



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΓΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΕΞΥΠΝΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΚΑΙ ΙΑΤΡΙΚΗ**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΑΟΥΣΗΣ

Επιβλέπων: Ανδρέας Τσορμπατζόγλου

Επίκουρος Καθηγητής, ΔΕΠ

Άρτα, Σεπτέμβριος, 2025

**OPTICAL FIBERS FOR SENSORS – TECHNOLOGIES AND
APPLICATIONS IN SMART INFRASTRUCTURE AND MEDICINE**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Τόπος, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Ανδρέας Τσορμπατζόγλου

2. Μέλος επιτροπής

Όνομα Επίθετο,

3. Μέλος επιτροπής

Όνομα Επίθετο,

© Επίθετο, Όνομα, έτος.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

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

Επίθετο, Όνομα

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Είναι σημαντική η αναγνώριση της βοήθειας που έλαβε ο φοιτητής/ η φοιτήτρια κατά τη διάρκεια της προπαρασκευής της εργασίας του. Η βοήθεια μπορεί να είναι ακαδημαϊκή, τεχνική, γραμματειακή, διοικητική και προσωπική (π.χ. οικογένεια). Δεν υπερβαίνει τη μία παράγραφο.

[Διαγράψτε αυτή τη σελίδα αν δεν τη χρειάζεστε.]

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι οπτικές ίνες δεν χρησιμοποιούνται μόνο για τη μετάδοση δεδομένων, αλλά και ως αισθητήρες για θερμοκρασία, τάση, πίεση και βιοϊατρικές εφαρμογές. Η εργασία εξετάζει τις αρχές λειτουργίας, τις τεχνολογίες Fiber Bragg Gratings (FBG) και Distributed Acoustic Sensing (DAS), καθώς και τις σύγχρονες εφαρμογές τους στις έξυπνες πόλεις, γεωδυναμική παρακολούθηση και διάγνωση ασθενειών. Ειδικότερα στο κεφάλαιο 1 θα κάνουμε μια εισαγωγή και μια αναφορά των αισθητήρων οπτικών ινών στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στο θεωρητικό πλαίσιο και συγκεκριμένα στις βασικές αρχές των οπτικών ινών. Στο κεφάλαιο 3 θα αναλύσουμε κάποιες εφαρμογές στις έξυπνες υποδομές και στη συνέχεια στην Ιατρική και την Βιοιατρική. Τέλος κάνουμε μια συγκριτική ανάλυση και αναφέρουμε τις μελλοντικές προοπτικές έως ότου καταλήξουμε στα τελικά συμπεράσματα.

Λέξεις-κλειδιά: FBG, DAS, αισθητήρες οπτικών ινών, παρακολούθηση της δομικής υγείας, βιοϊατρική ανίχνευση

ABSTRACT

Optical fibers are not only used for data transmission, but also as sensors for temperature, voltage, pressure and biomedical applications. The paper examines the operating principles, the Fiber Bragg Gratings (FBG) and Distributed Acoustic Sensing (DAS) technologies, as well as their modern applications in smart cities, geodynamic monitoring and disease diagnosis. In chapter 1 we will make an introduction and a report of fiber optic sensors in modern technological applications. Then we will refer to the theoretical framework and specifically the basic principles of optical fibers. In chapter 3 we will analyze some applications in smart infrastructures and then in Medicine and Biomedicine. Finally, we make a comparative analysis and report on prospects until we reach the final conclusions.

Keywords: FBG, DAS, optical fiber sensors, structural health monitoring, biomedical sensing

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ	11
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Αντικείμενο και σκοπός εργασίας.....	12
1.2 Η σημασία των αισθητήρων οπτικών ινών στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές	14
1.3 Μεθοδολογία και δομή της εργασίας	16
2 Θεωρητικό πλαίσιο	19
2.1 Βασικές αρχές οπτικών ινών	19
2.2 Οπτικές Ίνες ως Αισθητήρες	25
3 Εφαρμογές σε έξυπνες υποδομές	33
3.1 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας.....	33
3.2 Αισθητήρες οπτικών ινών σε γέφυρες, σήραγγες και κτίρια.....	34
3.3 Εφαρμογές σε αγωγούς ύδρευσης και πετρελαίου/αερίου	38
3.4 Ρόλος των αισθητήρων στην πρόληψη βλαβών και συντήρηση υποδομών	40
3.5 Παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων με αισθητήρες οπτικών ινών	41
4 Εφαρμογές στην Ιατρική και Βιοιατρική	43
4.1 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών στην ενδοσκόπηση	43
4.2 Βιοαισθητήρες για ανίχνευση χημικών και βιολογικών ουσιών	44
4.3 Παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών (θερμοκρασία, πίεση, οξυγόνωση).....	46
4.4 Χρήση σε μη επεμβατικές και ελάχιστα επεμβατικές διαγνωστικές μεθόδους	48
4.5 Μελλοντικές εξελίξεις στην ιατρική τεχνολογία με αισθητήρες οπτικών ινών	50
5 Συγκριτική Ανάλυση και Μελλοντικές Προοπτικές	53
5.1 Σύγκριση αισθητήρων οπτικών ινών με παραδοσιακές τεχνολογίες	53
5.2 Προκλήσεις και περιορισμοί στην υιοθέτηση της τεχνολογίας	54
5.3 Μελλοντικές τάσεις και εξελίξεις στον τομέα των αισθητήρων οπτικών ινών	55
6 Συμπεράσματα.....	57

6.1	Συνοπτική ανασκόπηση των ευρημάτων.....	57
6.2	Η σημασία της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών για το μέλλον.....	58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Αισθητήρας οπτικών ινών	14
Εικόνα 2-1: Δομή οπτικής ίνας	19
Εικόνα 2-2: Κατηγορίες οπτικής ίνας.....	20
Εικόνα 2-3: Μονότροπη οπτική ίνα [24].....	21
Εικόνα 2-4: Πολύτροπη οπτική ίνα [24]	22
Εικόνα 2-5: Βασικές αρχές λειτουργίας αισθητήρα	26
Εικόνα 2-6: Κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών.....	29
Εικόνα 2-7: Ενεργοί Αισθητήρες	30
Εικόνα 2-8: Παθητικοί αισθητήρες	31
Εικόνα 3-1: Γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη[22]	36
Εικόνα 3-2: Συγκρότημα κτιρίων Σιγκαπούρη με εγκατεστημένο σύστημα SHM [22]	38
Εικόνα 3-3: Σύστημα υπέρυθρης έρευνας και παρακολούθησης [25]	42
Εικόνα 4-1: Καρκίνος παχέος εντέρου [29]	43
Εικόνα 4-2: Ενδοσκόπιο εντέρου [30]	44

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και σκοπός εργασίας

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας από την βιομηχανική επανάσταση και μετέπειτα είναι ραγδαία. Μάλιστα, ο ρυθμός ανάπτυξής της, με το πέρασμα των ετών, είναι ακόμη πιο μεγάλος. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνολογία έχει έρθει να εξυπηρετήσει καθώς επίσης και να καλύψει όσο γίνεται περισσότερες καινούριες προκύπτουσες απαιτήσεις των ανθρώπων, συμβάλλοντας στην ανοδική τάση του βιοτικού τους επιπέδου.

Μια από τις πιο καθοριστικές απαιτήσεις τους ήταν εκείνη της επικοινωνίας. Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, επομένως, προσέφερε τη δυνατότητα για ανάπτυξη δικτύων τηλεπικοινωνίας που διασυνδέουν και τα πιο απομακρυσμένα μέρη της γης, προσφέροντας την ευχέρεια της επικοινωνίας των ανθρώπων μεταξύ τους, δίχως να υφίστανται γεωγραφικά ή άλλα όρια. Κατόρθωσε, επομένως, με την ανάπτυξη ενός δικτύου μεταφοράς πληροφοριών να διασυνδέσει όλους τους ανθρώπους.

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, όμως, επέφερε και την ανάπτυξη του διαδικτύου. Στη σημερινή εποχή στο συγκεκριμένο μέσο οι άνθρωποι έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν κάθε μορφή πληροφοριών, δίχως να υπάρχει περιορισμός στην συνομιλία τους. Με αυτόν τον τρόπο στην σημερινή εποχή τα δίκτυα αυτής της μορφής έχουν μετατραπεί σε δίκτυα μεταφοράς πληροφοριών και όχι σε δίκτυα μεταφοράς ήχου.

Οι πληροφορίες, όμως, έχουν αρκετά πιο μεγάλο όγκο. Για αυτό το λόγο στη σύγχρονη εποχή οι ανάγκες από τα εν λόγω δίκτυα είναι πλέον αρκετά πιο μεγάλες. Όσο περισσότερο περνάνε τα χρόνια, οι πληροφορίες αυτής της μορφής θα έχουν ολοένα και πιο μεγάλο όγκο και ως επί το πλείστον λόγω της αισθητής ανοδικής τάσης των χρηστών του διαδικτύου.

Η παραπάνω εποχή έχει αναπτύξει την απαίτηση για ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη των παραπάνω δικτύων. Η ικανότητα μεταφοράς τεράστιου όγκου πληροφοριών έγινε ζωτικής σημασίας. Παράλληλα, η αισθητή ανοδική τάση του όγκου των πληροφοριών είχε ανάγκη από ένα δίκτυο με πιο μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς, με απώτερο σκοπό να είναι δυνατή σε λογικό χρονικό πλαίσιο. [1]

Οι οπτικές ίνες αποτελούν μία από τις πιο καινοτόμες τεχνολογίες στον τομέα των αισθητήρων, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια, αντοχή και αξιοπιστία στη μετάδοση

δεδομένων. Η χρήση τους σε αισθητήρες έχει επεκταθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, καθιστώντας τις βασικό εργαλείο σε πολλούς τομείς, όπως οι έξυπνες υποδομές και η ιατρική.

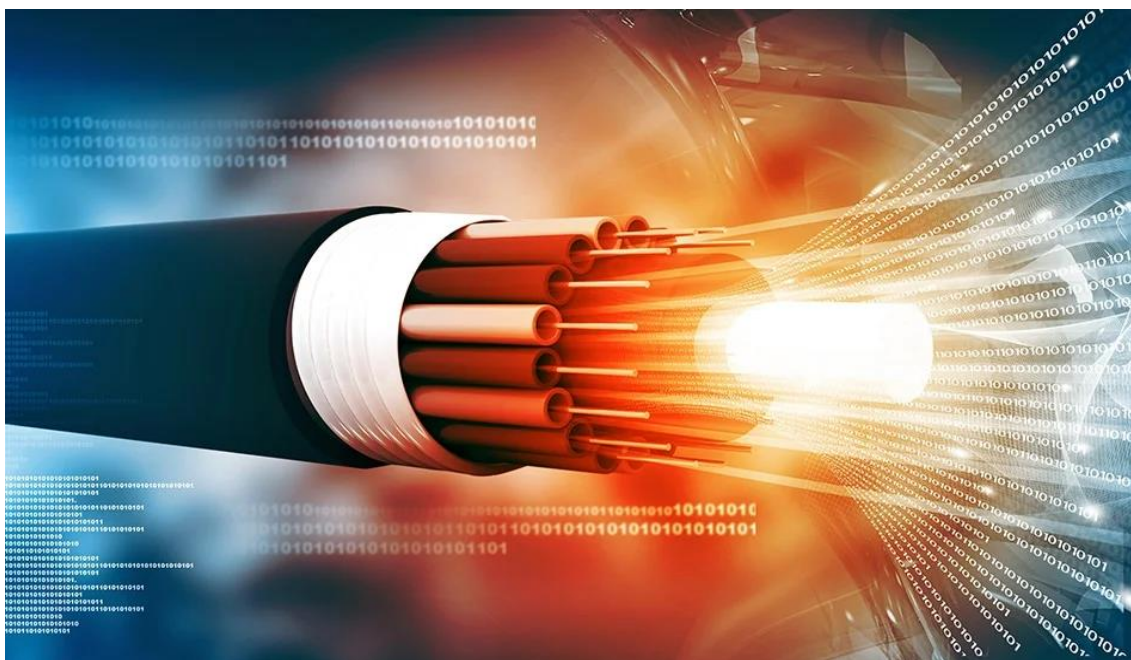
Στον τομέα των έξυπνων υποδομών, οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση κατασκευών, όπως γέφυρες, σήραγγες και κτίρια, παρέχοντας πληροφορίες για την αντοχή και τη σταθερότητά τους. Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να ανιχνεύσουν αλλαγές στη θερμοκρασία, την πίεση, τη δόνηση και την παραμόρφωση, συμβάλλοντας στην πρόληψη καταστροφικών βλαβών και στη βελτίωση της ασφάλειας.

Στην ιατρική, οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η ενδοσκόπηση, η απεικόνιση και η παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών. Η ευελιξία και η μικρή διάμετρος των οπτικών ινών επιτρέπουν την εισαγωγή τους στο ανθρώπινο σώμα για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την ασφάλεια των ιατρικών διαδικασιών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των τεχνολογιών οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται για αισθητήρες, καθώς και η παρουσίαση των κύριων εφαρμογών τους στις έξυπνες υποδομές και την ιατρική. Θα εξεταστούν οι βασικές αρχές λειτουργίας, οι τύποι των αισθητήρων οπτικών ινών και τα πλεονεκτήματά τους σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων.

1.2 Η σημασία των αισθητήρων οπτικών ινών στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές

Οι αισθητήρες οπτικών ινών (fiber optic sensors) αποτελούν μία από τις πιο καινοτόμες και ραγδαία αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στον τομέα της ανίχνευσης φυσικών και χημικών μεγεθών. Διαδραματίζουν έναν ολοένα και πιο κρίσιμο ρόλο στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές, λόγω της υψηλής ευαισθησίας, της ακρίβειας και της αντοχής τους σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες. Βασίζονται στη δυνατότητα των οπτικών ινών να μεταφέρουν φωτεινά σήματα, τα οποία μεταβάλλονται με βάση τις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον τους. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια, παρέχοντας πληροφορίες για παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η παραμόρφωση, οι δονήσεις, ακόμα και η παρουσία συγκεκριμένων χημικών ουσιών.



Εικόνα 1-1: Αισθητήρας οπτικών ινών

Η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών παρουσιάζει πλήθος πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών αισθητήρων:

- ✓ Ηλεκτρομαγνητική αδιαφορία: Οι αισθητήρες δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθιστώντας τους ιδανικούς για χρήση σε περιβάλλοντα υψηλής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

- ✓ Μικρό βάρος και διαστάσεις: Η ελάχιστη διάμετρος των οπτικών ινών επιτρέπει την εγκατάστασή τους σε δυσπρόσιτα σημεία ή σε ενσωματωμένα συστήματα.
- ✓ Αντοχή σε αντίξοες συνθήκες: Είναι κατάλληλοι για λειτουργία σε περιβάλλοντα με ακραίες θερμοκρασίες, υψηλές πιέσεις ή διαβρωτικές ουσίες.
- ✓ Αξιοπιστία και ευαισθησία: Παρέχουν εξαιρετική ακρίβεια και σταθερότητα στις μετρήσεις, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο.

Με τη συνεχή πρόοδο στην τεχνολογία των οπτικών ινών και της νανοτεχνολογίας, οι αισθητήρες οπτικών ινών γίνονται όλο και πιο ευέλικτοι, αποδοτικοί και οικονομικά προσιτοί. Οι μελλοντικές εφαρμογές αναμένεται να επεκταθούν σε πεδία όπως τα έξυπνα δίκτυα ενέργειας (smart grids), η ρομποτική, και η τεχνητή νοημοσύνη, όπου απαιτείται συνεχής και αξιόπιστη συλλογή δεδομένων. Κάποιοι από τους τομείς όπου η χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών φαίνεται να γίνεται όλο και πιο απαραίτητη δίνονται παρακάτω:

- Βιομηχανικές και Δομικές Εφαρμογές

Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της υγείας κρίσιμων υποδομών, όπως γέφυρες, φράγματα, σήραγγες και κτίρια. Μέσω αυτών, είναι δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων, τάσεων, δονήσεων και αλλαγών στη θερμοκρασία, συμβάλλοντας στην πρόληψη αστοχιών και στη διασφάλιση της ασφάλειας των κατασκευών.

- Ιατρικές Εφαρμογές

Στον ιατρικό τομέα, οι αισθητήρες οπτικών ινών επιτρέπουν την ανάπτυξη καινοτόμων διαγνωστικών και θεραπευτικών εργαλείων, όπως ενδοσκοπικές κάμερες, οπτικά συστήματα απεικόνισης και βιοϊατρικοί αισθητήρες. Όλες αυτές οι εφαρμογές προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και ελάχιστα επεμβατικές διαδικασίες, βελτιώνοντας την ποιότητα της ιατρικής φροντίδας.

- Αεροδιαστημικές και Αμυντικές Τεχνολογίες

Όσον αφορά την αεροδιαστημική και την αμυντική βιομηχανία αυτές βασίζονται σε αισθητήρες οπτικών ινών για την ανίχνευση τάσεων και κραδασμών σε αεροσκάφη, δορυφόρους καθώς και σε στρατιωτικό εξοπλισμό. Λόγω της ανθεκτικότητας των οπτικών ινών σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, αποτελούν ιδανική επιλογή για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και ασφάλειας.

- ο Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα

Τέλος οι αισθητήρες οπτικών ινών παίζουν και αυτές σημαντικό ρόλο στη βελτίωση των δικτύων επικοινωνίας, παρέχοντας αξιόπιστη παρακολούθηση της ποιότητας των οπτικών σημάτων και συμβάλλοντας στην αποτροπή απωλειών δεδομένων και βλαβών στα δίκτυα υψηλής ταχύτητας.

Ουσιαστικά η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας των οπτικών ινών οδηγεί στη διεύρυνση των εφαρμογών τους, καθιστώντας τους αισθητήρες αυτού του τύπου απαραίτητους σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και βιομηχανικών κλάδων.

1.3 Μεθοδολογία και δομή της εργασίας

Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε βιβλιογραφική έρευνα και ανάλυση σύγχρονων επιστημονικών άρθρων, μελετών και τεχνικών εκθέσεων σχετικά με τη χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών. Η μεθοδολογία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1) Συλλογή Πηγών

- Αναζήτηση βιβλιογραφίας από επιστημονικά περιοδικά, συνέδρια, βιβλία και έγκυρες ηλεκτρονικές πηγές.
- Επιλογή πρόσφατων ερευνών και τεχνολογικών εξελίξεων που σχετίζονται με τις εφαρμογές των αισθητήρων οπτικών ινών.

2) Ανάλυση και Κατηγοριοποίηση των Δεδομένων

- Δομή των πληροφοριών ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής (έξυπνες υποδομές, ιατρική, τηλεπικοινωνίες κ.λπ.).
- Σύγκριση των τεχνολογικών λύσεων και αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους.

3) Σύνθεση Συμπερασμάτων

- Παρουσίαση των κυριότερων ευρημάτων.
- Συζήτηση για τις προοπτικές και μελλοντικές εξελίξεις των αισθητήρων οπτικών ινών.

Δομή της εργασίας

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

1.2 Η σημασία των αισθητήρων οπτικών ινών στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές

1.3 Μεθοδολογία και δομή της εργασίας

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο

2.1 Βασικές Αρχές Οπτικών Ινών

Φυσικές αρχές μετάδοσης του φωτός μέσω οπτικών ινών

Κατηγορίες οπτικών ινών (μονότροπες, πολύτροπες)

Πλεονεκτήματα οπτικών ινών σε σύγκριση με άλλα μέσα μετάδοσης

2.2 Οπτικές Ίνες ως Αισθητήρες

Αρχές λειτουργίας αισθητήρων οπτικών ινών

Κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών:

Ενεργοί και παθητικοί αισθητήρες

Τοπικοί και διανεμημένοι αισθητήρες

Συμβολικοί αισθητήρες (Interferometric Sensors)

Αισθητήρες πλέγματος Bragg (FBG Sensors)

Πλεονεκτήματα αισθητήρων οπτικών ινών (ευαισθησία, αξιοπιστία, ανθεκτικότητα)

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές σε Έξυπνες Υποδομές

- 3.1 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας
- 3.2 Αισθητήρες οπτικών ινών σε γέφυρες, σήραγγες και κτίρια
- 3.3 Εφαρμογές σε αγωγούς ύδρευσης και πετρελαίου/αερίου
- 3.4 Ρόλος των αισθητήρων στην πρόληψη βλαβών και συντήρηση υποδομών
- 3.5 Παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων με αισθητήρες οπτικών ινών

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές στην Ιατρική και Βιοϊατρική

- 4.1 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών στην ενδοσκόπηση
- 4.2 Βιοαισθητήρες για ανίχνευση χημικών και βιολογικών ουσιών
- 4.3 Παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών (θερμοκρασία, πίεση, οξυγόνωση)
- 4.4 Χρήση σε μη επεμβατικές και ελάχιστα επεμβατικές διαγνωστικές μεθόδους
- 4.5 Μελλοντικές εξελίξεις στην ιατρική τεχνολογία με αισθητήρες οπτικών ινών

Κεφάλαιο 5: Συγκριτική Ανάλυση και Μελλοντικές Προοπτικές

- 5.1 Σύγκριση αισθητήρων οπτικών ινών με παραδοσιακές τεχνολογίες
- 5.2 Προκλήσεις και περιορισμοί στην υιοθέτηση της τεχνολογίας
- 5.3 Μελλοντικές τάσεις και εξελίξεις στον τομέα των αισθητήρων οπτικών ινών
- 5.4 Δυνητικές νέες εφαρμογές σε βιομηχανία, ιατρική και περιβαλλοντική παρακολούθηση

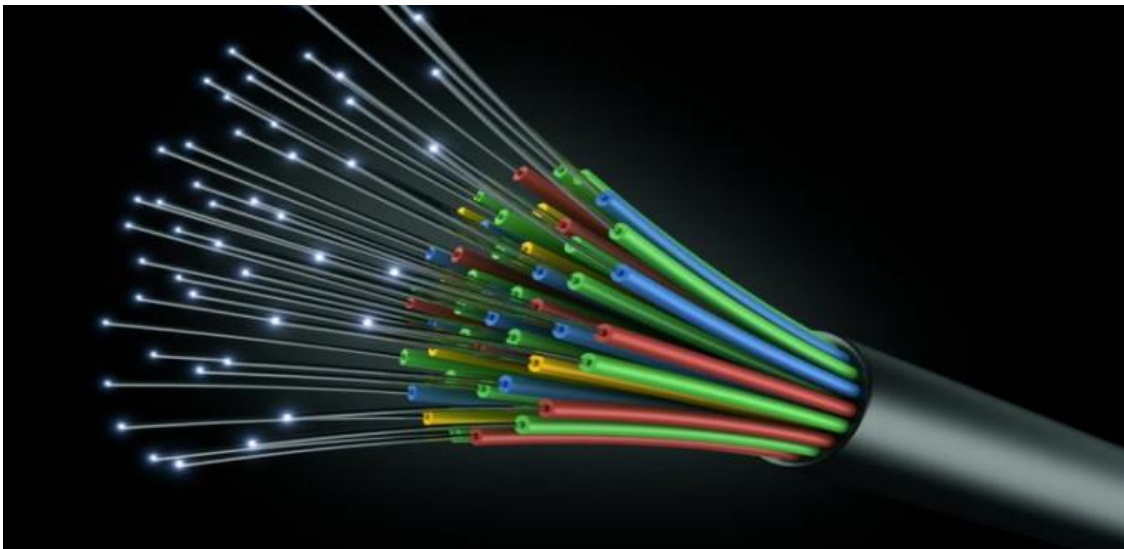
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

- 6.1 Συνοπτική ανασκόπηση των ευρημάτων
- 6.2 Η σημασία της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών για το μέλλον

2 Θεωρητικό πλαίσιο

2.1 Βασικές αρχές οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες αποτελούν μέσο μετάδοσης φωτεινών σημάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες, στη βιοϊατρική και σε αισθητήρες. Η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται με τη χρήση του φωτός που οδεύει μέσω ενός μέσου μετάδοσης, συνήθως γυαλί, και εντοπίζεται στο τέρμα από έναν ανιχνευτή. Βασίζονται σε φυσικές αρχές που επιτρέπουν τη μεταφορά φωτός σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες.



Εικόνα 2-1: Δομή οπτικής ίνας

1. Δομή Οπτικής Ίνας

Η οπτική ίνα αποτελείται από το γυάλινο πυρήνα (core), την επένδυση του γυαλιού (cladding), και το εξωτερικό συνήθως πλαστικό κάλυμμα. Η οπτική ίνα αποτελείται από τρία βασικά στρώματα:

- **Πυρήνας (core):** Το εσωτερικό μέρος της ίνας, κατασκευασμένο από καθαρό γυαλί ή πλαστικό, μέσω του οποίου μεταδίδεται το φως.
- **Επένδυση (cladding):** Περιβάλλει τον πυρήνα και έχει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης, ώστε να διατηρείται το φως εντός του πυρήνα μέσω ολικής εσωτερικής ανάκλασης.
- **Εξωτερική επένδυση (coating):** Προστατευτικό στρώμα που παρέχει μηχανική αντοχή και προστασία από υγρασία ή ζημιές.

2. Φυσικές Αρχές Μετάδοσης Φωτός

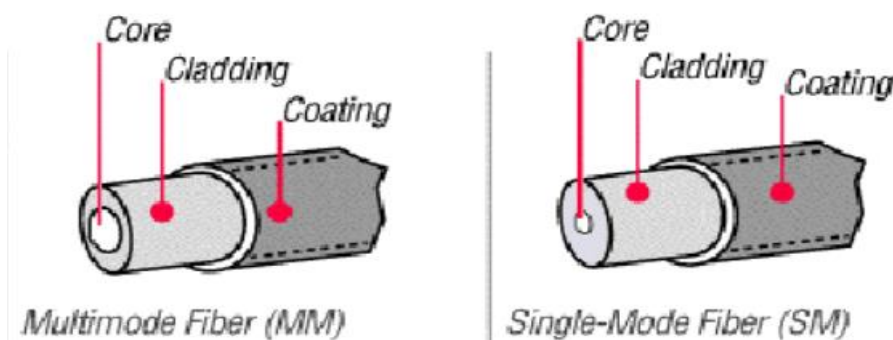
Η μετάδοση του φωτός στην οπτική ίνα βασίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης (total internal reflection). Μόλις το φως εισέρχεται στην οπτική ίνα με κάποια γωνία, ταξιδεύει σε ένα μονοπάτι που αποκαλείται τρόπος (mode). Ανάλογα με τον τύπο της ίνας δύναται να υπάρχουν από έναν μέχρι εκατοντάδες τρόπους, καθώς το πλήθος των τρόπων σε μια ίνα είναι συνάρτηση της διαμέτρου του πυρήνα και του μήκους κύματος. Κάθε τρόπος φέρει ένα ποσοστό φωτός από το σήμα που εισέρχεται. Όταν το φως εισέρχεται υπό γωνία μεγαλύτερη από τη γωνία κρίσης, αντανακλάται πλήρως εντός του πυρήνα, χωρίς να διαφεύγει.[2][6]

Για να συμβεί αυτό:

- Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της επένδυσης.
- Το φως πρέπει να εισέλθει με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης ώστε να παραμείνει παγιδευμένο στο εσωτερικό.

3. Τύποι Οπτικών Ινών

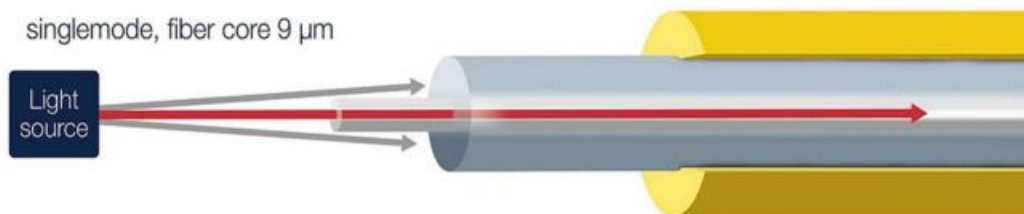
Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σήμερα: οι πολύτροπες (multimode) και οι μονότροπες (single-mode). Και οι δύο αυτές κατηγορίες ενεργούν σαν μέσο μετάδοσης για το φως, αλλά λειτουργούν με διαφορετικούς τρόπους, έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές. Οι διαφορετικοί τρόποι αναγκάζουν τις ακτίνες να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο μέγιστος ρυθμός από bits σε μία τέτοια ίνα.[2]



Εικόνα 2-2: Κατηγορίες οπτικής ίνας

Μονότροπες ίνες (Single-mode):

Η μονότροπη ίνα επιτρέπει μόνο ένα μονοπάτι ή τρόπο (mode), ώστε το φως να διέρχεται στην ίνα. Η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Τυπικά, το μέγεθος του πυρήνα είναι περίπου 9 μm . Λόγω του μικρού μεγέθους του πυρήνα της υπάρχει μόνο ένας δυνατός τρόπος μετάδοσης του οπτικού σήματος, ο αξονικός. Το φως που περιέχεται στον πυρήνα αναγκάζεται να ταξιδέψει σε ευθεία γραμμή. Η μονότροπη ίνα έχει γενικά μεγαλύτερη ικανότητα να μεταφέρει πληροφορία ακόμα και σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μικρές απώλειες σήματος και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως σε μεγάλες εκτάσεις, όπου η απόσταση μεταξύ επαναληπτών/ενισχυτών πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Ωστόσο, η μονότροπη ίνα τείνει να είναι ακριβότερη από την πολύτροπη. Οι μονότροπες ακτίνες που υπάρχουν ήδη μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα με ταχύτητα 50 Gbps για 100 km χωρίς ενίσχυση. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμη υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για κοντινότερες αποστάσεις. Οι μονότροπες ίνες είναι κίτρινες στο χρώμα για να ξεχωρίζουν. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και υψηλής ακρίβειας αισθητήρες.[2][3][8]

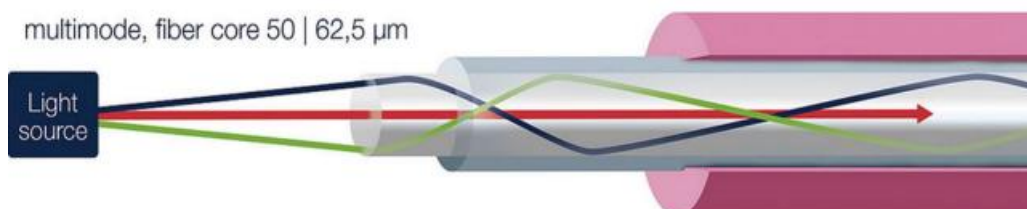


Εικόνα 2-3: Μονότροπη οπτική ίνα [24]

Πολύτροπες ίνες (Multimode):

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν στο εμπόριο. Η πολύτροπη ίνα επιτρέπει περισσότερους από έναν τρόπους για οπτική μετάδοση, για την ακρίβεια επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών ρυθμών ταλάντωσης (modes) μέσω της οπτικής ίνας. Τα κοινά μεγέθη του πυρήνα είναι 50 και 62.5 μm . Σε πυρήνες οπτικών ινών αυτού του μεγέθους, το φως μπορεί να χωριστεί σε πολλαπλά μονοπάτια. Ο ρυθμός της διαμόρφωσης σε αυτόν τον τύπο ίνας μπορεί να φτάσει μέχρι 200 Mb/s και σε αποστάσεις μικρότερες των 100 μέτρων το εύρος ζώνης είναι ουσιαστικά απεριόριστο. Κατά συνέπεια, οι πολύτροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα

μετάδοσης για μικρές αποστάσεις, όπως τοπικά δίκτυα και δίκτυα πρόσβασης. Επίσης, είναι αρκετά οικονομικές, αφού χρησιμοποιούνται με φθηνούς συνδετήρες (connectors) και LED πομπούς. Για να ξεχωρίζουν, οι πολύτροπες ίνες είναι χρώματος πορτοκαλί. Συμπερασματικά επιτρέπουν πολλαπλές διαδρομές φωτός και είναι κατάλληλες για μικρότερες αποστάσεις και με χαμηλότερες ταχύτητες.[2][3]



Εικόνα 2-4: Πολύτροπη οπτική ίνα [24]

4. Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα

Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά είναι:

- ✚ Υψηλό εύρος ζώνης και ικανότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων.
- ✚ Χαμηλές απώλειες σήματος σε μεγάλες αποστάσεις.
- ✚ Αντοχή σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- ✚ Μικρό μέγεθος και ευελιξία.
- ✚ Ασφάλεια στη μετάδοση (δεν μπορεί να υποκλαπεί εύκολα).

Αυτές οι βασικές αρχές αποτελούν τη θεμελιώδη γνώση για την κατανόηση των πιο προηγμένων εφαρμογών των οπτικών ινών, όπως στους αισθητήρες που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

Η τεχνολογία των οπτικών ινών έχει γνωρίσει μεγάλη άνθιση στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες, εξαιτίας κάποιων ιδιοτήτων των οπτικών ινών που δεν είχαν τα προϋπάρχοντα μέσα μετάδοσης, όπως για παράδειγμα τα παραδοσιακά καλώδια χαλκού. Η χρήση οπτικών συστημάτων, εκτός από να παρέχει συνδέσμους μετάδοσης με αρκετά υψηλές χωρητικότητες, παρουσιάζει κάποια σημαντικά οφέλη, έτσι ώστε να προτιμούνται τα δίκτυα οπτικών ινών έναντι άλλων παραδοσιακών δικτύων. Κάποια από τα πλεονεκτήματα αυτών των δικτύων συνοψίζονται στα κατωτέρω:

- ✓ Υψηλό εύρος ζώνης: Το εύρος ζώνης (bandwidth) στα οπτικά δίκτυα είναι σχεδόν απεριόριστο. Έχουν αρκετά μεγαλύτερο εύρος από τα δίκτυα χαλκού και ξεπερνούν κατά εκατοντάδες φορές αυτό ενός κοινού καλωδίου. Συγκριτικά με τα δορυφορικά δίκτυα εκτός από το μεγαλύτερο εύρος έχουν και μικρότερη καθυστέρηση (round trip), με αποτέλεσμα περισσότερη πληροφορία να μπορεί να μεταδοθεί από ένα απλό καλώδιο, άρα και συνολικά λιγότερα καλώδια για κάποιο δεδομένο ποσό πληροφορίας. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, που με τη σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία διαμεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP.
- ✓ Μεγάλη απόσταση μετάδοσης: Τα καλώδια οπτικών ινών έχουν πολύ μικρότερες απώλειες σε σχέση με τα καλώδια χαλκού. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να αποσταλούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις χωρίς την παρέμβαση άλλων συσκευών.
- ✓ Μικρός αριθμός επαναληπτών: Ως συνέπεια της μεγάλης απόστασης μετάδοσης που έχουν τα οπτικά δίκτυα, λίγοι επαναλήπτες (repeaters) και αναγεννητές σήματος απαιτούνται στα δίκτυα αυτά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χάρη στην υψηλή ποιότητα του γυαλιού που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης υπάρχει μικρή εξασθένιση του σήματος λόγω απόστασης (attenuation) και διασπορά (dispersion). Ακόμα και στην περίπτωση όμως που υπάρξει εξασθένιση σήματος, αυτό ενισχύεται πολύ εύκολα μέσω των κατάλληλων ενισχυτών.
- ✓ Μικρές διαστάσεις και βάρος: Τα οπτικά καλώδια είναι αρκετά μικρότερα και ελαφρύτερα σε σχέση με ηλεκτρικά καλώδια. Ένα σύστημα με οπτικά καλώδια μπορεί να εκτελέσει ακριβώς την ίδια εργασία και να μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα συγκριτικά με ένα πολύ μεγαλύτερο και βαρύτερο σύστημα που αποτελείται από χάλκινα καλώδια. Για να γίνει αντιληπτή η διαφορά στο βάρος τους ενδεικτικά αναφέρεται ότι 1000 χάλκινα καλώδια ζυγίζουν περίπου 8000 κιλά/km, ενώ 912 οπτικές ίνες 495 κιλά/km, ενώ οι τελευταίες καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε δίκτυα αστικών περιοχών που είναι αναγκαίο να καλυφθούν πολλοί πελάτες σε σχετικά λίγα τετραγωνικά.

- ✓ Χαμηλό κόστος υλικών: Για την ίδια χωρητικότητα μεταδόσεων τα οπτικά καλώδια είναι πολύ φθηνότερα από τα αντίστοιχα χάλκινα, διότι η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Κατά συνέπεια, αυτό ωφελεί αρχικά τους πάροχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες και εν συνεχεία τον ίδιο τον καταναλωτή. Η μείωση των αναγκών απόσβεσης εξόδων των παροχών επιβαρύνει με μικρότερες χρεώσεις τους καταναλωτές για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούν.
- ✓ Αυξημένη ασφάλεια και υψηλή διαθεσιμότητα: Λόγω κάποιων προβλημάτων που εμφανίζονται στις συνδέσεις με ηλεκτρικά στοιχεία, οι οπτικές συνδέσεις φαίνεται να είναι απόλυτα ασφαλείς σε αυτόν τον τομέα. Τα οπτικά καλώδια δεν εμφανίζουν προβλήματα σπινθηρισμών ή άλλων φαινομένων από υψηλή τάση που μπορούν να εμφανίσουν τα δίκτυα χαλκού. Η ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς. Ωστόσο, πρέπει να παίρνονται μέτρα για την προστασία των ματιών από την ακτίνα λέιζερ.
- ✓ Αμιγώς ψηφιακό σήμα και αυξημένη ασφάλεια του μεταδιδόμενου σήματος: Μια οπτική ίνα εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν τις φωτεινές αναλαμπές με υψηλή αξιοπιστία, μεταφέροντας τα bytes με πολύ μικρότερες αλλοιώσεις σε σχέση με αυτές ενός κοινού καλωδίου δικτύου, ή μιας ασύρματης σύνδεσης δεδομένων. Συγχρόνως, προσφέρει υψηλό βαθμό ασφάλειας των δεδομένων, αφού το οπτικό σήμα περιορίζεται μέσα στην ίνα και τυχόν εκπομπές ή διαρροές απορροφώνται από το επίστρωμα γύρω από την ίνα. Αντιθέτως, στα καλώδια χαλκού μπορούν αρκετά εύκολα τα οπτικά σήματα να υποκλαπούν. Έτσι, τα οπτικά δίκτυα κρίνονται απαραίτητα σε εφαρμογές με σημαντική την ασφάλεια της πληροφορίας, όπως οικονομικά, νομικά, κυβερνητικά και στρατιωτικά συστήματα.
- ✓ Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια: Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι γίνεται χρήση φωτεινών δεσμών, που απαιτούν πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα και αφετέρου στο ότι δεν υπάρχουν σημαντικές απώλειες σήματος.
- ✓ Εύκολη αναβάθμιση δικτύων: Λόγω της θεωρητικά απεριόριστης χωρητικότητας των οπτικών ινών, τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν

χωρίς να γίνεται αλλαγή των ινών. Το μόνο που χρειάζεται είναι να γίνει αναβάθμιση των ηλεκτρονικών στοιχείων, λείζερ, LEDs που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου και παράγουν τα οπτικά σήματα.[2][10][3]

2.2 Οπτικές Ίνες ως Αισθητήρες

Ο αισθητήρας οπτικών ινών είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη φυσική κατάσταση ενός υπό παρακολούθηση αντικειμένου σε μετρήσιμο οπτικό σήμα. Η λειτουργία του βασίζεται στην εκπομπή φωτεινής δέσμης από μια πηγή φωτός, η οποία μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας προς έναν διαμορφωτή. Εκεί, το φως αλληλεπιδρά με τις εξωτερικές φυσικές παραμέτρους που μετρούνται, προκαλώντας μεταβολές σε οπτικές του ιδιότητες, όπως η ένταση, το μήκος κύματος, η συχνότητα, η φάση και η πόλωση.

Το μεταβαλλόμενο αυτό φως (διαμορφωμένο οπτικό σήμα) στη συνέχεια μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας σε μια οπτοηλεκτρονική συσκευή, όπου, μέσω αποδιαμόρφωσης, εξάγεται η μετρούμενη πληροφορία. Σε όλη αυτή τη διαδικασία, η οπτική ίνα λειτουργεί διπλά: τόσο ως μέσο μετάδοσης του φωτός όσο και ως ενεργός αισθητήρας μέσω της διαμόρφωσης του φωτεινού σήματος.

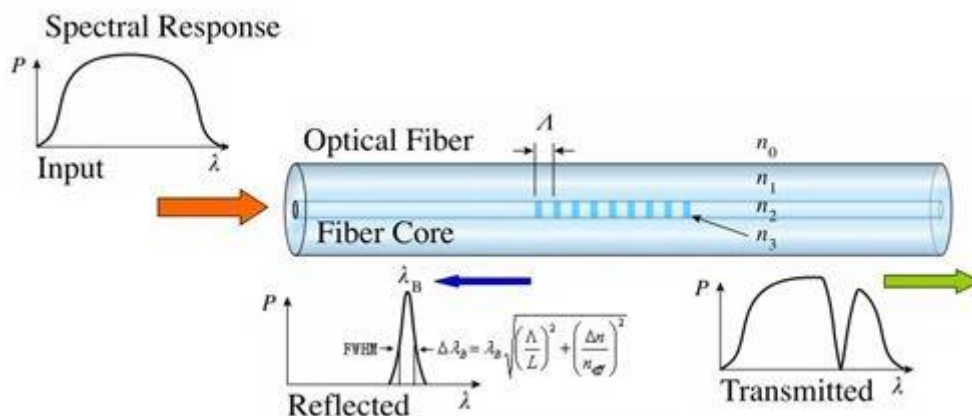
Οι αισθητήρες οπτικών ινών αναπτύσσονται με στόχο τη βελτίωση χαρακτηριστικών όπως η ευαισθησία, η ακρίβεια, η προσαρμοστικότητα, η συμπαγής κατασκευή και η ευφυής λειτουργία. Χάρη στα πλεονεκτήματά τους, αποτελούν μια από τις πλέον καινοτόμες τεχνολογίες στην οικογένεια των αισθητήρων.

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν πλήθος εξαιρετικών ιδιοτήτων: είναι ανθεκτικές σε ηλεκτρομαγνητικές και ατομικές ακτινοβολίες, έχουν μικρή διάμετρο, είναι ευέλικτες, ελαφριές και διαθέτουν εξαιρετική ηλεκτρική μόνωση. Παράλληλα, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην υγρασία, στις υψηλές θερμοκρασίες, στη διάβρωση και στα χημικά.

Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως «αισθητήρια όργανα» σε σημεία που είναι απρόσιτα ή επικίνδυνα για τον άνθρωπο, όπως περιοχές υψηλής θερμοκρασίας ή με πυρηνική ακτινοβολία. Επιπλέον, ξεπερνούν τα φυσιολογικά όρια των ανθρώπινων αισθήσεων, ενισχύοντας τη δυνατότητα παρακολούθησης κρίσιμων παραμέτρων σε απαιτητικά περιβάλλοντα. [11]

Αρχές λειτουργίας αισθητήρων οπτικών ινών

Ο αισθητήρας οπτικών ινών όπως έχουμε αναφέρει είναι ένας αισθητήρας που μετατρέπει την κατάσταση του μετρημένου αντικειμένου σε ένα μετρήσιμο σήμα φωτός. Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα οπτικών ινών είναι να στείλει την προσπίπτουσα δέσμη φωτός από την πηγή φωτός στον διαμορφωτή μέσω της οπτικής ίνας και να αλληλεπιδράσει με τις εξωτερικές μετρούμενες παραμέτρους του διαμορφωτή για να κάνει τις οπτικές ιδιότητες του φωτός όπως ένταση φωτός, μήκος κύματος, συχνότητα, φάση, κατάσταση πόλωσης, κλπ. Αλλάζει και γίνεται διαμορφωμένο οπτικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια αποστέλλεται στην οπτοηλεκτρονική συσκευή μέσω της οπτικής ίνας, και η μετρούμενη παράμετρος λαμβάνεται μετά τον αποδιαμορφωτή. Σε ολόκληρη τη διαδικασία, η δέσμη φωτός εισάγεται μέσω της οπτικής ίνας και μετά εκπέμπεται αφού περάσει από τον διαμορφωτή. Η λειτουργία της οπτικής ίνας είναι πρώτα η μετάδοση της φωτεινής δέσμης και, δεύτερον, ενεργεί ως οπτικός διαμορφωτής.



Εικόνα 2-5: Βασικές αρχές λειτουργίας αισθητήρα

Η βασική αρχή λειτουργίας του αισθητήρα οπτικών ινών είναι η αποστολή του φωτός από την πηγή φωτός στον διαμορφωτή μέσω της οπτικής ίνας. Αφού η προς μέτρηση παράμετρος αλληλεπιδρά με το φως που εισέρχεται στην περιοχή διαμόρφωσης, οι οπτικές ιδιότητες του φωτός (όπως ένταση φωτός, μήκος κύματος, συχνότητα, φάση, κατάσταση πόλωσης κ.λπ.) αλλάζουν, και ονομάζεται διαμορφωμένο φως σήματος και, στη συνέχεια, χρησιμοποιεί την επίδραση των μετρημένων χαρακτηριστικών μετάδοσης φωτός για την ολοκλήρωση της μέτρησης. Υπάρχουν δύο αρχές μέτρησης για αισθητήρες οπτικών ινών:

(1) Η αρχή του αισθητήρα οπτικών ινών τύπου φυσικής ιδιότητας όπου ο αισθητήρας οπτικής ίνας τύπου φυσικής ιδιότητας χρησιμοποιεί την ευαισθησία της οπτικής ίνας σε περιβαλλοντικές αλλαγές για να μετατρέψει τη φυσική ποσότητα εισόδου σε διαμορφωμένο οπτικό σήμα. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην επίδραση της οπτικής διαμόρφωσης της οπτικής ίνας, δηλαδή όταν αλλάζουν οι εξωτερικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η πίεση, το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο κ.λπ. , θα αλλάξει και αυτό.

Επομένως, εάν μπορεί να μετρηθεί η φάση φωτός και η ένταση του φωτός μέσω της οπτικής ίνας, μπορεί να είναι γνωστή η αλλαγή της μετρούμενης φυσικής ποσότητας. Αυτός ο τύπος αισθητήρα ονομάζεται επίσης ευαίσθητος τύπος στοιχείου ή λειτουργικός αισθητήρας οπτικών ινών. Η δέσμη της σημειακής φωτεινής πηγής του λέιζερ διαχέεται σε παράλληλα κύματα και χωρίζεται σε δύο διαδρομές με έναν διαχωριστή δέσμης, η μία είναι η οπτική διαδρομή αναφοράς και η άλλη είναι η οπτική διαδρομή μέτρησης. Οι εξωτερικές παράμετροι (θερμοκρασία, πίεση, δόνηση κ.λπ.) προκαλούν την αλλαγή του μήκους της ίνας αλλάζοντας έτσι διαφορετικούς αριθμούς περιθωρίων παρεμβολής. Μετρώντας την κίνηση του τρόπου λειτουργίας, μπορεί να μετρηθεί η θερμοκρασία ή η πίεση.

(2) Η αρχή του δομημένου αισθητήρα οπτικών ινών όπου ο δομημένος αισθητήρας οπτικών ινών είναι ένα σύστημα μέτρησης που αποτελείται από ένα στοιχείο ανίχνευσης φωτός (ευαίσθητο στοιχείο), έναν βρόχο μετάδοσης οπτικών ινών και ένα κύκλωμα μέτρησης. Μεταξύ αυτών, η οπτική ίνα χρησιμοποιείται μόνο ως μέσο μετάδοσης φωτός, επομένως ονομάζεται επίσης αισθητήρας οπτικής ίνας μετάδοσης φωτός ή μη λειτουργική εκτέλεση.

Σε αυτή τη περίπτωση, οι οπτικές ίνες έχουν πολλές εξαιρετικές ιδιότητες, όπως: απόδοση παρεμβολής κατά της ηλεκτρομαγνητικής και ατομικής ακτινοβολίας, μικρή διάμετρος, μαλακές, ελαφρές μηχανικές ιδιότητες. μόνωση, μη επαγωγικές ηλεκτρικές ιδιότητες. αντοχή στο νερό, αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία, αντοχή στη διάβρωση, χημικές ιδιότητες, κ.λπ., Μπορεί να παίξει το ρόλο των ανθρώπινων αυτιών σε μέρη που δεν είναι προσβάσιμα ή επιβλαβή για τον άνθρωπο (όπως περιοχές πυρηνικής ακτινοβολίας) και μπορεί επίσης να ξεπεράσει τα ανθρώπινα φυσιολογικά όρια και λάβουμε αυτό που δεν μπορεί να γίνει αισθητό από τις ανθρώπινες αισθήσεις δηλαδή εξωτερικές πληροφορίες.[12][13][21]

Κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορα κριτήρια, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας, την τοποθέτηση της οπτικής ίνας στο σύστημα μέτρησης και το είδος του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Ακολουθούν οι βασικές κατηγορίες:

- **Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας**

- a) **Ενδοπαρεμβατικοί (Intrinsic)**

Η οπτική ίνα λειτουργεί τόσο ως μέσο μεταφοράς του φωτός όσο και ως αισθητικό στοιχείο. Το φυσικό μέγεθος μεταβάλλει ιδιότητες του φωτός εντός της ίνας (π.χ. ένταση, φάση, πολικότητα, μήκος κύματος). Παράδειγμα: αισθητήρας παραμόρφωσης ή θερμοκρασίας με χρήση Bragg gratings (FBG).

- b) **Εξωπαρεμβατικοί (Extrinsic)**

Η οπτική ίνα χρησιμοποιείται μόνο για τη μετάδοση του φωτός προς και από ένα αισθητικό στοιχείο εκτός της ίνας. Παράδειγμα: αποστολή φωτός σε έναν κλασικό αισθητήρα πίεσης και επιστροφή του σήματος στην ίνα.

- **Ανάλογα με το μετρούμενο μέγεθος**

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να μετρήσουν διάφορα φυσικά μεγέθη όπως:

- Θερμοκρασία (με FBG, Raman scattering κ.ά.)
- Πίεση
- Παραμόρφωση / Τάση / Μηχανική φόρτιση
- Επιτάχυνση / Δόνηση
- Ηχητικά κύματα / Ακουστικά σήματα
- Ηλεκτρικά / Μαγνητικά πεδία
- Χημικά / Βιολογικά μεγέθη (π.χ. ανίχνευση pH, αερίων, γλυκόζης)

- **Ανάλογα με τη γεωμετρία λειτουργίας**

- a. Σημειακοί αισθητήρες (Point sensors)

Η μέτρηση γίνεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο της ίνας. Παράδειγμα: FBG αισθητήρας σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

- b. Κατανεμημένοι αισθητήρες (Distributed sensors)

- i. Μέτρηση καθ' όλο το μήκος της ίνας.
- ii. Χρησιμοποιούν φαινόμενα όπως Raman, Brillouin ή Rayleigh scattering.
- iii. Ιδανικοί για παρακολούθηση μεγάλων δομών (γέφυρες, σήραγγες, αγωγοί).

- c. Πολλαπλών σημείων αισθητήρες (Quasi-distributed sensors)

- ο Πολλαπλά σημεία μέτρησης κατά μήκος της ίνας, συχνά με FBGs σε σειρά.

- **Ανάλογα με το είδος της τροποποίησης του φωτός**

- Αισθητήρες έντασης (Intensity-modulated)
- Αισθητήρες φάσης (Phase-modulated)
- Αισθητήρες συχνότητας (Frequency-modulated)
- Αισθητήρες πόλωσης (Polarization-modulated)



Εικόνα 2-6: Κατηγορίες αισθητήρων οπτικών ινών

Ενεργοί και Παθητικοί Αισθητήρες

Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται σε παθητικούς (passive) και ενεργούς (active). Οι ενεργοί αισθητήρες παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα ως απόκριση σε κάποιο ερέθισμα χωρίς να απαιτούν ηλεκτρική ισχύ, μετατρέποντας την ενέργεια του εισερχόμενου ερεθίσματος στη μορφή του εξερχόμενου σήματος (π.χ. θερμοζεύγος).

Οι ενεργοί αισθητήρες χρειάζονται μια εξωτερική πηγή ενέργειας —ένα σήμα διέγερσης— για να λειτουργήσουν. Αυτό το σήμα στη συνέχεια διαμορφώνεται από τον αισθητήρα για να δημιουργήσει ένα σήμα εξόδου. Πάρτε για παράδειγμα ένα θερμίστορ. Δεν παράγει από μόνο του ηλεκτρικό σήμα. Όμως, αν περάσει ηλεκτρικό ρεύμα μέσα του, η αντίστασή του αλλάζει ανάλογα με τη θερμοκρασία. Μετρώντας αυτές τις αλλαγές στο ρεύμα ή την τάση, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία. Στην τηλεπισκόπηση, οι πιο συνηθισμένοι ενεργοί αισθητήρες είναι τα ραντάρ. Ένα ραντάρ εκπέμπει τα δικά του μικροκύματα και στη συνέχεια μετράει την ενέργεια που ανακλάται πίσω από αντικείμενα ή επιφάνειες. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων ανεξάρτητα από τις συνθήκες φωτισμού (π.χ., μέρα ή νύχτα) ή τις καιρικές συνθήκες (π.χ., σύννεφα).[14][15][16]

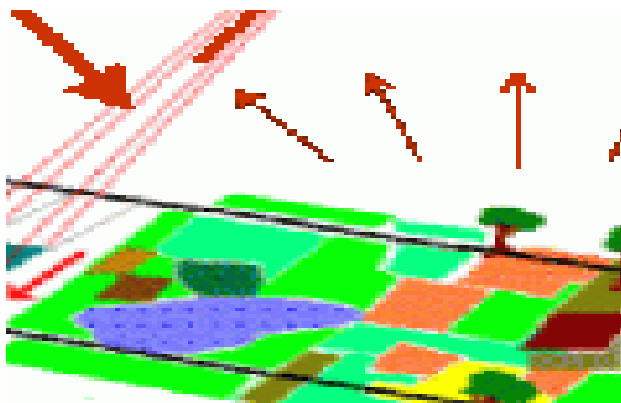


Εικόνα 2-7: Ενεργοί Αισθητήρες

Σε αντίθεση με τους ενεργούς, οι παθητικοί αισθητήρες προκειμένου να παράγουν το σήμα εξόδου απαιτούν κατανάλωση ενέργειας η οποία προέρχεται από εξωτερική πηγή. Ουσιαστικά, οι παθητικοί αισθητήρες παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα ως απόκριση σε ένα εξωτερικό ερέθισμα που χρησιμεύει ως σήμα εξόδου χωρίς την ανάγκη πρόσθετης πηγής ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο αισθητήρας θερμοκρασίας LM

335 ο οποίος απαιτεί τάση τροφοδοσίας για τη λειτουργίας του, μια φωτοδίοδος και ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, θερμοστοιχείο.

Στην εικόνα 2-8 παρατηρούμε τους αισθητήρες που λαμβάνουν τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο «πράσινο» φως, ενώ άλλοι στοχεύουν προς τα υπέρυθρα μήκη κύματος.



Εικόνα 2-8: Παθητικοί αισθητήρες

Γενικά, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν εξωτερικές πηγές ενέργειας για να «παρατηρήσουν» ένα αντικείμενο, όταν π. χ. χρησιμοποιούν το ηλιακό φως για να παρατηρήσουν τη γη, ονομάζονται παθητικοί αισθητήρες.[14][15][16]

Πλεονεκτήματα αισθητήρων οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Optic Sensors - FOS) αποτελούν μία από τις πιο αξιόπιστες και τεχνολογικά προηγμένες λύσεις για την ανίχνευση και παρακολούθηση διαφόρων φυσικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, οι δονήσεις και η παραμόρφωση. Χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες βιομηχανικές και κατασκευαστικές εφαρμογές λόγω των μοναδικών τους ιδιοτήτων, οι οποίες περιλαμβάνουν την υψηλή ακρίβεια, την ανθεκτικότητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, τη μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος συντήρησης (Villatoro et al., 2021). Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε τα κύρια πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι η υψηλή ευαισθησία τους. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν αλλαγές σε φυσικές παραμέτρους που είναι πολύ μικρές για να ανιχνευθούν από άλλους τύπους αισθητήρων. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να ανιχνεύσουν παραμορφώσεις

τάξης μεγέθους μικροκλίμακας (micro-strain), κάτι που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση των μικρών αλλαγών στην τάση που συμβαίνουν σε κατασκευές λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας ή μεταβολών στο φορτίο. Αυτή η ικανότητα καθιστά τους αισθητήρες οπτικών ινών ιδανικούς για εφαρμογές σε τομείς όπου απαιτείται υψηλή ευαισθησία, όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική και η βιομηχανική παραγωγή.[17][18]

Ένα άλλο πλεονέκτημα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι η αξιοπιστία τους. Σε αντίθεση με άλλους τύπους αισθητήρων, οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι ανθεκτικοί σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, χαρακτηριστικό που τους καθιστά κατάλληλους για χρήση σε σκληρά περιβάλλοντα. Είναι επίσης ανθεκτικοί στη διάβρωση και μπορούν να αντέξουν τις υψηλές θερμοκρασίες, κι έτσι καθίστανται ιδανικοί για χρήση σε κατασκευές όπως γέφυρες, αγωγοί και αεροσκάφη. Οι αισθητήρες οπτικών ινών εγκαθίστανται επίσης εύκολα και μπορούν να ενσωματωθούν σε δομές κατά την κατασκευή ή τη μετασκευή. Αυτό τους καθιστά μια οικονομικά αποδοτική λύση για το SHM, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της υγείας μιας δομής καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν επίσης το πλεονέκτημα της μεγάλης διάρκειας ζωής και του χαμηλού κόστους συντήρησης. Λόγω της ανθεκτικότητάς τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία, οι ακραίες θερμοκρασίες και η διάβρωση, οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να λειτουργούν απρόσκοπτα για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς την ανάγκη για συχνές επισκευές ή αντικατάσταση. Αυτό μειώνει το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και αυξάνει την αποδοτικότητα των συστημάτων που τους χρησιμοποιούν. Σε ένα παράδειγμα από τον τομέα της παρακολούθησης αγωγών πετρελαίου, οι αισθητήρες οπτικών ινών που εγκαταστάθηκαν σε αγωγούς υποθαλάσσιων εγκαταστάσεων στη Βραζιλία είχαν διάρκεια ζωής πάνω από 20 χρόνια χωρίς να απαιτείται σημαντική συντήρηση (dos Santos et al., 2022). Αυτή η ανθεκτικότητα οφείλεται στην υψηλή ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των αισθητήρων, καθώς και στην ανθεκτικότητα των οπτικών ινών στις διαβρωτικές συνθήκες που επικρατούν σε υποθαλάσσια περιβάλλοντα. Οι αισθητήρες αυτοί προσφέρουν επίσης χαμηλό κόστος λειτουργίας λόγω της απλότητας της συντήρησής τους. Σε πολλές περιπτώσεις, οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργούν συνεχώς για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς την ανάγκη για συχνές επεμβάσεις, κάτι που μειώνει το κόστος εργασίας και τα συνολικά κόστη συντήρησης (Pinto et al., 2021).

Ένα άλλο πλεονέκτημα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι η ικανότητά τους να μεταδίδουν σήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Οι παραδοσιακοί αισθητήρες συχνά απαιτούν ενσύρματες συνδέσεις για τη μετάδοση σημάτων, κάτι που μπορεί να περιορίσει την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και του συστήματος παρακολούθησης ή ελέγχου. Αντίθετα, οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να μεταδώσουν σήματα σε αρκετά χιλιόμετρα χωρίς σημαντική απώλεια στην ένταση του σήματος ή στην ακρίβεια.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες ανίχνευσης, όπως η υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία, η ανθεκτικότητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η μεγάλη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, η ευαισθησία σε μηχανικές βλάβες και η περιορισμένη ευελιξία σε ορισμένες εφαρμογές. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, οι αισθητήρες οπτικών ινών συνεχίζουν να αποτελούν μια από τις πιο αξιόπιστες και ανθεκτικές λύσεις για τη μέτρηση φυσικών μεγεθών σε κρίσιμες βιομηχανικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, και η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής αναμένεται να συνεχιστεί με ραγδαίο ρυθμό στο μέλλον.[17][18][11]

3 Εφαρμογές σε έξυπνες υποδομές

3.1 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας

Οι αισθητήρες οπτικών ινών (OFS) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που έχει κερδίσει ευρεία αποδοχή σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς λόγω της υψηλής ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητάς τους σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο, η χρήση αυτών των αισθητήρων απαιτεί την ύπαρξη ενός ξεκάθαρα και αποτελεσματικού κανονιστικού πλαισίου που να διασφαλίζει την ορθή εφαρμογή τους και την προστασία των βιομηχανικών υποδομών και του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες οπτικών ινών παίζουν έναν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση της υγείας των κατασκευών, όπως γεφυρών, κτιρίων, σιράγγων και άλλων υποδομών. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική σε κατασκευές που υπόκεινται σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις, όπως οι γέφυρες και τα φράγματα, όπου η ανίχνευση της παραμόρφωσης και των δονήσεων είναι κρίσιμη για την ασφάλεια.

Οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν βασικό στοιχείο των σύγχρονων έργων υποδομής, από πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έως γέφυρες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Παρά την υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα του χάλυβα, η συνεχής παρακολούθηση και συντήρηση αυτών των κατασκευών είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της δομικής τους ακεραιότητας σε βάθος χρόνου. Σε αυτό το πλαίσιο, η Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας Κατασκευών (Structural Health Monitoring - SHM) παίζει καθοριστικό ρόλο, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για τη διαρκή αξιολόγηση της κατάστασης των χαλύβδινων κατασκευών.

Τι είναι όμως η παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας?

Η Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών (SHM) είναι η συστηματική και συνεχής αξιολόγηση της κατάστασης μιας κατασκευής, χρησιμοποιώντας ακριβείς μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες και προηγμένες τεχνολογίες.

Αυτοί οι έξυπνοι αισθητήρες παρακολουθούν κρίσιμες παραμέτρους, όπως η τάση, η παραμόρφωση, οι δονήσεις, η κλίση, καθώς και εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία.

Τα δεδομένα που συλλέγονται μεταδίδονται σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου, το οποίο τα αναλύει, εντοπίζει τυχόν ανωμαλίες και ενεργοποιεί ειδοποιήσεις αν παρατηρηθούν ασυνήθιστα μοτίβα.

Ειδικά για τις χαλύβδινες κατασκευές, όπως οι πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα SHM διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην έγκαιρη ανίχνευση ζημιών ή φθοράς, επιτρέποντας έγκαιρες συντηρήσεις και επισκευές.

Με αυτόν τον τρόπο, διευκολύνονται προληπτικές επεμβάσεις, που συμβάλλουν στην παράταση της διάρκειας ζωής των κρίσιμων υποδομών και στην ενίσχυση της συνολικής ασφάλειας.[17][19]

3.2 Αισθητήρες οπτικών ινών σε γέφυρες, σήραγγες και κτίρια

Η χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση δονήσεων και πίεσης δεν περιορίζεται μόνο στις βιομηχανικές εφαρμογές. Σε δομικές κατασκευές, όπως γέφυρες και κτίρια, η παρακολούθηση της δόνησης και της πίεσης είναι ζωτικής σημασίας για την

εξασφάλιση της ασφάλειας και της αντοχής των κατασκευών. Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να ανιχνεύσουν μικρο-δονήσεις και να μετρήσουν την πίεση που ασκείται σε κρίσιμα δομικά σημεία, όπως τα θεμέλια ή τα αρθρώματα. Σε μια μελέτη που διεξήχθη στη γέφυρα Sutong στην Κίνα, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση των δονήσεων που προκαλούνται από τα διερχόμενα οχήματα και τον άνεμο (Yang et al., 2021). Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν επέτρεψαν στους μηχανικούς να εκτιμήσουν την απόκριση της γέφυρας σε διάφορα φορτία και να εντοπίσουν ενδείξεις δομικής κόπωσης. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας οδήγησε σε βελτιωμένες στρατηγικές συντήρησης και μείωσε την ανάγκη για επιτόπιο έλεγχο.[17]

Οι γέφυρες είναι πολύπλοκες κατασκευές που αποτελούνται από πολλά στοιχεία και εξαρτήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καταπονούνται όταν εκτίθενται σε εξωτερικά φαινόμενα. Υπόκεινται σε διάφορα φορτία και περιβαλλοντικές επιρροές που μπορούν να επηρεάσουν τη δομική τους ακεραιότητα. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επιθεώρησης είναι συχνά χρονοβόρες και μπορεί να χάνουν κρυφές ζημιές. Οι αισθητήρες οπτικών ινών παρέχουν λύση επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, εντοπίζοντας έγκαιρα πιθανά προβλήματα.

Τα συστήματα SHM επιτρέπουν την ταχύτατη αξιολόγηση της ακεραιότητας μιας γέφυρας και για την προσέγγιση αυτή έχουν αναγνωριστεί ως ένα από τα καλύτερα μέσα που υπάρχουν για την αύξηση της ασφάλειας και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης γεφυρών. Οι κύριες λειτουργίες της παρακολούθησης είναι να εξασφαλιστεί η μακροζωία και η ασφάλεια των γεφυρών καθώς και να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση τους. Στην πραγματικότητα η κακή λειτουργία των γεφυρών μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες και σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει την απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Τα παραδείγματα εφαρμογών αισθητήρων οπτικών ινών σε γέφυρες είναι πάρα πολλά. Μερικά από αυτά είναι η καλωδιωτή γέφυρα στο λιμάνι της Βενετίας, η γέφυρα Île d'Orléans στο Κεμπέκ, η γέφυρα Versoix κοντά στην Γενεύη και η κρεμαστή γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη.



Εικόνα 3-1: Γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη[22]

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

Επιπλέον τα σύγχρονα πολυώροφα κτίρια, τα στάδια και τα ιστορικά μνημεία αποτελούν και αυτά πολύπλοκες κατασκευές που υπόκεινται σε σημαντικές καταπονήσεις από περιβαλλοντικά και λειτουργικά φορτία. Η απόκριση αυτών των κατασκευών σε τέτοια φορτία διαφοροποιείται ανάλογα με χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος, η γεωμετρία, τα δομικά στοιχεία, τα υλικά κατασκευής και ο τρόπος θεμελίωσης.

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν τα ιστορικά μνημεία. Η μακροχρόνια έκθεσή τους σε περιβαλλοντικές συνθήκες, σε συνδυασμό με τις παλαιότερες τεχνικές δόμησης και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθιστά τη συμπεριφορά τους στις καταπονήσεις διαφορετική και συχνά απρόβλεπτη. Η απουσία κατάλληλης διαχείρισης και παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή ολική κατάρρευση, με σοβαρές συνέπειες όχι μόνο σε επίπεδο ασφάλειας και οικονομίας, αλλά και με μη αναστρέψιμη πολιτιστική απώλεια.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring - SHM) αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα από τα πλέον αποτελεσματικά μέσα για την αύξηση της ασφάλειας και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κτιριακών υποδομών. Μέσω αυτής της προσέγγισης, επιτυγχάνεται η άμεση και αξιόπιστη αξιολόγηση της αρτιότητας της κατασκευής.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα συστήματα SHM παρέχουν στους ιδιοκτήτες και τους διαχειριστές αξιόπιστες και αντικειμενικές πληροφορίες, οι οποίες είναι καθοριστικές για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με:

- Τη βελτίωση της λειτουργίας.
- Τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών συντήρησης.
- Τον προγραμματισμό επισκευών.
- Την ανάγκη και τον χρόνο αντικατάστασης δομικών στοιχείων.
- Μηχανισμοί Υποβάθμισης και Τρόποι Ανίχνευσης

Η παρακολούθηση της ακεραιότητας επιτρέπει τη συλλογή αξιόπιστων στοιχείων για την πραγματική κατάσταση μιας δομής, την παρατήρηση της εξέλιξής της και την έγκαιρη ανίχνευση νέων ατελειών. Παραδείγματα φθορών περιλαμβάνουν τη ρωγμάτωση του σκυροδέματος και την οξείδωση ή θραύση λόγω κόπωσης του χάλυβα. Η υποβάθμιση των υλικών μπορεί να οφείλεται σε:

- Μηχανικούς παράγοντες: Όπως η υπερβολική φόρτιση.
- Φυσικοχημικούς παράγοντες: Όπως η διάβρωση του χάλυβα, η διείσδυση αλάτων και χλωριόντων στο σκυρόδεμα, ή το πάγωμα/απόψυξη του σκυροδέματος.

Η διαρκής εικόνα της τρέχουσας κατάστασης και της δυναμικής εξέλιξης μιας κατασκευής σε πραγματικό χρόνο καθίσταται εφικτή μέσω της μόνιμης εγκατάστασης αισθητήρων και της συνεχούς μέτρησης των σχετικών παραμέτρων.

Το Σεπτέμβριο του 2000 στην Σιγκαπούρη, κατασκευάστηκε ίσως το μεγαλύτερο σύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας ενός συγκροτήματος πολυώροφων κτιρίων. Τοποθετήθηκαν συνολικά πάνω από 2000 αισθητήρες οπτικών ινών στους σκελετούς των κτιρίων κατά την διάρκεια της κατασκευής τους. Το project αυτό είχε σαν στόχο την διεύρυνση της γνώσης σχετικά με την πραγματική δομική συμπεριφορά, τον έλεγχο της διαδικασίας κατασκευής, την αύξηση της ασφάλειας κατά την διάρκεια ζωής των κατασκευών, την ενίσχυση των δραστηριοτήτων συντήρησης, καθώς και την αξιολόγηση

της δομικής κατάστασης μετά από διάφορα γεγονότα όπως οι σεισμοί, οι απρόσμενες καιρικές συνθήκες κ.α.[22][23]



Εικόνα 3-2: Συγκρότημα κτιρίων Σιγκαπούρη με εγκατεστημένο σύστημα SHM [22]

3.3 Εφαρμογές σε αγωγούς ύδρευσης και πετρελαίου/αερίου

Οι αισθητήρες οπτικών ινών (Optical Fiber Sensors - OFS) έχουν βρει εκτεταμένες και κρίσιμες εφαρμογές στους αγωγούς ύδρευσης και πετρελαίου/αερίου, προσφέροντας πρωτοποριακές λύσεις για την παρακολούθηση, την ασφάλεια και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Η δυνατότητα κατανεμημένης μέτρησης, η ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η αντοχή σε σκληρά περιβάλλοντα τους καθιστούν ιδανικούς για αυτές τις υποδομές. Ορισμένες από τις βασικές Εφαρμογές σε Αγωγούς Ύδρευσης και Πετρελαίου/Αερίου είναι:

1) Ανίχνευση Διαρροών (Leak Detection):

- Πώς λειτουργεί: Οι κατανεμημένοι αισθητήρες οπτικών ινών (Distributed Fiber Optic Sensors - DFOS), όπως αυτοί που βασίζονται στην ανίχνευση θερμοκρασίας (Distributed Temperature Sensing - DTS) ή ακουστικής (Distributed Acoustic Sensing - DAS), μπορούν να εγκατασταθούν κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού. Μια διαρροή προκαλεί αλλαγές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από τον

αγωγό (π.χ., το διαρρέον υγρό έχει διαφορετική θερμοκρασία από το έδαφος) ή παράγει ακουστικά κύματα (ήχοι από τη διαρροή).

- Όφελος: Επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση και τον ακριβή εντοπισμό διαρροών (συχνά με ακρίβεια 1-5 μέτρων) σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και σε αγωγούς δεκάδων ή εκατοντάδων χιλιομέτρων. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή απωλειών προϊόντος, περιβαλλοντικής ρύπανσης και κινδύνων ασφαλείας.

2) Ανίχνευση Παραβίασης από Τρίτους (Third-Party Intrusion - TPI) / Προστασία Αγωγών:

- Πώς λειτουργεί: Οι αισθητήρες DAS είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε δονήσεις και ακουστικά σήματα. Όταν κάποιος προσπαθεί να σκάψει κοντά στον αγωγό (χειροκίνητα ή με μηχανήματα), οι δονήσεις ανιχνεύονται από την οπτική ίνα που είναι θαμμένη παράλληλα με τον αγωγό.
- Όφελος: Παρέχουν συνεχή παρακολούθηση για την πρόληψη δολιοφθορών, κλοπών (π.χ., πετρελαίου), ή τυχαίων ζημιών από κατασκευαστικές εργασίες, ειδοποιώντας άμεσα τους χειριστές για την ακριβή θέση της διαταραχής.

3) Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας και Καταπόνησης (Strain Monitoring):

- Πώς λειτουργεί: Αισθητήρες όπως οι Bragg Grating (FBG) ή οι κατανεμημένοι αισθητήρες παραμόρφωσης (Distributed Strain Sensing - DSS) μπορούν να μετρήσουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που υφίσταται ο αγωγός λόγω εσωτερικής πίεσης, θερμικών διαστολών/συστολών, καθιζήσεων εδάφους, κατολισθήσεων ή σεισμικής δραστηριότητας.
- Όφελος: Βοηθούν στην αξιολόγηση της δομικής υγείας του αγωγού, στην πρόληψη αστοχιών και στην εκτίμηση της επίδρασης γεωλογικών κινδύνων.

4) Παρακολούθηση Θερμοκρασίας και Ροής:

- Πώς λειτουργεί: Οι αισθητήρες DTS μπορούν να παρέχουν συνεχή προφίλ θερμοκρασίας κατά μήκος του αγωγού. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε αγωγούς πετρελαίου και αερίου, όπου η θερμοκρασία επηρεάζει τη ροή (π.χ., πήξη παραφινών ή σχηματισμός ένυδρων ενώσεων).
- Όφελος: Επιτρέπει τον έλεγχο της διαδικασίας, την ανίχνευση σημείων με συσσώρευση υγρών (slugs), την παρακολούθηση της κίνησης "ξυστρών" (PIGs) μέσα στον αγωγό και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης μεταφοράς.

5) Παρακολούθηση Πίεσης:

- Πώς λειτουργεί: Ειδικοί αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να μετρούν την πίεση μέσα στον αγωγό.
- Όφελος: Παρέχουν ακριβή δεδομένα για τον έλεγχο της λειτουργίας, την ανίχνευση ανωμαλιών στην πίεση που μπορεί να υποδηλώνουν διαρροή ή φράξιμο, και τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας.

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε ορισμένα πλεονεκτήματα των Αισθητήρων Οπτικών Ινών που αφορούν τους Αγωγούς:

- **Μεγάλη Εμβέλεια:** Μία μόνο οπτική ίνα μπορεί να παρακολουθεί δεκάδες ή και εκατοντάδες χιλιόμετρα αγωγού, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλούς αισθητήρες και πολύπλοκες καλωδιώσεις.
- **Ανοσία σε Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές:** Ιδιαίτερα σημαντικό σε περιβάλλοντα με ηλεκτρικό θόρυβο ή κοντά σε ηλεκτροφόρα καλώδια.
- **Ασφάλεια:** Δεν μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα, καθιστώντας τους εγγενώς ασφαλείς για χρήση σε περιβάλλοντα με εύφλεκτα υλικά (πετρέλαιο, φυσικό αέριο).
- **Αντοχή στο Περιβάλλον:** Είναι ανθεκτικοί σε ακραίες θερμοκρασίες, διάβρωση, υγρασία και χημικά.
- **Χαμηλή Συντήρηση:** Απαιτούν ελάχιστη ή καθόλου συντήρηση μετά την εγκατάσταση.
- **Ακριβής Εντοπισμός:** Οι κατανεμημένοι αισθητήρες μπορούν να εντοπίσουν με μεγάλη ακρίβεια την πηγή ενός συμβάντος κατά μήκος του αγωγού.

Συνοψίζοντας, οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση αγωγών, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ασφάλεια, την περιβαλλοντική προστασία και την οικονομική αποδοτικότητα της μεταφοράς υγρών και αερίων.

3.4 Ρόλος των αισθητήρων στην πρόληψη βλαβών και συντήρηση υποδομών

Οι αισθητήρες διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στην πρόληψη βλαβών και στη συντήρηση υποδομών, καθώς επιτρέπουν τη συνεχή, αξιόπιστη και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της κατάστασης των δομικών στοιχείων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της

καταγραφής φυσικών μεγεθών όπως η παραμόρφωση, η δόνηση, η θερμοκρασία και η υγρασία, τα οποία αποτελούν δείκτες της υγείας της υποδομής.

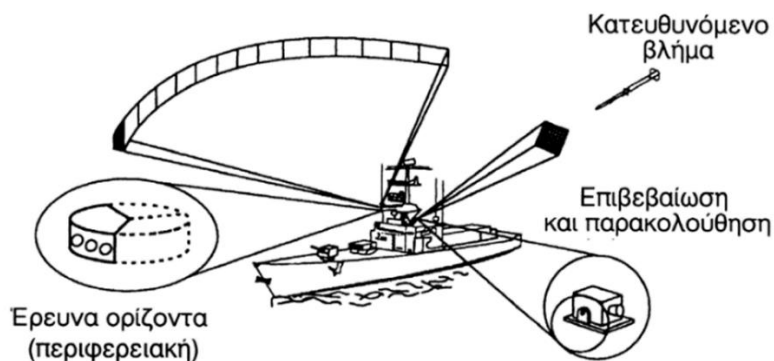
Στη σύγχρονη κοινωνία, οι υποδομές — όπως γέφυρες, φράγματα, υδάτινα έργα, ενεργειακά, μεταλλευτικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα — αποτελούν βασικούς τομείς επενδύσεων που στηρίζουν τη σταθερότητα της οικονομίας και τη συνεχιζόμενη εθνική ευημερία. Ωστόσο, οι απροσδόκητες αστοχίες λόγω ανεπαρκούς σχεδιασμού ή φθοράς των κατασκευών αποτελούν ένα σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα, ειδικά με την αύξηση του κόστους συντήρησης και αποκατάστασης των υποδομών. Η δομική φθορά που οδηγεί σε αστοχία ή κατάρρευση μπορεί να προκαλέσει ανθρώπινες απώλειες και σοβαρές διαταραχές σε πολλούς τομείς. Για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης πραγματοποιούνται τακτικοί επιτόπιοι έλεγχοι. Ωστόσο, οι παραδοσιακές αυτές μέθοδοι είναι συχνά χρονοβόρες, απαιτούν έντονη ανθρώπινη εργασία και παρουσιάζουν αμφισβητήσιμη αξιοπιστία.

Η πρόοδος της τεχνολογίας έξυπνων αισθητήρων έχει ενισχύσει σημαντικά το ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM), με στόχο τη μετάβαση από την αντιδραστική στη προληπτική συντήρηση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συνεχή και σε πραγματικό χρόνο αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας, αξιοπιστίας και ανθεκτικότητας. Όργανα όπως οι επιταχυνσιόμετρα και οι μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στα συστήματα SHM, επιτρέποντας τη διαδικτυακή και σε πραγματικό χρόνο συλλογή δεδομένων για την παρακολούθηση των δομικών αποκρίσεων. Ωστόσο, αυτού του είδους οι αισθητήρες δεν είναι αποδοτικοί για την παρακολούθηση μεγάλων και γεωγραφικά κατανεμημένων υποδομών—όπως οι αγωγοί, τα φράγματα και οι γέφυρες—καθώς απαιτείται μεγάλος αριθμός αισθητήρων για την αξιόπιστη συλλογή δεδομένων. Επιπλέον, υπάρχουν προκλήσεις όσον αφορά την ανθεκτικότητα των αισθητήρων, την ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI), καθώς και την αντίσταση σε χημικές επιδράσεις και διάβρωση.

3.5 Παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων με αισθητήρες οπτικών ινών

Η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων έχει καταστεί απαραίτητη σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η διαχείριση φυσικών πόρων, η πολιτική προστασία, η γεωργία ακριβείας και η προστασία κρίσιμων υποδομών. Οι παραδοσιακοί αισθητήρες ηλεκτρικού τύπου παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς την ευαισθησία, την ακρίβεια και την

ανθεκτικότητα σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε αυτό το πλαίσιο, οι αισθητήρες οπτικών ινών αναδύονται ως μια ιδιαίτερα αποδοτική και αξιόπιστη τεχνολογία για την καταγραφή και ανάλυση κρίσιμων παραμέτρων του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 3-3: Σύστημα υπέρυθρης έρευνας και παρακολούθησης [25]

Η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων με αισθητήρες οπτικών ινών θεωρείται μια σύγχρονη τεχνολογία που επιτρέπει την ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση διαφόρων περιβαλλοντικών μεγεθών. Οι αισθητήρες αυτοί, χρησιμοποιούν τις ιδιότητες του φωτός για να ανιχνεύσουν αλλαγές στο περιβάλλον, όπως θερμοκρασία, πίεση, παραμόρφωση, κ.α. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως υψηλή ευαισθησία, αντοχή σε θόρυβο και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, και δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης.

Ουσιαστικά, οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν μία τεχνολογία αιχμής για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, προσφέροντας μοναδικά πλεονεκτήματα ως προς την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την προσαρμοστικότητα. Η ευρεία υιοθέτησή τους δύναται να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα περιβαλλοντικών προγραμμάτων, να συμβάλει στην πρόληψη φυσικών καταστροφών και να υποστηρίξει τη μετάβαση σε βιώσιμες και τεχνολογικά έξυπνες κοινωνίες. [26][27]

4 Εφαρμογές στην Ιατρική και Βιοιατρική

4.1 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών στην ενδοσκόπηση

Οι αισθητήρες οπτικών ινών βρίσκουν αυξανόμενη χρήση στην ενδοσκόπηση λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους, όπως η μικρού μεγέθους, η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και η ευαισθησία σε διάφορες παραμέτρους. Στην ενδοσκόπηση, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και μέτρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η πίεση και η παραμόρφωση, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη διάγνωση και τη θεραπεία.

Η ενδοσκόπηση αποτελεί βασικό διαγνωστικό και επεμβατικό εργαλείο στη σύγχρονη ιατρική, επιτρέποντας την απεικόνιση και αξιολόγηση εσωτερικών οργάνων χωρίς τη χρήση επεμβατικών χειρουργικών τεχνικών. Τα τελευταία χρόνια, η ενσωμάτωση αισθητήρων οπτικών ινών σε ενδοσκοπικές διατάξεις έχει φέρει επανάσταση στη διάγνωση και παρακολούθηση παθήσεων, προσφέροντας παράλληλη καταγραφή φυσιολογικών παραμέτρων, υψηλή ακρίβεια και συμβατότητα με το ανθρώπινο σώμα.

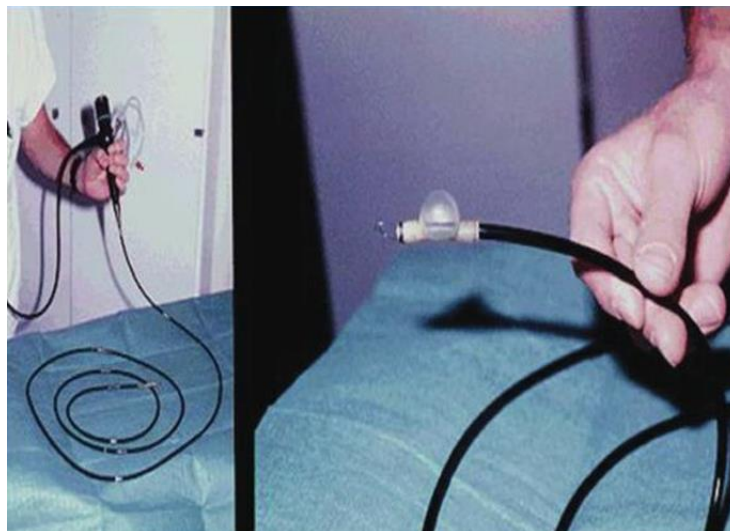
Ας δούμε ένα παράδειγμα εφαρμογής σε ενδοσκόπηση που αφορά την υγεία. Ο καρκίνος του παχέος εντέρου όπως γνωρίζουμε είναι η δεύτερη θανατηφόρα μορφή καρκίνου στις ΗΠΑ, μετά τον καρκίνο των πνευμόνων. Πρώτο μέτρο πρόληψης είναι βέβαια η σωστή διατροφή με έμφαση στην πρόσληψη φυτικών ινών και τροφής με λίγα λιπαρά. Δεύτερο μέτρο είναι η τακτική διερεύνηση-ανίχνευση παρουσίας προκαρκινικών όγκων. Οι όγκοι αυτοί είναι πολύποδες και αδενώματα και συνιστάται η αφαίρεσή τους πριν εξελιχθούν σε κακοήθειες.



Εικόνα 4-1: Καρκίνος παχέος εντέρου [29]

Τα ενδοσκόπια κατασκευάστηκαν για να βοηθήσουν την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων. Είναι λεπτά και εύκαμπτα για να μπορούν να προωθούνται σε στενές

διόδους. Έχουν ενσωματωμένες οπτικές ίνες και video camera για να φωτίζεται και να εμφανίζεται σε εξωτερική οθόνη η περιοχή από όπου περνούν. Είναι επίσης εξοπλισμένα με μικροσκοπικά χειρουργικά εργαλεία. Με τα ενδοσκόπια ο γιατρός μπορεί να δει το εσωτερικό οργάνων, να διαγνώσει τυχόν ύπαρξη επικίνδυνων μορφωμάτων και να προβεί σε επέμβαση αφαίρεσής τους επί τόπου.



Εικόνα 4-2: Ενδοσκόπιο εντέρου [30]

Πολλές ειδικότητες ιατρικής χρησιμοποιούν ενδοσκόπια. Για το παχύ έντερο υπάρχει το σιγμοειδοσκόπιο και το ορθοσκόπιο, για την κοιλιακή χώρα υπάρχει το λαπαροσκόπιο ή περιτοναιοσκόπιο με το οποίο γίνονται εξετάσεις γυναικολογικής φύσης και εξετάσεις σχετικές με την ουροδόχο κύστη, όπως και επεμβάσεις κήλης (κοιλιοκήλη, ομφαλοκήλη, κυστεοκήλη) και στομάχου. Τέτοιου είδους επεμβάσεις παρουσιάζουν παρόμοιο ποσοστό επιτυχίας με τις κλασικές της «ανοιχτής» χειρουργικής με σημαντικά χαμηλότερο ποσοστό επιπλοκών.

Τα αρθροσκόπια έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών σε επεμβάσεις στο γόνατο, τον αστράγαλο (ποδοκνημική άρθρωση), τον ώμο και γενικότερα σε προβληματικές αρθρώσεις.

Η επέμβαση με τη βοήθεια ενδοσκοπίου συνεπάγεται συντομότερη παραμονή του ασθενούς στην κλινική και ταχύτερη ανάρρωση. Ουσιαστικά δεν δημιουργείται άνοιγμα στο δέρμα κατά την επέμβαση, παρά μόνο οπές, που επουλώνονται εύκολα.

Η οπτική, η επιστήμη που σχετίζεται με το ορατό φως, είναι το θεωρητικό εργαλείο για τη λειτουργία του ενδοσκοπίου. [29][30]

4.2 Βιοαισθητήρες για ανίχνευση χημικών και βιολογικών ουσιών

Οι βιοαισθητήρες είναι χημικοί αισθητήρες στους οποίους το σύστημα αναγνώρισης χρησιμοποιεί ένα βιοχημικό μηχανισμό (Cammann et al., 1996). Η πρώτη περιγραφή

βιοαισθητήρα παρουσιάστηκε από τους Clark και Lyons το 1962 και βασίστηκε σε ένα ενζυμικό ηλεκτρόδιο αποτελούμενο από ένα ακινητοποιημένο ένζυμο πάνω σε ηλεκτροχημικό ανιχνευτή. Από τότε ακολούθησαν εκτεταμένες μελέτες σχεδιασμού και εξέλιξης των βιοαισθητήρων με διαφορετικές προσεγγίσεις τόσο στο θέμα κατασκευής όσο και εφαρμογών. Ουσιαστικά η ανάπτυξή τους υπαγορεύτηκε από τις ανάγκες ιατρικής διάγνωσης και ταχείας ανάλυσης κλινικών δειγμάτων (Γηρούση, 2015). Οι πολλές και διαφορετικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους βιοαισθητήρες έδωσαν τη δυνατότητα για πολλαπλούς ορισμούς. Οι ορισμοί των βιοαισθητήρων είναι κάπως διαφορετικοί από τους αντίστοιχους χημικούς, αλλά οι περισσότεροι από αυτούς συμφωνούν ότι η διάκριση τους από τους χημικούς αισθητήρες, προκύπτει από το γεγονός, ότι χρησιμοποιούν ένα βιολογικό ή βιοενεργειακό συστατικό όπως ένα ένζυμο, ένα αντίσωμα, ένα πολυνουκλεϊκό οξύ ή ακόμη και ολόκληρα κύτταρα ή λεπτά τμήματα ιστού ως στοιχείο υποδοχέα για μοριακή αναγνώριση. Παρόλα αυτά, ένας βιοαισθητήρας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ειδικός τύπος χημικού αισθητήρα. [31]

Όπως αναφέρει η βιοχημικός, οι βιοαισθητήρες είναι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τη μέτρηση βιολογικών ή χημικών ουσιών, μέσω της σύνδεσης ενός βιολογικού στοιχείου όπως το ένζυμο, το αντίσωμα ή το κύτταρο, με έναν αισθητήρα που μετατρέπει την αντίδραση ή την αλληλεπίδραση σε μετρήσιμο σήμα όπως ηλεκτρικό, οπτικό, θερμικό, κ.λπ. Χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση ασθενειών, όπως λοιμώξεις, καρκίνος, αυτοάνοσα νοσήματα, αλλεργίες, καθώς και για την παρακολούθηση παραμέτρων, όπως των επιπέδων γλυκόζης, φαρμάκων και βιολογικών δεικτών, στο πλαίσιο της προσαρμογής μιας θεραπείας. «Ο βιοαισθητήρας αξιοποιεί τις φυσικοχημικές αντιδράσεις των βιολογικών στοιχείων για να εντοπίσει δεδομένα μόρια ή οργανισμούς, προσφέροντας γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα» σημειώνει.

Στα είδη των βιοαισθητήρων περιλαμβάνονται οι ηλεκτροχημικοί, οι οπτικοί, οι θερμικοί, οι μηχανικοί, οι ακουστικοί, οι μαγνητικοί, οι αντιγονικοί, οι αντισωματικοί, οι κυτταρικοί και οι ενζυμικοί, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση βιολογικών ή χημικών στοιχείων μέσω διαφορετικών φυσικών μεθόδων. Άλλη κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση τη θέση τους, όπως αν είναι φορετοί, εμφυτευμένοι ή επιδερμικοί, αν τοποθετούνται σε συγκεκριμένο σημείο του σώματος ή του χώρου ή αν χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές συνθήκες.[32][33]

4.3 Παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών (θερμοκρασία, πίεση, οξυγόνωση)

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση στο μέσο προσδόκιμο ζωής του ανθρώπινου πληθυσμού, γεγονός που έχει ενισχύσει το ενδιαφέρον για τεχνολογίες παρακολούθησης της υγείας. Οι φορητές (wearable) ηλεκτρονικές συσκευές έχουν αναδειχθεί ως βασικά εργαλεία σε αυτή την κατεύθυνση, καθώς συνεισφέρουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στη διατήρηση της ευημερίας των ανθρώπων. Η παρακολούθηση της υγείας περιλαμβάνει την έγκαιρη διάγνωση ασθενειών, την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της θεραπείας σε πραγματικό χρόνο και τη συνεχή καταγραφή βασικών φυσιολογικών παραμέτρων.

Οι wearable συσκευές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά μέσα παρακολούθησης, όπως οι μετρητές πίεσης ή τα περιπατητικά ΗΚΓ. Είναι ελαφριές, φορητές και αλληλεπιδρούν άμεσα με το ανθρώπινο σώμα, καταγράφοντας με ακρίβεια καρδιακούς παλμούς, πίεση αίματος, κίνηση, ενδοφθάλμια πίεση και άλλες κρίσιμες παραμέτρους. Επιπλέον, παρέχουν συνεχή ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στη συμμόρφωση των ασθενών με τις ιατρικές οδηγίες και τα χρονοδιαγράμματα λήψης φαρμάκων.

Ως ασύρματες συσκευές, τα wearables έχουν τη δυνατότητα να στέλνουν τις πληροφορίες τους σε κεντρικούς κόμβους, όπως κινητά τηλέφωνα ή μικροελεγκτές, οι οποίοι με τη σειρά τους μπορούν να διαβιβάζουν τα δεδομένα σε ιατρικά κέντρα ή να τα εμφανίζουν άμεσα σε οθόνες για ιατρική αξιολόγηση. Το ενδιαφέρον για αυτά τα συστήματα έχει αυξηθεί κυρίως λόγω της ανάγκης για μακροχρόνια παρακολούθηση ασθενών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αυξημένος κίνδυνος οξέων επεισοδίων ή απαιτείται αξιολόγηση θεραπείας σε οικιακό ή εξωτερικό περιβάλλον.

Αν και τα συμβατικά περιπατητικά συστήματα είναι επαρκή για σύντομες περιόδους παρακολούθησης (μία ή δύο ημέρες), όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα Holter ΗΚΓ, δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται συνεχής παρακολούθηση για εβδομάδες ή μήνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα wearables παρέχουν τη βέλτιστη λύση, καθώς είναι διακριτικά, άνετα στη χρήση και μπορούν να ενσωματωθούν σε καθημερινά αντικείμενα όπως επίδεσμοι, ρούχα ή κοσμήματα (δαχτυλίδια, βραχιόλια κ.λπ.).

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποθηκεύονται προσωρινά στη συσκευή και μεταφέρονται περιοδικά σε βάσεις δεδομένων μέσω σύνδεσης στο διαδίκτυο. Στη συνέχεια, επεξεργάζονται με στόχο την έγκαιρη πρόγνωση πιθανών επιπλοκών ή την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων παρεμβάσεων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα wearable τεχνολογίας αποτελεί ο αισθητήρας σε μορφή δαχτυλιδιού, ένας παλμικός οξύμετρος που επιτρέπει τη συνεχή και διακριτική παρακολούθηση του καρδιακού ρυθμού και των επιπέδων οξυγόνου στο αίμα. Η συγκεκριμένη συσκευή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να φοριέται για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να προκαλεί ενόχληση, ενώ ενσωματώνει πομποδέκτη χαμηλής

κατανάλωσης και υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία με σταθμό βάσης. Αυτό επιτρέπει την απομακρυσμένη ρύθμιση της συσκευής και την ανά πάσα στιγμή μεταφόρτωση των δεδομένων που συλλέγονται.



Εικόνα 4-3: Παράδειγμα wearable συστήματος[37]

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4-3) απεικονίζεται σχηματικά ένα σύστημα για την παρακολούθηση στο οικιακό και κοινωνικό περιβάλλον. Εμφανίζεται ένα άτομο όπου κάνει καταμέτρηση πίεσης στο σπίτι. Επίσης ελέγχεται ο καρδιακός ρυθμός και ο ρυθμός αναπνοής όπως φαίνεται και στην εικόνα. Ένα κινητό τηλέφωνο καταγράφει τα δεδομένα και ταυτόχρονα λειτουργεί σαν πύλη για επικοινωνία με απομακρυσμένη τοποθεσία μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας ή Internet.[34][35][36]

Στο πλαίσιο της παρακολούθησης της ανθρώπινης υγείας, ένα σύγχρονο έξυπνο wearable σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει ποικιλία συσκευών, οι οποίες είτε φοριούνται είτε εμφυτεύονται στο σώμα. Οι συσκευές αυτές ενδέχεται να περιλαμβάνουν αισθητήρες, ενεργοποιητές, ευφυή υφάσματα, τροφοδοτικά, μονάδες επεξεργασίας, συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, διεπαφές χρήστη, συσκευές πολυμέσων, καθώς και το απαραίτητο λογισμικό, αλγόριθμους συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, αλλά και υποσυστήματα υποστήριξης αποφάσεων.

Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα μπορεί να καταγράφει πληθώρα βιομετρικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία σώματος και δέρματος, ο καρδιακός ρυθμός, η αρτηριακή πίεση, ο κορεσμός οξυγόνου στο αίμα, ο ρυθμός αναπνοής, καθώς και να εκτελεί ηλεκτροκαρδιογραφική (ΗΚΓ) και ηλεκτροεγκεφαλογραφική (ΗΕΓ) καταγραφή.

Τα συλλεγόμενα δεδομένα μεταδίδονται, μέσω ασύρματου αισθητηριακού δικτύου (WSN – Wireless Sensor Network), είτε προς έναν ενδιάμεσο κόμβο, όπως έναν προσωπικό ψηφιακό βοηθό (PDA), είτε απευθείας σε κεντρικό ιατρικό σύστημα για αξιολόγηση από επαγγελματίες υγείας. Ωστόσο, η χρήση ασύρματων διασυνδέσεων ενέχει κινδύνους για την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των δεδομένων υγείας, καθώς είναι δυνατόν να παραβιαστούν από κακόβουλους χρήστες ή επιτιθέμενους μέσω επιθέσεων δικτύου.

Η προστασία των διακινούμενων δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλων κρυπτογραφικών τεχνικών, οι οποίες διασφαλίζουν την ακεραιότητα και εμπιστευτικότητα της πληροφορίας κατά τη μετάδοση. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι γιατροί έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν, να αξιολογούν και, όπου απαιτείται, να παρεμβαίνουν εγκαίρως στη θεραπευτική διαχείριση του ασθενούς, βασιζόμενοι σε συνεχώς ενημερωμένα και ασφαλή δεδομένα.

Ένας ολοένα και πιο σημαντικός τύπος τέτοιων συστημάτων είναι η έξυπνη ιατρική wearable συσκευή, η οποία προσφέρει δυνατότητες πραγματικού χρόνου για καταγραφή, επεξεργασία και παροχή άμεσης ανατροφοδότησης τόσο προς το ιατρικό προσωπικό όσο και προς τον ίδιο τον χρήστη. Τέτοιες λύσεις βρίσκουν εφαρμογή όχι μόνο σε ασθενείς, αλλά και σε αθλητές και υγιή άτομα που επιθυμούν προληπτική παρακολούθηση της φυσικής τους κατάστασης.[34][35][36][37]

4.4 Χρήση σε μη επεμβατικές και ελάχιστα επεμβατικές διαγνωστικές μεθόδους

Η εξέλιξη των διαγνωστικών τεχνολογιών στην ιατρική απαιτεί μεθόδους που είναι ταυτόχρονα ακριβείς, ασφαλείς και όσο το δυνατόν λιγότερο επεμβατικές για τον ασθενή. Οι αισθητήρες οπτικών ινών ανταποκρίνονται άριστα σε αυτή την πρόκληση, προσφέροντας δυνατότητες συνεχούς παρακολούθησης βιολογικών παραμέτρων χωρίς σημαντική ενόχληση ή κίνδυνο. Η χρήση τους σε μη επεμβατικές και ελάχιστα επεμβατικές μεθόδους καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπου η άμεση πρόσβαση σε εσωτερικά όργανα ή ζωτικά σημεία του σώματος είναι δύσκολη ή ανεπιθύμητη.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν μια σειρά από χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδανικές για χρήση σε ιατρικές εφαρμογές:

- Μικρό μέγεθος και ευελιξία: Επιτρέπουν την εισαγωγή τους σε στενούς ή δύσκολα προσβάσιμους ανατομικούς χώρους.
- Ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές: Δεν επηρεάζονται από τον εξοπλισμό απεικόνισης ή άλλες ηλεκτρικές συσκευές.
- Ασφάλεια και βιοσυμβατότητα: Δεν εκπέμπουν ακτινοβολία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια ακόμη και κοντά σε ευαίσθητους ιστούς.
- Υψηλή ευαισθησία: Ανιχνεύουν πολύ μικρές μεταβολές σε φυσιολογικές παραμέτρους όπως η πίεση, η θερμοκρασία ή η χημική σύσταση.

Με βάση τα χαρακτηριστικά τους αλλά και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν μπορούμε να εντοπίσουμε σε ποιες περιοχές της ιατρικής χρησιμοποιούνται ανώδυνα και μη επεμβατικά για καλύτερη αποτελεσματικότητα της όλης θεραπείας.

- Φασματοσκοπία Εγγύς Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (NIRS)

Η NIRS χρησιμοποιεί αισθητήρες οπτικών ινών για τη μέτρηση της οξυγόνωσης των ιστών μέσω της φασματικής ανάλυσης του φωτός που διαπερνά το δέρμα. Η μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως:

- ✓ Στην παρακολούθηση εγκεφαλικής λειτουργίας σε νεογνά και ασθενείς υπό αναισθησία.
- ✓ Στην αθλητική ιατρική για εκτίμηση της μυϊκής απόδοσης.
- ✓ Σε επεμβάσεις καρδιάς για την παρακολούθηση της αιμάτωσης.

➤ Ανίχνευση Καρδιοαναπνευστικών Σημάτων

Οπτικές ίνες ενσωματωμένες σε φορητές συσκευές, όπως "έξυπνα" ρούχα ή επιθέματα, χρησιμοποιούνται για την καταγραφή:

- ✓ Καρδιακού ρυθμού
- ✓ Ρυθμού αναπνοής
- ✓ Θερμοκρασίας επιφανειακών ιστών

Οι εφαρμογές αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην κατ' οίκον παρακολούθηση ασθενών και στη φροντίδα ηλικιωμένων.

Στη συνέχεια αναγνωρίσαμε ορισμένες Ελάχιστες Επεμβατικές Εφαρμογές στις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους αισθητήρες. Πρόκειται για τεχνικές που απαιτείται η ελάχιστη εφαρμογή για την φροντίδα και παρακολούθηση των ασθενών που υπόκεινται σε αυτές τις εξετάσεις.

➤ Ενδοσκοπικές Διαγνωστικές Τεχνικές

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τεχνικές όπως η Οπτική Συνεκτική Τομογραφία (OCT) και η φασματοσκοπία Raman για την απεικόνιση και τη χημική ανάλυση ιστών. Η εφαρμογή τους είναι κρίσιμη σε:

- Γαστρεντερολογικές ενδοσκοπήσεις
- Ουρολογικές εξετάσεις
- Έγκαιρη ανίχνευση καρκινικών αλλοιώσεων

➤ Μέτρηση Πίεσης και Θερμοκρασίας με Καθετήρες

Οι αισθητήρες τύπου Fiber Bragg Grating (FBG) ενσωματώνονται σε καθετήρες και επιτρέπουν τη μέτρηση:

- Ενδοαγγειακής πίεσης (π.χ. σε καρδιολογικές εφαρμογές)
- Πίεσης εντός της ουροδόχου κύστης ή του εγκεφαλονωτιαίου υγρού
- Τοπικής θερμοκρασίας ιστών κατά τη διάρκεια επεμβάσεων

Αντίστοιχα, οπτικοί αισθητήρες pH μπορούν να παρέχουν δεδομένα για το γαστρικό περιβάλλον ή τη μικροβιακή δραστηριότητα.

Οι βασικότερες τεχνολογίες οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν:

- FBG (Fiber Bragg Grating): Ανταποκρίνονται σε μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης με πολύ μεγάλη ακρίβεια.
- Interferometric Sensors: Ικανότητα ανίχνευσης εξαιρετικά μικρών μετατοπίσεων ή δονήσεων.
- Φθορίζοντες και Raman αισθητήρες: Χρησιμοποιούνται για τη χημική ανάλυση ιστών ή υγρών του σώματος.

Η ενσωμάτωση των αισθητήρων οπτικών ινών σε μη επεμβατικές και ελάχιστα επεμβατικές διαγνωστικές διαδικασίες αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στη σύγχρονη ιατρική πρακτική. Παρέχουν τη δυνατότητα για ασφαλή, αξιόπιστη και συνεχή παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων, διευκολύνοντας τόσο τη διάγνωση όσο και τη θεραπευτική αντιμετώπιση, ιδιαίτερα σε ευπαθείς ομάδες και σε καταστάσεις όπου απαιτείται ελαχιστοποίηση των κινδύνων που σχετίζονται με την κλασική επεμβατική ιατρική.[38][39][40][41]

4.5 Μελλοντικές εξελίξεις στην ιατρική τεχνολογία με αισθητήρες οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στις μελλοντικές εξελίξεις της ιατρικής τεχνολογίας, προσφέροντας νέες δυνατότητες για διαγνωστική παρακολούθηση, θεραπεία και χειρουργικές επεμβάσεις.

Η ραγδαία πρόοδος της ιατρικής τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει ενισχυθεί σημαντικά από την ανάπτυξη και ενσωμάτωση αισθητήρων οπτικών ινών (Fiber Optic Sensors – FOS). Πρόκειται για τεχνολογία που αξιοποιεί τις ιδιότητες της διάδοσης του φωτός μέσα από οπτικές ίνες για την ανίχνευση φυσικών, χημικών ή βιολογικών παραμέτρων με υψηλή ακρίβεια όπως ανέφερε και ο Lee στην έρευνα του το 2003. Οι αισθητήρες αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος, βιοσυμβατότητα, ευκαμψία, αντοχή σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και δυνατότητα χρήσης ακόμη και σε ακραία περιβάλλοντα, όπως το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος (Mishra et al., 2015). Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, οι οπτικές ίνες αποτελούν πυρήνα πολλών καινοτόμων ιατρικών εφαρμογών του μέλλοντος (Pospori et al., 2020). Ας δούμε όμως αναλυτικά που χρησιμοποιούνται αυτές οι τεχνολογίες.

1. Ελάχιστα Επεμβατική Διάγνωση και Παρακολούθηση

Η σύγχρονη ιατρική κατευθύνεται προς ελάχιστα επεμβατικές ή μη επεμβατικές μεθόδους διάγνωσης και παρακολούθησης ασθενών. Οι οπτικοί αισθητήρες μπορούν να

ενσωματωθούν σε μικροκαθετήρες, βελόνες ή χειρουργικά εργαλεία, προσφέροντας συνεχή μέτρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση, το pH ή η συγκέντρωση βιοδεικτών, με ελάχιστη ενόχληση για τον ασθενή (Lim et al., 2020). Οι τεχνολογίες αυτές έχουν ήδη ξεκινήσει να εφαρμόζονται σε ενδοσκοπικές ή καρδιολογικές επεμβάσεις, ενώ μελλοντικά προβλέπεται η ευρεία διάδοσή τους στην κλινική πράξη.

2. Νευροπαρακολούθηση και Εγκεφαλική Δραστηριότητα

Η δυνατότητα τοποθέτησης αισθητήρων σε περιοχές του εγκεφάλου, σε συνδυασμό με την ευαισθησία των FOS, επιτρέπει την καταγραφή εγκεφαλικής πίεσης, θερμοκρασίας και χημικής σύστασης. Ειδικά οι αισθητήρες τύπου Fiber Bragg Grating (FBG) προσφέρουν εξαιρετική ακρίβεια σε νευροχειρουργικές εφαρμογές, ανοίγοντας τον δρόμο για εξελιγμένες μεθόδους παρακολούθησης νευρολογικών παθήσεων (Baldini et al., 2012).

3. Καρδιαγγειακές Εφαρμογές

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ήδη σε συστήματα όπως το Optical Coherence Tomography (OCT) για την απεικόνιση του εσωτερικού των αγγείων. Περαιτέρω εφαρμογές περιλαμβάνουν αισθητήρες ενσωματωμένους σε stents ή ενδοαγγειακούς καθετήρες, οι οποίοι επιτρέπουν την παρακολούθηση της πίεσης και της ροής του αίματος σε πραγματικό χρόνο (Lim et al., 2020), αυξάνοντας την ασφάλεια κατά και μετά την επέμβαση.

4. Έξυπνες και Φορητές Συσκευές Υγείας

Η συνεχής παρακολούθηση ασθενών με χρόνιες παθήσεις αποτελεί βασική πρόκληση της σύγχρονης ιατρικής. Οι αισθητήρες οπτικών ινών ενσωματώνονται ήδη σε φορητές ή εμφυτεύσιμες συσκευές, που σε συνδυασμό με τεχνητή νοημοσύνη και υπολογιστικά συστήματα, μπορούν να παρέχουν προγνωστικά μοντέλα για την υγεία του ασθενούς (Pospori et al., 2020). Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν παρακολούθηση διαβήτη, καρδιακής ανεπάρκειας ή ακόμα και πρόληψη ανίχνευση λοιμώξεων.

5. Βιολογική και Χημική Ανάλυση In Vivo

Οι οπτικές ίνες μπορούν να τροποποιηθούν ώστε να λειτουργούν ως φασματοσκοπικοί ή φθοριμετρικοί αισθητήρες, ικανοί να ανιχνεύουν ουσίες όπως γλυκόζη, γαλακτικό οξύ ή ορμόνες μέσα στο ανθρώπινο σώμα (Baldini et al., 2012). Μελλοντικά, αυτό θα επιτρέψει εξατομικευμένη παρακολούθηση και φαρμακευτική αγωγή, με συνεχή μέτρηση βιοδεικτών και άμεση ρύθμιση της θεραπείας.

6. Οπτική Βιοψία και Απεικόνιση Ιστών

Η χρήση τεχνικών όπως η Raman spectroscopy ή η φθορισμομετρία μέσω οπτικών ινών επιτρέπει τη λήψη "οπτικής βιοψίας", δηλαδή την διάγνωση ιστών χωρίς την ανάγκη για χειρουργική αφαίρεση δείγματος (Zhao et al., 2014). Αυτό οδηγεί σε ταχύτερη διάγνωση,

μείωση των επεμβάσεων και ενίσχυση της ακρίβειας στην αντιμετώπιση καρκινικών αλλοιώσεων.

7. Έξυπνα Υφάσματα και Ιατρικά Επιθέματα

Μια αναδυόμενη τάση είναι η ενσωμάτωση οπτικών ινών σε έξυπνα ρούχα ή επιθέματα, τα οποία μπορούν να παρακολουθούν παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η πίεση ή η υγρασία τραυμάτων (Rajan, 2017). Οι τεχνολογίες αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην τηλεϊατρική και στην κατ' οίκον φροντίδα ασθενών με χρόνια τραύματα ή μετεγχειρητικές ανάγκες.

8. Ρομποτική και Χειρουργική Ακρίβειας

Η ενσωμάτωση αισθητήρων οπτικών ινών σε ρομποτικά χειρουργικά συστήματα προσφέρει απτική ανάδραση (haptic feedback) και ακριβή καταγραφή πιέσεων και δυνάμεων κατά τη διάρκεια επεμβάσεων. Η τεχνολογία αυτή βελτιώνει την ακρίβεια, την ασφάλεια και τα αποτελέσματα των επεμβάσεων (Cusano et al., 2018).

Ουσιαστικά οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν βασικό πυλώνα των μελλοντικών εξελίξεων στην ιατρική τεχνολογία, προσφέροντας μοναδικές δυνατότητες για ακριβή, εξατομικευμένη και ελάχιστα επεμβατική φροντίδα. Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα αυτό αναμένεται να επιφέρει ριζικές αλλαγές τόσο στον τρόπο διάγνωσης όσο και στη θεραπευτική προσέγγιση, αναβαθμίζοντας συνολικά την ποιότητα της υγειονομικής περίθαλψης.[42][43][44][45][46][47][48][49]

5 Συγκριτική Ανάλυση και Μελλοντικές Προοπτικές

5.1 Σύγκριση αισθητήρων οπτικών ινών με παραδοσιακές τεχνολογίες

Οι αισθητήρες αποτελούν βασικό στοιχείο στην ιατρική τεχνολογία, τη βιομηχανία, την περιβαλλοντική παρακολούθηση και τις τηλεπικοινωνίες. Παραδοσιακά, χρησιμοποιούνται αισθητήρες βασισμένοι σε ηλεκτρικά, μαγνητικά ή πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα. Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες, οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Optic Sensors – FOS) έχουν αποκτήσει αυξανόμενη σημασία, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Στον πίνακα και την ανάλυση που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια συγκριτική επισκόπηση μεταξύ των FOS και των παραδοσιακών τεχνολογιών.

Κριτήριο	Αισθητήρες οπτικών ινών	Παραδοσιακοί αισθητήρες
Ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές	Πλήρης ανοσία λόγω της χρήσης φωτός	Ευαίσθητοι σε παρεμβολές, ιδίως σε βιομηχανικά ή ιατρικά περιβάλλοντα
Μέγεθος και ευκαμψία	Πολύ μικροί και ευέλικτοι, κατάλληλοι για εμφυτεύσεις	Συνήθως μεγαλύτεροι και άκαμπτοι
Βιοσυμβατότητα	Υψηλή – ιδανική για εφαρμογές in vivo	Περιορισμένη, απαιτείται προστασία, απομόνωση
Πολυπαραμετρική μέτρηση	Δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης πολλών παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, pH)	Συνήθως ένας αισθητήρας ανά παράμετρο
Εμβέλεια μετάδοσης σήματος	Μεγάλη – ελάχιστες απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις	Περιορισμένη – απαιτεί ενισχυτές σήματος
Αντοχή σε ακραία περιβάλλοντα	Πολύ ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες, χημικά και ακτινοβολία	Περιορισμένη αντοχή
Κατανάλωση ενέργειας	Εξαιρετικά χαμηλή	Απαιτούν συνεχή ηλεκτρική τροφοδοσία
Κόστος	Υψηλότερο αρχικό κόστος, μειώνεται με τη μαζική παραγωγή	Χαμηλότερο, με ευρεία εμπορική διαθεσιμότητα
Ευκολία ενσωμάτωσης σε συστήματα	Εύκολη ενσωμάτωση σε φορητές ή εμφυτεύσιμες συσκευές	Περιορισμοί λόγω μεγέθους ή ευαισθησίας

Όπως βλέπουμε και από τον πίνακα που παραθέτουμε πιο πάνω οι αισθητήρες οπτικών ινών πλεονεκτούν σημαντικά σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, βιοσυμβατότητα και λειτουργία σε αντίξοες συνθήκες. Το βασικό πλεονέκτημα τους είναι ότι χρησιμοποιούν φως αντί για ρεύμα, καθιστώντας τους ανοσοποιημένους στις

ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές – ένα ιδιαίτερα κρίσιμο χαρακτηριστικό για ιατρικές συσκευές ή συστήματα λειτουργούντα κοντά σε ηλεκτροχειρουργικά εργαλεία ή απινιδωτές (Lee, 2003).

Η ευκαμψία και το μικροσκοπικό μέγεθος των FOS επιτρέπουν την ενσωμάτωσή τους σε φορητές ή εμφυτεύσιμες διατάξεις, ενώ επιτρέπουν την προσπέλαση δύσκολα προσβάσιμων περιοχών του σώματος (π.χ. αγγεία, εγκέφαλος) με ελάχιστη επεμβατικότητα (Lim et al., 2020).

Αντίθετα, οι παραδοσιακοί αισθητήρες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος, ευρεία διαθεσιμότητα και απλή χρήση, γι' αυτό και εξακολουθούν να κυριαρχούν σε πολλές εφαρμογές γενικής χρήσης, όπως στην καταγραφή θερμοκρασίας ή πίεσης σε απλές ιατρικές ή οικιακές συσκευές.

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι οι FOS μπορούν να συνδυαστούν με τεχνολογίες φασματοσκοπίας, Raman και Bragg gratings, προσφέροντας εξελιγμένες λειτουργίες όπως οπτική βιοψία ή πολυπαραμετρική διάγνωση σε πραγματικό χρόνο (Baldini et al., 2012; Cusano et al., 2018).

Συμπερασματικά, παρότι οι παραδοσιακοί αισθητήρες παραμένουν απαραίτητοι για πολλές απλές ή οικονομικά αποδοτικές εφαρμογές, οι αισθητήρες οπτικών ινών αντιπροσωπεύουν το μέλλον των προηγμένων τεχνολογικών λύσεων, ιδίως στον ιατρικό τομέα. Η δυνατότητα χρήσης τους σε κρίσιμες, ακραίες ή βιολογικά ευαίσθητες εφαρμογές, τους καθιστά μοναδικούς σε επιδόσεις, αξιοπιστία και ασφάλεια.[42][43][44][45]

5.2 Προκλήσεις και περιορισμοί στην υιοθέτηση της τεχνολογίας

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Optic Sensors – FOS), η ευρεία υιοθέτησή τους στην ιατρική και γενικότερα στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας συνοδεύεται από προκλήσεις και περιορισμούς τεχνικής, οικονομικής και κανονιστικής φύσης. Η κατανόηση αυτών των περιορισμών είναι κρίσιμη για την επιτυχή ένταξή τους σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και για την καθιέρωσή τους ως κυρίαρχη τεχνολογία στο μέλλον.

Η κατασκευή αισθητήρων οπτικών ινών απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες μικροκατεργασίας και μεγάλη ακρίβεια. Η ευαισθησία και αξιοπιστία των FOS εξαρτώνται από μικροδομές όπως τα Bragg gratings, των οποίων η κατασκευή απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους φωτολιθογραφίας ή laser εγγραφής (Cusano et al., 2018). Επιπλέον, οι αισθητήρες είναι συχνά εύθραυστοι και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στη μηχανική τους ενσωμάτωση σε ιατρικές ή φορητές συσκευές.

Ένας από τους βασικούς περιορισμούς είναι το υψηλό αρχικό κόστος ανάπτυξης, κατασκευής και ενσωμάτωσης των FOS σε εμπορικές εφαρμογές. Η ανάγκη για εξειδικευμένα υλικά (όπως ειδικές επικαλύψεις ή πολυμερικά περιβλήματα) και η περιορισμένη κλίμακα παραγωγής αυξάνουν το κόστος σε σύγκριση με παραδοσιακούς

αισθητήρες (Mishra et al., 2015). Αν και το κόστος μειώνεται με την πρόοδο της τεχνολογίας, παραμένει σημαντικό εμπόδιο για την υιοθέτηση σε αγορές με περιορισμένο προϋπολογισμό, όπως δημόσια νοσοκομεία ή αναπτυσσόμενες χώρες.

Η μακροχρόνια αξιοπιστία και η σταθερότητα των FOS σε πραγματικές συνθήκες (π.χ. υγρασία, χημικές ουσίες, κίνηση του ασθενούς) δεν έχουν ακόμη πλήρως τεκμηριωθεί για όλες τις ιατρικές εφαρμογές (Pospori et al., 2020). Επιπλέον, απαιτούνται πρότυπα διακρίβωσης και διεθνείς προδιαγραφές, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις βρίσκονται ακόμη υπό διαμόρφωση. Αυτό δυσχεραίνει την ευρεία αποδοχή τους από τους κατασκευαστές ιατροτεχνολογικού εξοπλισμού και τις ρυθμιστικές αρχές.

Η έγκριση νέων ιατρικών τεχνολογιών, όπως οι FOS, απαιτεί εκτεταμένες κλινικές δοκιμές και συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια όπως το FDA (ΗΠΑ) και ο Κανονισμός 2017/745 (MDR) της Ε.Ε. για τα ιατροτεχνολογικά προϊόντα. Οι διαδικασίες αυτές είναι συχνά χρονοβόρες, δαπανηρές και απαιτούν υψηλό βαθμό τεκμηρίωσης, καθυστερώντας τη διάθεση νέων προϊόντων στην αγορά (Lim et al., 2020).

Η εκπαίδευση και εξοικείωση του προσωπικού (ιατρικού, νοσηλευτικού και τεχνικού) με την τεχνολογία των οπτικών ινών αποτελεί προϋπόθεση για την επιτυχή υιοθέτηση. Η πολυπλοκότητα στη λειτουργία και στη συντήρηση των συστημάτων αυτών μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου το προσωπικό δεν διαθέτει προηγούμενη εμπειρία με οπτοηλεκτρονικές διατάξεις (Rajan, 2017).

Η ενσωμάτωση των FOS απαιτεί συμβατότητα με τα υπάρχοντα συστήματα μέτρησης, λογισμικά και ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου. Σε πολλές περιπτώσεις, η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών απαιτεί αντικατάσταση υλικού ή την ανάπτυξη νέων πλατφορμών, γεγονός που ενισχύει το κόστος και την πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες αισθητήρων, οι FOS βρίσκονται ακόμη σε στάδιο τεχνολογικής ωρίμανσης (Technology Readiness Level - TRL 5-7) για πολλές κρίσιμες ιατρικές εφαρμογές. Πολλές τεχνικές και υλοποιήσεις παραμένουν σε ερευνητικό ή πιλοτικό στάδιο και δεν έχουν ακόμα φτάσει σε επίπεδο εμπορικής αξιοποίησης.

Παρά τα εμφανή πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών, η υιοθέτησή τους σε ευρεία κλίμακα απαιτεί την υπέρβαση σημαντικών τεχνικών, οικονομικών και ρυθμιστικών εμποδίων. Η αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών μέσω ερευνητικής καινοτομίας, ανάπτυξης διεθνών προτύπων, μείωσης κόστους και εκπαίδευσης χρηστών, θα καθορίσει τον ρυθμό και την επιτυχία της μετάβασης προς τη νέα εποχή των FOS στην ιατρική τεχνολογία.[43][45][46][47][48]

5.3 Μελλοντικές τάσεις και εξελίξεις στον τομέα των αισθητήρων οπτικών ινών

Οι μελλοντικές τάσεις στον τομέα των αισθητήρων οπτικών ινών κινούνται προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης νέων υλικών, την αύξηση της ευαισθησίας και ακρίβειας των μετρήσεων, καθώς και την επέκταση των εφαρμογών σε νέους τομείς όπως η κβαντική

επικοινωνία και η βιοϊατρική. Επίσης συνδέονται άμεσα και με τις τεχνολογικές και βιομηχανικές ανάγκες για πιο έξυπνες, ακριβείς και ολοκληρωμένες λύσεις μέτρησης. Θα μπορούσαμε όλα αυτά να τα συνοψίσουμε σε πέντε βασικούς άξονες:

- 1) Ενσωμάτωση σε συστήματα έξυπνων υποδομών (Smart Infrastructure)
 - Ανάπτυξη αισθητήρων που ενσωματώνονται σε δίκτυα IoT για συνεχή, απομακρυσμένη παρακολούθηση γεφυρών, κτιρίων, σιδηροδρομικών γραμμών κ.λπ.
 - Χρήση Distributed Optical Fiber Sensing (DOFS) για παρακολούθηση μεγάλων αποστάσεων με ένα μόνο καλώδιο οπτικής ίνας.
 - Συνδυασμός με τεχνητή νοημοσύνη για πρόβλεψη και πρόληψη βλαβών.
- 2) Μικροκλίμακα και φορητότητα (Miniaturization & Portability)
 - Ανάπτυξη μικρο- και νανο-οπτικών αισθητήρων με υψηλή ευαισθησία για βιοϊατρικές εφαρμογές.
 - Ενσωμάτωση σε φορητές συσκευές για παρακολούθηση υγείας και περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο.
 - Ευέλικτες οπτικές ίνες από πολυμερή για χρήση σε φορετά συστήματα (wearables).
- 3) Προηγμένα υλικά και τεχνικές κατασκευής
 - Αξιοποίηση φωτονικών κρυστάλλων και ειδικών επιστρώσεων για αυξημένη ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας, πίεσης και χημικών ουσιών.
 - Ανάπτυξη γραμμικών και μη γραμμικών οπτικών ινών για καλύτερη ανίχνευση σε αντίξοα περιβάλλοντα.
 - Χρήση 3D εκτύπωσης για την παραγωγή εξατομικευμένων αισθητήρων.
- 4) Πολυπαραμετρικοί και υβριδικοί αισθητήρες
 - Αισθητήρες που μετρούν ταυτόχρονα πολλές φυσικές και χημικές παραμέτρους (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, δόνηση, υγρασία).
 - Συνδυασμός οπτικών ινών με άλλες τεχνολογίες, όπως MEMS ή ηλεκτροχημικούς αισθητήρες, για υβριδικά συστήματα υψηλής απόδοσης.
- 5) Εξάπλωση σε νέες αγορές και εφαρμογές
 - Στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές για ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.
 - Παρακολούθηση περιβάλλοντος για ανίχνευση ρύπων και πρόληψη φυσικών καταστροφών (σεισμοί, κατολισθήσεις).
 - Χρήση σε υποθαλάσσια δίκτυα για εντοπισμό διαρροών ή παρακολούθηση θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Το μέλλον των αισθητήρων οπτικών ινών δεν περιορίζεται μόνο στη βελτίωση της ευαισθησίας και της ακρίβειας· μετατοπίζεται προς έξυπνα, ολοκληρωμένα και προσαρμοστικά συστήματα που συνεργάζονται με AI, Big Data και IoT.[50][51]

6 Συμπεράσματα

6.1 Συνοπτική ανασκόπηση των ευρημάτων

Η ανάπτυξη αισθητήρων οπτικών ινών (Optical Fiber Sensors – OFS) έχει αναδειχθεί ως μία από τις πιο καινοτόμες κατευθύνσεις στη σύγχρονη τεχνολογία με εφαρμογές που εκτείνονται από την παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών έως την ιατρική διάγνωση και παρακολούθηση ασθενών. Οι βασικές τους αρχές λειτουργίας, όπως η περίθλαση Bragg (FBG) και η κατανεμημένη οπτική ανίχνευση (DOFS), επιτρέπουν τη μέτρηση φυσικών, μηχανικών και χημικών παραμέτρων με ακρίβεια, αξιοπιστία και αντοχή σε ακραία περιβάλλοντα (Li et al., 2022). Η χρήση ειδικών δομών, όπως οι C-type και οι υβριδικοί φωτονικοί κρύσταλλοι (PCF), προσφέρει βελτιωμένη ευαισθησία και δυνατότητες πολυπαραμετρικής μέτρησης (Li et al., 2024; Islam et al., 2019).

Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη αισθητήρων με μειωμένο μέγεθος, βελτιστοποιημένη γεωμετρία και προηγμένα υλικά, όπως νανοεπιστρώσεις για αύξηση της ευαισθησίας ή πολυμερικές ίνες για ευκαμψία και βιοσυμβατότητα (Kinet et al., 2023). Παράλληλα, η κατανεμημένη ανίχνευση θερμοκρασίας, δονήσεων και παραμόρφωσης μέσω τεχνικών Rayleigh, Raman και Brillouin (Hartog, 2015) επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση ενός καλωδίου οπτικής ίνας ως συνεχούς αισθητήρα μήκους χιλιομέτρων.

Στις έξυπνες υποδομές, οι OFS χρησιμοποιούνται για τη διαρκή παρακολούθηση γεφυρών, σιδηροδρομικών γραμμών και αγωγών. Η τεχνολογία DOFS, σε συνδυασμό με συστήματα Internet of Things (IoT), επιτρέπει την απομακρυσμένη συλλογή δεδομένων και την ανάλυσή τους σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης, είναι δυνατή η πρόβλεψη αστοχιών και η έγκαιρη συντήρηση, μειώνοντας σημαντικά το κόστος και τους κινδύνους (Li et al., 2024).

Στην ιατρική, οι αισθητήρες οπτικών ινών συμβάλλουν στη δημιουργία φορετών συσκευών (wearables) και ελάχιστα επεμβατικών διαγνωστικών εργαλείων. Εφαρμόζονται σε καθετήρες, ενδοσκόπια και συστήματα παρακολούθησης ζωτικών λειτουργιών, επιτρέποντας συνεχή μέτρηση καρδιακού ρυθμού, αναπνοής, θερμοκρασίας και οξυγόνωσης αίματος (Leal-Junior et al., 2024). Οι εύκαμπτες πολυμερικές οπτικές ίνες ενσωματώνονται σε υφάσματα και ιατρικά εμφυτεύματα, προσφέροντας άνεση και ασφάλεια στον ασθενή.

Όμως παρά την τεχνολογική πρόοδο, η εμπορική διάδοση των αισθητήρων οπτικών ινών περιορίζεται ακόμα από το υψηλό κόστος κατασκευής και την ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού. Ωστόσο, η έρευνα κινείται προς:

- Μικροκλίμακα και νανοκλίμακα για αυξημένη φορητότητα και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.
- Πολυπαραμετρική μέτρηση μέσω ενιαίων συστημάτων, μειώνοντας το πλήθος των απαιτούμενων αισθητήρων
- Υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν οπτικές ίνες με MEMS ή άλλες τεχνολογίες.

- ο Διασύνδεση με Big Data και AI για προγνωστική συντήρηση σε υποδομές και εξατομικευμένη ιατρική φροντίδα.

Συνολικά, οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την εξέλιξη των έξυπνων πόλεων και της σύγχρονης ιατρικής τεχνολογίας, προσφέροντας αξιόπιστες, ευέλικτες και κλιμακούμενες λύσεις που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.[50][51][52][53]

6.2 Η σημασία της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών για το μέλλον

Ολοκληρώνοντας αυτό το κομμάτι της πτυχιακής θα εστιάσουμε στην αξία, τον ρόλο και τις προοπτικές της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών, εντάσσοντάς την στο πλαίσιο των έξυπνων υποδομών και της ιατρικής.

Η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών (Optical Fiber Sensors – OFS) αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την πρόοδο της βιομηχανίας 4.0, των έξυπνων πόλεων και της προηγμένης ιατρικής φροντίδας. Ο συνδυασμός υψηλής ακρίβειας, ανθεκτικότητας σε ακραίες συνθήκες και δυνατότητας μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθιστά τις οπτικές ίνες μια τεχνολογία-κλειδί για εφαρμογές όπου η αξιοπιστία είναι ζωτικής σημασίας.

Στις έξυπνες υποδομές, οι OFS συμβάλλουν στη μετάβαση από την παραδοσιακή παθητική παρακολούθηση σε ενεργά συστήματα διαχείρισης κινδύνων. Η δυνατότητα καταμετρημένης μέτρησης σε μεγάλες αποστάσεις, η ενσωμάτωση με συστήματα Internet of Things (IoT) και η χρήση αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης για προγνωστική ανάλυση, επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων σε γέφυρες, σήραγγες, αγωγούς και δικτυακές εγκαταστάσεις ενέργειας. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη ασφάλεια, μείωση κόστους συντήρησης και παράταση της διάρκειας ζωής των κατασκευών.

Στην ιατρική, η σημασία τους είναι ακόμη πιο καθοριστική. Η ανάπτυξη φορετών συστημάτων παρακολούθησης και ελάχιστα επεμβατικών εργαλείων βασισμένων σε οπτικές ίνες ανοίγει τον δρόμο για προσωποποιημένη υγειονομική φροντίδα, όπου οι ασθενείς μπορούν να παρακολουθούνται συνεχώς χωρίς περιορισμούς στην κινητικότητα ή την άνεσή τους. Οι βιοσυμβατές και εύκαμπτες οπτικές ίνες διευρύνουν το φάσμα εφαρμογών σε κρίσιμες επεμβάσεις, τηλεϊατρική και μακροχρόνια παρακολούθηση χρόνιων παθήσεων.

Μελλοντικά, η τεχνολογία αυτή αναμένεται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς οι απαιτήσεις για πιο έξυπνες, ενεργειακά αποδοτικές και ασφαλείς υποδομές θα συνεχίσουν να αυξάνονται. Παράλληλα, η ανάγκη για πρόληψη αντί για αντιμετώπιση προβλημάτων στην ιατρική θα ενισχύσει την υιοθέτηση των OFS. Ο συνδυασμός τους με Big Data, AI και 5G/6G δίκτυα θα δημιουργήσει ένα νέο οικοσύστημα παρακολούθησης, όπου η πληροφορία θα ρέει άμεσα, επιτρέποντας ταχύτερες και ακριβέστερες αποφάσεις.

Συνοψίζοντας, οι αισθητήρες οπτικών ινών δεν αποτελούν απλώς μία ακόμη καινοτομία μέτρησης, αλλά ένα στρατηγικό τεχνολογικό εργαλείο που θα υποστηρίξει την επόμενη γενιά υποδομών και ιατρικών υπηρεσιών, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής και την ασφάλεια σε παγκόσμιο επίπεδο.[51][52][53]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/10083/%CE%9F%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%9C%CE%9F%CE%A5%20%CE%A7%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9D%CE%91%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. https://masters.ds.unipi.gr/technoeconomic/files/2011/06/Technoekonomiki_analysi_NGA_Ekalis-Katsinos.pdf
3. <http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3167/CIED%20%20%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%A3%20%CE%92%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%9B%CE%95%CE%99%CE%9F%CE%A3.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. Culshaw, B., & Dakin, J. (2013). Optical Fiber Sensors: Systems and Applications. Artech House.
5. Udd, E., & Spillman, W. B. (2011). Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Wiley.
6. Grattan, K. T. V., & Meggitt, B. T. (2000). Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals. Springer.
7. Kashyap, R. (2009). Fiber Bragg Gratings. Academic Press.
8. Measures, R. M. (2001). Structural Monitoring with Fiber Optic Technology. Academic Press.
9. [https://d10lvax23vl53t.cloudfront.net/images/Article_Images/ImageForArticle_1537\(1\).jpg](https://d10lvax23vl53t.cloudfront.net/images/Article_Images/ImageForArticle_1537(1).jpg)
10. Σπυριδούλα Μαργαρίτη | Ελευθέριος Στεργίου ,(2007), Τοπικά & Αστικά Δίκτυα(LAN-MAN), Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα
11. <https://gr.opticalpatchcable.com/news/fiber-optic-sensor-41286035.html>
12. <https://gr.opticalpatchcable.com/news/fiber-optic-sensor-41286035.html>
13. <https://gr.fibretx.com/info/basic-principles-of-fiber-optic-sensors-58216573.html>
14. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEMBFR4PVFG_0.html
15. <https://gr.egfueldispenser.com/news/active-vs-passive-sensors-51649891.html>
16. https://qr.tziola.gr/wp-content/uploads/2019/03/qr_1.1.pdf
17. https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/9202/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%9A%CE%AF%CF%84%CF%83%CE%B9%CE%BF%CF%85_S.pdf?sequence=1&isAllowed=y
18. https://issuu.com/etek/docs/etek_275_arch2023_digital/s/21996155
19. <https://www.synenergy-advisors.com/nea/parakolythisi-tis-domikis-akeraiotitas-metallikwn-kataskeiwn>
20. http://dide.zak.sch.gr/plinetza/tech/optikes_ines.pdf
21. Πέτσιος, Μ. (2008). Ανάπτυξη αλγορίθμων σύνθεσης δεδομένων συστήματος χωρικά κατανεμημένων διστατικών αισθητήρων ραντάρ για τρισδιάστατη παρακολούθηση πολλαπλών σύνθετα κινούμενων ιπτάμενων στόχων (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών).

22. <http://artemis.library.tuc.gr/MT2013-0021/MT2013-0021.pdf>
23. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5941/Kotsidis_Ilias_Master_Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
24. https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/7625/Kyriakaki_ice_46576.pdf?sequence=1&isAllowed=y
25. https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fbelisarius21.wordpress.com%2F2023%2F05%2F20%2F%25CF%2583%25CF%2585%25CF%2583%25CF%2584%25CE%25AE%25CE%25BC%25CE%25B1%25CF%2584%25CE%25B1%25CF%2585%25CF%2580%25CE%25AD%25CF%2581%25CF%2585%25CE%25B8%25CF%2581%25CE%25B7%25CF%2582-%25CE%25AD%25CF%2581%25CE%25B5%25CF%2585%25CE%25BD%25CE%25B1%25CF%2582-%25CE%25BA%25CE%25B1%25CE%25B9-%25CF%2580%25CE%25B1%25CF%2581%25CE%25B1-2%2F&psig=AOvVaw39mLAb_1EjyZr1uxFJfP2U&ust=1752578427115000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCLD06s2dvI4DFQAAAAAdAAAAABAL
26. Culshaw, B., & Kersey, A. D. (2008). Fiber-optic sensing: A historical perspective. *Journal of Lightwave Technology*, 26(9), 1064–1078. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.923886>
27. Grattan, K. T. V., & Sun, T. (2000). Fiber optic sensor technology: An overview. *Sensors and Actuators A: Physical*, 82(1–3), 40–61. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00368-4](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00368-4)
28. <https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/MED295/optical%20fibers%20endoscopy.pdf>
29. <https://bolanis.gr/karkinos-paxeos-enterou/>
30. <https://www.kekos.gr/2020/02/11/evteroskopisi/>
31. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/49899/PHD_Bratakou_final_b.pdf?sequence=1
32. <https://freader.ekt.gr/eadd/index.php?doc=45413&lang=el#p=12>
33. <https://www.iatronet.gr/article/132373/vioaisththres-kai-pseydh-apotelesmata-postha-veltiothei-h-akriveia-ton-test>
34. http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/17542/3/wearables%20athlites_final%20gia%20artemis-converted.pdf
35. Pantelopoulos, A., & Bourbakis, N. G. (2010). A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 40(1), 1–12. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2009.2032660>
36. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/48371/%CE%A4%CE%95%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%9F.pdf?sequence=1>
37. https://www.samsung.com/gr/apps/samsung-health-monitor/?srsltid=AfmBOooZyMCHWGNPYuup4oH9-1WVJsCXp3xBD8eVQrbII4_q_Q2cge9J

38. Culshaw, B. (2006). Optical fiber sensor technologies: opportunities and—perhaps—pitfalls. *Journal of Lightwave Technology*, 22(1), 39–50. <https://doi.org/10.1109/JLT.2003.820744>
39. Grattan, K. T. V., & Meggitt, B. T. (Eds.). (2000). *Optical fiber sensor technology: Advanced applications—Bragg gratings and distributed sensors* (Vol. 4). Springer.
40. Omer, A. E. (2021). Medical applications of fiber optic sensors: A review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 11(4), 30–37.
41. López-Higuera, J. M., Cobo, L. R., Incera, A. Q., & Cobo, A. (2011). Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 29(4), 587–608. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2107571>
42. Baldini, F., Brenci, M., Chiavaioli, F., Mignani, A. G., & Trono, C. (2012). Optical fiber gratings for high-performance biosensing. *Sensors*, 12(6), 8861–8892. <https://doi.org/10.3390/s120608861>
43. Cusano, A., Cutolo, A., & Albert, J. (Eds.). (2018). *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation*. Bentham Science Publishers.
44. Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 9(2), 57–79. [https://doi.org/10.1016/S1068-5200\(02\)00527-8](https://doi.org/10.1016/S1068-5200(02)00527-8)
45. Lim, Y. T., Lee, K. S., & Park, S. J. (2020). Optical fiber sensors for biomedical applications. *Optics and Lasers in Engineering*, 129, 106044. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106044>
46. Mishra, S. K., Tripathi, S. M., & Gupta, B. D. (2015). Fiber optic sensors: Principles and applications in biomedicine. In O. S. Wolfbeis (Ed.), *Chemical, Biological and Environmental Sensors for Health Applications* (pp. 197–220). Elsevier.
47. Pospori, A., Bashir, A., Liu, D., & Sugden, K. (2020). Optical fibre sensors for medical applications: A review of technology and trends. *Journal of Biomedical Optics*, 25(10), 100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.25.10.100901>
48. Rajan, G. (Ed.). (2017). *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*. CRC Press.
49. Zhao, Y., Zhao, J., & Xu, W. (2014). Fiber-optic sensors for biomedical applications. In *Biomedical Optical Sensors and Systems* (pp. 1–30). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16782-2>
50. Leal-Junior, A. G., Díaz, C. A. R., Marques, C., & Frizera, A. (2024). The role of optical fiber sensors in the new generation of healthcare devices: A review. *Sensors & Diagnostics*, 3(1), 168–190. <https://doi.org/10.1039/D4SD00032C>
51. Kinet, D., Mégret, P., Goossen, K. W., Qiu, L., Heider, D., & Caucheteur, C. (2023). Review of wearable optical fiber sensors for biomedical applications. *Optics & Laser Technology*, 164, 109423. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109423>
52. Li, C., Wei, H., Zhou, J., & Li, Z. (2022). Optical fiber sensors: Working principle, applications, and limitations. *Advanced Photonics Research*, 3(7), 2100371. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100371>

53. Li, X., Zhao, Y., Zhang, L., Liu, X., & Zhang, W. (2024). C-type optical fiber sensors: Structural optimization, sensing enhancement, and applications. *Photonics*, 12(7), 695. <https://doi.org/10.3390/photonics12070695>

[Οπισθόφυλλο. Κενή σελίδα]