



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εφαρμογή Αισθητήρων Οπτικών Ινών σε Βιομηχανικά
Περιβάλλοντα**

**Ειρήνη Κυριακάκη
Α.Μ. 46576**

**Επιβλέπων Καθηγητής
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ**

**ΑΙΓΑΛΕΩ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024**

Εξεταστική Επιτροπή Καθηγητών

Ημερομηνία Εξέτασης: 2/10/2024

Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης Επιβλέπων Καθηγητής	Παναγιώτης Καρκαζής Αναπλ. Καθηγητής	Νικόλαος Μυριδάκης Επικ. Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Κυριακάκη Ειρήνη του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 46576, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Η Δηλούσα,
Κυριακάκη Ειρήνη



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε, μετά από επίμονες προσπάθειες, στο ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο της Εφαρμογής Αισθητήρων Οπτικών Ινών σε Βιομηχανικά Περιβάλλοντα. Την προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου, ο κύριος Μαυρομμάτης Κωνσταντίνος, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους, και όλους τους δικούς μου ανθρώπους που ήταν δίπλα μου στο ταξίδι τής γνώσης, για την υποστήριξη και την κατανόησή τους, καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην σύγχρονη εποχή, οι αισθητήρες οπτικών ινών παίζουν καίριο ρόλο στην καθημερινότητά μας, καθώς και έχουν κατακτήσει τους περισσότερους τομείς της Βιομηχανίας. Η εφεύρεση και η εγκαθίδρυσή τους, οφείλονται στην ανάγκη κάλυψης σημαντικών προβλημάτων που ξεκίνησαν να προκύπτουν, εξαιτίας της ανεπάρκειας και της αδυναμίας των απλών συμβατικών αισθητήρων να ανταπεξέλθουν σε ποικίλες εφαρμογές της Βιομηχανίας, δυσκολεύοντας την διεκπεραίωση των διαφόρων διεργασιών.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών, με σκοπό την κατανόηση της προέλευσής τους, της δομής τους και των αρχών λειτουργίας τους, εστιάζοντας στις εφαρμογές τους σε διάφορα βιομηχανικά περιβάλλοντα, καθώς και στις υπηρεσίες που παρέχουν στο εκάστοτε πεδίο εφαρμογής τους.

Κατ' αρχάς, θα ξεκινήσουμε με την παρουσίαση του αισθητήρα, εξετάζοντας την σημασία του, καθώς και την δομή και την τοποθέτησή του ως επιμέρους οντότητα ενός συστήματος, με απλά παραδείγματα. Επίσης, θα αναφερθούμε στις ποικίλες υπηρεσίες που προσφέρει στα κυριότερα πεδία εφαρμογής στην Βιομηχανία.

Έπειτα, θα προχωρήσουμε με την μελέτη της οπτικής ίνας, αναλύοντας την έννοια και την δομή της, καθώς και την θέση της σε ένα σύστημα ή δίκτυο. Επιπροσθέτως, θα εξετάσουμε τις ιδιότητές της, και θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τις υπηρεσίες που προσφέρει στην Βιομηχανία.

Στην συνέχεια, θα μελετήσουμε διεξοδικά τον αισθητήρα οπτικών ινών, ξεκινώντας με την παρουσίαση της προέλευσής του, καθώς και την ιστορία της σύζευξης των δύο προαναφερθεισών τεχνολογιών που τον δημιούργησαν. Επίσης, θα εξετάσουμε την δομή και την τοποθέτησή του ως μέρος ενός συστήματος, καθώς και θα αναλύσουμε λεπτομερώς τις αρχές λειτουργίας του. Έπειτα, θα εστιάσουμε στις υπηρεσίες που παρέχει σε ποικίλους τομείς της Βιομηχανίας, καθώς και την πληθώρα πλεονεκτημάτων που διαθέτει.

Τέλος, θα συνοψίσουμε, ανακεφαλαιώνοντας τις πληροφορίες και τις γνώσεις που συλλέξαμε από τα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και παρουσιάζοντας συνοπτικά τις μελλοντικές προοπτικές για τους αισθητήρες οπτικών ινών.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Φωτονική

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: αισθητήρας, οπτική ίνα, αισθητήρας οπτικών ινών, Βιομηχανία, βιομηχανικά περιβάλλοντα

Abstract

In modern days, fiber-optic sensors play a crucial role in our everyday life, and have conquered the majority of industrial fields, as well. The invention and establishment of fiber-optic sensors are due to the necessity to resolve significant problems, which started to occur, due to the inefficiency and inadequacy of plain conventional sensors to cope in a variety of industrial applications, rendering the consummation of various processes difficult.

The goal of this thesis is the analysis of the fiber-optic sensor technology, for the purpose of understanding its origin, structure and operating principles, focusing on its applications in numerous industrial environments, as well as the services they provide in every field of application.

Firstly, we will present the sensor, by analyzing its meaning, as well as its structure and positioning as an individual entity of a system, with the use of simple examples. Moreover, we will refer to the various services it provides in the major industrial fields of application.

Furthermore, we will proceed with the analysis of the optical fiber, by dissecting its concept and structure, as well as its positioning as a part of a system or network. Additionally, we will examine its properties, and briefly present the services it provides in the Industry.

Consequently, we will elaborate on the fiber optic sensor, starting by presenting its origin, as well as the history of the conjunction of both of the aforementioned technologies that created it. Moreover, we will examine its structure and positioning as a part of a system, and analyze exhaustively its operating principles, as well. Furthermore, we will focus on the services it provides to various industrial sectors, as well as the numerous advantages it has to offer.

Ultimately, we will summarize the information and knowledge we gathered from the previous chapters, and briefly present the prospects of fiber-optic sensors.

Scientific Area: Photonics

Keywords: sensor, optical fiber, fiber-optic sensor, Industry, industrial environments

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	6
Περίληψη	8
Abstract	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Σχημάτων	16
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	17
Κεφάλαιο 2: Αισθητήρες	20
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Ορισμός.....	22
2.3 Τα Μέρη του Αισθητήρα.....	24
2.3.1 Συστήματα Μέτρησης.....	25
2.3.2 Συστήματα Ελέγχου.....	27
2.4 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων.....	29
2.4.1 Στατικά Χαρακτηριστικά.....	29
2.4.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά.....	36
2.5 Κατηγορίες Αισθητήρων.....	38
2.5.1 Αναλογικοί – Ψηφιακοί.....	38
2.5.2 Παθητικοί – Ενεργοί.....	39
2.6 Τύποι και Εφαρμογές Αισθητήρων.....	40
2.7 Συμπέρασμα.....	42
Κεφάλαιο 3: Οπτικές Ίνες	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Ορισμός.....	44
3.3 Η Δομή της Οπτικής Ίνας.....	46
3.3.1 Η Οπτική Ίνα.....	46
3.3.2 Το Καλώδιο Οπτικών Ινών.....	49
3.3.3 Το Δίκτυο Οπτικών Ινών.....	53
3.4 Κατηγορίες Οπτικών Ινών.....	56

3.5 Χαρακτηριστικά Οπτικών Ινών.....	59
3.6 Εφαρμογές Οπτικών Ινών.....	62
3.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Οπτικών Ινών.....	63
Κεφάλαιο 4: Αισθητήρες Οπτικών Ινών.....	67
4.1 Εισαγωγή.....	67
4.2 Ορισμός.....	69
4.3 Η Σύνδεση του Αισθητήρα με την Οπτική Ίνα.....	70
4.4 Τα Μέρη του Αισθητήρα Οπτικών Ινών.....	71
4.5 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων Οπτικών Ινών.....	75
4.6 Κατηγορίες Αισθητήρων Οπτικών Ινών.....	78
4.6.1 Ενδογενείς – Εξωγενείς.....	78
4.6.2 Έντασης – Φάσης – Μήκους Κύματος – Πόλωσης.....	83
4.6.3 Σημειακοί – Κατανεμημένοι.....	90
4.6.4 Χημικοί – Φυσικοί – Βιοϊατρικοί.....	92
4.6.5 Through-Beam – Retro-Reflective – Diffuse-Reflective.....	94
4.7 Τύποι και Εφαρμογές Αισθητήρων Οπτικών Ινών.....	96
4.9 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Αισθητήρων Οπτικών Ινών.....	109
4.10 Συμπέρασμα.....	114
Κεφάλαιο 5: Μελλοντικές Προοπτικές.....	115
Κεφάλαιο 6: Επίλογος.....	118
Βιβλιογραφία.....	121

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Ηχοεντοπισμός στην Νυχτερίδα.....	20
Εικόνα 2.2: Αισθητήριο Όργανο και Εγκέφαλος.....	21
Εικόνα 2.3: Τα Αισθητήρια Όργανα του Ανθρώπου.....	21
Εικόνα 2.4: Διάφοροι Τύποι Αισθητήρων.....	22
Εικόνα 2.5: Θερμόμετρα Τοίχου.....	26
Εικόνα 2.6: Το Θερμόμετρο.....	26
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα Διμεταλλικού Θερμοστάτη.....	28
Εικόνα 2.8: Θερμοστάτης σε Σόμπα.....	28
Εικόνα 2.9: Διμεταλλικός Θερμοστάτης Χώρου.....	28
Εικόνα 2.10: Η Νεκρή Ζώνη.....	30
Εικόνα 2.11: Διαφορά Πιστότητας και Ακρίβειας.....	31
Εικόνα 2.12: Απόκλιση Πραγματικών Σημείων Μέτρησης.....	34
Εικόνα 2.13: Περιοχή Γραμμικότητας Αισθητήρα.....	34
Εικόνα 2.14: Απόκλιση Αποτελεσμάτων Εξόδου μεταξύ Αύξησης & Μείωσης της Εισόδου..	35
Εικόνα 2.15: Απεικόνιση Ολίσθησης ως Γραφική Παράσταση Εύρους Τιμών ως προς τον Χρόνο....	36
Εικόνα 2.16: Κατηγορίες Κυματομορφών Σήματος Εισόδου.....	37
Εικόνα 2.17: Αναλογικό Σήμα.....	38
Εικόνα 2.18: Ψηφιακό Σήμα.....	39
Εικόνα 2.19: Διάφοροι Τύποι Αισθητήρων.....	40
Εικόνα 2.20: Εφαρμογές Αισθητήρων.....	42
Εικόνα 3.1: Διοχέτευση του Φωτός εντός τού Γυαλιού για Φωταγωγή.....	44
Εικόνα 3.2: Δέσμη Οπτικών Ινών (1).....	45
Εικόνα 3.3: Δέσμη Οπτικών Ινών (2).....	45
Εικόνα 3.4: Οπτικό Καλώδιο και Ηλεκτρικό Καλώδιο.....	46
Εικόνα 3.5: Ο Πυρήνας της Οπτικής Ίνας.....	47
Εικόνα 3.6: Η Λειτουργία της Επένδυσης της Οπτικής Ίνας.....	48
Εικόνα 3.7: Η Επένδυση της Οπτικής Ίνας.....	48
Κυριακάκη Ειρήνη	11

Εικόνα 3.8: Η Δομή της Οπτικής Ύνας.....	48
Εικόνα 3.9: Το Οπτικό Καλώδιο.....	49
Εικόνα 3.10: Καλώδιο Οπτικών Ινών (1).....	50
Εικόνα 3.11: Καλώδιο Οπτικών Ινών (2).....	50
Εικόνα 3.12: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου (1).....	51
Εικόνα 3.13: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου (2).....	51
Εικόνα 3.14: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου Tight Buffer.....	52
Εικόνα 3.15: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου Patch Cord.....	52
Εικόνα 3.16: Δομή του Οπτικού Καλωδίου Loose Buffer.....	53
Εικόνα 3.17: Διάγραμμα Δικτύου Οπτικών Ινών.....	55
Εικόνα 3.18: Η Μονότροπη Οπτική Ύνα.....	57
Εικόνα 3.19: Η Πολύτροπη Οπτική Ύνα.....	58
Εικόνα 3.20: Πολύτροπη Οπτική Ύνα Διακριτού και Βαθμιαίου Δείκτη.....	59
Εικόνα 4.1: Αξιοποίηση της Οπτικής Ύνας για Ανίχνευση σε Διάφορα Βιομηχανικά Περιβάλλοντα...	68
Εικόνα 4.2: Διοχέτευση του Φωτός από Πηγή εντός τής Οπτικής Ύνας.....	72
Εικόνα 4.3: Το Κύκλωμα του Φωτοπολλαπλασιαστή.....	74
Εικόνα 4.4: Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο.....	74
Εικόνα 4.5: Η Κατοπτρική Ανάκλαση.....	76
Εικόνα 4.6: Retro-Reflection.....	76
Εικόνα 4.7: Η Διάθλαση του Φωτός.....	77
Εικόνα 4.8: Η Πόλωση του Φωτός.....	78
Εικόνα 4.9: Ενδογενής Αισθητήρας Οπτικών Ινών.....	80
Εικόνα 4.10: Εξωγενής Αισθητήρας Οπτικών Ινών.....	82
Εικόνα 4.11: Παράδειγμα Αισθητήρα Έντασης.....	84
Εικόνα 4.12: Το κύμα Β προηγείται του Α κατά 180° ή π ακτίνια (μισό κύκλο).....	85
Εικόνα 4.13: Το κύμα Β προηγείται του Α κατά 90° ή $\pi/2$ ακτίνια ($1/4$ του κύκλου).....	85
Εικόνα 4.14: Διάγραμμα Αισθητήρα Φάσης Michelson.....	86
Εικόνα 4.15: Το Ορατό Φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας.....	87
Εικόνα 4.16: Διάγραμμα Αισθητήρα Μέλανος Σώματος.....	88

Εικόνα 4.17: Διάγραμμα Αισθητήρα Πόλωσης.....	90
Εικόνα 4.18: Διάγραμμα Σημειακού Αισθητήρα	90
Εικόνα 4.19: Κατανομημένος Αισθητήρας σε Γέφυρα.....	91
Εικόνα 4.20: Χημικός Αισθητήρας Μέτρησης CO ₂ στο Στομάχι.....	93
Εικόνα 4.21: Διάγραμμα Αισθητήρα Through-Beam.....	95
Εικόνα 4.22: Διάγραμμα Retro-Reflective Αισθητήρα.....	95
Εικόνα 4.23: Διάγραμμα Αισθητήρα Diffuse-Reflective.....	96
Εικόνα 4.24: Πεδία Εφαρμογής Αισθητήρων Οπτικών Ινών.....	98
Εικόνα 4.25: Σχέδιο για την Χρήση Αισθητήρων Οπτικών Ινών στην Ακρόπολη.....	99
Εικόνα 4.26: Η Λειτουργία τού Ενδοσκοπίου.....	100
Εικόνα 4.27: Σύστημα Ανίχνευσης Διαρροής.....	102
Εικόνα 4.28: Διαρροή σε Αγωγό Νερού.....	102
Εικόνα 4.29: Σύστημα Παρακολούθησης της Ευζωίας των Ζώων στις Φάρμες.....	103
Εικόνα 4.30: Σύστημα Μέτρησης της Στάθμης Υγρών στα Δεξαμενόπλοια.....	105
Εικόνα 4.31: Φορητές Συσκευές Αισθητήρων Οπτικών Ινών για Στρατιώτες.....	107
Εικόνα 4.32: Σύστημα Παρακολούθησης Φράκτη.....	109
Εικόνα 6.1: Εφαρμογές τού Διαδικτύου των Αντικειμένων.....	119
Εικόνα 6.2: Η Έξυπνη Πόλη.....	119

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Γενικό Διάγραμμα του Αισθητήρα.....	23
Σχήμα 2.2: Γενικό Διάγραμμα Απλού Συστήματος Αισθητήρα.....	25
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα Συστήματος Μέτρησης Αισθητήρα.....	26
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Συστήματος Ελέγχου Αισθητήρα.....	27
Σχήμα 3.1: Λειτουργία Πομπού σε Δίκτυο Οπτικών Ινών.....	54
Σχήμα 3.2: Λειτουργία Δέκτη σε Δίκτυο Οπτικών Ινών.....	55
Σχήμα 3.3: Λειτουργία Ενισχυτή σε Δίκτυο Οπτικών Ινών.....	55
Σχήμα 3.4: Δίκτυο Οπτικών Ινών.....	55
Σχήμα 3.5: Δίκτυο Οπτικών Ινών με Ενισχυτή.....	56
Σχήμα 4.1: Βασικό Διάγραμμα Αισθητήρα Οπτικών Ινών.....	75
Σχήμα 4.2: Βασικό Διάγραμμα Ενδογενούς Αισθητήρα Οπτικών Ινών.....	80
Σχήμα 4.3: Βασικό Διάγραμμα Εξωγενούς Αισθητήρα Οπτικών Ινών.....	82
Σχήμα 4.4: Βασικό Διάγραμμα Βιοϊατρικού Αισθητήρα Οπτικών Ινών.....	94

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του ανθρώπου και είναι ευρέως διαδεδομένοι στην Βιομηχανία, έχοντας ήδη εγκαθιδρυθεί στην πλειοψηφία των τομέων της, και συνεχίζουν να εξαπλώνονται. Ξεκινώντας από την Ιατρική και τις Τηλεπικοινωνίες, προχωρώντας στην Αεροναυπηγική, την Βιομηχανία και την κατασκευή δομών μεγάλης κλίμακας – με αυτά να αποτελούν ορισμένα μόνο από τα ποικίλα πεδία εφαρμογής τους – έχουν διευκολύνει εξαιρετικά τον άνθρωπο και έχουν αναβαθμίσει την ζωή και την καθημερινότητα του.

Ωστόσο, το ταξίδι για την εφεύρεση και την εγκαθίδρυσή τους ήταν μεγάλο και αναπάντεχο, έχοντας τις ρίζες τους στους βασικούς πρωτόγονους αισθητήρες. Από αρχαιότατων χρόνων, οι αισθητήρες έπαιζαν κυρίαρχο ρόλο στην ζωή, όχι μόνο του ανθρώπου, αλλά και κάθε άλλου έμβιου όντος, αποτελώντας το μέσο επικοινωνίας μεταξύ του κάθε οργανισμού και του περιβάλλοντος του. Οι βιολογικοί αισθητήρες – όπως η όραση, η όσφρηση, η αφή, η ακοή και η γεύση – ενσωματωμένοι από κατασκευής στα έμβια όντα, ήταν ο μοναδικός τρόπος αλληλεπίδρασης με τον περίγυρο, και φυσικά την εξέλιξη και την επιβίωση τους. Βασισμένοι, λοιπόν, στους βιολογικούς αισθητήρες, με την πρόοδο της τεχνολογίας, ξεκίνησαν να κατασκευάζονται και οι τεχνητοί αισθητήρες που έχουν κατακλύσει την ζωή μας μέχρι και σήμερα. Επί παραδείγματι, οι κάμερες, οι οποίες είναι πλέον ευρέως διαδεδομένες και προσιτές σε όλους – είτε για προσωπική ή επαγγελματική χρήση – για την επίτευξη διαφόρων σκοπών, είναι το πιο καταφανές παράδειγμα τεχνητού αισθητήρα, βασισμένο στην μια από τις πέντε βασικές αισθήσεις, την όραση. Φυσικά, οι αισθητήρες, γενικότερα, ποικίλουν και είναι πλέον ικανοί να ανιχνεύουν οποιοδήποτε επιθυμητό φυσικό μέγεθος, όπως την θερμοκρασία, την πίεση, την υγρασία και την επιτάχυνση, και χρησιμοποιούνται, αναλόγως με τις εκάστοτε ανάγκες, σε κάθε πιθανή εφαρμογή στην Βιομηχανία. Λόγου χάρι, στον τομέα της παραγωγής, είναι απαραίτητοι οι αισθητήρες για την καταμέτρηση των τεμαχίων ή την ανίχνευση και απόσυρση ελαττωματικών προϊόντων, όπως,

αντιστοίχως, στην Αυτοκινητοβιομηχανία, οι αισθητήρες μέτρησης της πίεσης των ελαστικών.

Ουσιαστικά, ωστόσο, η μεγάλη εφεύρεση, η οποία και αποτέλεσε ορόσημο στο ταξίδι τής εφεύρεσης της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών, είναι η οπτική ίνα, μια καινοτόμος τεχνολογία, διαρκώς εξελισσόμενη μέχρι και σήμερα. Στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, με την ανακάλυψη της δυνατότητας της διοχέτευσης του φωτός εντός του γυαλιού, με σκοπό τον έλεγχο της κατεύθυνσής του, έφερε την επανάσταση στην ζωή του ανθρώπου. Ξεκινώντας από την κάλυψη των αναγκών φωταγώγησης, προχωρώντας, κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, στην Ιατρική για την διεξαγωγή χειρουργικών επεμβάσεων χωρίς νυστέρι, καθώς και τις Τηλεπικοινωνίες, ήταν «θέμα χρόνου» να εισχωρήσουν και στην Βιομηχανία. Πλέον, η οπτική ίνα συναντάται σε κάθε πιθανό τομέα τής ζωής του ανθρώπου, με απλά παραδείγματα χρήσης, τα δίκτυα υπολογιστών και τα τηλεφωνικά δίκτυα στις Τηλεπικοινωνίες, καθώς και την μετάδοση δεδομένων και τον έλεγχο της γραμμής παραγωγής των προϊόντων στην Βιομηχανία.

Στην συνέχεια, με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, και κατ' επέκταση, την δημιουργία νέων αναγκών, οι οποίες αδυνατούσαν να καλυφθούν από τις ήδη υπάρχουσες πιθανές λύσεις, η εμφάνιση μιας καινούριας και καταλληλότερης εφεύρεσης ήταν πλέον αναγκαία. Ως εκ τούτου, με την σύζευξη των δύο παραπάνω τεχνολογιών, γεννήθηκε η πανίσχυρη τεχνολογία-υβρίδιο, οι αισθητήρες οπτικών ινών, οι οποίοι έχουν ήδη κατακτήσει τους περισσότερους τομείς τής Βιομηχανίας, και διεξάγονται διαρκείς μελέτες και πειράματα για την αποκλειστική εγκαθίδρυσή τους, εξαλείφοντας εντελώς τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς αισθητήρες. Εκεί που τα ελαττώματα των συμβατικών αισθητήρων ξεκίνησαν να γίνονται αντιληπτά και αυτοί αποδείχθηκαν ανεπαρκείς σε πολλούς τομείς, οι αισθητήρες οπτικών ινών εμφανίστηκαν ως η «πανάκεια», αποδεικνύοντας ότι είναι παραπάνω από ικανοί να υπερβούν τα προκύπτοντα προβλήματα. Αξιοποιώντας τις πολύτιμες ιδιότητες της οπτικής ίνας, είναι ικανοί να διεξάγουν την ίδια λειτουργία με τους απλούς αισθητήρες, ταχύτερα, αποδοτικότερα, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και παρέχοντας πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, αποδείχθηκαν καταλληλότεροι σε εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε δυσπρόσιτες τοποθεσίες και υπό αντίξοες

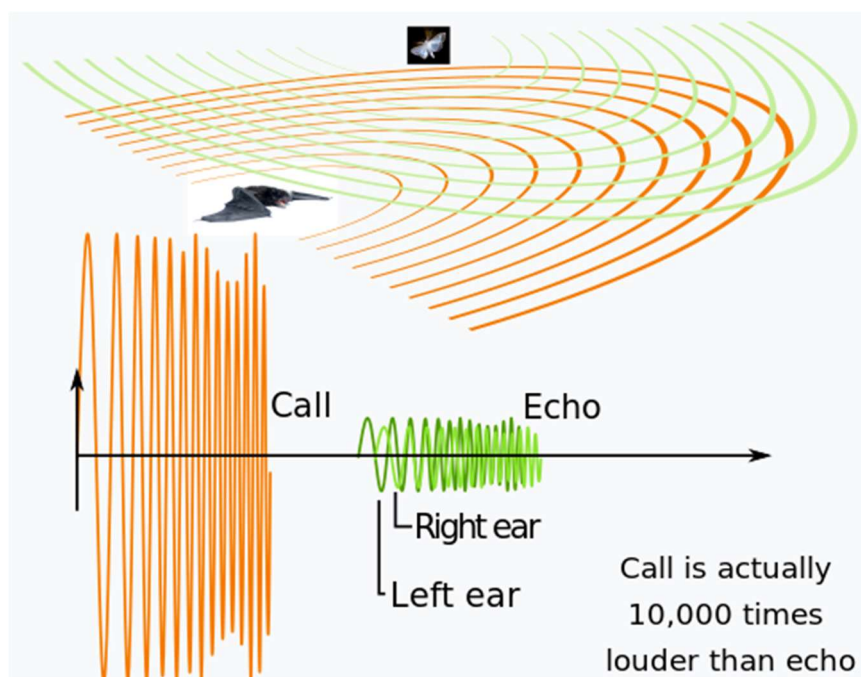
περιβαλλοντικές συνθήκες - όπως υποβρυχίως ή σε εκρηκτικά περιβάλλοντα - καθώς και επέτρεψαν την απομακρυσμένη ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας τον έλεγχο των πετρελαιοπηγών στον τομέα της Ενέργειας, ή των αεροσκαφών στην στρατιωτική βιομηχανία, αντιστοίχως. Τα προαναφερθέντα αποτελούν μόνο ελάχιστα παραδείγματα από την πληθώρα εφαρμογών και υπηρεσιών που προσφέρουν οι αισθητήρες οπτικών ινών, καθιστώντας την παρουσία τους αναγκαία σε όλο και περισσότερους τομείς της Βιομηχανίας.

Στην εργασία αυτή, θα αναλύσουμε, αρχικά, τις έννοιες και τις αρχές λειτουργίας τού αισθητήρα και της οπτικής ίνας, καθώς και τις εφαρμογές τους και το σύνολο των υπηρεσιών που προσφέρουν στην Βιομηχανία. Έπειτα, θα εστιάσουμε στην τεχνολογία τού αισθητήρα οπτικών ινών, όπου θα αναλύσουμε, εξίσου, την έννοια και τις αρχές λειτουργίας τους, καθώς και θα μελετήσουμε διεξοδικά τις πολυάριθμες εφαρμογές τους σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 2: Αισθητήρες

2.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες, όπως προαναφέραμε, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής και της καθημερινότητάς μας από αρχαιότατων χρόνων. Κατ' αρχάς, οι πρωταρχικοί αισθητήρες συναντώνται στα έμβια όντα ως τα κατάλληλα όργανα, με τα οποία μπορούν να αντιληφθούν το περιβάλλον τους. Επί παραδείγματι, κάποια είδη θηλαστικών, όπως οι νυχτερίδες, διαθέτουν ηχοεντοπισμό, το βιολογικό σόναρ, σύμφωνα με το οποίο ανιχνεύουν ερεθίσματα από το περιβάλλον τους, εκπέμποντας κάποιο κάλεσμα, και λαμβάνοντας, στην συνέχεια, την ηχώ που επιστρέφεται από τις οντότητες και τις δομές στον περίγυρό τους.



Εικόνα 2.1: Ηχοεντοπισμός στην Νυχτερίδα

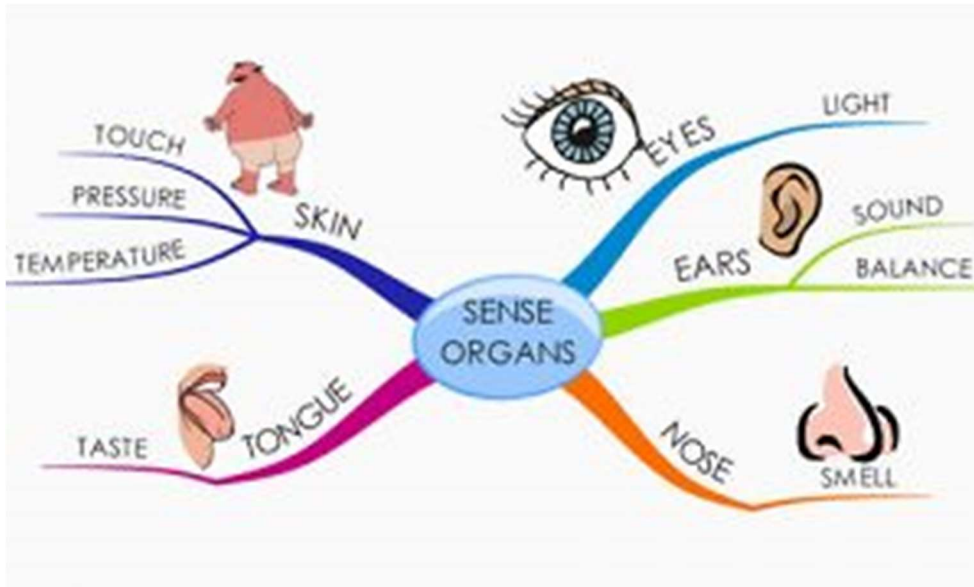
Ωστόσο, οι πιο απλοί και βασικοί φυσικοί αισθητήρες, οι οποίοι συναντώνται και στον άνθρωπο, είναι το μάτι, υπεύθυνο για την ανίχνευση του ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η μύτη για την ανίχνευση της οσμής, το αφτί για την ανίχνευση των ηχητικών κυμάτων, η γλώσσα για την ανίχνευση της γεύσης, καθώς και το δέρμα για την αίσθηση της επαφής με άλλες δομές. Τα πέντε αυτά

αισθητήρια όργανα δέχονται διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα, δηλαδή πληροφορίες, τις οποίες λαμβάνει ο εγκέφαλος από το περιβάλλον του μέσω αυτών, τις επεξεργάζεται, και εν τέλει παίρνει τις κατάλληλες αποφάσεις, καθιστώντας ικανό τον άνθρωπο – ή οποιοδήποτε έμβιο ον – να πράττει τις αντίστοιχες ενέργειες.



Ποσοτικός τρόπος μέτρησης → αισθητήρες

Εικόνα 2.2: Αισθητήριο Όργανο και Εγκέφαλος

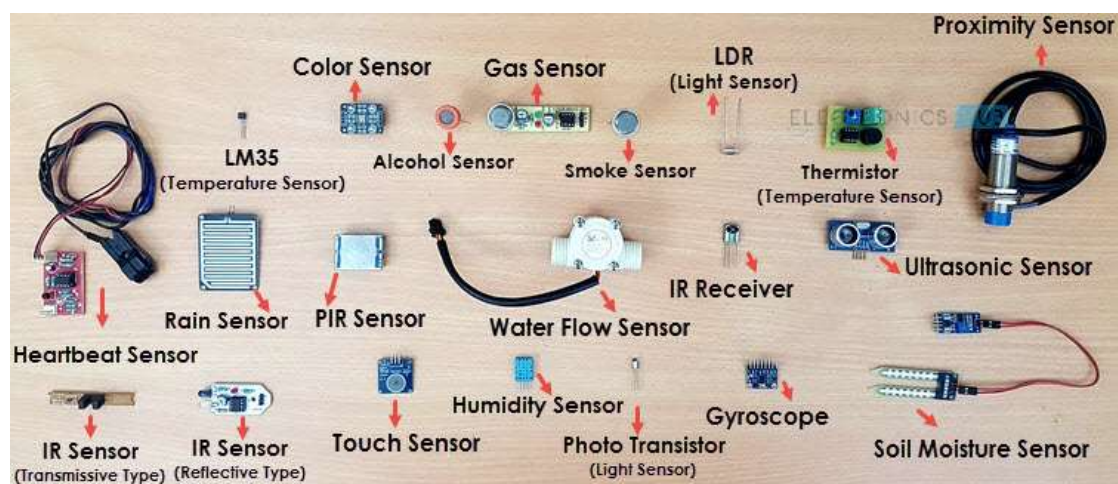


Εικόνα 2.3: Τα Αισθητήρια Όργανα του Ανθρώπου

Κατ' αυτόν τον τρόπο, αντιγράφοντας τους βιολογικούς αισθητήρες, κατασκευάστηκαν οι τεχνητοί αισθητήρες στις ηλεκτρονικές συσκευές, οι οποίοι είναι πλέον πανταχού παρόντες σε κάθε πτυχή της ζωής μας, εφαρμόζονται σε κάθε κλάδο της Βιομηχανίας και εξελίσσονται συνεχώς με την ταχεία πρόοδο της τεχνολογίας. Συναντώνται, στις οικίες, τα γραφεία, τα οχήματα, τους υπολογιστές, τα μέσα μεταφοράς, τα εργοστάσια, τα εμπορικά κέντρα, και σχεδόν σε οποιοδήποτε άλλο πιθανό μέρος ή οντότητα, με κάποια συγκεκριμένη μορφή. Καθιστούν την ζωή

και την καθημερινότητα πιο εύκολη και άνετη, αφού η παρουσία τους έχει σκοπό την παροχή βοήθειας κυρίως προς τον άνθρωπο, σε διάφορες καταστάσεις, κρίσιμες και μη. Επί παραδείγματι, υπάρχουν αισθητήρες που ανιχνεύουν την κίνηση στον χώρο και ανάβουν τα φώτα, αλλά υπάρχουν και εκείνοι που ανιχνεύουν τον καπνό και πυροδοτούν τον συναγερμό και το σύστημα πυρόσβεσης σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Όπως θα δούμε παρακάτω, οι αισθητήρες είναι απαραίτητοι για να μπορέσει οποιοδήποτε σύστημα να αλληλοεπιδράσει με το περιβάλλον του, εφόσον αποτελούν το μοναδικό μέσον ανίχνευσης και «αντίληψης» των μεταβολών και των γεγονότων που συμβαίνουν στον περίγυρό του. Μέσω των αισθητήρων, ένα σύστημα αποκτά την ικανότητα να επικοινωνεί με το περιβάλλον του και να επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από τον έξω κόσμο, με στόχο την επεξεργασία και την αξιοποίηση τους για την επίτευξη διαφόρων σκοπών.



Εικόνα 2.4: Διάφοροι Τύποι Αισθητήρων

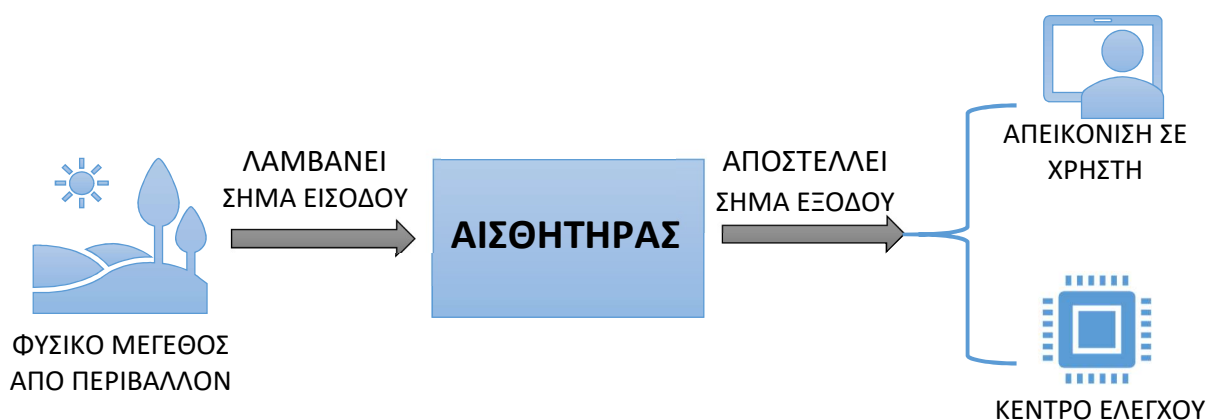
2.2 Ορισμός

Οι αισθητήρες αποτελούν συσκευές ή υποσυστήματα μεγαλύτερων συστημάτων μέτρησης ή ελέγχου, τα οποία ανιχνεύουν κάποιο φυσικό μέγεθος και παράγουν μία μετρήσιμη έξοδο σχετική με αυτό. Δηλαδή, αναλόγως την ιδιότητά του, ο κάθε αισθητήρας ανιχνεύει τις αντίστοιχες μεταβολές και τα γεγονότα που διαδραματίζονται στο περιβάλλον του (σήμα εισόδου), τα επεξεργάζεται, και τελικά,

παράγει και αποστέλλει ένα σήμα εξόδου σε μορφή κατάλληλη, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει αντιληπτό από το τμήμα που θα το λάβει στην συνέχεια (π.χ. κύκλωμα ελέγχου) ή τον άνθρωπο.

Το σήμα εισόδου, το οποίο ανιχνεύεται, μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής, όπως θερμοκρασία, φως, ήχος, πίεση, υγρασία, κίνηση, ταχύτητα και επιτάχυνση, παραμόρφωση, ακτινοβολία κ.α. Ωστόσο, το σήμα εξόδου που παράγεται από την επεξεργασία του φυσικού μεγέθους, έχει είτε μορφή ευανάγνωστη από τον άνθρωπο ή μορφή ηλεκτρικού σήματος, το οποίο, εν συνεχεία, μετατρέπεται συνήθως σε δυαδικό κώδικα, αναλόγως τις εκάστοτε ανάγκες, με σκοπό την καταγραφή ή την περαιτέρω επεξεργασία του από άλλα ηλεκτρονικά τμήματα, αντιστοίχως.

Οι αισθητήρες διαφέρουν ως προς την ιδιότητά τους, εφόσον είναι σχεδιασμένοι να ανιχνεύουν ερεθίσματα συγκεκριμένης μορφής ο καθένας, καθώς και ως προς άλλους παράγοντες – όπως το κόστος, την ποιότητα, την αξιοπιστία, το περιβάλλον χρήσης – αναλόγως τις εκάστοτε συνθήκες και τον σκοπό για τον οποίο επιλέγονται.



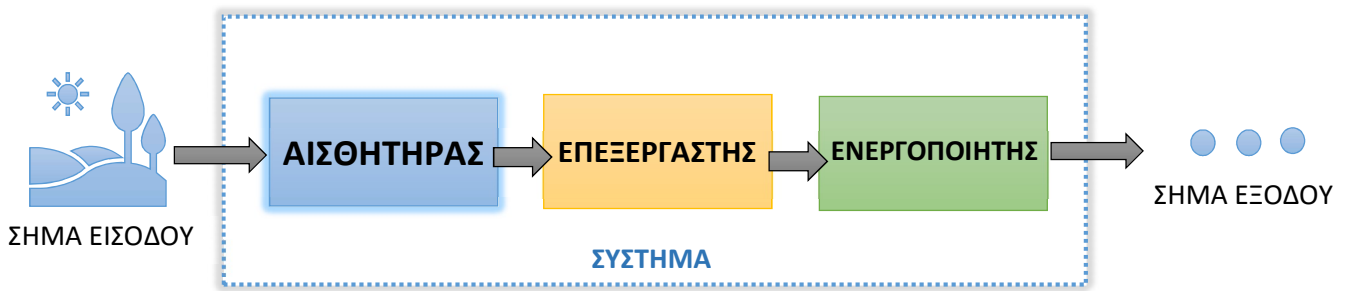
Σχήμα 2.1: Γενικό Διάγραμμα του Αισθητήρα

2.3 Τα Μέρη του Αισθητήρα

Οι αισθητήρες, σε μικροσκοπικό επίπεδο, αποτελούνται από διάφορα εξαρτήματα – όπως τρανζίστορ, διόδους, ακόμα και ολοκληρωμένα κυκλώματα – τα οποία τους καθιστούν ικανούς να συμπεριφέρονται ως διακόπτες. Κατ' αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιούνται συνήθως με σκοπό τον έλεγχο του ηλεκτρικού ρεύματος που περνάει μέσα από ένα κύκλωμα, κλείνοντας και ανοίγοντάς το, αναλόγως με τις ανάγκες και το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής.

Ωστόσο, ένας αισθητήρας από μόνος του δεν είναι πάντα ικανός να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς, εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών, το ηλεκτρικό σήμα εξόδου του υφίσταται παραμόρφωση και καθίσταται ασταθές. Προκειμένου, λοιπόν, να λειτουργήσει σωστά ο αισθητήρας, να είναι σε θέση να παράγει αξιόπιστα και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα, καθώς και να μπορέσει να ευσταθήσει γενικότερα ως μία πλήρως λειτουργική οντότητα σε ένα πείραμα, συνηθώς απαιτείται η χρήση επιπλέον εξοπλισμού. Οι επιπρόσθετες αυτές συσκευές είναι υπεύθυνες για την περαιτέρω επεξεργασία και μετατροπή του σήματος που παράγει ο αισθητήρας, σε κατάλληλη μορφή, δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα σύστημα.

Επί παραδείγματι, ένα τέτοιου είδους σύστημα θα μπορούσε να αποτελείται από τρία διακριτά μέρη. Κατ' αρχάς, έναν **αισθητήρα** υπεύθυνο για την συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον, καθώς και μια επιπλέον ηλεκτρονική διάταξη, γνωστή ως «**κύκλωμα ελέγχου**», η οποία αποτελεί τον επεξεργαστή ή μικροελεγκτή που μετατρέπει το σήμα εξόδου τού αισθητήρα σε ηλεκτρικό σήμα κατάλληλης μορφής. Τέλος, ακολουθεί κάποιος **μετατροπέας** (π.χ ενεργοποιητής), ο οποίος λαμβάνει το ηλεκτρικό σήμα εξόδου και το μετατρέπει εκ νέου σε κάποια αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας, με σκοπό την μέτρηση, την απεικόνιση ή την μετάδοση της πληροφορίας. Συνηθίζεται να ονομάζουμε ολόκληρο αυτό το σύστημα εξίσου «αισθητήρα». Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να απεικονιστεί ως εξής:



Σχήμα 2.2: Γενικό Διάγραμμα Απλού Συστήματος Αισθητήρα

Λόγω του ευρέος πεδίου εφαρμογής τους, καθώς και της ποικιλομορφίας των αισθητήρων, τα προαναφερθέντα αυτά συστήματα διακρίνονται **σε συστήματα μέτρησης** και **συστήματα ελέγχου**.

2.3.1 Συστήματα Μέτρησης

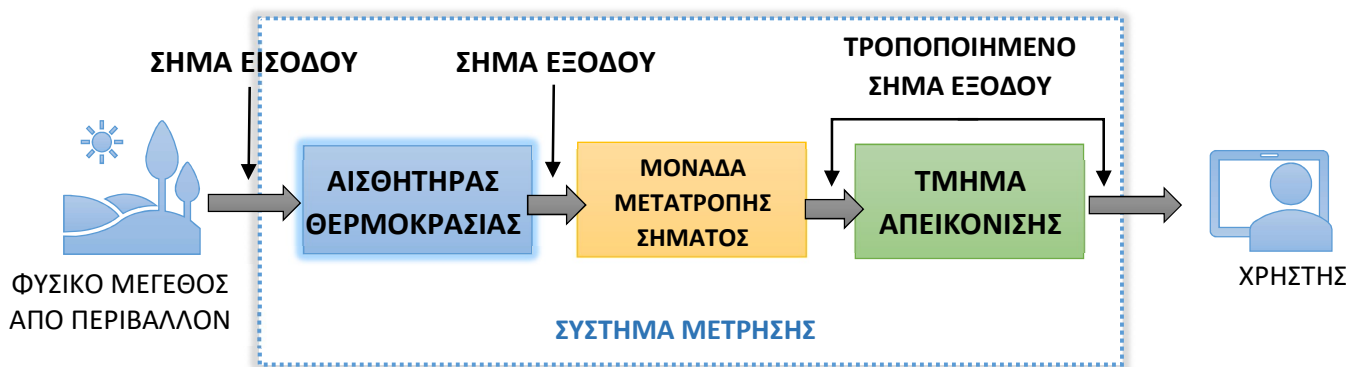
Ένα σύστημα μέτρησης είναι ικανό να καταγράψει τα ληφθέντα δεδομένα και να απεικονίσει το αντίστοιχο σήμα εξόδου, χωρίς να αντιδράσει με κάποιον τρόπο στο σήμα εισόδου, ούτε να επηρεαστεί το περιβάλλον του με οποιονδήποτε τρόπο. Επί παραδείγματι, ένα τέτοιου είδους σύστημα αποτελεί το θερμόμετρο υδραργύρου, το οποίο λαμβάνει ως σήμα εισόδου την θερμοκρασία τού περιβάλλοντος, η οποία μεταφέρεται στο θερμόμετρο. Το σήμα εξόδου που παράγει, απεικονίζεται σε μορφή ευανάγνωστη για τον άνθρωπο, σε βαθμονομημένο σωλήνα σε κλίμακα βαθμών Κελσίου, όπου ο όγκος τού υδραργύρου μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Πιο συγκεκριμένα, η ολοκληρωμένη λειτουργία τού συστήματος μέτρησης μπορεί να περιγραφεί καλύτερα σε ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο και διαιρείται σε τρεις επιμέρους διαδικασίες – την ανίχνευση, την μετατροπή του σήματος εξόδου τού αισθητήρα σε άλλη μορφή, και την απεικόνισή του – οι οποίες εκτελούνται από τα τρία διαφορετικά τμήματα που συντελούν το θερμόμετρο. Αρχικά, ο **αισθητήρας** ανιχνεύει το φυσικό μέγεθος, το οποίο, στην προκειμένη περίπτωση είναι η θερμοκρασία, και το μετατρέπει σε σήμα. Έπειτα, η **μονάδα** υπεύθυνη για την επεξεργασία και την μετατροπή τού σήματος εξόδου το μετατρέπει σε κατάλληλη και αξιοποιήσιμη μορφή από το **τμήμα απεικόνισης**. Τέλος, το τμήμα απεικόνισης της μέτρησης λαμβάνει το τροποποιημένο πλέον σήμα εξόδου, το καταγράφει και το

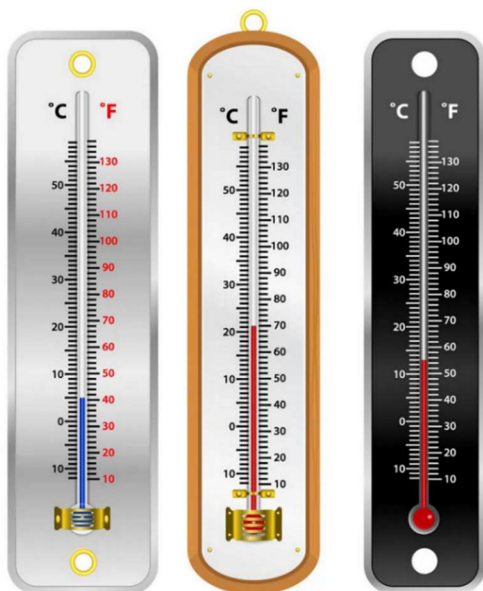
Εφαρμογή Αισθητήρων Οπτικών Ινών σε Βιομηχανικά Περιβάλλοντα

εμφανίζει στον χρήστη σε ευανάγνωστη μορφή – στην προκειμένη περίπτωση σε κάποιας μορφής οθόνη.

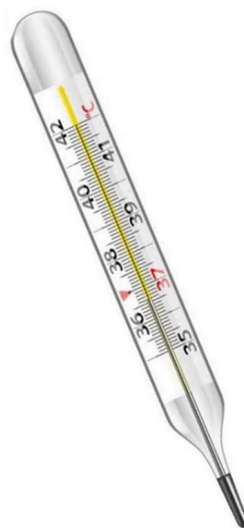
Ο μοναδικός σκοπός τού συστήματος αυτού είναι η ένδειξη της μετρήσιμης εξόδου (π.χ. θερμοκρασίας) σε κατανοητή μορφή, και δεν έχει την δυνατότητα να επηρεάσει, να μεταβάλει, ούτε να ελέγξει, κανέναν παράγοντα στο περιβάλλον – στην συγκεκριμένη περίπτωση την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα Συστήματος Μέτρησης Αισθητήρα



Εικόνα 2.5: Θερμόμετρα Τοίχου

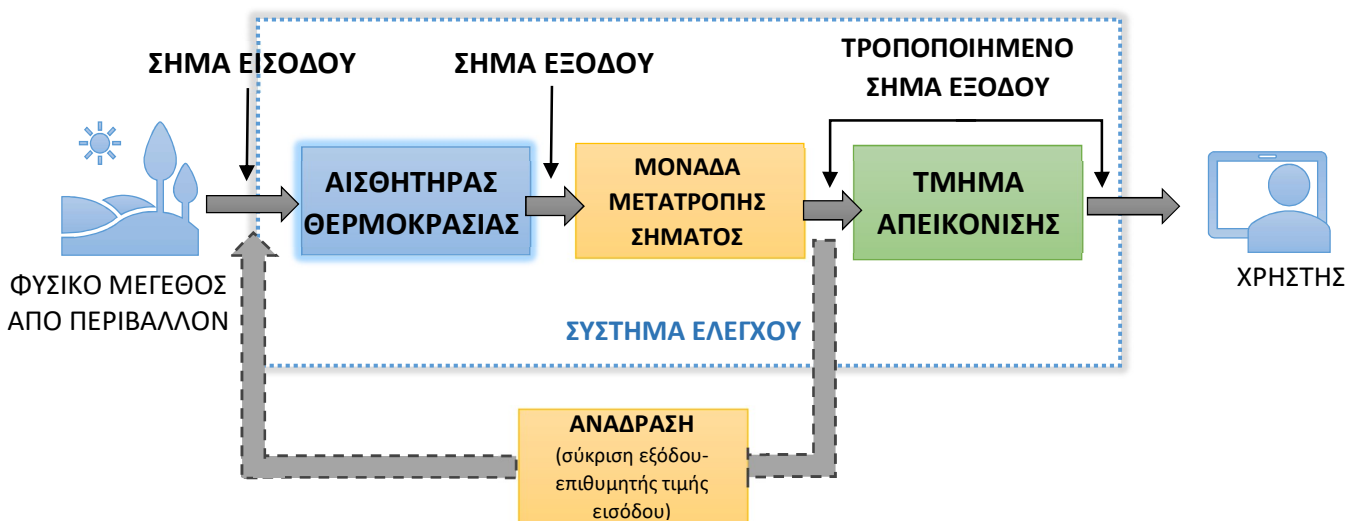


Εικόνα 2.6: Το Θερμόμετρο

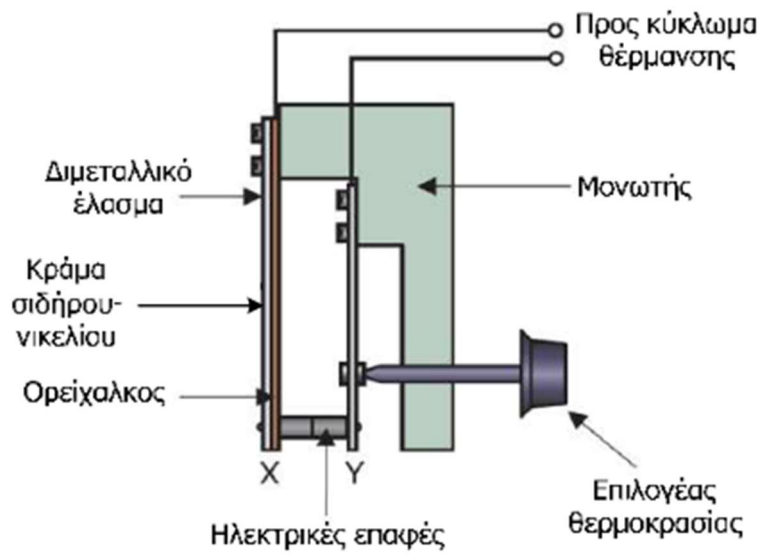
2.3.2 Συστήματα Ελέγχου

Αντιστοίχως, τα συστήματα ελέγχου λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως και τα συστήματα μέτρησης, με την διαφορά ότι είναι ικανά, και έχουν ως κύριο σκοπό, να επηρεάζουν το περιβάλλον τους με κατάλληλο τρόπο, καθώς και να ελέγχουν το φυσικό μέγεθος το οποίο ανιχνεύουν.

Επί παραδείγματι, ένα τέτοιου είδους σύστημα ελέγχου αποτελεί ο θερμοστάτης, ο οποίος, εκτός από την παρακολούθηση και την μέτρηση της θερμοκρασίας, είναι ικανός να ελέγχει την θερμότητα που εκπέμπεται από ένα σύστημα θέρμανσης, και κατ' επέκταση, τα επίπεδα της θερμοκρασίας τής οντότητας, του χώρου ή της δομής που παρακολουθείται. Πιο συγκεκριμένα, σε μια συσκευή θέρμανσης του χώρου, όπως η σόμπα ή το αερόθερμο, ο θερμοστάτης λαμβάνει ως σήμα εισόδου την θερμοκρασία τού περιβάλλοντος, και το συγκρίνει με την επιθυμητή θερμοκρασία, η οποία ορίζεται από τον χρήστη μέσω ενός αναλογικού μεταγωγέα ή αντίστοιχου ψηφιακού κυκλώματος. Όσο η θερμοκρασία τού χώρου είναι χαμηλότερη, το κύκλωμα κλείνει και το σύστημα θερμαίνει τον χώρο. Ωστόσο, μόλις η θερμοκρασία ξεπεράσει τα επιθυμητά επίπεδα, το κύκλωμα ανοίγει και διακόπτεται η εκπομπή τής θερμότητας έως ότου η θερμοκρασία μειωθεί ξανά· τότε επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Συστήματος Ελέγχου Αισθητήρα



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα Διμεταλλικού Θερμοστάτη



Εικόνα 2.8: Θερμοστάτης σε Σόμπα



Εικόνα 2.9: Διμεταλλικός Θερμοστάτης Χώρου

2.4 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Οι αισθητήρες, ανεξάρτητα από την ποικιλομορφία τους, τις διαφορές τους, καθώς και τα πολυάριθμα πεδία εφαρμογής τους, διαθέτουν κάποια κοινά βασικά χαρακτηριστικά και αρχές λειτουργίας, τα οποία τούς χαρακτηρίζουν, και κατ' επέκταση μας βοηθούν να επιλέξουμε τους κατάλληλους, αναλόγως τις ανάγκες μας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν καταλλήλως οι σωστοί εξειδικευμένοι αισθητήρες σε κάποιο σύστημα μέτρησης ή ελέγχου. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν την ακρίβεια, τον βαθμό σταθερότητας της λειτουργίας τους, την απόδοση, καθώς και την ταχύτητα απόκρισής τους στο σήμα εισόδου που λαμβάνουν· διακρίνονται στα στατικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

2.4.1 Στατικά Χαρακτηριστικά

Τα στατικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στην συμπεριφορά ενός αισθητήρα και στο κατά πόσο ορθά παρουσιάζει το μετρούμενο σήμα εισόδου, όταν πλέον έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ αυτού και του φυσικού μεγέθους που λαμβάνει ως σήμα εισόδου· δηλαδή, η είσοδος και η έξοδος δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Η κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται όταν το σήμα εισόδου είναι σταθερό, ή όταν η μεταβολή του είναι τόσο βραδεία που ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα να την αντιλαμβάνεται. Τα κύρια στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων θα αναλυθούν παρακάτω.

- **Πιστότητα (Accuracy)**

Η πιστότητα ενός αισθητήρα είναι η ικανότητά του να αποδίδει αποτελέσματα (σήμα εξόδου) όσο το δυνατόν εγγύτερα στην πραγματική τιμή τού μετρούμενου φυσικού μεγέθους που έλαβε ως σήμα εισόδου. Εφόσον, όπως είναι αναμενόμενο, πρακτικά κάθε αισθητήρας θα εμφανίσει κάποια απόκλιση μεταξύ των δύο ποσοτήτων – δηλαδή **σφάλμα** – σε κάποιον βαθμό, η πιστότητα εκφράζεται κυρίως ως η απόλυτη τιμή τού σφάλματος. Το μέγιστο σφάλμα, το

οποίο είναι δυνατόν να δημιουργήσει ένας αισθητήρας, κατά την λειτουργία του, ονομάζεται **ανοχή**.

▪ **Διακριτική Ικανότητα (Resolution)**

Η διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα είναι η ελάχιστη μεταβολή τού σήματος εισόδου – δηλαδή του φυσικού μεγέθους – που είναι ικανός να ανιχνεύσει, προκειμένου να γίνει αισθητή η αντίστοιχη μεταβολή στο σήμα εξόδου. Όσο μικρότερη είναι η ελάχιστη ανιχνεύσιμη μεταβολή, τόσο μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα έχει ο αισθητήρας. Η ελάχιστη αυτή μεταβολή τού σήματος εισόδου που «πυροδοτεί» τον αισθητήρα, ξεκινώντας από την μηδενική τιμή, αντιπροσωπεύει την τιμή αμέσως μετά το **κατώφλι** ή **όριο** της διακριτικής ικανότητας.

▪ **Νεκρή Ζώνη (Dead Zone)**

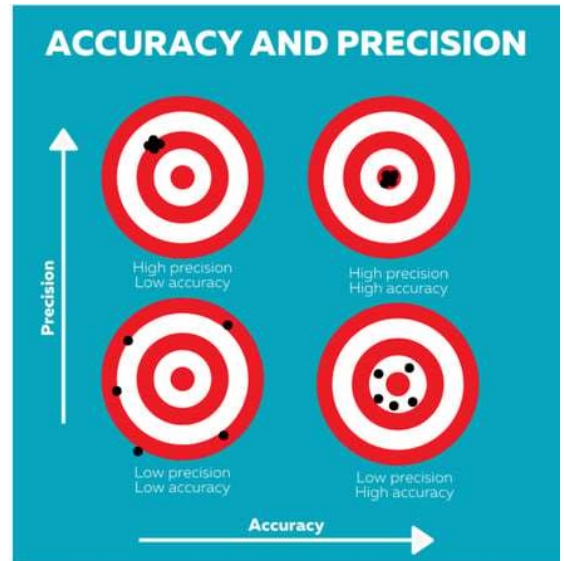
Η νεκρή ζώνη ενός αισθητήρα είναι η τιμή τής μέγιστης μεταβολής τού σήματος εισόδου, η οποία δεν γίνεται αντιληπτή από τον αισθητήρα, και κατ' επέκταση δεν προκαλεί αλλαγή στο σήμα εξόδου του. Αυτή η τιμή θεωρείται ότι είναι το **κατώφλι** – όπως αναφέραμε και παραπάνω – πέρα από το οποίο ξεκινά ο αισθητήρας να αντιλαμβάνεται τις μεταβολές τού μετρούμενου φυσικού μεγέθους.



Εικόνα 2.10: Η Νεκρή Ζώνη

- **Ακρίβεια (Precision)**

Η ακρίβεια ενός αισθητήρα αναφέρεται στον βαθμό κατά τον οποίο ένας αισθητήρας δεν επηρεάζεται από τυχαία σφάλματα (θόρυβο), όταν ανιχνεύει το ίδιο σήμα εισόδου κάτω από τις ίδιες συνθήκες μέτρησης. Δηλαδή, η ακρίβεια σχετίζεται με την συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων που παράγονται, καθώς και κατά πόσο το ένα προσεγγίζει το άλλο, και όχι τον βαθμό στον οποίο πλησιάζουν τα αποτελέσματα αυτά την πραγματική τιμή τού σήματος εισόδου (πιστότητα).



Εικόνα 2.11: Διαφορά Πιστότητας και Ακρίβειας

- **Επαναληψιμότητα (Repeatability)**

Η επαναληψιμότητα ενός αισθητήρα αναφέρεται στον βαθμό κατά τον οποίο τα αποτελέσματά του (σήμα εξόδου) προσεγγίζουν το ένα το άλλο – δηλαδή τον **βαθμό ακριβείας** – κατά την μέτρηση ενός σταθερού φυσικού μεγέθους (σήμα εισόδου) κατά την διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος, σε σταθερές συνθήκες μέτρησης.

- **Αναπαραγωγιμότητα**

Ομοίως με την επαναληψιμότητα, η αναπαραγωγιμότητα ενός αισθητήρα έχει ταυτόσημο ορισμό, με την μοναδική διαφορά ότι αναφέρεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες μέτρησης, όπως διαφορετικά όργανα μέτρησης ή διαφορετικά περιβάλλοντα.

- **Σφάλμα (Error)**

Το σφάλμα ενός αισθητήρα αποτελεί την απόκλιση μεταξύ της τιμής τής εξόδου και της πραγματικής τιμής τής εισόδου που μετράται από αυτόν· συνήθως τα σφάλματα εκφράζονται ποσοστιαία ως εξής:

$$e = \frac{\text{Πραγματική τιμή εισόδου} - \text{Μετρούμενη τιμή εξόδου}}{\text{Πραγματική τιμή εισόδου}} \times 100\%$$

Τα σφάλματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα **συστηματικά** και τα **τυχαία**, όπως θα δούμε παρακάτω.

▪ **Συστηματικό Σφάλμα (Systematic Error)**

Τα συστηματικά σφάλματα, σε έναν αισθητήρα, είναι τα σφάλματα τα οποία τον επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις μετρήσεις, και συνήθως μπορούν εύκολα να διαπιστωθούν και να διορθωθούν με μεθόδους αντιστάθμισης – όπως το φιλτράρισμα ή η ανάδραση – κατά την διαδικασία της ανάλυσης των μετρήσεων. Τέτοιου είδους σφάλματα προκύπτουν από μία πληθώρα παραγόντων, όπως, για παράδειγμα, τους εξής παρακάτω:

- Μεταβολές, στις οποίες υπόκειται το σήμα κατά την μετάδοση, όπως η εξασθένησή του
- Μεταβλητές τού περιβάλλοντος που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία τού αισθητήρα, όπως η θερμοκρασία
- Μεταβολές που προκύπτουν από την ίδια την διαδικασία μέτρησης και επηρεάζουν την φυσική ποσότητα εισόδου
- Πιθανές μεταβολές στην χημική δομή, καθώς και ατέλειες των επιμέρους εξαρτημάτων τού αισθητήρα
- Ο ανθρώπινος παράγοντας, όπως πιθανά λάθη τού παρατηρητή ή του χειριστή

▪ **Τυχαίο Σφάλμα (Random Error)**

Τα τυχαία σφάλματα, σε έναν αισθητήρα, είναι τα σφάλματα τα οποία, σε αντίθεση με τα συστηματικά, τον επηρεάζουν με τυχαίο τρόπο στις μετρήσεις του, και δεν είναι εφικτό να διορθωθούν κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Ένα τέτοιου είδους σφάλμα ονομάζεται «θόρυβος» και αποτελεί ένα σήμα, το οποίο δεν μεταφέρει πληροφορία· οι πιθανοί παράγοντες ύπαρξής του ποικίλουν, ως εξής:

- Περιβαλλοντικός θόρυβος, όπως ο ήχος στο υπόβαθρο που καταγράφεται από κάποιο μικρόφωνο
- Τυχαίες και ακανόνιστες μεταβολές τής θερμοκρασίας
- Μεταβολές που προκύπτουν από την ίδια την διαδικασία μέτρησης και επηρεάζουν την φυσική ποσότητα εισόδου
- Περιβαλλοντικές παρεμβάσεις, τις οποίες υφίσταται το σήμα κατά την μετάδοση
- Λανθασμένες ενέργειες του χειριστή

Τέλος, η μοναδική δυνατότητα ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων που επιφέρουν οι παραπάνω παράγοντες, είναι η αναλογία τού σήματος ως προς τον θόρυβο να είναι αρκετά μεγαλύτερη της μονάδας.

▪ **Εύρος Εισόδου – Εξόδου (Input – Output Range)**

Το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα αναφέρεται στα όρια λειτουργίας του, δηλαδή, στην μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τού σήματος εισόδου (μετρούμενου φυσικού μεγέθους) ή του σήματος εξόδου, μεταξύ των οποίων είναι ικανός να λειτουργεί βέλτιστα και να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Το εύρος μπορεί να εκφραστεί ως η διαφορά τής μέγιστης και της ελάχιστης τιμής ως εξής:

$$x_{i/o} = x_{max} - x_{min}$$

Συνήθως, στις προδιαγραφές των αισθητήρων, το εύρος λειτουργίας αναφέρεται στο εύρος τιμών θερμοκρασίας, πίεσης ή υγρασίας, μεταξύ των οποίων είναι δυνατή η χρήση τους.

▪ **Ευαισθησία (Sensitivity)**

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα μάς δείχνει κατά πόσο μεταβάλλεται η έξοδος, όταν το μετρούμενο σήμα εισόδου που λαμβάνει μεταβάλλεται. Επί παραδείγματι, στο θερμόμετρο υδραργύρου, όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά 1°C, η στάθμη του υδραργύρου μετακινείται κατά 1cm, αντιστοίχως. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την σχέση τής μεταβολής της εξόδου ενός

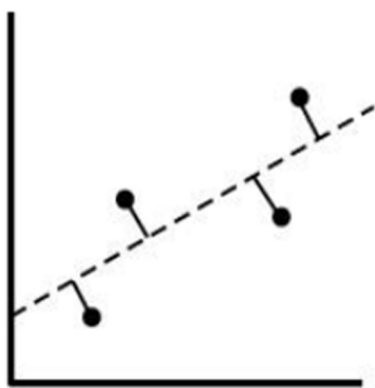
αισθητήρα ως προς την μεταβολή της εισόδου (φυσικού μεγέθους), δηλαδή την συνάρτηση μεταφοράς, και εκφράζεται ως εξής:

$$\text{Ευαισθησία } (S) = \frac{[\text{Μέγιστη τιμή εξόδου}] - [\text{Ελάχιστη τιμή εξόδου}]}{[\text{Μέγιστη τιμή εισόδου}] - [\text{Ελάχιστη τιμή εισόδου}]}$$

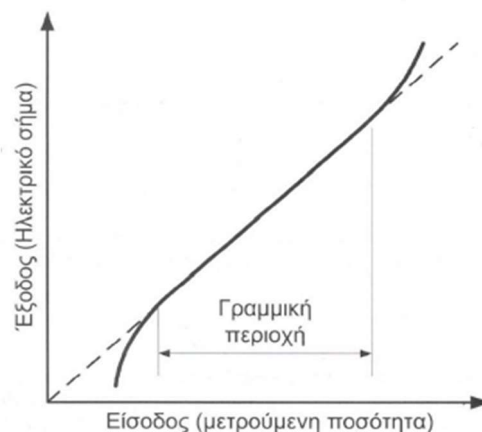
Εφόσον η συνάρτηση μεταφοράς τού αισθητήρα είναι γραμμική, η ευαισθησία του είναι σταθερή και μοναδική για ολόκληρο το εύρος λειτουργίας του, και θεωρείται ιδανική. Διαφορετικά, όταν πρόκειται για μη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, παρατηρείται ότι η ευαισθησία διαφέρει από σημείο σε σημείο.

▪ Γραμμικότητα (Linearity)

Η γραμμικότητα ενός αισθητήρα αποτελεί τον βαθμό, κατά τον οποίο η γραφική παράσταση του σήματος εξόδου ως προς το σήμα εισόδου προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή, και αντιπροσωπεύει την απόκλιση της εξόδου ως προς την είσοδο. Συνήθως, πρακτικά, υπάρχει κάποιος βαθμός απόκλισης μεταξύ εισόδου και εξόδου στους περισσότερους αισθητήρες· οπότε, με τον όρο **μη-γραμμικότητα** ορίζουμε την μέγιστη απόκλιση των πραγματικών σημείων στην γραφική παράσταση από την θεωρητική νοητή γραμμή που θα προέκυπτε κάτω από ιδανικές συνθήκες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ένας αισθητήρας είναι δυνατό να είναι γραμμικός για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών εισόδου – με αποτέλεσμα τα σημεία μέτρησης να συμπίπτουν με την ευθεία γραμμή – και σε άλλο εύρος τιμών να είναι μη-γραμμικός.



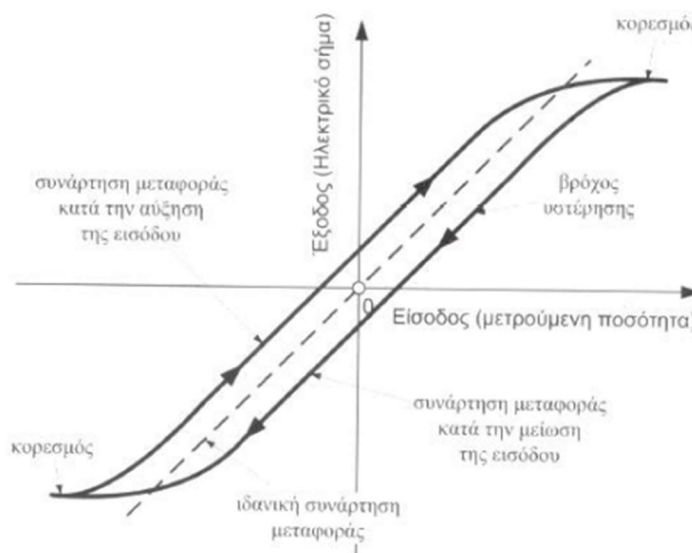
Εικόνα 2.12: Απόκλιση Πραγματικών Σημείων Μέτρησης



Εικόνα 2.13: Περιοχή Γραμμικότητας Αισθητήρα

- **Υστέρηση (Hysteresis)**

Η υστέρηση ενός αισθητήρα αποτελεί την απόκλιση μεταξύ των διαφόρων μετρήσεων εξόδου, κατά την ανίχνευση του ίδιου σήματος εισόδου, όταν αυτό προσεγγίζεται από αντίθετες κατευθύνσεις. Επί παραδείγματι, όταν το φυσικό μέγεθος που ανιχνεύει ένας αισθητήρας αυξάνεται συνεχώς με ένα σταθερό βήμα, και μόλις φτάσει σε κάποιο σημείο ξεκινήσει και μειώνεται ομοίως, με τον ίδιο σταθερό ρυθμό, τότε είναι πιθανόν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μεταξύ αύξησης και μείωσης να μην συμπίπτουν μεταξύ τους, στις αντίστοιχες τιμές εισόδου τους. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει υστέρηση, και συνήθως εμφανίζεται σε αισθητήρες που περιλαμβάνουν κινητά ή μηχανικά μέρη, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως της τριβής ή της μηχανικής τάσης.

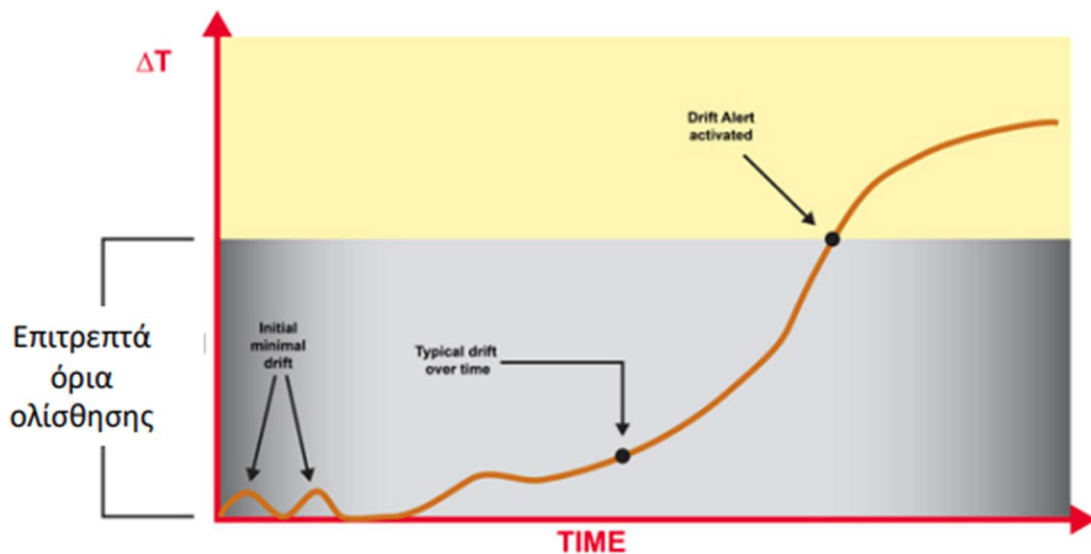


Εικόνα 2.14: Απόκλιση Αποτελεσμάτων Εξόδου μεταξύ Αύξησης & Μείωσης της Εισόδου

- **Ευστάθεια (Stability)**

Η ευστάθεια ενός αισθητήρα αναφέρεται στο μέτρο μεταβολής τού σήματος εξόδου που είναι πιθανό να προκύψει, όταν το σήμα εισόδου, καθώς και οι συνθήκες μέτρησης παραμένουν σταθερές, κατά την διάρκεια ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος. Μία τέτοια μεταβολή ονομάζεται **ολίσθηση (drift)** και συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό επί του συνολικού εύρους τιμών εξόδου.

Γενικότερα, η ολίσθηση ορίζεται ως η φυσική τάση τού αισθητήρα να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του, και κατ' επέκταση το σήμα εξόδου που παράγεται από την μέτρηση του παρ'όλα-αυτά-σταθερού και αμετάβλητου σήματος εισόδου, εξαιτίας της γήρανσης των υλικών και των μεταβολών τού περιβάλλοντος που προκύπτουν με το πέρασμα τού χρόνου. Ως εκ τούτου, κατανοούμε ότι πρόκειται για δύο αντιστρόφως ανάλογες οντότητες, αφού όσο μικρότερη είναι η ολίσθηση ενός αισθητήρα, τόσο περισσότερο ευσταθής είναι.



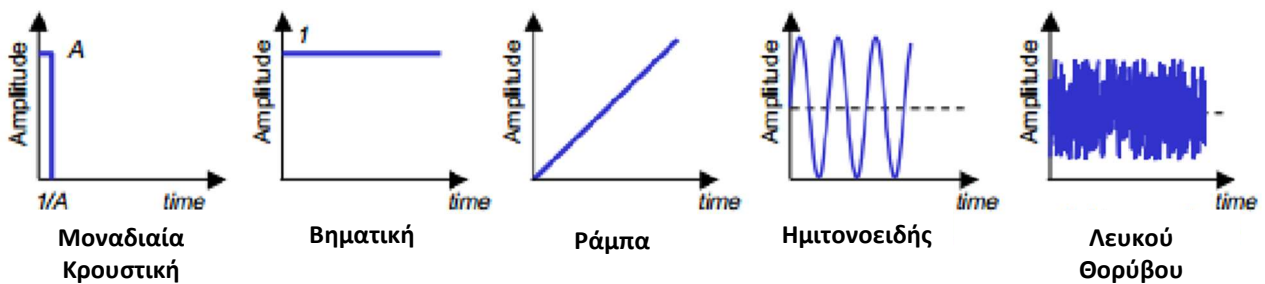
Εικόνα 2.15: Απεικόνιση Ολίσθησης ως Γραφική Παράσταση Εύρους Τιμών ως προς τον Χρόνο

2.4.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Όταν το φυσικό μέγεθος που ανιχνεύεται από κάποιον αισθητήρα μεταβάλλεται, τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά – τα οποία έχουν δυναμική μόνο στην περίπτωση που το σήμα εισόδου είναι σταθερό – παύουν να ισχύουν, με αποτέλεσμα να μην είναι επαρκή για τον καθορισμό τής απόκρισης του αισθητήρα. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στην συμπεριφορά ενός αισθητήρα, κατά το χρονικό διάστημα της έναρξης της μεταβολής τού σήματος εισόδου, έως την χρονική στιγμή κατά την οποία το σήμα εξόδου θα σταθεροποιηθεί εκ νέου με τα καινούργια δεδομένα.

Πρακτικά, ο λόγος που ένας αισθητήρας εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά υπό μεταβλητές συνθήκες, και κατ' επέκταση η ανάγκη ύπαρξης των δυναμικών χαρακτηριστικών, είναι η παρουσία στοιχείων που αποθηκεύουν ενέργεια, όπως, επί παραδείγματι, η μάζα γενικότερα, τα επαγωγικά στοιχεία και οι πυκνωτές.

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά μπορούν να προσδιοριστούν μέσω της ανάλυσης της απόκρισης και του τρόπου λειτουργίας τού αισθητήρα σε διάφορες διακριτές κατηγορίες κυματομορφών τού σήματος εισόδου, όπως η **ημιτονοειδής**, η **βηματική**, η **μοναδιαία κρουστική**, η **ράμπα** και η **κυματομορφή λευκού θορύβου**.



Εικόνα 2.16: Κατηγορίες Κυματομορφών Σήματος Εισόδου

- **Ταχύτητα Απόκρισης (Speed of Response)**

Η ταχύτητα απόκρισης ενός αισθητήρα αποτελεί την ταχύτητα, με την οποία αυτός ανταποκρίνεται σε οποιαδήποτε μεταβολή τού φυσικού μεγέθους που λαμβάνει ως σήμα εισόδου. Οι αισθητήρες που έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης, ανταποκρίνονται άμεσα, οπότε είναι και πιο επιθυμητοί στην πράξη.

- **Καθυστέρηση (Lag)**

Η καθυστέρηση ενός αισθητήρα αποτελεί την απόκλιση μεταξύ της πραγματικής χρονικής στιγμής, κατά την οποία συμβαίνει κάποια μεταβολή στο σήμα εισόδου, και της χρονικής στιγμής που η μεταβολή αυτή γίνεται αντιληπτή από τον αισθητήρα και απεικονίζεται στο σήμα εξόδου.

- **Δυναμικό Σφάλμα (Dynamic Error)**

Το δυναμικό σφάλμα ενός αισθητήρα είναι η απόκλιση μεταξύ της τιμής της εξόδου που προκύπτει από την μέτρηση, και της πραγματικής τιμής της εισόδου που μεταβάλλεται με τον χρόνο. Δυναμικό σφάλμα υφίσταται μόνο όταν θεωρείται ότι δεν υπάρχει καθόλου σφάλμα υπό σταθερές συνθήκες (στατικό).

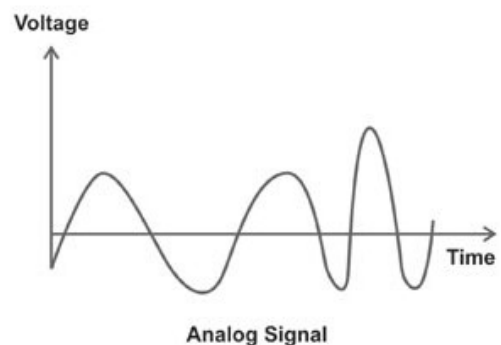
2.5 Κατηγορίες Αισθητήρων

Η ποικιλομορφία των αισθητήρων, γενικότερα, είτε ως προς την εξειδικευμένη ιδιότητα του καθενός, είτε ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, ή τα πεδία εφαρμογής τους, καθιστά δύσκολη και χρονοβόρα την ορθή επιλογή τού κατάλληλου αισθητήρα για την κάθε περίπτωση. Για τον λόγο αυτό, οι αισθητήρες ομαδοποιούνται σε επιμέρους κατηγορίες, με γνώμονα τα δύο βασικά κριτήρια που τους καθορίζουν, όπως θα δούμε παρακάτω.

2.5.1 Αναλογικοί – Ψηφιακοί

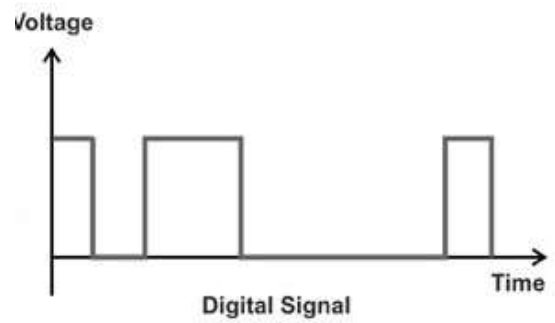
Με βάση τον τύπο τού σήματος εξόδου που παράγουν, οι αισθητήρες διακρίνονται σε αναλογικούς και ψηφιακούς.

Ένας **αναλογικός αισθητήρας** μετατρέπει το σήμα εισόδου που λαμβάνει σε αναλογικό σήμα εξόδου, το οποίο είναι συνεχές και διαθέτει ποικιλία διαφορετικών τιμών, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0 Volt και 5 Volt. Λόγου χάρη, τέτοιου είδους αισθητήρες αποτελούν το θερμοζεύγος και το επιταχυνσιόμετρο, οι οποίοι και είναι υπεύθυνοι για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της επιτάχυνσης, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.17: Αναλογικό Σήμα

Ένας **ψηφιακός αισθητήρας** μετατρέπει το σήμα εισόδου σε ψηφιακό σήμα εξόδου, το οποίο είναι διακριτό και δυαδικό – δηλαδή, αντιπροσωπεύεται από μόνο δύο τιμές, το 0 (0 Volt) και το 1 (5 Volt). Πλέον, οι ψηφιακοί αισθητήρες τείνουν να αντικαταστήσουν εξ ολοκλήρου τους αναλογικούς στην Βιομηχανία· επί παραδείγματι, εφαρμόζονται ήδη για την μέτρηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της πίεσης, καθώς και σε πληθώρα λοιπών φαινομένων και περιβαλλοντικών παραγόντων.



Εικόνα 2.18: Ψηφιακό Σήμα

2.5.2 Ενεργοί – Παθητικοί

Με βάση τον τρόπο διέγερσής τους – δηλαδή, εάν απαιτούν την χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας για να λειτουργήσουν – διακρίνονται σε ενεργούς και παθητικούς.

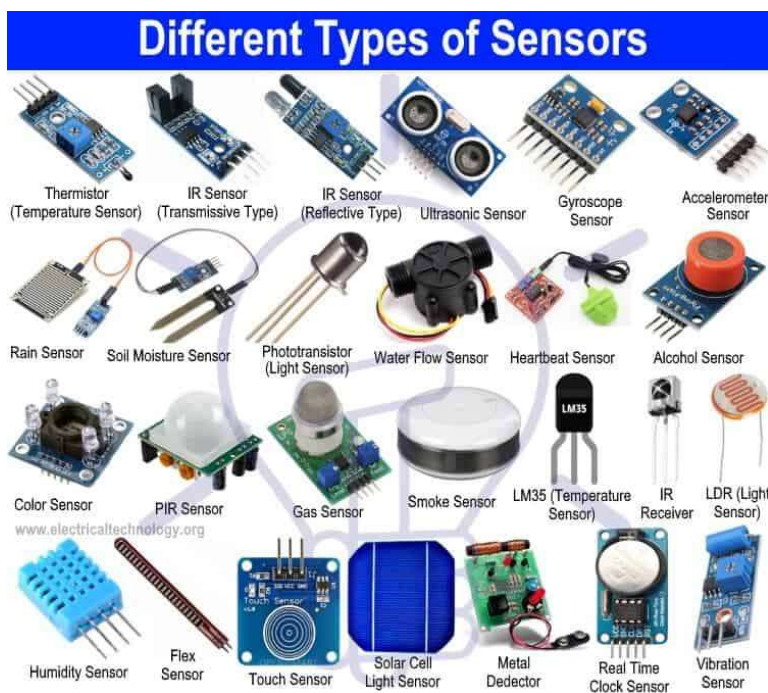
Ένας **ενεργός αισθητήρας** προϋποθέτει την χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας, προκειμένου να λειτουργήσει – δηλαδή, να μπορέσει να ανταποκριθεί καταλλήλως στην διαχείριση του σήματος εισόδου και να παράγει αξιόπιστο σήμα εξόδου. Επί παραδείγματι, τέτοιου είδους αισθητήρες χρησιμοποιούνται στους μετεωρολογικούς δορυφόρους, οι οποίοι απαιτούν την χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας, έτσι ώστε να μπορέσουν να ανιχνεύσουν και να μεταδώσουν πληροφορίες για την ατμόσφαιρα και τις καιρικές συνθήκες σε κατάλληλη μορφή.

Ένας **παθητικός αισθητήρας** δεν απαιτεί την χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας, προκειμένου να ανιχνεύσει κάποιο σήμα εισόδου και να λειτουργήσει, καθώς αντλεί την ενέργεια που χρειάζεται, στην κατάλληλη μορφή, από το ίδιο του το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει ένα φυσικό μέγεθος ως σήμα εισόδου – όπως το φως, την θερμική ή την μηχανική ενέργεια και το μετατρέπει στην κατάλληλη μορφή, έτσι ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί. Για παράδειγμα, έναν τέτοιο αισθητήρα αποτελεί το θερμόμετρο υδραργύρου, το οποίο ανιχνεύει την μεταβολή της θερμοκρασίας και μετατοπίζει την στάθμη του υδραργύρου μέσα σε βαθμονομημένο σωλήνα, με σκοπό την ένδειξη της θερμοκρασίας με ευανάγνωστο τρόπο.

2.6 Τύποι και Εφαρμογές Αισθητήρων

Οι αισθητήρες, πέρα από τα δύο βασικά κριτήρια, σύμφωνα με τα οποία κατηγοριοποιούνται, διακρίνονται σε μία πληθώρα τύπων, αναλόγως με την εξειδικευμένη ιδιότητά τους, δηλαδή, το φυσικό μέγεθος, το οποίο ανιχνεύουν και επεξεργάζονται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ταξινομούνται στους θερμικούς, τους χημικούς, τους μηχανικούς, τους μαγνητικούς και τους αισθητήρες ακτινοβολίας.

Ορισμένοι από τους πιο διαδεδομένους τύπους αισθητήρων είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, εγγύτητας, κίνησης, θέσης, φωτός, στάθμης, επιτάχυνσης και αφής· και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς της Βιομηχανίας. Επί παραδείγματι, οι αισθητήρες στάθμης είναι ικανοί να ανιχνεύσουν την στάθμη κάποιας φυσικής ουσίας, όπως το ύδωρ, τα καύσιμα, το λίπασμα ή και τα απόβλητα, και να εμφανίσουν κάποια ένδειξη ή να προχωρήσουν σε κάποια συγκεκριμένη ενέργεια – όπως να αποστείλουν ένα ηλεκτρικό σήμα ή να κάνουν κάποια μηχανική κίνηση – αναλόγως το πεδίο εφαρμογής τους. Στα οχήματα, λόγω χάρη, χρησιμοποιούνται αισθητήρες στάθμης υπεύθυνοι για την μέτρηση των επιπέδων τού καυσίμου, προκειμένου να ενημερώνεται ο οδηγός εγκαίρως και να αναπληρώνει το καύσιμο όποτε είναι αναγκαίο.



Εικόνα 2.19: Διάφοροι Τύποι Αισθητήρων

Όπως ήδη γνωρίζουμε, οι αισθητήρες υπάρχουν και εφαρμόζονται σε κάθε πτυχή της καθημερινότητάς μας με κάποιον τρόπο, και καθιστούν την ζωή μας πιο εύκολη, από τον τρόπο ζωής και το σύστημα υγείας, μέχρι την Βιομηχανία και την Επιστήμη. Τα πεδία εφαρμογής τους ποικίλουν και διακρίνονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- **Ιατρική** (π.χ. παρακολούθηση πίεσης αίματος, παρακολούθηση επιπέδων σακχάρου, χρήση ρομποτικής στις χειρουργικές επεμβάσεις, παρακολούθηση καρδιακού ρυθμού κλπ)
- **Βιομηχανία Ηλεκτρονικών Ευρείας Κατανάλωσης** (π.χ. μικρόφωνα, CMOS αισθητήρες εικόνας στις ψηφιακές κάμερες, αισθητήρες GPS, αισθητήρες αφής κλπ)
- **Αυτοκινητοβιομηχανία** (π.χ. αισθητήρες πίεσης ελαστικών, αισθητήρες επιτάχυνσης, αισθητήρες εγγύτητας για αποφυγή σύγκρουσης κλπ)
- **Βιομηχανικοί Αυτοματισμοί** (π.χ. αισθητήρες στάθμης, αισθητήρες πίεσης, ανίχνευση παρουσίας αερίων, αισθητήρες κίνησης κλπ)
- **Αγροτική Βιομηχανία** (π.χ. αισθητήρες ποιότητας εδάφους, αισθητήρες υγρασίας, αισθητήρες ροής αέρα στα θερμοκήπια κλπ)
- **Βιομηχανία Τροφίμων** (π.χ. αισθητήρες εύρεσης ξένων σωμάτων σε τρόφιμα, αισθητήρες καταμέτρησης των τεμαχίων, αισθητήρες pH κλπ)
- **Αεροπορία** (π.χ. αισθητήρες ταχύτητας αέρα, μέτρηση ύψους, αισθητήρες μέτρησης της πίεσης και των καυσίμων κλπ)
- **Στρατιωτική Βιομηχανία** (π.χ. έξυπνοι αισθητήρες εντοπισμού των στρατιωτών και μέτρησης των ζωτικών σημείων τους, ραντάρ και σόναρ για παρακολούθηση, έρευνα και διάσωση κλπ)



Εικόνα 2.20: Εφαρμογές Αισθητήρων

2.7 Συμπέρασμα

Με την ραγδαία πρόοδο της τεχνολογίας, οι αισθητήρες έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, έχοντας αφήσει πίσω την αρχική και παρωχημένη λειτουργία τους, η οποία περιοριζόταν στην απλή ανίχνευση φυσικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία και η πίεση. Πλέον, έχουν εξαπλωθεί σε όλους τους τομείς της Βιομηχανίας – και όχι μόνο – και υπάρχουν σε κάθε πιθανή μορφή, καθιστώντας μας ικανούς να παρακολουθούμε και να ελέγχουμε τον κόσμο γύρω μας ανά πάσα στιγμή. Η εξέλιξη των αισθητήρων έχει συμβάλει σημαντικά στην διευκόλυνση και την αναβάθμιση της καθημερινότητάς μας, καθώς είναι ικανοί να παρέχουν πιο ακριβείς και αξιόπιστες πληροφορίες, να διεκπεραιώνουν περισσότερες λειτουργίες αυτόματα, καθώς και να ανταποκρίνονται ταχύτερα και αποδοτικότερα στα ερεθίσματα που ανιχνεύουν. Όπως θα δούμε και παρακάτω, το μέλλον προβλέπεται ευοίωνο, αφού με την παρουσία της τεχνητής νοημοσύνης, πρόκειται να συναντήσουμε καινοτόμες εφευρέσεις και εφαρμογές πιο έξυπνων αισθητήρων σε εξελιγμένα περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 3: Οπτικές Ίνες

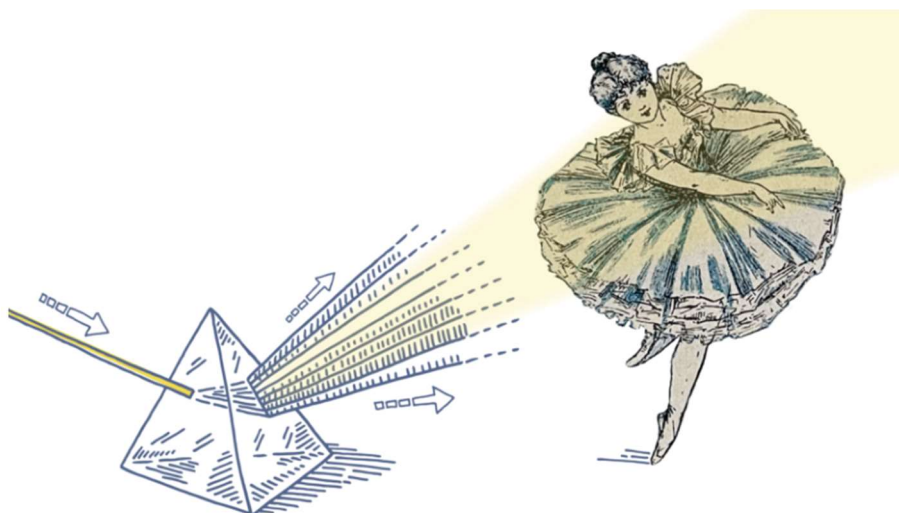
3.1 Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή, η οπτική ίνα αποτελεί τεχνολογία αιχμής, και οι εφαρμογές της – παρόλο που οι πιο ευρέως γνωστές αποτελούν την παροχή Διαδικτύου και τα δίκτυα υπολογιστών και τηλεφώνων – εξαπλώνονται σε όλους τους τομείς, από την απλή οικιακή χρήση, τις επιχειρήσεις και τις Τηλεπικοινωνίες, στην Βιομηχανία και την Επιστήμη. Ωστόσο, η απαρχή αυτής της περιζήτητης, πολύπλοκης, και διαρκώς εξελισσόμενης τεχνολογίας δεν βασίστηκε σε εμπορικούς σκοπούς, ούτε για λόγους ευχρηστίας, αλλά για αποκλειστικά αισθητικούς λόγους. Η ανάπτυξη της βασικής ιδέας της οπτικής ίνας χρονολογείται στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, όταν επιστήμονες χρησιμοποίησαν πίδακες νερού για την διοχέτευση του φωτός εντός του γυαλιού, παρατηρώντας ότι είναι δυνατός ο έλεγχος της δρομολόγησης του φωτός με την μέθοδο της διάθλασης. Όπως αποδείχθηκε αργότερα, η διάθλαση – η οποία αποτελεί την μεταβολή της κατεύθυνσης του φωτός, κατά την διέλευσή του από ένα μέσο σε ένα άλλο – είναι και η βασική αρχή λειτουργίας της οπτικής ίνας. Οπότε, η πρωταρχική λειτουργία της πρώιμης αυτής «οπτικής ίνας» ήταν η φωταγωγή σιντριβανιών, καθώς και παραστάσεων μπαλέτων και όπερας.

Στην συνέχεια, με την πάροδο των ετών, η ιδέα της διοχέτευσης και χρήσης του φωτός για την επίτευξη κάποιου σκοπού εξαπλώθηκε και σε άλλους τομείς, πέραν της απλής φωταγώγησης. Κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, ανακαλύφθηκε η πιο σύγχρονη έκδοση της οπτικής ίνας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση. Πιο συγκεκριμένα, επιστήμονες, με την χρήση εύκαμπτων ινών γυαλιού, εφηύραν το πρώτο ενδοσκόπιο, επιτρέποντας στους ιατρούς την απεικόνιση του εσωτερικού του ανθρώπινου σώματος και την πραγματοποίηση επεμβάσεων χωρίς νυστέρι. Έπειτα, με την εφεύρεση και την ενσωμάτωση του Laser με την οπτική ίνα, το οποίο αδιαμφισβήτητα αποτελεί ισχυρή και πολύ σημαντική ανακάλυψη, άνοιξαν νέοι ορίζοντες για τη οπτική ίνα, σε εφαρμογές όπως χειρουργικές επεμβάσεις, κοπές, ευθυγραμμίσεις κ.α. Στην συνέχεια, με την πρόοδο της τεχνολογίας, στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, η ιδέα της οπτικής ίνας συνδέθηκε με τις τηλεπικοινωνίες, όταν

κατασκευάστηκε το πρώτο διατλαντικό καλώδιο οπτικών ινών, το οποίο συνέδεσε την Ευρώπη με την Βόρεια Αμερική.

Τέλος, κατά την σημερινή εποχή, η οπτική ίνα εξακολουθεί να εξελίσσεται και να αναβαθμίζεται, εισχωρώντας σε όλο και περισσότερους τομείς, και αποκτώντας κυρίαρχο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες παγκοσμίως.



Εικόνα 3.1: Διοχέτευση του Φωτός εντός τού Γυαλιού για Φωταγωγήση

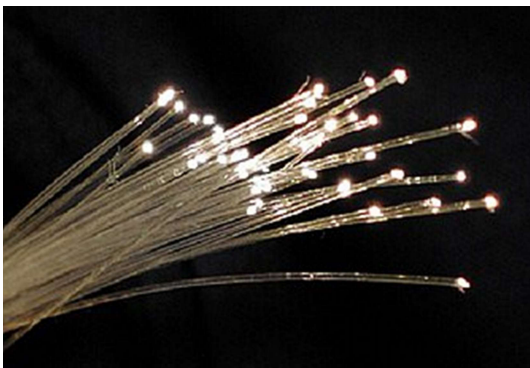
3.2 Ορισμός

Οι οπτικές ίνες αποτελούν ένα μέσο μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων σε μορφή σωματιδίων φωτός. Πιο συγκεκριμένα, η οπτική ίνα είναι ένα πολύ λεπτό και ευλύγιστο διαφανές νήμα, κατασκευασμένο από γυαλί ή πλαστικό, και με διάμετρο συνήθως μικρότερη των $10\mu\text{m}$ – δηλαδή, περίπου όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Στο ένα άκρο της δέχεται την πληροφορία σε μορφή φωτονίων· η πληροφορία αυτή, αρχικά, είναι ψηφιακό, αναλογικό ή ηχητικό σήμα, σήμα δεδομένων ή και εικόνας, το οποίο, κατόπιν της ψηφιοποίησής του, έχει μετατραπεί σε φως, προκειμένου να το λάβει η οπτική ίνα. Αντιστοίχως, στο άλλο άκρο της, αποστέλλει το φωτεινό σήμα σε κάποιον δέκτη, υπεύθυνο για την εκ νέου μετατροπή του σε ψηφιακό, και έπειτα, σε οποιαδήποτε άλλη επιθυμητή μορφή, όπως ήχο, εικόνα κλπ.

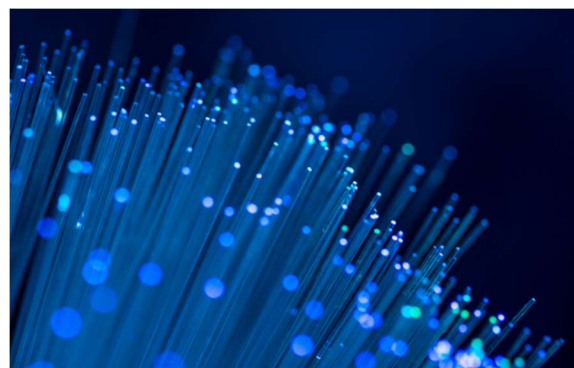
Κατ' αυτόν τον τρόπο, με την διοχέτευση της πληροφορίας διαμέσου της οπτικής ίνας, μεταξύ των δύο άκρων της, με την μορφή φωτονίων, επιτυγχάνεται ταχύτερη

μετάδοση, σε μεγαλύτερες αποστάσεις, καθώς και το ψηφιακό σήμα διατηρείται πιο σταθερό. Σε αντίθεση με τα μεταλλικά σύρματα, τα οποία εμπεριέχονται στα συμβατικά ηλεκτρικά καλώδια, με την χρήση οπτικών ινών παρατηρείται σημαντικά λιγότερη απώλεια κατά την μετάδοση των δεδομένων, εφόσον το φως ανακλάται διαδοχικά στα τοιχώματα της οπτικής ίνας και μεταφέρεται χωρίς να την διαπερνά και να διαφεύγει, παραμένοντας ανεπηρέαστο από οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

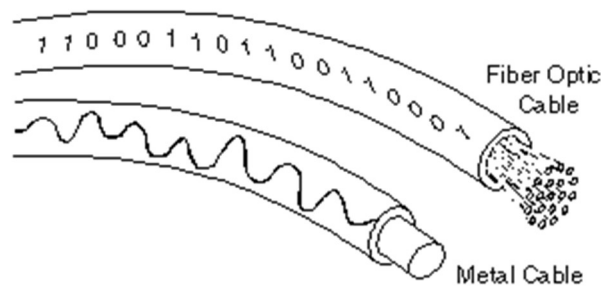
Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι φανερό ότι οι ιδιότητές τους καθιστούν τις οπτικές ίνες περιζήτητες και καταλληλότερες από άλλες επιλογές – όπως, λόγου χάρη, τα προαναφερθέντα ηλεκτρικά καλώδια – αφού χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες, την κατασκευή δικτύων, καθώς και για τον φωτισμό ή την προβολή εικόνων. Επιπροσθέτως, οι οπτικές ίνες είναι εξίσου προτιμότερες, λόγω του γεγονότος ότι δεν είναι αγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος· για αυτόν τον λόγο, αποτελούν ασφαλέστερη επιλογή για εφαρμογές σε περιβάλλοντα υψηλής τάσεως, όπως σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, υπό συνθήκες συχνής παρουσίας εκρηκτικών αερίων, καθώς και πτώσεων κεραυνών. Ωστόσο, μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές, η οποία αποτελεί και το κύριο θέμα αυτής της εργασίας, είναι στους αισθητήρες οπτικών ινών, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 3.2: Δέσμη Οπτικών Ινών (1)



Εικόνα 3.3: Δέσμη Οπτικών Ινών (2)



Εικόνα 3.4: Οπτικό Καλώδιο και Ηλεκτρικό Καλώδιο

3.3 Η Δομή της Οπτικής Ίνας

Ξεκινώντας από την οπτική ίνα ως το θεμελιώδες στοιχείο, θα αναλύσουμε τα δομικά της χαρακτηριστικά, και στην συνέχεια θα προχωρήσουμε στην μελέτη τού καλωδίου οπτικών ινών. Τέλος, θα καταλήξουμε στην περιγραφή και τον τρόπο λειτουργίας τού δικτύου, μέσα στο οποίο υπάρχουν και λειτουργούν τα καλώδια οπτικών ινών ως το βασικό εξάρτημα.

3.3.1 Η Οπτική Ίνα

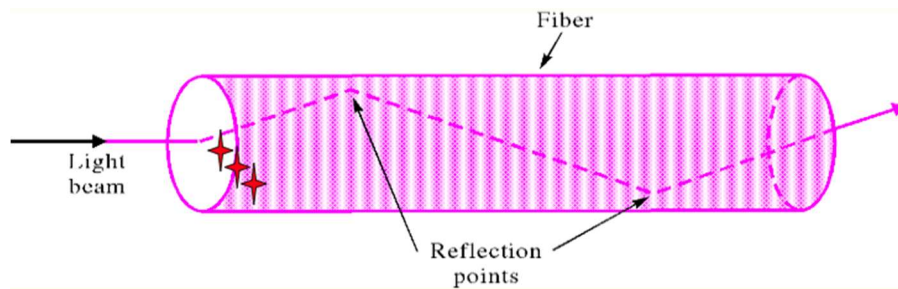
Όπως ήδη γνωρίζουμε, τα φωτόνια μεταδίδονται διαμέσου της οπτικής ίνας, διαδοχικά ανακλώμενα στα τοιχώματά της· για τον λόγο αυτό, η οπτική ίνα αποτελείται από διακριτά μέρη, τα οποία εξασφαλίζουν ότι το φως δεν θα την διαπεράσει και δεν θα διαφύγει στο περιβάλλον, διατηρώντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την σταθερότητα του σήματος, με την ελάχιστη δυνατή απώλεια. Το γεγονός ότι το φως προσπίπτει στην εσωτερική επιφάνεια της οπτικής ίνας και ανακλάται ολοκληρωτικά, χωρίς να διαθλάται σχεδόν καθόλου, ονομάζεται «**ολική εσωτερική ανάκλαση**». Κατ' αυτόν τον τρόπο, η οπτική ίνα είναι ικανή να συμπεριφέρεται ως οδηγός κύματος· το γεγονός αυτό οφείλεται στους μανδύες που την περιβάλλουν, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Αρχικά, στο κέντρο μιας οπτικής ίνας βρίσκεται ο **πυρήνας (core)**, ο οποίος αποτελεί το γυάλινο κυλινδρικό νήμα, διαμέσου του οποίου μεταφέρονται τα φωτόνια, και

είναι η περιοχή της οπτικής ίνας με τον μεγαλύτερο **δείκτη διάθλασης**. Με τον όρο αυτόν, αναφερόμαστε στην αναλογία της ταχύτητας του φωτός εντός ενός μέσου αναφοράς – όπως το κενό – ως προς την ταχύτητα του φωτός μέσα σε οποιοδήποτε άλλο μέσο, κατασκευασμένο από οποιοδήποτε υλικό – στην προκειμένη περίπτωση μιλάμε για το υλικό του πυρήνα. Ο δείκτης διάθλασης n εκφράζεται ως εξής:

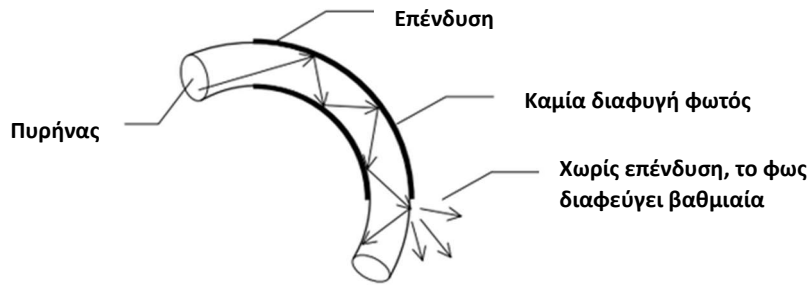
$$n = \frac{c}{u} = \frac{\text{ταχύτητα διάδοσης φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα διάδοσης φωτός στο μέσο}}$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διάθλασης, τόσο βραδύτερα ταξιδεύουν τα φωτόνια εντός του συγκεκριμένου μέσου, επιτυγχάνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την ολική εσωτερική ανάκλαση εντός του πυρήνα της οπτικής ίνας. Εξ ορισμού, ο δείκτης διάθλασης του κενού ισούται με την μονάδα, το οποίο σημαίνει ότι το φως ταξιδεύει με την μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα.

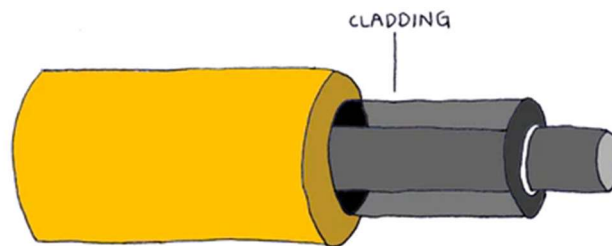


Εικόνα 3.5: Ο Πυρήνας της Οπτικής Ίνας

Έπειτα, ο πυρήνας περιβάλλεται από την **επένδυση** ή επικάλυψη (cladding), κατά μήκος ολόκληρης της οπτικής ίνας, η οποία είναι υπεύθυνη για την διατήρηση των φωτονίων εντός του πυρήνα, ανακλώντας τα πίσω στο εσωτερικό του, εμποδίζοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα να διαφύγει, σε περίπτωση πιθανής διάθλασης του φωτός. Η επένδυση αποτελεί ένα λεπτό στρώμα, κατασκευασμένο από γυαλί με προσμείξεις, έτσι ώστε να διαθέτει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα, προκειμένου να διασφαλιστεί η μεταφορά του σήματος, με την ελάχιστη δυνατή απώλεια ή διάχυση του φωτός.

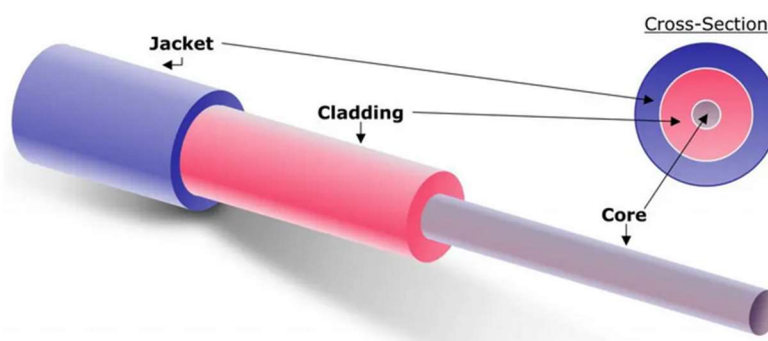


Εικόνα 3.6: Η Λειτουργία της Επένδυσης της Οπτικής Ίνας



Εικόνα 3.7: Η Επένδυση της Οπτικής Ίνας

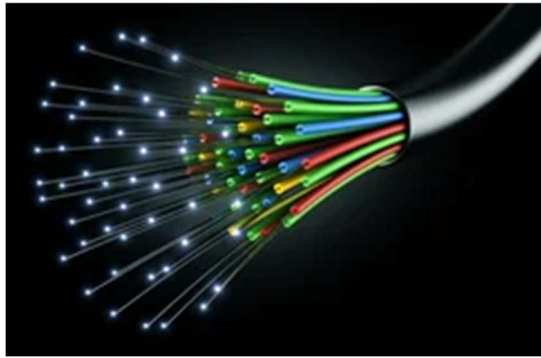
Επιπροσθέτως, υπάρχει το εξωτερικό **περίβλημα (jacket)**, το οποίο επικαλύπτει την προαναφερθείσα εσωτερική επένδυση, και είναι υπεύθυνο για την προστασία τού πυρήνα και της επένδυσης αυτής από διάφορες δυσμενείς συνθήκες, όπως, για παράδειγμα, την υγρασία, την τριβή, ή και οποιαδήποτε πιθανή μηχανική βλάβη. Το περίβλημα αυτό είναι κατασκευασμένο από ανθεκτικό, αλλά και ευλύγιστο πολυμερές υλικό, όπως το πλαστικό ή το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC).



Εικόνα 3.8: Η Δομή της Οπτικής Ίνας

Ωστόσο, όταν μια οπτική ίνα αποτελεί μέρος ενός οπτικού καλωδίου, όπως θα δούμε και παρακάτω, περικλείεται από έναν **επιπλέον μανδύα**, ο οποίος φέρει ένα

συγκεκριμένο χρώμα, χάριν ευκολίας, για την διάκριση και την αναγνώριση των διαφόρων οπτικών ινών εντός τού καλωδίου.



Εικόνα 3.9: Το Οπτικό Καλώδιο

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, εκτός του γυαλιού, ο πυρήνας και η επένδυση της οπτικής ίνας μπορούν εναλλακτικά να κατασκευαστούν από **πλαστικό**, το οποίο αποτελεί υλικό που δεν είναι τόσο καθαρό όσο το γυαλί. Τα οφέλη του πλαστικού επικεντρώνονται στο χαμηλό κόστος, την εύκολη εγκατάσταση, καθώς και στο γεγονός ότι είναι πιο ευλύγιστο υλικό. Απεναντίας, τα μειονεκτήματά του ποικίλουν, με σημαντικότερο εξ αυτών την διασπορά τού φωτός, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του σήματος, καθώς και την αδυναμία μετάδοσης σε αποστάσεις τόσο μεγάλες όσο επιτυγχάνονται αντίστοιχα με την χρήση γυαλιού. Για τον λόγο αυτό, οι κύριες εφαρμογές των οπτικών ινών από πλαστικό περιορίζονται στις καταναλωτικές, όπως τον φωτισμό, τα συστήματα ήχου, τα οχήματα, καθώς και τα οικιακά συστήματα αυτοματοποίησης.

3.3.2 Το Καλώδιο Οπτικών Ινών

Συνήθως, οι οπτικές ίνες δεν χρησιμοποιούνται μεμονωμένες η καθεμιά, αλλά συναντώνται συγκεντρωμένες σε δέσμες, οι οποίες και αποτελούν τα **καλώδια οπτικών ινών**. Ένα τέτοιου είδους καλώδιο εμπεριέχει εκατοντάδες οπτικές ίνες, οι οποίες είναι πλήρως προστατευμένες εντός του καλωδίου, καθώς και διαχωρίζονται η μία από την άλλη, μέσω των επικαλύψεών τους, για την αποφυγή πιθανών παρεμβολών μεταξύ τους. Το καλώδιο οπτικών ινών χρησιμοποιείται συνήθως σε

εφαρμογές όπου απαιτείται η μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, και με υψηλότερο εύρος ζώνης, δηλαδή, ταχύτερη μετάδοση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων. Το οπτικό καλώδιο είναι και αυτό εξίσου κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση του σήματος σταθερού με την ελάχιστη δυνατή απώλεια, η διατήρηση των φωτονίων εντός του καλωδίου χωρίς διαρροή, καθώς και η προστασία από επιβλαβείς εξωτερικούς παράγοντες.



Εικόνα 3.10: Καλώδιο Οπτικών Ινών (1)



Εικόνα 3.11: Καλώδιο Οπτικών Ινών (2)

Πιο συγκεκριμένα, το οπτικό καλώδιο αποτελείται από επιμέρους τμήματα, όπως και η οπτική ίνα, το καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για κάποιον συγκεκριμένο σκοπό. Αρχικά, στο κέντρο τού καλωδίου βρίσκεται ο **πυρήνας (core)**, ο οποίος αποτελείται από μία ή περισσότερες οπτικές ίνες συγκεντρωμένες σε μία δέσμη. Η κάθε οπτική ίνα, η οποία εμπεριέχεται στο καλώδιο, έχει την δομή και λειτουργεί με βάση τους κανόνες στους οποίους αναφερθήκαμε παραπάνω· στην προκειμένη περίπτωση επικαλύπτεται και από τον επιπλέον εξωτερικό μανδύα που φέρει συγκεκριμένο διακριτό χρώμα.

Έπειτα, με βάση τον σκοπό και το πεδίο εφαρμογής του, το καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να περιλαμβάνει κάποιο **ενισχυτικό καλώδιο (central strength wire)** στο κέντρο του, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επιπλέον ενίσχυση και στήριξή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η προστασία του από επιβλαβείς εξωτερικούς παράγοντες, καθώς και από πιθανές βλάβες κατά την εγκατάσταση, ή και την λειτουργία του – όπως είναι οι πιέσεις, οι εφελκυσμοί και οι τριβές. Το κεντρικό ενισχυτικό καλώδιο κατασκευάζεται από υψηλής αντοχής υλικά, όπως το ατσάλι ή τα νήματα Kevlar, τα οποία αποτελούν τύπο ισχυρών συνθετικών ινών. Αξίζει να

σημειωθεί ότι οι ίνες Kevlar χρησιμοποιούνται και γενικότερα για την ενίσχυση του οπτικού καλωδίου, όπου χρειάζεται, πέρα από το κεντρικό ενισχυτικό καλώδιο.

Επιπροσθέτως, συχνά, στα οπτικά καλώδια εμπεριέχεται κάποιου είδους **gel**, το οποίο είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση της υγρασίας, διατηρώντας τα στεγνά, αποτρέποντας την επαφή των οπτικών ινών με το νερό.

Στην συνέχεια, συνήθως συναντάται η **εσωτερική επένδυση**, η οποία είναι υπεύθυνη για την εσωτερική ανάκλαση των φωτονίων πίσω στις οπτικές ίνες, σε περίπτωση πιθανής διάθλασης στο εξωτερικό τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρχει διαφυγή τού φωτός έξω από το καλώδιο στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να εκμηδενίζεται και το ποσοστό απώλειας τής πληροφορίας.

Τέλος, τα παραπάνω περιεχόμενα του καλωδίου οπτικών ινών περικλείονται από κάποιο **εξωτερικό περίβλημα** (jacket) – το οποίο επιτελεί τον ίδιο σκοπό με το αντίστοιχο εξωτερικό περίβλημα της οπτικής ίνας – και είναι υπεύθυνο για την περαιτέρω προστασία των οπτικών ινών. Το περίβλημα αυτό είναι αρκετά ανθεκτικό, κατασκευασμένο από καουτσούκ ή ατσάλι, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται το καλώδιο από περιβαλλοντικούς παράγοντες, καιρικά φαινόμενα, καθώς και πιθανές μηχανικές βλάβες κατά την λειτουργία του, λαμβάνοντας υπόψιν πάντα το πεδίο εφαρμογής και τους σκοπούς χρήσης. Το καουτσούκ προτιμάται για εφαρμογές σε μικρότερα καλώδια για οικιακή κυρίως χρήση, ενώ το ατσάλι για καλώδια μεγαλύτερων διαστάσεων για χρήση σε εξωτερικούς χώρους.



Εικόνα 3.12: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου (1)

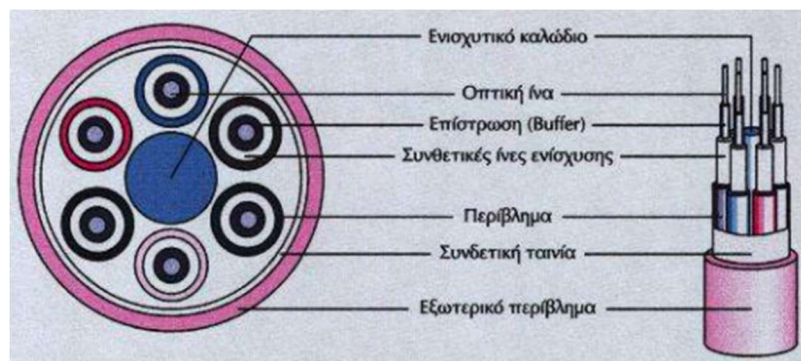


Εικόνα 3.13: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου (2)

Τα καλώδια οπτικών ινών διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, με βάση την κατασκευή τους, και είναι τα εξής:

- **Καλώδια Οπτικών Ινών Κατασκευής Tight Buffer**

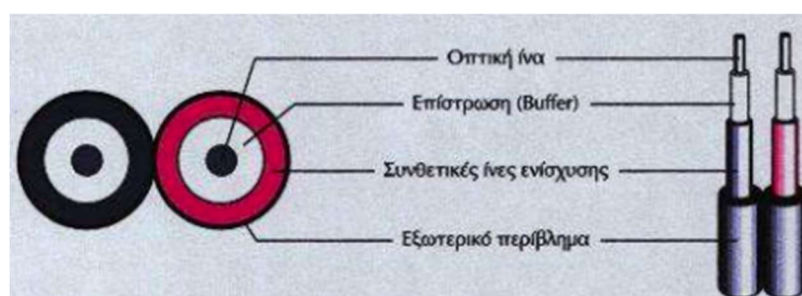
Στα καλώδια αυτά, στην κάθε οπτική τους ίνα, αλλά και εξωτερικά της επένδυσης, υπάρχουν ανθεκτικές συνθετικές ίνες, καθώς και μονωτικό περίβλημα. Επίσης, εντός τού οπτικού καλωδίου, εμπεριέχονται και καλώδια που συμβάλλουν στην ενίσχυση και την στήριξή του, όπως το κεντρικό ενισχυτικό καλώδιο, στο οποίο αναφερθήκαμε παραπάνω. Τέλος, όλα αυτά τα εξαρτήματα περιβάλλονται από το εξωτερικό περίβλημα του οπτικού καλωδίου.



Εικόνα 3.14: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου Tight Buffer

- **Καλώδιο Οπτικών Ινών Κατασκευής Patch Cord**

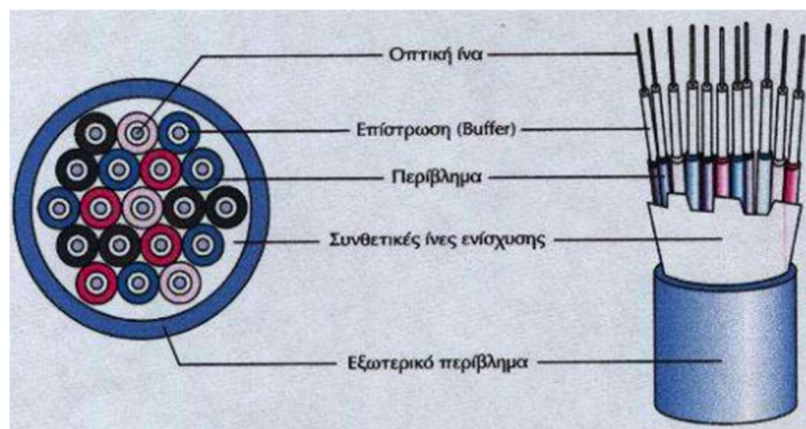
Τα καλώδια αυτά, κατασκευασμένα με παρόμοιο τρόπο όπως και τα Tight Buffer, είναι πιο εύκαμπτα και αποτελούνται από δύο καλώδια, τα οποία εμπεριέχουν οπτικές ίνες κατασκευασμένες από πλαστικό, και ενώνονται μεταξύ τους εξωτερικά.



Εικόνα 3.15: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου Patch Cord

- **Καλώδια Οπτικών Ινών Κατασκευής Loose Buffer**

Στα καλώδια αυτά, οι οπτικές τους ίνες, συμπεριλαμβανομένων των περιβλημάτων τους, είναι τοποθετημένες με ελεύθερο τρόπο εντός αυτού, μαζί με τις ανθεκτικές συνθετικές ίνες, υπεύθυνες για την επιπλέον ενίσχυση του καλωδίου. Τέλος, όλα τα περιεχόμενα του οπτικού καλωδίου περικλείονται από το εξωτερικό περίβλημα, ομοίως με την Tight Buffer κατασκευή.



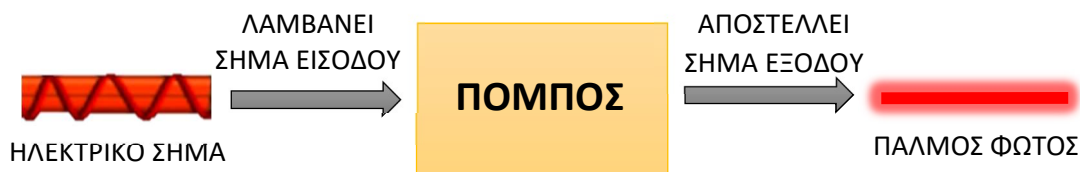
Εικόνα 3.16: Η Δομή του Οπτικού Καλωδίου Loose Buffer

3.3.3 Το Δίκτυο Οπτικών Ινών

Η οπτική ίνα, γενικότερα, και κατ' επέκταση τα καλώδια οπτικών ινών, προκειμένου να ευσταθήσουν ως οντότητες και να χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου δικτύου, στο οποίο εμπεριέχονται και άλλες οντότητες που επιτελούν κάποια συγκεκριμένη λειτουργία η καθεμιά. Τα τρία βασικά μέρη ενός δικτύου οπτικών ινών αποτελούν τον πομπό, το μέσο μεταφοράς των δεδομένων, καθώς και τον δέκτη, όπως θα δούμε στην συνέχεια. Επιπροσθέτως, υπό συγκεκριμένες συνθήκες και για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες αποστάσεις, παρατηρείται και η παρουσία ενισχυτή σήματος.

Κατ' αρχάς, στο ένα άκρο τού οπτικού καλωδίου βρίσκεται ο **πομπός**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετατροπή του αρχικού ηλεκτρικού σήματος, ψηφιακού ή αναλογικού, σε φωτόνια, καθώς και για την εκπομπή του με την μορφή παλμών φωτός. Είναι συνδεδεμένος με το καλώδιο και αποτελείται από τρία βασικά τμήματα

– ένα **κύκλωμα διασύνδεσης** υπεύθυνο για την λήψη των ηλεκτρικών σημάτων, ένα **οπτικό ανιχνευτή** για την μετατροπή των σημάτων σε παλμούς φωτός, καθώς και μία **πηγή φωτός**, η οποία πυροδοτείται από τον οπτικό ανιχνευτή, για την διοχέτευση των φωτονίων στο εσωτερικό του οπτικού καλωδίου. Τέτοιες πηγές φωτός για χρήση στα δίκτυα οπτικών ινών, συνήθως, αποτελούν οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) για λιγότερο δαπανηρές εφαρμογές με μετάδοση σε μικρότερες αποστάσεις, ή οι δίοδοι laser, για πιο ακριβές εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αντιστοίχως.



Σχήμα 3.1: Λειτουργία Πομπού σε Δίκτυο Οπτικών Ινών

Έπειτα, ακολουθεί το **μέσο μεταφοράς**, το οποίο είναι το καλώδιο οπτικών ινών. Όπως ήδη γνωρίζουμε, είναι υπεύθυνο για την μετάδοση των δεδομένων σε μορφή κύματος φωτός, με την μέθοδο των διαδοχικών ανακλάσεων στα τοιχώματα των οπτικών ινών, τις οποίες και εμπεριέχει στο εσωτερικό του.

Στην συνέχεια, στο άλλο άκρο του καλωδίου οπτικών ινών βρίσκεται ο **δέκτης**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την λήψη της πληροφορίας σε μορφή φωτός, καθώς και για την εκ νέου μετατροπή της σε ψηφιακό σήμα, και έπειτα στην αρχική της μορφή. Ο δέκτης είναι συνδεδεμένος με το καλώδιο, και αποτελείται από διακριτά τμήματα, όπως και ο πομπός. Αρχικά, το σήμα προς λήψη ανιχνεύεται από τον **οπτικό ανιχνευτή**, ο οποίος, στην ουσία, είναι φωτοδίοδοι, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την μετατροπή του από φωτόνια σε ηλεκτρικό ρεύμα, ή γενικότερα στην αρχική του μορφή. Έπειτα, το τροποποιημένο σήμα λαμβάνεται από τον **ενισχυτή**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ενίσχυσή του σε τέτοιο βαθμό, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία του. Λαμβάνοντας υπόψιν τον τύπο μετατροπής του σήματος, καθώς και της ηλεκτρικής εξόδου, η διάταξη του δέκτη ενδέχεται να διαφέρει για την εκάστοτε εφαρμογή.

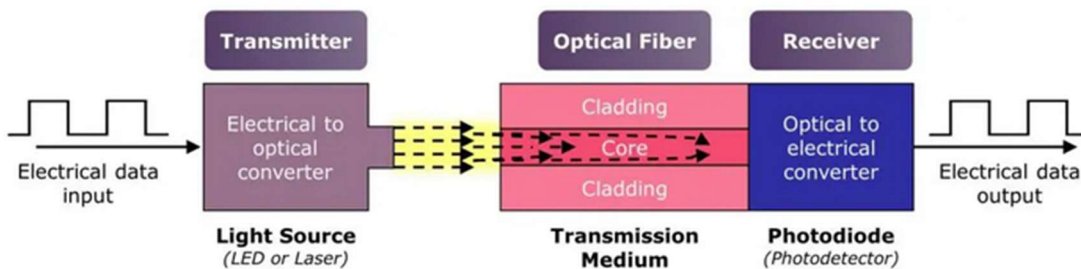


Σχήμα 3.2: Λειτουργία Δέκτη σε Δίκτυο Οπτικών Ινών

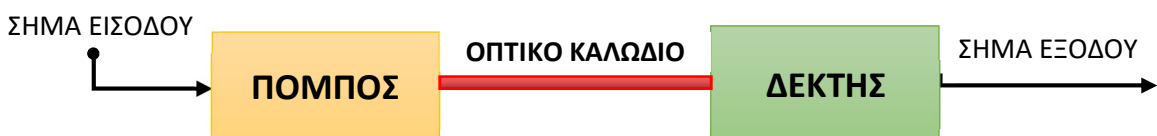
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για εφαρμογές όπου απαιτείται η μετάδοση του σήματος σε μεγάλες αποστάσεις, συνήθως χρησιμοποιείται μία επιπλέον οντότητα στο δίκτυο, ο **ενισχυτής σήματος**. Είναι απαραίτητος, στην προκειμένη περίπτωση, αφού το σήμα είναι πολύ πιθανό να υφίσταται εξασθένηση, κατά την μετάδοσή του σε μακρινές αποστάσεις, επιφέροντας απώλεια δεδομένων. Ο ενισχυτής είναι υπεύθυνος για την ενίσχυση του σήματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, και αποτελείται από κυκλώματα, τα οποία έχουν σκοπό την λήψη τού εξασθενημένου κύματος φωτός και την εκ νέου εκπομπή τού σήματος με πλήρη ισχύ.



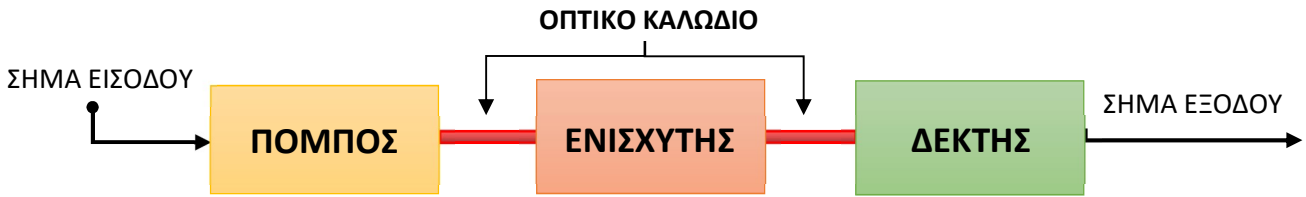
Σχήμα 3.3: Λειτουργία Ενισχυτή σε Δίκτυο Οπτικών Ινών



Εικόνα 3.17: Διάγραμμα Δικτύου Οπτικών Ινών



Σχήμα 3.4: Δίκτυο Οπτικών Ινών



Σχήμα 3.5: Δίκτυο Οπτικών Ινών με Ενισχυτή

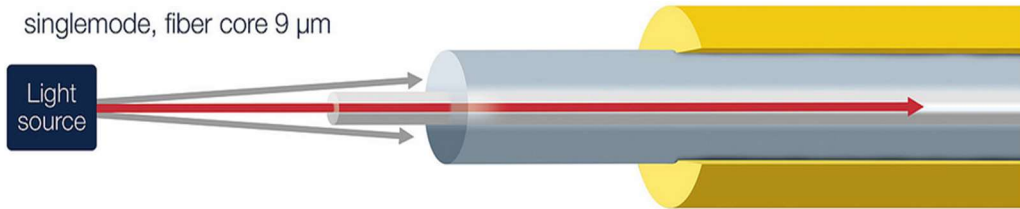
3.4 Κατηγορίες Οπτικών Ινών

Όπως ήδη γνωρίζουμε, οι οπτικές ίνες, ανεξαρτήτως της γενικής βασικής δομής τους, διαφέρουν ως προς κάποιες ιδιότητές τους, αναλόγως με το πεδίο εφαρμογής τους και τον τρόπο, με τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Για αυτόν τον λόγο, καθώς και για την εύκολη αναγνώριση και επιλογή των καταλλήλων για τις εκάστοτε συνθήκες, ομαδοποιούνται σε επιμέρους κατηγορίες, με γνώμονα το πλήθος των ρυθμών μετάδοσης που είναι ικανές να υποστηρίξουν ταυτόχρονα· οι δύο αυτές κατηγορίες αποτελούν τις **μονότροπες** και τις **πολύτροπες** οπτικές ίνες, όπως θα δούμε παρακάτω.

- **Μονότροπες Οπτικές Ίνες (Single Mode Optical Fibers)**

Οι μονότροπες οπτικές ίνες υποστηρίζουν έναν μόνο τρόπο μετάδοσης του φωτός στο εσωτερικό τους, καθώς η διάμετρος του πυρήνα τους είναι πολύ μικρή, μέχρι και 10 μm – δηλαδή, προσεγγίζει τις διαστάσεις τού ίδιου του μήκους κύματος του σήματος που μεταφέρεται. Ο μοναδικός αυτός τρόπος μετάδοσης που επιτρέπει η μονότροπη οπτική ίνα είναι σε ευθεία γραμμή, εμποδίζοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, τα φωτόνια να αναπηδούν και να ανακλώνται στα τοιχώματά της, και απορρίπτοντας, κατ' επέκταση, την είσοδο ακτινών μεταδιδόμενων υπό διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Η ιδιότητά της αυτή επιτρέπει την διάδοση του σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε πολύ υψηλές ταχύτητες, με σημαντικά μικρότερη απώλεια δεδομένων.

Οπότε, οι μονότροπες οπτικές ίνες εφαρμόζονται κυρίως σε δίκτυα επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων, που υπερβαίνουν το 1 χιλιόμετρο. Συνήθως, το χρώμα τού εξωτερικού περιβλήματός τους, για την διάκρισή τους από τις πολύτροπες, είναι το κίτρινο.

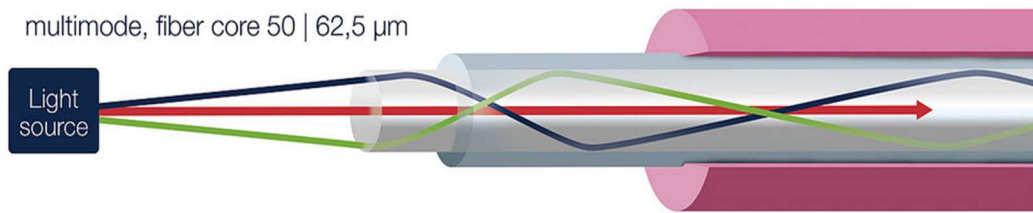


Εικόνα 3.18: Η Μονότροπη Οπτική Ίνα

- **Πολύτροπες Οπτικές Ίνες (Multimode Optical Fibers)**

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες υποστηρίζουν πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης του φωτός στο εσωτερικό τους ταυτόχρονα, καθώς η διάμετρος του πυρήνα τους κυμαίνεται από 50μm έως 100μm – είναι, δηλαδή, σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν της μονότροπης οπτικής ίνας. Τα κύματα φωτός διέρχονται στο εσωτερικό τής οπτικής ίνας υπό διαφορετικές γωνίες, και ανακλώνται διαδοχικά στα τοιχώματά της, το καθένα ακολουθώντας το μοναδικό του διακριτό μονοπάτι. Αυτό σημαίνει ότι η οπτική ίνα, στην προκειμένη περίπτωση, δέχεται όλα τα είδη μετάδοσης, είτε σε ευθεία γραμμή ή όχι, ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης· κατ' αυτό τον τρόπο, επιτρέπει την μετάδοση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι το κάθε κύμα φωτός φτάνει στον προορισμό του, συνήθως, με κάποια μικρή χρονοκαυστέρηση, καθώς και εξασθενημένο, με μεγαλύτερη πιθανότητα απώλειας.

Οπότε, οι πολύτροπες οπτικές ίνες εφαρμόζονται κυρίως σε δίκτυα επικοινωνιών μικρότερων αποστάσεων, σε εφαρμογές όπου απαιτείται η μετάδοση σημάτων υψηλούς ισχύος, δηλαδή, σημάτων που μεταφέρουν τεράστιο όγκο δεδομένων. Συνήθως, το χρώμα τού εξωτερικού περιβλήματός τους, για την διάκρισή τους από τις μονότροπες, καθώς και από τους ποικίλους τύπους των πολύτροπων οπτικών ινών, είναι το πορτοκαλί, το ροζ, το γαλάζιο και το πράσινο.



Εικόνα 3.19: Η Πολύτροπη Οπτική Ίνα

Όπως είναι ήδη γνωστό, ο πυρήνας της οπτικής ίνας, γενικότερα, περιβάλλεται από γυάλινη επένδυση με μικρότερο δείκτη διάθλασης, η οποία είναι υπεύθυνη για την περαιτέρω ανάκλαση των φωτονίων πίσω στο εσωτερικό του, σε περίπτωση διάθλασης του φωτός στο εξωτερικό του. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διαφοροποιούνται σε δύο υποκατηγορίες, με βάση τον τρόπο μεταβολής του δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης αυτής, και είναι οι εξής:

- **Πολύτροπες Οπτικές ίνες Διακριτού Δείκτη (Step Index)**

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακριτού δείκτη χαρακτηρίζονται από την **απότομη μεταβολή** του δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα τους και της επένδυσης που τον περιβάλλει. Δηλαδή, στη επιφάνεια, στην οποία εφάπτεται ο πυρήνας με την επένδυση, συναντάται ξαφνική αλλαγή του δείκτη διάθλασης μεταξύ των δύο υλικών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η πληθώρα των διαφορετικών ακτινών φωτός μπορεί να μεταδίδεται ελεύθερα κατά μήκος της οπτικής ίνας, εγγύτερα του άξονα, καθώς και υπό πολλές διαφορετικές γωνίες.

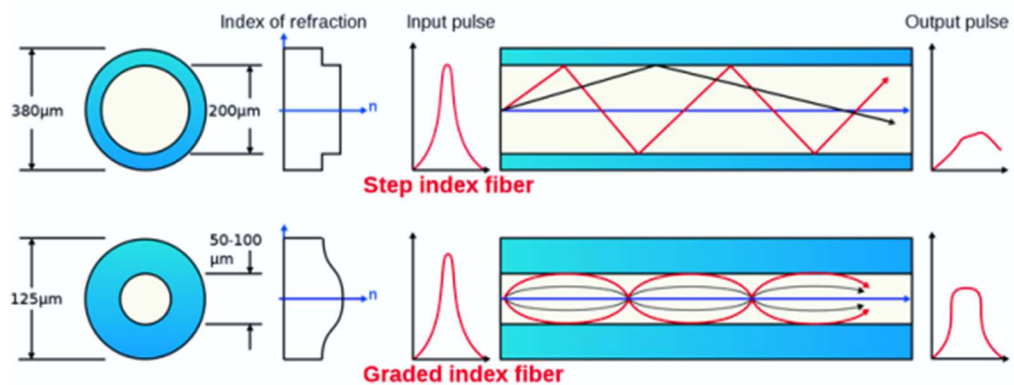
Ωστόσο, η απότομη αυτή απόκλιση του δείκτη διάθλασης αυξάνει το ποσοστό διασποράς του εκάστοτε κύματος φωτός που μεταφέρεται σε διαφορετικό μονοπάτι, προξενώντας χρονοκαθυστέρηση της άφιξης του καθενός στον προορισμό του, δηλαδή, στον δέκτη.

- **Πολύτροπες Οπτικές ίνες Βαθμιαίου Δείκτη (Graded Index)**

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες βαθμιαίου δείκτη χαρακτηρίζονται από την **σταδιακή μεταβολή** του δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα

τους και της επένδυσης που τον περιβάλλει. Αυτό επιτυγχάνεται με την ιδιότητα του υλικού του πυρήνα να κατέχει μεταβλητό δείκτη διάθλασης. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης διάθλασής του ξεκινά από την μέγιστη δυνατή τιμή του στο κέντρο του, και μειώνεται σταδιακά, φτάνοντας στην ελάχιστη τιμή του, στο σημείο όπου εφάπτεται με την επένδυση. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο του πυρήνα, τόσο ελαττώνεται ο δείκτης διάθλασης του υλικού, προκειμένου να φτάσει βαθμιαία στην τιμή του δείκτη διάθλασης της επένδυσης.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι μεταδιδόμενες ακτίνες φωτός «λυγίζουν» όσο πλησιάζουν προς τις άκρες του πυρήνα, και κατ' επέκταση την επένδυση – χωρίς να αναπηδούν στα τοιχώματά του – ακολουθώντας παραβολικές τροχιές, διαδοχικά συγκλίνουσες και αποκλίνουσες. Η ιδιότητά τους αυτή έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της διασποράς του φωτός, καθώς και των αποκλίσεων της ταχύτητας μετάδοσης των πολλών διαφόρων κυμάτων φωτός.



Εικόνα 3.20: Πολύτροπη Οπτική Ίνα Διακριτού και Βαθμιαίου Δείκτη

3.5 Χαρακτηριστικά Οπτικών Ινών

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν κάποια κοινά βασικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές, τα οποία τις χαρακτηρίζουν, και κατ' επέκταση μας καθιστούν ικανούς να επιλέξουμε τα κατάλληλα καλώδια, αναλόγως τις ανάγκες μας. Τα χαρακτηριστικά αυτά

καθορίζουν την αποδοτικότητα των οπτικών ινών σχετικά με την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος, την ισχύ του, το εύρος ζώνης του, καθώς και την γενικότερη απόδοση της οπτικής ίνας, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

- **Ταχύτητα Μετάδοσης (Transmission Speed)**

Η ταχύτητα μετάδοσης αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία μεταδίδονται τα δεδομένα στο εσωτερικό τής οπτικής ίνας. Τα καλώδια οπτικών ινών διακρίνονται για την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος, καθώς η μεταφορά του με την μορφή φωτονίων διασφαλίζει την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα μετάδοσης από τον πομπό στον δέκτη.

- **Εύρος Ζώνης (Bandwidth)**

Το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας αναφέρεται στο **εύρος των συχνοτήτων** που επιτρέπεται να μεταδοθούν διαμέσου της, και κατ' επέκταση, στον όγκο των δεδομένων που είναι ικανή να μεταφέρει από τον πομπό στον δέκτη, κατά την διάρκεια κάποιου συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (ρυθμός μετάδοσης). Στην περίπτωση του Διαδικτύου, εκφράζεται συνήθως σε bits ή gigabits ανά δευτερόλεπτο (bps ή Gbps), ενώ σε αναλογικές συσκευές σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (Hertz).

- **Εξασθένηση (Attenuation)**

Η πιθανή εξασθένηση του σήματος, εντός της οπτικής ίνας, μειώνει την ισχύ του, κατά την μετάδοσή του σε μεγάλες αποστάσεις. Οπότε, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο της εξασθένησης, στον υπολογισμό τής μέγιστης δυνατής απόστασης που μπορεί να υποστηρίξει η οπτική ίνα, έτσι ώστε το σήμα να είναι ικανό να διαδοθεί, με συγκεκριμένη ισχύ. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα αποφευχθεί η μείωση της ισχύος του, και κατ' επέκταση η απώλεια δεδομένων.

- **Διασπορά (Dispersion)**

Η διασπορά αναφέρεται στην **εξάπλωση** ενός παλμού φωτός, κατά την μετάδοσή του διαμέσου της οπτικής ίνας, η οποία είναι πιθανό να επηρεάσει

και να προκαλέσει παρεμβολές στους γειτονικούς παλμούς εντός της ίνας αυτής. Υπάρχουν τρία είδη διασποράς που συναντώνται στην οπτική ίνα, και είναι τα εξής:

- Η **διασπορά τρόπου (modal dispersion)**, η οποία προκύπτει στις πολύτροπες οπτικές ίνες, όταν το σήμα διαχέεται με την πάροδο του χρόνου, εξαιτίας των διαφορετικών μονοπατιών και των διαφορετικών ταχυτήτων διάδοσης μεταξύ των πολλαπλών κυμάτων φωτός. Δηλαδή, η διασπορά αυτή προκύπτει, διότι η ταχύτητα δεν είναι η ίδια για όλα τα διαφορετικά κύματα φωτός που μεταδίδονται με διαφορετικό τρόπο το καθένα εντός της οπτικής ίνας. Όσο μεγαλύτερο είναι το μονοπάτι μιας ακτίνας φωτός – δηλαδή, όσο περισσότερες διαδοχικές ανακλάσεις υφίσταται – τόσο περισσότερες είναι και οι πιθανότητες μεγαλύτερης διασποράς.
- Η **χρωματική διασπορά ή διασπορά υλικού (chromatic/material dispersion)**, η οποία προκύπτει, όταν το σήμα αποτελείται από ακτίνες φωτός με διαφορετικά μήκη κύματος, οι οποίες και ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα αρχίζει εξίσου να διαχέεται με την πάροδο του χρόνου, εφόσον οι ακτίνες φωτός φτάνουν στον προορισμό τους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, και κατ' επέκταση τόσο μεγαλύτερη και η ταχύτητα διάδοσης. Το συγκεκριμένο είδος διασποράς το αντιλαμβανόμαστε με την μορφή χρωμάτων, αφού οι διαφορετικές συχνότητες που εμπεριέχονται στο σήμα, μεταφράζονται σε διαφορετικά χρώματα από το ανθρώπινο μάτι.
- Η **διασπορά μήκους κύματος (wavelength dispersion)**, η οποία προκύπτει στις μονότροπες οπτικές ίνες, εξαιτίας της μετάδοσης ενός μέρους τού κύματος φωτός στο εξωτερικό τού πυρήνα, διαμέσου τής επένδυσης (cladding). Εφόσον, ο δείκτης διάθλασης της επένδυσης είναι μικρότερος από του πυρήνα, το φως ταξιδεύει ταχύτερα εκεί από ό,τι εντός του πυρήνα, προξενώντας διασπορά.

3.6 Εφαρμογές Οπτικών Ινών

Στην σημερινή εποχή, όπως ήδη γνωρίζουμε, οι οπτικές ίνες έχουν ήδη αρχίσει και εισχωρούν σταδιακά σε όλο και περισσότερες πτυχές της καθημερινότητάς μας, με σκοπό την διευκόλυνση, καθώς και την αναβάθμιση του τρόπου ζωής μας. Τις συναντάμε στις τηλεπικοινωνίες, στο σύστημα υγείας, στην Βιομηχανία, καθώς και την Επιστήμη, όπου έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα συμβατικά καλώδια χαλκού. Τα πεδία εφαρμογής τους ποικίλουν και διακρίνονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- **Τηλεπικοινωνίες** (π.χ. δίκτυα υπολογιστών, τηλεφωνικά δίκτυα)
- **Ιατρική** (π.χ. laser στις χειρουργικές επεμβάσεις, συστήματα απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο και ενδοσκόπια)
- **Βιομηχανικοί Αυτοματισμοί και Έλεγχος** (π.χ. για μετάδοση δεδομένων και έλεγχο της γραμμής παραγωγής προϊόντων κλπ)
- **Φωτισμός** (π.χ. συστήματα φωτισμού εσωτερικών χώρων, εξωτερικών χώρων κατοικιών, εικαστικός φωτισμός, φωτισμός οριοθέτησης δρόμων κλπ)
- **Στρατιωτική Βιομηχανία** (π.χ. για απομακρυσμένο χειρισμό και έλεγχο πτήσης αεροσκαφών, για επικοινωνία μεταξύ επίγειων δορυφορικών σταθμών και κέντρων δεδομένων)
- **Ενέργεια** (π.χ. μετάδοση δεδομένων και έλεγχος απομακρυσμένων εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου σε πραγματικό χρόνο)
- **Ασφάλεια** (π.χ. συστήματα ασφαλείας με κάμερες, συστήματα ασφαλείας σε φράκτες για ανίχνευση εισβολέων σε περιφραγμένες περιοχές)
- **Αισθητήρες** (π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, αισθητήρες εντοπισμού θέσης κλπ)

3.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Οπτικών Ινών

Πλέον, οι οπτικές ίνες θεωρούνται ότι αποτελούν το καταλληλότερο και αποδοτικότερο μέσο μετάδοσης, για χρήση σε ποικίλες εφαρμογές, λαμβάνοντας υπόψιν την δυνατότητα μεταφοράς τεράστιου όγκου ψηφιακών δεδομένων, σε πολύ υψηλές ταχύτητες, με ελάχιστη απώλεια. Πιο συγκεκριμένα, οι οπτικές ίνες χαρακτηρίζονται από μία πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία τις καθιστούν προτιμότερες από τα συμβατικά μεταλλικά καλώδια, τα οποία αποτελούν αγωγούς ηλεκτρικού ρεύματος. Τα κυριότερα αυτά πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- **Υψηλή Ταχύτητα Μετάδοσης**

Εφόσον το σήμα διαδίδεται υπό την μορφή παλμών φωτός εντός της οπτικής ίνας, η ταχύτητα μετάδοσης είναι η ταχύτερη δυνατή, και φυσικά υψηλότερη από την αντίστοιχη στα μεταλλικά καλώδια.

- **Ελάχιστη Απώλεια Δεδομένων**

Η οπτική ίνα, λόγω της γενικότερης ανθεκτικής δομής της, καθώς και των προστατευτικών περιβλημάτων που διαθέτει, εξασφαλίζει την διατήρηση του φωτός εντός του πυρήνα της, κατά την διάδοσή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η οποιαδήποτε πιθανή διαφυγή τού φωτός, και κατ' επέκταση απώλεια δεδομένων, περιορίζεται στο ελάχιστο.

- **Υποστήριξη μεγάλων αποστάσεων**

Τα καλώδια οπτικών ινών έχουν την δυνατότητα να μεταδώσουν τα δεδομένα σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις, με την ελάχιστη δυνατή απώλεια. Λαμβάνοντας υπόψιν την κατασκευή σωστών δικτύων, με τα κατάλληλα εξαρτήματα και υλικά, τα οπτικά καλώδια αποτελούν την ιδανική και πιο αξιόπιστη επιλογή για μετάδοση ποιοτικού σήματος σε μεγάλες αποστάσεις.

- **Μεγάλο Εύρος Ζώνης**

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων· δηλαδή, έχουν την ικανότητα να μεταδίδουν μεγάλο όγκο δεδομένων ανά την μονάδα του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η πληθώρα αυτή των δεδομένων μεταφέρεται σε

πολύ υψηλές ταχύτητες, οι οποίες και υπερβαίνουν τις ταχύτητες που υποστηρίζουν τα μεταλλικά καλώδια, τα οποία διαθέτουν περιορισμένο εύρος ζώνης.

▪ **Ανοσία σε Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές**

Η οπτική ίνα αποτελεί διηλεκτρικό μέσο μεταφοράς των κυμάτων φωτός, δηλαδή ηλεκτρικό μονωτή, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται καθόλου από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν υφίσταται κίνδυνος βραχυκυκλωμάτων, ούτε παρεμβάσεων ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, ο οποίος θα μπορούσε να εξασθενήσει ή να αλλοιώσει το σήμα μετάδοσης. Ως εκ τούτου, η οπτική ίνα αποτελεί το ιδανικό μέσο για χρήση σε εφαρμογές και περιβάλλοντα όπου αναπτύσσεται υψηλή τάση, καθώς και ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος.

▪ **Προστασία από Περιβαλλοντικές Παρεμβολές**

Η οπτική ίνα, λόγω της εξαιρετικής θωράκισής της από τις ανθεκτικές επικαλύψεις και τα περιβλήματα που διαθέτει, δεν επηρεάζεται από τους πολλούς διαφορετικούς παράγοντες που θα αποτελούσαν απειλή για ένα συμβατικό καλώδιο χαλκού. Επί παραδείγματι, οι οπτικές ίνες δεν επηρεάζονται από την υγρασία, ούτε από άλλους κινδύνους που θα προέκυπταν από την έκθεσή τους σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Οπότε, αποτελούν, αδιαμφισβήτητα, την καταλληλότερη επιλογή για χρήση στην Βιομηχανία.

▪ **Ελαφριά Δομή και Ευελιξία**

Οι οπτικές ίνες διακρίνονται για την μικροσκοπική και ελαφριά τους δομή, η οποία έχει αποδειχθεί ότι είναι μεγάλο πλεονέκτημα για την εγκατάστασή τους, καθώς και την γενικότερη λειτουργία τους. Παρόλο που το υλικό κατασκευής τους είναι το γυαλί, διαθέτουν σημαντική ευκαμψία, καθώς και μεγάλη αντοχή σε μηχανικές βλάβες, γεγονός το οποίο παρατείνει το προσδόκιμο ζωής τους. Οπότε είναι προφανές ότι τα μικρά και ελαφριά

καλώδια οπτικών ινών αποτελούν την βέλτιστη δυνατή επιλογή για την μετάδοση δεδομένων, από ό,τι τα πιο βαριά και δύσχρηστα καλώδια χαλκού.

- **Χαμηλό Κόστος**

Το κόστος για την δημιουργία ενός δικτύου οπτικών ινών είναι σχετικά χαμηλό, αφού η πρώτη ύλη – δηλαδή, το γυαλί – αποτελεί μία σχετικά οικονομική επιλογή. Πλέον, το κόστος τής οπτικής ίνας έχει προσεγγίσει σημαντικά την χαμηλή τιμή τού συμβατικού καλωδίου χαλκού, παρόλο που τα υπόλοιπα εξαρτήματα για την χρήση σε δίκτυα οπτικών ινών θεωρούνται πιο δαπανηρά. Ωστόσο, αποδεδειγμένα, οι οπτικές ίνες αποτελούν το καταλληλότερο, αποδοτικότερο, καθώς και οικονομικότερο μέσο μετάδοσης που υποστηρίζει την μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και σε μεγάλες αποστάσεις.

- **Χαμηλές Ενεργειακές Απαιτήσεις**

Εφόσον, όπως ήδη γνωρίζουμε, στις οπτικές ίνες δεν υφίσταται σημαντική απώλεια του σήματος, και κατ' επέκταση της ψηφιακής πληροφορίας, απαιτείται και εξαιρετικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για την μετάδοσή του. Οπότε, η χρήση κυμάτων φωτός αποτελεί μία προτιμότερη επιλογή, από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, από ό,τι το ηλεκτρικό σήμα.

- **Ασφάλεια**

Η οπτική ίνα αποτελεί το πιο ασφαλές μέσο μετάδοσης πληροφοριών, καθώς η μεταφορά τους με την μορφή κυμάτων φωτός αποκλειστικά εντός τού πυρήνα, χωρίς σημαντικές απώλειες, καθιστά αδύνατη την οποιαδήποτε εξωτερική παρέμβαση ή υποκλοπή.

Απεναντίας, οι οπτικές ίνες, όπως και κάθε άλλο μέσο, παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως, λόγου χάρη, την απαίτηση μεγάλης προσοχής και τέλειας προσαρμογής στην διασύνδεση της πηγής φωτός με το οπτικό καλώδιο, κατά την εγκατάσταση των δικτύων οπτικών ινών, ή το κόστος τους σε σχέση με τα συμβατικά

μεταλλικά καλώδια. Ωστόσο, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών αντιμετωπίζονται και σταδιακά καταρρίπτονται, με αποτέλεσμα, η οπτική ίνα να θεωρείται πλέον περιζήτητη και να αποτελεί το προτιμότερο και πιο αξιόπιστο μέσο μεταφοράς δεδομένων. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της πληθώρας πλεονεκτημάτων που διαθέτουν, και ιδιαίτερα της ποιότητας και αξιοπιστίας τους, εφαρμόζονται ευρέως στην κατασκευή των αισθητήρων, διαμορφώνοντας τους εξαιρετικά προηγμένους και πολυχρηστικούς αισθητήρες οπτικών ινών, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Κεφάλαιο 4: Αισθητήρες Οπτικών Ινών

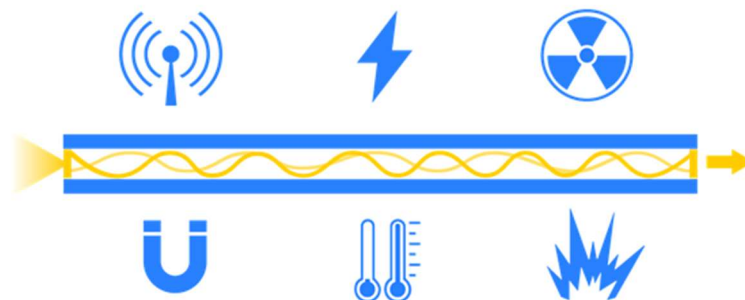
4.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη γνωρίζουμε, οι συμβατικοί αισθητήρες, οι οποίοι αξιοποιούν τα μεταλλικά καλώδια και λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα, παρουσιάζουν διάφορα μειονεκτήματα, λόγω της φύσης τους, και αδυνατούν να λειτουργήσουν σωστά, καθώς και να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα, σε πολλά πεδία εφαρμογής. Είναι επιρρεπείς σε πιθανές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και στον θόρυβο, καθώς επίσης δεν είναι ανθεκτικοί υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες, σε υποβρύχια περιβάλλοντα, και σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν υψηλή τάση και εκρήξεις. Ως εκ τούτου, η ανάγκη μιας καινούργιας, πιο ισχυρής και ανθεκτικής εφεύρεσης, η οποία θα υπερνικούσε τα παραπάνω προβλήματα, ήταν μεγάλη.

Παράλληλα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας της οπτικής ίνας, και την αναβάθμισή της σε ένα άνευ προηγουμένου ευέλικτο και πολυχρηστικό εργαλείο, γρήγορα εξαπλώθηκε και στους τομείς όπου απαιτείται ανίχνευση. Όπως είναι γνωστό, η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως αισθητήρας, κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, για τις ανάγκες της απεικόνισης του εσωτερικού τού ανθρώπινου σώματος στην Ιατρική. Το πρώτο ενδοσκόπιο δημιουργήθηκε, με την αξιοποίησή της, για την επίτευξη χειρουργικών επεμβάσεων χωρίς νυστέρι. Η εφεύρεση αυτή έδωσε το έναυσμα για την μετέπειτα εξέλιξη της οπτικής ίνας και την σύζευξή της με τον αισθητήρα σε περισσότερες εφαρμογές. Με την πάροδο του χρόνου και την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, η δομή της οπτικής ίνας αναβαθμίστηκε εξαιρετικά, και, κατ' επέκταση, αυξήθηκαν και οι δυνατότητές της, με αποτέλεσμα να μπορεί να εφαρμόζεται σε όλο και περισσότερους τομείς, πέραν των φωταγωγήσεων, της Ιατρικής και των Τηλεπικοινωνιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αργότερα, με την εφεύρεση του Laser, δημιουργήθηκαν ευκαιρίες και πολλές καινοτομίες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένου και του τομέα της ανίχνευσης· η διαρκής ανάπτυξη, σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους των οπτοηλεκτρικών εξαρτημάτων οδήγησε στην εμφάνιση νέων εφαρμογών.

Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε το πανίσχυρο υβρίδιο με την σύζευξη των δύο προαναφερθεισών τεχνολογιών – την οπτική ίνα, η οποία πλέον κυριαρχεί στις Τηλεπικοινωνίες, και την τεχνολογία τού αισθητήρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίστηκε η δυνατότητα της ανίχνευσης μεταβολών διαφόρων φυσικών μεγεθών στο εξωτερικό περιβάλλον, αξιοποιώντας τις παραμέτρους τού φωτός (π.χ. ένταση, μήκος κύματος, φάση, πόλωση) και παρατηρώντας τους τρόπους, με τους οποίους επηρεάζονται. Με την εφεύρεση αυτή, παρατηρήθηκε μια πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως η ελάχιστη έως μηδαμινή απώλεια, η αυξημένη ευαισθησία στην ανίχνευση, καθώς και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επιπροσθέτως, η ελαφριά δομή τους και η φορητότητα που διαθέτουν, σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητά τους σε «εχθρικά» περιβάλλοντα και υπό αντίξοες συνθήκες, τους καθιστούν κατάλληλους και πολύ πιο ευέλικτους σε διάφορους τομείς. Εκεί, λοιπόν, που οι απλοί συμβατικοί αισθητήρες είχαν αποδειχθεί ανεπαρκείς και αδυνατούσαν να φέρουν εις πέρας τον ρόλο που τους είχε ανατεθεί, ήρθαν να τους αντικαταστήσουν σταδιακά οι αισθητήρες οπτικών ινών.

Στην σημερινή εποχή, οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν κατακλύσει την καθημερινότητά μας γενικότερα, αλλά και την πλειοψηφία των πεδίων τής Βιομηχανίας, και, με την ραγδαία εξέλιξή τους, εξαπλώνονται και στα υπόλοιπα, υπερνικώντας σταδιακά τις προκλήσεις και τα εμπόδια που προκύπτουν. Οι αισθητήρες οπτικών ινών εφαρμόζονται ήδη ευρέως για την ανίχνευση ποικίλων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως την θερμοκρασία, την πίεση, την υγρασία, την επιτάχυνση, και οποιοδήποτε άλλο ανιχνεύσιμο μέγεθος. Παρακάτω, θα αναλύσουμε την έννοια αυτού του είδους αισθητήρα, τις αρχές λειτουργίας του και την τοπολογία του σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.



Εικόνα 4.1: Αξιοποίηση της Οπτικής ίνας για Ανίχνευση σε Διάφορα Βιομηχανικά Περιβάλλοντα

4.2 Ορισμός

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν διατάξεις μεγαλύτερων συστημάτων μέτρησης ή ελέγχου, τα οποία ανιχνεύουν ένα φυσικό μέγεθος και μετατρέπουν την κατάστασή του σε μετρήσιμη έξοδο, **υπό την μορφή σήματος φωτός**. Όπως και στους απλούς αισθητήρες, ένας αισθητήρας οπτικών ινών, αναλόγως με την ιδιότητά του, είναι ικανός να ανιχνεύσει τις μεταβολές που διαδραματίζονται στο περιβάλλον του, για κάποιο συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, ως σήμα εισόδου. Εφόσον, επεξεργαστεί αυτό το σήμα εισόδου, ο αισθητήρας οπτικών ινών παράγει και αποστέλλει ένα σήμα εξόδου σε μορφή κυμάτων φωτός, καταλλήλως διαμορφωμένο με βάση την κατάσταση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Εν συνεχεία, το σήμα εξόδου υφίσταται εκ νέου επεξεργασία, και μετατρέπεται στην τελική του μορφή, προκειμένου να γίνει αντιληπτό και κατανοητό από το τμήμα που θα το λάβει για περαιτέρω επεξεργασία, όπως κάποιο κύκλωμα ελέγχου ή ένας επεξεργαστής. Οπότε, ουσιαστικά, ο αισθητήρας οπτικών ινών εκπέμπει, λαμβάνει και μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό σήμα.

Το προς ανίχνευση σήμα εισόδου, ομοίως με τους απλούς αισθητήρες, μπορεί να είναι ένα οποιασδήποτε μορφής φυσικό μέγεθος, όπως θερμοκρασία, πίεση, επιτάχυνση, μετατόπιση, συγκέντρωση αερίων κλπ. Ωστόσο, η κεντρική διαφορά των αισθητήρων οπτικών ινών με τους απλούς αισθητήρες βρίσκεται στην αξιοποίηση και την σύζευξή τους με την τεχνολογία της οπτικής ίνας. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση οπτικών ινών, το σήμα εξόδου, που προκύπτει από την μετατροπή και την επεξεργασία τού σήματος εισόδου, αρχικά, έχει αποκλειστικά την μορφή κυμάτων φωτός, με ιδιότητες αντίστοιχες του σήματος εισόδου· επί παραδείγματι, η ένταση, το μήκος κύματος, η φάση, η πόλωση και λοιπές ιδιότητες του φωτός, διαμορφώνονται σε συνάρτηση με την μεταβολή που υπέστη το φυσικό μέγεθος, η οποία και ανιχνεύθηκε από τον αισθητήρα. Έπειτα, το σήμα εξόδου μετατρέπεται εκ νέου σε μορφή ηλεκτρικού σήματος, προκειμένου να ληφθεί από κάποιον ηλεκτρονικό επεξεργαστή για περαιτέρω επεξεργασία, ή και απεικόνιση.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών, όπως και οι απλοί αισθητήρες, διαφέρουν ως προς την ιδιότητά τους, εφόσον ο καθένας είναι κατασκευασμένος για την ανίχνευση και την

επεξεργασία ερεθισμάτων συγκεκριμένης μορφής. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, ως προς τους οποίους διαφέρουν – όπως το κόστος, την ποιότητα, την αξιοπιστία, το περιβάλλον χρήσης – και είναι εξίσου σημαντικοί για την επιλογή των καταλλήλων για τις εκάστοτε συνθήκες και τον σκοπό χρήσης.

4.3 Η Σύνδεση του Αισθητήρα με την Οπτική Ίνα

Οι απλοί συμβατικοί αισθητήρες έχουν αποδειχθεί ανεπαρκείς σε πληθώρα εφαρμογών, εξαιτίας της ευαισθησίας τους σε περιβάλλοντα υψηλής επικινδυνότητας και δυσμενών καιρικών συνθηκών, όπως η υγρασία, η ανάπτυξη υπερβολικά υψηλών τάσεων, καθώς και σε περιπτώσεις συγκέντρωσης εκρηκτικών αερίων, ή και συχνής πτώσεως κεραυνών. Επίσης, η ευαισθησία τους σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθώς και το υψηλό κόστος εγκατάστασης, και κατ' επέκταση συντήρησής τους, το οποίο συνεπάγεται των προαναφερθέντων μειονεκτημάτων, δημιούργησαν την ανάγκη ύπαρξης μιας προηγμένης και πιο ανθεκτικής γενιάς αισθητήρων.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η τεχνολογία της οπτικής ίνας καταρρίπτει τα παραπάνω προβλήματα και καλύπτει την πλειοψηφία των αναγκών όπου οι απλοί αισθητήρες αποδείχθηκαν ανεπαρκείς, έγινε η σύνδεση των δύο τεχνολογιών, δημιουργώντας μια ισχυρή και καινοτόμο οντότητα. Η νέα αυτή τεχνολογία που προέκυψε αποτελεί τους αισθητήρες οπτικών ινών, οι οποίοι διαθέτουν τα χαρακτηριστικά και τις ικανότητες του αισθητήρα, σε συνδυασμό με την πληθώρα πλεονεκτημάτων που προσφέρει η οπτική ίνα. Πλέον, με το νέο αυτό είδος αισθητήρων, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τους σε περιβάλλοντα επικίνδυνων συνθηκών, ακόμα και σε υποβρύχιες εφαρμογές, καθώς και πειράματα που περιλαμβάνουν ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Όπως ήδη γνωρίζουμε, η οπτική ίνα αποτελεί ένα εξαιρετικά ανθεκτικό μέσο, κατασκευασμένο για χρήση σε περιβάλλοντα δυσμενών συνθηκών, που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των απλών αισθητήρων, καθώς και διαθέτει ανοσία σε

ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, εφόσον δεν είναι αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πληροφορία, η οποία μεταδίδεται μέσω οπτικών ινών εντός τού αισθητήρα – και στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί το ερέθισμα που ανιχνεύτηκε – να υφίσταται την μικρότερη δυνατή απώλεια, παρέχοντας πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς και να μεταφέρεται ταχύτερα.

Επιπροσθέτως, η μικροσκοπική και ευέλικτη μορφή των οπτικών ινών επιτρέπει την χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών και σε εφαρμογές που τοποθετούνται σε σημεία μη προσβάσιμα ή και επιβλαβή για τον άνθρωπο, καθώς και σε πολύ στενούς χώρους. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν περιοχές πυρηνικής ακτινοβολίας και εκρηκτικών αερίων, καθώς και για την μέτρηση θερμοκρασίας εντός των κινητήρων αερίωσης (jet) των αεροσκαφών.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν εξαπλωθεί σε όλους σχεδόν τους τομείς και τα πεδία εφαρμογών – ειδικότερα στην Βιομηχανία – και βρίσκουν μεγάλη χρησιμότητα σε κατανεμημένα δίκτυα αισθητήρων, καθώς και στην απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχό τους, αφού δεν απαιτούν ηλεκτρική παροχή και διακρίνονται για το μικρό και εύχρηστο μέγεθός τους.

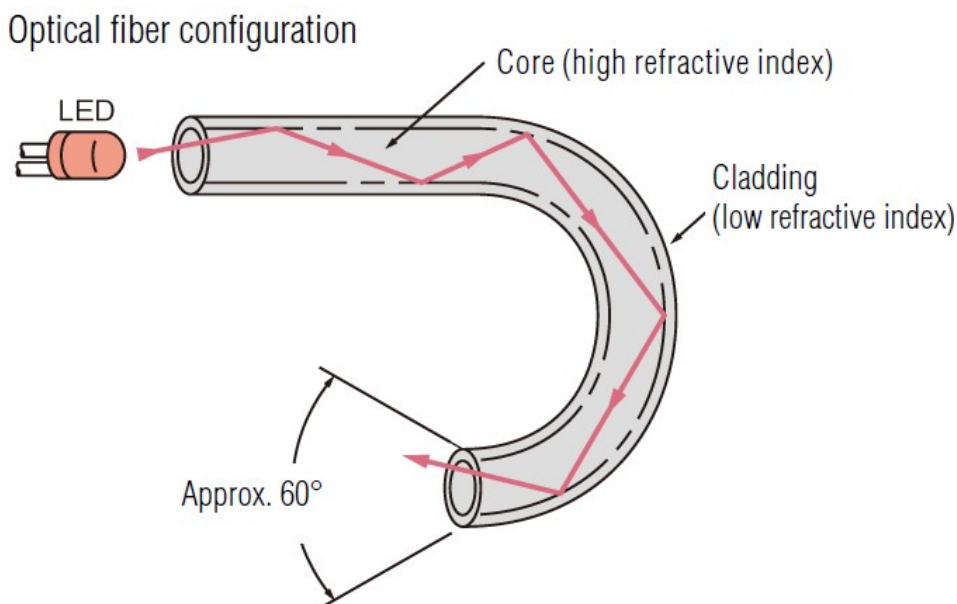
4.4 Τα Μέρη του Αισθητήρα Οπτικών Ινών

Ο αισθητήρας οπτικών ινών αποτελεί μία διάταξη, η οποία εμπεριέχει διάφορα διακριτά στοιχεία – το καθένα υπεύθυνο για κάποια συγκεκριμένη λειτουργία – τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίτευξη ενός γενικού σκοπού. Επί παραδείγματι, η οντότητα ή το εξάρτημα που είναι υπεύθυνο για την μετατροπή τού σήματος εισόδου σε κύματα φωτός είναι μοναδικό και διαφορετικό από το αντίστοιχο για την επεξεργασία και την μετατροπή τού σήματος εξόδου σε ηλεκτρικό σήμα.

Φυσικά, ο κοινός γενικός σκοπός, για τον οποίο συνεργάζονται όλα τα επιμέρους στοιχεία τού συστήματος ενός αισθητήρα οπτικών ινών είναι η σωστή και αξιόπιστη ανίχνευση, καθώς και επεξεργασία των μεταβολών ενός φυσικού μεγέθους σε

κάποιο περιβάλλον εφαρμογής, προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή εκτέλεση ενός πειράματος, μιας διαδικασίας ή κάποιας κατασκευής. Όπως είναι ήδη γνωστό, οι αισθητήρες οπτικών ινών ενσωματώνουν την τεχνολογία της οπτικής ίνας στην λειτουργία τους, για την υψηλή αξιοπιστία των μετρήσεών τους, καθώς και την δυνατότητα εφαρμογής τους σε περιβάλλοντα υψηλής επικινδυνότητας και δύσκολης προσβασιμότητας, όπως θα δούμε και στην συνέχεια.

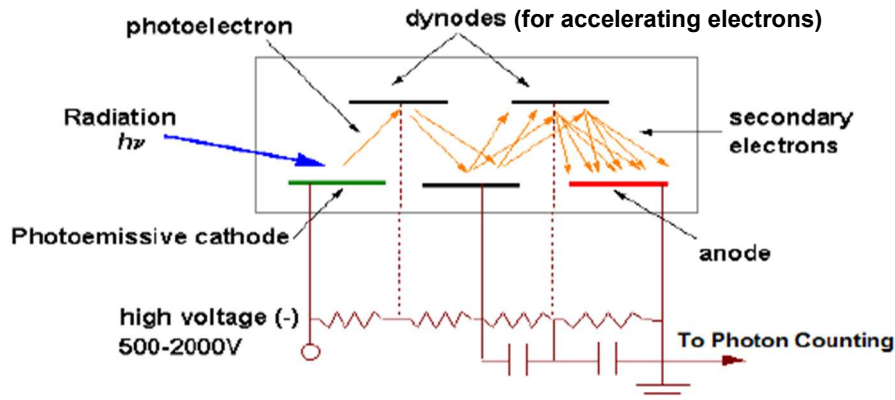
Πιο συγκεκριμένα, ένα απλό γενικό σύστημα αισθητήρα οπτικών ινών θα μπορούσε να αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία. Κατ' αρχάς, το πρώτο και βασικότερο είναι η **πηγή φωτός**, η οποία μπορεί να είναι δίοδος εκπομπής φωτός (LED) ή δίοδος laser, και είναι υπεύθυνη για την παροχή φωτός στο σύστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η χρήση της επόμενης οντότητας, η οποία και είναι η **οπτική ίνα**. Ο βασικός ρόλος της οπτικής ίνας είναι η διοχέτευση και μετάδοση των κυμάτων φωτός από το ένα τμήμα τού συστήματος ενός αισθητήρα οπτικών ινών στο άλλο. Επιπροσθέτως, σε κάποια είδη αισθητήρων οπτικών ινών, πέρα από μέσα μετάδοσης, οι οπτικές ίνες είναι υπεύθυνες και για την ίδια την ανίχνευση του ερεθίσματος, όπως θα δούμε παρακάτω, στην ανάλυση των διαφόρων κατηγοριών των αισθητήρων οπτικών ινών.



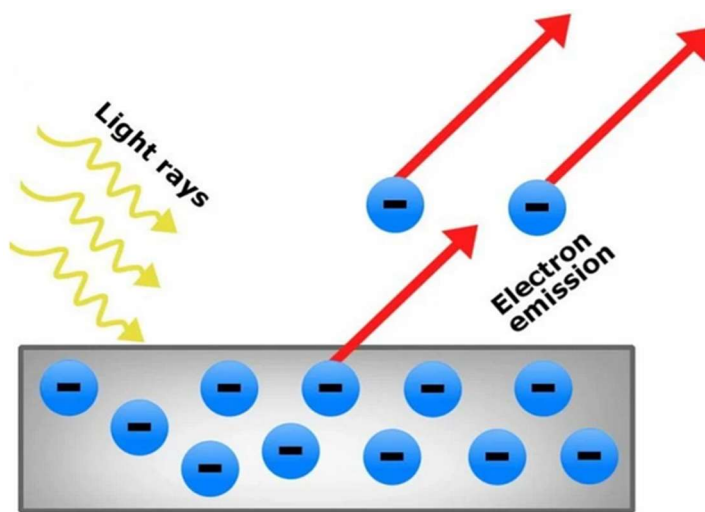
Εικόνα 4.2: Διοχέτευση του Φωτός από Πηγή εντός τής Οπτική Ίνας

Στην συνέχεια, ακολουθεί κάποιου είδους **αισθητήριο στοιχείο**, όπως ένας μετατροπέας, ο οποίος λαμβάνει την μεταβολή τού προς ανίχνευση φυσικού μεγέθους, το οποίο έχει οποιαδήποτε μορφή ενέργειας, καθώς και τα κύματα φωτός από την πηγή. Ο μετατροπέας αυτός είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία και την διαμόρφωση τού φωτός, με βάση το ερέθισμα που δέχθηκε από το περιβάλλον του. Πιο συγκεκριμένα, ιδιότητες του φωτός, όπως η ένταση, το μήκος κύματος, η φάση, ή και η πόλωση, διαμορφώνονται με βάση την μέτρηση που λήφθηκε από το περιβάλλον. Επί παραδείγματι, αισθητήρες οπτικών ινών, όπου ο μετατροπέας διαμορφώνει την ένταση, συνήθως χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της απόστασης και της δύναμης. Επίσης, όταν ο μετατροπέας διαμορφώνει το μήκος κύματος, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται στην μέτρηση πληθώρας φυσικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση ή η επιτάχυνση, και προτιμώνται σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν τον έλεγχο γεφυρών, αεροπλάνων, πλοίων, καθώς και την ανίχνευση της σεισμικής δραστηριότητας.

Έπειτα, πάλι μέσω καλωδίου οπτικών ινών, το διαμορφωμένο σήμα φωτός αποστέλλεται στο τέταρτο στοιχείο τού συστήματος αισθητήρα οπτικών ινών, σε έναν **οπτικό ανιχνευτή**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετατροπή των κυμάτων φωτός σε ηλεκτρικό σήμα. Ο οπτικός ανιχνευτής αποτελεί μια φωτοηλεκτρική συσκευή, όπως, επί παραδείγματι, έναν σωλήνα φωτοπολλαπλασιαστή, του οποίου τα βασικά στοιχεία είναι η άνοδος και η κάθοδος. Μόλις η κάθοδος ανιχνεύσει φωτόνια, ξεκινούν να εκπέμπονται ηλεκτρόνια – τα λεγόμενα φωτοηλεκτρόνια – τα οποία έλκονται από την άνοδο, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται ηλεκτρικό ρεύμα εντός του κυκλώματος αυτού. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο, όταν κάποια ακτίνα φωτός προσπέσει στην επιφάνεια ενός αγωγού, όπως το μέταλλο, απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από την επιφάνεια αυτή· το γεγονός αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της μεταφοράς ενέργειας από τα φωτόνια στα ηλεκτρόνια του αγωγού, δημιουργώντας ανισορροπία μεταξύ των φορτίων.



Εικόνα 4.3: Το Κύκλωμα του Φωτοπολλαπλασιαστή

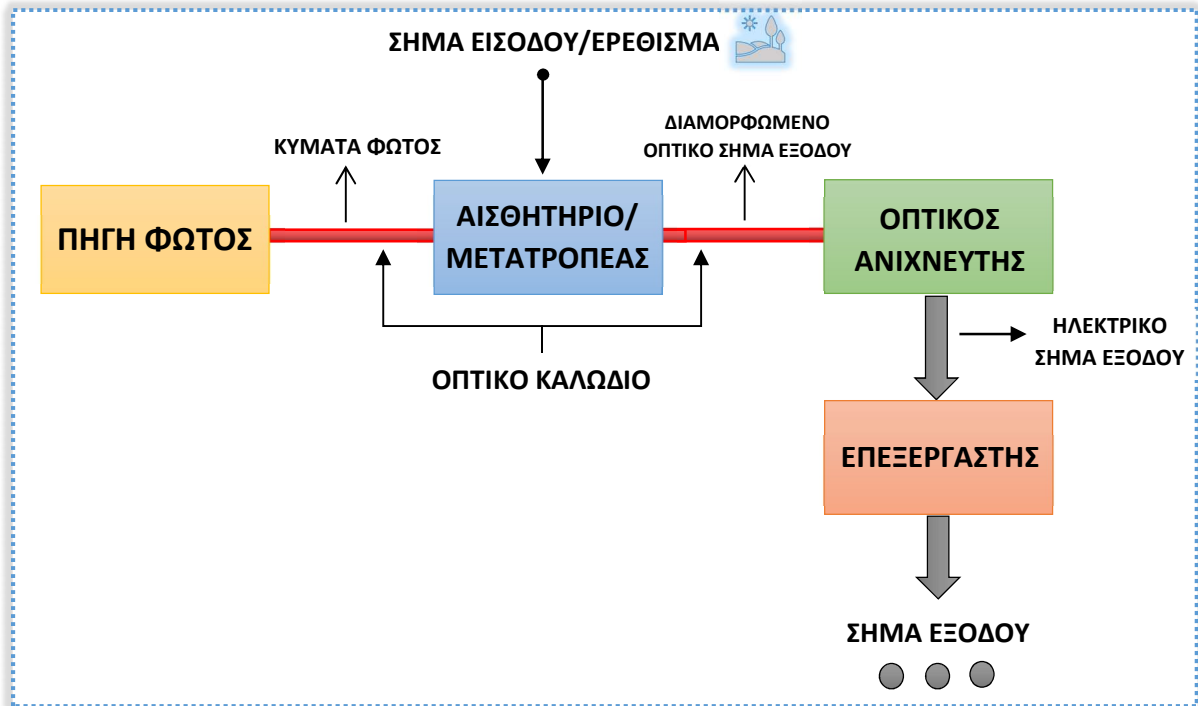


Εικόνα 4.4: Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Τέλος, το σήμα εξόδου, το οποίο έχει πλέον μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, αποστέλλεται σε κάποια **ηλεκτρονική συσκευή**, δηλαδή κάποιον επεξεργαστή – όπως, λόγου χάρη, έναν παλμογράφο ή έναν αναλυτή οπτικού φάσματος – υπεύθυνο για την περαιτέρω επεξεργασία του, την απεικόνιση, την μετάδοση ή αξιοποίησή του με οποιονδήποτε άλλο τρόπο, αναλόγως τού πεδίου εφαρμογής.

Όλα τα παραπάνω δομικά στοιχεία επιλέγονται με βάση το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής, τον σκοπό τού συστήματος, καθώς και την ιδιότητα του φωτός που μεταβάλλεται και διαμορφώνεται, κατά την λειτουργία τού αισθητήρα. Επίσης, για τον έλεγχο της φάσης συνήθως επιλέγεται μονότροπη οπτική ίνα, ενώ για την ένταση και το μήκος κύματος χρησιμοποιείται πολύτροπη.

Ένα γενικό σύστημα αισθητήρα οπτικών ινών μπορεί να απεικονισθεί ως εξής:



Σχήμα 4.1: Βασικό Διάγραμμα Αισθητήρα Οπτικών Ινών

4.5 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων Οπτικών Ινών

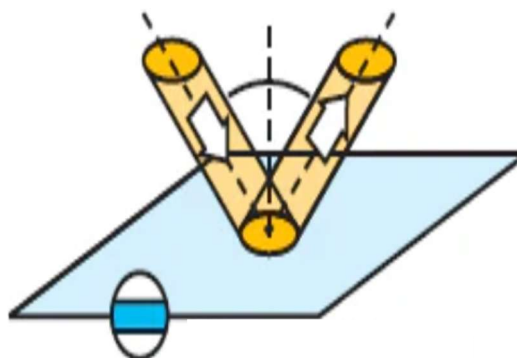
Οι αισθητήρες οπτικών ινών, ανεξαρτήτως της ποικιλομορφίας τους, των διαφορών τους, καθώς και των πολυάριθμων πεδίων εφαρμογής τους – όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω – διαθέτουν κάποια κοινά βασικά χαρακτηριστικά και αρχές λειτουργίας. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, είμαστε ικανοί να επιλέξουμε τους κατάλληλους αισθητήρες για το κάθε πεδίο εφαρμογής, αναλόγως με τις ανάγκες μας. Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων οπτικών ινών καθορίζουν την γενικότερη υπόσταση, καθώς και τις προδιαγραφές του καθενός, και σχετίζονται φυσικά με την ύπαρξη της οπτικής ίνας. Προφανώς, αναφερόμαστε στον συνδυασμό των χαρακτηριστικών των αισθητήρων γενικότερα με τα χαρακτηριστικά των οπτικών ινών, τα οποία και έχουμε ήδη αναλύσει σε προηγούμενα κεφάλαια, αμφότερα. Επί παραδείγματι, τέτοιου είδους χαρακτηριστικά αποτελούν η ακρίβεια και ο βαθμός σταθερότητας της λειτουργίας των αισθητήρων, καθώς και η ταχύτητα απόκρισής

τους στο σήμα εισόδου που λαμβάνουν· όσον αφορά στην οπτική ίνα, αναφερόμαστε στο εύρος ζώνης, στον βαθμό εξασθένησης του σήματος κλπ.

Ωστόσο, αποκλειστικά για τους αισθητήρες οπτικών ινών, αξίζει να αναφερθούμε στις βασικές προδιαγραφές του φωτός, οι οποίες αξιοποιούνται για την ανίχνευση του σήματος εισόδου και καθορίζουν την γενικότερη λειτουργία τους.

- **Κατοπτρική Ανάκλαση (Specular Reflection)**

Η **κατοπτρική ανάκλαση** αποτελεί είδος ανάκλασης, κατά το οποίο η γωνία πρόσπτωσης του φωτός – όταν αυτό προσπίπτει σε λεία και ομαλή επιφάνεια, όπως σε καθρέφτη, γυαλί ή διάφανη υγρή επιφάνεια – είναι ίση με την γωνία ανάκλασής του. Αυτό σημαίνει ότι η ακτίνα φωτός ακολουθεί

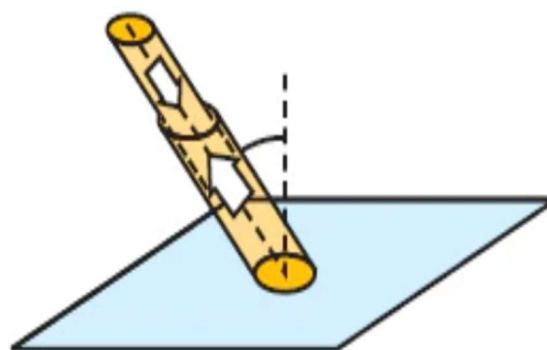


Εικόνα 4.5: Η Κατοπτρική Ανάκλαση

ένα συγκεκριμένο μονοπάτι από την στιγμή της πρόσπτωσης. Η κατοπτρική ανάκλαση μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την χρήση λείων και ομαλών επιφανειών, καθώς η απορρόφηση του προσπίπτοντος φωτός ελαχιστοποιείται, με αποτέλεσμα η απώλεια να είναι εξίσου ελάχιστη, σε αντίθεση με τις τραχείες επιφάνειες.

- **Retro-reflection**

Αυτό το είδος ανάκλασης συμβαίνει όταν το φως που εκπέμπεται από την πηγή προσπίπτει σε επιφάνεια κατασκευασμένη με τέτοιον τρόπο, έτσι ώστε η προσπίπτουσα ακτίνα φωτός να ανακλάται απευθείας πίσω στην πηγή, ακολουθώντας το ίδιο μονοπάτι. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να



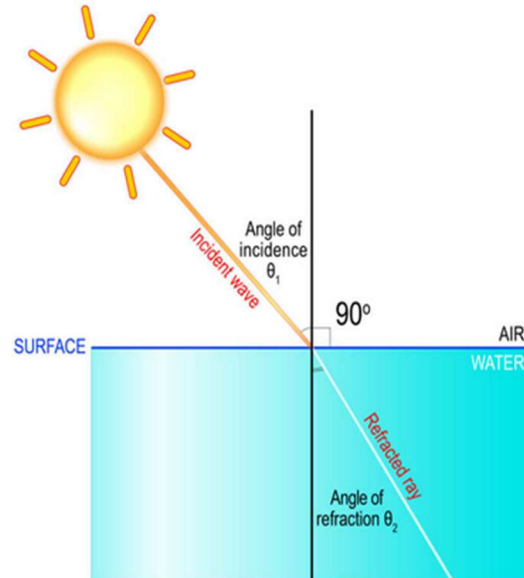
Εικόνα 4.6: Retro-Reflection

επιτευχθεί με την χρήση καθρεφτών τοποθετημένων σε κατάλληλη γωνία,

προκειμένου το εκπεμπόμενο φως, που προσπίπτει διαδοχικά επάνω τους, να επιστρέφει παράλληλα στην αντίθετη πορεία από όπου εκπέμφθηκε.

▪ **Διάθλαση (Refraction)**

Σύμφωνα με το φαινόμενο της **διάθλασης**, όταν το φως διαπεράσει μία επιφάνεια, μεταβάλλεται η πορεία του εντός του μέσου αυτού που μόλις διαπέρασε. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της διαφοράς των δεικτών διάθλασης μεταξύ των μέσων εντός των οποίων διαδίδεται το φως. Πιο συγκεκριμένα, όταν, επί παραδείγματι, μια ακτίνα φωτός μεταβεί από το κενό – το οποίο

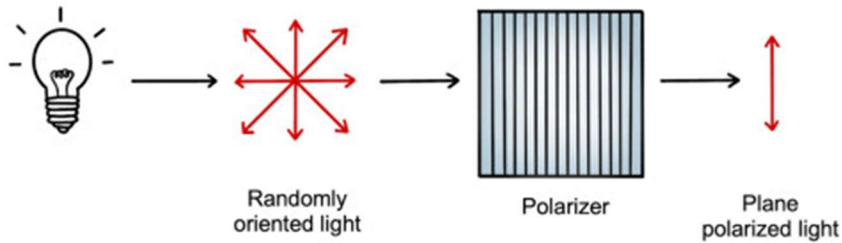


Εικόνα 4.7: Η Διάθλαση του Φωτός

διαθέτει τον μεγαλύτερο δυνατό δείκτη διάθλασης – σε κάποιο άλλο μέσο με μικρότερο δείκτη διάθλασης – όπως το ύδωρ, το γυαλί ή το πλαστικό – τότε το φως ταξιδεύει βραδύτερα, με αποτέλεσμα να αλλάζει και η κατεύθυνση διάδοσής του.

▪ **Πόλωση (Polarization)**

Γενικότερα, το πεδίο ταλάντωσης του φωτός είναι τυχαίο και συμπεριλαμβάνει ακτίνες με διαφορετικό πεδίο ταλάντωσης, δηλαδή, η καθεμιά διαδίδεται σε διαφορετική κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι το φως θεωρείται μη πολωμένο, ενώ αποτελείται από διακριτές ακτίνες πολωμένες με διαφορετικό τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις. Η **πόλωση** αποτελεί το φαινόμενο, κατά το οποίο το επίπεδο ταλάντωσης του φωτός είναι αποκλειστικά το ίδιο για τον συνολικό αριθμό των φωτονίων· δηλαδή, όλες οι επιμέρους ακτίνες φωτός ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι δημιουργώντας μία ενιαία ακτίνα. Οι συσκευές μέσω των οποίων περιορίζεται το επίπεδο ταλάντωσης και επιτυγχάνεται η πόλωση, ονομάζονται «πολωτικά φίλτρα».



Εικόνα 4.8: Η Πόλωση του Φωτός

4.6 Κατηγορίες Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι εξαιρετικά ποικιλόμορφοι και διαθέτουν μια πληθώρα ιδιοτήτων, οι οποίες μας βοηθούν να τους διαχωρίζουμε σε κατηγορίες, καθιστώντας ικανούς τους χειριστές να επιλέγουν τους κατάλληλους για το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής, είτε πρόκειται για πειράματα ή για κατασκευές. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν την αρχή λειτουργίας τους, την λειτουργία διαμόρφωσης του φωτός, την μέθοδο ανίχνευσης, το πεδίο εφαρμογής τους κ.α.

4.6.1 Ενδογενείς - Εξωγενείς

Με βάση την αρχή λειτουργίας τους – δηλαδή, εάν η οπτική ίνα χρησιμοποιείται και ως αισθητήριο στοιχείο ή μόνο ως μέσο μετάδοσης – οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται στους ενδογενείς (intrinsic) και τους εξωγενείς (extrinsic).

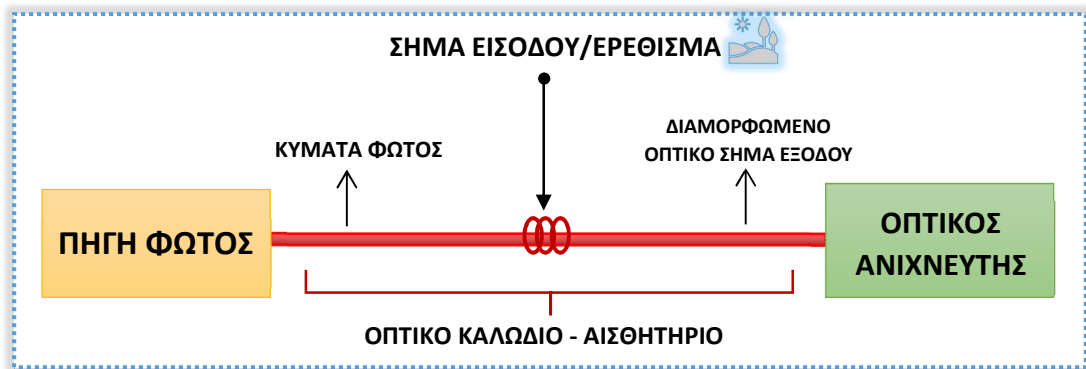
- **Ενδογενείς Αισθητήρες (Intrinsic Sensors)**

Οι **ενδογενείς αισθητήρες οπτικών ινών** χρησιμοποιούν την ίδια την οπτική ίνα ως αισθητήριο στοιχείο· δηλαδή, βασίζονται κατεξοχήν στις προδιαγραφές της οπτικής ίνας για την ανίχνευση και την μετατροπή του ερεθίσματος από το περιβάλλον σε κατάλληλα διαμορφωμένες ακτίνες φωτός, και όχι σε κάποιο επιπλέον εξωτερικό εξάρτημα – όπως, επί παραδείγματι, έναν μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα, η οπτική ίνα είναι ικανή να ανιχνεύει οποιαδήποτε περιβαλλοντική μεταβολή – όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, μηχανική τάση – ανάλογα με την ιδιότητα του κάθε

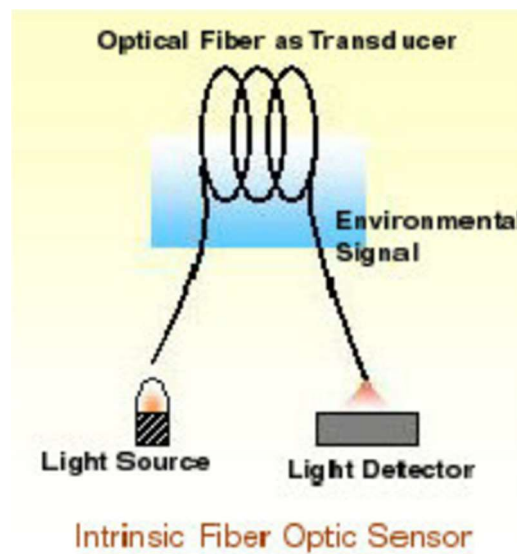
αισθητήρα, και σχετικά με αυτή, να διαμορφώνει αναλόγως τις αντίστοιχες ιδιότητες της δέσμης φωτός που μεταδίδεται κατά μήκος της, εκπεμπόμενη από την πηγή φωτός. Οι ιδιότητες αυτές, όπως ήδη γνωρίζουμε, είναι η ένταση, η φάση, η πόλωση, το μήκος κύματος· το ποιά από αυτές τις ιδιότητες θα διαμορφωθεί, καθώς και η μορφή τού προς ανίχνευση φυσικού μεγέθους καθορίζονται από τον αισθητήρα.

Οι ενδογενείς αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών για την μέτρηση διαφόρων μεγεθών με διαφορετικούς τρόπους. Ένα παράδειγμα απλού ενδογενούς αισθητήρα οπτικών ινών αποτελεί ένας αισθητήρας που μεταβάλλει την ένταση του φωτός – δηλαδή μεταφράζει την περιβαλλοντική μεταβολή που έλαβε ως σήμα εισόδου σε αυξομείωση της έντασης του φωτός – καθώς αποτελείται από μια **πηγή φωτός**, το **καλώδιο οπτικών ινών** και έναν **οπτικό ανιχνευτή**. Πιο συγκεκριμένα, η οπτική ίνα είναι ικανή να ανιχνεύσει το περιβαλλοντικό ερέθισμα και να λειτουργήσει η ίδια ως μετατροπέας, μεταβάλλοντας την ένταση του φωτός που μεταδίδεται στο εσωτερικό της, έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο ερέθισμα. Έπειτα, η διαμορφωμένη δέσμη φωτός καταλήγει στον οπτικό ανιχνευτή, ο οποίος την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα, προκειμένου η πληροφορία να γίνει αξιοποιήσιμη.

Σε έναν ενδογενή αισθητήρα οπτικών ινών, όπως είναι γνωστό, δεν απαιτείται η χρήση επιπλέον εξωτερικών εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα να θεωρούνται πιο εύκολα κατασκευάσιμοι και αξιόπιστοι, και κατ' επέκταση λιγότερο δαπανηροί. Ωστόσο, το σημαντικότερο πλεονέκτημα που διαθέτουν οι ενδογενείς αισθητήρες οπτικών ινών αποτελεί η δυνατότητα ανίχνευσης της πληροφορίας κατανεμημένης κατά μήκος πολύ μεγάλων αποστάσεων.



Σχήμα 4.2: Βασικό Διάγραμμα Ενδογενούς Αισθητήρα Οπτικών Ινών



Εικόνα 4.9: Ενδογενής Αισθητήρας Οπτικών Ινών

▪ Εξωγενείς Αισθητήρες (Extrinsic Sensors)

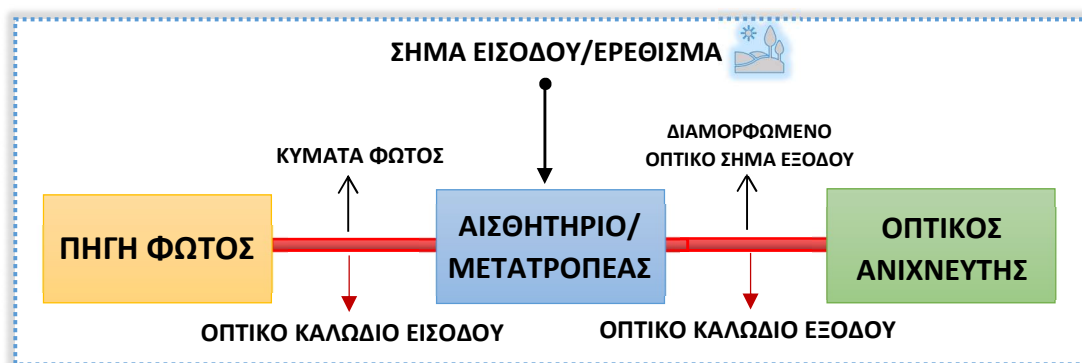
Οι **εξωγενείς αισθητήρες οπτικών ινών** χρησιμοποιούν την οπτική ίνα αποκλειστικά και μόνο ως μέσο μετάδοσης της πληροφορίας, και συνήθως είναι πολύτροπη· ένα οπτικό καλώδιο είναι υπεύθυνο για την αποστολή δέσμης φωτός από την πηγή, καθώς και ένα για την μετάδοση της διαμορφωμένης δέσμης φωτός, η οποία αποτελεί και το σήμα εξόδου. Στην προκειμένη περίπτωση, το αισθητήριο στοιχείο αποτελεί ένα εξωτερικό εξάρτημα, το οποίο μπορεί να είναι κάποιου είδους μετατροπέας, ο οποίος ανιχνεύει το περιβαλλοντικό ερέθισμα και το χρησιμοποιεί για την διαμόρφωση του φωτός, το οποίο και αποστέλλει στο επόμενο στοιχείο τού συστήματος. Διαφορετικά, το αισθητήριο στοιχείο μπορεί να είναι κάποιος μη

οπτικός ηλεκτρονικός αισθητήρας, συνδεδεμένος με έναν οπτικό πομπό, για την διεκπεραίωση της ίδιας διαδικασίας με παραπάνω.

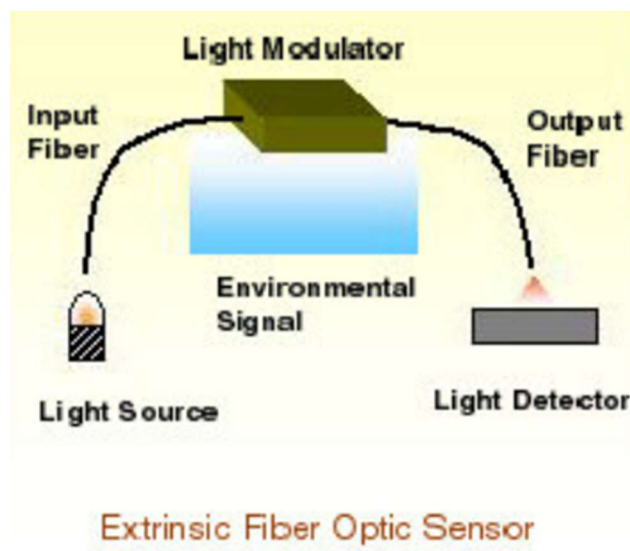
Πιο συγκεκριμένα, ένα απλό σύστημα εξωγενούς αισθητήρα οπτικών ινών αποτελείται από μια **πηγή φωτός**, δύο **καλώδια οπτικών ινών**, ένα **αισθητήριο στοιχείο** και έναν **οπτικό ανιχνευτή**. Η πηγή εκπέμπει μια δέσμη φωτός, η οποία μεταδίδεται μέσω του οπτικού καλωδίου εισόδου στο αισθητήριο στοιχείο. Ο μετατροπέας αυτός ανιχνεύει την μεταβολή ενός φυσικού μεγέθους – λόγου χάρη θερμοκρασία ή επιτάχυνση – ως σήμα εισόδου, και, έπειτα, διαμορφώνει κάποια από τις ιδιότητες του φωτός – επί παραδείγματι, φάση ή ένταση – που έλαβε από την πηγή. Το αισθητήριο στοιχείο, προκειμένου να επιτευχθεί η διαδικασία αυτή, μπορεί να περιέχει καθρέπτες, αέριο ή υγρό, καθώς και οποιουσδήποτε άλλους μηχανισμούς με δυνατότητα παραγωγής και διαμόρφωσης μιας δέσμης φωτός. Τέλος, το διαμορφωμένο πλέον οπτικό σήμα εξόδου αποστέλλεται, μέσω της οπτικής ίνας εξόδου, στον οπτικό ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής αυτός είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της διαμορφωμένης δέσμης φωτός σε ηλεκτρικό σήμα, προκειμένου να γίνει δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση της πληροφορίας.

Οι εξωγενείς αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που απαιτούν την μέτρηση περιστροφής, επιτάχυνσης, μετατόπισης, ταχύτητας και πλήθος διαφόρων μεγεθών. Ένα διαδεδομένο παράδειγμα εφαρμογής τους αποτελεί η μέτρηση της θερμοκρασίας εντός των κινητήρων αεριώθησης (jet) των αεροσκαφών, όπου η ακτινοβολία μεταδίδεται μέσω οπτικής ίνας σε ένα πυρόμετρο, το οποίο βρίσκεται στο εξωτερικό του κινητήρα και λειτουργεί απομακρυσμένα, χωρίς να έρχεται σε άμεση επαφή με αυτόν. Επιπροσθέτως, οι εξωγενείς αισθητήρες οπτικών ινών εφαρμόζονται, κατά τον ίδιο τρόπο, και για την μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε ηλεκτρικούς μετασχηματιστές, και συγκεκριμένα σε περιβάλλοντα όπου τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι εξαιρετικά ισχυρά, καθιστώντας αδύνατη την μέτρηση με οποιονδήποτε άλλο τρόπο.

Όπως οι ενδογενείς, έτσι και οι εξωγενείς αισθητήρες οπτικών ινών διαθέτουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία τους καθιστούν περιζήτητους και απαραίτητους σε πολλά διαφορετικά είδη πειραμάτων και πεδία εφαρμογών. Διακρίνονται για την εξαιρετική προστασία που παρέχουν στα σήματα μέτρησης ενάντια στον θόρυβο, καθιστώντας τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα περισσότερο αξιόπιστα. Ωστόσο, το σημαντικότερο πλεονέκτημα που διαθέτουν αποτελεί η δυνατότητα χρήσης τους σε σημεία μη προσβάσιμα, ή σε χώρους όπου η πρόσβαση είναι εξαιρετικά δύσκολη για τους απλούς συμβατικούς αισθητήρες.



Σχήμα 4.3: Βασικό Διάγραμμα Εξωγενούς Αισθητήρα Οπτικών Ινών



Εικόνα 4.10: Εξωγενής Αισθητήρας Οπτικών Ινών

4.6.2 Έντασης – Φάσης – Μήκους Κύματος – Πόλωσης

Με βάση την ιδιότητα του φωτός που χρησιμοποιείται και διαμορφώνεται κατά την διαδικασία μετατροπής τού σήματος εισόδου σε οπτικό σήμα εξόδου, οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται στους αισθητήρες έντασης (intensity-based), φάσης (phase-based), μήκους κύματος (wavelength-based) και πόλωσης (polarization-based).

- **Αισθητήρες Έντασης (Intensity-based Sensors)**

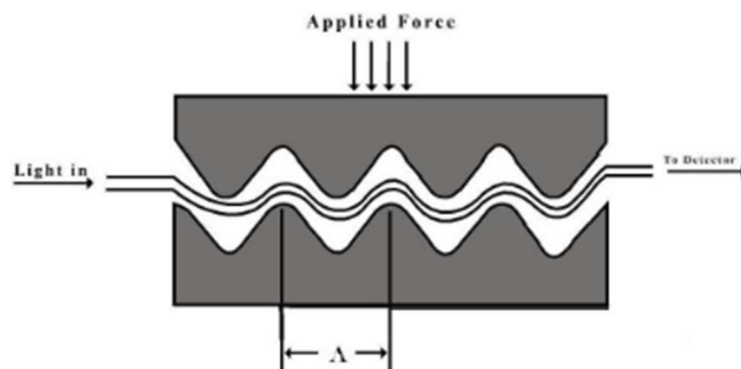
Η **ένταση** ενός κύματος φωτός αποτελεί δυναμική ποσότητα, η οποία σχετίζεται με την «δύναμη» του φωτός, δηλαδή, το πόσο έντονα φωτοβολεί. Η ένταση είναι ανάλογη με το τετράγωνο του **πλάτους** τού κύματος φωτός· αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνεται το πλάτος, τόσο θα αυξάνεται η ένταση στο τετράγωνο. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση μείωσης του πλάτους, αντίστοιχα.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών που λειτουργούν βασισμένοι στην διαμόρφωση της έντασης του φωτός αποτελούν έναν από τους πρωταρχικούς τύπους που αναπτύχθηκαν με την σύζευξη των τεχνολογιών τού απλού αισθητήρα και της οπτικής ίνας. Συνήθως, σε τέτοιου είδους αισθητήρες χρησιμοποιούνται πολύτροπες οπτικές ίνες, καθώς απαιτείται η διάδοση μεγάλης ποσότητας φωτός για την ρύθμιση της έντασης, άρα και η δυνατότητα διοχέτευσης όσο το δυνατόν περισσότερων ακτινών φωτός, ανεξαρτήτως του τρόπου μετάδοσής τους.

Γενικά, η μέτρηση της φυσικής ποσότητας που δέχεται ο αισθητήρας ως σήμα εισόδου πραγματοποιείται με την διαμόρφωση της έντασης της δέσμης φωτός που μεταδίδεται εντός της οπτικής ίνας, παράγοντας σήμα εξόδου, με τέτοιο τρόπο που να αντιστοιχεί απολύτως στην μεταβολή τού μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας λειτουργεί βασισμένος στην **απώλεια** που υφίσταται το μεταδιδόμενο σήμα, όταν το μετρούμενο μέγεθος υφίσταται εξίσου κάποια μεταβολή, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται κυρίως με την κάμψη της οπτικής ίνας. Πιο συγκεκριμένα, όταν μεταβάλλεται η φυσική ποσότητα εισόδου, το σήμα μετατρέπεται, με την

βοήθεια εξωτερικής συσκευής, σε κάποιου είδους δύναμη, η οποία και εφαρμόζεται πάνω στην οπτική ίνα, κάμπτοντάς την. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η δέσμη φωτός – δηλαδή το μεταδιδόμενο σήμα – υφίσταται απώλεια, αφού ένα μέρος της διαφεύγει διαμέσου της επικάλυψης έξω από τον πυρήνα της οπτικής ίνας, καταλήγοντας στην μείωση της έντασης.

Απλά παραδείγματα αισθητήρων οπτικών ινών που βασίζονται στην ένταση αποτελούν οι αισθητήρες πίεσης, επιτάχυνσης, κίνησης ή θερμικής διαστολής. Λόγου χάρη, σε έναν αισθητήρα πίεσης που αξιοποιεί την κάμψη της οπτικής ίνας για την διαμόρφωση της έντασης, η οπτική ίνα τοποθετείται μεταξύ δύο πλακών που διαθέτουν εγκοπές, διαμέσου των οποίων και περνάει. Μόλις ο αισθητήρας δεχθεί πίεση, η άνω πλάκα μετακινείται προς τα κάτω, κάμπτοντας την οπτική ίνα· εφόσον η κάμψη αυτή ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο, το μεταδιδόμενο φως διαφεύγει, διαμέσου της επικάλυψης, εκτός του πυρήνα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα υφίσταται απώλεια και η ένταση του φωτός μειώνεται.

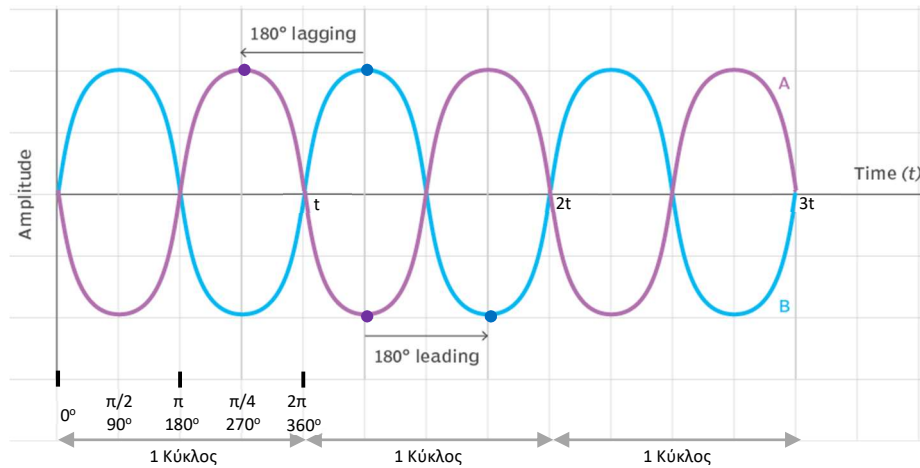


Εικόνα 4.11: Παράδειγμα Αισθητήρα Έντασης

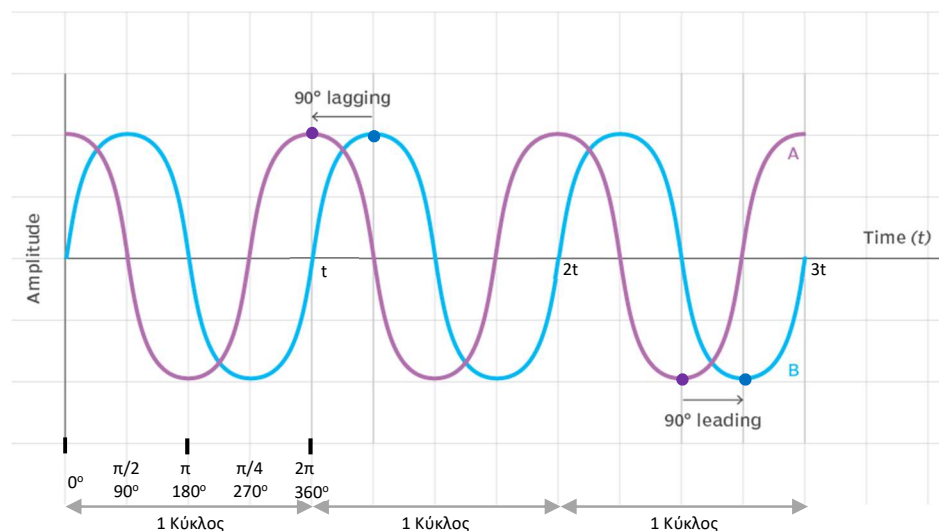
- **Αισθητήρες Φάσης (Phase-based Sensors)**

Η **φάση** ενός κύματος φωτός αναπαριστά την θέση του, σε μια οποιαδήποτε συγκεκριμένη χρονική στιγμή (στιγμιότυπο) τού κύκλου του, και μετράται σε μοίρες ή ακτίνια. Ωστόσο, η έννοια της φάσης, στην προκειμένη περίπτωση, αποκτά νόημα, όταν αναφερόμαστε στο φαινόμενο της **διαφοράς φάσης**. Η διαφορά φάσης προκύπτει με την σύγκριση δύο διαφορετικών κυμάτων, και

σχετίζεται με το κατά πόσο το ένα κύμα προηγείται ή υστερεί του άλλου· η διαπίστωση αυτή διεξάγεται, συγκρίνοντας την θέση των κορυφών ή των κοιλάδων των δύο κυμάτων σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο.



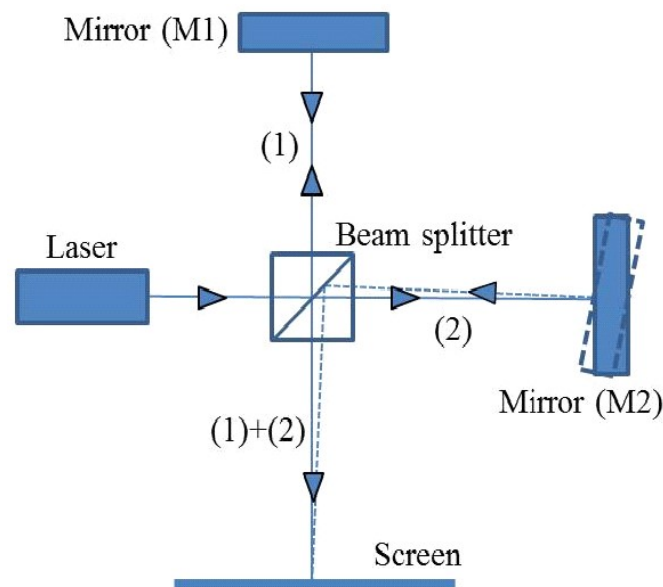
Εικόνα 4.12: Το κύμα B προηγείται του A κατά 180° ή π ακτίνια (μισό κύκλο)



Εικόνα 4.13: Το κύμα B προηγείται του A κατά 90° ή π/2 ακτίνια (1/4 του κύκλου)

Οι αισθητήρες οπτικών ινών, οι οποίοι λειτουργούν βασισμένοι στην διαμόρφωση της φάσης του φωτός, αξιοποιούν το φαινόμενο της διαφοράς φάσης, το οποίο προκύπτει και είναι ανάλογο της μεταβολής του φυσικού μεγέθους που ανιχνεύεται. Πιο συγκεκριμένα, η μεταδιδόμενη ακτίνα φωτός, που εκπέμπεται από μία πηγή και διοχετεύεται εντός της οπτικής ίνας, διαχωρίζεται σε δύο ξεχωριστές ακτίνες φωτός· η μια ακτίνα αποτελεί την ακτίνα αναφοράς και η άλλη την προς σύγκριση ακτίνα σήματος. Η προς

σύγκριση ακτίνα, η οποία μεταδίδεται εντός της οπτικής ίνας που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον ανίχνευσης, ανακλάται πάνω σε κινούμενη κατοπτρική επιφάνεια με ταχύτητα καθορισμένη από την μεταβολή τού μετρούμενου φυσικού μεγέθους που ανιχνεύεται. Μέσω της ανάκλασης αυτής, η φάση τού κύματος φωτός μεταβάλλεται. Παράλληλα, η ακτίνα αναφοράς, η οποία δεν επηρεάζεται καθόλου από το περιβάλλον ανίχνευσης, ανακλάται πάνω σε σταθερή κατοπτρική επιφάνεια, διατηρώντας σταθερή την φάση της. Στην συνέχεια, οι δύο δέσμες φωτός επανενώνονται, και με την συμβολή τους αυτή, προκύπτει ένα ενιαίο κύμα φωτός, το οποίο καταδεικνύει την διαφορά φάσης. Τέλος, το τελικό κύμα καταλήγει στην μονάδα απεικόνισης των αποτελεσμάτων.



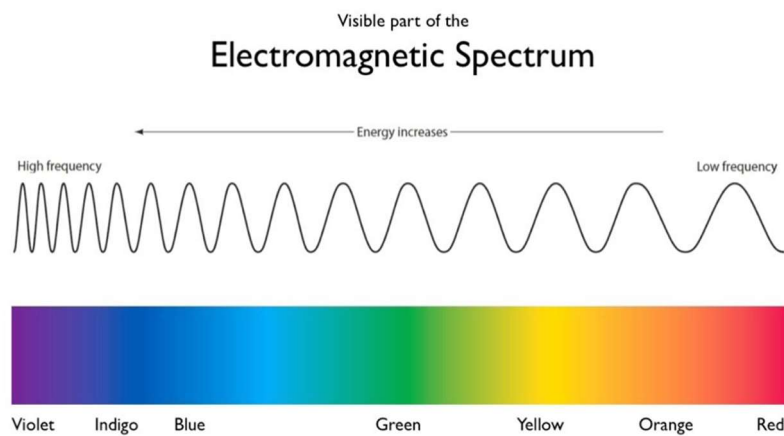
Εικόνα 4.14: Διάγραμμα Αισθητήρα Φάσης Michelson

- **Αισθητήρες Μήκους Κύματος (Wavelength-based Sensors)**

Το **μήκος κύματος** ενός κύματος φωτός αποτελεί την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων αυτού, και σχετίζεται με την **συχνότητά** του. Δηλαδή, εφόσον το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, όσο μικρότερο είναι το μέν, τόσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, και αντίστροφα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα μεταφράζεται με την

μορφή χρώματος από το ανθρώπινο μάτι· ως εκ τούτου, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος – άρα και υψηλότερη η συχνότητα – τόσο το αντιληπτό χρώμα στο ορατό φάσμα τής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τείνει προς το βιολετί. Απεναντίας, όταν το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο – και κατ' επέκταση η συχνότητα χαμηλότερη – το αντιληπτό χρώμα τείνει προς το κόκκινο.

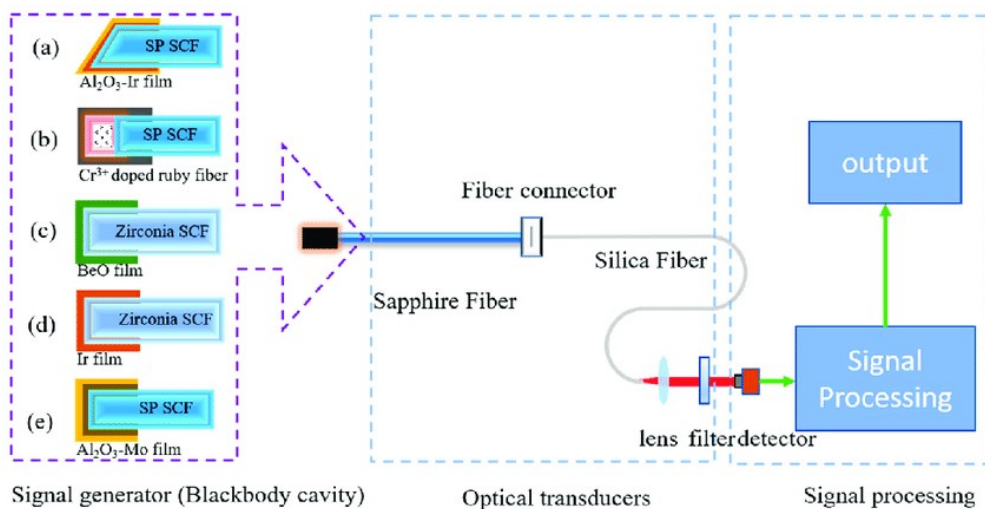
Οι αισθητήρες οπτικών ινών, που λειτουργούν βασισμένοι στην διαμόρφωση του μήκους κύματος του φωτός, αξιοποιούν την διαφορά χρώματος που προκύπτει με την μεταβολή του μήκους κύματος. Πιο συγκεκριμένα, η ανίχνευση και η μέτρηση του φυσικού μεγέθους που δέχεται ένα τέτοιος αισθητήρας ως σήμα εισόδου πραγματοποιείται αποκλειστικά με την διαμόρφωση του μήκους κύματος της δέσμης φωτός που μεταδίδεται εντός τής οπτικής ίνας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα εξόδου που παράγεται είναι αντίστοιχο της μεταβολής της φυσικής ποσότητας που ανιχνεύθηκε.



Εικόνα 4.15: Το Ορατό Φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

Ένα απλό παράδειγμα αισθητήρα οπτικών ινών που διαμορφώνει το μήκος κύματος τού φωτός αποτελεί ο αισθητήρας μέλανος σώματος. Αρχικά, το **μέλαν σώμα** (black body) αποτελεί ιδανικό θερμαινόμενο στερεό, το οποίο θεωρείται ότι απορροφά όλα τα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτουν πάνω του. Επιπροσθέτως, θεωρείται ότι το μέλαν σώμα έχει την δυνατότητα να εκπέμπει την λεγόμενη «ακτινοβολία

μέλανος σώματος» σε όλα τα μήκη κύματος, αναλόγως την εκάστοτε θερμοκρασία του. Σε έναν τέτοιου είδους αισθητήρα, τοποθετείται στο ένα άκρο της οπτικής ίνας μια κοιλότητα μέλανος σώματος, της οποίας όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, τόσο αυτή ξεκινάει να φωτοβολεί, λειτουργώντας ως πηγή φωτός. Στο άλλο άκρο της οπτικής ίνας τοποθετείται ένας ανιχνευτής, ο οποίος, σε συνδυασμό με φίλτρα στενής δέσμης και φακούς, ανιχνεύει το ποσό της φωτεινής ενέργειας που εκπέμπεται από την κοιλότητα μέλανος σώματος. Οι αισθητήρες μέλανος σώματος χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιβάλλοντα όπου αναπτύσσονται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες για την μέτρηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 4.16: Διάγραμμα Αισθητήρα Μέλανος Σώματος

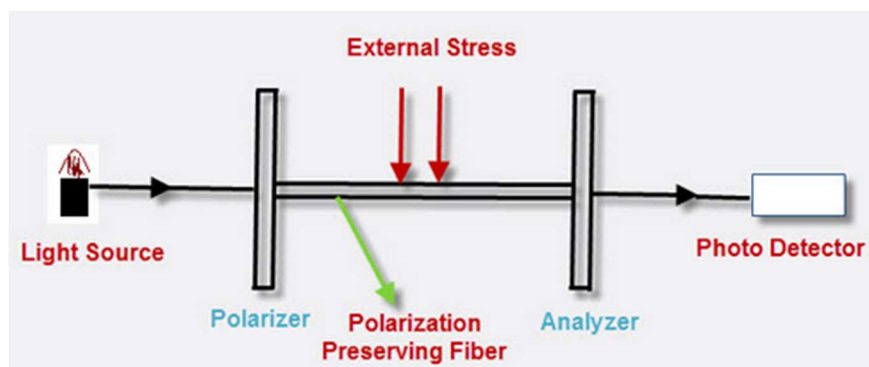
- **Αισθητήρες Πόλωσης (Polarization-based Sensors)**

Όπως ήδη γνωρίζουμε, η **πόλωση** αποτελεί το φαινόμενο, κατά το οποίο το **επίπεδο ταλάντωσης** του φωτός είναι αποκλειστικά το ίδιο για τον συνολικό αριθμό των φωτονίων του· δηλαδή, όλες οι επιμέρους ακτίνες φωτός, που το αποτελούν, ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι αποτελώντας μία ενιαία δέσμη.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών, που λειτουργούν βασισμένοι στην διαμόρφωση της πόλωσης του φωτός, αξιοποιούν το φαινόμενο της **διπλής διάθλασης** (birefringence), κατά το οποίο, μια μεταδιδόμενη ακτίνα φωτός

διαχωρίζεται σε δύο διαφορετικά μονοπάτια. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει από τις πιθανές ατέλειες και ασυμμετρίες που ενδεχομένως συναντώνται κατά μήκος τού πυρήνα μια οπτικής ίνας, ή στην εφαρμογή κάποιας εξωτερικής δύναμης, κάμπτοντάς την. Για την επίτευξη του φαινομένου τής διπλής διάθλασης, χρησιμοποιείται ένα εξειδικευμένο είδος οπτικής ίνας, η Οπτική Ίνα Διατήρησης Πόλωσης (Polarization Maintaining – PM Fiber). Η οπτική ίνα αυτή είναι μονότροπη (single-mode), κατασκευασμένη από συγκεκριμένα υλικά, των οποίων οι δείκτες διάθλασης εξαρτώνται από την κατεύθυνση της πόλωσης του φωτός, και έχει την δυνατότητα διατήρησης σταθερών των δεικτών διάθλασης κατά μήκος ολόκληρης της έκτασής της. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διατηρείται η επιθυμητή πόλωση του φωτός, αποτρέποντας την σύζευξη των δύο ορθογώνιων κατευθύνσεων πόλωσης.

Πιο συγκεκριμένα, σε έναν τέτοιου είδους αισθητήρα, το φως, που εκπέμπεται από την πηγή, διοχετεύεται εντός τής οπτικής ίνας, και πολώνεται μέσω ενός πολωτικού φίλτρου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ακτίνα φωτός διαχωρίζεται σε δύο ξεχωριστά μονοπάτια· το ένα κατευθύνεται υπό γωνία 45° ως προς τον άξονα, του οποίου την κατεύθυνση ακολουθεί το δεύτερο μονοπάτι, το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά. Το κομμάτι αυτό της οπτικής ίνας που διατηρεί την πόλωση των ακτινών σταθερή χρησιμοποιείται ως αισθητήρας. Στην περίπτωση που εφαρμοστεί κάποια εξωτερική δύναμη στην οπτική ίνα – όπως πίεση, παραμόρφωση ή καταπόνηση – προκαλείται μεταβολή τής φάσης μεταξύ των δύο πολωμένων καταστάσεων. Στην συνέχεια, οι ακτίνες φωτός κατευθύνονται προς στον αναλυτή, όπου διαπιστώνεται και καταγράφεται η μεταβολή τής πόλωσης του φωτός, σε συνάρτηση με την διαταραχή που υπέστη η οπτική ίνα, σε σύγκριση με την ακτίνα αναφοράς. Τέλος, το φωτεινό κύμα καταλήγει στον οπτικό ανιχνευτή, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση.



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα Αισθητήρα Πόλωσης

4.6.3 Σημειακοί – Κατανεμημένοι

Με βάση το μέγεθος και την θέση του αισθητήριου στοιχείου, και κατ' επέκταση το εύρος μέτρησης – δηλαδή, την δυνατότητα συνεχούς ή σημειακής μέτρησης και παρακολούθησης του σήματος – οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται στους σημειακούς (single-point) και τους κατανεμημένους (distributed).

- **Σημειακοί Αισθητήρες (Single-Point Sensors)**

Οι σημειακοί αισθητήρες οπτικών ινών διαθέτουν το μοναδικό αισθητήριο στοιχείο τους στο τέλος του οπτικού καλωδίου, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα ανίχνευσης μόνο τοπικά σε συγκεκριμένα σημεία του περιβάλλοντος ανίχνευσης, εντός του περιορισμένου εύρους ανίχνευσης του αισθητήρα. Αυτού του είδους οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε πολύ εξειδικευμένα πεδία εφαρμογών, κυρίως στον τομέα της Χημείας, καθώς δεν είναι κατάλληλοι για αξιοποίηση σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή πιο πολύπλοκων πειραμάτων.

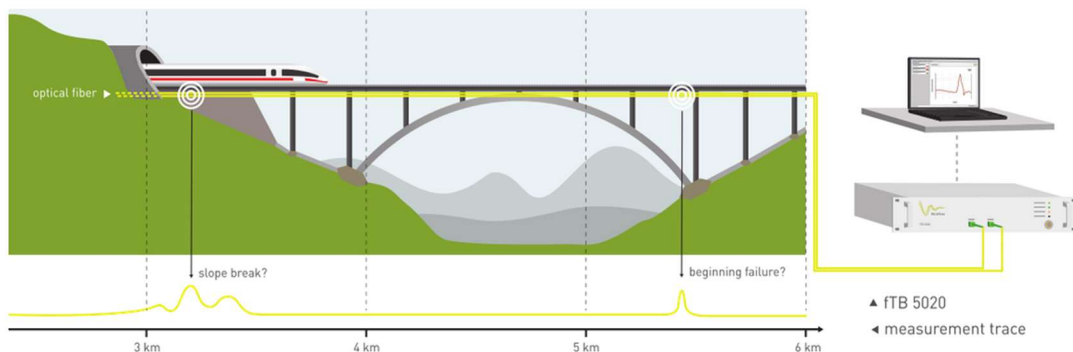


Εικόνα 4.18: Διάγραμμα Σημειακού Αισθητήρα

▪ **Κατανεμημένοι Αισθητήρες (Distributed Sensors)**

Οι κατανεμημένοι αισθητήρες οπτικών ινών είναι ικανοί να ανιχνεύουν και να παρακολουθούν τις μετρήσεις και τις μεταβολές τού προς ανίχνευση φυσικού μεγέθους διαρκώς και αδιάκοπα, σε πραγματικό χρόνο, κατά μήκος ολόκληρης της οπτικής ίνας. Πιο συγκεκριμένα, η οπτική ίνα αναλαμβάνει τον ρόλο ενός ενιαίου μεγάλου και ευέλικτου αισθητήρα, ο οποίος παρακολουθεί τις μεταβολές και τις μεταδίδει υπό μορφή κυμάτων φως στο τμήμα επεξεργασίας. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης οποιασδήποτε μεταβολής σε οποιοδήποτε σημείο τού περιβάλλοντος παρακολούθησης, χωρίς περιορισμό, και για μεγάλες αποστάσεις, επιτυγχάνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την παραγωγή πιο λεπτομερών μετρήσεων, και κατ' επέκταση, πιο αξιόπιστων συνολικών αποτελεσμάτων. Είναι πλέον κατανοητό ότι, στην προκειμένη περίπτωση, αναφερόμαστε σε ενδογενείς αισθητήρες, αφού η ίδια η οπτική ίνα είναι και το αισθητήριο στοιχείο, εκτός από απλό μέσο μετάδοσης του σήματος.

Η πιο διαδεδομένη και δημοφιλής χρήση τους συναντάται στην παρακολούθηση αστικών κατασκευών μεγάλης κλίμακας, όπως, για παράδειγμα, γεφυρών, φραγμάτων και κτηρίων. Η δυνατότητα συνεχούς ανίχνευσης και παρακολούθησης οποιασδήποτε μεταβολής, όπως της μετατόπισης, της θερμοκρασίας και της καταπόνησης των δομικών στοιχείων μιας τέτοιου είδους κατασκευής, βοηθάει στην έγκαιρη και γρήγορη αντιμετώπιση πιθανών ατελειών και ελαττωμάτων κατά την διαδικασία κατασκευής, καθώς και φθορών που προκύπτουν με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 4.19: Κατανεμημένος Αισθητήρας σε Γέφυρα

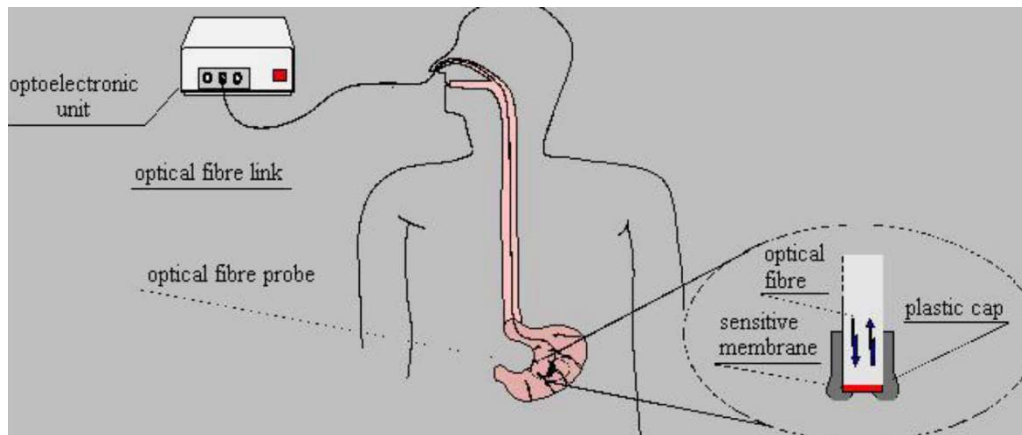
4.6.4 Χημικοί – Φυσικοί – Βιοϊατρικοί

Με βάση το πεδίο εφαρμογής τους, οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται σε χημικούς (chemical), φυσικούς (physical) και βιοϊατρικούς (biomedical).

- **Χημικοί Αισθητήρες (Chemical Sensors)**

Ένας χημικός αισθητήρας οπτικών ινών λειτουργεί ανιχνεύοντας χημική πληροφορία, δηλαδή, κάποια μεταβολή στην συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου χημικού είδους στο περιβάλλον του ως σήμα εισόδου· το περιβάλλον εφαρμογής του μπορεί να είναι γενικότερα ο αέρας ή το νερό, και ειδικότερα κάποιου είδους συγκεκριμένο υγρό ή αέριο . Επί παραδείγματι, χρησιμοποιείται για την μέτρηση του Ph, την ανάλυση αερίων, σε φρεάτια για την ανάλυση των υπόγειων νερών, την μέτρηση των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο στομάχι κ.α.

Ένας τέτοιου είδους αισθητήρας διακρίνεται από την απλή δομή του, και αξιοποιεί τον **φθορισμό** και την **απορρόφηση** ως μεθόδους ανίχνευσης· οι μεταβολές που ανιχνεύονται διαπιστώνονται με την μέτρηση των αλλαγών που υφίστανται οι παράμετροι του μεταδιδόμενου φωτός. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του φθορισμού, η οπτική ίνα μεταδίδει την δέσμη φωτός διέγερσης στο σημείο ανίχνευσης, και ο φθορισμός που δημιουργείται, οδηγείται, μέσω της οπτικής ίνας, στον φασματοσκοπικό αναλυτή για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση. Στην περίπτωση της απορρόφησης, η δέσμη φωτός μεταδίδεται, μέσω της οπτικής ίνας, σε ειδικό θάλαμο, ο οποίος επικοινωνεί με το περιβάλλον. Έπειτα, μετά από διαδοχικές ανακλάσεις που συμβαίνουν μεταξύ δύο καθρεφτών, το φως διοχετεύεται εντός μιας δεύτερης οπτικής ίνας, η οποία και το οδηγεί στον δεκτή. Ο δεκτής διαπιστώνει τις μεταβολές και τα στοιχεία που επηρέασαν την δέσμη φωτός εντός του θαλάμου.



Εικόνα 4.20: Χημικός Αισθητήρας Μέτρησης CO₂ στο Στομάχι

- **Φυσικοί Αισθητήρες (Physical Sensors)**

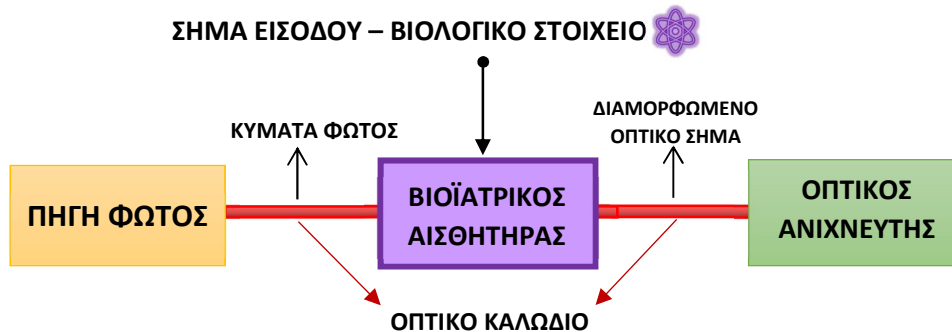
Οι φυσικοί αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την μέτρηση φυσικών παραμέτρων τού περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση, η παραμόρφωση, η επιτάχυνση, σε οποιοδήποτε πεδίο εφαρμογής στην Βιομηχανία.

- **Βιοϊατρικοί Αισθητήρες (Biomedical Sensors)**

Οι βιοϊατρικοί αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της Ιατρικής και της Βιολογίας, για την ανίχνευση διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με τον οργανισμό των έμβιων όντων. Είναι ικανοί να ανιχνεύουν μη-ηλεκτρικές ποσότητες και να τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Επί παραδείγματι, τέτοιου είδους αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύσουν τα επίπεδα γλυκόζης στο αίμα, να μετρήσουν το οξυγόνο και το pH, την ροή και την πίεση του αίματος, καθώς και να παρέχουν εικόνες και πληροφορίες για το εσωτερικό τού σώματος. Αποτελούν σημαντικό βοηθητικό εργαλείο, ειδικότερα στην Ιατρική, καθώς διευκολύνουν την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών ασθενειών και άλλων προβλημάτων υγείας.

Γενικότερα, σε έναν βιοϊατρικό αισθητήρα οπτικών ινών, το εκπεμπόμενο φως μεταδίδεται, μέσω τής οπτικής ίνας, στο αισθητήριο στοιχείο, το οποίο είναι είτε κάποιος ξεχωριστός αισθητήρας ή η ίδια η οπτική ίνα. Στο σημείο αυτό, ο αισθητήρας ανιχνεύει την μεταβολή στο περιβάλλον του ή την

παρουσία κάποιας ουσίας, και διαμορφώνει τις κατάλληλες παραμέτρους του φωτός. Έπειτα, το διαμορφωμένο φως οδηγείται στον οπτικό ανιχνευτή, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση.



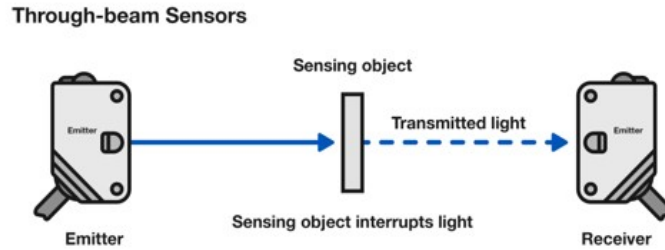
Σχήμα 4.4: Βασικό Διάγραμμα Βιοϊατρικού Αισθητήρα Οπτικών Ινών

4.6.5 Through-Beam – Retro-Reflective – Diffuse-Reflective

Με βάση την μέθοδο ανίχνευσης, οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται σε through-beam (διαμέσου-δέσμης), retro-reflective και diffuse-reflective.

- **Through-beam Sensors (Αισθητήρες Διαμέσου-δέσμης)**

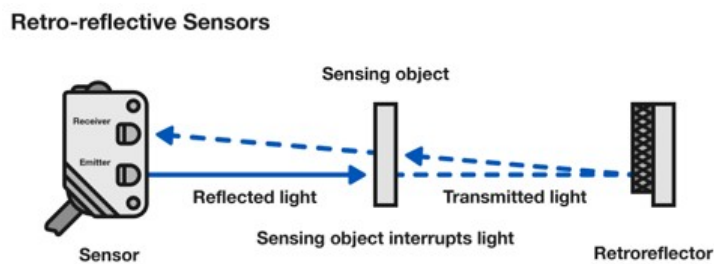
Οι διαμέσου-δέσμης αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούνται από έναν **πομπό** και έναν **δεκτή** τοποθετημένους σε αντίθετες κατευθύνσεις· ο πομπός εκπέμπει μια δέσμη φωτός, η οποία πηγαίνει κατευθείαν στον δεκτή. Η ανίχνευση πραγματοποιείται μόλις ο στόχος ανίχνευσης περάσει ανάμεσά τους, διακόπτοντας την δέσμη φωτός, και κατ' επέκταση, μειώνοντας την ένταση του φωτός που κατευθύνεται προς τον δεκτή. Ως εκ τούτου, ο δέκτης αντιλαμβάνεται την μεταβολή της έντασης του φωτός και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση. Αυτού του είδους οι αισθητήρες διακρίνονται για την ακρίβειά τους, την δυνατότητα λειτουργίας τους σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς και την ρυθμιζόμενη ευαισθησία τους αναλόγως με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.



Εικόνα 4.21: Διάγραμμα Αισθητήρα Through-Beam

- **Retro-Reflective Sensors**

Οι retro-reflective αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούνται από έναν **πομποδέκτη** και έναν ανακλαστήρα τοποθετημένους σε αντίθετες κατευθύνσεις· ο πομποδέκτης εκπέμπει μια δέσμη φωτός, η οποία κατευθύνεται προς τον ανακλαστήρα, και επιστρέφει πίσω. Η ανίχνευση πραγματοποιείται μόλις ο στόχος ανίχνευσης περάσει ανάμεσά τους, διακόπτοντας την δέσμη φωτός, και μειώνοντας την έντασή του. Ως εκ τούτου, ο πομποδέκτης αντιλαμβάνεται την μεταβολή αυτή και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα προς επεξεργασία και απεικόνιση. Οι αισθητήρες αυτοί διακρίνονται για την αποδοτικότητα τους σε διάφορες συνθήκες φωτισμού, την ανθεκτικότητά τους σε παρεμβολές και θορύβους, καθώς και την ευελιξία τους σε περιβάλλοντα περιορισμένου χώρου.



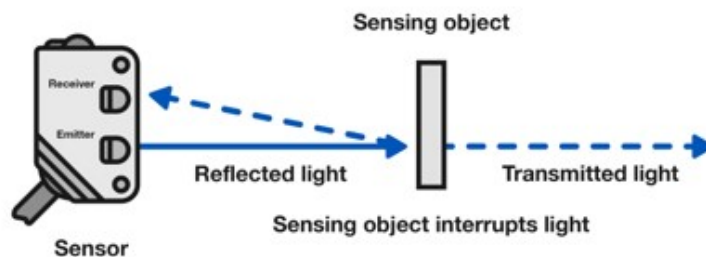
Εικόνα 4.22: Διάγραμμα Retro-Reflective Αισθητήρα

- **Diffuse-Reflective Sensors**

Οι diffuse-reflective αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούνται αποκλειστικά και μόνο από έναν **πομποδέκτη**, και χρησιμοποιείται το ίδιο το αντικείμενο-στόχος ως ανακλαστήρας· το εκπεμπόμενο φως ανακλάται πάνω στην

επιφάνεια του στόχου και επιστρέφει πίσω στον πομποδέκτη. Η ανίχνευση πραγματοποιείται μόλις ο στόχος ανίχνευσης περάσει μπροστά από την δέσμη φωτός, ανακλώντας ένα μέρος της πίσω στον πομποδέκτη – αφού πρόκειται για διάχυτη ανάκλαση, και όχι απευθείας ανακατεύθυνση στην πηγή – δηλώνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την παρουσία του. Ως εκ τούτου, ο πομποδέκτης αντιλαμβάνεται την μεταβολή αυτή, η οποία εξαρτάται από την φύση και την ανακλαστικότητα του υλικού, στο περιβάλλον και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα προς επεξεργασία και απεικόνιση. Τέτοιου είδους αισθητήρες διακρίνονται για την αποδοτικότητα τους σε διάφορες συνθήκες φωτισμού και ποικιλία επιφανειών, την ευαισθησία τους στην διάχυτη ανακλαστικότητα των υλικών, καθώς και την καταλληλότητά τους σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, για εφαρμογές που απαιτούν σταθερότητα και ακρίβεια.

Diffuse-reflective Sensors



Εικόνα 4.23: Διάγραμμα Αισθητήρα Diffuse-Reflective

4.7 Τύποι και Εφαρμογές Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Σύμφωνα με όσα έχουμε αναλύσει μέχρι τώρα στο κεφάλαιο των αισθητήρων οπτικών ινών, είναι προφανές ότι οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ευρέως στην πλειοψηφία των τομέων της Βιομηχανίας, αφού αποτελούν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την διεκπεραίωση πολλών διαφορετικών διεργασιών. Έχουν συμβάλει στην αυτοματοποίηση πληθώρας λειτουργιών, οι οποίες μέχρι πρότινος διεξάγονταν από το ανθρώπινο δυναμικό, καθώς και έχουν αντικαταστήσει τους απλούς ηλεκτρικούς αισθητήρες, αφού είναι σημαντικά

αποδοτικότεροι και πολύ πιο ανθεκτικοί σε «εχθρικά» βιομηχανικά περιβάλλοντα και υπό αντίξοες συνθήκες. Επιπροσθέτως, έχουν καταστήσει δυνατή την ανίχνευση σε δυσπρόσιτους και επικίνδυνους για τον άνθρωπο χώρους, αφού υποστηρίζουν την μετάδοση πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις, διευκολύνοντας την πραγματοποίηση και τον έλεγχο της από απομακρυσμένους και ασφαλείς χώρους.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών, πέρα από τα προαναφερθέντα κριτήρια που αναλύσαμε πιο πάνω, σύμφωνα με τα οποία και κατηγοριοποιούνται, διακρίνονται σε μία πληθώρα τύπων, οι οποίοι αναφέρονται σε διαφορετικές χρήσεις σε κατάλληλα περιβάλλοντα εφαρμογής. Όπως ήδη γνωρίζουμε, αναλόγως με την εξειδικευμένη ιδιότητά τους – δηλαδή, το είδος τού φυσικού μεγέθους, το οποίο ανιχνεύουν και επεξεργάζονται – ταξινομούνται στους χημικούς, τους φυσικούς και τους βιοϊατρικούς αισθητήρες.

Ορισμένοι από τους πιο διαδεδομένους τύπους αισθητήρων οπτικών ινών είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, μετατόπισης, πίεσης, υγρασίας, εγγύτητας, κίνησης, θέσης και επιτάχυνσης, και εφαρμόζονται ευρέως σε πολλούς τομείς τής Βιομηχανίας. Επί παραδείγματι, ένα από τα πιο γνωστά και σημαντικά πεδία εφαρμογής αποτελεί η κατασκευή και η συντήρηση δομών μεγάλης κλίμακας, όπως γεφυρών, κτηρίων, φραγμάτων κλπ. Στην περίπτωση αυτή, με την αξιοποίηση της οπτικής ίνας, ο αισθητήρας οπτικών ινών λαμβάνει διάφορα δεδομένα και μετρήσεις από το περιβάλλον μέτρησης, και διαμορφώνει κάποια από τις ιδιότητες του φωτός.

Πιο συγκεκριμένα, ο παρατηρητής παρακολουθεί την πιθανή μεταβολή της έντασης, της φάσης ή της πόλωσης του φωτός και αντιλαμβάνεται την δομική κατάσταση της εκάστοτε κατασκευής, καθώς και εάν έχουν προκύψει κάποιες ατέλειες ή σφάλματα. Λόγου χάρη, θα μπορούσε η κατεύθυνση του φωτός να αλλάζει, στην περίπτωση ανίχνευσης κάποιας μετατόπισης, φθοράς ή οποιασδήποτε άλλης μεταβολής – αναλόγως με τον τύπο τού αισθητήρα – μεταξύ των δομικών στοιχείων μιας γέφυρας, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να αποβεί μοιραίο εάν δεν ανιχνευόταν και δεν διορθωνόταν εγκαίρως. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, το διαμορφωμένο φως μετατρέπεται, εν συνεχεία, σε άλλου είδους σήμα, πιο εύκολα παρατηρήσιμο, όπως ηχητικό ή δόνηση, ως κάποιο είδος συναγερμού, ο οποίος πυροδοτείται στην περίπτωση ανίχνευσης κάποιας δομικής

ατέλειας. Οπότε, κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η ορθή και ασφαλής κατασκευή, καθώς και συντήρηση, των κατασκευών μεγάλης κλίμακας, αφού παρακολουθούνται διαρκώς μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών, ανιχνεύοντας πιθανές αστοχίες και φθορές με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Ωστόσο, το παραπάνω παράδειγμα αποτελεί μόνο ένα πεδίο χρήσης τους στην Βιομηχανία· παρακάτω θα αναφερθούμε συνοπτικά στους πιο διαδεδομένους τομείς εφαρμογών των αισθητήρων οπτικών ινών, με αντίστοιχα παραδείγματα.



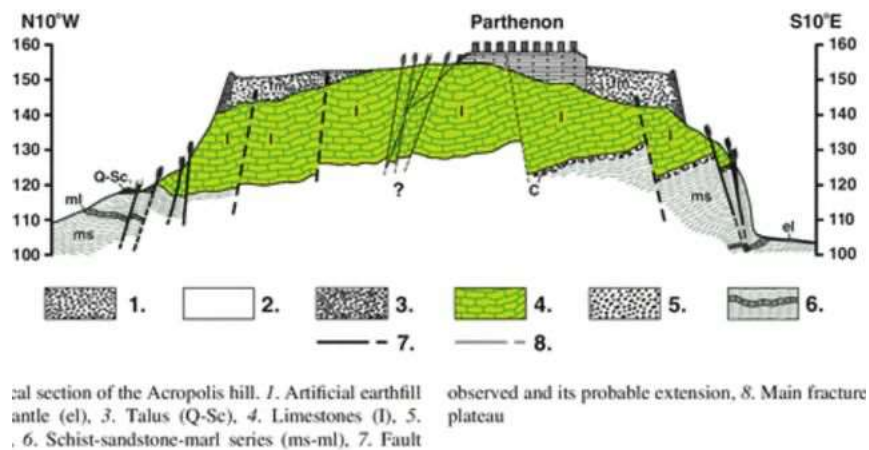
Εικόνα 4.24: Πεδία Εφαρμογής Αισθητήρων Οπτικών Ινών

- **Βιομηχανία Οικοδομικών Κατασκευών Αστικών Δομών**

Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής των αισθητήρων οπτικών ινών στον τομέα της κατασκευής αστικών δομών αποτελούν η ανίχνευση μετατοπίσεων των δομικών στοιχείων των γεφυρών, η ανίχνευση κίνησης, καταπόνησης και θερμοκρασίας των δομικών στοιχείων των κτηρίων, καθώς και η ανίχνευση διαρροών σε φράγματα και αγωγούς μεταφοράς νερού, φυσικού αερίου, πετρελαίου κλπ.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αξιοποίησης των αισθητήρων οπτικών ινών, στην προκειμένη περίπτωση, αποτελεί η παρακολούθηση και η προστασία της Ακρόπολης, το Τείχος της οποίας, καθώς και ο Παρθενώνας, έχουν υποστεί σημαντικές φθορές και ρωγμές, εξαιτίας της παρόδου του χρόνου,

καθώς και του ανθρώπινου παράγοντα. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτοί είναι υπεύθυνοι για την ανίχνευση οποιασδήποτε μεταβολής που υφίσταται η δομή ολόκληρης της Ακρόπολης, όπως μετατοπίσεις και πιέσεις εξαιτίας της αυξομείωσης της θερμοκρασίας που προκύπτει με την αλλαγή των εποχών, ή των αντίξοων καιρικών συνθηκών και των σεισμών. Το σύνολο των πληροφοριών αυτών συλλέγεται και αποστέλλεται για την απομακρυσμένη παρακολούθηση του λόφου και την πρόληψη πιθανών καταστροφών.



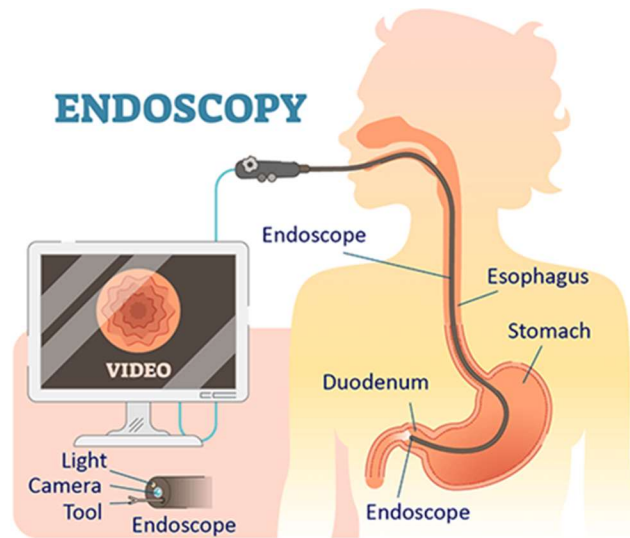
Εικόνα 4.25: Σχέδιο για την Χρήση Αισθητήρων Οπτικών Ινών στην Ακρόπολη

■ Ιατρική

Στον τομέα της Ιατρικής, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, όπως για την παρακολούθηση της κατάστασης της υγείας και των ζωτικών σημείων των ασθενών σε πραγματικό χρόνο, σε συστήματα απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο και ενδοσκόπια, καθώς και για την διεξαγωγή χειρουργικών επεμβάσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης των αισθητήρων οπτικών ινών στην Ιατρική αποτελεί το ενδοσκόπιο, το οποίο και ήταν ένας από τους πρώτους αισθητήρες οπτικών ινών που εφευρεθήκαν με την εμφάνιση της οπτικής ίνας. Το ενδοσκόπιο, γενικότερα, χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του εσωτερικού τού σώματος του ασθενούς, καθώς και για την διεξαγωγή χειρουργικών επεμβάσεων, ευκολότερα, χωρίς νυστέρι· ειδικότερα, διαφέρει

στην δομή του, αναλόγως με τις εκάστοτε ανάγκες και το σημείο τού σώματος που χρήζει εξέτασης. Πιο συγκεκριμένα, η βασική δομή ενός ενδοσκοπίου περιλαμβάνει μια πηγή φωτός, μια συσκευή απεικόνισης, καθώς και σωλήνες, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχουν δέσμες χιλιάδων οπτικών ινών. Μέσω τής μίας δέσμης διοχετεύεται το φως στο εσωτερικό τού σώματος, και μέσω μιας άλλης δέσμης, μεταφέρεται η πληροφορία στην μονάδα απεικόνισης υπό μορφή εικόνας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η παρακολούθηση ή η επέμβαση σε εσωτερικά όργανα του σώματος, χωρίς την χρήση νυστεριού.



Εικόνα 4.26: Η Λειτουργία τού Ενδοσκοπίου

- **Αυτοκινητοβιομηχανία**

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αξιοποιούνται για ελέγχους και μετρήσεις διαφόρων τύπων οχημάτων στον τομέα τής Βιομηχανίας, με κυριότερα παραδείγματα τον έλεγχο των επιπέδων τής θερμοκρασίας του κινητήρα, την ανίχνευση τής πίεσης των ελαστικών, την μέτρηση τής επιτάχυνσης, καθώς και την αποφυγή σύγκρουσης με την χρήση αισθητήρων εγγύτητας.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης των αισθητήρων οπτικών ινών στην Αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί η μέτρηση και η παρακολούθηση τής θερμοκρασίας στα πιο κρίσιμα σημεία τού οχήματος, όπως τον κινητήρα, το σύστημα ψύξης, τα φρένα, καθώς και την καμπίνα. Τοποθετημένοι στα κατάλληλα σημεία, ανιχνεύουν λεπτομερώς οποιαδήποτε μεταβολή στα

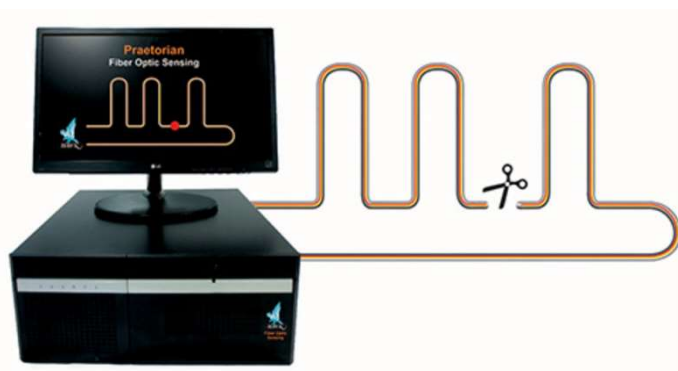
επίπεδα της θερμοκρασίας στο καθένα, και την αποστέλλουν στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας τού οχήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η συνεχής παρακολούθηση της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο, και κατ' επέκταση, η έγκαιρη ανίχνευση και ενημέρωση του οδηγού για οποιαδήποτε πιθανή υπερθέρμανση κάποιου τμήματος του οχήματος. Ως εκ τούτου, καθίσταται δυνατή η αποφυγή πιθανών βλαβών, καθώς και των επικίνδυνων επιπτώσεών τους, βελτιώνοντας παράλληλα την συνολική απόδοση και ασφάλεια του οχήματος.

▪ **Βιομηχανικοί Αυτοματισμοί**

Με την χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών έχει επιτευχθεί η αυτοματοποίηση πολλών βιομηχανικών διαδικασιών – οι οποίες χαρακτηρίζονται από την επαναληψιμότητα ή και την επικινδυνότητά τους – με ορισμένες εξ αυτών την μέτρηση της στάθμης υγρών, την ανίχνευση παρουσίας αερίων στον χώρο, τον έλεγχο ρομποτικών μηχανισμών, την ανίχνευση διαρροών, καθώς και την γενικότερη εξ αποστάσεως παρακολούθηση όλων των μηχανημάτων ενός εργοστασίου ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα βιομηχανικού αυτοματισμού με την αξιοποίηση των αισθητήρων οπτικών ινών αποτελεί η ανίχνευση διαρροών σε σύστημα αγωγών που μεταφέρουν κάποιο υγρό ή αέριο, όπως πετρέλαιο, νερό, φυσικό αέριο ή κάποιου είδους χημικό. Τέτοιου είδους αισθητήρες είναι υπεύθυνοι για την συνεχή παρακολούθηση των αγωγών, σε πραγματικό χρόνο, κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων, και την ανίχνευση οποιασδήποτε δόνησης ή μεταβολής τής θερμοκρασίας, ως ένδειξη πιθανής διαρροής σε κάποιο σημείο τού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας αυτός εκπέμπει παλμούς laser, οι οποίοι, κατά την ανίχνευση κάποιας μεταβολής, διαμορφώνονται καταλλήλως, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ακριβής θέση, η ένταση, και κατ' επέκταση ο βαθμός επικινδυνότητας τής διαρροής. Έπειτα, η πληροφορία μεταδίδεται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας, για την

έγκαιρη ενημέρωση των αρμοδίων για την ύπαρξη διαρροής, διασφαλίζοντας την άμεση αποκατάσταση της βλάβης.



Εικόνα 4.27: Σύστημα Ανίχνευσης Διαρροής



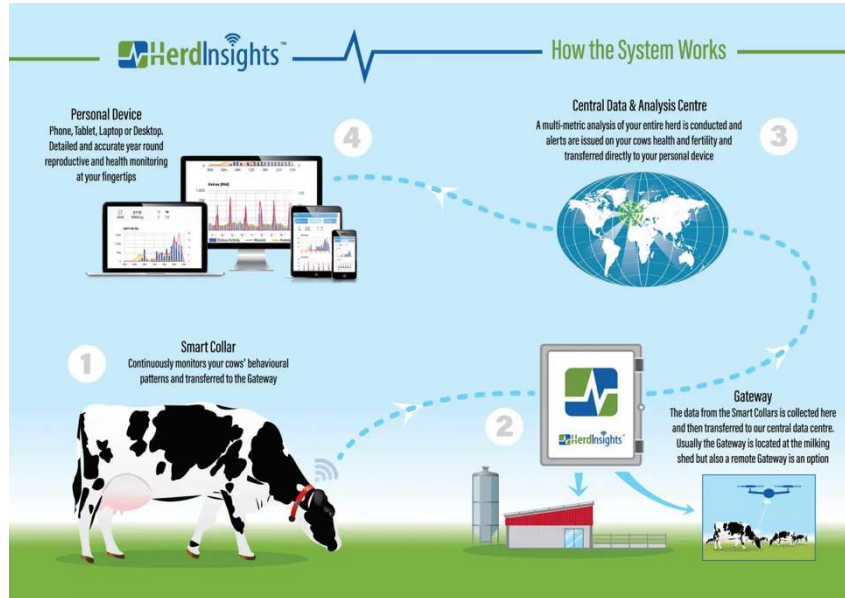
Εικόνα 4.28: Διαρροή σε Αγωγό Νερού

▪ Αγροτική Βιομηχανία

Στον τομέα της Αγροτικής Βιομηχανίας, οι αισθητήρες οπτικών ινών αξιοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, οι οποίες περιλαμβάνουν την ανάλυση της ποιότητας του εδάφους, την ανίχνευση υγρασίας, τον έλεγχο της ροής του αέρα στα θερμοκήπια, καθώς και της ευζωίας των ζώων στις φάρμες.

Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα, στο οποίο συνδυάζεται η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών με το Διαδίκτυο των Αντικειμένων, αποτελεί το περιλαίμιο συνεχούς παρακολούθησης των ζώων στις φάρμες, καθώς και οι χωρικοί αισθητήρες στο περιβάλλον τους. Το περιλαίμιο διαθέτει πληθώρα αισθητήρων, υπεύθυνους για την ανίχνευση των ζωτικών στοιχείων των ζώων, της θέσης τους, καθώς και της αλληλεπίδρασή του με τον περίγυρό του· αντιστοίχως, οι αισθητήρες στον χώρο ανιχνεύουν την θερμοκρασία, τα επίπεδα υγρασίας, καθώς και την ποιότητα του νερού και του αέρα. Έπειτα, οι πληροφορίες, που περισυλλέγονται εντός του δικτύου αυτού των αισθητήρων, μεταδίδονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας, όπου αποθηκεύονται και υφίστανται την κατάλληλη ανάλυση και επεξεργασία, παράγοντας χρήσιμα αποτελέσματα για τις συνθήκες διαβίωσης των ζώων. Τέλος, οι πληροφορίες αυτές διατίθενται προς απεικόνιση στις συσκευές του

χρήστη, προκειμένου να παρατηρεί ανά πάσα στιγμή και σε πραγματικό χρόνο την υγεία, την συμπεριφορά και την τοποθεσία των ζώων, καθώς και να ελέγχει το τάισμα και τις λοιπές συνθήκες τού περιβάλλοντός τους, διασφαλίζοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την ευζωία των ζώων.



Εικόνα 4.29: Σύστημα Παρακολούθησης της Ευζωίας των Ζώων στις Φάρμες

■ Βιομηχανία Τροφίμων

Οι αισθητήρες οπτικών ινών παίζουν εξίσου καίριο ρόλο στην Βιομηχανία Τροφίμων, με κυριότερα παραδείγματα την παρακολούθηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και της πίεσης σε τρόφιμα που προορίζονται για υποβολή σε μικροκύματα, την ανίχνευση και εύρεση ξένων σωμάτων σε τρόφιμα, την καταμέτρηση των τεμαχίων, καθώς και την παρακολούθηση συσκευασίας των τροφίμων.

Επί παραδείγματι, οι αισθητήρες οπτικών ινών αξιοποιούνται για τον έλεγχο της πίεσης στην συσκευασία τροφίμων που προορίζονται για υποβολή σε μικροκύματα. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτοί είναι υπεύθυνοι για την μέτρηση της εσωτερικής πίεσης που αναπτύσσεται κατά την θέρμανση των τροφίμων, μέσω μικροκυμάτων, σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και για την παρακολούθηση των επιπτώσεων στην υφή των τροφίμων, και των πιθανών

αλλοιώσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η χρήση σωστών συσκευασιών και η κατάλληλη σφράγιση τους, αναλόγως με τον τύπο, καθώς και τις αντοχές των τροφίμων.

- **Αεροπορία**

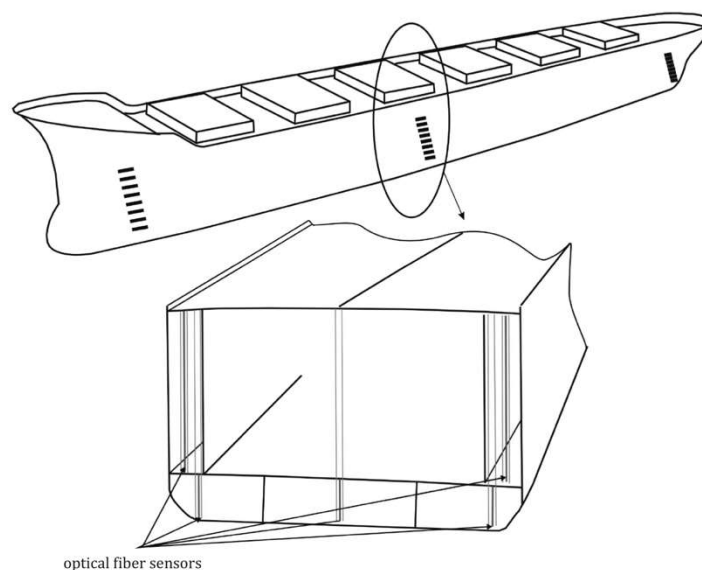
Στον τομέα τής Αεροπορίας, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ευρέως για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της πίεσης εντός των κινητήρων αεριώθησης (jet) αεροσκαφών, την συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης της δομής των αεροσκαφών, την έγκαιρη ανίχνευση φθορών και παραμορφώσεων, καθώς και την μέτρηση των επιπέδων των καυσίμων.

Ένα από τα παραδείγματα εφαρμογών των αισθητήρων οπτικών ινών στην Αεροπορία αποτελεί η ανίχνευση και ο έλεγχος του αεροσκάφους σε περίπτωση απότομης προσγείωσης. Κατά την έκτακτη απότομη προσγείωση, το αεροσκάφος, πλησιάζοντας τον διάδρομο προσγείωσης, αναπτύσσει ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 2 m/s, γεγονός το οποίο αποτελεί ισχυρό κίνδυνο για το πλήρωμα και τους επιβάτες, καθώς και την ακεραιότητα του αεροσκάφους, προκαλώντας σοβαρές βλάβες στον εξοπλισμό προσγείωσης, αλλά και στην συνολική δομή του. Οι αισθητήρες, στην προκειμένη περίπτωση, είναι υπεύθυνοι για την έγκαιρη ανίχνευση της καταπόνησης και πιθανών παραμορφώσεων στην δομή του αεροσκάφους που προκύπτουν από τις δυνάμεις που ασκούνται κατά την προσγείωση, σε πραγματικό χρόνο, και, κατ' επέκταση, να καθορίζουν τον βαθμό επικινδυνότητας τής προσγείωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πλήρωμα, καθώς και η κατασκευαστική εταιρία ενημερώνονται έγκαιρα και λεπτομερώς για οποιοδήποτε πιθανό πρόβλημα.

- **Ναυπηγική**

Στον τομέα τής Ναυπηγικής, οι αισθητήρες οπτικών ινών αξιοποιούνται κυρίως για την παρακολούθηση φόρτωσης και εκφόρτωσης πλοίων σε πραγματικό χρόνο, τον έλεγχο της πλοήγησης και της θέσης των πλοίων ανά πάσα στιγμή, καθώς και την άμεση ανίχνευση φθορών και ελαττωμάτων της δομής των πλοίων.

Επί παραδείγματι, στα δεξαμενόπλοια, μια από τις εφαρμογές των αισθητήρων οπτικών ινών αποτελεί η ανίχνευση της στάθμης των υγρών που μεταφέρουν, όπως νερού ή πετρελαίου, στις δεξαμενές τους. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιου είδους αισθητήρες – οι οποίοι αποτελούνται από οπτικές ίνες σε μορφή σπειρώματος, τοποθετημένες γύρω από έναν κυλινδρικό σωλήνα – τοποθετούνται καθέτως σε κάθε βυθομετρικό αγωγό τής κάθε δεξαμενής στο εσωτερικό τού πλοίου, απέναντι από τα σημάδια βυθίσματος που βρίσκονται στο κύριο σώμα τού πλοίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, περισυλλέγονται τα δεδομένα τής στάθμης των υγρών και αποστέλλονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο τού φορτίου σε πραγματικό χρόνο, είτε τοπικά από το πλήρωμα, ή μέσω δορυφόρου από τις εμπλεκόμενες εταιρίες.



Εικόνα 4.30: Σύστημα Μέτρησης της Στάθμης Υγρών στα Δεξαμενόπλοια

- **Τηλεπικοινωνίες**

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι των Τηλεπικοινωνιών, με κυριότερες εφαρμογές την συνεχή παρακολούθηση και επιθεώρηση των δικτύων σε πραγματικό χρόνο για την έγκαιρη ανίχνευση

πιθανών προβλημάτων, την μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς και τον ακριβή και λεπτομερή εντοπισμό πιθανών βλαβών σε δίκτυο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των αισθητήρων οπτικών ινών στις Τηλεπικοινωνίες αποτελεί η συνεχής παρακολούθηση και προστασία δικτύων, αξιοποιώντας την μέθοδο Distributed Acoustic Sensing (DAS). Μέσω αυτής της μεθόδου, επιτυγχάνεται η αδιάκοπη παρακολούθηση κατά μήκος ολόκληρων των καλωδίων ενός δικτύου, σε πραγματικό χρόνο, προστατεύοντάς τα, και ανιχνεύοντας λεπτομερώς και με ακρίβεια οποιαδήποτε πιθανή βλάβη υποστούν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διάφορες απειλές που μπορεί να βλάψουν το δίκτυο – είτε περιβαλλοντικές, όπως η υγρασία, η εξωτερική τριβή και τα ακραία καιρικά φαινόμενα, ή από ανθρώπινο παράγοντα – ανιχνεύονται άμεσα και με ακριβή τοποθεσία, για την έγκαιρη επέμβαση και ταχεία αποκατάσταση από τους αρμοδίους.

- **Στρατιωτική Βιομηχανία**

Στον τομέα της Στρατιωτικής Βιομηχανίας, αξιοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών οι αισθητήρες οπτικών ινών, με ορισμένες εξ αυτών την ανίχνευση των ζωτικών στοιχείων των στρατιωτών σε πραγματικό χρόνο, τον εξ αποστάσεως χειρισμό και έλεγχο των πτήσεων επανδρομένων-και-μη αεροσκαφών, καθώς και την ασφαλέστερη και ακριβέστερη εκτόξευση πυραύλων.

Ένα από τα πιο καινοτόμα και σημαντικά παραδείγματα εφαρμογής των αισθητήρων οπτικών ινών στην Στρατιωτική Βιομηχανία αποτελεί η ανίχνευση και παρακολούθηση της υγείας και της θέσης των στρατιωτών, σε πραγματικό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, οι στρατιώτες φορούν φορητές συσκευές (wearables), οι οποίες διαθέτουν αισθητήρες υπεύθυνους για την μέτρηση των ζωτικών τους στοιχείων, όπως την θερμοκρασία, τα επίπεδα του οξυγόνου στο αίμα, καθώς και τον καρδιακό ρυθμό. Επιπροσθέτως, στους αισθητήρες αυτούς συμπεριλαμβάνεται και η τεχνολογία GPS (Παγκόσμιο Σύστημα Θεσιθεσίας) για την συνεχή ιχνηλάτηση της ακριβούς τοποθεσίας των στρατιωτών ανά πάσα στιγμή. Επίσης, οι φορέσιμες αυτές συσκευές διαθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό, ο οποίος ενεργοποιείται αυτομάτως σε

περίπτωση ανίχνευσης κάποιας βλάβης, τραυματισμού ή κινδύνου στην υγεία τού στρατιώτη. Τέλος, όλες οι πληροφορίες και οι μετρήσεις, που περισυλλέγονται από τους αισθητήρες, αποστέλλονται ασύρματα σε κάποια απομακρυσμένη μονάδα επεξεργασίας για την ανάλυση, την αποθήκευση, την απεικόνιση, καθώς και την αξιολόγησή τους από τους αρμοδίους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η έγκαιρη ανίχνευση πιθανών κινδύνων, για την άμεση προστασία τού στρατιωτικού προσωπικού.



Εικόνα 4.31: Φορητές Συσκευές Αισθητήρων Οπτικών Ινών για Στρατιώτες

▪ Ενέργεια

Στον τομέα τής Ενέργειας, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται εξίσου σε ποικίλες εφαρμογές, όπως στην ανίχνευση πιθανών παραμορφώσεων και φθορών των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, τον έλεγχο απομακρυσμένων εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την μέτρηση της θερμοκρασίας σε δεξαμενές καυσίμων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των αισθητήρων οπτικών ινών στον τομέα τής Ενέργειας αποτελεί η περίπτωση του ελέγχου απομακρυσμένων

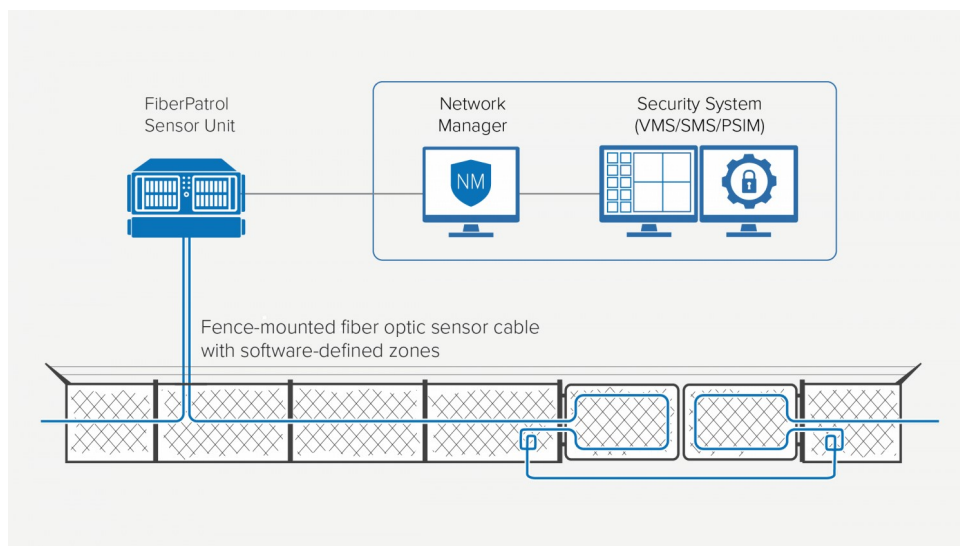
εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου σε πραγματικό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτοί είναι υπεύθυνοι για την ανίχνευση διαφόρων φυσικών μεγεθών που αναπτύσσονται σε τέτοιου είδους δομές, όπως την θερμοκρασία, την πίεση, την συγκέντρωση χημικών ενώσεων. Όλες οι πληροφορίες, που περισυλλέγονται από τις εγκαταστάσεις, αποστέλλονται σε κάποια απομακρυσμένη κεντρική μονάδα επεξεργασίας, όπου αναλύονται και καταγράφονται, καθιστώντας ικανούς τους αρμόδιους να πάρουν τις κατάλληλες αποφάσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η αδιάκοπη παρακολούθηση των εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου σε πραγματικό χρόνο, και με μεγάλη ακρίβεια· με αποτέλεσμα οποιεσδήποτε βλάβες, προβλήματα και κίνδυνοι προκύψουν να ανιχνεύονται εγκαίρως, καθώς και να διασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία και ακεραιότητα των δομών αυτών.

- **Ασφάλεια**

Οι αισθητήρες οπτικών ινών, πλέον, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο τομέα της Ασφάλειας, και αξιοποιούνται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές, με τις πιο διαδεδομένες να αποτελούν την νυχτερινή παρακολούθηση εξωτερικών χώρων, όπως δασών, με κάμερες νυχτερινής όρασης, τα συστήματα ασφαλείας με κάμερες σε κτήρια και λοιπές υποδομές, καθώς και τα συστήματα ασφαλείας σε φράκτες για την ανίχνευση εισβολέων σε περιφραγμένες περιοχές.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αξιοποιούνται ευρέως για τις ανάγκες ασφαλείας και παρακολούθησης περιφραγμένων περιοχών, σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιου είδους αισθητήρες είναι υπεύθυνοι για την ακριβή και έγκαιρη περιμετρική ανίχνευση εισβολέων, καθώς και πιθανών βλαβών των φρακτών, για την αποφυγή και την εξάλειψη απειλών, και κατ' επέκταση την προστασία της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, μια πηγή laser διοχετεύει παλμικά το φως εντός της οπτικής ίνας, και οποιαδήποτε παρεμβολή ή δύναμη ασκείται πάνω στον φράκτη ανιχνεύεται υπό την μορφή δονήσεων, και μεταβάλλει την ένταση του φωτός. Κατ' αυτόν τον τρόπο, παρατηρείται άμεσα και λεπτομερώς η εξωτερική παρέμβαση και αποστέλλεται η πληροφορία σε μια

απομακρυσμένη μονάδα επεξεργασίας, ενημερώνοντας τους αρμοδίους για την ύπαρξη εισβολής ή βλάβης.



Εικόνα 4.32: Σύστημα Παρακολούθησης Φράκτη

4.9 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Όπως ήδη γνωρίζουμε, οι αισθητήρες οπτικών ινών – το υβρίδιο των δύο σημαντικών τεχνολογιών του αισθητήρα και της οπτικής ίνας που έχει κατακλύσει την πλειοψηφία των τομέων της Βιομηχανίας, καθώς και της ζωής του ανθρώπου γενικότερα – αποτελούν ένα καινοτόμο και πανίσχυρο είδος αισθητήρων. Από την Ιατρική και τις Τηλεπικοινωνίες, στην Αυτοκινητοβιομηχανία και την Κατασκευή Αστικών Δομών, είναι αποδεδειγμένα η καταλληλότερη, πιο εύχρηστη, καθώς και πιο αξιόπιστη επιλογή για τις εφαρμογές, τις κατασκευές και οποιαδήποτε άλλη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε οποιονδήποτε τομέα.

Με βάση την γενικότερη φύση των αισθητήρων οπτικών ινών, τα δομικά τους στοιχεία, τις αρχές λειτουργίας τους, καθώς και την δυνατότητα εφαρμογή τους σε μια πληθώρα περιβαλλόντων υπό διαφορετικές συνθήκες, θα αναλύσουμε παρακάτω τα **πλεονεκτήματα** που προσφέρουν, συγκριτικά με τους απλούς συμβατικούς αισθητήρες, ως εξής:

- **Μεγάλο Εύρος Ζώνης**

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελεί το μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων· δηλαδή, παρέχουν την δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων ανά την μονάδα τού χρόνου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η μετάδοση σήματος που εμπεριέχει την περισσότερη δυνατή πληροφορία, σε πολύ υψηλές ταχύτητες, οι οποίες υπερβαίνουν τις αντίστοιχες που παρέχουν τα μεταλλικά καλώδια, τα οποία και διαθέτουν περιορισμένο εύρος ζώνης.

- **Ελαφριά Δομή και Ευελιξία στην Εγκατάσταση**

Υιοθετώντας τα πλεονεκτήματα της φύσης και της δομής της οπτικής ίνας, οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται από το μικροσκοπικό μέγεθός τους, την ελαφριά δομή τους, καθώς και την ευελιξία που συνεπάγεται αυτών. Επίσης, τα οπτικά καλώδια, όπως ήδη γνωρίζουμε, είναι αρκετά ευλύγιστα και ανθεκτικά, καθιστώντας την τοποθέτηση και την δρομολόγησή τους εύκολη. Η δυνατότητα της εύκολης εγκατάστασής τους σε περιβάλλοντα που περιλαμβάνουν πολύ στενούς – ακόμα και μη προσβάσιμους από τον άνθρωπο – χώρους, σε οποιοδήποτε σύστημα ή δομή, χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς, καθιστούν τους αισθητήρες οπτικών ινών αδιαμφισβήτητα πιο επιθυμητούς, συγκριτικά με τους απλούς αισθητήρες.

- **Απομακρυσμένη Ανίχνευση και Λειτουργία**

Η δυνατότητα εξ αποστάσεως ανίχνευσης που παρέχουν οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματά τους ενάντια στους απλούς αισθητήρες. Η απομακρυσμένη ανίχνευση επιτυγχάνεται εξαιτίας της οπτικής ίνας, καθώς η πηγή και τα τμήματα του συστήματος ανίχνευσης υπεύθυνα για την επεξεργασία τού σήματος μπορούν να βρίσκονται πολλά χιλιόμετρα μακριά από τον αισθητήρα και το μετρούμενο μέγεθος, χωρίς να αλλοιώνεται η πληροφορία που μεταφέρεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η επεξεργασία διεκπεραιώνεται σε ασφαλές και ελεγχόμενο περιβάλλον, χωρίς να υποβάλλονται τα υπόλοιπα εξαρτήματα

του συστήματος, ούτε και ο ανθρώπινος παράγοντας, σε επικίνδυνες συνθήκες ή «εχθρικά» περιβάλλοντα.

▪ **Αντοχή σε Αντίξοες Περιβαλλοντικές Συνθήκες**

Λαμβάνοντας υπόψιν την ισχυρή και ανθεκτική δομή των οπτικών καλωδίων, καταλαβαίνουμε ότι οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι, κατ' επέκταση, εξίσου ανθεκτικοί και επιδεικνύουν υψηλή αντοχή κατά την έκθεσή τους σε επικίνδυνα περιβάλλοντα εφαρμογής. Σε περιπτώσεις όπου οι απλοί συμβατικοί αισθητήρες θα παρουσίαζαν αλλοίωση του σήματος, θα παρήγαγαν εσφαλμένα και αναξιόπιστα αποτελέσματα, ή θα καταστρέφονταν ολοσχερώς, οι αισθητήρες οπτικών ινών δεν επηρεάζονται καθόλου. Τέτοιου είδους επικίνδυνοι περιβαλλοντικοί παράγοντες αποτελούν οι εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, η υγρασία, οι πτώσεις κεραυνών, οι συγκρούσεις, ή και η παρουσία εκρηκτικών αερίων.

▪ **Ανοσία σε Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές**

Αξιοποιώντας το γεγονός ότι η οπτική ίνα αποτελεί διηλεκτρικό μέσο μεταφοράς κυμάτων φωτός – και όχι αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος, όπως τα συμβατικά ηλεκτρικά καλώδια – οι αισθητήρες οπτικών ινών παρουσιάζουν απόλυτη ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές και τοποθεσίες όπου συναντάται ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος, καθώς και ανάπτυξη υψηλής τάσης, χωρίς να υφίσταται κίνδυνος βραχυκυκλωμάτων και παρεμβολών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην εξασθένηση ή την αλλοίωση του σήματος μετάδοσης.

▪ **Υψηλή Ευαισθησία και Ακρίβεια**

Λόγω της ελαφριάς και, ταυτόχρονα, ισχυρής δομής της οπτικής ίνας, συμπεριλαμβάνοντας και τον τρόπο λειτουργίας της, είναι κατανοητό ότι καθιστά ικανούς τους αισθητήρες οπτικών ινών να «αισθάνονται» και να ανιχνεύουν, με μεγαλύτερη ευαισθησία, ακόμα και τις πιο ανεπαίσθητες μεταβολές, οι οποίες ενδεχομένως να μην γίνονταν αντιληπτές από τους

απλούς αισθητήρες. Επιπροσθέτως, αξιοποιώντας το φως, αντί του ηλεκτρικού ρεύματος, οι αισθητήρες αυτοί είναι ικανοί να καταγράψουν και να παράγουν πιο ακριβή αποτελέσματα, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, και σαφώς σε υψηλότερες ταχύτητες. Ακόμα και σε εφαρμογές που απαιτούν παρακολούθηση πιθανών μεταβολών των επιθυμητών φυσικών μεγεθών, σε εξαιρετικά μικροσκοπική κλίμακα, οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι ικανοί να διεκπεραιώσουν ορθά την ανίχνευση.

- **Ταυτόχρονη Ανίχνευση Πολλαπλών Παραμέτρων**

Με την δυνατότητα σύνδεσης πολλών διαφορετικών αισθητήρων οπτικών ινών – ο καθένας υπεύθυνος για την ανίχνευση διαφορετικής μορφής φυσικού μεγέθους – κατά μήκος ενός και μόνο οπτικού καλωδίου, δημιουργείται ένα απλό δίκτυο αισθητήρων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη ανίχνευση και παρακολούθηση των διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή, με λιγότερα καλώδια και εξοπλισμό, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις περιττές δαπάνες. Επί παραδείγματι, σε κάποιο σύστημα ανίχνευσης πολλαπλών μεγεθών, όπως στην κατασκευή γεφυρών και άλλων αστικών δομών, θα μπορούσε να υπάρχει ένα δίκτυο αισθητήρων, στο οποίο αισθητήρες πίεσης, θερμοκρασίας και μετατόπισης θα τοποθετούνται κατά μήκος ενός οπτικού καλωδίου.

- **Συνεχής Ανίχνευση**

Με την δυνατότητα της κατανομής των αισθητηρίων στοιχείων κατά μήκος ενός και μόνο οπτικού καλωδίου, καταλαμβάνοντας ολόκληρο το μήκος του, επιτυγχάνεται η συνεχής ανίχνευση και παρακολούθηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, σε πραγματικό χρόνο, χωρίς καμία διακοπή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οποιαδήποτε μεταβολή και αν προκύψει, σε οποιοδήποτε σημείο τού περιβάλλοντος παρακολούθησης, ανιχνεύεται άμεσα, επιφέροντας την παραγωγή πιο αξιόπιστων και ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

- **Ασφάλεια και Αξιοπιστία**

Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι η οπτική ίνα αποτελεί το πιο ασφαλές και αξιόπιστο μέσο μετάδοσης δεδομένων, με την λιγότερη δυνατή απώλεια σήματος, είναι φανερό ότι και οι αισθητήρες οπτικών ινών λειτουργούν και ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των εκάστοτε εφαρμογών και πειραμάτων. Είτε πρόκειται για αισθητήρες σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών όπου απαιτείται η βέλτιστη ασφάλεια και διατήρηση των μεταδιδόμενων δεδομένων, ή για την έγκαιρη και ακριβή ανίχνευση διαφόρων φυσικών μεγεθών στην Βιομηχανία, διασφαλίζεται η παραγωγή ορθών μετρήσεων και αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ελαττώνοντας τα πιθανά σφάλματα και τις αστοχίες στο ελάχιστο.

Απεναντίας, αξίζει να σημειωθεί ότι, παρ'όλα τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν, οι αισθητήρες οπτικών ινών παρουσιάζουν και κάποια **μειονεκτήματα**, τα οποία περιορίζουν την χρήση τους και αποτρέπουν την επιλογή τους σε ορισμένους τομείς και εφαρμογές. Θα τα αναλύσουμε παρακάτω, ως εξής:

- **Υψηλό Κόστος**

Αρχικά, ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι το υψηλό συνολικό κόστος των αισθητήρων αυτών, το οποίο συνεπάγεται του αντίστοιχου υψηλού κόστους των εξαρτημάτων που τους απαρτίζουν, κυρίως σε περιπτώσεις κατασκευών και πειραμάτων μεγάλης κλίμακας.

- **Πολυπλοκότητα**

Οι ίδιοι οι αισθητήρες οπτικών ινών, καθώς και η εγκατάστασή τους, αποτελούν ακόμα μια σχετικά καινούργια και πολύπλοκη διαδικασία, η οποία απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και ακρίβεια, καθώς και εξειδικευμένη εκπαίδευση των χρηστών για την εξασφάλιση της ορθής και ασφαλούς χρήσης τους.

- **Προβλήματα Συμβατότητας**

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι πρόκειται για σύνθετη τεχνολογία, η οποία ακόμα αναπτύσσεται και αναβαθμίζεται, είναι λογικό το γεγονός ότι προκύπτουν κάποια προβλήματα συμβατότητας σε ορισμένους τομείς. Επί παραδείγματι, είναι πιθανό οι αισθητήρες οπτικών ινών να μην μπορούν ακόμα να εφαρμοστούν σε κάποια ιδιαίτερα συστήματα που λειτουργούν με ηλεκτρικά σήματα, και να απαιτείται η χρήση πολύ εξειδικευμένων εξαρτημάτων και συσκευών για την επίτευξη συμβατότητας.

4.10 Συμπέρασμα

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν, αδιαμφισβήτητα, καινοτόμο και ευέλικτη τεχνολογία, η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η «πανάκεια» σε πολλά εμπόδια και περιορισμούς που εμφανίζονται στην καθημερινότητα του ανθρώπου γενικότερα, αλλά και ειδικότερα στους διάφορους τομείς της Βιομηχανίας. Εκεί που οι απλοί συμβατικοί αισθητήρες καθίστανται ανεπαρκείς και αδυνατούν να λειτουργήσουν, αντικαταστάθηκαν από τους αισθητήρες οπτικών ινών με μεγάλη επιτυχία, αποφέροντας σαφώς καλύτερα αποτελέσματα. Τα μειονεκτήματά τους αποτελούν αμελητέα ποσότητα, συγκριτικά με την πληθώρα πλεονεκτημάτων που διαθέτουν, και, κατά πάσα πιθανότητα, θα εξαλειφθούν εντελώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Η οπτική ίνα αποτελεί δυναμική οντότητα, η οποία εξελίσσεται και βελτιώνεται συνεχώς ως προς την απόδοσή της και τις δυνατότητες εφαρμογής της, αναβαθμίζοντας, κατ' επέκταση, και τους αισθητήρες. Τέλος, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πως οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν τεχνολογία αιχμής, η οποία, παράλληλα με την άνοδο της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), καθώς και του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT), θα κυριαρχήσουν σε όλους τους τομείς της Βιομηχανίας, αλλά και την καθημερινής μας ζωής γενικότερα.

Κεφάλαιο 5: Μελλοντικές Προοπτικές

Οι αισθητήρες οπτικών ινών, όντες μια καινοτόμος και συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία, η οποία έχει αδιαμφισβήτητα αποδειχθεί πανίσχυρη και καταλληλότερη από άλλες αντίστοιχες του είδους της, προβλέπεται ότι θα επιφέρουν τεράστια άλματα στην Βιομηχανία, αλλά και την σύγχρονη καθημερινότητα στο κοντινό μέλλον. Ο συνδυασμός της βελτίωσης της δομής και των εξαρτημάτων που απαρτίζουν τους αισθητήρες οπτικών ινών – προσδίδοντάς τους περισσότερες δυνατότητες και υψηλότερες επιδόσεις – με την εξάπλωση του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT), την άνοδο της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), καθώς και την εμφάνιση νέων επικείμενων τεχνολογικών ανακαλύψεων, ανοίγει νέους ορίζοντες και πολλές ευκαιρίες σε κάθε πιθανό τομέα της Βιομηχανίας, πέρα από αυτούς που έχει ήδη κατακτήσει. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παγκόσμια αγορά των αισθητήρων οπτικών ινών προβλέπεται ότι θα έχει φτάσει περίπου τα πέντε δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025, για τις ανάγκες έρευνας και ανάπτυξης, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης περίπου 11%. Στην εποχή μας, οι επιστήμονες επικεντρώνονται στην εξέλιξη, την αναβάθμιση και την τελειοποίηση της δομής και των αρχών λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών, στοχεύοντας παράλληλα στην μείωση του κόστους παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, μία από τις αναβαθμίσεις στις οποίες στοχεύουν οι επιστήμονες είναι η σμίκρυνση της δομής τους, παρέχοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την δυνατότητα φορητότητας, επιτρέποντας την συνεχή παρακολούθηση και φροντίδα της υγείας και των ζωτικών σημείων τού ανθρώπου, σε πραγματικό χρόνο. Επιπροσθέτως, η ενσωμάτωση του δικτύου 5G με τους αισθητήρες οπτικών ινών, θα επιτρέψει την μετάδοση των δεδομένων σε υψηλότερες ταχύτητες, για την άμεση αξιοποίησή τους σε πραγματικό χρόνο, σε εφαρμογές, όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα έξυπνα δίκτυα. Επίσης, η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση των αισθητήρων αυτών, τους καθιστά πλέον κατάλληλους και περιζήτητους για εφαρμογές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και απαιτούν φορητότητα. Επιπλέον, ο συνδυασμός των αισθητήρων οπτικών ινών με την Τεχνητή Νοημοσύνη θα παρέχει την δυνατότητα πρόβλεψης και

πρώιμης ανίχνευσης πιθανών επικείμενων βλαβών και ανωμαλιών σε ένα σύστημα ή μια εφαρμογή, προκειμένου να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, για την αποφυγή τους. Επιπρόσθετα, οι αισθητήρες οπτικών ινών, σε συνδυασμό με το Διαδίκτυο των Αντικειμένων, θα επιτρέψουν την δημιουργία Έξυπνων Πόλεων, όπου το σύνολο των πληροφοριών των διαφορετικών τομέων και υποδομών μιας πόλης θα συγκεντρώνονται σε μία οντότητα, για την ευκολότερη διαχείριση και αντιμετώπιση προβλημάτων και προκλήσεων, όπως η επερχόμενη λειψυδρία, η αποδοτικότερη διαχείριση πόρων, καθώς και η ανάπτυξη υποδομών.

Βραχυπρόθεσμα, αναμένεται ότι η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών, ξεκινώντας από την δομή τους, θα μεταβληθεί σημαντικά, και θα αναβαθμιστεί σε μια πανίσχυρη, άνευ προηγούμενου οντότητα, η οποία θα επιφέρει βελτιώσεις και καινοτομίες στην Βιομηχανία, αλλά και στο σύνολο της μελλοντικής καθημερινότητας. Μια από τις κυριότερες αλλαγές, στις οποίες τοποθετούν μεγάλη βαρύτητα οι επιστήμονες, είναι η στροφή στην μικρογραφία και την απλούστευση. Με την ανάπτυξη των νανοαισθητήρων, θα επιτραπεί η χρήση τους σε νέες εφαρμογές, όπου απαιτείται λεπτομέρεια και υψηλή ευαισθησία σε μικρό μέγεθος, αφού θα διαθέτουν σαφώς πιο ελαφριά και ευέλικτη δομή. Επιπροσθέτως, μια εξίσου σημαντική βελτίωση, στην οποία στοχεύουν οι επιστήμονες, είναι η επιπλέον θωράκιση και αύξηση της ανθεκτικότητας των ήδη στιβαρών αισθητήρων οπτικών ινών, εξασφαλίζοντας την απρόσκοπτη και ορθή λειτουργία τους υπό αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον, άλλη επερχόμενη εξέλιξη αποτελεί η βελτίωση και η εξάπλωση των ασύρματων συστημάτων αισθητήρων οπτικών ινών σε όλο και περισσότερους τομείς τής Βιομηχανίας, για την επίτευξη πιο αξιόπιστης και ακριβούς απομακρυσμένης παρακολούθησης και χειρισμού σε πληθώρα εφαρμογών. Επίσης, με την ανάπτυξη δικτύων, εντός των οποίων θα επικοινωνούν οι αισθητήρες μεταξύ τους, αλλά και με τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας, θα επιτραπεί ο συνδυασμός, η ανάλυση και η ένωση ποικίλων πληροφοριών για την μαζική παρακολούθηση μεγάλης κλίμακας. Επί παραδείγματι, με την αξιοποίηση του Διαδικτύου των Αντικειμένων, υπάρχει η δυνατότητα της ανάπτυξης των Έξυπνων Πόλεων, με την δημιουργία τέτοιου είδους δικτύων, επιτρέποντας την διαχείριση πολλαπλών ζητημάτων, όπως την μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, την συλλογική

παρακολούθηση διαφόρων υποδομών μιας πόλης, καθώς και την υπεύθυνη διαχείριση των πόρων, είτε οικονομικών ή ενεργειακών.

Εν κατακλείδι, είναι προφανές ότι το μέλλον, με την συνεχή εξέλιξη και τον εκσυγχρονισμό των αισθητήρων οπτικών ινών, επιφυλάσσει μεγάλη πρόοδο και ανάπτυξη σε όλους τους τομείς, φέρνοντας την επανάσταση στην Βιομηχανία, αλλά και γενικότερα στην ζωή μας. Δημιουργώντας έναν πιο «έξυπνο», πιο «συνδεδεμένο» και αυτοματοποιημένο κόσμο, θα επιφέρει μια πιο ποιοτική και βιώσιμη για τον άνθρωπο ζωή, με νέες προοπτικές και ευκαιρίες.

Κεφάλαιο 6: Επίλογος

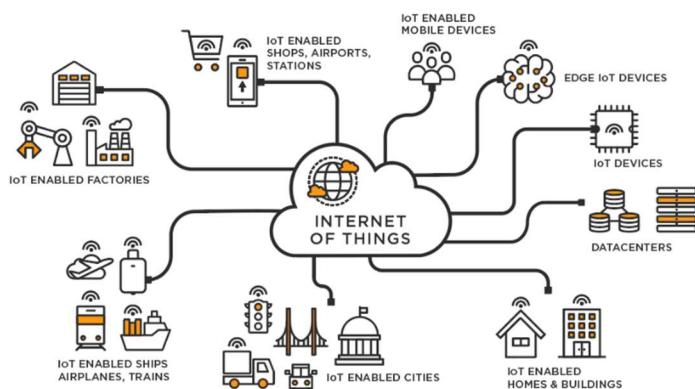
Σύμφωνα με όσα αναλύσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι προφανές ότι οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν μια καινοτόμο και διαρκώς εξελισσόμενη τεχνολογία, η οποία έχει διευκολύνει σημαντικά τον άνθρωπο, γενικότερα στην σύγχρονη καθημερινότητα, αλλά και ειδικότερα, στην Βιομηχανία. Έχουν χαρακτηριστεί επάξια ως το πιο χρήσιμο εργαλείο στην πλειοψηφία των τομέων της Βιομηχανίας, αφού έχουν αντικαταστήσει εντελώς τους απλούς συμβατικούς αισθητήρες στα περισσότερα πεδία εφαρμογών, και προβλέπεται ότι βραχυπρόθεσμα θα απορροφήσουν και τους υπόλοιπους εναπομείναντες τομείς.

Ως τεχνολογία που γεννήθηκε, λόγω της ανεπάρκειας των απλών αισθητήρων, για την κάλυψη αναγκών που μόνο ένα νέο και πιο εξελιγμένο είδος αισθητήρων θα μπορούσε να ικανοποιήσει, έφεραν την επανάσταση στην Βιομηχανία. Με την αξιοποίηση της οπτικής ίνας, άνοιξαν νέοι ορίζοντες και ευκαιρίες σε όλους τους τομείς, όπως στην Ιατρική, την Αγροτική Βιομηχανία, τον τομέα της Ενέργειας, καθώς και τις οικοδομικές κατασκευές, διεκπεραιώνοντας τις αρμοδιότητές τους πολύ πιο αποδοτικά, σε σύγκριση με τους απλούς αισθητήρες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως συμβαίνει με κάθε νέα εφεύρεση και με την άνοδο κάθε καινούργιας τεχνολογίας, έτσι και οι αισθητήρες οπτικών ινών κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν πολυάριθμες προκλήσεις, καθώς και να υπερβούν πολλά προβλήματα, με κυριότερα τα θέματα συμβατότητας. Ήταν αναγκαίο να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές στα ήδη υπάρχοντα συστήματα που λειτουργούσαν, μέχρι πρότινος, με ηλεκτρικούς αισθητήρες, προκειμένου να «δεχθούν» τους εξελιγμένους αυτούς αισθητήρες και να μπορέσουν να λειτουργήσουν εκ νέου. Ωστόσο, με την πάροδο των ετών, και κατ' επέκταση, τα τεράστια άλματα της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια – λαμβάνοντας υπόψιν, παράλληλα, την πληθώρα πλεονεκτημάτων που διαθέτουν, τα οποία και έχουμε αναλύσει διεξοδικά στα προηγούμενα κεφαλαία – τα περισσότερα προβλήματα που προέκυψαν με την εμφάνιση των αισθητήρων οπτικών ινών έχουν ήδη επιλυθεί, και είναι απλά «θέμα χρόνου», αυτοί να κατακλύσουν κάθε πτυχή της ζωής του ανθρώπου, ανεξαιρέτως.

Επιπλέον, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πως με μία τόσο ισχυρή και ευέλικτη τεχνολογία στην διάθεσή μας, το μέλλον προβλέπεται ευσώνο. Με την ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT), καθώς και της έξαρσης της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) τα τελευταία χρόνια, ο στόχος των αισθητήρων οπτικών ινών είναι να ενσωματωθούν ολοκληρωτικά σε κάθε πτυχή της ζωής μας – από την Βιομηχανία, τις επιχειρήσεις και οποιεσδήποτε υπηρεσίες και υποδομές υπάρχουν σε μια κοινωνία, στα σπίτια, το λιανικό εμπόριο και τον τομέα της Υγείας – και να δημιουργηθεί ένα ενιαίο δίκτυο. Αυτό είναι το σχέδιο των Έξυπνων Πόλεων, που έχουν ως στόχο την απλοποίηση και την διευκόλυνση της ζωής μας, αξιοποιώντας την μετάδοση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, την απομακρυσμένη ανίχνευση, καθώς και την σύνδεση όλων των πληροφοριών συλλογικά σε μια οντότητα.

Στην εργασία αυτή, αρχικά, αναλύθηκαν διεξοδικά οι έννοιες του αισθητήρα και της οπτικής ίνας, καθώς και οι πολυάριθμες υπηρεσίες και οι λειτουργίες που μας προσφέρουν. Έπειτα, μελετήσαμε την σύζευξη των δύο τεχνολογιών, καταλήγοντας στο κύριο θέμα της εργασίας, τους αισθητήρες οπτικών ινών. Τέλος, αναλύθηκαν οι έννοιες και οι αρχές λειτουργίας τους, καθώς και οι ποικίλες δυνατότητες και εφαρμογές τους, εστιάζοντας στην αξιοποίησή τους σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.



Εικόνα 6.1: Εφαρμογές τού Διαδικτύου των Αντικειμένων



Εικόνα 6.2: Η Έξυπνη Πόλη

Βιβλιογραφία

1. Sensor, *Wikipedia*
<https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor>
2. Echolocation is nature's built-in sonar. Here's how it works., National Geographic
<https://www.nationalgeographic.com/animals/article/echolocation-is-nature-built-in-sonar-here-is-how-it-works>
3. Animal echolocation, *Wikipedia*
https://en.wikipedia.org/wiki/Animal_echolocation
4. Infrastructures of sensors in daily business usage, *Erasmus*
<https://savestartups.erasmus.site/el/courses/module-5-infrastructures-of-sensors-in-daily-business-usage/lessons/chapter-1-how-sensors-work-use-of-sensors-in-the-server-room/>
5. Sensor, Robert Sheldon, *TechTarget*
<https://www.techtarget.com/whatis/definition/sensor>
6. Types of Sensors, Variohm Eurosensor
<https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/types-of-sensors>
7. What Is A Sensor? 25 Different Types Of Sensors And Their Uses, *ElectronicsHub*
<https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/>
8. Types of Sensors – A Complete Guide, *Thomas*
<https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/types-of-sensors/>
9. What is a Sensor? Different Types of Sensors with Applications, *Electrical Technology*
<https://www.electricaltechnology.org/2018/11/types-sensors-applications.html>
10. Different Types of Sensors and Sensing Technologies, *Components101*
<https://components101.com/article/different-types-of-sensors-and-sensing-technologies>
11. What is a Sensor? Different Types of Sensors with Applications, *Tesca*
<https://www.tescaglobal.com/blog/what-is-a-sensor-and-types-of-sensors/>
12. The Different Types of Sensors and Its Applications, *Podium School*
<https://learn.podium.school/science/types-of-sensors/>

13. Types of Sensors with Their Circuit Diagrams, *Elprocus*
<https://www.elprocus.com/types-of-sensors-with-circuits/>
14. Different Types of Sensor Used in Industrial World, *The Automization*
<https://theautomization.com/different-types-of-sensor-used-in-industrial-world/>
15. Sensors, *IEDA*
<https://ieda.ust.hk/dfaculty/ajay/courses/alp/ieem110/lecs/sensors/sensors.html>
16. Sensor Characteristics (Part One), Advanced Measurement Systems & Sensors, Prof. Kasim M. Al-Aubidy, Philadelphia University-Jordan
<https://www.philadelphia.edu.jo/academics/kaubaidy/uploads/Sensor-Lect2.pdf>
17. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ, 3η Έκδοση, Καλοβρέκτης Κ. Κατέβας Ν., Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
https://qr.tziola.gr/wp-content/uploads/2019/03/qr_1.1.pdf
18. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ – INTERFACES, Χ. ΤΣΩΝΟΣ, ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ
<http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/%20%20INTERFACES%20%CE%95%CE%9A%CE%A0%CE%91%CE%99%CE%94%CE%95%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%9F.pdf>
19. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ, Λάμπρος Μπισδούνης, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
<http://econ.uop.gr/~bisdounis/files/D08.pdf>
20. What's The Difference Between Sensors and Actuators?, *UpKeep*
<https://upkeep.com/learning/sensors-and-actuators-2/>
21. Εξαρτήματα για Αυτόματο Έλεγχο Διεργασιών, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, *Docplayer*
<https://docplayer.gr/208193089-1-aisthitires-2-energopoiites-3-metatropois-analogikon-simaton-se-psifiaka-adc-4-metatropois-psifiakon-simaton-se-analogika-dac.html>
22. Τι είναι οι αισθητήρες; Που βρίσκονται, πως λειτουργούν και τι σκοπούς εξυπηρετούν;, *AutoMintzas*
https://www.automintzas.gr/?section=637&language=el_GR&itemid730=6563&detail730=1

23. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ, Π. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΟΣ (ΦΥΣΙΚΟΣ), 2ο Λύκειο Αλίμου
<https://blogs.sch.gr/2lykalim/files/2016/03/%CE%91%CE%99%CE%A3%CE%98%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3.pdf>
24. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ, 3η Έκδοση, Καλοβρέκτης Κ. Κατέβας Ν., Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, *Maredu HCG*
<https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/ASP324/%CE%A6%CE%95%CE%92%CE%A1%CE%9F%CE%A5%CE%91%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A3%202020%20%20%CE%A3%CE%91%CE%95%201%2C%20%CE%91%CE%99%CE%A3%CE%98%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3%20%20%CE%9A%CE%91%CE%99%20%20%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%20 /%CE%91%CE%99%CE%A3%CE%98%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3%20%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%97%CE%A3%CE%97%CE%A3%20%CE%9A%CE%91%CE%99%20%CE%95%CE%9B%CE%95%CE%93%CE%A7%CE%9F%CE%A5.pdf>
25. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ, Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Πανεπιστήμιο Πατρών, *studocu*
<https://www.studocu.com/gr/document/panepisthmio-patrwn/mhxanologikes-metrhseis/aisothres-aisothres/40951198>
26. WHAT IS THE DIFFERENCE BETWEEN A TRANSDUCER AND A SENSOR, *Celmi*
<https://www.celmi.com/en/what-is-the-difference-between-a-transducer-and-a-sensor/>
27. Accuracy, Precision, & Resolution - What Do They Mean for IAQ Sensors?, *kaiterra*
<https://learn.kaiterra.com/en/resources/accuracy-precision-resolution-what-do-they-mean-for-iaq-sensors>
28. Σόμπα Χαλαζία με θερμοστάτη (εικόνα), *Starkstores*
<https://www.starkstores.gr/sompa-xalazia-me-thermostath-2000w-zilan-zln6821>
29. Θερμοστάτης Χώρου Διμεταλλικός (εικόνα), *ΣΤΑΜΝΑΣ*
<https://stamnas.gr/product/thermostatis-choroy-dimetallikos-bs-900/>
30. Sensors for daily life: A review, *ScienceDirect*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666351121000425>
31. Applications of Sensors, *Variohm Eurosensor*
<https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/applications-of-sensors->
32. Top Agriculture Sensors Used in Farming Industry, *Kheti Buddy*
<https://khetibuddy.com/top-agriculture-sensors-used-in-farming-industry/>

33. The Application of Sensors in the Food Industry, *Linkedin*
<https://www.linkedin.com/pulse/application-sensors-food-industry-mohammed-hashim-p>
34. Applications of Sensors, A. Sathyanarayanan, *EDUCBA*
<https://www.educba.com/applications-of-sensors/>
35. Sensors Used in Military Applications and the Electrical Connectors That Keep Them Powered, *Bead Electronics*
<https://www.beadelectronics.com/blog/sensors-used-in-military-applications-and-the-electrical-connectors-that-keep-them-powered>
36. Sensor Technology: How They Work and Their Revolutionary Applications, *Hasonss*
<https://hasonss.com/blogs/sensor-technology/>
37. Οπτική ίνα, *Βικιπαίδεια*
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%80%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%AF%CE%BD%CE%B1
38. Optical fiber, *Wikipedia*
https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber
39. Τι είναι οι οπτικές ίνες και πως λειτουργούν;, *Coolweb*
<https://coolweb.gr/ti-einai-optikes-ines-pos-leitourgoun/>
40. Semiconductor Fibers: What Will Replace Fiber Optic Cable Transmission Lines?, *Altium*
<https://resources.altium.com/p/semiconductor-fibers-could-replace-fiber-optic-cable-transmission-lines>
41. Fiber Optics: What is it? and How Does it Work?, *Dgtl Infra*
<https://dgtlinfra.com/fiber-optics/>
42. ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ, *Leandros Physics UOI*
<http://leandros.physics.uoi.gr/labs/theory/optic/refraction2.html>
43. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ, *Weebly*
<https://optikesines.weebly.com/epsilon%20rhogamma%20alpha%20alpha%20alpha%20epsilon.html>
44. Total internal reflection, *Wikipedia*
https://en.wikipedia.org/wiki/Total_internal_reflection
45. What Is Optical Fiber?, Tiffany San Souci, *M2Optics*
<https://www.m2optics.com/blog/what-is-optical-fiber>
46. Οπτικές Ίνες, *CONTA UOM*
<http://www.conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/seminaria/thlematikes/Optical/optical%20fiber.htm>

47. Πως λειτουργούν οι οπτικές ίνες, *Γενικό Λύκειο Νέων Μουδιανών*
<https://lyk-n-moudan-new.chal.sch.gr/index.php?pg=89110889>
48. Οπτική Ίνα – ό,τι πρέπει να ξέρει ένας επαγγελματίας (μέρος 1), *Electrical News*
<https://www.electricalnews.gr/optikes-ines/optiki-ina-oti-prepei-na-xerei-enas-epaggelmatias-meros-1/>
49. Οπτική Ίνα / Μια αναπάντεχη ιστορία!, *Μουσείο Τηλεπικοινωνιών Ομίλου ΟΤΕ*
<https://www.otegroupmuseum.gr/anakalipse/mt-stories/optiki-ina-mia-anapantexi-istoria/>
50. Οπτικές Ίνες, *aic*
<https://www.aic.gr/optikes-ines/>
51. fiber optics (optical fiber), Jennifer English, TechTarget
<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/fiber-optics-optical-fiber>
52. What is the central strength member in the ofc?, *Genuine Modules*
https://www.genuinemodules.com/what-is-the-central-strength-member-in-the-ofc_a6864
53. Basic Components of a Fiber Optic Cable, Ben Hamlitsch, *truecable*
https://www.truecable.com/blogs/cable-academy/basic-components-of-a-fiber-optic-cable#page_comments=1
54. Πώς γίνεται η μετάδοση των δεδομένων μέσω οπτικών ινών, Εγγλέζος Π. Καζιάνης Γ. Κατσάνος Β. Λαγκαδινός Σ., *Docplayer*
<https://docplayer.gr/6521558-Pos-ginetai-i-uetadosi-ton-dedouenon-ueso-optikon-inon.html>
55. Introduction to Fiber Optic Transmitter, *Fiber Transceiver Solution*
<https://www.fiber-optic-transceiver-module.com/fibre-optic-transmitter-introduction.html>
56. Fibre Optic Transmitters, *RS Delivers*
<https://gr.rsdelivers.com/browse/electronic-components-power-connectors/%CE%B1%CF%80%CE%B5%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CE%BF%CF%80%CF%84%CE%BF%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%B1/fibre-optic-components/fibre-optic-transmitters>
57. Fiber Optic Transmitters and Receivers (Transceivers), *The FOA*
<https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/transceiver.html>

58. Optical Transmitter - EXFO animated glossary of Fiber Optics, EXFO Tube, *Youtube*
<https://www.youtube.com/watch?v=NfRO3YSViFw>
59. Fiber Optic Receivers Information, *GlobalSpec*
https://www.globalspec.com/learnmore/optics_optical_components/fiber_optics/fiber_optic_receivers
60. Singlemode or multimode glass fiber?, *Rosenberger*
<https://osi.rosenberger.com/news-media/singlemode-multimode-glass-fiber/>
61. A Complete Guide to Fibre Optic Cables, *RS Delivers*
<https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/fibre-optic-cables-guide>
62. How Does Fiber-Optic Cable Bandwidth Work?, *The Network Installers*
<https://thenetworkinstallers.com/blog/fiber-optic-cable-bandwidth/>
63. POF Measurement: Bandwidth, *FiberFin*
<https://fiberfin.com/pof-measurement-bandwidth/>
64. Dielectric, *Wikipedia*
<https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric>
65. Types of Optical Fiber Dispersion and Compensation Strategies, *FS*
<https://community.fs.com/article/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies.html>
66. WHAT IS OPTICAL FIBER DISPERSION?, *FOSCO*.
<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052678-what-is-optical-fiber-dispersion>
67. Refraction, *Britannica*
<https://www.britannica.com/science/refraction>
68. History of Fiber Optics, *Timbercon*
<https://www.timbercon.com/resources/blog/history-of-fiber-optics/>
69. Αισθητήρας οπτικών ινών, *FOCC*
<http://gr.opticalpatchcable.com/news/fiber-optic-sensor-41286035.html>
70. Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, *elergon*
<https://www.elergon.gr/el/nea/arthra/xrisi-aisthitiron-optikon-inon-se-biomixanika-peribalonta>
71. Fiber-optic sensor, *Wikipedia*
https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_sensor
72. What is a Fiber Optic Sensor?, *Keyence*
<https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/fiber/info/>

73. Introduction to Fiber Optic Sensors and their Types with Applications, *Elprocus*
<https://www.elprocus.com/different-types-of-fiber-optic-sensors/>
74. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ, Φυσική (Β Λυκείου Γενικής Παιδείας) - Βιβλίο Μαθητή (Εμπλουτισμένο)
http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2682/Fysiki_B-Lykeiou-GP_html-empl/index3_3.html
75. Διαμόρφωση σήματος, *Βικιπαίδεια*
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BC%CF%8C%CF%81%CF%86%CF%89%CF%83%CE%B7_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82
76. The Importance of Optical Detectors, George Zhu, *M2Optic*
<https://www.m2optics.com/blog/optical-detectors>
77. photoelectric device, *Britannica*
<https://kids.britannica.com/students/article/photoelectric-device/276409>
78. ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ, Εμμανουήλ Αντ. Δρης, Ε.Μ.Πολυτεχνείο
<http://www.physics.ntua.gr/~dris/PHOTOELECTRICEFFECT.pdf>
79. What Is The Photoelectric Effect?, *ScienceABC*
<https://www.scienceabc.com/pure-sciences/what-explain-photoelectric-effect-einstein-definition-exmample-applications-threshold-frequency.html>
80. Extrinsic and intrinsic types of fiber optic sensors (εικόνα), *ResearchGate*
https://www.researchgate.net/figure/Extrinsic-and-intrinsic-types-of-fiber-optic-sensors_fig4_267419252
81. Extrinsic Optical Sensor Vs Intrinsic Optical Sensor-Difference Between Extrinsic Optical Sensor And Intrinsic Optical Sensor, *RF Wireless World*
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Extrinsic-Optical-Sensor-vs-Intrinsic-Optical-Sensor.html>
82. FIBER OPTIC SENSORS AND THEIR APPLICATIONS, Fidanboyly, K. Efendioğlu, H. S., Fatih University, Istanbul
https://www.researchgate.net/profile/Kemal-Fidanboyly/publication/264596659_Fiber_Optic_Sensors_and_Their_Applications/links/59b43f250f7e9b3743523a40/Fiber-Optic-Sensors-and-Their-Applications.pdf
83. Intensity and amplitude, *schoolphysics*
https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Wave%20properties/Wave%20properties/text/Intensity_and_amplitude/index.html

84. Intensity and Amplitude Relationship, *Vaia*
<https://www.vaia.com/en-us/explanations/physics/wave-optics/intensity-and-amplitude-relationship/>
85. Fiber Optic Sensors, *Keyence*
<https://www.keyence.com/products/sensor/fiber-optic/>
86. WHAT IS RETROREFLECTION?, *RoadVista*
<https://www.roadvista.com/blogs/blog/retroreflection>
87. Refraction of Light, *e-Tuitions*
<https://e-tuitions.com/micro-topic/refraction-of-light>
88. Refraction, *Wikipedia*
<https://en.wikipedia.org/wiki/Refraction>
89. Πόλωση, *Βικιπαίδεια*
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%8C%CE%BB%CF%89%CF%83%CE%B7>
90. Polarized Light (εικόνα), *ScienceDirect*
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/polarized-light>
91. Retroreflector, *Wikipedia*
<https://en.wikipedia.org/wiki/Retroreflector>
92. Modal dispersion, *Wikipedia*
https://en.wikipedia.org/wiki/Modal_dispersion
93. FIBER OPTIC SENSORS FOR THE MILITARY, Nanette M. Shoenfett, U.S. ARMY ARMAMENT RESEARCH, DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTER, Picatinny Arsenal, New Jersey
<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA232100.pdf>
94. Military Fiber Optic Cable for Weapon Systems, *ofs*
<https://www.ofsoptics.com/weapon-systems/>
95. Advantages of fiber optic sensors (εικόνα), *ResearchGate*
https://www.researchgate.net/figure/Advantages-of-fiber-optic-sensors_tbl1_340503736
96. What are the pros and cons of using fiber optic sensors?, *LinkedIn*
<https://www.linkedin.com/advice/0/what-pros-cons-using-fiber-optic-sensors-skills-fiber-optics>
97. Benefits of Fiber Optic Sensing Versus Electrical Gages, *Luna*
<https://lunainc.com/blog/benefits-fiber-optic-sensing-versus-electrical-gages>
98. Advantages Of Fiber Optic Sensor | Disadvantages Of Fiber Optic Sensor, *RF Wireless World*

<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Fiber-Optic-Sensor.html>

99. The History Of Fiber Optics Timeline, *FiberOpticx*
<https://fiberoptix.com/the-history-of-fiber-optics-timeline/>
100. Applications and Advances of Fiber Optic Sensors, *FiberOpticShare*
<https://www.fiberopticsshare.com/applications-and-advances-of-fiber-optic-sensors.html>
101. What is Distributed Fiber Optic Sensing?, *fibrisTerre*
<https://www.fibristerre.de/technology/>
102. Phase, Robert Sheldon, *TechTarget*
<https://www.techtarget.com/whatis/definition/phase>
103. Phase difference, *Oregon State*
http://sites.science.oregonstate.edu/~hadlekat/COURSES/ph212/superposition/phase_difference.html
104. Visible part of the Electromagnetic Spectrum (εικόνα)
<https://i.ytimg.com/vi/KIMZDsoq6G8/maxresdefault.jpg>
105. Schematic figure of Michelson interferometer (εικόνα), *ResearchGate*
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-figure-of-Michelson-interferometer_fig1_306050242
106. ΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΧΗΜΕΙΑ (Ενότητα #1: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ), ΠΕΡΙΚΛΗΣ ΑΚΡΙΒΟΣ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημείας
<https://opencourses.auth.gr/modules/document/index.php?course=OCRS500&download=/568b8ee6HiHN/5692e5d7f71d.pdf>
107. A schematic diagram for high-temperature blackbody optical fiber sensor system and various blackbody cavities (εικόνα), *ResearchGate*
https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-for-high-temperature-blackbody-optical-fiber-sensor-system-and_fig1_362515799
108. Black-body radiation, *Wikipedia*
https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation
109. Η ακτινοβολία του μέλανος σώματος, Κβαντομηχανική, *Πανελλήνιο Σχολικό Δίκτυο*
<https://blogs.sch.gr/yliko/files/2022/09/Η-ακτινοβολία-του-μέλανος-σώματος.pdf>
110. Polarization in Fiber Optics, *mks Newport*
<https://www.newport.com/t/polarization-in-fiber-optics>

111. Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors, *MDPI*
<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1094>
112. Fiber Optic Sensors: A Leading Trend in Sensor Technology, Akshaya Dhingra, Vikas Sindhu, Anil Sangwan, Department of Electronics & Communication Engineering, University Institute of Engineering & Technology, Maharshi Dayanand University, *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*
<https://archives.palarch.nl/index.php/jae/article/download/5711/5608/11146>
113. Fiber Optic Chemical Sensors, *CLU-IN*
<https://clu-in.org/characterization/technologies/focs.cfm>
114. Αισθητήρες οπτικών ινών, *Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο*
<https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TH188/Μάθημα%20της%2017%20Μαΐου%202021/chapter%2012%20talk.pdf>
115. Diffused, through-beam and retroreflective sensors - what's the difference?, *element14*
<https://community.element14.com/products/manufacturers/bulgin/b/blog/posts/diffused-through-beam-and-retroreflective-sensors---what-s-the-difference>
116. Why Fiber Optic? (εικόνα), *micronor sensors*
<https://micronor.com/why-fiber-optic/>
117. Tech 101: Internet of Things (εικόνα), *MICHIGAN ROSS BUSINESS+TECH*
<https://businesstech.bus.umich.edu/uncategorized/tech-101-internet-of-things/>
118. Smart Cities in Russia: Technologies, Trends, and Future Prospects (εικόνα), Divya Kumar, *LinkedIn*
<https://www.linkedin.com/pulse/smart-cities-russia-technologies-trends-future-prospects-divya-kumar-oxy5f>
119. Internet of Things in Agriculture, Itika Sarkar, *iot4beginners*
<https://iot4beginners.com/internet-of-things-in-agriculture/>
120. IoT-Enabled Livestock Management: Revolutionizing Animal Tracking and Monitoring, *intuz*
<https://www.intuz.com/blog/iot-enabled-livestock-management>
121. Διερεύνηση της δομικής συμπεριφοράς του περιμετρικού Τείχους της Ακρόπολης Αθηνών έναντι σεισμικών δράσεων, μέσω συνδυασμένης ενόργανης παρακολούθησης με αισθητήρες οπτικών ινών και επιταχυνσιογράφους, *Κοινωνοφελές Ίδρυμα Ιωάννη Σ. Λάτση*

<https://www.latsis-foundation.org/ell/grants/dierevnisi-tis-domikis-syberiforas-tou-perimetrikou-teixous-tis-akropolis-athinon-enadi-seismikon-draseon-meso-syndyasmenis-enorganis-parakolouthisis-me-aisthithires-optikon-inon-kai-epitaxynsiografou?catID=1>

122. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ, 2ο ΕΠΑΛ Αχαρνών
http://users.sch.gr/marmarinos/files/imerida/06_2o%20epal%20axarnwn.pdf
123. What is Industrial Automation? A Comprehensive Overview, Phillip Dodd, *Fiberroad*
<https://fiberroad.com/resources/new-trends/what-is-industrial-automation-a-comprehensive-overview/>
124. Industrial use cases of optical fiber: Innovation across industries, Henson Toland, *HFCL*
<https://www.hfcl.com/blog/optical-fiber-use-cases-in-industry>
125. Τί είναι το ιατρικό ενδοσκόπιο, *Αoniopto*
<http://gr.aonilenses.com/info/what-is-a-medical-endoscope-77270203.html>
126. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΕΝΔΟΣΚΟΠΙΟ Εφαρμογές στην Ιατρική, *SlidePlayer*
<https://slideplayer.gr/slide/1997989/>
127. Upper GI Endoscopy (εικόνα), *Johns Hopkins Medicine*
<https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/upper-gi-endoscopy>
128. Pressure monitoring during high temperature short-time microwave process, *Opsens Solutions*
<https://opsens-solutions.com/industries/microwave-chemistry-food/pressure-monitoring-solutions-food-packaging/>
129. Real-time Soldier Health and Location Tracking System, *ResearchGate*
https://www.researchgate.net/publication/379049403_Real-time_Soldier_Health_and_Location_Tracking_System
130. A Real Time Autonomous Soldier Health Monitoring and Reporting System Using COTS Available Entities, *IEEE Xplore*
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7306769>
131. Global Military Wearable Sensors Market Will Grow Significant Between 2017-2025: Prominent Key Players Are Safran Group, Ledios, Boeing, TT Electronics, Innova Design Solutions, Lockheed Martin, Rheinmetall, Arralis, and Q-Track. (εικόνα), *OpenPR Worldwide Public Relations*
<https://www.openpr.com/news/1464599/global-military-wearable-sensors-market-will-grow-significant-between-2017-2025-prominent-key-players-are->

[safran-group-ledios-boeing-tt-electronics-innova-design-solutions-lockheed-martin-rheinmetall-arralis-and-g-track.html](#)

132. FiberPatrol FP1150 Fiber Optic Intrusion Detection System for Fence, Wall, and Buried Applications, *SENSTAR*
<https://senstar.com/products/fence-sensors/fiberpatrol-fp1150/#:~:text=When%20an%20intruder%20moves%20across,the%20detection%20criteria%20are%20met.>
133. Ship's cargo handling system with the optical fiber sensor technology application, Renato Ivče Irena Jurdana Serdjo Kos, Multidisciplinary SCIENTIFIC JOURNAL OF MARITIME RESEARCH
<https://hrcak.srce.hr/file/194559>
134. Fiber Optic Temperature Sensors in Electric Vehicle Temperature Testing, *RUGGED MONITORING*
<https://idm-instrumentos.es/wp-content/uploads/2021/06/RuggedM-Vehiculo-Elctrico.pdf>
135. Optical Fibre-Based Sensors for Oil and Gas Applications, *National Library of Medicine*
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8473273/>
136. A Preliminary Assessment of an FBG-Based Hard Landing Monitoring System, *MDPI*
<https://www.mdpi.com/2304-6732/8/10/450>
137. When telecom fiber can sense, *NOKIA*
<https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/when-telecom-fiber-can-sense/>
138. Use of fiber optic sensors in automation, *electronica*
<https://www.redeweb.com/en/Articles/use-of-fiber-optic-sensors-in-automation/>
139. Praetorian Fiber Optic Sensing for Pipeline Monitoring and Leak Detection, *HAWK*
<https://www.hawkmeasurement.com/product/FOS-1/>
140. The Future of Optical Fiber Sensors, *ResearchGate*
https://www.researchgate.net/publication/368355621_The_Future_of_Optical_Fiber_Sensors
141. What is the Future of Fiber Optic Sensors in the World of IoT?, Samuel Kassey, *LaseOptics Corporation*
<https://laseoptics.com/blog/what-is-the-future-of-fiber-optic-sensors-in-the-world-of-iot/>

- 142.** Status and future development of distributed optical fiber sensors for biomedical applications, *ScienceDirect*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214180423000685>