπικής οπτικής ίνας (που έχει κυκλική διατομή)

Πηγή: Rezgui, 2021

Όπως ο ηλεκτρισμός μπορεί να τροφοδοτήσει πολλούς τύπους μηχανών, έτσι και οι δέσμες φωτός μπορούν να μεταφέρουν πολλούς τύπους πληροφοριών και μπορούν να βοηθήσουν με πολλούς τρόπους. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν δικτύωση υπολογιστών, μετάδοση, ιατρική σάρωση και στρατιωτικό εξοπλισμό το κάνουν εντελώς αόρατα (Méndez and Morse, 2007; Thyagarajan and Ghatak, 2007).

#### 1.4 ΠΡΟΦΙΛ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

Καθώς ο δείκτης διάθλασης είναι απλώς ένας λόγος της ταχύτητας του φωτός σε ένα υλικό προς την ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο, δεν έχει καμία μονάδα. Ο δείκτης διάθλασης περιγράφει τη σχέση μεταξύ των δεικτών του πυρήνα και της επένδυσης. Αναφέρεται στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης σε μια διατομή του οπτικού τμήματος της ίνας. Γενικά, υπάρχουν δύο είδη δείκτη διάθλασης (Tong, 2014):

- Step-index (uniform-core): τύπος ίνας που χρησιμοποιείται συχνά.
- Διαβαθμισμένος δείκτης (μη ομοιόμορφος πυρήνας)

Η τυπική διάμετρος πυρήνα της οπτικής ίνας βαθμιαίου δείκτη είναι τυπικά μεταξύ 8 και 10  $\mu\text{m}$ , ενώ η διάμετρος της επένδυσης είναι περίπου 125  $\mu\text{m}$  και οι τυπικές διαβαθμισμένες ίνες δείκτη έχουν διάμετρο πυρήνα 50, 62,5, 85 ή 100  $\mu\text{m}$  και διάμετρο επένδυσης 125  $\mu\text{m}$ . Ο δείκτης διάθλασης αλλάζει απότομα μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης μιας οπτικής



ίνας βαθμιδωτού δείκτη και η μετάβαση του δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης είναι σταδιακή σε μια διαβαθμισμένη οπτική ίνα.

Το ενδιαφέρον για τις οπτικές ίνες διαβαθμισμένου δείκτη αυξάνεται λόγω των εκτεταμένων πιθανών εφαρμογών τους. Χωρίς αυτά τα εξαρτήματα, είναι δύσκολο να υπάρξει περαιτέρω ανάπτυξη συστημάτων οπτικών ινών για μετάδοση πληροφοριών, ιατρική και βιομηχανική ενδοσκόπηση, τεχνολογία αντιγραφής, γρήγορες συσκευές εισόδου υπολογιστή και επικοινωνία φασ (Rezgui, 2021).

Πίνακας 1 - Δείκτης διάθλασης ορισμένων ουσιών στους 20°C

Πηγή: Rezgui, 2021

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρας	1.00029
Άκετόνη	1.36
Καθαρή αλκοόλη	1.32
Κεχριμπάρι	1.54
Κρύσταλλο	1.60 to 2.00
Διαμάντι	2.42 to 2.75
Δισουλφίδιο του άνθρακα	1.628
Διοξειδίο του άνθρακα	1.00045
Αιθανόλη	1.361
Λάδι σιλικόνης	1.393 to 1.403
Βενζόλιο	1.501
Νερό	1.33
Σμαράγδι	1.57
Πάγος	1.31
Γλυκερίνη	1.47
Λαπι Λαζουλι	1.61
Οπαλίνα	1.45
Πλαστικό	1.460
Πλεξιγκλας	1.51
Πολυστυρένιο	1.20
Ρουμπίνι	1.78
Χαλαζίας	1.55 or 1.64
Ζαφείρι	1.77
Τοπάζι	1.61
Τουρμαλίνης	1.27
Γυαλί	1.50
Στεφανύαλος	1.52
Μονωμένο γυαλί	1.56-1.65-1.89
Κηροζίνη	1.44
Τερεβινθέλαιο	1.47

## 1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας όπως η Google έχουν επεκταθεί στις υπηρεσίες οπτικών ινών με το Google fiber. Τα εξαρτήματα οπτικής επικοινωνίας εφαρμόζονται ευρέως στον σημερινό τομέα των τηλεπικοινωνιών χάρη σε πολλά πλεονεκτήματα που σχετίζονται με τη χρήση οπτικών ινών, τα οποία παρατίθενται παρακάτω (Rezgui, 2021):

- Διηλεκτρικά οφέλη
- Λιγότερη ευαισθησία στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας
- Ισχύς σήματος
- Ευελιξία
- Ευκολία εγκατάστασης
- Ταχύτητα
- Μικρό μέγεθος
- Ελαφρύ
- Μη εύφλεκτο
- Ασφαλής μετάδοση
- Άμεση σύνδεση χωρίς ηχώ
- Μεγάλη απόσταση μετάδοσης
- Περιορισμός κόστους
- Χαμηλό κόστος

Μια οπτική ίνα εγγυάται τέλεια ηλεκτρική μόνωση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η οπτική ίνα είναι πλήρως ανθεκτική σε πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το χάλκινο καλώδιο. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από γυαλί, το οποίο είναι ένας μονωτήρας, έτσι ώστε να μην μπορεί να περάσει ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι οπτικές ίνες αντέχουν σε ακραίες θερμοκρασίες καλύτερα από τα ηλεκτρικά καλώδια. Η οπτική ίνα είναι επίσης λιγότερο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας από τον χαλκό και μπορεί να βυθιστεί στο νερό.

Η ισχύς του σήματος του Διαδικτύου με οπτικές ίνες δεν υποβαθμίζεται τόσο γρήγορα σε απόσταση. Οι οργανισμοί σε σχετικά μεγάλους χώρους θα μπορούσαν να επωφεληθούν από την καλύτερη ισχύ του σήματος σε όλη την εγκατάσταση.

Επειδή οι οπτικές ίνες είναι εύκαμπτες και μπορούν να μεταδώσουν και να λάβουν φως χρησιμοποιούνται σε πολλές εύκαμπτες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Επίσης, οι οπτικές ίνες μπορούν να παραχθούν και να τοποθετηθούν πιο εύκολα. Τα μεγάλα μήκη

κάνουν την εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών πολύ πιο εύκολη στη χρήση σε προσωρινές ή φορητές εγκαταστάσεις. Τα καλώδια οπτικών ινών μπορούν να εγκατασταθούν με τον ίδιο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση χάλκινων και ομοαξονικών καλωδίων, με ορισμένες τροποποιήσεις λόγω του μικρού μεγέθους και της περιορισμένης τάσης έλξης και ακτίνας κάμψης των οπτικών καλωδίων.

Ακόμη, το Διαδίκτυο οπτικών ινών είναι πολλές φορές ταχύτερο ακόμη και από τις χάλκινες συνδέσεις Διαδικτύου με την υψηλότερη ταχύτητα. Οι οπτικές ίνες έχουν μικρότερη διάμετρο από τις χάλκινες γραμμές, είναι ελαφριές και επειδή δεν διέρχεται ηλεκτρισμός μέσω οπτικών ινών, δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος.

Επιπροσθέτως, οι χάκερ αποτελούν σημαντική απειλή στον σημερινό κυβερνοχώρο. Η λήψη καλωδίων και η υποκλοπή σήματος μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν με βασικά επαγγελματικά καλώδια Διαδικτύου. Οι οπτικές ίνες είναι το πιο ασφαλές διαθέσιμο μέσο για τη μεταφορά ευαίσθητων δεδομένων, καθώς είναι δύσκολη η αναχαίτιση της μετάδοσης δεδομένων μέσω ενός καλωδίου ινών. Οι οπτικές ίνες είναι δύσκολο να αξιοποιηθούν. Καθώς δεν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, οι εκπομπές δεν μπορούν να αναχαιτιστούν. Δεδομένου ότι το σωματικό χτύπημα της ίνας απαιτεί μεγάλη ικανότητα για να μην εντοπιστεί. Στις σπάνιες περιπτώσεις που είναι καλώδια οπτικών ινών Η μετάδοση του ορατού φωτός καθιστά εύκολο τον εντοπισμό των χακαρισμένων καλωδίων.

Χάρη στις οπτικές ίνες, υπάρχει άμεση σύνδεση χωρίς ηχώ, ενώ ακούγεται συχνά μια ηχώ στο τηλέφωνο επειδή το σήμα αναπηδά από έναν δορυφόρο επικοινωνίας. Η υπόσχεση των οπτικών ινών ήταν η δυνατότητα αυξημένων ρυθμών μετάδοσης. Ένα σύστημα οπτικών ινών που χρησιμοποιεί γυάλινη ίνα είναι σίγουρα ικανό να μεταφέρει φως σε μεγάλες αποστάσεις.

Μετατρέποντας ένα σήμα εισόδου σε σύντομες λάμπες φωτός, η οπτική ίνα είναι σε θέση να μεταφέρει σύνθετες πληροφορίες σε αποστάσεις άνω των εκατό χιλιομέτρων χωρίς πρόσθετη ενίσχυση. Αυτό είναι τουλάχιστον πέντε φορές καλύτερο από τις αποστάσεις που επιτυγχάνονται με τα καλύτερα χάλκινα ομοαξονικά καλώδια.

Επιπλέον, αρκετά μίλια καλωδίου οπτικών ινών μπορούν να γίνουν φθηνότερα από ισοδύναμα μήκη χάλκινου σύρματος. Αυτό εξοικονομεί χρήματα. Επιπλέον, το καλώδιο οπτικών ινών κοστίζει λιγότερο στη συντήρηση από τις παραδοσιακές γραμμές χαλκού, εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα.

Ακόμη, λεπτά νήματα γυαλιού, αρκετά εύκαμπτα ώστε να τυλίγονται γύρω από ένα δάχτυλο, και πιο φθηνά όπως το χάλκινο σύρμα, χωρίς κόστος συντήρησης, επειδή ο δείκτης φωτοδότησης είναι ενσωματωμένος ακριβώς στη δομή των ινών. Επιπλέον, η οπτική ίνα αντιστέκεται στα περισσότερα διαβρωτικά στοιχεία που προσβάλλουν το χάλκινο καλώδιο.

Οι οπτικές ίνες έχουν τα παρακάτω μειονεκτήματα (Rezgui, 2021):

- Εύθραυστα εξαρτήματα
- Ζημιά που προκαλείται από την άγρια ζωή
- Επηρεάζονται από χημικές ουσίες
- Αδιαφάνεια

Η οπτική ίνα είναι ένα εύθραυστο υλικό. Σε σύγκριση με τον χαλκό, απαιτεί περισσότερη προστασία γύρω από το καλώδιο.

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η περίπτωση, όπου πολλά πουλιά βρίσκουν το ενισχυτικό υλικό Kevlar της επένδυσης του οπτικού καλωδίου ιδιαίτερα ελκυστικό ως υλικό φωλιάς και έτσι ραμφίζουν τις επενδύσεις για να λάβουν τα υλικά. Επιπλέον, οι κάστορες και άλλα τρωκτικά χρησιμοποιούν εκτεθειμένο καλώδιο οπτικών ινών για να ακονίσουν τα δόντια τους. Ακόμη, οι καρχαρίες είναι γνωστό ότι καταστρέφουν τα καλώδια οπτικών ινών όταν τοποθετούνται κάτω από το νερό, ειδικά σε επαναλαμβανόμενα σημεία.

Οι οπτικές ίνες μπορεί να επηρεαστούν από διάφορες χημικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένου του αερίου υδρογόνου (πρόβλημα στο υποβρύχιο καλώδιο). Η σύνδεση δύο οπτικών ινών απαιτεί λεπτό γυάλισμα και τέλειο παραλληλισμό.

Είναι γνωστό ότι οι περισσότερες ίνες γίνονται αδιαφανείς όταν εκτίθεται σε ακτινοβολία.

## 1.6 ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Υπάρχουν κάποια μέτρα ασφαλείας στην επικοινωνία οπτικών ινών. Αυτά περιλαμβάνουν (Onu and Ikporo, 2016):

**Ασφαλή σύνδεσμο οπτικών ινών.** Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της διαταραχής της φυσικής υποδομής. Χρησιμοποιεί τεχνολογία που μπορεί ταυτόχρονα να κάνει χρήση ενός καλωδίου επικοινωνίας οπτικών ινών ως ειδοποίηση παραβίασης ή αισθητήρα ελέγχου

ακεραιότητας. Παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο οποιαδήποτε φυσική διαταραχή, όπως σύσφιξη ή κάμψη. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να προκύψουν οπτικές απώλειες προκειμένου η τεχνική να ανιχνεύσει διαταραχές.

**Μέθοδος κρυπτογράφησης.** Αυτή η μέθοδος ασχολείται με την κρυπτογράφηση όλων των δεδομένων που μεταδίδονται. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται ισχυρή κρυπτογράφηση με μεγάλους κωδικούς. Επιτρέπει επίσης στον τελικό χρήστη να χρησιμοποιεί φυσική μέθοδο που μπορεί να αλλάξει τα φωτεινά σήματα καθώς ταυτοποιεί ταυτόχρονα παράνομες επιθέσεις. Επιπροσθέτως, η μέθοδος κρυπτογράφησης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας φωτόνια για την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Σε αυτή τη μέθοδο, όταν ένας πομπός στέλνει φωτόνια που κατευθύνονται ειδικά σε δεδομένα διαστήματα μέσω ενός καλωδίου οπτικών ινών, ο δέκτης αναλύει στη συνέχεια την άφιξη του φωτονίου στα δεδομένα διαστήματα.

Όταν λαμβάνεται ένα αντίστοιχο τμήμα του μοτίβου μετάδοσης που διαφημίζεται σε ξεχωριστό μήκος κύματος από έναν πομπό, ο δέκτης θα χρησιμοποιήσει το «κλειδί» και θα επικυρώσει το ξεκλείδωμα των δεδομένων από τη ροή. Λόγω της αδυναμίας της δέσμης φωτός που διέρχεται από το καλώδιο, οποιαδήποτε αλλαγή θα παρατηρούνταν αμέσως και οποιοσδήποτε εισβολέας κατασκοπεύει να κάνει την έγχυση αναπόφευκτα θα ενοχλούσε τα μοτίβα των φωτονίων. Όταν συμβεί αυτό, η συσκευή του δέκτη θα ανιχνεύσει το αλλαγή στο μοτίβο, τερματισμός της μετάδοσης και ηχητικό σήμα.

**Σύστημα FiberSentinel της Opterna.** Χρησιμοποιεί τεχνολογία αποτροπής εισβολής Wave Sense, τεχνητή νοημοσύνη και οπτική αναγνώριση ψηφιακής υπογραφής για την παρακολούθηση των συνδέσεων ινών. Αναφέρεται ότι ανιχνεύει όλες τις φυσικές εισβολές και ακυρώνει αμέσως όλες τις μεταδόσεις. Κατά τη στιγμή της ανίχνευσης εισβολής, αυτό το σύστημα συνεχούς παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο θα αλλάξει τη μετάδοση δεδομένων σε μια εναλλακτική διαδρομή οπτικών ινών και θα ειδοποιήσει τον χειριστή του δικτύου.

**Λύση ασφαλείας Oyster Optics.** Παρέχει λύση οπτικής ασφάλειας, παρακολούθησης και ανίχνευσης εισβολής που είναι ανεξάρτητη από πρωτόκολλο. Το σύστημα χρησιμοποιεί μια ασφαλή διαμόρφωση φάσης του οπτικού σήματος για να αποτυπώσει δεδομένα στον οπτικό φορέα. Εάν υποκλαπούν δεδομένα, ο εισβολέας δεν θα μπορεί να έχει πρόσβαση στα δεδομένα που έχουν καταγραφεί εκτός εάν έχει δέκτη Oyster Optics που συγχρονίζεται με τον πομπό κατά την ενεργοποίηση. Αυτό παρέχει έναν μοναδικό πομπό και δέκτη χρησιμοποιώντας μια μη ψευδοτυχαία διαδικασία παραγωγής που δεν μπορεί να

αναπαραχθεί. Αυτό το σύστημα μπορεί να επαναδρομολογήσει τη μετάδοση δεδομένων σε ένα εφεδρικό σύστημα κάθε φορά που εντοπίζεται εισβολή. Μπορεί να υλοποιηθεί ως αυτόνομη συσκευή ή σε επίπεδο κάρτας πομποδέκτη.

## 1.7 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΗΣ

Τα καλώδια οπτικών ινών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τύπο του περιβάλλοντος εγκατάστασης, τον αριθμό των μεμονωμένων ινών και ανάλογα με την εφαρμογή. Μπορεί να υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες καλωδίων (Navaneetha et al., 2015):

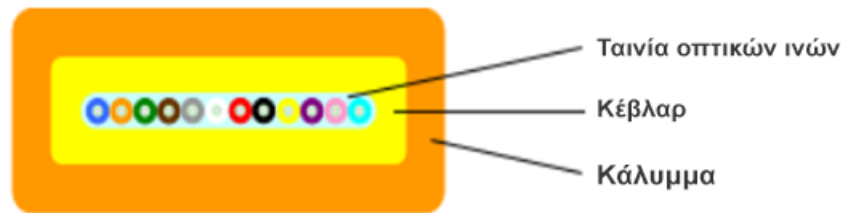
- Καλώδια εσωτερικού χώρου
- Καλώδια εξωτερικού χώρου
- Εσωτερική/Εξωτερική.

Τα καλώδια οπτικών ινών μπορεί να αποτελούνται από μία (simplex), δύο (duplex) ή περισσότερες (multifiber) μεμονωμένες ίνες. Τα καλώδια simplex παρέχουν μονόδρομη μετάδοση, ενώ τα καλώδια διπλής όψης, duplex, επιτρέπουν τη μετάδοση και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τα καλώδια πολλαπλών ινών μπορεί να φέρουν πολλά ζεύγη ινών που περιβάλλουν ένα κεντρικό μέλος αντοχής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 ή μπορεί να λάβουν τη μορφή καλωδίων με κορδέλα, τα οποία είναι μεμονωμένα καλώδια σε μια σειρά που περιβάλλονται από ένα μόνο τζάκετ (Εικόνα 6).



Εικόνα 4 - Καλώδια πολλαπλών ινών με πολλά ζεύγη ινών που περιβάλλουν ένα κεντρικό μέλος αντοχής

Πηγή: Navaneetha et al., 2015



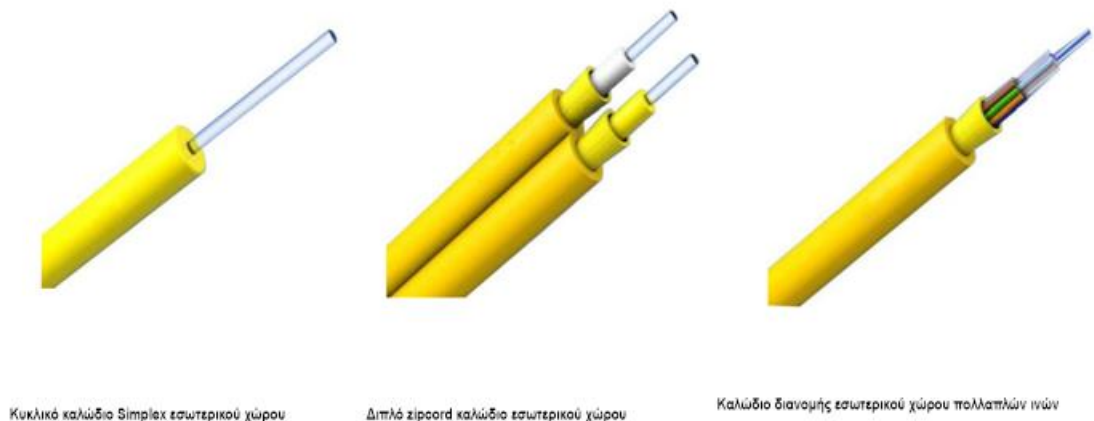
Εικόνα 5 - Καλώδια πολλαπλών ινών με μορφή καλωδίων με κορδέλα

Πηγή: Navaneetha et al., 2015

Τα οπτικά καλώδια εσωτερικού χώρου, έχουν ποικίλες εφαρμογές μέσα σε ένα κτίριο. Αντικαθιστούν τα καλώδια εξωτερικού χώρου επειδή τα καλώδια εσωτερικού χώρου έχουν μεγαλύτερη ευελιξία, είναι φθηνότερα και βολικά για χρήση μέσα σε ένα κτίριο. Τα καλώδια εσωτερικού χώρου έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τους επιτρέπουν να είναι πιο ευνοϊκό. Όπως:

- Δεν χρειάζονται γείωση και αντικεραυνική προστασία, επειδή είναι απαλλαγμένα από μέταλλο.
- Έχουν εύκολη απογύμνωση. Είναι 900μm TBII σφιχτές ρυθμιστικές ίνες.
- Όλες οι πληροφορίες του καλωδίου μπορούν να εκτυπωθούν στο εξωτερικό περίβλημα.

Το καλώδιο εσωτερικού χώρου είναι επίσης σχεδιασμένο να αντέχει σε υψηλές/χαμηλές θερμοκρασίες και να αντέχει στις μηχανικές καταπονήσεις που μπορεί να αντιμετωπίσει το καλώδιο μέσα στο κτίριο. Αυτοί οι χαρακτήρες είναι παρόντες ενώ εξακολουθεί να έχει παρόμοια οπτική μετάδοση με τα καλώδια εξωτερικού χώρου. Αυτό θα οδηγούσε σε μικρότερη αύξηση της εξασθένησης με τις αρθρώσεις ματίσματος. Τα καλώδια εσωτερικού χώρου τοποθετούνται σε ένα πώμα διανομής οπτικών ινών μέσα στα κτίρια. Η διανομή των καλωδίων θα μπορούσε να είναι πιο ευέλικτη στη διαχείριση και επεξεργασία. Η Εικόνα 7 δείχνει το εσωτερικό του χώρου καλωδίου (Navaneetha et al., 2015).



Εικόνα 6 - Εσωτερικός χώρος καλωδίου

Πηγή: Navaneetha et al., 2015

Η κωδικοποίηση χρώματος αφορά τα χαρακτηριστικά (επιβραδυντικό πυρκαγιάς, μηχανική, απλή ή πολλαπλή λειτουργία, διηλεκτρικές ιδιότητες του περιβλήματος) του καλωδίου. Αλλά δεν τηρούν όλοι οι κατασκευαστές τα ίδια πρότυπα.

Η χρωματική κωδικοποίηση, η διαφορά του χρώματος χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των καλωδίων, για την οπτική αναγνώριση καθενός από αυτά για σύνδεση με τη σωστή σειρά. Η Εικόνα 8 δείχνει τη διαφορά των χρησιμοποιούμενων χρωμάτων για τα καλώδια 1-12 κλώνων ινών. Σε περίπτωση περισσότερων ινών υποδεικνύονται με ίδια χρώματα, αλλά με γραμμές ή διακεκομμένες γραμμές (Navaneetha et al., 2015).

ΧΡΩΜΑΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ (Για καλώδια με 1-12 κλώνους ινών)	
1	Μπλε
2	Πορτοκαλί
3	Πράσινο
4	Καφέ
5	Γκρι
6	Άσπρο
7	Κόκκινο
8	Μάυρο
9	Κίτρινο
10	Μωβ
11	Ροζ
12	Κυανό

Εικόνα 7 - Διαφορά χρησιμοποιούμενων χρωμάτων για καλώδια 1-12 κλώνων ινών

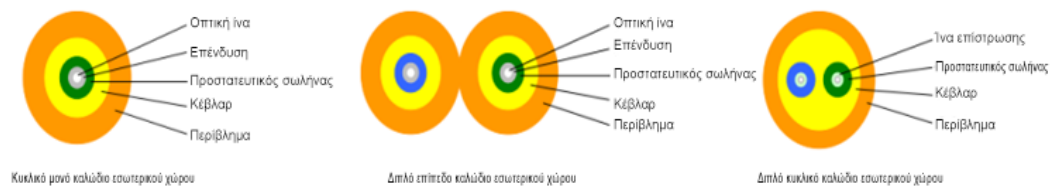


Πηγή: Navaneetha et al., 2015

Οι πιο σημαντικές απαιτήσεις απομόνωσης των καλωδίων οπτικών ινών εσωτερικού χώρου (Navaneetha et al., 2015):

Τα καλώδια δεν πρέπει να είναι υποστηρικτικά και να έχουν χαμηλό καπνό και αλογόνο, πρέπει να έχουν μικρή ακτίνα κάμψης και πρέπει να είναι αποτελεσματικά θωρακισμένα.

Τα καλώδια διασύνδεσης χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των συσκευών, των μπλοκ στη συσκευή, των στοιχείων ελέγχου διεργασιών, των ενσύρματων συστημάτων γραφείου για τη μετάδοση δεδομένων, εικόνας, βίντεο και φωνής σε διανομή εντός του κτιρίου. Μπορούν να σχεδιαστούν μία ή δύο ίνες (Simplex Round, Duplex Zipcord, Duplex Round) (Navaneetha et al., 2015).



Εικόνα 8 - Καλώδια διασύνδεσης

Πηγή: Navaneetha et al., 2015

Αυτά τα καλώδια υφίστανται σχεδόν ελάχιστη μηχανική φόρτιση. Για ενώσεις των μπλοκ στη συσκευή είναι συχνά επαρκείς οπτικές ίνες σε επίστρωση buffer. Αν υπάρχει συχνά εναλλαγή καλωδίων διασύνδεσης για συνδέσεις, μπορεί να περιέχει προστατευτικά πηνία νήματα αραμιδίου και ένα πρόσθετο εξωτερικό κέλυφος, το οποίο παρέχει αυξημένη μηχανική δύναμη (Navaneetha et al., 2015).

## 1.8 ΡΟΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΣΕ ΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΙ ΙΝΕΣ

Τα φωτόνια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα καθώς δεν χρειάζεται να φέρουν φορτίο. Δεν έχουν μάζα σε ηρεμία και η μάζα τους είναι αμελητέα σε κίνηση σε σύγκριση με τα ηλεκτρόνια. Σε ένα καλώδιο, τα ηλεκτρόνια απαιτούν μια «ώθηση» (τάση) για να υπερνικήσουν τις αδρανειακές και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Η τάση δημιουργεί ροή ηλεκτρονίων (ρεύμα) και με τη σειρά της παράγει θερμότητα στο καλώδιο. Επιπλέον, η ροή των ηλεκτρονίων δημιουργεί μαγνητικά πεδία που εκτείνονται πέρα από τα όρια του σύρματος. Αυτά τα πεδία

μπορεί να επηρεάσουν τα ηλεκτρόνια που ταξιδεύουν σε κοντινά καλώδια για να δημιουργήσουν ρεύματα σε αυτά (Gopal and Annamdas, 2011).

Αυτά τα καλώδια μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως ανεπιθύμητες κεραίες, όπου η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που περνά από το καλώδιο μπορεί να διεγείρει μια ροή ηλεκτρονίων. Αυτά τα εφέ μπορούν να δημιουργήσουν «διασταύρωση» μεταξύ των καλωδίων, οδηγώντας σε υποβάθμιση των αισθητήρων. Επιπροσθέτως, αυτά τα μεταλλικά καλώδια μπορούν να προσελκύσουν κεραυνούς προκαλώντας αστοχία στον εξοπλισμό ή οι ίδιοι οι αισθητήρες μπορεί να υποστούν αλλαγές παρουσία εξωτερικών παραγόντων. Ωστόσο, τα φωτόνια δεν έχουν καμία από αυτές τις συνθήκες που να σχετίζονται με την εφαρμογή συστημάτων αισθητήρων οπτικών ινών (FOS).

Δεν δημιουργούν ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία ακόμη και στην ίδια ίνα, εξαλείφοντας έτσι αποτελεσματικά τις παρεμβολές. Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ δύο γειτονικών φωτονίων που ταξιδεύουν στην ίδια ίνα σε αντίθεση με δύο γειτονικά ηλεκτρόνια που ταξιδεύουν σε ένα μόνο καλώδιο. Έτσι, δύο σύρματα ή μια ομάδα συρμάτων δεν μπορούν να συνδεθούν σε ένα μόνο καλώδιο για να αποφευχθεί η απώθηση των ηλεκτρονίων λόγω του κοινού ηλεκτρικού τους φορτίου. Ενώ, είναι δυνατός ο συνδυασμός ενός εξαιρετικά μεγάλου αριθμού σημάτων σε μία μόνο ίνα, μια τέτοια διάταξη είναι γνωστή ως πολυπλεξία. Δεδομένου ότι δεν μεταφέρεται ηλεκτρικό σήμα στην ίνα, είναι ασφαλέστερο σε σκληρά περιβάλλοντα όπως η παρουσία εκρηκτικών αερίων ή καυσίμων. Σε ορισμένες εφαρμογές, το βάρος και ο όγκος μπορεί να μην είναι κρίσιμα, αλλά για πολλές άλλες εφαρμογές, το βάρος και ο όγκος μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντικά και η ελαχιστοποίηση αυτών μπορεί να είναι πολύ κρίσιμη (Gopal and Annamdas, 2011).

### **1.8.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΗΡΙΤΙΣΙΚΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΙΝΩΝ**

Το FOS αποτελείται από μια λεπτή οπτική ίνα, που τυπικά κυμαίνεται από 75 έως 125 microns σε διάμετρο, μπορεί να διαμορφωθεί για να μετρήσει ένα ευρύ φάσμα επιδράσεων μέσω αλλαγών στις δέσμες φωτός που διαδίδονται μέσω των οπτικών ινών. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι (Gopal and Annamdas, 2011):

- Ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές: προστατεύει από κεραυνούς και ηλεκτρικούς κινδύνους
- Ανθεκτικό και στιβαρό: Μπορεί να αντέξει σε σκληρό περιβάλλον και θερμοκρασία είτε πάνω είτε μέσα σε οποιοδήποτε σύνθετο υλικό.

- Multiplex: Πολλοί αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους για να οδηγήσουν σε εξαιρετικά τεράστιο δίκτυο ανίχνευσης κατά μήκος μιας γραμμής ινών.
- Πολυλειτουργικές δυνατότητες: Πολλαπλές παράμετροι μπορούν να ανιχνευτούν κατά μήκος της ίδιας γραμμής ινών ταυτόχρονα, όπως καταπόνηση, πίεση, διάβρωση, θερμοκρασία κ.λπ.
- Βελτιστοποιημένο μέγεθος: Οι αισθητήρες ινών δεν επηρεάζουν ούτε την ακαμψία ούτε διαταράσσουν την ακεραιότητα του υλικού υποδοχής.
- Βελτιστοποίηση του κόστους: Ο υψηλός βαθμός συνέργειας με τις αγορές τηλεπικοινωνιών και οπτοηλεκτρονικών μπορεί να καταστήσει πολύ πιθανή την προοπτική συσκευών χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης στο μέλλον επικοινωνιακή.
- Συστήματα ελέγχου για αποτελεσματική παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM): Ανάπτυξη συστοιχιών αισθητήρων ινών για την αξιολόγηση της κατάστασης μιας δομής. Για παράδειγμα, το σύστημα FOS αναπτύσσεται (για τη μέτρηση της τάσης, της θερμοκρασίας ή του περιβάλλοντος) σε σημαντικές θέσεις σε οποιαδήποτε δομή. Επιπλέον, το σύστημα FOS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για τη συλλογή των δεδομένων αλλά και για την απόκριση σε αυτά. Για παράδειγμα, ένας αυτοκινητόδρομος που ανιχνεύει ένα ατύχημα και ενεργοποιεί προειδοποιητικές πινακίδες ως αποτέλεσμα μιας τέτοιας ανάπτυξης.

### 1.8.2 ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Ακολουθούν οι κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών (Gopal and Annamdas, 2011):

- Αισθητήρες ινών με διαμορφωμένη ή κατανεμημένη ένταση
- Φασματομετρικοί ή οιονεί κατανεμημένοι αισθητήρες ινών
- Εσωτερικοί και εξωγενείς αισθητήρες
- Αισθητήρες Micro bend
- Αισθητήρας ίνας συμπερίληψης

Οι διαμορφωμένοι αισθητήρες έντασης βασίζονται στη διαμόρφωση της έντασης φωτός (πλάτος) στην ίνα. Αυτό το είδος αισθητήρα μπορεί να μετρήσει οποιαδήποτε παράμετρο μπορεί να προκαλέσει απώλειες έντασης στην κατευθυνόμενη δέσμη φωτός. Οι αισθητήρες που μεταβάλλουν την ένταση του φωτός είναι οι απλούστεροι καθώς απαιτούνται μόνο πηγή

και ανιχνευτής. Τα πλεονεκτήματα αυτών των αισθητήρων είναι η απλότητα υλοποίησης, το χαμηλό κόστος, η δυνατότητα πολυπλεξίας και η ικανότητα απόδοσης ως πραγματικοί κατανεμημένοι αισθητήρες. Απώλειες κατάγματος ή τοπικές βλάβες σε μια κατασκευή προκαλούν διακυμάνσεις της έντασης του φωτός. Η κύρια εφαρμογή του είναι για εύρεση σφαλμάτων και παρακολούθηση εξασθένησης σε οπτικά δίκτυα. Καθώς αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να διανεμηθούν, μπορούν επίσης να είναι κατάλληλοι για μεγάλες δομικές, καθώς όλα τα τμήματα μιας οπτικής ίνας λειτουργούν ως αισθητήρες.

Υπάρχουν δύο κύριες μεθοδολογίες κατανεμημένων αισθητήρων, η πρώτη είναι η ανακλασομετρία οπτικού πεδίου χρόνου (OTDR) και η άλλη είναι η σκέδαση Brillouin. Στο OTDR, η σκέδαση Rayleigh και η Fresnel χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση δομικών διαταραχών. Δεν είναι απαραίτητο να μελετήσουμε λεπτομερώς τα φαινόμενα σκέδασης καθώς λειτουργεί με την απλή αρχή της σκέδασης φωτός. Χρησιμοποιώντας την τεχνική OTDR, από την οπισθοσκέδαση του φωτός, είναι δυνατό να ληφθεί η τιμή της έντασης φωτός κατά μήκος ολόκληρης της ίνας, μετρώντας το χρόνο πτήσης των παλμών που επιστρέφουν. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο εντοπισμός απωλειών στην ίνα και ο εντοπισμός αυτών των απωλειών με αρκετά καλή χωρική ανάλυση.

Οι κατανεμημένοι αισθητήρες έχουν μεγάλες δυνατότητες στην πολιτική μηχανική λόγω της εγγενούς διανεμητικής τους φύσης. Επίσης, διαθέτουν ορισμένους περιορισμούς όπως ανεπαρκή ανάλυση, αδύναμο ανιχνεύσιμο σήμα και δυσκίνητο σύστημα αποδιαμόρφωσης. Επιπλέον, καθώς μετρώνται μόνο σχετικές διακυμάνσεις στην ένταση της φωτεινής πηγής, αυτές οι διακυμάνσεις οδηγούν σε ψευδείς μετρήσεις, εκτός εάν χρησιμοποιείται σύστημα αναφοράς.

Οι φασματομετρικοί αισθητήρες παρακολουθούν τις αλλαγές στο μήκος κύματος του φωτός. Αυτοί οι αισθητήρες δεν είναι τόσο ευαίσθητοι όσο οι συμβολομετρικοί αισθητήρες. Εντούτοις, η διαμόρφωση, η εγκατάσταση και η επεξεργασία δεδομένων τους είναι εξαιρετικά εύκολη. Ένα πλεονέκτημα αυτών των αισθητήρων είναι ότι οι ανιχνευόμενες πληροφορίες είναι μια απόλυτη παράμετρος, και έτσι οι απόλυτες μετρήσεις που λαμβάνονται είναι πιο αξιόπιστες σε σύγκριση με τις σχετικές. Η κωδικοποιημένη σε μήκος κύματος φύση της εξόδου επιτρέπει ευκολία στην πολυπλεξία. Ωστόσο, διακοπτόμενα τμήματα ινών λειτουργούν ως αισθητήρες και αυτός ο τμηματικός σχηματισμός επιτυγχάνεται με πλέγματα ινών.

Το πλέγμα Bragg είναι μια περιοδική δομή, που κατασκευάζεται με την έκθεση μιας φωτοευαίσθητοποιημένης ίνας σε υπεριώδες φως. Μπορούν να τοποθετηθούν αρκετές

σχάρες κατά μήκος μιας μοναδικής οπτικής ίνας με διακοπτόμενο τρόπο για να ληφθεί ένα σχεδόν κατανεμημένο σύστημα ανίχνευσης. Όταν το φως από μια πηγή ευρείας ζώνης αλληλεπιδρά με το πλέγμα, ένα μόνο μήκος κύματος, γνωστό ως μήκος κύματος Bragg, ανακλάται πίσω ενώ το υπόλοιπο σήμα μεταδίδεται.

Μια εξωτερική μηχανική καταπόνηση στην ίνα (ένα ερέθισμα) μετατοπίζει το μήκος κύματος Bragg (απόκριση της ίνας) μέσω διαστολής/συστολής της περιοδικότητας του πλέγματος. Ομοίως, μια διακύμανση θερμοκρασίας (ερέθισμα) προκαλεί θερμική διαστολή/συστολή της περιοδικότητας του πλέγματος και επίσης αλλάζει τον δείκτη διάθλασης (αποκρίσεις).εξαρτάται τόσο από τα φυσικά χαρακτηριστικά της ίνας όσο και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος. Τόσο ο αποτελεσματικός δείκτης διάθλασης όσο και η περίοδος τριψίματος ποικίλλουν ανάλογα με τις αλλαγές στην καταπόνηση, μια αλλαγή θερμοκρασίας και μια αλλαγή πίεσης, που επιβάλλονται στην ίνα. Μια εφαρμοζόμενη τάση και πίεση θα μετατοπίσει το μήκος κύματος Bragg μέσω διαστολής ή συστολής της περιοδικότητας του πλέγματος και μέσω του φωτοελαστικού εφέ.

Αυτές οι συσκευές έχουν μια σειρά από ευδιάκριτα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα ανίχνευσης. Ένα από τα πιο σημαντικά από αυτά είναι ότι οι αισθητές πληροφορίες κωδικοποιούνται απευθείας στο μήκος κύματος, το οποίο είναι απόλυτη παράμετρος. Επομένως, η απόδοση δεν εξαρτάται άμεσα από τα συνολικά επίπεδα φωτός. απώλειες στις συνδετικές ίνες και τους ζεύκτες ή επαναβαθμονόμηση ή εκ νέου αρχικοποίηση του συστήματος. Επιπλέον, η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος επιτυγχάνεται εύκολα με την κατασκευή κάθε πλέγματος σε ελαφρώς διαφορετική συχνότητα εντός του φάσματος πηγών ευρείας ζώνης.

Στην βιομηχανία πολιτικού μηχανικού, οι αισθητήρες καταπόνησης που βασίζονται σε FBG έχουν αποδειχθεί ελκυστικές εναλλακτικές λύσεις αντί των συμβατικών ηλεκτρικών μετρητών καταπόνησης. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης για ανίχνευση υδρογόνου στη χημική βιομηχανία. Είναι δύσκολο να προκαθοριστούν οι χώροι εγκατάστασης αισθητήρων FBG, αλλά είναι άριστοι στον εντοπισμό της ζημιάς μόνο όταν είναι γνωστή η συγκεκριμένη περιοχή(ες) ενδιαφέροντος. Μπορούν να εφαρμοστούν στην αεροδιαστημική και την πολιτική βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένων γεφυρών, κτιρίων και φραγμάτων για μέτρηση δυναμικής καταπόνησης, θερμοκρασίας, πίεσης ανέμου ή νερού και τοποθεσίας ζημιών.

Γενικά, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται είτε ως αισθητήριο στοιχείο (εσωτερικοί αισθητήρες) όπου η ίνα χρησιμοποιείται ως μέσο εισόδου/εξόδου, είτε ως μέσο μετάδοσης σημάτων από έναν απομακρυσμένο αισθητήρα στα ηλεκτρονικά που

επεξεργάζονται τα σήματα (εξωτερικοί αισθητήρες). Στους εγγενείς αισθητήρες, ο μετρητής δρα απευθείας πάνω στην οπτική ίνα και αλλάζει ορισμένες φυσικές ιδιότητες της ίνας. Αυτές οι αλλαγές στην ίνα προκαλούν μια αλλαγή στις ιδιότητες του φωτός (ένταση, φάση, πόλωση, μήκος κύματος ή χρόνος διέλευσης φωτός) που ταξιδεύει μέσα στην ίνα και το φως δεν εξέρχεται ποτέ από την ίνα για να μετρήσει την τάση, τη θερμοκρασία, την πίεση, ηλεκτρική τάση κ.λπ. Οι αισθητήρες που διαμορφώνουν την ένταση του φωτός χρησιμοποιούν κυρίως πολυτροπικές ίνες, αλλά για άλλες παραμέτρους χρησιμοποιούνται μόνο καλώδια απλής λειτουργίας. Για παράδειγμα, ένα απλό επιταχυνσιόμετρο (αισθητήρας) μπορεί να κατασκευαστεί τοποθετώντας μια μάζα που υπόκειται στην επιτάχυνση σε μια πολύτροπη ίνα. Η δύναμη που ασκείται από τη μάζα στην ίνα προκαλεί αλλαγή στην ένταση του φωτός που μεταδίδεται. Εάν απαιτείται, αυτοί οι εγγενείς αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κατανεμημένοι αισθητήρες έως 1 μέτρο.

Όλες οι παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η μετατόπιση, η πίεση, το pH και οι διακυμάνσεις του καπνού μπορούν να μετρηθούν αποτελεσματικά παρατηρώντας τη διακύμανση του δείκτη διάθλασης. Η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας μια ίνα που έχει έναν κυρίαρχο μηχανισμό απώλειας γνωστό ως παροδική απώλεια, όπου η ίνα θα έχει δύο διαφορετικούς συντελεστές θερμοκρασίας πυρήνα και επένδυσης. Η ηλεκτρική τάση μπορεί να ανιχνευθεί από μη γραμμικά οπτικά εφέ σε ειδικά κολλημένες ίνες, οι οποίες μεταβάλλουν την πόλωση του φωτός ως συνάρτηση της τάσης ή του ηλεκτρικού πεδίου. Για τη μέτρηση γωνίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Sagnac.

Τα FBG είναι πολύ αποτελεσματικοί εγγενείς αισθητήρες για τη μέτρηση της τάσης ή της θερμοκρασίας όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως. Πρόσφατα, αυτά τα FBG αναπτύχθηκαν επίσης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της καταπόνησης ταυτόχρονα με πολύ υψηλή ακρίβεια. Ακόμη και οι κατανεμημένοι αισθητήρες όπως εκείνοι με βάση τη σκέδαση Brillouin είναι αποτελεσματικοί εγγενείς αισθητήρες. Χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση της τάσης και της θερμοκρασίας σε μεγαλύτερες αποστάσεις περίπου 20-30 χιλιομέτρων στο παρελθόν. Άλλοι εγγενείς αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν ως υδρόφωνα (κατανεμημένοι αισθητήρες) για σεισμικές εφαρμογές, εφαρμογές σόναρ και ως αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης για τη βιομηχανία πετρελαίου. Οι υδρόφωνες είναι αισθητήρες ινών με περισσότερους από εκατό αισθητήρες ανά καλώδιο ινών. Ανάλογα με τη διάταξη των αισθητήρων σε διαφορετικές συστοιχίες, τα συστήματα υδροφώνων μπορούν να ονομαστούν ως συστήματα με ροή στο κάτω μέρος ή ρυμουλκούμενα, κ.λπ..

Αυτά τα συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες κατάλληλες για ημιαγωγούς. Ορισμένοι άλλοι εγγενείς αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν όπως γυροσκόπια οπτικών ινών για την αεροδιαστημική, χερσαία διέλευση για σκοπούς πλοήγησης και αισθητήρες υδρογόνου. Ορισμένοι άλλοι εγγενείς αισθητήρες στην ηλεκτρική μηχανική χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (mega hertz), μέτρηση τάσεων AC/DC, ηλεκτρική ισχύ, που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς διακόπτες για τη μετάδοση φωτός από φλας ηλεκτρικού τόξου σε ψηφιακό προστατευτικό ρελέ.

Στους εξωτερικούς αισθητήρες, χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον πολυτροπική οπτική ίνα για τη μετάδοση διαμορφωμένου φωτός είτε από έναν οπτικό αισθητήρα χωρίς ίνα είτε από έναν ηλεκτρονικό αισθητήρα συνδεδεμένο με έναν οπτικό πομπό στον οποίο η οπτική ίνα χρησιμοποιείται καθαρά ως διαδρομή εισόδου/εξόδου. Η ίνα μεταφέρει το φως μόνο από την πηγή στο αισθητήριο τμήμα και από το τμήμα αίσθησης στο σύστημα αποδιαμόρφωσης. Οι εξωτερικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των κραδασμών, της περιστροφής, της μετατόπισης, της ταχύτητας, της επιτάχυνσης, της ροπής και της συστρόφης.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των εξωτερικών αισθητήρων είναι η ικανότητά τους να φτάνουν σε μέρη που είναι διαφορετικά απρόσιτα με εξαιρετική προστασία των σημάτων μέτρησης έναντι οποιουδήποτε θορύβου. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές, όπως η μέτρηση της θερμοκρασίας εντός των κινητήρων αεριωθουμένων αεροσκαφών με τη χρήση ίνας για τη μετάδοση ακτινοβολίας σε ένα πυρόμετρο ακτινοβολίας που βρίσκεται έξω από τον κινητήρα. Οι εξωτερικοί αισθητήρες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο για τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας των ηλεκτρικών μετασχηματιστών, όπου τα ακραία ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν καθιστούν αδύνατες άλλες τεχνικές μέτρησης.

Αναφορικά με αυτό το είδος, ένας αισθητήρας Micro bend διαμόρφωσης έντασης, όπου η διαμόρφωση που προκαλείται κατά τη μέτρηση οποιασδήποτε ιδιότητας όπως η πίεση μπορεί να αντανακλάται με τη μορφή μιας μικροδιαμόρφωσης απώλειας κάμψης, διαμόρφωσης κινούμενης ίνας ή διαμόρφωσης απορροφητικού στρώματος. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα ορισμένο μήκος ίνας που τοποθετείται μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών που έχουν ένα βέλτιστο προφίλ αυλάκωσης έτσι ώστε η ίνα να έχει πολλαπλές κάμψεις. Λόγω των απωλειών που προκαλούνται από μικροκάμψεις. Έτσι, οι κατευθυνόμενες λειτουργίες κατώτερης τάξης μετατρέπονται σε λειτουργίες υψηλότερης τάξης και τελικά χάνονται από την ακτινοβολία στα εξωτερικά στρώματα με αποτέλεσμα τη μείωση της οπτικής έντασης

που εξέρχεται από την ίνα. Μια μετατόπιση των πλακών λόγω μετρήσιμης ιδιότητας προκαλεί αλλαγή στο πλάτος των στροφών και κατά συνέπεια ένα διαμορφωμένο φως έντασης αναδύεται από τον πυρήνα της ίνας.

Τέτοιοι αισθητήρες είναι κατάλληλοι για κατασκευές πολιτικού μηχανικού, ειδικά σε ενσωματωμένα σύνθετα υλικά όπως το υλικό οπλισμένου σκυροδέματος, όπου οι ενισχυτικές ίνες στη σύνθετη δομή λειτουργούν ως φυσικές θέσεις απώλειας κάμψης για την οπτική ίνα. Επιπροσθέτως, η ευαίσθητη οπτική ίνα μικροκάμψης μπορεί να καλυφθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλείται περιοδική μικροκάμψη. Όταν η ίνα με μανδύα φορτώνεται, το συνολικό αποτέλεσμα οδηγεί σε αύξηση της απώλειας. Ο συνδυασμός πολλαπλών αισθητήρων μικροκάμψης μπορεί να σχηματίσει μια διάταξη αισθητήρων για την σχεδόν κατανεμημένη εφαρμογή ανίχνευσης στην παρακολούθηση της τοπικής τάσης ή παραμόρφωσης κατά μήκος των δομών.

Η ευαισθησία του αισθητήρα μπορεί να ρυθμιστεί σε μια συγκεκριμένη τιμή σύμφωνα με τις απαιτήσεις της συνθήκης μέτρησης. Συνδεδεμένη με συστήματα επεξεργασίας πολυπλεξίας ανίχνευσης, η συστοιχία αισθητήρων μπορεί να βρει εφαρμογή στην παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και στην ανίχνευση ζημιών μεγάλων και κρίσιμων δομών μηχανικής.

Τα περισσότερα από τα εξαρτήματα αυτών των αισθητήρων χρησιμοποιούν είτε πλήρως ίνες είτε ενσωματωμένο οπτικό υλικό για να παρέχουν καλύτερη σταθερότητα. Ένας συμβολομετρικός αισθητήρας λειτουργεί στη διαμόρφωση στη φάση του φωτός που αναδύεται από μια ίνα απλής λειτουργίας. Η διακύμανση της φάσης μετατρέπεται σε μετατόπιση έντασης χρησιμοποιώντας παρεμβολομετρικά σχήματα (μορφές Sagnac, συντονιστές δακτυλίου, Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Pero ή διπλή λειτουργία, πολωσιμετρικά, πλέγματα και συμβολόμετρα με βάση το Etalon.).

Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εσωτερικοί ή εξωτερικοί αισθητήρες και ως κατανεμημένοι ή διανεμημένοι αισθητήρες ανάλογα με τον τύπο των εφαρμογών. Οι εφαρμογές μπορεί να είναι ακουστικές (π.χ. υδρόφωνα), περιστροφής (π.χ. γυροσκόπιο), χημικά, βιολογικά κ.ά., με σκοπό μέτρηση καταπόνησης, θερμοκρασίας κ.ά. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές σε πολλά συστήματα ανίχνευσης όπως είναι παραδείγματος χάριν η ανίχνευση σημάτων δόνησης.

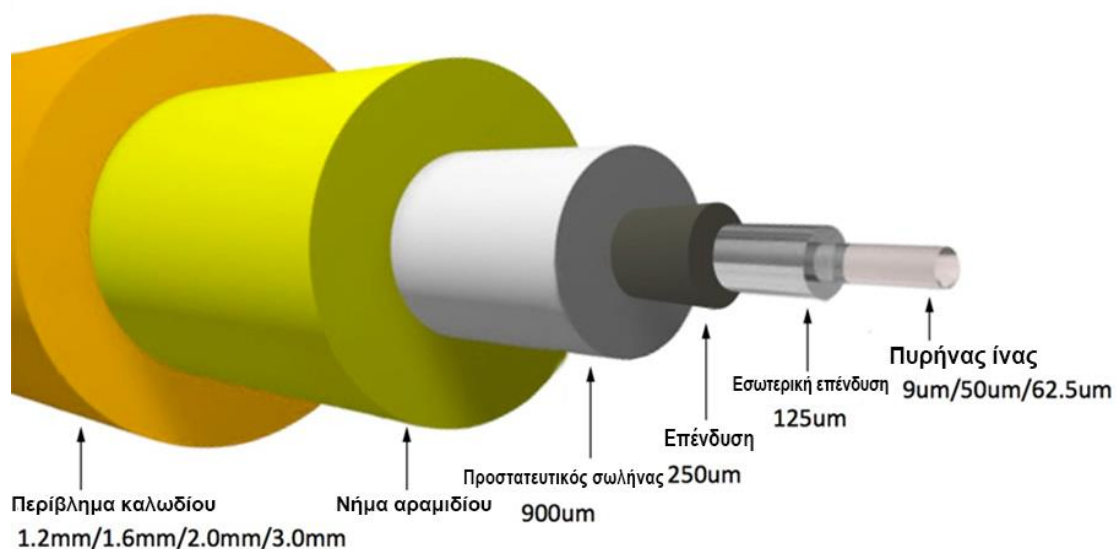


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

### 2.1 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

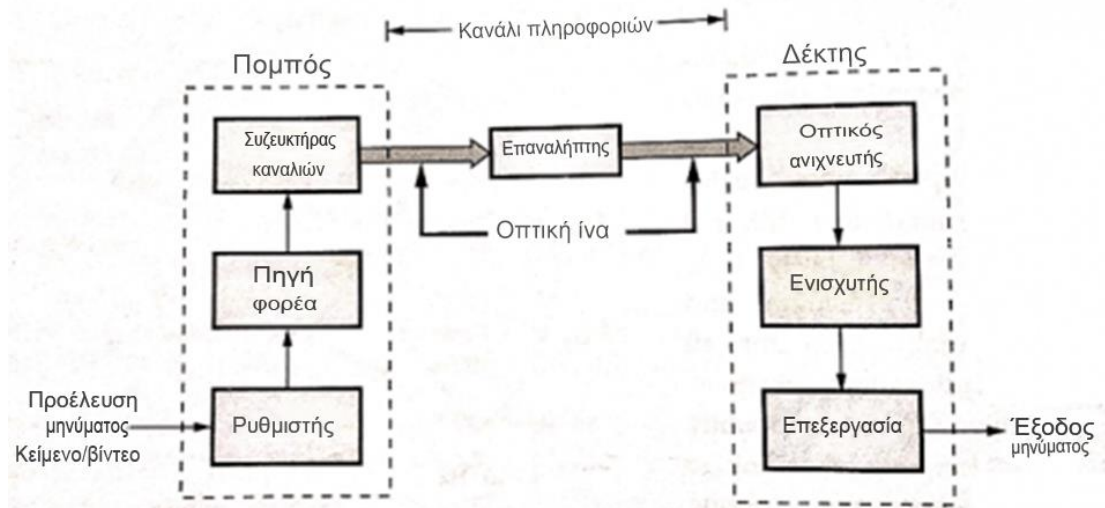
Η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως μέσο μετάδοσης τηλεπικοινωνιών το 1966. Εκείνη την εποχή, η ίνα είχε ακόμα κάποια προβλήματα με τη χρήση της και έχασε περισσότερα από 1000 dB/km εγκατάστασης. Πολλά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί για την πρόληψη και τη μείωση των εν λόγω απωλειών. Μέχρι τη δεκαετία του 2000, οι οπτικές ίνες μπορούσαν να λειτουργούν σε μήκη κύματος μικρότερα από 1,5 m με απώλειες μικρότερες από 1 dB/km, πολύ λιγότερες από πριν. Η αναγωγή μπορεί να γίνει μειώνοντας τη συνολική απορρόφηση ιόντων μετάλλων μετάπτωσης όπως ο σίδηρος, το χρώμιο, το κοβάλτιο και ο χαλκός.

Στην αρχή, περίπου πριν από λίγους αιώνες, ο Alexander Graham Bell είχε πειραματιστεί με την αποστολή τηλεφωνικών σημάτων σε απόσταση αρκετών εκατοντάδων μέτρων χρησιμοποιώντας δέσμες ορατού φωτός. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του ονομάζονται «Φωτόφωνο». Αυτή η ανακάλυψη έγινε η αρχή των βασικών αρχών της οπτικής επικοινωνίας όπως αυτή εφαρμόζεται σήμερα (Rahmanda et al., 2021).



Εικόνα 9 - Μέρη οπτικής ίνας

Πηγή: Rahmanda et al., 2021



Εικόνα 10 - Διαδρομή του μηνύματος δεδομένων μέσω πολλών διεργασιών

Πηγή: Rahmanda et al., 2021

Η Εικόνα 11 δείχνει τη διαδρομή του μηνύματος δεδομένων μέσω πολλών διεργασιών πριν φτάσει στον προορισμό του. Κάθε μέρος του διαγράμματος έχει τη δική του λειτουργία. Για παράδειγμα, ο διαμορφωτής λειτουργεί για να μετατρέπει ένα ηλεκτρικό μήνυμα σε μια πιο ακριβή μορφή και, στη συνέχεια, η φέρουσα πηγή το εκτυπώνει σε κύματα φωτός όπου εκπέμπονται οι προηγουμένως επεξεργασμένες πληροφορίες. Σε μια οπτική ίνα, γενικά χρησιμοποιείται πομπός δίοδος λέιζερ (LD) ή δίοδος εκπομπής φωτός (LED) για την εκπομπή ψηφιακού σήματος που έχει μετατραπεί από έναν διαμορφωτή σε φωτεινό σήμα. Στη συνέχεια, ο συζευκτήρας καναλιών συνδυάζει τις ακτίνες φωτός και τις κατευθύνει στον δέκτη. Το φωτεινό σήμα μεταδίδεται μέσω του καναλιού πληροφοριών, το οποίο είναι μια ενδιάμεση διαδρομή μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Μετά από αυτό, το εκπεμπόμενο σήμα φωτός ανιχνεύεται από τον Οπτικό Ανιχνευτή, έτσι ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα ξανά και να παράγει έξοδο που μπορεί να είναι με τη μορφή κειμένου, εικόνων, ήχου ή βίντεο (Rahmanda et al., 2021).

Η εφαρμογή τηλεπικοινωνιακής υποδομής που βασίζεται σε οπτικές ίνες ως ραχοκοκαλιά αποτελεί λύση για την ταχεία ανάπτυξη της κίνησης στο διαδίκτυο. Λόγω της ταχείας ανάπτυξης, η ζήτηση για εύρος ζώνης για εφαρμογές κοινής χρήσης αυξάνεται. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η χωρητικότητα της μεταφοράς δεδομένων οπτικών ινών με μεγάλη ποσότητα. Η επιλογή της οπτικής ίνας ως τηλεπικοινωνιακής υποδομής έχει περισσότερα πλεονεκτήματα από άλλους τύπους μέσων μεταφοράς δεδομένων.

Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι με τη μορφή της ταχύτητας και της ικανότητας της τεχνολογίας επικοινωνίας οπτικών ινών να μεταδίδει δεδομένα με μεγάλη χωρητικότητα σε μεγάλες

αποστάσεις. Επομένως, η οπτική ίνα είναι η καταλληλότερη επιλογή για την κατασκευή εθνικών και παγκόσμιων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Αυτό συμβαδίζει με τους παρόχους Διαδικτύου που προτιμούν να επενδύουν σε τεχνολογίες που προσφέρουν μακροπρόθεσμη ισορροπία αντί για βραχυπρόθεσμες τεχνολογίες που μπορούν να απειλήσουν την επιβίωσή τους στην αγορά. Εάν περιγράφεται συγκεκριμένα, το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας είναι πολύ υψηλό. Επειδή έχει υψηλό εύρος ζώνης, η ικανότητα μεταφοράς περισσότερων πληροφοριών είναι επίσης μεγαλύτερη. Οι οπτικές ίνες έχουν επίσης υψηλότερη αντίσταση στη θερμοκρασία από άλλους τύπους καλωδίων χαλκού. Ακόμη και στη χειρότερη περίπτωση, εάν το οπτικό εξωτερικό στρώμα λιώσει, η απόδοση του συστήματος οπτικών ινών μπορεί να λειτουργεί καλά (Ghazi et al., 2021; Solihah and Nashiruddin, 2020).

Η οπτική ίνα λειτουργεί ως κανάλι επικοινωνίας. Ο ρόλος ενός καναλιού επικοινωνίας είναι να μεταφέρει το οπτικό σήμα από τον πομπό στον δέκτη χωρίς να το παραμορφώνει. Τα περισσότερα συστήματα φωτοκυμάτων χρησιμοποιούν οπτικές ίνες ως κανάλι επικοινωνίας επειδή οι ίνες πυριτίου μπορούν να μεταδώσουν φως με απώλειες τόσο μικρές όσο 0,2 dB/km. Ακόμη και τότε, η οπτική ισχύς μειώνεται μόνο στο 1% μετά από 100 km. Για το λόγο αυτό, οι απώλειες ινών παραμένουν ένα σημαντικό ζήτημα σχεδιασμού και καθορίζουν την απόσταση επαναλήπτη ή ενισχυτή ενός συστήματος ελαφρών κυμάτων μεγάλων αποστάσεων. Ένα άλλο σημαντικό θέμα σχεδιασμού είναι η διασπορά ινών που οδηγεί στη διεύρυνση των μεμονωμένων οπτικών παλμών με τη διάδοση. Εάν οι οπτικοί παλμοί εξαπλωθούν σημαντικά έξω από την εκχωρημένη θυρίδα bit, το μεταδιδόμενο σήμα υποβαθμίζεται σοβαρά (Das et al., 2016).

Τελικά, καθίσταται αδύνατη η ανάκτηση του αρχικού σήματος με υψηλή ακρίβεια. Το πρόβλημα είναι πιο σοβαρό στην περίπτωση των πολύτροπων ινών, καθώς οι παλμοί εξαπλώνονται γρήγορα (συνήθως με ρυθμό 10ns/km) λόγω των διαφορετικών ταχυτήτων που σχετίζονται με διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας ινών. Αυτός είναι ο λόγος που τα περισσότερα συστήματα οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν ίνες μονής λειτουργίας. Η διασπορά υλικού (που σχετίζεται με την εξάρτηση από τη συχνότητα του δείκτη διάθλασης) εξακολουθεί να οδηγεί σε διεύρυνση του παλμού (συνήθως <0,1 ns/km), αλλά είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι αποδεκτή για τις περισσότερες εφαρμογές και μπορεί να μειωθεί περαιτέρω ελέγχοντας το φασματικό πλάτος του οπτικού πηγής (Das et al., 2016).

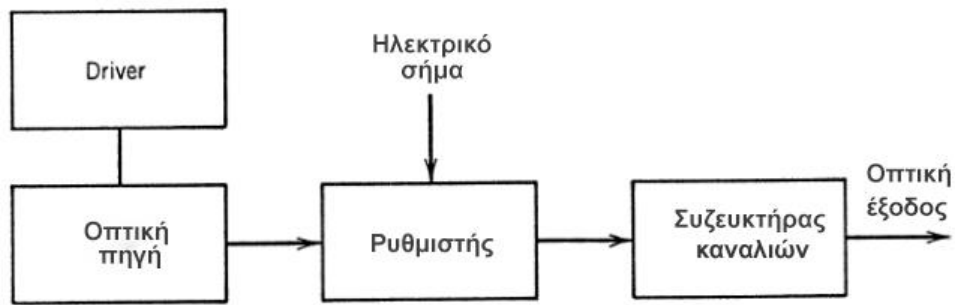
Η ίδια η χρήση οπτικών ινών ως μέσο τηλεπικοινωνιών αποτελείται γενικά από πολλά σημαντικά μέρη. Τα στοιχεία αποτελούνται από:

- Οπτικοί πομποί

- Οπτικοί Δέκτες
- Προφίλ δείκτη διάθλασης (RI) ίνας μονής λειτουργίας
- Διάδοση φωτός σε πολύτροπη ίνα
- Νόμος του Snell
- Διάδοση φωτός σε ίνα μονής λειτουργίας

Ο ρόλος ενός οπτικού πομπού είναι να μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε οπτική μορφή και να εκτοξεύει το οπτικό σήμα που προκύπτει στην οπτική ίνα (Σχήμα 2). Αποτελείται από μια οπτική πηγή, έναν διαμορφωτή και έναν συζευκτήρα καναλιών. Ως οπτικές πηγές χρησιμοποιούνται λέιζερ ημιαγωγών ή δίοδοι εκπομπής φωτός λόγω της συμβατότητάς τους με το κανάλι επικοινωνίας οπτικών ινών. Το οπτικό σήμα παράγεται με τη διαμόρφωση του οπτικού φέροντος κύματος. Αν και μερικές φορές χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός διαμορφωτής, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παραλειφθεί, καθώς η έξοδος μιας οπτικής πηγής ημιαγωγών μπορεί να διαμορφωθεί απευθείας μεταβάλλοντας το ρεύμα έγχυσης. Ένα τέτοιο σχέδιο απλοποιεί τον σχεδιασμό του πομπού και είναι γενικά οικονομικά αποδοτικό. Ο συζεύκτης είναι συνήθως ένας μικροφακός που εστιάζει το οπτικό σήμα στο επίπεδο εισόδου μιας οπτικής ίνας με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Η εκτοξευόμενη ισχύς είναι μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού. Κάποιος μπορεί να αυξήσει την απόσταση του ενισχυτή (ή του επαναλήπτη) αυξάνοντάς την, αλλά η εμφάνιση διαφόρων μη γραμμικών εφέ περιορίζει πόσο μπορεί να αυξηθεί η ισχύς εισόδου. Η εκτοξευόμενη ισχύς εκφράζεται συχνά σε μονάδες «dBm» με 1 Mw ως επίπεδο αναφοράς. (Das et al., 2016).

Έτσι, 1 mW είναι 0 dBm, αλλά 1 μW αντιστοιχεί σε -30 dBm. Η εκτοξευόμενη ισχύς είναι μάλλον χαμηλή (< -10 dBm) για τις διόδους εκπομπής φωτός, αλλά τα λέιζερ ημιαγωγών μπορούν να εκτοξεύσουν ισχύ 10 dBm. Καθώς οι δίοδοι εκπομπής φωτός είναι επίσης περιορισμένες στις δυνατότητες διαμόρφωσης τους, τα περισσότερα συστήματα φωτοκυμάτων χρησιμοποιούν λέιζερ ημιαγωγών ως οπτικές πηγές. Ο ρυθμός bit των οπτικών πομπών συχνά περιορίζεται από τα ηλεκτρονικά και όχι από το ίδιο το λέιζερ ημιαγωγών.

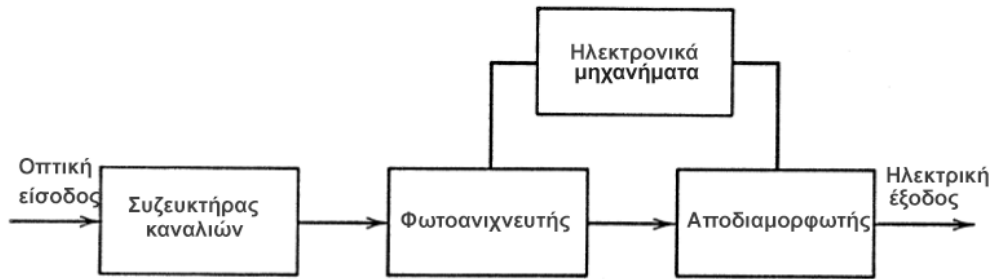


Εικόνα 11 - Εξαρτήματα οπτικού πομπού

Πηγή: Das et al., 2016

Ένας οπτικός δέκτης μετατρέπει το οπτικό σήμα που λαμβάνεται στο άκρο εξόδου της οπτικής ίνας πίσω στο αρχικό ηλεκτρικό σήμα. Το διάγραμμα ενός οπτικού δέκτη φαίνεται στην Εικόνα 13. Αποτελείται από έναν συζεύκτη, έναν φωτοανιχνευτή και έναν αποδιαμορφωτή. Ο συζεύκτης εστιάζει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα στον φωτοανιχνευτή. Οι φωτοδίοδοι ημιαγωγών χρησιμοποιούνται ως φωτοανιχνευτές λόγω της συμβατότητάς τους με ολόκληρο το σύστημα. Ο σχεδιασμός του αποδιαμορφωτή εξαρτάται από τη μορφή διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται από το σύστημα lightwave. Η αποδιαμόρφωση σε αυτή την περίπτωση γίνεται από ένα κύκλωμα απόφασης που προσδιορίζει τα bit ως 1 ή 0, ανάλογα με το πλάτος του ηλεκτρικού σήματος. Η ακρίβεια του κυκλώματος απόφασης εξαρτάται από το SNR του ηλεκτρικού σήματος που παράγεται στον φωτοανιχνευτή.

Η απόδοση ενός ψηφιακού συστήματος φωτοκυμάτων χαρακτηρίζεται μέσω του ρυθμού biterror (BER). Αν και το BER μπορεί να οριστεί ως ο αριθμός των σφαλμάτων που γίνονται ανά δευτερόλεπτο, ένας τέτοιος ορισμός καθιστά τον ρυθμό μετάδοσης bit BER εξαρτώμενο. Είναι σύνηθες να ορίζεται το BER ως η μέση πιθανότητα λανθασμένης αναγνώρισης bit. Επομένως, ένα BER  $10^{-6}$  αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε ένα σφάλμα ανά εκατομμύριο bit. Τα περισσότερα συστήματα lightwave καθορίζουν μια απαίτηση λειτουργίας BER  $10^{-9}$  (Das et al., 2016).



Εικόνα 12 - Εξαρτήματα οπτικού δέκτη

Πηγή: Das et al., 2016

Μια σημαντική παράμετρος για κάθε δέκτη είναι η ευαισθησία του δέκτη. Συνήθως ορίζεται ως η ελάχιστη μέση οπτική ισχύς που απαιτείται για την πραγματοποίηση BER  $10^{-9}$ . Η ευαισθησία του δέκτη εξαρτάται από το SNR, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από διάφορες πηγές θορύβου που αλλοιώνουν το λαμβανόμενο σήμα. Ακόμη και για έναν τέλει δέκτη, εισάγεται κάποιος θόρυβος από την ίδια τη διαδικασία της φωτοανίχνευσης. Αυτό αναφέρεται ως κβαντικός θόρυβος ή θόρυβος βολής, καθώς προέρχεται από τη σωματιδιακή φύση των ηλεκτρονίων. Οι οπτικοί δέκτες που λειτουργούν στο όριο θορύβου βολής ονομάζονται δέκτες περιορισμένου κβαντικού θορύβου. Κανένας πρακτικός δέκτης δεν λειτουργεί στο όριο κβαντικού θορύβου λόγω της παρουσίας πολλών άλλων πηγών θορύβου. Ορισμένες από τις πηγές θορύβου, όπως ο θερμικός θόρυβος, είναι εσωτερικές του δέκτη. Άλλα προέρχονται από τον πομπό ή κατά τη διάδοση κατά μήκος του συνδέσμου ινών.

Για παράδειγμα, οποιαδήποτε ενίσχυση του οπτικού σήματος κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης με τη βοήθεια οπτικών ενισχυτών εισάγει τον λεγόμενο θόρυβο του ενισχυτή που προέρχεται από τη θεμελιώδη διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής. Η χρωματική διασπορά σε οπτικές ίνες μπορεί να προσθέσει επιπλέον θόρυβο μέσω φαινομένων όπως η παρεμβολή διασυμβόλων και ο θόρυβος κατάτμησης λειτουργίας. Η ευαισθησία του δέκτη καθορίζεται από μια αθροιστική επίδραση όλων των πιθανών μηχανισμών θορύβου που υποβαθμίζουν το SNR στο κύκλωμα απόφασης. Γενικά, εξαρτάται επίσης από τον ρυθμό μετάδοσης bit καθώς η συμβολή ορισμένων πηγών θορύβου (π.χ. θόρυβος λήψης) αυξάνεται ανάλογα με το εύρος ζώνης του σήματος (Das et al., 2016).

Η ινα μονής λειτουργίας χαρακτηρίζεται από το στενό μέγεθος πυρήνα της. Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι μόνο μία λειτουργία μπορεί να διαδοθεί. Το μέγεθος του πυρήνα είναι συνήθως μεταξύ 8 και 10 microns αν και οι ίνες SM ειδικού σκοπού συχνά χρησιμοποιείται

με μεγέθη πυρήνα τόσο χαμηλά όσο 4 microns. Στο RI η διαφορά μεταξύ πυρήνα και επένδυσης είναι συνήθως πολύ μικρή (γύρω στο 0,01). Αυτό γίνεται για να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση απόσβεσης. Κάποιος μπορεί να επιτύχει τη διαφορά δείκτη είτε με ντόπινγκ του πυρήνα για να αυξήσει το RI του (πχ με GeO<sub>2</sub>) ή κατά ντόπινγκ της επένδυσης (πχ με φθόριο) για να χαμηλώσει το RI της.

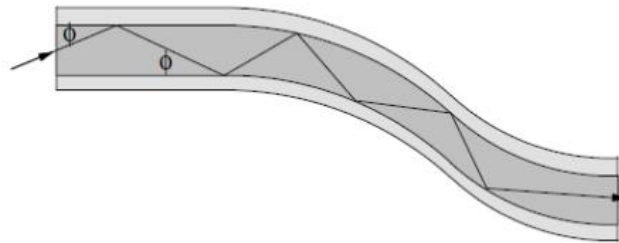
Τα πρόσθετα τόσο στον πυρήνα όσο και στην επένδυση επηρεάζουν την εξασθένηση. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές συνθέσεις πυρήνα και επένδυσης σε χρήση. Ο δείκτης διάθλασης των ινών αλλάζει και χειρίζεται με την προσθήκη διαφόρων «προσθέτων» στο βασικό SiO<sub>2</sub>.

Αυτά μπορεί να έχουν διάφορα αποτελέσματα (Das et al., 2016):

- Ορισμένες προσμείξεις αυξάνουν τον δείκτη διάθλασης και άλλοι το μειώνουν. Αυτός είναι ο πρωταρχικός λόγος που χρησιμοποιούνται προσμείξεις.
- Όλα τα πρόσθετα αυξάνουν την εξασθένηση της ίνας. Επομένως, οι προσμείξεις πρέπει να αποφεύγονται (ή τουλάχιστον να ελαχιστοποιούνται) εάν η εξασθένηση είναι σημαντική για την εφαρμογή της ίνας. Καθώς το φως ταξιδεύει στον πυρήνα, αναμένεται ότι τα επίπεδα πρόσμιξης στην επένδυση μπορεί να μην κάνουν ιδιαίτερα μεγάλη διαφορά. Σε μονοτροπική ίνα το αρκετά μεγάλο ποσοστό της οπτικής ισχύος (ηλεκτρομαγνητικό πεδίο) ταξιδεύει στην επένδυση. Σε μονοτροπικές ίνες η εξασθένηση και η ταχύτητα διάδοσης επηρεάζεται έντονα από τα χαρακτηριστικά της επένδυσης. Στην πολυτροπική ίνα ο πυρήνας είναι ντοπαρισμένος ούτως ή άλλως (αν και σε διαφορετικά επίπεδα) είναι ένα ζήτημα ακόμη και στον πυρήνα. Σε πολύτροπη ίνα step-index υπάρχει ένα "φεύγον πεδίο" στημένο στην επένδυση κάθε στιγμή που μια ακτίνα ανακλάται. Αυτό είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά εξασθένησης της επένδυσης.
- Εάν χρησιμοποιηθεί ένα προσμίκτης σε πολύ υψηλό επίπεδο, αλλάζει ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού αλλά αλλάζει και ο συντελεστής διαστολής. Αυτό σημαίνει ότι σε συνθήκες λειτουργίας η επένδυση μπορεί να σπάσει από τον πυρήνα.

Το βασικό χαρακτηριστικό της διάδοσης του φωτός σε μια ίνα είναι ότι η ίνα μπορεί να κάμπτεται γύρω από τις γωνίες. Υπό την προϋπόθεση ότι η ακτίνα κάμψης δεν είναι πολύ σφιχτή (2 cm είναι περίπου το ελάχιστο για τις περισσότερες πολυτροπικές ίνες), το φως θα ακολουθεί την ίνα και θα διαδίδεται χωρίς απώλεια λόγω των στροφών. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «ολική εσωτερική αντανάκλαση». Μια ακτίνα φωτός που εισέρχεται στην ίνα

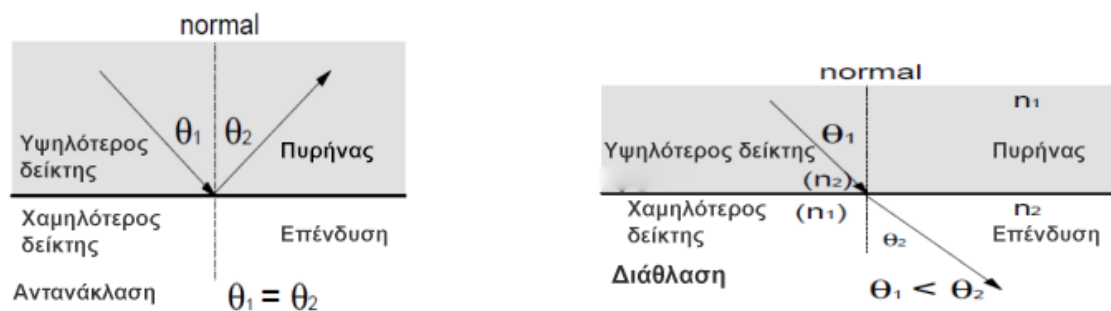
καθοδηγείται κατά μήκος της ίνας επειδή αναπηδά από τη διεπαφή μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης (κατώτερος δείκτης διάθλασης). Το φως λέγεται ότι «δεσμεύεται» μέσα στην ίνα (Εικόνα 14).



Εικόνα 13 - Διάδοση φωτός σε πολύτροπη ίνα

Πηγή: Das et al., 2016

Αν αναλογιστεί κανείς τη διάδοση μιας «ακτίνας» σε μια πολύτροπη ίνα δεικτών βημάτων, μπορεί να αναλυθεί η κατάσταση πολύ εύκολα με τους «νόμους της στοιχειώδους φυσικής». «Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης». Αυτό σημαίνει ότι  $\theta_1 = \theta_2$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.



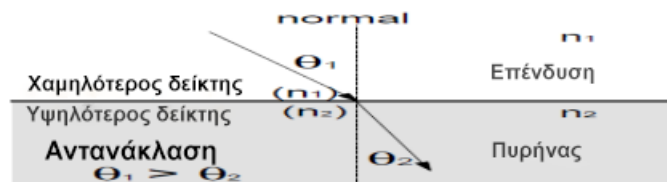
Εικόνα 14 - Ανάκλαση και διάθλαση

Πηγή: Das et al., 2016

Η διάδοση κατά μήκος μιας ίνας είναι ότι δεν μπορεί να διαδοθεί όλο το φως με αυτόν τον τρόπο. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας με τη διεπιφάνεια συγκόλλησης πρέπει να είναι αρκετά μικρή, διαφορετικά η ακτίνα θα περάσει μέσα στην επένδυση και μετά από λίγο θα φύγει από την ίνα.

Για να κατανοηθεί η διάδοση ακτινών σε μια ίνα, (Εικόνα 16) χρειάζεται ένας ακόμη νόμος. Αυτός είναι ο νόμος του Snell,  $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ , όπου, δηλώνει τον δείκτη διάθλασης του υλικού.





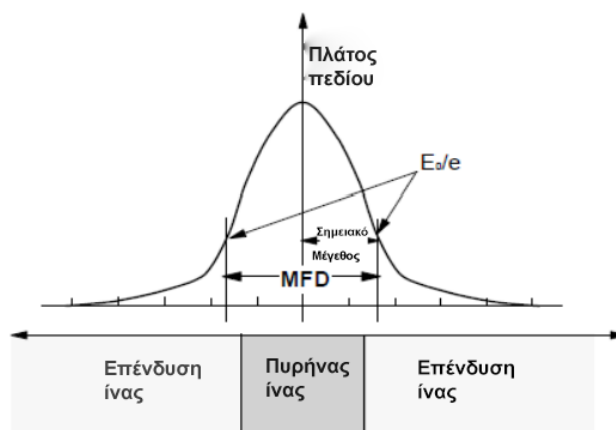
Εικόνα 15 - Διάθλαση του νόμου Snels

Πηγή: Das et al., 2016

### Διάμετρος πεδίου λειτουργίας (MFD) και μέγεθος κηλίδας

Η οπτική ισχύς (σε ίνα μονής λειτουργίας) ταξιδεύει τόσο στον πυρήνα όσο και στην επένδυση. Σε πολλές περιπτώσεις, κυρίως όταν ενώνεται ίνα, χρειάζεται ένας αριθμός που θα παρέχει ένα μέτρο της έκτασης της περιοχής που μεταφέρει το οπτικό σήμα. Στην ίνα μονής λειτουργίας η διάμετρος του πυρήνα δεν είναι επαρκής.

Το πεδίο λειτουργίας ορίζεται ως η απόσταση (Εικόνα 17) μεταξύ των σημείων όπου η ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται στο 0,37 (1/e) της κορυφής. Το πεδίο λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί ο αποτελεσματικός πυρήνας της ίνας, αν και το πραγματικό μέγεθος πυρήνα είναι συνήθως κάπως μικρότερο. Ένα σημαντικό σημείο είναι ότι δεν υπάρχει απότομο όριο που να καθορίζει την έκταση του πεδίου λειτουργίας. Παρόλο που το σήμα εξασθενεί εκθετικά, δεν υπάρχει ακριβές σημείο αποκοπής. Το μέγεθος κηλίδας χρησιμοποιείται επίσης μερικές φορές για τον χαρακτηρισμό της ίνας μονής λειτουργίας. Η διάμετρος του σημείου είναι μόνο η ακτίνα του πεδίου λειτουργίας (Das et al., 2016).



Εικόνα 16 - Ορισμός πεδίου λειτουργίας

Πηγή: Das et al., 2016

## 2.2 ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

### 2.2.1 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Το ευρύ φάσμα της οπτικής ασύρματης επικοινωνίας ανταποκρίνεται στις ανάγκες της ασύρματης επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας, η οποία είναι το κύριο πλεονέκτημα της οπτικής ασύρματης επικοινωνίας έναντι των παραδοσιακών τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας. Οι επικοινωνίες οπτικών ινών, ως σημαντική χρήση της τεχνολογίας λέιζερ, είναι ζωτικής σημασίας διευκολυντές για τη σύγχρονη εποχή της πληροφορίας. Με την άνοδο των νέων τεχνολογιών όπως το Internet of Things, Big Data, υπολογιστικό νέφος, εικονική πραγματικότητα και τεχνητή νοημοσύνη, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη στην κοινωνία για μετάδοση δεδομένων υψηλής χωρητικότητας, ανεβάζοντας τον πήχη για την τεχνολογία επικοινωνίας οπτικών ινών (Kaur et al., 2022).

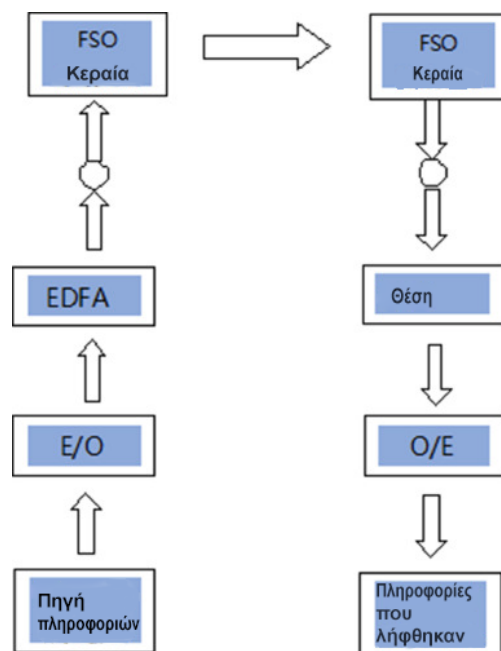
Τα φωτεινά σημεία χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πληροφοριών στην επικοινωνία οπτικών ινών, μια διαδικασία που χρησιμοποιεί οπτικές ίνες. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που παράγονται από το φως, μεταφέρουν δεδομένα σε πολλές μορφές. Κατά τη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά. Είχε τον πιο σημαντικό αντίκτυπο με την ανάπτυξη νέας τεχνολογίας επικοινωνίας. Τα χάλκινα σύρματα χρησιμοποιήθηκαν πριν από την ανάπτυξη των οπτικών ινών, τα οποία τελικά καταργήθηκαν σταδιακά υπέρ των καλωδίων ινών (Le et al., 2019; Guo et al., 2022).

Για να χρησιμοποιήσετε την τεχνολογία οπτικών ινών ακολουθούν τα εξής βήματα: δημιουργία οπτικού σήματος, μετάδοση σημάτων χρησιμοποιώντας ίνα, διασφάλιση ότι τα σήματα είναι καθαρά και ισχυρά, λήψη οπτικών σημάτων και μετατροπή τους σε ηλεκτρικά σήματα. Οι ίνες που μπορούν να μεταφέρουν φως προς την κατεύθυνση του μήκους τους είναι γνωστές ως οπτικές ίνες. Στην ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση, είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματικά (Tokhy et al., 2022).

Για επιτυχή μετάδοση οπτικών σημάτων, τα συστήματα επικοινωνίας FSO χρησιμοποιούν ελεύθερο χώρο ως κανάλι επικοινωνίας μεταξύ πομποδέκτη που είναι οπτικής επαφής (LOS). Το κανάλι μπορεί να είναι ατμόσφαιρα, χώρος ή κενό και τα χαρακτηριστικά του καθορίζουν τον τρόπο μετάδοσης και λήψης των οπτικών σημάτων, επιτρέποντας την ανάπτυξη αξιόπιστων και αποτελεσματικών συστημάτων επικοινωνίας. Τα δεδομένα ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας τεχνολογία FSO μέσω διάδοσης φωτός σε ατμοσφαιρικές ή διαστημικές διαδρομές επικοινωνίας, επιτρέποντας οπτική συνδεσιμότητα. Η επικοινωνία FSO παρέχει υψηλό ρυθμό δεδομένων για την κάλυψη της ταχέως αυξανόμενης ζήτησης για ευρυζωνική κίνηση, η οποία οφείλεται κυρίως στην πρόσβαση στο Διαδίκτυο και στις υπηρεσίες

μετάδοσης HDTV. Το FSO επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη ελευθερία στη δημιουργία σχεδίων οπτικών δικτύων σε πολύ υψηλές ταχύτητες, σε ρυθμούς δεκάδων και εκατοντάδων Gbit/s, σε σύγκριση με την τεχνολογία οπτικών ινών (Nguyen et al., 2019).

Η Εικόνα 17 δείχνει ότι μπορεί να ληφθεί επικοινωνία διπλής όψης μέσω του σήματος από την αντίθετη πλευρά του παλμού λέιζερ που αποδιαμορφώνεται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα επικοινωνίας λέιζερ ατμοσφαιρικής εκπομπής. Κάθε μετάδοση που διαμορφώνεται με παλμό λέιζερ (όπως ομιλία ή δεδομένα) αποστέλλεται και λαμβάνεται από δύο συστήματα επικοινωνίας λέιζερ. Τα δεδομένα του συστήματος μπορεί να αποστέλλονται μέσω ομιλίας και δεδομένων υπολογιστή. Περνάει φως λέιζερ με τροποποιημένο σήμα, ώστε η οπτική κεραία να λαμβάνει ένα σήμα που περιλαμβάνει ένα λέιζερ μέσω του ηλεκτρικού κυκλώματος κίνησης. Η οπτική κεραία επικοινωνίας λέιζερ του φωτός συγκεντρώνεται από τον φωτοανιχνευτή ταυτόχρονα σε ηλεκτρικά σήματα και στη συνέχεια τα οπτικά σήματα ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση ως μέθοδο ανίχνευσης εύρους για την ενίσχυση του σήματος και χρήσιμη ανίχνευση σήματος. Για να ολοκληρωθεί η ομιλία, τα εξαρτήματα υψηλής συχνότητας και ένα φιλτραρισμένο κύκλωμα αποδιαμόρφωσης ζώνης βάσης αποκαθιστούν το τελικό σήμα που ελήφθη από τον ενισχυτή μέσω ενός ακουστικού. Η μεταφορά δεδομένων για επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών είναι δυνατή εάν ο διακόπτης κάτω από το Κ αναποδογυρίσει. Εκτός από υπολογιστή και άλλα εξαρτήματα, διαθέτει επίσης ένα μόντεμ και ένα ατμοσφαιρικό κανάλι (Kaur et al., 2022).



Εικόνα 17 - Οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666285X22000280>

Ο σημερινός Εξοπλισμός Χρήστη (UE) είναι σε θέση να παρέχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και υπηρεσιών διαδικτύου, αυξάνοντας την απαίτηση για μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας και υπηρεσίες υψηλής ποιότητας (QoS). Ως αποτέλεσμα αυτών των απαιτήσεων, τα συστήματα κινητής επικοινωνίας επόμενης γενιάς αναμένεται να παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερη ποιότητα σύνδεσης από τα τρέχοντα συστήματα. Για την ανοδική σύνδεση των Διεθνών Κινητών Τηλεπικοινωνιών-Προηγμένη, Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (OFDMA) και Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας Ενιαίου Φορέα(SC-FDMA) είναι ισχυροί υποψήφιοι πολλαπλής πρόσβασης (IMT-Advanced). Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση του συστήματος IMT-Advanced, αυτές οι προσεγγίσεις πολλαπλής πρόσβασης θα χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες, όπως η μετάδοση πολλαπλών λυμάτων και η πολλαπλή είσοδος-πολλαπλή-έξοδος (MIMO). Οι κόμβοι ή τα κανάλια που συνδέουν πηγή (πομπός) και προορισμό (δέκτης) που λαμβάνουν και στέλνουν πληροφορίες από την πηγή στον προορισμό είναι γνωστά ως ρελέ (Fairoz et al., 2021).

Έβδομη γενιά RF/FSO .Το "FSO" σημαίνει "Free Space Optics". Ο στρατός χρησιμοποιεί αυτήν την τεχνολογία για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά μόλις πρόσφατα κέρδισε εμπορική ειδοποίηση. Το FSO χρησιμοποιεί μια παρόμοια θεμελιώδη αρχή με το καλώδιο οπτικών ινών, με την εξαίρεση ότι μεταδίδει δεδομένα ασύρματα. Η τεχνολογία FSO χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό από σημείο σε σημείο αντί να αναπηδά μια δέσμη ηλιακού φωτός από ένα συγκεκριμένο μονωμένο καλώδιο που στέλνει τις ακτίνες του ηλιακού φωτός στον δέκτη. Σε αυτό το οπτικό εύρος ζώνης, οι γραμμές είναι ιδανικές για λόγους ασφαλείας, καθώς μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα, ήχο και βίντεο. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι οι πληροφορίες ταξιδεύουν γρηγορότερα από το φως, καθιστώντας τις ανώτερες σε ταχύτητα από ενσύρματα δίκτυα όπως αυτά που ορίζονται από τα καλώδια οπτικών ινών. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη θα πρέπει να περιοριστεί στο ελάχιστο για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων εξισορροπώντας προσεκτικά τα μήκη κύματος φωτός (Singh, 2021).

Με τον όρο RF γίνεται λόγος στις ραδιοσυχνότητες. Η ασύρματη μετάδοση δεδομένων από τον πομπό στον δέκτη είναι ένας στόχος αυτής της τεχνικής, όπως και το FSO. Σε αντίθεση με το FSO, τα σήματα RF δεν κινούνται με την ταχύτητα του φωτός (και όχι του ήχου), αν και η διαφορά είναι μικρή για ανθρώπινες χρήσεις.

## 2.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ

Ως αναδυόμενη τεχνολογία αισθητήρων, οι αισθητήρες οπτικών ινών παρουσιάζουν τα εγγενή πλεονεκτήματα του ελαφρού βάρους, της συμπαγούς, της χημικής σταθερότητας, της ανοσίας στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και των δυνατοτήτων πολυπλεξίας. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τους αισθητήρες οπτικών ινών μια εγγενώς ασφαλή και για την ιατρική τεχνολογία και δομικές εφαρμογές παρακολούθησης της υγείας. Επιπλέον, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση πολλών παραμέτρων όπως ο δείκτης διάθλασης, η θερμοκρασία, η υγρασία, η επιτάχυνση, η πίεση, ο ρυθμός αναπνοής και ο κορεσμός οξυγόνου. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά των οπτικών ινών επιτρέπουν την ενσωμάτωσή τους σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα για εφαρμογές ανίχνευσης και επίσης τη δημιουργία υφασμάτων με βάση οπτικές ίνες, τα λεγόμενα φωτονικά υφάσματα καθώς και την ενσωμάτωση σε σύνθετα ελάσματα, μέταλλα με διαδικασία συγκόλλησης σκυρόδεμα ακόμη και σε τρισδιάστατες (3D) εκτυπωμένες δομές (Leal-Junior et al., 2019).

Η εφαρμογή των οπτικών ινών ως αισθητήρων έχει μελετηθεί όλα αυτά τα χρόνια και υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις ανίχνευσης που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες όπως συμβολόμετρα, μη γραμμικά φαινόμενα, συντονισμός Plasmion επιφάνειας, πλέγματα Bragg ινών (FBGs) και αισθητήρες που βασίζονται στη διακύμανση της έντασης. Για απλότητα, ο τύπος των αισθητήρων μπορεί να χωριστεί σε αισθητήρες με βάση τη διακύμανση της έντασης (ή ισχύος) των αισθητήρων ινών και μήκους κύματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες που βασίζονται στη διακύμανση της έντασης για την αξιολόγηση της διασποράς δέσμης και της απόκλισης φάσης για μέτρηση όπως σε έναν αισθητήρα θολότητας. Οι διαφορές στη σύζευξη φωτός μεταξύ δύο ινών χρησιμοποιούνται επίσης για την ανίχνευση παραμέτρων όπως η τάση, η καμπυλότητα και η επιτάχυνση. Ωστόσο, οι περισσότεροι από τους αισθητήρες που βασίζονται σε διακύμανση της έντασης των αισθητήρων οπτικών ινών εκμεταλλεύονται την ευελιξία του πολυμερούς για τη μέτρηση των απωλειών μετάδοσης σε μια ίνα κάμψης, όπου αυτή η αρχή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες επιδράσεις στην ίνα, όπως το φαινόμενο τάσης-οπτικής για τη μέτρηση δύναμης, θερμοκρασίας και υγρασίας. Τέτοιοι αισθητήρες έχουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους, της ευκολίας εφαρμογής και της απλότητας στην ανάλυση και απόκτηση δεδομένων (Leal-Junior et al., 2019).

Από τη δεκαετία του 1980, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσης των τενόντων σε πραγματικό χρόνο και στη συνέχεια σε μια μεγάλη ποικιλία πιθανών ιατρικών εφαρμογών ως επιθέματα πίεσης σε επαφή με το δέρμα, το καρδιαγγειακό σύστημα. Πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρώσει τις μελέτες τους στην παρακολούθηση και

την ανίχνευση ζωτικών σημείων μέσω αισθητήρων οπτικών ινών που βρίσκονται σε κάποιο μέσο που έρχεται σε επαφή με το δέρμα και με την ικανότητα να αποτελούνται από δύο ή περισσότερους αισθητήρες στην ίδια ίνα. Επειδή τα ζωτικά σημεία είναι ο πρώτος τρόπος δοκιμής της υγείας και της σταθερότητας ενός ατόμου, η παρακολούθηση του καρδιακού παλμού, ως ένα καλά μελετημένο πεδίο, είναι ένας τομέας που προσφέρεται για συνεχείς τρόπους καινοτομίας και ανάπτυξης βελτιώσεων στις συσκευές και τον εξοπλισμό μέτρησης (Mayoral et al., 2021).

Οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές για τη μέτρηση των χημικών παραμέτρων, τη ροή και τα επίπεδα υγρού και την ανίχνευση αερίων. Ωστόσο, έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως στον ηλεκτρικό και μηχανικό τομέα λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που τους έχουν αποδοθεί, όπως η ανοσία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ωστόσο, στον ιατρικό τομέα δεν έχουν ακόμη αποκτήσει ευρεία αποδοχή, καθώς οι συμβατικοί αισθητήρες έχουν επίσης σημειώσει μεγάλη πρόοδο, δίνοντάς τους καλά χαρακτηριστικά χρήστη όπως αξιοπιστία, συντήρηση, υποστήριξη και τεχνολογική ενοποίηση. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη για ένα απλό σύστημα μέτρησης ζωτικών σημείων για την παρακολούθηση της υγείας στο σπίτι.

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ**

Εφαρμογές πολιτικού μηχανικού με τους αισθητήρες οπτικών ινών :

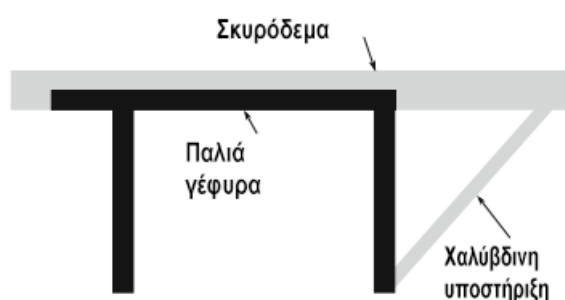
- Κατασκευές αυτοκινητοδρόμων
- Γέφυρες

Οι γέφυρες και οι αυτοκινητόδρομοι είναι σημαντικές υποδομές. Οποιοδήποτε κλείσιμο μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση και τεράστιο οικονομικό και κοινωνικό κόστος. Πολλοί αισθητήρες οπτικών ινών έχουν εγκατασταθεί σε γέφυρες και αυτοκινητόδρομους σε όλο τον κόσμο. Παρακολουθούν τις παγκόσμιες και τοπικές μηχανικές συμπεριφορές των γεφυρών καθώς και περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, το επίπεδο pH, η υγρασία και η περιεκτικότητα σε χλωριούχα. Οι αισθητήρες σημείων εφαρμόζονται σε κρίσιμα εξαρτήματα της γέφυρας όπως καλώδια γέφυρας, αγκυρώσεις, καταστρώματα γεφυρών, προβλήτες και πεζοδρόμια. Εγκαθίστανται ενσωματωμένοι αισθητήρες για τη μέτρηση της καμπυλότητας και της παραμόρφωσης της

γέφυρας, καθώς και την έναρξη της ρωγμής. Στο πεζοδρόμιο εφαρμόζονται καταναμημένοι αισθητήρες για την παρακολούθηση του κύματος πίεσης πρόσκρουσης που δημιουργείται από οχήματα υψηλής ταχύτητας (Leung et al., 2013).

Όταν μια γέφυρα που σχεδιάστηκε πριν από πολλά χρόνια δεν μπορεί να ικανοποιήσει την τρέχουσα χωρητικότητα κυκλοφορίας, μια οικονομική λύση είναι η μετασκευή της υπάρχουσας δομής αντί της κατασκευής μιας νέας. Οι γέφυρες North και South Versoix στην Ελβετία ήταν χαρακτηριστικά παραδείγματα αναβάθμισης γεφυρών.

Ήταν δύο παράλληλες δίδυμες γέφυρες, καθεμία από τις οποίες στήριζε δύο λωρίδες του ελβετικού εθνικού αυτοκινητόδρομου A9 μεταξύ Γενεύης και Λωζάνης. Οι γέφυρες ήταν κλασικές παράλληλες δοκοί από προεντεταμένο σκυρόδεμα που στηρίζουν ένα κατάστρωμα από σκυρόδεμα και δύο προεξοχές. Προκειμένου να υποστηριχθεί μια τρίτη λωρίδα κυκλοφορίας και μια νέα λωρίδα έκτακτης ανάγκης, διευρύνθηκαν τα εξωτερικά δοκάρια και επεκτάθηκαν οι προεξοχές. Η κατασκευή προχώρησε σε δύο φάσεις: την εσωτερική και την εξωτερική προέκταση προεξοχής. Η πρώτη φάση ξεκίνησε με την κατεδάφιση του υπάρχοντος εσωτερικού προεξοχής και ακολούθησε η ανακατασκευή ενός μεγαλύτερου. Η δεύτερη φάση συνίστατο στην κατεδάφιση της παλιάς εξωτερικής προεξοχής, στη διεύρυνση του εξωτερικού ιστού και στην ανοικοδόμηση μιας μεγαλύτερης προεξοχής που υποστηρίζεται από μεταλλικά δοκάρια (Εικόνα 19) (Leung et al., 2013).



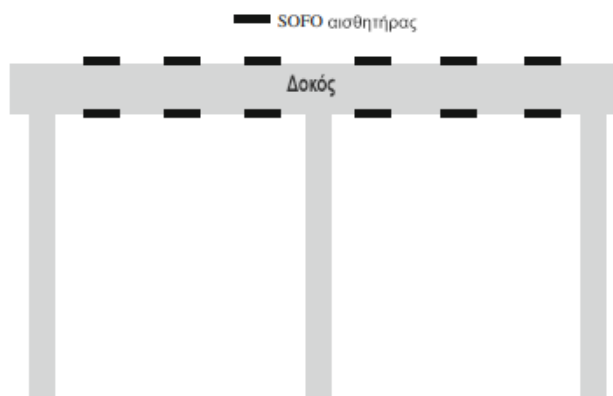
Εικόνα 18 - Η γέφυρα Versoix

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

Στις γέφυρες Versoix εγκαταστάθηκαν περισσότερα από εκατό παρεμβολόμετρα SOFO μεγάλου εύρους για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης λόγω διαφορικής συρρίκνωσης μεταξύ του παλιού και του νέου σκυροδέματος. Επίσης, η παρακολούθηση έδειξε πώς η παραμόρφωση κατά τη διαμήκη διεύθυνση της γέφυρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης της δοκού. Με ένα

ζεύγος συμβολομέτρων SOFO εγκατεστημένα στην πλευρά συμπίεσης και στην πλευρά τάνυσης στην ίδια θέση (Εικόνα 20), μπορεί να υπολογιστεί η τοπική μέση καμπυλότητα. Η κατακόρυφη απόκλιση της δοκού μπορεί να εκτιμηθεί με ολοκλήρωση με βάση τις κατάλληλες οριακές συνθήκες (Leung et al., 2013).



Εικόνα 19 - Το σχηματικό διάγραμμα της θέσης συμβολόμετρων SOFO στη γέφυρα Versoix

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

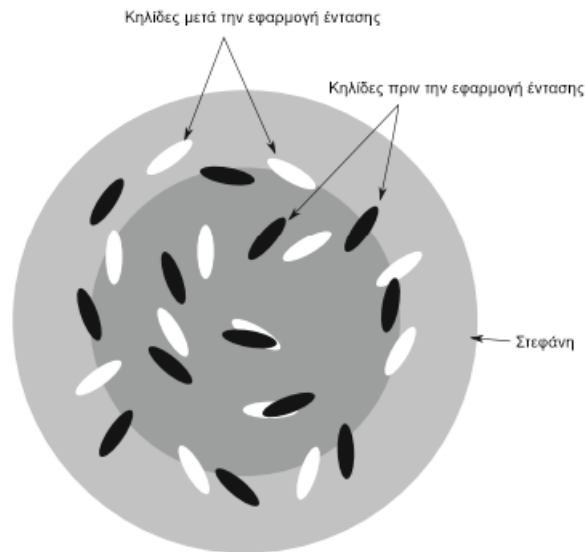
Το 1997, η γέφυρα Waterbury στο Βερμόντ των Η.Π.Α. αποκαταστάθηκε και στο κατάστρωμα της γέφυρας ενσωματώθηκαν αισθητήρες καταπόνησης ινών Bragg (FBG), αισθητήρες δόνησης βασισμένοι σε κηλίδες [58] και αισθητήρες χλωρίου. Υπήρχαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την εγκατάσταση αισθητήρων καταπόνησης FBG (Fuhr et al., 1998).

Η πρώτη προσέγγιση ήταν να χυτευτούν οι γυμνοί αισθητήρες FBG σε μια σχετικά εύπλαστη πλαστική ένωση (Castolite) και τοποθετήθηκε μεταλλικός πείρος για να εντοπιστεί η κεντρική θέση της παλιάς γέφυρας. Ο ολοκληρωμένος αισθητήρας Castolite FBG τοποθετήθηκε στον χαλύβδινο οπλισμό πριν από τη χύτευση σκυροδέματος. Η δεύτερη προσέγγιση ήταν να κολληθεί ο αισθητήρας καταπόνησης FBG σε έναν οπλισμό χάλυβα μήκους 1 m με εποξική επίστρωση με την ίδια κόλλα που χρησιμοποιείται για ηλεκτρικούς μετρητές καταπόνησης. Η εποξειδική επίστρωση του χαλύβδινου οπλισμού είναι για την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση. Ο οπλισμός μήκους 1 m ήταν στερεωμένος στο χαλύβδινο σύστημα ενίσχυσης του καταστρώματος της γέφυρας. Η τρίτη προσέγγιση ήταν η σύνδεση των αισθητήρων καταπόνησης FBG απευθείας στις ενισχύσεις του καταστρώματος της γέφυρας με εποξειδικό υλικό.



Το πλεονέκτημα της δεύτερης προσέγγισης έναντι της τρίτης προσέγγισης είναι ότι η δεύτερη προσέγγιση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε καλά ελεγχόμενο περιβάλλον ενώ η ποιότητα της τρίτης προσέγγισης εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Η αρχή ανίχνευσης των 36 εγκατεστημένων αισθητήρων χλωρίου βασίζεται στην αλλαγή χρώματος (από γαλακτώδες λευκό σε ροζ) όταν συμβαίνει χημική αντίδραση μεταξύ του νερού μεταφέρθηκε ιόν χλωρίου και το φιλμ κολλοειδούς γέλης του αισθητήρας (Leung et al., 2013).

Μεταβάλλοντας τη χημεία του κολλοειδούς πηγματος, το εύρος του ορίου χλωρίου μπορεί να κυμαίνεται από 20 mg/L έως πάνω από 2300 mg/L. Ο αισθητήρας κραδασμών αποτελείται από μια συνεκτική πηγή φωτός λέιζερ, μια πολυτροπική οπτική ίνα και έναν ανιχνευτή φωτογραφίας. Ενώ η συνολική ένταση που ταξιδεύει μέσω της οπτικής ίνας παραμένει η ίδια, η ένταση του μεμονωμένου τρόπου λειτουργίας ποικίλλει ανάλογα με τη διακύμανση της αλλαγής φάσης και δείχνει διαφορετικά μοτίβα κηλίδων στο άκρο της σχισμένης ίνας λόγω παρεμβολής μεταξύ διαφορετικών τρόπων λειτουργίας (Εικόνα 21). Με την εισαγωγή ενός αδιαφανούς δακτυλίου μπροστά από τον φωτοανιχνευτή, η ένταση φωτός που ανιχνεύεται από τον φωτοανιχνευτή αλλάζει με τη μεταβολή της διαφοράς φάσης που προκαλείται από τη μηχανική καταπόνηση στην περιοχή ανίχνευσης. Όταν η ένταση της πηγής λέιζερ ποικίλλει ημιτονοειδώς, είναι δυνατό να μετατοπιστεί η συχνότητα του δονούμενου σήματος σε μια λιγότερο θορυβώδη περιοχή σε χαμηλή περιοχή συχνοτήτων όπως στις υποδομές πολιτικού μηχανικού. Σε αυτό το έργο, όλα τα καλώδια μολύβδου και τα κιβώτια πρόσβασης ήταν ενσωματωμένα σε σκυρόδεμα. Το κουτί πρόσβασης ήταν γεμάτο με χαρτί για να απορροφήσει την υγρασία και να διατηρήσει το καλώδια από σκυρόδεμα. Όλοι οι αισθητήρες επιβίωσαν και έδειξαν λογικές τιμές μετά την έκχυση σκυροδέματος και την εκσκαφή των κιβωτίων πρόσβασης.



Εικόνα 20 - Διαφορετικά σχέδια κηλίδων στο σχισμένο άκρο του πολύτροπης οπτικής ίνας

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

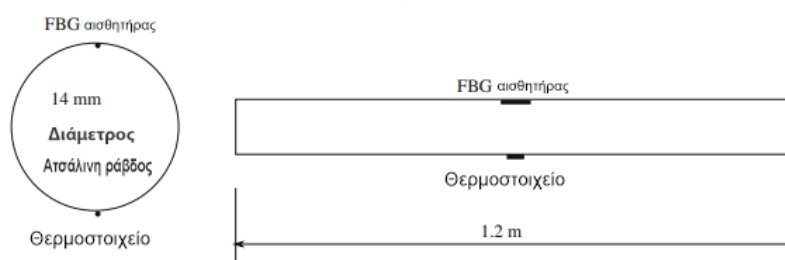
Αισθητήρες FBG έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της εσωτερικής καταπόνησης της κιβωτίου δοκού μιας προεντεταμένης γέφυρας από σκυρόδεμα στο δακτυλιοειδές κανάλι στη Γάνδη του Βελγίου και της δοκού μιας σιδηροδρομικής γέφυρας κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής Gent Moeskroen στο Βέλγιο κατά τη διάρκεια δοκιμών στεγανότητας και κατά το φορτίο λειτουργίας.

Ωστόσο, καθώς ο γυμνός αισθητήρας FBG είναι πολύ εύθραυστος για να ενσωματωθεί απευθείας στη δομή, αναπτύχθηκαν διάφορα είδη τεχνικών συσκευασίας. Μια προσέγγιση ήταν η προσάρτηση αισθητήρων FBG σε μια χαλύβδινη ράβδο ενίσχυσης που θα ενσωματωθεί μέσα στη δομή. Η ράβδος ανίχνευσης αποτελούνταν από έναν αισθητήρα καταπόνησης FBG και ένα θερμοστοιχείο για αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Μια στενή αυλάκωση χαραχθηκε στη ράβδο και ο αισθητήρας FBG προσαρτήθηκε στην αυλάκωση με κόλλα στη μέση της ράβδου ενώ το θερμοστοιχείο ήταν κολλημένο στην αντίθετη πλευρά (Εικόνα 14). Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η καταπόνηση που μετρήθηκε από τις ράβδους ανίχνευσης συμφωνούσε με τα αποτελέσματα από το μηχανικό παραμορφόμετρο (demec) (Matthys and Taerwe, 2003).

Μια άλλη προσέγγιση για τη συσκευασία αισθητήρων καταπόνησης και θερμοκρασίας FBG είναι η ενσωμάτωση των αισθητήρων σε πολυμερές ενισχυμένο με ίνες (FRP) (Εικόνα 22). Οι αισθητήρες καταπόνησης μπορούν να μετρήσουν τόσο την εφελκυστική όσο και τη θλιπτική

καταπόνηση με υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο. Μπορούν να μετρηθούν στελέχη έως και 5.000 μικροστελέχη με ανάλυση 1-2 μικροστελέχων. Αυτή η μέθοδος συσκευασίας έχει επικυρωθεί εκτενώς στη γέφυρα Shangdong Binzhou Yellow River Highway Bridge στην ηπειρωτική Κίνα, η οποία άνοιξε για κυκλοφορία τον Ιούλιο του 2004. Η δοκός της γέφυρας είναι κατασκευασμένη από προεντεταμένο σκυρόδεμα που υποστηρίζεται από 200 καλώδια στήριξης. Ολόκληρο το μήκος της γέφυρας είναι 1698,4 m (Li et al., 2006).

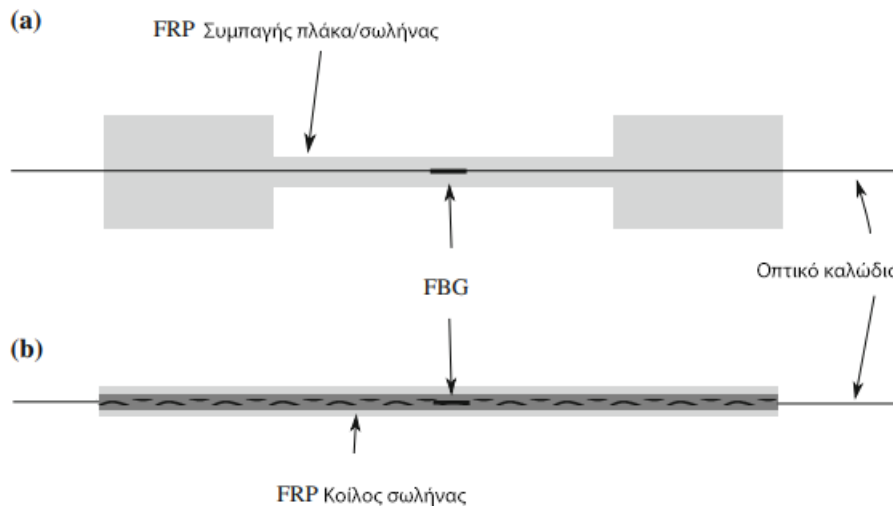
Το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο φορτηγού είναι 120 τόνοι, το οποίο υπερβαίνει το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού που καθορίζεται στον κώδικα πρακτικής στην ηπειρωτική Κίνα. Η γέφυρα ήταν βαριά εξοπλισμένη με 1688 αισθητήρες καταπόνησης FBG στις δοκούς και τους πύργους κοντά στις θέσεις των αρμών, καθώς και 180 αισθητήρες θερμοκρασίας FBG. Το ποσοστό επιβίωσης αυτών των αισθητήρων FBG ήταν περίπου 75%. Οι αισθητήρες καταπόνησης FBG μέτρησαν τη διαμήκη τάση και την εγκάρσια τάση της δοκού για να εκτιμήσουν το πραγματικό επίπεδο προέντασης και την καταπόνηση κοντά στις αγκυρώσεις του καλωδίου (Leung et al., 2013).



Εικόνα 21 - Μια ανιχνευτική ράβδος ενίσχυσης από χάλυβα με αισθητήρα καταπόνησης FBG και θερμοστοιχείο

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)



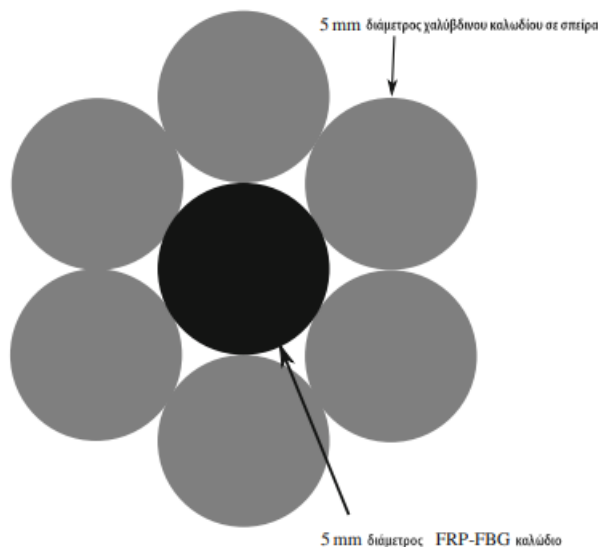
Εικόνα 22 - Σχηματικό διάγραμμα της σημειακής συσκευασίας FRP Αισθητήρες FBG. α) αισθητήρα καταπόνησης και β) αισθητήρα θερμοκρασίας

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

Εκτός από την παρακολούθηση της κατάστασης των εξαρτημάτων της γέφυρας κατά τη λειτουργία, οι αισθητήρες FBG μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της ανάπτυξης καταπόνησης διαφορετικών εξαρτημάτων κατά το στάδιο της κατασκευής. Τον Οκτώβριο του 2004, εγκαταστάθηκαν αισθητήρες καταπόνησης και θερμοκρασίας FBG στα θεμέλια των προβλήτων της τρίτης γέφυρας Nanjing Yangtze και παρακολούθησαν την εσωτερική θερμοκρασία και την εσωτερική καταπόνηση της μάζας σκυροδέματος της θεμελίωσης κατά την κατασκευή και τη λειτουργία.

Όταν συμβεί υποβάθμιση σε καλωδιακές γέφυρες ή κρεμαστές γέφυρες, η κατανομή φορτίου μεταξύ των καλωδίων θα αλλάξει. Με τη συνεχή παρακολούθηση των τάσεων εφελκυσμού στα καλώδια που προκαλούνται από το κυκλοφοριακό φορτίο και τη μεταβολή της θερμοκρασίας, οποιαδήποτε μη φυσιολογική διακύμανση μπορεί να υποδηλώνει βλάβη και κόπωση της δομής της γέφυρας. Ο αισθητήρας σημείου στην Εικόνα 23 δεν είναι κατάλληλος για εγκατάσταση στο καλώδιο. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε ένα έξυπνο καλώδιο για τη μέτρηση του φορτίου που μεταφέρει το καλώδιο (Εικόνα 24) (Leung et al., 2013).

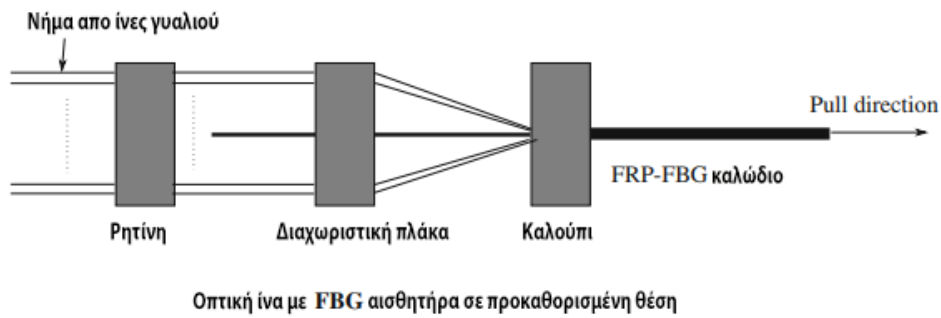


Εικόνα 23 - Σχηματικό διάγραμμα του έξυπνου καλωδίου, το οποίο αποτελείται ένα καλώδιο FRP-FBG στη μέση και έξι χαλύβδινα σύρματα σε σπείρα

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

Η οπτική ίνα και οι γυάλινες ίνες σύρθηκαν με τάση παράλληλα (Εικόνα 25) (Huang et al., 2013). Εφαρμόστηκε ρητίνη και στη συνέχεια το σύνθετο στερεοποιήθηκε με θέρμανση σε κλίβανο. Τα FRP FBG που προέκυψαν αποτελούνταν από μια οπτική ίνα στο κέντρο της διατομής και οι αισθητήρες FBG βρίσκονταν στις προκαθορισμένες θέσεις. Η καταπόνηση των αισθητήρων FBG θα είναι ίδια με τις γύρω ίνες γυαλιού. Για να βρεθεί η πραγματική μηχανική καταπόνηση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πρόσθετοι αισθητήρες θερμοκρασίας (είτε με χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας FBG στην Εικόνα 15b είτε θερμοστοιχείο). Στο έξυπνο καλώδιο, το καλώδιο FRP FBG αντικαθιστά το κεντρικό καλώδιο ενός τυπικού χαλύβδινου καλωδίου 7 συρμάτων (Εικόνα 16). Δεδομένου ότι η ακαμψία του FRP είναι πολύ χαμηλότερη από τον χάλυβα, η χωρητικότητα φορτίου του έξυπνου καλωδίου θεωρείται ότι είναι έξι στα επτά του αρχικού χαλύβδινου καλωδίου. Τα έξυπνα καλώδια έχουν δοκιμαστεί εκτενώς στη γέφυρα Sichuan Erbian Arch και στη γέφυρα Hunan Maocaojie στις καμάρες και στα καλώδια σύνδεσης (Li et al., 2011).



Εικόνα 24 - Σχηματικό διάγραμμα της κατασκευής του FRP FBG

Πηγή:

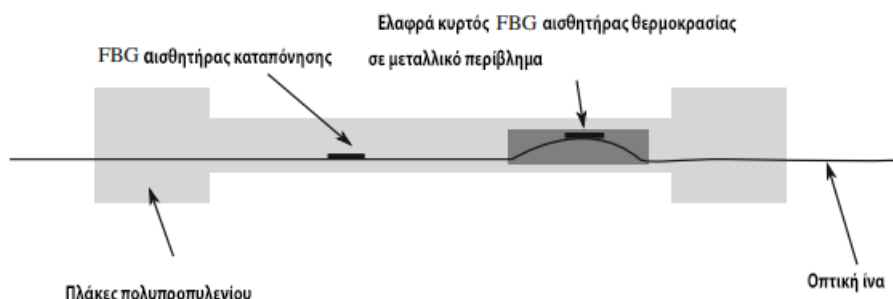
[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

Λόγω της εξαιρετικής μηχανικής αντοχής και αντοχής στη διάβρωση, τα καλώδια πολυμερούς ενισχυμένα με ανθρακονήματα (CFRP) ενδέχεται να αντικαταστήσουν τα χαλύβδινα καλώδια στην κατασκευή γεφυρών.

Δύο γέφυρες στην Ελβετία με διαφορετικούς τύπους καλωδίων CFRP οργανώθηκαν από αισθητήρες FBG. Για τη γέφυρα καλωδίων Storchbru"cke στο Winterthur της Ελβετίας, ένα από τα δώδεκα συνηθισμένα ζεύγη καλωδίων από χάλυβα αντικαταστάθηκαν από καλώδια CFRP. Κάθε καλώδιο έχει μήκος 35 μέτρα και αποτελείται από 241 σύρματα CFRP διαμέτρου 5 mm σε εξαγωνική δομή και τοποθετήθηκαν επτά αισθητήρες FBG. Τρεις αισθητήρες FBG προσαρτήθηκαν στην περιφέρεια και απέχουν 120 σε σχέση με το κέντρο του καλωδίου για τη μέτρηση της μέσης τάσης καθώς και της κλίσης καταπόνησης μέσα στο καλώδιο. Το επίπεδο του στελέχους ήταν μεταξύ 1.000 και 1.500 microstrains. Επιπλέον, τρεις αισθητήρες FBG προσαρτήθηκαν σε τρία σύρματα CFRP μήκους 30 cm και ένας άλλος αισθητήρας FBG συνδέθηκε σε μια ράβδο αλουμινίου, η οποία ήταν συνδεδεμένη στα φορτωμένα σύρματα με τρόπο που δεν ήταν ευαίσθητο στη μηχανική καταπόνηση. Οι 4 αισθητήρες FBG που δεν είναι ευαίσθητοι στη μηχανική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκαν για αντιστάθμιση θερμοκρασίας και παρακολούθηση της μακροπρόθεσμης μετατόπισης. Με τη βελτίωση των τεχνικών απόκτησης δεδομένων και αξιολόγησης μήκους κύματος, η τυπική απόκλιση της μέτρησης ενός στελέχους μπορεί να μειωθεί από 7 σε 2,5 microstrains (Leung et al., 2013).

Το κύριο μειονέκτημα του αισθητήρα FBG είναι η ευαισθησία τόσο σε μηχανική όσο και σε καταπόνηση που προκαλείται από τη θερμοκρασία. Στο συμβατικό σχεδιασμό, οι αισθητήρες θερμοκρασίας ήταν τοποθετημένοι δίπλα στον αισθητήρα μηχανικής καταπόνησης. Δύο FBG

αισθητήρες συνδέθηκαν σε σειρά (περίπου 30 mm διαχωρισμός) και τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε δύο πλαστικά πλάκες (πολυπροπυλενίου) (Εικόνα 26).



Εικόνα 25 - Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα καταπόνησης FBG με αυτοαντιστάθμιση θερμοκρασίας

Πηγή:

[https://www.researchgate.net/publication/271794520\\_Review\\_Optical\\_fiber\\_sensors\\_for\\_civil\\_engineering\\_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download](https://www.researchgate.net/publication/271794520_Review_Optical_fiber_sensors_for_civil_engineering_applications/link/621abefd2542ea3cacb453e8/download)

- Κατανεμημένοι Αισθητήρες Οπτικών Ινών για Παρακολούθηση Κατασκευών

Από τα πολύ πρώιμα στάδια της ανάπτυξης και εγκατάστασης των Κατανεμημένων Αισθητήρων Οπτικών Ινών (Distributed Fiber Optics Sensing - DFOS), το Structural Health Monitoring (SHM) της υποδομής ζωτικής σημασίας έχει θεωρηθεί ως πολύτιμη χρήση της τεχνολογίας. Υποσχέθηκε να αντικαταστήσει αισθητήρες σημείου και να παρακολουθεί συνεχώς τις τιμές καταπόνησης ή/και θερμοκρασίας. Αυτή η μακροχρόνια παρακολούθηση, κατά τη διάρκεια της περιόδου συντήρησης της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής, παρέμεινε για δεκαετίες η σχεδόν αποκλειστική χρήση της τεχνολογίας. Ωστόσο, αυτό σήμαινε ότι οι επιδιωκόμενοι χρήστες της τεχνολογίας ήταν διαφορετικοί από εκείνους που ανέπτυξαν και εγκαθιστούσαν τα συστήματα, καθώς ο καλύτερος και μερικές φορές ο μόνος χρόνος για μόνιμη εγκατάσταση αισθητήριων ινών ήταν κατά το στάδιο της κατασκευής. Λόγω των μεγάλων χρόνων απόκτησης, της περιορισμένης χωρικής ανάλυσης και της ευαισθησίας που δεν πληρούσε ορισμένες τεχνικές απαιτήσεις, υπήρξε περιορισμένο ενδιαφέρον από τον κατασκευαστικό κλάδο για τη χρήση συστημάτων κατανεμημένης ανίχνευσης οπτικών ινών (DFOS) για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων μηχανικής κατασκευής. Η κατάσταση στον κλάδο των πολιτικών μηχανικών άλλαξε με την ουσιαστική βελτίωση στην τεχνολογία DFOS, στην ανίχνευση της απόδοσης του καλωδίου, η οποία αναμόρφωσε το τοπίο της Παρακολούθησης Δομικής Υγείας που βασίζεται σε DFOS (Kishida et al., 2022).

Με την τρέχουσα τεχνολογία, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει το DFOS κατά το στάδιο της μηχανικής, επιτρέποντας τη χρήση του για ολόκληρο τον κύκλο ζωής της κατασκευής. Αυτό παρουσιάζεται σχηματικά στο Εικόνα 27.



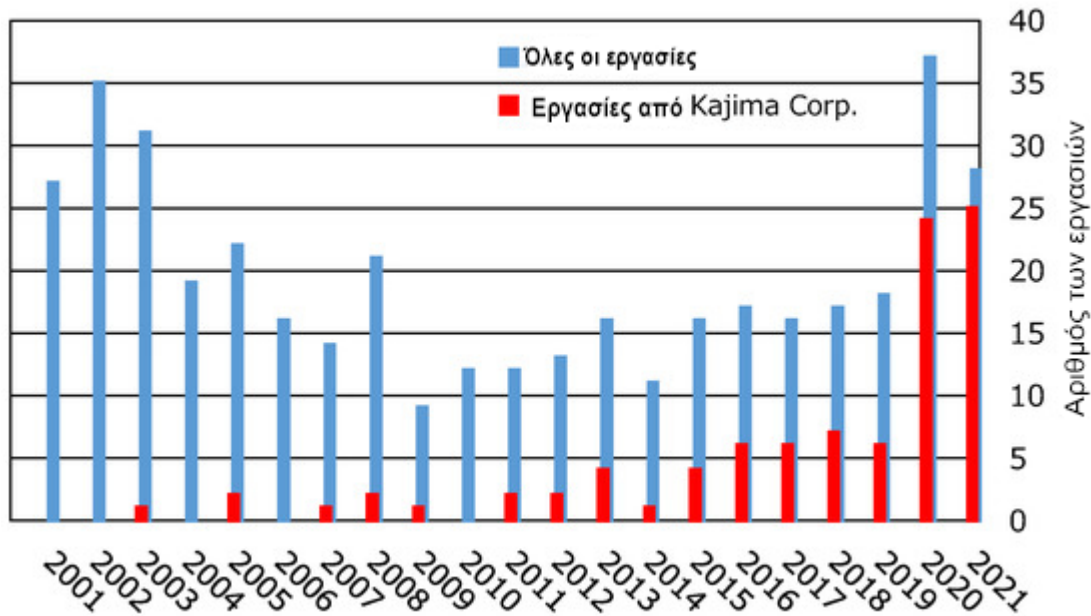
Εικόνα 26- Το DFOS είναι μια τεχνολογία για ολόκληρο τον κύκλο ζωής της μονάδας μιας δομής

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368>

Το 2021, δημοσιεύτηκε ένα εγχειρίδιο DFOS για έργα πολιτικού μηχανικού από την Κοινοπραξία Photonic Sensing στην Ιαπωνία (PhoSC, <https://phosc.jp/>). Το PhoSC συγκεντρώνει κατασκευαστικές εταιρείες, ειδικούς και εταιρείες αισθητήρων οπτικών ινών. Το PhoSC διατηρεί έναν από τους καλύτερους ιστότοπους εισαγωγής τεχνολογίας, όπου εξηγούνται οι βασικές αρχές και οι τεχνολογίες πεδίου.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση του DFOS εκτίθεται επίσης στον αριθμό των εργασιών που σχετίζονται με το DFOS στην Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών. Έχει αυξηθεί γρήγορα τα τελευταία 3 χρόνια, όπως φαίνεται στο Εικόνα 28 , όπου οι κόκκινες ράβδοι υποδηλώνουν τις δημοσιεύσεις από την Kajima Co. (Τόκιο, Ιαπωνία). Υπάρχει ήδη μια σειρά από μεγάλα έργα, στα οποία θα αναπτυχθεί η τεχνολογία DFOS για την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων κατά τη φάση της μηχανικής τους. Ο συνολικός εκτιμώμενος προϋπολογισμός για αυτά τα έργα είναι 2000 εκατ. USD ή περισσότερο για τα επόμενα 3 έως 10 χρόνια (Kishida et al., 2022).





Εικόνα 27 - Αλλαγή στις δημοσιεύσεις DFOS στην Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368>

Για τη χρήση ανακριτών στη φάση της μηχανικής της κατασκευής, με βάση τη συγκεντρωμένη εμπειρία από ένα ευρύ φάσμα χρηστών και σε μια ποικιλία τύπων έργων, απαιτούνται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά συστήματος DFOS για ένα επιτυχημένο έργο:

- Η ακρίβεια παραμόρφωσης πρέπει να είναι μικρότερη από 1 cm.
- Η ακρίβεια δεν πρέπει να υποβαθμίζεται με την απόσταση.
- Η χωρική ανάλυση πρέπει να είναι καλύτερη από 20 cm,

Η λίστα των δευτερευόντων χαρακτηριστικών του συστήματος DFOS περιλαμβάνει:

- Ο χρόνος απόκτησης, για απόσταση έως 500 m, πρέπει να είναι μικρότερος από 5 δευτερόλεπτα.
- Να επιτρέπεται η μηχανική παραμόρφωση, η θερμική καταπόνηση και διαχωρισμός θερμοκρασίας.
- Να υπάρχει αξιοπιστία και να χρησιμοποιούνται καλώδια ανίχνευσης οπτικών ινών χαμηλού κόστους.

Αρχή και απόδοση της μεθόδου κατανεμημένης Rayleigh Intensity Pattern - RIP και σύγκριση με τη σκέδαση Brillouin

Η πρώτη εφαρμογή της οπισθοσκέδασης τύπου Rayleigh για μετρήσεις καταπόνησης αναπτύχθηκε με τη μορφή Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR). Αν και αυτή η μέθοδος παρέχει δεδομένα με χωρική ανάλυση άνευ προηγουμένου τάξης χιλιοστών, η σχετικά μικρή απόσταση κάτω των 100 m περιορίζει τη χρήση της μεθόδου σε εφαρμογές Structural Health Monitoring - SHM μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, οποιεσδήποτε αλλαγές στο συνολικό μήκος της ίνας, καθιστούν αδύνατο για τη μέθοδο να προσδιορίσει την αλλαγή παραμόρφωσης. Αυτό το χαρακτηριστικό και μόνο καθιστά τη χρήση αυτής της τεχνικής σε έργα μακροπρόθεσμης παρακολούθησης δύσκολη στην καλύτερη περίπτωση (Kishida et al., 2022).

Μια εναλλακτική προσέγγιση, χρησιμοποιώντας την απόκτηση στον τομέα του χρόνου με βάση τη Συνεκτική Οπτική Ανακλαστικότητα Τομέα Χρόνου (C-OTDR) προτάθηκε από τους Koyamada et al. (2009) . Η μέθοδος προσφέρει τάξη cm και χωρική ανάλυση, αλλά είναι σημαντικό να παρέχει μετρήσεις σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου χρησιμοποιώντας ένα συντονιζόμενο μήκος κύματος (TW-COTDR) λέιζερ και σάρωση συχνότητας για τη λήψη φάσματος ισχύος παρουσιάστηκε από τους Kishida et al. (2013).

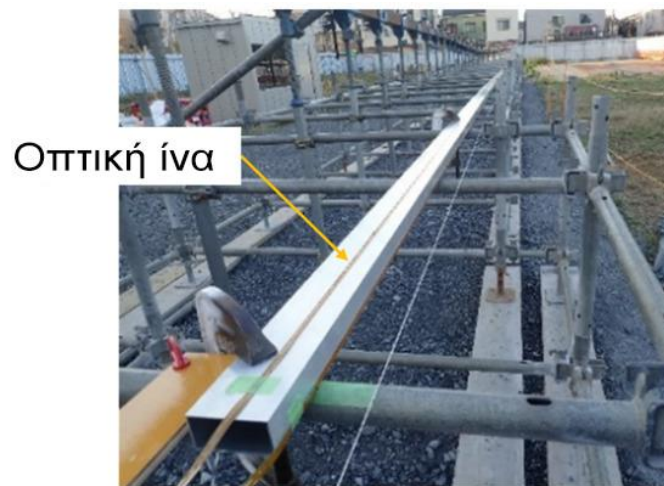
Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας έχει αποδειχθεί ότι είναι η πολύ υψηλή της ακρίβεια, η οποία δεν αλλάζει με τη χωρική ανάλυση. Πρόσφατα, έγινε αντιληπτό ότι το σήμα που χρησιμοποιείται στο TW-COTDR είναι το Rayleigh Intensity Pattern (RIP), το οποίο είναι το βασικό φαινόμενο οπισθοσκέδασης οπτικών ινών που παρατηρείται σε κάθε τύπο οπτικών ινών. Το RIP δεν σχετίζεται με τη φάση του οπτικού σήματος, αλλά αλλάζει με τη χωρική ανάλυση (Kishida et al., 2022).

Τονίζεται εδώ ότι τόσο οι υλοποιήσεις συχνότητας όσο και ο τομέας χρόνου της μεθόδου σκέδασης που βασίζεται στο Rayleigh παρέχουν σχετικά αποτελέσματα/αλλαγές στην τάση και/ή στη θερμοκρασία μεταξύ μιας αυθαίρετα επιλεγμένης κατάστασης αναφοράς και μιας δεδομένης μέτρησης στιγμιότυπου. Η μετρούμενη μετατόπιση συχνότητας λαμβάνεται με διασταυρούμενη συσχέτιση. Η μετατόπιση συχνότητας  $\Delta \nu_R$  που προκαλείται από τις αλλαγές τάσης/θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας:

$$\Delta \nu_R = \nu_{\tau 0} \Delta \epsilon + \nu_{\tau 0} \Delta T$$

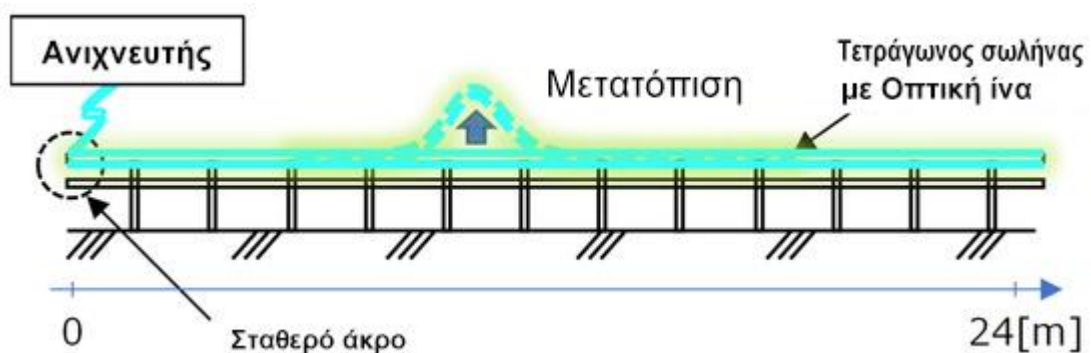
(1) όπου  $\Delta \epsilon$  και  $\Delta T$  είναι παραμόρφωση και μεταβολές θερμοκρασίας, αντίστοιχα, ενώ  $\nu_{\tau 0}$  και  $\nu_{\tau 0}$  αντιστοιχούν στους συντελεστές μετατροπής συχνότητας-καταπόνησης και συχνότητας-θερμοκρασίας.

Η ευαισθησία της σκέδασης Rayleigh είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερη από τις μεθόδους ανίχνευσης που βασίζονται στο Brillouin. Για RIP που μετρείται με χρήση TW-COTDR, η επιτεύξιμη ακρίβεια για την παραμόρφωση είναι τόσο υψηλή όσο 0,078 micro-strains ή 0,01 K για τη θερμοκρασία. Αυτό οδηγεί σε ουσιαστικές βελτιώσεις στα προκύπτοντα αποτελέσματα, όπως οι μετατοπίσεις. Αυτό είναι πιο εμφανές όταν αντιπαραβάλλουμε τις παραδοσιακές μετρήσεις Brillouin με τα αποτελέσματα TW-COTDR. Η απλή δοκιμή με δοκό μήκους 24 m, πολλαπλών σημείων στήριξης και εξαναγκασμένες μετατοπίσεις που εφαρμόστηκαν σε απόσταση 10 m, διευθετήθηκε, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29 και στην Εικόνα 30.



Εικόνα 28 - Η διάταξη ινών και το δείγμα δοκιμής

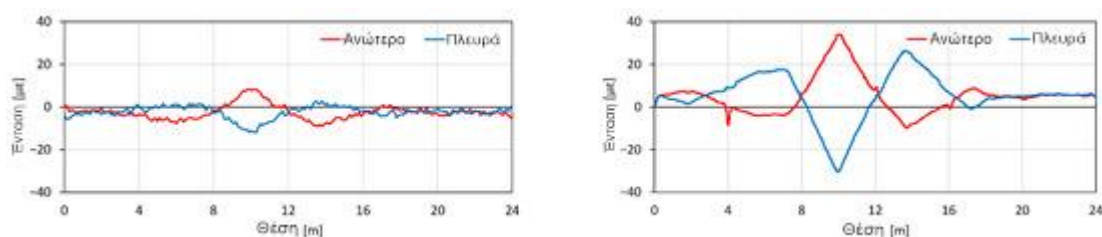
Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>



Εικόνα 29 - Σχηματικό σχέδιο δοκιμής διάταξης ινών και φόρτωσης

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>

Οι μετρούμενες αλλαγές παραμόρφωσης κατά μήκος της δέσμης απεικονίζονται στην Εικόνα 31, όπου στα αριστερά είναι η κατανομή που μετρήθηκε με την τεχνική Brillouin και στα δεξιά, η ίδια με τη σκέδαση Rayleigh (Kishida et al., 2022).

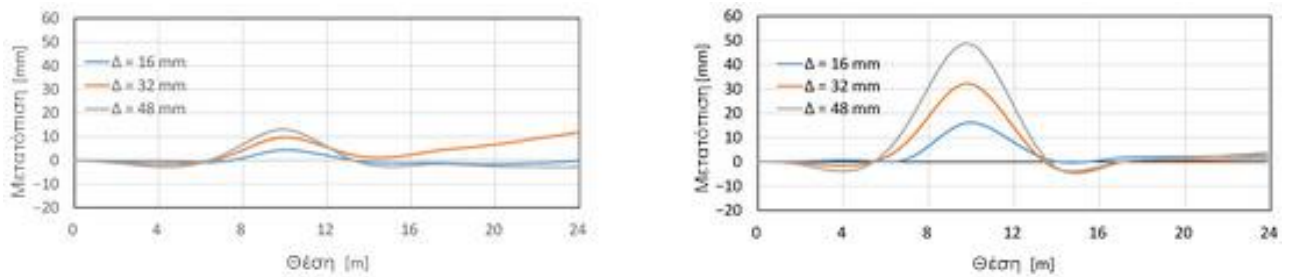


Εικόνα 30 - Μετρημένη κατανομή καταπόνησης κατά μήκος της ίνας: Brillouin ( αριστερά ) και Rayleigh ( δεξιά ).

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>

Και τα δύο αποτελέσματα δείχνουν διαφορετικές παραμορφώσεις, θετικές και αρνητικές τιμές, στο εφαρμοσμένο σημείο μετατόπισης. Η υψηλότερη ανάλυση και ευαισθησία της νέας τεχνικής σημαίνει ότι τα στελέχη που μετρώνται εκεί είναι πιο ακριβή, καθώς η χαμηλότερη ανάλυση πάντα υποτιμά τις τοπικές αλλαγές παραμόρφωσης.

Η Εικόνα 32 παρουσιάζει το προκύπτον αποτέλεσμα της κατανομής μετατόπισης που προκύπτει με την ολοκλήρωση από την αρχή της μετρούμενης κατανομής παραμόρφωσης. Οι μετατοπίσεις που λαμβάνονται μέσω μετρήσεων καταπόνησης με βάση το Brillouin είναι και πάλι ουσιαστικά διαφορετικές από αυτές που εφαρμόζονται στην πραγματικότητα στη δοκό, ενώ αυτή που υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις Rayleigh είναι σχεδόν ακριβής. Αυτό είναι ακόμη πιο ορατό στο άκρο της δοκού, στα 24 m, όπου, λόγω στήριξης δοκού, δεν υπάρχει μετατόπιση δοκού. Η μετατόπιση που βασίζεται στα δεδομένα του Rayleigh δίνει, πάλι, τη σωστή τιμή εκεί, ενώ οι τιμές Brillouin είναι σαν να συνέβη μια μεγάλη απόκλιση, κάτι που είναι σαφώς λανθασμένο. Αυτή η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι η μετατροπή σε μετατοπίσεις είναι αθροιστική και τα σφάλματα διαδίδονται στη διαδικασία. Αυτή είναι μια από τις εφαρμογές.



Εικόνα 31 - Επιτευχθείσα μετατόπιση (εκτροπή) κατά μήκος της ίνας: Brillouin ( αριστερά ) και Rayleigh ( δεξιά ) επαληθευμένη με μετρήσεις μετατόπισης

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>

Η υψηλή ευαισθησία και η χωρική ανάλυση της τεχνικής TW-COTDR είναι το κλειδί για την επιτυχία της σε διάφορες άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της γεώτρησης, της παρακολούθησης κατολισθήσεων ή της μετανάστευσης του νερού σε βράχους. Οι μόνες αδυναμίες του TW-COTDR είναι ότι είναι σχετικά αργή και ότι η μη ομοιόμορφη κατανομή της τάσης και/ή της θερμοκρασίας εντός της χωρικής ανάλυσης οδηγεί σε χαμηλές τιμές συσχέτισης και κατά συνέπεια σε δυσκολίες στον προσδιορισμό της τιμής μετατόπισης. Επιπλέον, σε πολλές εφαρμογές, η απόλυτη κατανομή της τιμής της παραμόρφωσης έχει επίσης μεγάλη σημασία. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μόνο οι τεχνικές που βασίζονται στο Brillouin προσφέρουν τέτοιου είδους αποτελέσματα (Zhang et al., 2020; Kogure and Okuda, 2018; Zhang and Xue, 2019).

Μία από τις εφαρμογές που απαιτεί ιδιαίτερα μέτρηση κατανομής παραμόρφωσης υψηλής ακρίβειας και υψηλής ανάλυσης είναι η ανίχνευση παραμόρφωσης, η οποία χρησιμοποιεί δεδομένα κατανομής παραμόρφωσης και τα μετατρέπει σε τιμές μετατόπισης. Αυτό είναι δυνατό με τη σύνδεση πολλών οπτικών ινών σε ένα αντικείμενο που μοιάζει με ράβδο. Η μετατόπιση υπολογίζεται από τη μετρούμενη τάση κάμψης και ενσωματώνοντάς την από ένα σταθερό σημείο/άκρο.

Τα πλεονεκτήματα των κατανεμημένων μετρήσεων σε σχέση με τη συμβατική διακριτή μέτρηση των υπόγειων μετατοπίσεων, όπως τα κλισόμετρα, καθιστούν δυνατή την υλοποίηση μιας συσκευής μέτρησης υπογείων μετατοπίσεων με υψηλή ακρίβεια και συνεχή. Είναι επίσης εύκολο να κατασκευαστεί, καθώς ο σωλήνας είναι μικρός και ελαφρύς και η διάμετρος της γεώτρησης μπορεί να μειωθεί κατά την εγκατάσταση. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις σημειακές μετρήσεις, το συνολικό κόστος δεν εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων μέτρησης.

Υποθέτοντας ότι η αξονική δύναμη είναι αμελητέα, η εκτίμηση της παραμόρφωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο και κατά τη φάση της μηχανικής της κατασκευής. Οι μηχανικές παραδοχές παρουσιάζονται στην Εικόνα 33, δεξιά. Οι αρχές μιας τέτοιας εκτίμησης παραμόρφωσης μπορούν να εφαρμοστούν και να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης του τοίχου αντιστήριξης (Kishida et al., 2022).



Εικόνα 32 - Μετρήσεις μετατόπισης (θήκη χωρίς αξονική δύναμη).

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 33 αριστερά, μια οπτική ίνα προσαρτήθηκε στη φλάντζα του χάλυβα συγκράτησης της γης. Όπως φαίνεται στο κέντρο, οι μετατοπίσεις που σχετίζονται με την εκσκαφή μετρήθηκαν με οπτική ίνα χρησιμοποιώντας χαλύβδινα στηρίγματα αρ. 29 και αρ. 51 και συγκρίθηκαν με τα συμβατικά κλισόμετρα.

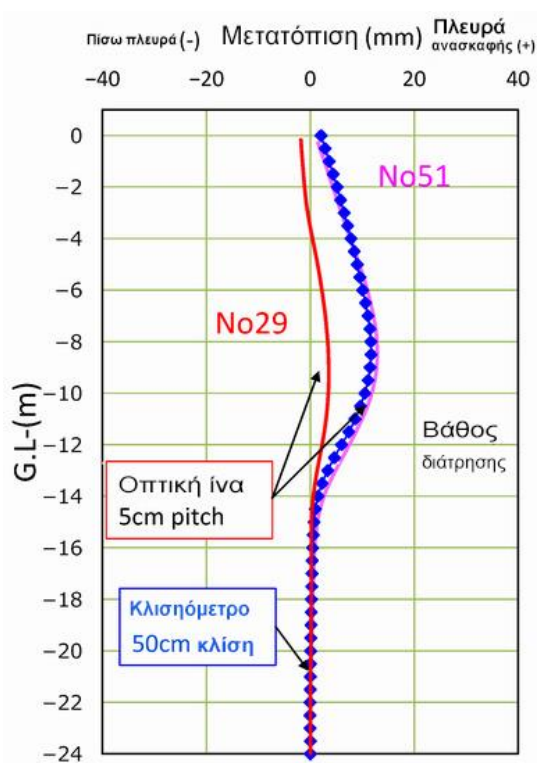


Εικόνα 33- Μετρήσεις μετατόπισης, εγκατεστημένη ίνα (αριστερά) και εργοτάξιο (δεξιά)

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>

Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 34. Ο κατακόρυφος άξονας υποδεικνύει τη θέση στην κατεύθυνση του βάθους και ο οριζόντιος άξονας λαμβάνεται μετατόπιση. Η κόκκινη γραμμή είναι αποτέλεσμα του Νο. 29 και η ροζ γραμμή είναι το αποτέλεσμα των οπτικών ινών Νο. 51. Η εκσκαφή προκαλεί μια μικρή παραμόρφωση προς την πλευρά της εκσκαφής, με κέντρο μεταξύ 8 και 10 m. Η μπλε γραμμή είναι η μετατόπιση που προκύπτει από το κλισιόμετρο.

Με την οπτική ίνα, κατέστησαν κατανοητά τα αποτελέσματα ισοδύναμα με εκείνα των κλισιομέτρων με περισσότερες λεπτομέρειες από ποτέ. Αυτές οι πολύτιμες λεπτομέρειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί εάν ο παράγοντας ασφάλειας που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό και την κατασκευή απαιτείται ή υπερεκτιμάται. Με την απλή εγκατάσταση, είναι δυνατή η παροχή ανατροφοδότησης σχετικά με τον προσωρινό σχεδιασμό και την κατασκευή που επιτυγχάνει τόσο οικονομική απόδοση όσο και ασφάλεια (Kishida et al., 2022).



Εικόνα 34 - Μετρήσεις μετατόπισης: δεδομένα κλίσεων και οπτικών ινών

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4368/htm>

### **3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ (SHM) ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (DOFS) ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Η μεγάλη πλειοψηφία της τεχνολογίας φωτονικής ανίχνευσης που εφαρμόζεται στον τομέα του πολιτικού μηχανικού αποτελείται από διακριτούς αισθητήρες όπως το FBG. Σήμερα, οι αισθητήρες DOFS είναι μια ελκυστική τεχνολογία που προσφέρει ανώτερη απόδοση και πλεονεκτήματα σε σύγκριση με περισσότερους συμβατικούς αισθητήρες που εφαρμόζονται στην πρακτική SHM. Παρά το φαινομενικά υψηλό κόστος τους, είναι ιδανικά για εφαρμογές όπου η αξιοπιστία σε δύσκολα περιβάλλοντα είναι απαραίτητη. Επιπλέον, προσφέρουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.

#### **3.2.1 Εργαστηριακές Δοκιμές**

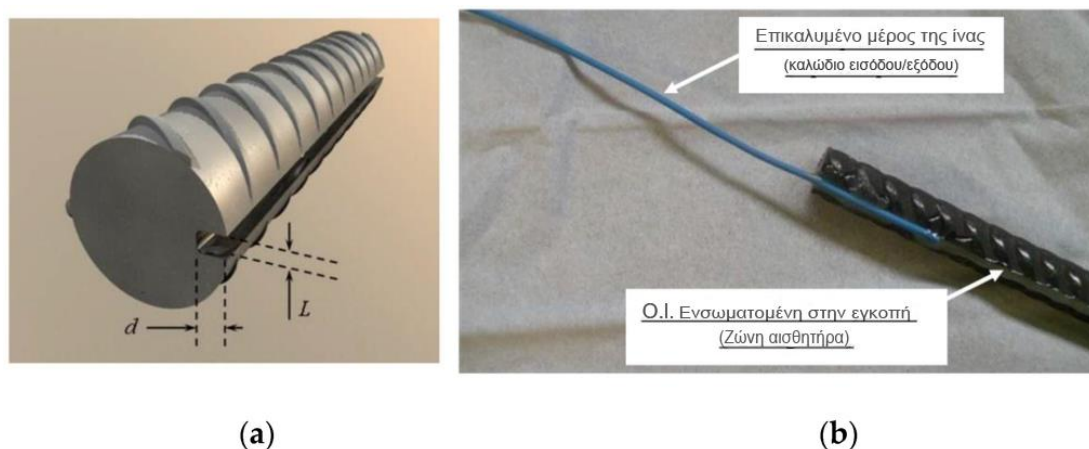
Προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του DOFS, μία από τις πιο σημαντικές πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η σωστή μεταφορά των μετρήσεων από την παρακολουθούμενη δομή στον αισθητήρα. Οι Zeng et al. (2002) για παράδειγμα, πραγματοποίησαν μια μέτρηση καταπόνησης μιας δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 1,65 m με ένα DOFS με βάση τη διασπορά Brillouin όπου αναλύθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι εγκατάστασης: ίνα ενσωματωμένη σε ράβδους πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες γυαλιού και ίνες κολλημένες σε χαλύβδινες ράβδους. Και οι δύο μέθοδοι βρέθηκαν να προστατεύουν αποτελεσματικά το σκέλος της οπτικής ίνας και να μετρούν τα δεδομένα καταπόνησης.

Οι Hoult et al. (2014) πραγματοποίησαν μια σειρά δοκιμών αξονικής τάσης σε χαλύβδινες πλάκες χρησιμοποιώντας αισθητήρια καλώδια πολυιμιδίου και επικαλυμμένα με νάιλον. Συνολικά, η επικαλυμμένη με πολυϊμίδιο ίνα παρουσίασε υψηλότερη ακρίβεια και καλύτερη συσχέτιση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τους ηλεκτρικούς μετρητές καταπόνησης. Ωστόσο, οι μετρήσεις τους φάνηκαν λανθασμένες σε θέσεις ρωγμών. Από την άλλη πλευρά, η επικαλυμμένη με νάιλον ίνα, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση ρωγμών και γενική φθορά, δεν προσφέρει την ίδια ακρίβεια με το καλώδιο πολυιμιδίου λόγω της ολίσθησης μεταξύ της επικάλυψης νάιλον και του εσωτερικού πυρήνα.

Επιπλέον, η προστασία DOFS μπορεί να παρεμβαίνει στη συλλογή των σωστών μετρήσεων καταπόνησης. Προκειμένου να ξεπεραστούν, ή τουλάχιστον να μειωθούν αυτά τα προβλήματα, και με αυτόν τον τρόπο να μετρηθεί αποτελεσματικά η καταπόνηση μιας δομής μετά τη ρωγμή, οι Quiertant et al. Εφάρμοσαν μια μονάδα ανάκρισης OBR σε συνδυασμό με αισθητήρες οπτικών ινών σε ράβδους με στόχο τη λήψη μετρήσεων καταπόνησης σε



κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα από Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 (Quiertant et al., 2012).



Εικόνα 35 - Γεωμετρία του αυλακιού στην όψη λεπτομέρειας της ράβδου ( a ) του άκρου της συνδεδεμένης ζώνης ( b )

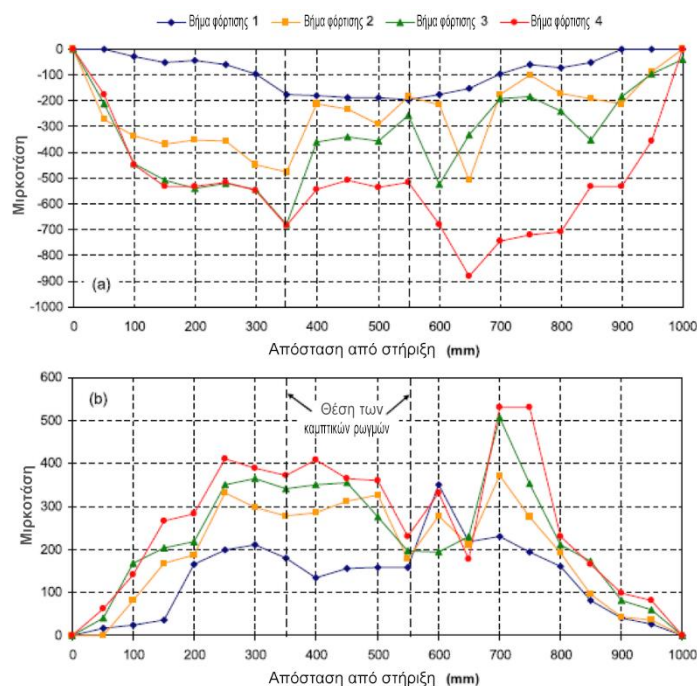
Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Οι δοκιμασμένες παράμετροι αυτών των πειραμάτων ήταν η μέθοδος που επιλέχθηκε για την εγκατάσταση της οπτικής ίνας, δηλαδή μια οπτική ίνα συγκολλημένη στην επιφάνεια του οπλισμού ή τοποθετημένη σε ένα αυλάκι, η γεωμετρία του αυλακιού και τέλος η τυπολογία της χρησιμοποιούμενης οπτικής ίνας. Στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι ένας αισθητήρας οπτικών ινών με επίστρωση πολυϊμιδίου ενσωματωμένος σε αυλάκωση κατά μήκος της ράβδου οπλισμού παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές για το DOFS είναι η ανίχνευση ρωγμών σε δομές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο, ένας από τους περιορισμούς του DOFS που βασίζεται στο Brillouin σχετίζεται με το γεγονός ότι δεν ανιχνεύονται και μετρώνται πολύ σημαντικές αλλαγές καταπόνησης που συμβαίνουν σε μήκη μικρότερα από το μισό της χωρικής ανάλυσης, καθιστώντας την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στην ανίχνευση ρωγμών πολύ δύσκολη.

Οι Deif et al. (2010) μελέτησαν τη δυνατότητα ενίσχυσης της χωρικής ανάλυσης και της καταπόνησης των κατανεμημένων αισθητήρων BOTDA προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα. Εφαρμόστηκε μια μέθοδος προσαρμογής πολλαπλών κορυφών για την εξαγωγή των κατανομών καταπόνησης στην επάνω και στην κάτω επιφάνεια κατά μήκος μιας δοκού οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκειται σε διαμόρφωση κάμψης τεσσάρων σημείων. Η μέθοδος προσαρμογής πολλαπλών κορυφών επέτρεψε τη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των μετρήσεων από 15 cm (του αισθητήρα) σε 5 cm (ανάγνωση ανάλυσης). Ωστόσο, παρά το

γεγονός ότι ήταν σε θέση να συλλάβει τη συσσώρευση ζημιών, το σύστημα δεν μπόρεσε να ανιχνεύσει και να εντοπίσει με ακρίβεια τον σχηματισμό ρωγμών (Εικόνα 37).



Εικόνα 36- ( α ) Κατανομές θλιπτικής και ( β ) τάσης εφελκυσμού που μετρώνται από κατανεμημένους αισθητήρες Brillouin

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

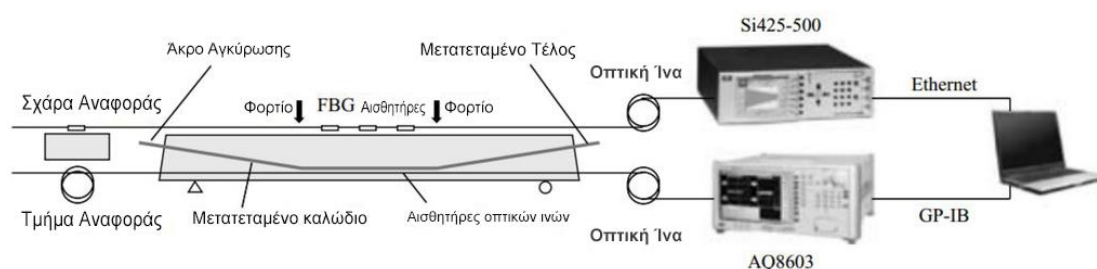
Οι Glisic and Inaudi (2012) αξιολόγησαν επίσης την απόδοση της εφαρμογής ενός προηγμένου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για την αποφυγή αυτού του περιορισμού μέσω αρκετών εργαστηριακών δοκιμών όπου το κατανεμημένο σύστημα παρακολούθησης θερμοκρασίας και καταπόνησης βασίστηκε στις αλλαγές στη συχνότητα Brillouin. Για αυτές τις δοκιμές κατασκευάστηκε μια συγκεκριμένη διάταξη και χρησιμοποιήθηκε για να τεντώσει 10 cm οπτικής ίνας με διαφορετικές προκαθορισμένες τιμές. Όλα αυτά τα προσομοιωμένα ανοίγματα ρωγμών εντοπίστηκαν και αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία.

Λαμβάνοντας υπόψη τον κίνδυνο θραύσης της οπτικής ίνας όταν η τάση που δημιουργείται από τη ρωγή είναι πολύ υψηλή και το γεγονός ότι αυτός ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε ήταν κατάλληλος μόνο εάν η τοπική πίεση ανακαταμεμηθεί σε ελάχιστο μήκος 10 cm, αποφάσισαν να δημιουργήσουν, στη θέση της ρωγμής, έναν μηχανισμό αποκόλλησης του αισθητήρα για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και σε υψηλά επίπεδα καταπόνησης. Για αυτό, έδωσαν ιδιαίτερη προσοχή στην επιλεγμένη κόλλα.

Αυτός ο μηχανισμός αποκόλλησης και το επιλεγμένο συγκολλητικό στη συνέχεια δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο με τη χρήση μιας συγκεκριμένης διάταξης όπου το DOFS

κολλήθηκε σε μεταλλικά στηρίγματα στα οποία δόθηκε μια σχετική μετατοπιστική κίνηση με στόχο την προσομοίωση ανοίγματος ρωγμής 0,5 mm. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που προέκυψαν απέδειξαν τον μηχανισμό αποκόλλησης και επιβεβαίωσαν την καλή επιλογή της κόλλας και τις διαδικασίες εγκατάστασης που πραγματοποιήθηκαν. Αυτό κατέδειξε την ικανότητα του συστήματος να ανιχνεύει και να εντοπίζει ρωγμές με ανοίγματα μικρότερα από 0,5 mm.

Οι Zhang et al. (2006) Ερεύνησαν την ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης της υγείας (HMS) (Εικόνα 37), που συνδύαζε τεχνικές BOTDR και πολυπλεξίας FBG με την πρόθεση να εφαρμοστεί σε ανακαινισμένες γέφυρες δοκών από σκυρόδεμα. Για αυτό, εκτελέστηκε μια σειρά στατικών και δυναμικών δοκιμών φόρτισης σε δοκό T οπλισμένου σκυροδέματος απλά στηριζόμενης, ενισχυμένη από εξωτερικά τεντωμένους τένοντες.



Εικόνα 37– Διαμόρφωση προτεινόμενου Συστήματος Δομικής Παρακολούθησης Υγείας

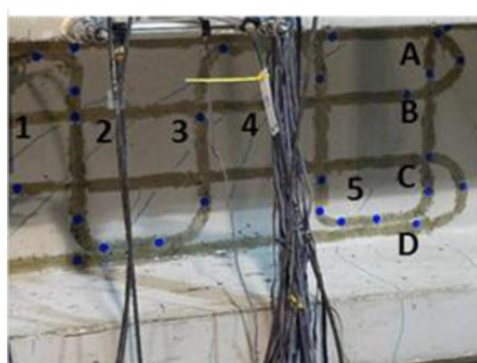
Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Αυτό το ανεπτυγμένο σύστημα SHM απέδειξε τη μεγάλη του αποτελεσματικότητα στη λειτουργία, προσδιορίζοντας σωστά τη σχετική δομική κατάσταση για κάθε κατάσταση φόρτωσης.

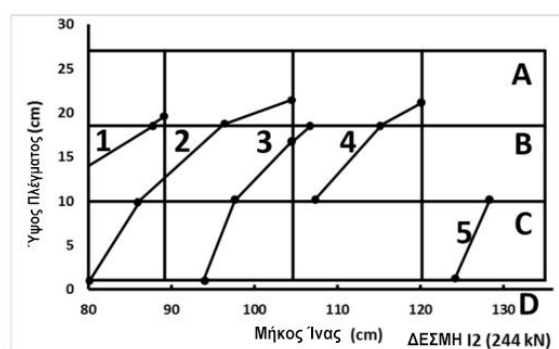
Με στόχο τη διερεύνηση των δυνατοτήτων ανίχνευσης ρωγμών σε στοιχεία από σκυρόδεμα, χωρίς την εμφάνιση αστοχίας αισθητήρα και αποκόλλησης, οι Villalba and Casas (2013) δημιούργησαν μια πλάκα από σκυρόδεμα με DOFS με βάση το OBR, κολλημένη στην κάτω και στην επάνω επιφάνεια, που υπόκεινται σε φορτίο δοκιμή. Η πλάκα ήταν επίσης εξοπλισμένη με πιο συμβατικούς ηλεκτρικούς αισθητήρες, όπως ενσωματωμένους μετρητές καταπόνησης και LVDT για λόγους σύγκρισης. Χρησιμοποιήθηκε επιστρωση πολυμερούς (πολυιμίδιο) για την προστασία της ίνας. Αυτή η τεχνολογία όχι μόνο μπόρεσε να ανιχνεύσει θέσεις ανοιγμάτων ρωγμών, αλλά και να συνεχίσει να εκτελεί σωστά μετρήσεις μέχρι τα επίπεδα φορτίου που παράγουν πλάτος ρωγμών στην περιοχή 1 mm. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν σε αυτό το πείραμα συγκρίθηκαν με τα διαθέσιμα δεδομένα από τους άλλους

αισθητήρες με όργανα καθώς και με την οπτική επιθεώρηση και τις προβλεπόμενες τιμές των μη γραμμικών μοντέλων FE (Rodríguez et al., 2015).

Αυτή η ομάδα εφάρμοσε επίσης μια νέα τεχνική σε δοκούς μερικώς προεντεταμένου σκυροδέματος (PPC) με αισθητήρες OBR προκειμένου να ανιχνεύσει επαγόμενες διατμητικές ρωγμές. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς αντίθετα με αυτό που συμβαίνει με τη ρωγή κάμψης, όπου οι ρωγμές εμφανίζονται ορθογώνια ως προς τον άξονα της δοκού, στην περίπτωση διατμητικής δράσης, η κλίση του σχεδίου ρωγμής είναι προηγουμένως άγνωστη και μπορεί ακόμη και να αλλάξει ανάλογα με τη δύναμη προέντασης και τη θέση κατά μήκος του στοιχείου. Για αυτό, προτάθηκε ένα δισδιάστατο πλέγμα DOFS που παρακολουθούσε την έναρξη, τη θέση, την κλίση και την εξέλιξη της ρωγμής κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής φορτίου δέσμης (Εικόνα 38) (Barrias et al., 2016).



(a)



(b)

Εικόνα 38- Σύγκριση του σχεδίου πραγματικής διατμητικής ρωγμής ( a ) και λήφθηκε από το σύστημα OBR ( b )

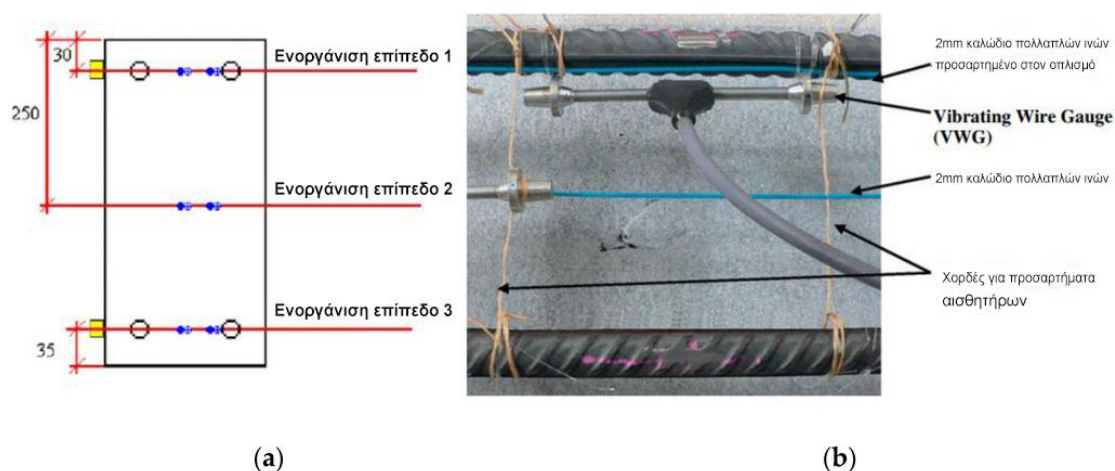
Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν καλή συμφωνία με τις οπτικοποιημένες ρωγμές και λήφθηκαν χωρίς να απαιτείται προηγούμενη γνώση της ραγισμένης ζώνης και κατά συνέπεια απέδειξαν τη σκοπιμότητα αυτής της μεθοδολογίας.

Οι Henault et al. (2010) διεξήγαγαν εργαστηριακά πειράματα όπου μια πλάκα σκυροδέματος ήταν εξοπλισμένη με DOFS με βάση Raman, Brillouin και Rayleigh προκειμένου να ληφθούν μετρήσεις καταπόνησης (ο αισθητήρας Raman χρησιμοποιήθηκε για αντιστάθμιση θερμοκρασίας). Τα αποτελέσματα των αισθητήρων BOTDR περιορίστηκαν από την κακή τους ακρίβεια, ενώ οι αισθητήρες OBR παρείχαν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Ωστόσο, δεδομένου ότι το εφαρμοζόμενο φορτίο προκάλεσε σχετικά μικρές καταπονήσεις, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας προκάλεσαν παρερμηνείες. Τα υλοποιηθέντα DOFS

ενσωματώθηκαν στο σκυρόδεμα και επίσης μελετήθηκε η επίδραση της διαδικασίας επίστρωσης και τοποθέτησης.

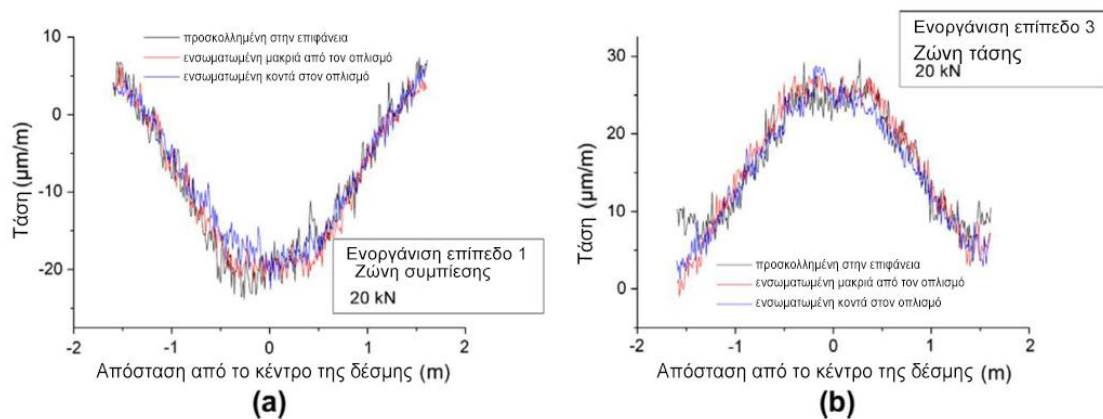
Η ίδια ερευνητική ομάδα παρακολούθησε επίσης μια δοκό από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 3,4 m με ορθογώνια διατομή 0,25 × 0,5 m<sup>2</sup> που υποβλήθηκε σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων μέσω της χρήσης διαφορετικών DOFS με βάση τη σκέδαση Rayleigh (τρία επίπεδα ενσωματωμένα στο σκυρόδεμα και δύο επίπεδα συνδεδεμένα με την εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος) που συνδυάστηκαν με αισθητήρες Vibrating Wire Gauges (VWG) (Εικόνα 40).



Εικόνα 39 - ( α ) Λεπτομέρειες των οργάνων διατομής στο μέσο άνοιγμα της δοκού (διαστάσεις σε mm). ( β ) Εικόνα της δοκού με όργανα πριν από την έκχυση σκυροδέματος

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

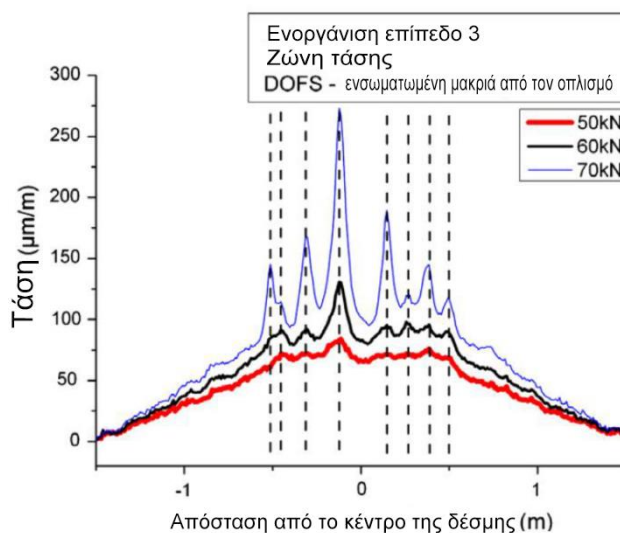
Η δοκιμή χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Στο πρώτο, το εφαρμοζόμενο επίπεδο φορτίου ήταν κάτω από την αντίσταση εφελκυσμού του σκυροδέματος προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση των διαφορετικών εφαρμοζόμενων συστημάτων ανίχνευσης. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που προέκυψε από αυτό το μέρος της δοκιμής ήταν η μειωμένη επίδραση της θέσης των αισθητήρων για τη μέτρηση της καταπόνησης, καθώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους ενσωματωμένους και τους εξωτερικούς συνδεδεμένους αισθητήρες παρουσίασαν μια σχετικά καλή συμφωνία σε συμπίεση και σε τάση (Εικόνα 41).



Εικόνα 40 - Προφίλ καταπόνησης που παρέχονται από το σύστημα DOFS για φορτίο κάμψης 20 kN: ( α ) Στη ζώνη συμπίεσης στο επίπεδο οργάνων 1 και ( β ) στη ζώνη τάνυσης στο επίπεδο οργάνων 3

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Στη δεύτερη φάση, προκλήθηκαν οι αρχικές ρωγμές προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων DOFS να ανιχνεύσουν τη θέση τους. Παρά το γεγονός ότι το δείγμα σπλισμένου σκυροδέματος υπέστη σοβαρή ζημιά σε επίπεδα υψηλού φορτίου, τα καλώδια οπτικών ινών δεν παρουσίασαν ρήξη εφελκυσμού. Ήταν δυνατός ο εντοπισμός της θέσης των ρωγμών (ακόμη και πριν από την οπτική επιθεώρηση) από τα πειραματικά δεδομένα που παρέχονται από το DOFS και η παρακολούθηση της εξέλιξής του (Εικόνα 42) (Henault et al., 2012).



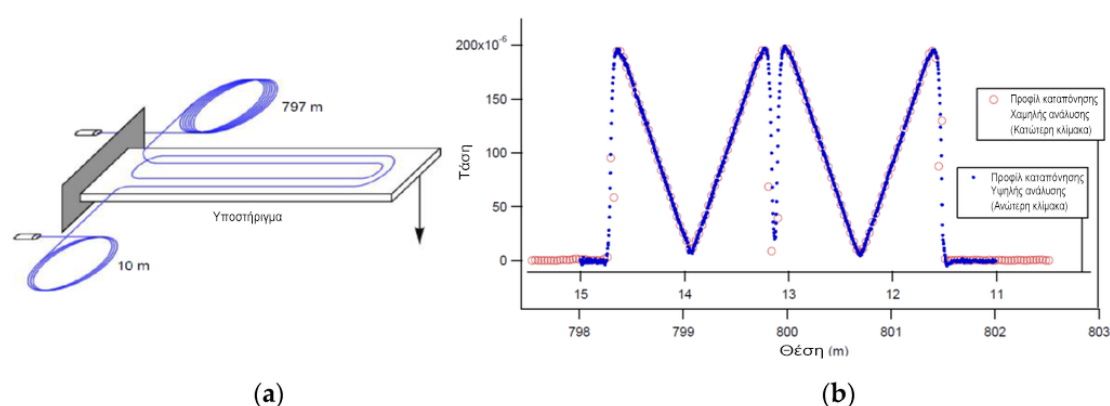
Εικόνα 41 - Προφίλ εφελκυσμού που καταγράφηκαν από το DOFS με βάση τη σκέδαση Rayleigh για διάφορα φορτία κάμψης άνω των 50 kN (προσαρμοσμένο)

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Η ίδια ομάδα έρευνας ανέπτυξε έναν αλγόριθμο για την αυτόματη ανάλυση της εξέλιξης ρωγμών σε στοιχεία σπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η διαδικασία παρείχε έναν ακριβή

χάρτη των ρωγμών με την εξέλιξη τους και συνδυάστηκε με μια δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (Buchoud et al., 2012).

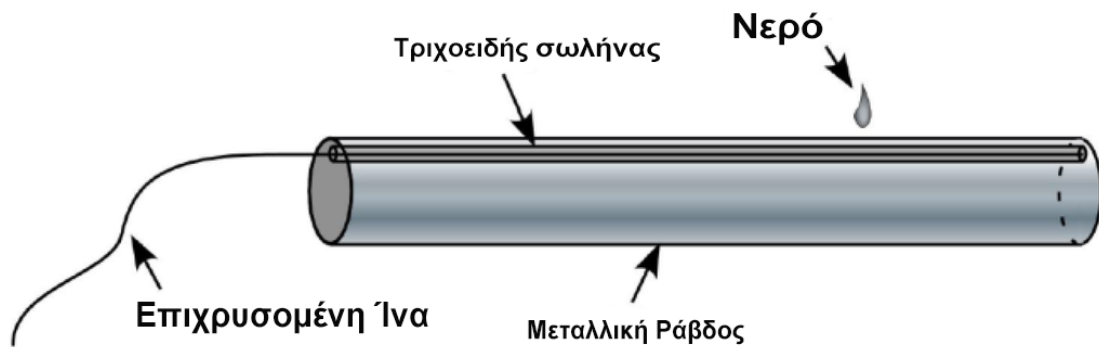
Ένας από τους αναφερόμενους περιορισμούς της ανίχνευσης που βασίζεται στο Rayleigh-OFDR είναι το σχετικά μικρό εύρος ανίχνευσης προκειμένου να επιτευχθούν μετρήσεις υψηλής χωρικής ανάλυσης. Ωστόσο, οι Gifford et al. ανέφεραν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας με σύστημα OBR σε έκταση δύο χιλιομέτρων. Οι ίδιοι συγγραφείς αξιολόγησαν επίσης με επιτυχία τις δυνατότητες μετρήσεων καταπόνησης αυτής της δοκιμής τόσο για κοντινές (10 m) όσο και για μεγάλες αποστάσεις ( $\approx 1$  km) μέσω ενός πειράματος που πραγματοποιήθηκε σε μια δοκό προβόλου (Εικόνα 43).



Εικόνα 42 - (α) Διάγραμμα δοκού προβόλου που χρησιμοποιείται για μετρήσεις καταπόνησης. Η ίνα κολλήθηκε στη δοκό σε διπλό βρόχο και τα δύο άκρα συνδέθηκαν σε καλώδια από ίνα με μήκη 10 m και 797 m αντίστοιχα. (β) Καταπόνηση στον πρόβολο όπως μετράται και από τις δύο εισόδους ινών

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

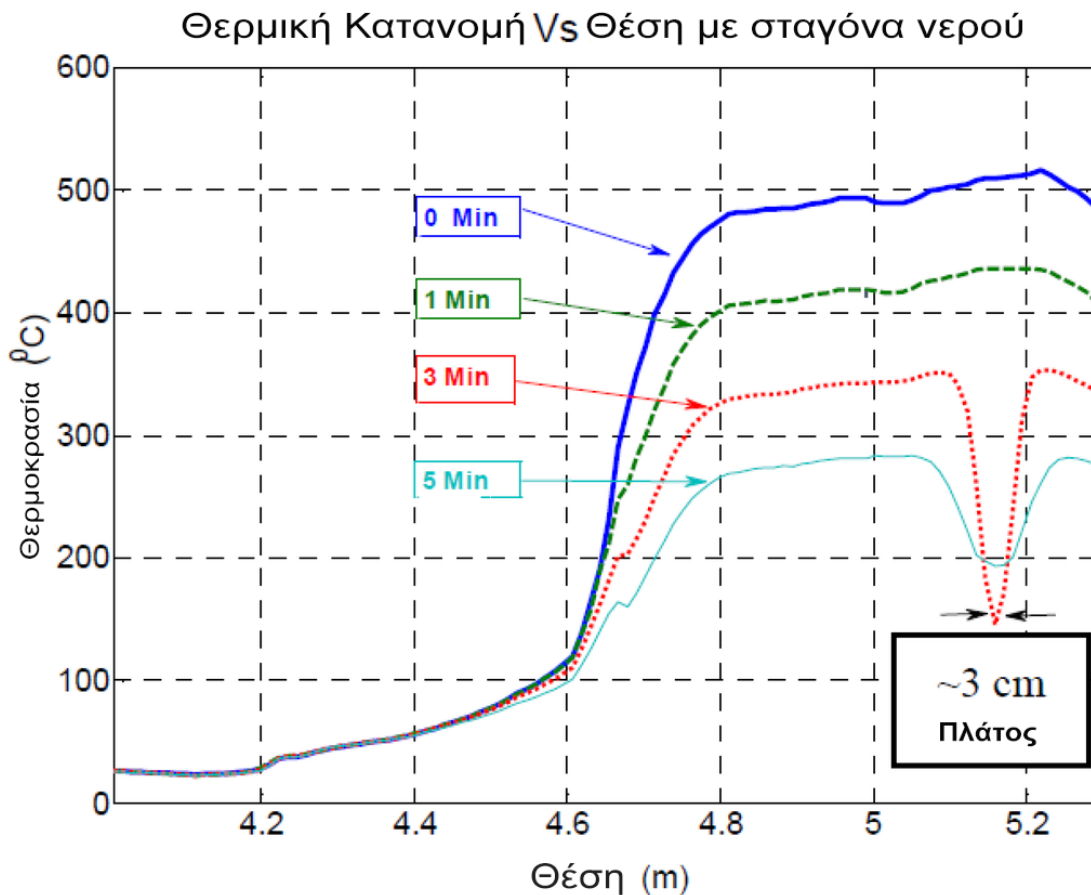
Αυτή η ερευνητική ομάδα πραγματοποίησε επίσης μια άλλη γενική δοκιμή προκειμένου να επικυρώσει τη δυνατότητα εφαρμογής των αισθητήρων Rayleigh-OFDR για ανίχνευση θερμοκρασίας. Αυτό το πείραμα συνίστατο σε μια μεταλλική ράβδο θερμαινόμενη με αντίσταση που έφτασε σε θερμοκρασίες έως και 600 °C και στη συνέχεια υποβλήθηκε σε θερμική κλίση ρίχνοντας νερό σε ένα εντοπισμένο σημείο της ράβδου που ήταν εξοπλισμένη με οπτικές ίνες επικαλυμμένες με χρυσό (για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα της ίνας σε υψηλές θερμοκρασίες) που απομονώθηκαν για να μην ανταποκρίνονται στην καταπόνηση (Εικόνα 44) (Gifford et al., 2007).



Εικόνα 43 - Δοκιμαστικό αντικείμενο για μέτρηση σε υψηλές θερμοκρασίες με ισχυρή θερμική κλίση

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Τα αποτελέσματα (Εικόνα 45) επιβεβαίωσαν την ικανότητα μέτρησης της θερμοκρασίας με υψηλή χωρική ανάλυση με DOFS που βασίζεται σε σκέδαση Rayleigh.



Εικόνα 44 - Θερμοκρασία σε σχέση με τη θέση για την ίνα σε θερμαινόμενη μεταλλική ράβδο (η ίνα εισέρχεται στη ράβδο περίπου στα 4,8 m)

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

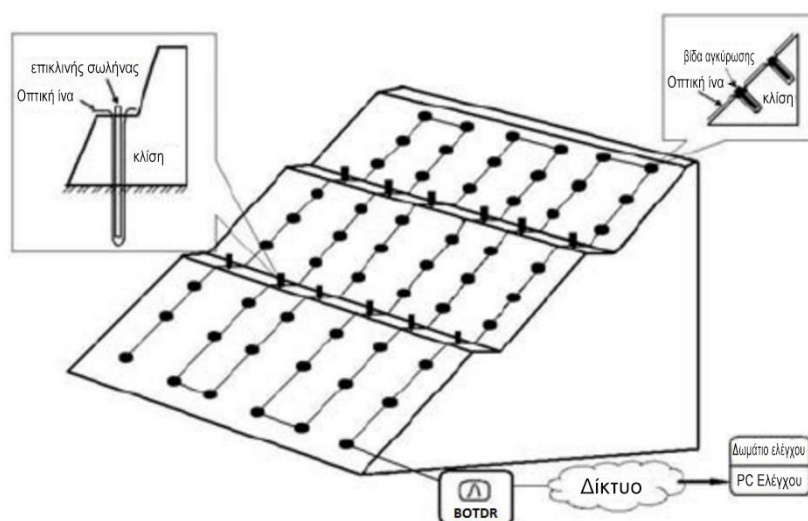
Τα DOFS βασισμένα σε οπισθοσκέδαση Rayleigh αναφέρθηκαν επίσης σε μια εφαρμογή όπου η τοπική θέρμανση μετρήθηκε με χωρική ανάλυση χιλιοστών. Μια άλλη επιτυχημένη



εφαρμογή αισθητήρων με βάση το Rayleigh για μετρήσεις θερμοκρασίας αναφέρεται από τους Sang et al. (2008) σε πυρηνικό αντιδραστήρα.

### 3.2.2 Γεωτεχνικές Κατασκευές

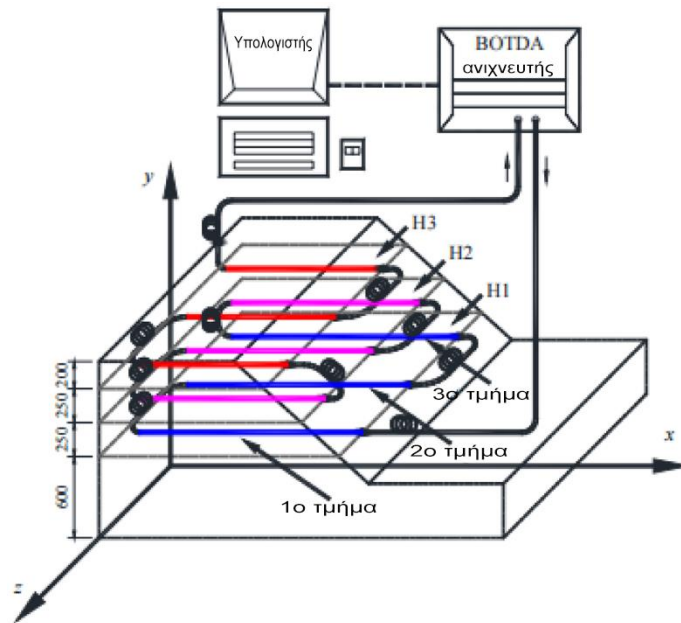
Λόγω των δυνατοτήτων του ευρέος φάσματος, το DOFS γίνεται μια πολύ ελκυστική τεχνολογία για την οργάνωση γεωτεχνικών κατασκευών. Ωστόσο, κατά την παρακολούθηση της ευστάθειας της κλίσης, οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες που εφαρμόζονται είναι διακριτοί αισθητήρες, όπως κλισόμετρα, ανιχνευτές ρωγμών, ανιχνευτές τάσης οπλισμού και μετρητές μετατόπισης. Με αυτόν τον τρόπο, δεν επιτυγχάνεται εύκολα μια συνολική συμπεριφορά της κλίσης. Αυτά όργανα είναι συχνά ασύμβατα με την παραμόρφωση της μάζας του βράχου-εδάφους και οι δυσκολίες που σχετίζονται με τη διαδικασία εγκατάστασης και τις κακές καταστάσεις μετρήσεων καθιστούν τακτικά άσκοπη την εφαρμογή αυτών των αισθητήρων. Οι Shi et al. (2006) δοκίμασαν τη σκοπιμότητα της εφαρμογής ενός κατανεμημένου συστήματος ανίχνευσης οπτικών ινών που βασίζεται σε BOTDR για πλαγιές (Εικόνα 45).



Εικόνα 45 - Το διάγραμμα του κατανεμημένου συστήματος παρακολούθησης οπτικών ινών που βασίζεται σε BOTDR για κλίσεις

Πηγή: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748/htm>

Οι Zhu et al. (2014) κατασκεύασαν ένα μεσαίου μεγέθους μοντέλο εδάφους καρφωμένης κλίσης στο εργαστήριο προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της παρακολούθησης προβλημάτων σταθερότητας της πλαγιάς μέσω της χρήσης της τεχνολογίας ανίχνευσης BOTDA (Εικόνα 46).



Εικόνα 46 - Διάταξη της ίνας ανίχνευσης BOTDA στην κλίση του μοντέλου (μονάδα: mm)

Πηγή: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11629-013-2816-0>

## Κεφάλαιο 4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### 4.1 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΗΜΑΡΧΕΙΟΥ ΚΟΡΔΕΛΙΟΥ – ΕΥΟΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΑΤΕΙΑ ΤΟΥ ΕΥΟΣΜΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η περίπτωση της εγκατάστασης οπτικών ινών στο Δημαρχείο Κορδελιού – Ευόσμου που βρίσκεται στην Πλατεία του Ευόσμου. Η «Ελληνική Εταιρεία Τηλεπικοινωνιών και Τηλεματικών Εφαρμογών Ανώνυμη Εταιρείς» που φέρει το διακριτικό «Forthnet» έλαβε το δικαίωμα προκειμένου να εγκαταστήσει οπτικές ίνες.

Ειδικότερα, αιτήθηκε προκειμένου να λάβει άδεια για τη διάνοιξη οδοστρώματος καθώς επίσης και για την εγκατάσταση οπτικών ινών. Στον πίνακα 2 παρατίθενται η διάνοιξη χανδάκων και η εγκατάσταση οπτικών ινών αλλά και σωληνώσεων ανά δρόμο για την περάτωση του έργου.

Πίνακας 2 - Διάνοιξη χανδάκων και εγκατάσταση οπτικών ινών ανά δρόμο

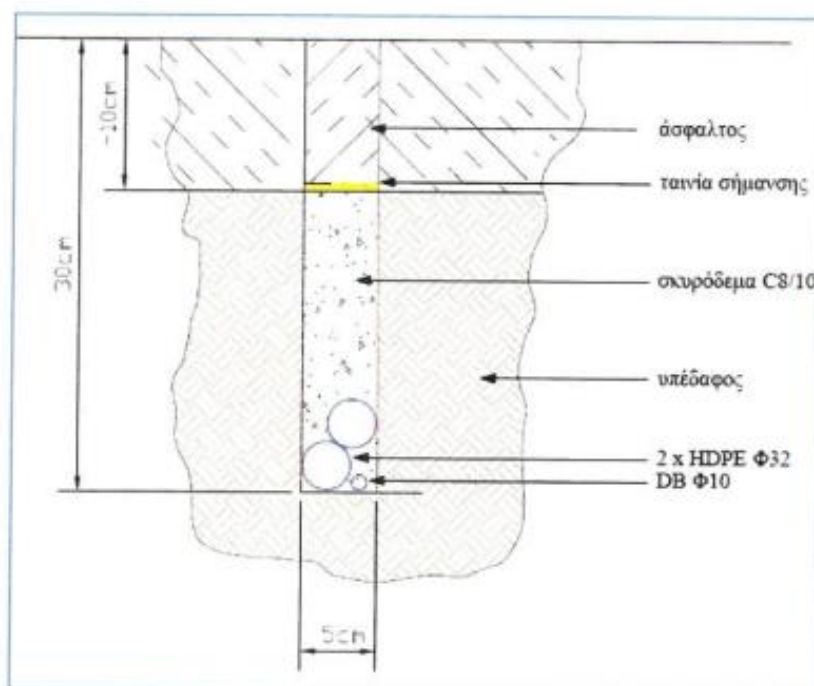
Α/Α	ΔΡΟΜΟΣ	ΑΠΟ	ΕΩΣ	ΜΕΤΡΑ
1	ΙΟΥΛΙΑΝΟΥ	ΠΕΡΙΚΛΕΟΥΣ	ΚΥΠΡΟΥ	320
2	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	ΚΥΠΡΟΥ	25ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ	400
3	ΠΑΤΡΩΝ ΜΕΓ.	ΤΕΓΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΗΣΤΟΥ	ΙΟΥΛΙΑΝΟΥ	10
4	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	ΑΧΙΛΛΕΩΣ	230
5	ΑΧΙΛΛΕΩΣ	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	Π. ΜΕΛΑ	100
6	Π. ΜΕΛΑ	ΑΧΙΛΛΕΩΣ	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΟΤΟΚΟΥ	90
7	ΠΗΝΕΛΟΠΗΣ ΔΕΛΤΑ	Π. ΜΕΛΑ	ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	95
8	ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΠΗΝΕΛΟΠΗΣ ΔΕΛΤΑ	ΚΑΡΑΟΛΗ ΚΑΙ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	125
9	ΚΑΡΑΟΛΗ ΚΑΙ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΤΖΑΒΕΛΛΑ	60
10	ΤΖΑΒΕΛΛΑ	ΚΑΡΑΟΛΗ ΚΑΙ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	170
11	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΤΖΑΒΕΛΛΑ	ΜΑΚΕΔΟΝΟΜΑΧΩΝ	150
12	ΜΑΚΕΔΟΝΟΜΑΧΩΝ	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	445
13	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	ΜΑΚΕΔΟΝΟΜΑΧΩΝ	425
14	ΥΠΟΣΜΗΝΑΓΟΥ ΤΣΑΛΗ	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	25ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ	80
15	25ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ	ΥΠΟΣΜΗΝΑΓΟΥ ΤΣΑΛΗ	ΣΜΥΡΝΗΣ	10
16	ΣΜΥΡΝΗΣ	25ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ	480
17	ΕΥΡΥΣΘΕΩΣ	ΣΜΥΡΝΗΣ	ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΥ	90
18	ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΥ	ΕΥΡΥΣΘΕΩΣ	ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	10
19	ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΥ	ΟΛΥΜΠΙΑΔΟΣ	320
20	ΟΛΥΜΠΙΑΔΟΣ	ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ	135
21	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ	ΣΜΥΡΝΗΣ	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	200
22	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ	ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	160

23	ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	ΑΝΔΡΟΜΑΧΗΣ	535
24	ΑΝΔΡΟΜΑΧΗΣ	ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	ΚΑΛΛΙΟΠΗΣ	45
25	ΚΑΛΛΙΟΠΗΣ	ΑΝΔΡΟΜΑΧΗΣ	ΜΑΝΩΛΗ ΑΝΔΡΟΝΙΚΟΥ	200
26	ΜΙΚΡΑΣ ΑΣΙΑΣ	ΓΡ. ΠΑΛΑΜΑ	ΣΑΠΦΟΥΣ	550
27	ΠΕΤΜΕΖΑ	ΜΙΚΡΑΣ ΑΣΙΑΣ	ΙΠΠΟΔΡΟΜΙΟΥ	160

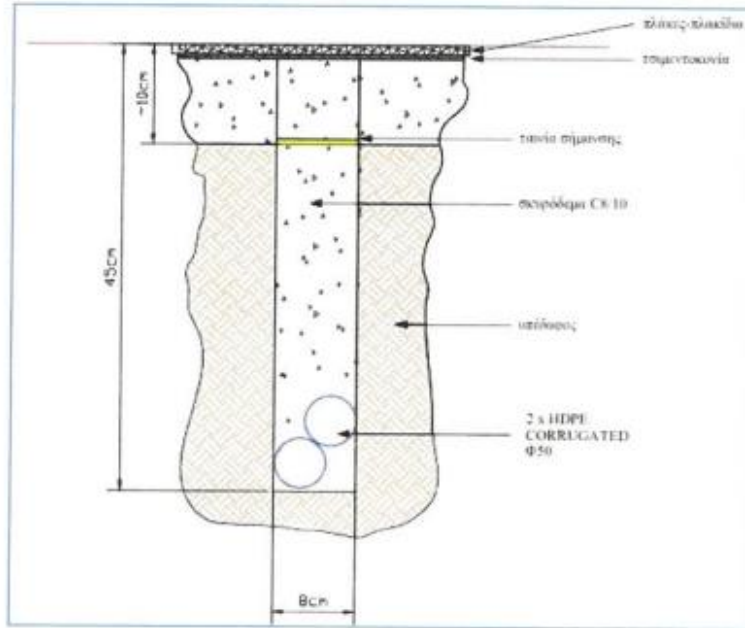
5595

Επίσης, στην αίτηση χορήγησης άδεια παρατίθενται και ο δρόμοι εγκατάστασης φρεατίων (Εικόνα 48). Καθώς αναφέρεται στην αίτηση χορήγησης άδειας σχετικά με τη διάνοιξη χανδάκων, οι τομές στο οδόστρωμα είναι ευθύγραμμες καθώς επίσης και κάθετες είτε παράλληλες στον άξονα του δρόμου. Επιπλέον, αναφέρεται πως οι τάφροι επρόκειτο να έχουν σχήμα ορθογώνιου. Στο κατώτερο σημείο των χανδάκων τοποθετούνται σωλήνες HDPE. Επιπλέον, ο τύπος αλλά και ο αριθμός των σωλήνων οι οποίοι τοποθετούνται καθορίζονται από την εταιρεία.

Στην Εικόνα 49 φαίνεται χάνδακας σε δρόμο με άσφαλτο, ο οποίος έχει διαστάσεις 0,05m πλάτος και 0,3m βάθος. Ενώ, στην Εικόνα 50 φαίνεται χάνδακας επί πεζοδρομίου με διαστάσεις 0,08 πλάτος και 0,45m βάθος.

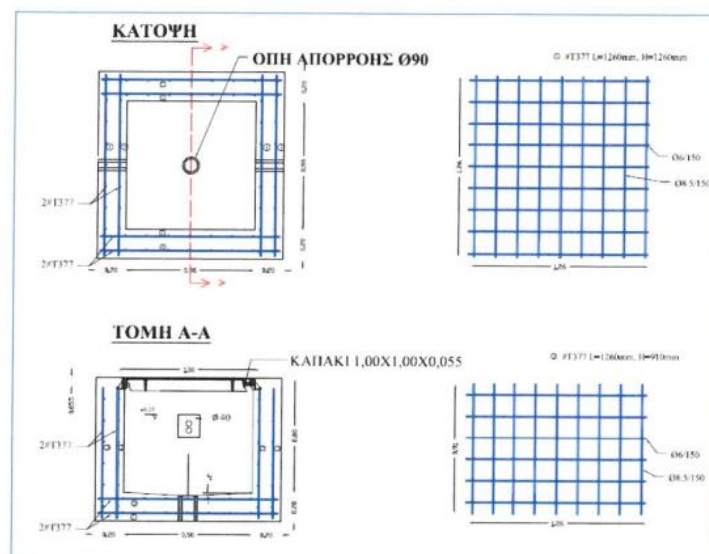


Εικόνα 47 - Χάνδακας σε ασφαλτοστρωμένη οδό

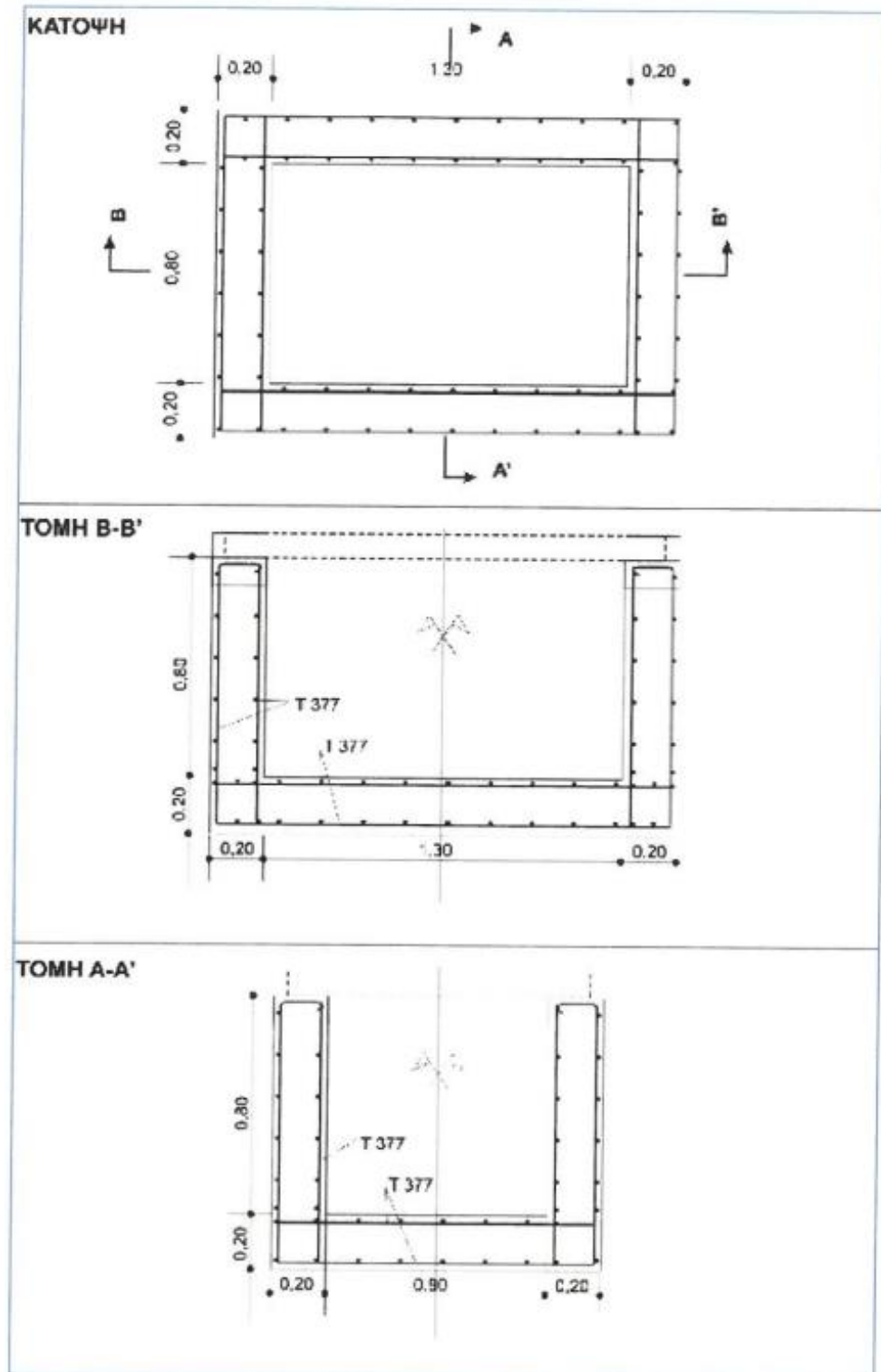


Εικόνα 48 - Χάνδακας επί πεζοδρομίου

Αναφορικά με τα φρεάτια είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα και οι διαστάσεις τους καθίστανται επαρκείς προκειμένου να τοποθετηθούν οπτικός σύνδεσμος αλλά και καλώδια οπτικών ινών. Ακόμη, στα σημεία διακλάδωσης των καλωδίων διατίθενται παράπλευρες οδεύσεις. Σε ότι αφορά στις αποστάσεις μεταξύ των φρεατίων κυμαίνονται σε 200 -1000 μ. Στην Εικόνα 51 παρουσιάζεται φρεάτιο μήκους 0,90m, πλάτους 0,90m και βάθους 0,80m. Στην Εικόνα 52 φαίνεται φρεάτιο μήκους 1,30m, πλάτους 0,80m και βάθους 0,80m. Πρόκειται για φρεάτιο τύπου Φ1.

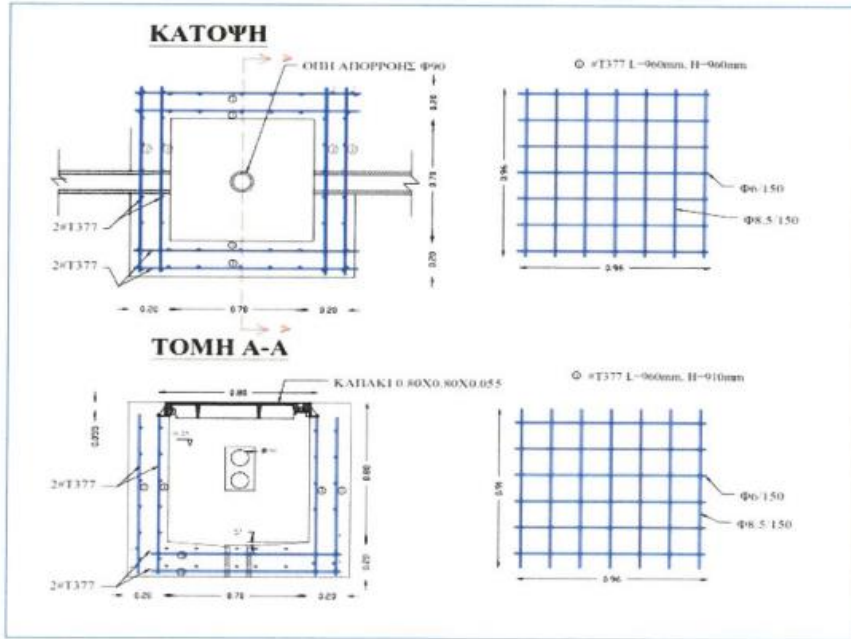


Εικόνα 49 - φρεάτιο 0,90m X 0,90m X 0,80m



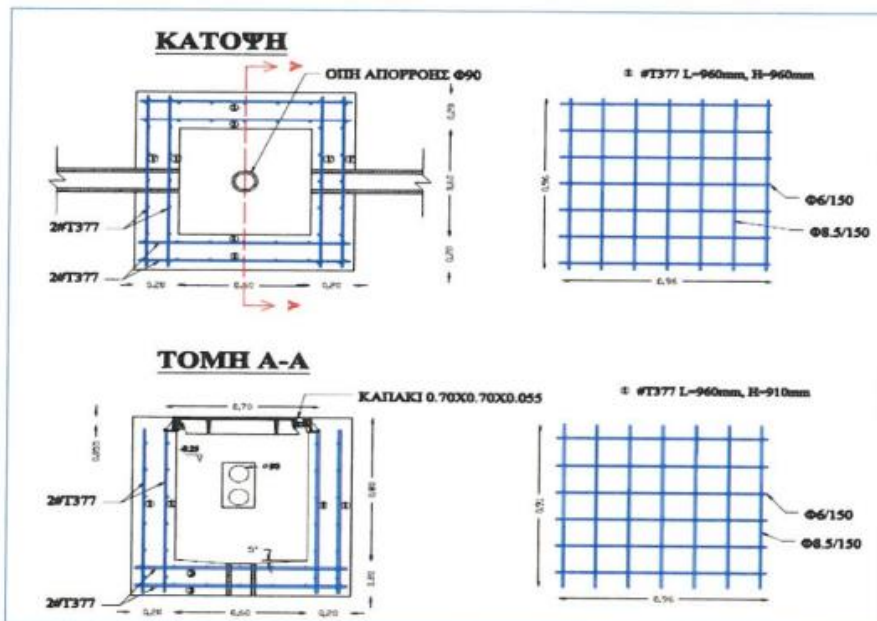
Εικόνα 50 - Φρεάτιο 1,30m X 0,80m X 0,80m

Παρακάτω στην Εικόνα 53 φαίνεται φρεάτιο τύπου Φ3 που έχει μήκος 0,70m, πλάτος 0,70m και βάθος 0,80m. Τα χαρακτηριστικά της κάτοψης και της τομής Α-Α' παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



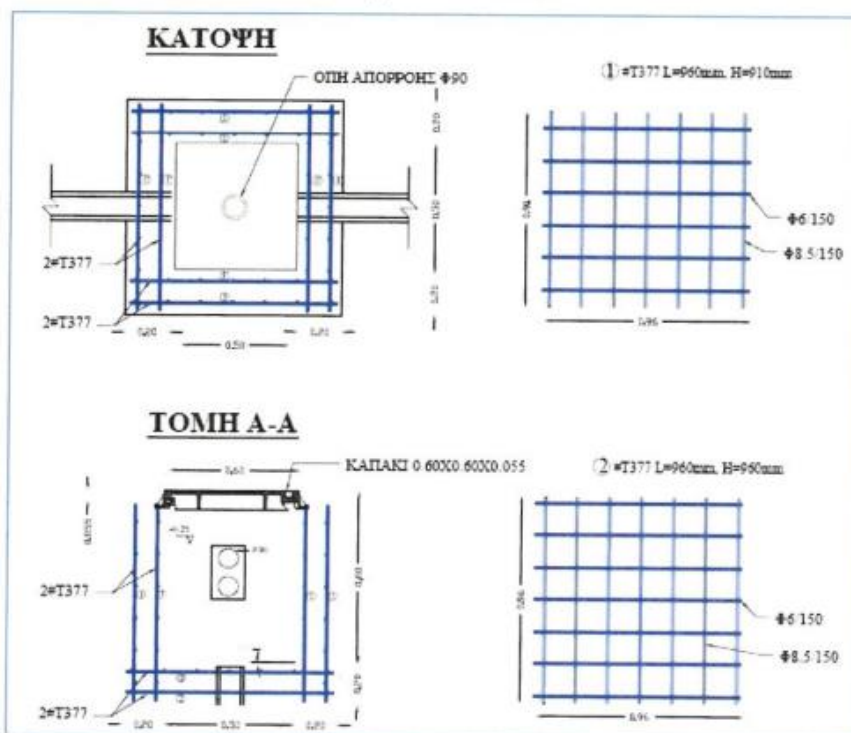
Εικόνα 51 - Φρεάτιο 0,70m X 0,70m X 0,80m

Στην Εικόνα 54 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του φρεατίου τύπου Φ4 που έχει διαστάσεις μήκος 0,60m, πλάτος 0,60m και βάθος 0,80m.



Εικόνα 52 - Φρεάτιο 0,60m X 0,60m X 0,80m

Τέλος στην Εικόνα 55 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά φρεατίου Φ5 με μήκος 0,50m, πλάτος 0,50m και βάθος 0,80m.



Εικόνα 53 - Φρεάτιο 0,50m X 0,50m X 0,80m

Στην Εικόνα 56 παρατίθενται οι δρόμοι όπου έλαβαν χώρα τα έργα για την εγκατάσταση οπτικών ινών.

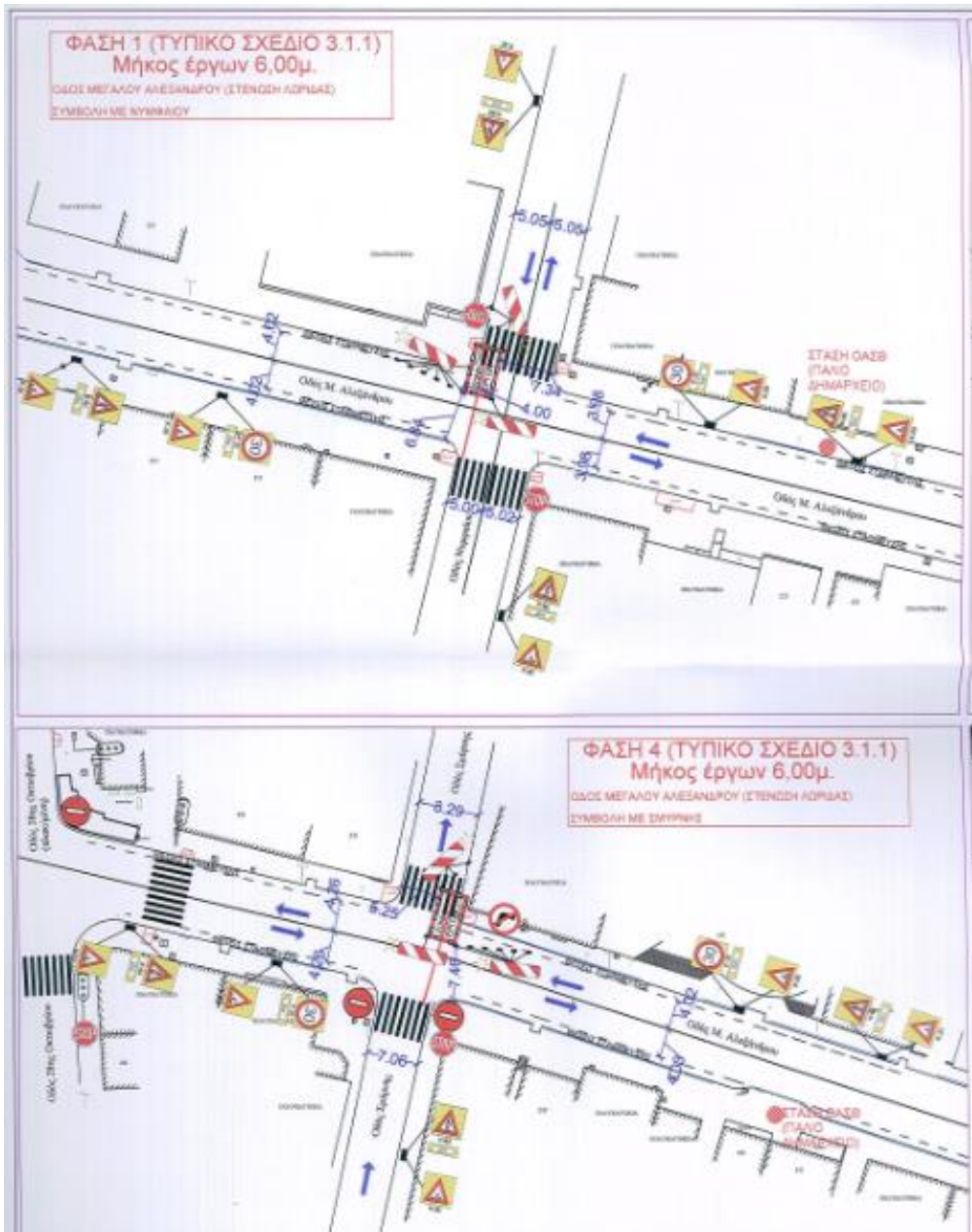
Πίνακας 3 - Δρόμοι διάνοιξης φρεατίων

A/A	ΔΡΟΜΟΣ	ΑΠΟ	ΕΩΣ
1	ΙΟΥΛΙΑΝΟΥ	ΠΕΡΙΚΛΕΟΥΣ	ΠΑΤΡΩΝ
2	ΠΑΤΡΩΝ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΙΟΥΛΙΑΝΟΥ ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	
3	ΝΥΜΦΑΙΟΥ		
4	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΣΜΥΡΝΗΣ	ΑΧΙΛΛΕΩΣ
5	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΑΧΙΛΛΕΩΣ	
6	Π. ΜΕΛΑ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΑΧΙΛΛΕΩΣ	
7	Π. ΜΕΛΑ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΠΗΝΕΛΟΠΗΣ ΔΕΛΤΑ	
8	ΠΗΝΕΛΟΠΗΣ ΔΕΛΤΑ	Π. ΜΕΛΑ	ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
9	ΚΑΡΑΟΛΗ ΚΑΙ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	
10	ΤΖΑΒΕΛΛΑ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΜΗΤΡΟΥΣΗ	
11	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΤΖΑΒΕΛΛΑ	
12	ΜΕΓ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΜΑΚΕΔΟΝΟΜΑΧΩΝ	
13	ΜΑΚΕΔΟΝΟΜΑΧΩΝ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΑΓΙΟΥ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ	
14	ΜΑΚΕΔΟΝΟΜΑΧΩΝ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	
15	ΑΓΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ	ΠΗΝΕΙΟΥ	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ
16	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΥΠΟΣΜΗΝΑΓΟΥ ΤΣΑΛΗ	
17	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	ΣΤΡ. ΔΑΓΚΛΗ	ΝΥΜΦΑΙΟΥ
18	ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΝΥΜΦΑΙΟΥ ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ	
19	ΝΥΜΦΑΙΟΥ		
20	25ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΣΜΥΡΝΗΣ	
21	ΣΜΥΡΝΗΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΕΥΡΥΣΘΕΩΣ	
22	ΟΛΥΜΠΙΑΔΟΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	
23	ΟΛΥΜΠΙΑΔΟΣ	ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ
24	ΣΜΥΡΝΗΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΕΜΠΕΔΟΚΛΗ	
25	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΣΜΥΡΝΗΣ	
26	ΑΝΤΩΝΗ ΤΡΙΤΣΗ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΝΥΜΦΑΙΟΥ	

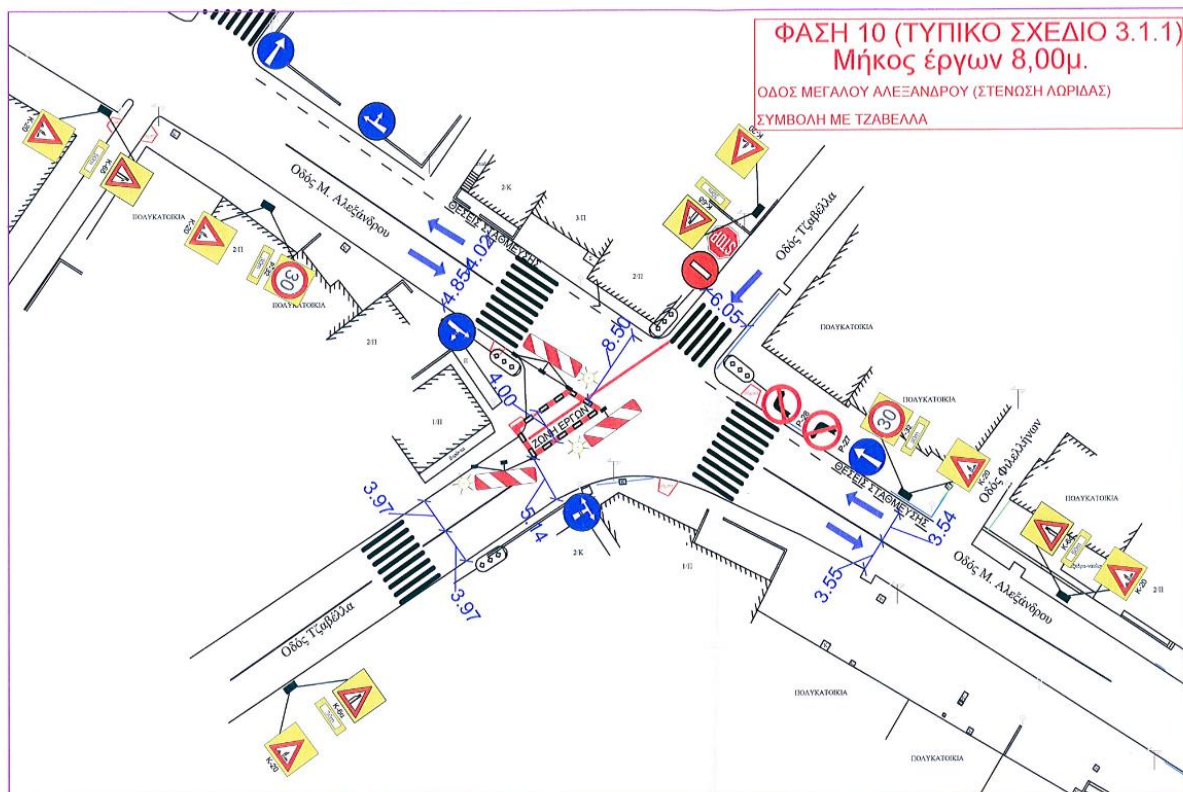


27	ΝΥΜΦΑΙΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	
28	ΜΑΙΑΝΔΡΟΥ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	
29	ΜΑΙΑΝΔΡΟΥ	ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑΣ
30	ΑΝΔΡΟΜΑΧΗΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ	
31	ΠΕΤΜΕΖΑ	ΜΙΚΡΑΣ ΑΣΙΑΣ	ΙΠΠΟΔΡΟΜΙΟΥ
32	ΜΙΚΡΑΣ ΑΣΙΑΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΠΕΤΜΕΖΑ	
33	ΜΙΚΡΑΣ ΑΣΙΑΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΠΑΡ. ΠΑΛΑΜΑ	
34	ΜΙΚΡΑΣ ΑΣΙΑΣ	ΣΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΟ ΚΑΛΑΒΡΥΤΩΝ	

Ακολουθεί η παρουσίαση διαφόρων φάσεων του έργου. Ειδικότερα, στην Εικόνα 57 παρουσιάζεται η Φάση 1 του έργου, που αφορά την οδό Μεγάλου Αλεξάνδρου στη συμβολή με Νυμφαίου και η Φάση 4 του έργου, που αφορά την οδό Μεγάλου Αλεξάνδρου στη συμβολή με την οδό Σμύρνης. Το μήκος των έργων ανέρχεται στα 6,00m για το καθένα. Στην Εικόνα 58 παρουσιάζεται η Φάση 10 του έργου που έλαβε χώρα στην οδό Μεγάλου Αλεξάνδρου στη συμβολή με την οδό Τζαβέλλα. Το μήκος έργων ανέρχεται στα 8,00m.



Εικόνα 54 - Φάση 1 και Φάση 4 του έργου



Εικόνα 55 - Φάση 10 του έργου

Στην Εικόνα 59 παρουσιάζεται ο χάρτης με όλες τις Φάσεις του έργου για την εγκατάσταση οπτικών ινών. Πρόκειται για 11 Φάσεις που καλύπτουν έργα στις περιοχές γύρω από την πλατεία Ευόσμου. Επίσης, παρατίθεται υπόμνημα με τις πινακίδες εργοταξιακής σήμανσης.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ  
ΠΙΝΑΚΙΔΕΣ ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΗΣ ΣΗΜΑΝΣΗΣ

K - 65		Επικίνδυνη στένωση οδοστρώματος στη δεξιά πλευρά	
K-6a		Επικίνδυνη στένωση οδοστρώματος στην αριστερή πλευρά	
K - 20		Κίνδυνος λόγω εκπολιόμενων εργασιών στην οδό	
K-1a		Επικίνδυνη στροφή αριστερά	
P - 7		Απαγορεύεται η είσοδος σε όλα τα οχήματα	πλαστικά New Jersey άδευση οπτικής ίνας
P - 27		Απαγορεύεται η αριστερή στροφή	
P - 28		Απαγορεύεται η δεξιά στροφή	
P - 49		Υποχρεωτική κατεύθυνση ιαθιά	
P - 52b		Υποχρεωτική δέλευση μόνο από τη δεξιά πλευρά της νησίδας ή του εμπαιδίου	
P - 52a		Υποχρεωτική δέλευση μόνο από την αριστερή πλευρά της νησίδας ή του εμπαιδίου	
Π - 77		Υποχρεωτικό πέρασμα από τα δεξιά της νησίδας ή του εμπαιδίου Συνδυάζεται με την πινακίδα P - 52b	
Π - 78		Υποχρεωτικό πέρασμα από τα αριστερά της νησίδας ή του εμπαιδίου Συνδυάζεται με την πινακίδα P - 52a	
P-50		Υποχρεωτική κατεύθυνση με στροφή δεξιά ή αριστερά	
P - 32		Η μέγιστη ταχύτητα περιορίζεται στον περιγραφόμενο αριθμό	
P - 8		κλειστή οδός για όλα τα οχήματα	
		αναλόμποντες φανοί	

Οι πινακίδες σήμανσης τοποθετούνται σε επαρκές ύψος, ώστε να γίνονται εύκολα αντιληπτές από τους οδηγούς. Το ελάχιστο ύψος του κάτω άκρου της πινακίδας από την επιφάνεια κυκλοφορίας ορίζεται σε 2,00 μ. Το ελάχιστο ύψος του πάνω άκρου της πινακίδας από την επιφάνεια κυκλοφορίας ορίζεται σε 2,50 μ. Το ελάχιστο ύψος του κάτω άκρου της πινακίδας από την επιφάνεια κυκλοφορίας ορίζεται σε 2,00 μ. Το ελάχιστο ύψος του πάνω άκρου της πινακίδας από την επιφάνεια κυκλοφορίας ορίζεται σε 2,50 μ.

Εικόνα 56 - Φάσεις του έργου και σήμανση

Κατά την περάτωση του έργου εφαρμόστηκαν μέτρα εργοταξιακής σήμανσης και ασφάλειας. Ειδικότερα, κατά την υλοποίηση του έργου εφαρμόστηκαν προσωρινά μέτρα κυκλοφοριακή ρύθμισης με σκοπό την ασφάλεια τόσο των πεζών όσο και των διερχόμενων οχημάτων. Επιπλέον, διασφαλίστηκαν μέτρα για την ασφάλεια του προσωπικού. Πιο συγκεκριμένα:

- Υποχρεωτική χρήση μέσων για την ατομική προστασία κατά τη διάρκεια υλοποίησης των εργασιών.
- Χρήση κρανών για την προστασία της κεφαλής.
- Χρήση γαντιών για προστασία από μηχανικούς κινδύνους.
- Χρήση προστατευτικής ενδυμασίας.
- Χρήση προστατευτικών υποδημάτων.
- Απομάκρυνση επικίνδυνων υλικών από την περιοχή εργασιών.

## 5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ανωτέρω ανάλυση, πραγματεύεται η χρήση των οπτικών ινών, οι οποίες συνιστούν ένα πρόσφατο πεδίο που έχει προσελκύσει σε μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον των ερευνητών σε όλο τον κόσμο. Πρόκειται για ένα σημαντικό επίτευγμα στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών, του διαδικτύου και της ιατρικής. Είναι αξιοσημείωτο, πως οι οπτικές ίνες είναι ένα από τα σημαντικά επιστημονικά επιτεύγματα κατά τον περασμένο αιώνα.

Συγκρίνοντας τις οπτικές ίνες με τα συμβατικά καλώδια, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ασφάλεια, είναι ελαφρύτερα και πιο οικονομικά. Επίσης, χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές ιατρικής αλλά και σε έργα υποδομής.

Οι οπτικές ίνες αξιοποιούνται και στον τομέα των πολιτικών μηχανικών σε διάφορα έργα υποδομής όπως είναι οι γέφυρες και οι αυτοκινητόδρομοι. Για την εγκατάστασή τους λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες του τόπου, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας. Με τους αισθητήρες οπτικών ινών είναι δυνατό να εντοπιστούν διάφορα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν, όπως είναι οι ρωγμές.

Στο πλαίσιο της παραπάνω ανάλυσης διαπιστώθηκε, πως μια από τις εφαρμογές των οπτικών ινών αφορά τη μέτρηση κατανομής παραμόρφωσης που είναι υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης. Ειδικότερα, πρόκειται για την ανίχνευση παραμόρφωσης, αξιοποιώντας δεδομένα κατανομής παραμόρφωσης, τα οποία εν συνεχεία μετατρέπονται σε τιμές μετατόπισης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη σύνδεση πολλών οπτικών ινών σε ένα αντικείμενο τα οποίο έχει τη μορφή ράβδου. Σχετικά με τη μετατόπιση υπολογίζεται βάσει της μετρούμενης τάσης κάμψης.

Παρουσιάζονται πλεονεκτήματα των κατανεμημένων μετρήσεων συγκριτικά με τη συμβατική διακριτή μέτρηση των υπόγειων μετατοπίσεων, όπως παραδείγματος χάριν τα κλισόμετρα και καθιστούν δυνατή την δημιουργία και χρήση μιας συσκευής μέτρησης υπογείων μετατοπίσεων που παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια και συνεχή. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι πως σε αντίθεση με σημειακές μετρήσεις, στην περίπτωση των οπτικών ινών το κόστος δεν διαμορφώνεται από τον αριθμό των σημείων μέτρησης.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται και η περίπτωση εγκατάστασης οπτικών ινών για το Δημαρχείο Κορδελιού – Ευόσμου που βρίσκεται στην πλατεία του Ευόσμου στη Θεσσαλονίκη. Το έργο έχει ανατεθεί στην εταιρεία Forthnet και περιλαμβάνει έργα σε διάφορους δρόμους της περιοχής με διάνοιξη χανδάκων και τοποθέτηση σωληνώσεων αλλά και καλωδίων οπτικών ινών.

Στο πλαίσιο υλοποίησης του εν λόγω έργου εφαρμόστηκαν διάφορα μέτρα διευκόλυνσης και ασφάλειας των χρηστών του οδικού δικτύου και των πεζοδρομίων, όπως επίσης και μέτρα ασφαλείας για το προσωπικό, ώστε να αποφευχθούν εργατικά ατυχήματα κατά τη διάρκεια υλοποίησης του έργου.

Οι οπτικές είναι μια τεχνολογία που έφερε επανάσταση σε διάφορους τομείς λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με χάλκινα καλώδια. Σε ότι αφορά στον κλάδο των πολιτικών μηχανικών φέρει αρκετά πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να εντοπίσει ζημιές όταν βρίσκονται σε αρχικό σημείο, ώστε να αποφευχθούν σημαντικά προβλήματα.

Στο μέλλον θα μπορούσαν να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες, ώστε να διερευνηθούν οι απόψεις, οι στάσεις και οι αντιλήψεις των πολιτικών μηχανικών για τις οπτικές ίνες και τη χρήση τους σε αυτό τον τομέα.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alferness R.C., (1986). Optical guided-wave devices. *Science New Series*, 234(4778): 825-829.
- Buchoud, E., Henault J.M., D'Urso G., Girard A., Blairon S., Mars J., Vrabie V., (2012). Development of an automatic algorithm to analyze the cracks evolution in a reinforced concrete structure from strain measurements performed by an Optical Backscatter Reflectometer. In *Proceedings of the 4th Workshop on Civil Structural Health Monitoring*, Berlin, Germany.
- Das A., Swain N., Panigraha M., (2016). Optical Fibre and its use in Communication Systems. *Int. J. Chem. Pharm. Rev. Res.*, 1(1): 6-12.
- Deif A., Martín-Pérez B., Cousin B., Zhang C., Bao X., Li W., (2010). Detection of cracks in a reinforced concrete beam using distributed Brillouin fibre sensors. *Smart Mater. Struct.*, 19: 055014.
- Fairoz Q., Subhi R.M., Hivi I., Mohammed M.A., Zryan N., Dathar A., Karzan H., (2021). A survey of optical fiber communications: challenges and processing time influences. *Asian J. Res. Comput. Sci.*, 7(4): 48-58.
- Fuhr PL., Huston D.R., MacCraith B., (1998). Embedded fiber optic sensors for bridge deck chloride penetration measurement. *Opt Eng*, 37(4):1221–1228.
- Ghazi A., Aljunid A.S., Idrus S., (2021). Hybrid Dy-NFIS & RLS equalization for ZCC code in optical-CDMA over multi-mode optical fiber. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 9(1): 253-276.
- Glisic B., Inaudi D., (2012). Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors. *Struct. Health Monit.*, 11: 161–171.
- Gopal V., Annamdas M., (2011). Review on Developments in Fiber Optical Sensors and Applications. *International Journal of Materials Engineering*, 1(1): 1-16.
- Gifford D.K., Kreger S.T., Sang A.K., Froggatt M.E., Duncan R.G., Wolfe M.S., Soller B.J., (2007). Swept-wavelength interferometric interrogation of fiber Rayleigh scatter for distributed sensing applications. *Proc. SPIE*: 6770.



Guo Y., Meiwei K., Mohammed Sohailh M., Omar A., Tien K., (2022). Compact scintillating-fiber/450-nm-laser transceiver for full-duplex underwater wireless optical communication system under turbulence. *Opt. Express*, 30 (1): 53-69.

Hao L., Huali W., (2022). AI-driven efficient and reliable routing mechanism for optical fiber communication and wireless sensor networks. *Internet Technol. Lett.*: e345.

Henault J.M., Quiertant M., Delepine-Lesoille S., Salin J., Moreau G., Taillade F., Benzarti K., (2012). Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system. *Constr. Build. Mater.*, 37: 916–923.

Hoult N.A., Ekim O., Regier R., (2014). Damage/deterioration detection for steel structures using distributed fiber optic strain sensors. *J. Eng. Mech.*, 140: 04014097.

Huang M., Zhou Z., Huang Y., Ou J., (2013). A distributed self-sensing FRP anchor rod with built-in optical fiber sensor. *Meas Phys Educ Exerc Sci* 46(4):1363–1370.

Johnson M., (2009). *Optical Fibers, Cables and Systems*. International Telecommunication Union-T Manual.

Kateeb I., Peluso M.S., Bikdash M., Chopade P., (2012). Reliability and effectiveness of cable types used in technical telecommunications systems. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/241630301\\_Reliability\\_and\\_effectiveness\\_of\\_cable\\_types\\_used\\_in\\_technical\\_telecommunications\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/241630301_Reliability_and_effectiveness_of_cable_types_used_in_technical_telecommunications_systems)

Kaur S., Singh P., Tripathi V., Kaur, R., (2022). Recent trends in wireless and optical fiber communication. *Global Transitions Proceedings*, 3(1): 343-348. <https://doi.org/10.1016/j.gltip.2022.03.022>

Kishida K., Yamauchi Y., Guzik A., (2013). Study of Optical Fibers Strain-Temperature Sensitivities Using Hybrid Brillouin-Rayleigh System. *Photonic Sens.*, 4: 1–11

Kishida K., Imai M., Kawabata J., Guzik A., (2022). Distributed Optical Fiber Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures. *Sensors*, 22(12): 4368

Kogure., T., Okuda Y., (2018). Monitoring the vertical distribution of rainfall-induced strain changes in a landslide measured by distributed fiber optic sensing (DFOS) with Rayleigh backscattering. *Geophys. Res. Lett.*, 45: 4033–4040.

Koyamada Y., Imahama M., Kubota K., Hogari K., (2009). Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long-range using coherent OTDR. *J. Lightwave Technol.*, 27: 1142–1146.

Le T.N., Wang W.J., Wang C.C., Nguyen N.T., (2019). Automatic defect inspection for coated eyeglass based on symmetrized energy analysis of color channels. *Symmetry*, 11(12): 1518.

Leal-Junior A.G., Diaz C.A.R., Avellar L.M., Pontes M.J., Marques C., Frizzera A., (2019). Polymer Optical Fiber Sensors in Healthcare Applications: A Comprehensive Review. *Sensors*, 19(14): 3156.

Leung C., Wan T.K., Inaudi D., Bao X., (2013). Review: Optical fiber sensors for civil engineering applications. *Materials and Structures*, 48(4).

Li H., Ou J., Zhao X., Zhou W., Li H., Zhou Z., Yang Y., (2006). Structural health monitoring system for the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge. *Computer-Aided Civ Infrastruct Eng.*, 21(4):306–317.

Li D., Zhou Z., Ou J., (2011). Development and sensing properties study of FRP-FBG smart stay cable for bridge health monitoring applications. *Meas Phys Educ Exerc Sci.*, 44(4):722–729.

Matthys S., Taerwe L., (2003). Testing of post-tensioned concrete girders in the framework of monitoring with fibre optic sensors. In: *Structural health monitoring and intelligent infrastructure—proceedings of the 1st international conference on structural health monitoring and intelligent infrastructure*, 1: 321–328.

Mayoral P.C., Gutiérrez G.J., Pérez C.L.J., Treviño V.M., Velasco G.B.I., Cruz H.A.P., Rosas T.R., Carrillo T.L., Ríos A.J., Apreza L.E., Laguna R.R., (2021). Fiber Optic Sensors for Vital Signs Monitoring. A Review of Its Practicality in the Health Field . *Biosensors*, 11(2): 58.

Méndez A., Morse T.F., (2007). *Specialty Optical Fibers Handbook*. Elsevier Inc., London, U.K.

Navaneetha C.M., Rishabh C., Batyr B., Hochschule B., Aditya G., (2015). Report on Fiber Optic Cables. *Fiber Optic Communication*: 1-31.

Nguyen N.T., Liu B.H., Wang S.Y., (2019). On new approaches of maximum weighted target coverage and sensor connectivity: Hardness and approximation. *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, 7(3): 1736-1751.

Onu F., Ikporo S.C., (2016). Comparative Study of Optic Fibre and Wireless Technologies in Internet Connectivity. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 5(6): 403 – 411.

Quiertant M., Baby F., Khadour A. Marchand P., Rivillon P., Billo J., Lapeyrere R., Toutlemonde F., Simon A., Cordier J. (2012). Deformation monitoring of reinforcement bars with a distributed fiber optic sensor for the SHM of reinforced concrete structures. *NDE 2012*: 1–10.

Rahmanda A., Tarsa A., Situmorang D.E., Sitompul D., (2021). A Literature Study of Optical Fibre Based-Telecommunication Backbone. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/357339447\\_A\\_Literature\\_Study\\_of\\_Optical\\_Fibre\\_Based-Telecommunication\\_Backbone](https://www.researchgate.net/publication/357339447_A_Literature_Study_of_Optical_Fibre_Based-Telecommunication_Backbone)

Rezgui H., (2021). An Overview of Optical Fibers. *Global Journal of Science Frontier Research*, 21(6): 1-8.

Rodríguez G., Casas J.R., Villaba S. (2015). Cracking assessment in concrete structures by distributed optical fiber. *Smart Mater. Struct.*, 24: 035005

Shi B., Sui H., Liu J., Zhang D., (2006). The BOTDR-based distributed monitoring system for slope engineering. In *Proceedings of the 10th IAEG International Congress*, Nottingham, UK, pp. 1–5.

Singh A., (2021). Optical fiber communication versus wireless communication. *Wireless Commun.*, 4(4): 547-552.

Solihah N., Nashiruddin I.M., (2020). Development of XGS-PON Optical Line Termination Equipment Standardization for Broadband Fiber Access Networks in Indonesia. 2020 12th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). IEEE.

Teja N.R., Babu M.A., Prasad T.R.S., Ravi T., (2012). Different types of dispersions in an optical fiber. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(12): 1-5.

Thyagarajan K., Ghatak A., (2007). *Fiber Optic Essentials*. Wiley, New Jersey, U.S.A.

Tokhy E., Mohamed S., Elsayed A., Kasban H., (2022). Performance Improvement of OFDMA Systems Through Wireless Communication Channels. *Wireless Pers. Commun.*: 1-27.

Tong X.C., (2014). *Advanced Materials for Integrated Optical Waveguides*. Springer International Publishing, Switzerland.

Trasatti L., (1989). Optical fibers and their applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A279: 354-358

Villalba S., Casas J.R., (2013). Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures. Mech. Syst. Signal Process., 39: 441–451

Yeh C., (1990). Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications. Academic Press, Inc., London.

Zeng X., Bao X., Chhoa C.Y., Bremner T.W., Brown A.W., DeMerchant M.D., Ferrier G., Kalamkarov A.L., Georgiades A.V., (2002). Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars. Appl. Opt., 41: 5105–5114.

Zhu H.H., Shi B., Zhang J., Yan J.F., Zhang C.C., (2014). Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under surcharge loading. J. Mt. Sci., 11: 979–989.

Zhang Y., Lei X., Hashimoto T., Xue Z., (2020). In situ hydromechanical responses during well drilling recorded by fiber-optic distributed strain sensing. Solid Earth, 11: 2487–2497.

Zhang Y., Xue Z., (2019). Deformation-Based monitoring of water migration in rocks using distributed fiber optic strain sensing: A laboratory study. Water Resour. Res., 55: 8368–8383.

Zoireff G., Costanzo L., Caso P., Bulus R., Vidal B., (2022). Transparent multichannel wireless bridge for optical fiber links based on a two-stage upconversion. Opt. Commun., 506: 127585.