



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία



<< ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ >>

ΨΥΧΟΓΙΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

A.M.: 445232017033

Επιβλέπων: Σοφία Μεταξά, Καθηγήτρια Εφαρμογών ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ
ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ
ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΥΧΟΓΙΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπων: Σοφία Μεταξά, Καθηγήτρια Εφαρμογών ΠΑΔΑ

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής
τριμελή επιτροπή:

(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ
ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ & ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΨΥΧΟΓΙΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΨΥΧΟΓΙΟΣ του ΓΕΩΡΓΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 445232017033 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

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 μένα 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 διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 20/06/2023 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση της επιβλέπουσας καθηγήτριας.»

Ο Δηλών

(Ονοματεπώνυμο φοιτητή)

ΨΥΧΟΓΙΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

(Υπογραφή φοιτητή)

Copyright © Ψυχογιός Βασίλειος, 2023

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην οικογένειά μου για την στήριξη που έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Πέραν της οικογένειάς μου θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της εργασίας, κ. Σοφία Μεταξά για την καθοδήγηση, την αφοσίωση και την πολύτιμη βοήθεια που πρόσφερε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Χωρίς τη βοήθειά της η σύνταξη της εργασίας θα ήταν αδύνατη. Τέλος, ευχαριστώ τους υπόλοιπους καθηγητές του τμήματος που συνέβαλαν στη μετάδοση των γνώσεων στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού.



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει σημαντική εξέλιξη στην ενόργανη παρακολούθηση, μέσω συστημάτων, της δομικής ακεραιότητας των κτιρίων. Αρκετά είναι τα έργα, σήμερα, που πραγματοποιείται χρήση τέτοιων συστημάτων, όπου τοποθετούνται κυρίως σε μεγάλα έργα. Η χρήση τους γίνεται με μόνιμη εγκατάσταση στα κτίρια, ώστε να καταγράφονται πληροφορίες της συμπεριφοράς. Γενικότερα η τεχνική εμπειρία σε σεισμούς, η εξέλιξη υπολογιστικών συστημάτων και οι μετρήσεις που λαμβάνονται από την συμπεριφορά μιας κατασκευής, συμβάλλουν στην εξέλιξη των συστημάτων παρακολούθησης και την εξέλιξη της αντισεισμικής τεχνολογίας.

Σε όλες τις δομές εφαρμόζεται ο σχεδιασμός και η λήψη φορτίων για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας και της συμπεριφοράς. Βέβαια υπάρχει πολλές φορές αβεβαιότητα λόγω της φύσης και των διαφόρων παραμέτρων που δεν δύναται πάντα να προβλεφθούν. Η οπτική παρακολούθηση δίνει μια λύση, όμως υπάρχουν πολλοί περιορισμοί που μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα. Έτσι η ενόργανη παρακολούθηση συμπληρώνει τα παραπάνω δίνοντας στοιχεία που είναι αδύνατο να γνωρίζει ή να εκπονήσει ένας μηχανικός κατά την επιθεώρηση ή τον σχεδιασμό. Στοιχεία που λαμβάνονται με χρήση αισθητήρων μόνιμα τοποθετημένων σε δομικά μέλη. Έτσι επιτυγχάνεται η συνεχή πληροφόρηση για την κατάσταση και την εξέλιξη της κατασκευής, όπως και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορούν να επηρεάσουν αυτή. Συνεπώς λαμβάνεται η ασφάλεια και η διαχείριση ενός έργου ολοκληρωτικά.



Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα οφέλη και οι δυσκολίες χρήσης ενόργανων συστημάτων παρακολούθησης. Ο κύκλος διαδικασιών που πραγματοποιείται για την ανάλυση ενός έργου, τα περιβαλλοντικά φαινόμενα, τα φορτία που ασκούνται σε μια κατασκευή είναι διαδικασίες που γίνονται στην μοντελοποίηση του έργου από τους εκάστοτε μηχανικούς. Στα κεφάλαια 2, 3, 4, 5, 6 και 7 καταγράφονται συστήματα οπτικών ινών, επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες καταπόνησης, μετρητές δύναμης, αισθητήρες διάβρωσης και αισθητήρες θερμοκρασίας αντίστοιχα. Παράλληλα βοηθητικά συστήματα και μέθοδοι όπως η θερμογραφία, η θερμο-ελαστική μέθοδος, τα ραντάρ διείσδυσης εδάφους, οι ηλεκτρομαγνητικοί μέθοδοι και η ανίχνευση με κραδασμούς είναι εργασίες για την αναγνώριση βλαβών. Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η επιλογή κατάλληλου αισθητήρα, η συλλογή, η μεταφορά και η αποθήκευση των δεδομένων και μερικές επιπλέον δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στο πεδίο εφαρμογής και κατασκευής του έργου.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Οφέλη της δομικής παρακολούθησης σε έργα	1
1.2 Δυσκολίες της δομικής παρακολούθησης σε έργα	2
1.3 Τεχνολογία δομικής παρακολούθησης και αισθητήρες	3
1.3.1 Ενσύρματη παρακολούθηση.....	5
1.4 Κύκλος ζωής παρακολούθησης	6
1.5 Παρακολούθηση και αξιολόγηση φορτίου	7
1.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	8
1.7 Μοντελοποίηση και αβεβαιότητα παραμέτρων	8
2. Οπτικές Ίνες (Fibre Optic).....	10
2.1 Αισθητήρες οπτικών ινών συσκευασμένοι σε FRP	10
2.2 Συμβολομετρικοί αισθητήρες SOFO (SOFO Interferometric	12
Sensors)	12
2.3 Συσκευασία αισθητήρων	13
2.4 Κατανεμημένα καλώδια ανίχνευσης	13
2.5 Καλώδιο ανίχνευσης θερμοκρασίας.....	14
2.6 Συνδυασμένη ανίχνευση καταπόνησης – θερμοκρασίας	15
(τεχνολογία SMARTprofile)	15
2.7 Λογισμικό και ένωση συστήματος	16
2.8 Μήκος αισθητήρα και σύνολο αισθητήρων	16
2.9 Παράδειγμα ερμηνείας σε μέτρηση παραμόρφωσης.....	17
2.10 Παράδειγμα παρακολούθησης πασσάλων επί τόπου.....	18
2.11 Παρακολούθηση δομικών μελών	20
2.11.1 Υποστυλώματα	20



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

2.11.2 Κουφώματα, τοίχοι, πλάκες.....	23
2.11.3 Παρακολούθηση σε όλη τη δομή.....	25
2.11.4 Παράδειγμα παρακολούθησης κτιρίου.....	25
2.12 Συμπεράσματα.....	27
3. Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers).....	28
3.1 Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.....	30
3.2 Ασύρματη δομική παρακολούθηση.....	32
3.2.1 Εφαρμογή επί του έργου.....	36
4. Αισθητήρες Καταπόνησης.....	38
4.1 Αποσυναρμολογούμενοι μετρητές τάσης.....	40
4.2 Δονούμενοι μετρητές καλωδίων.....	41
4.3 Προσδιορισμός θέσης.....	42
5. Μετρητές Δύναμης.....	44
6. Αισθητήρας Διάβρωσης (Corrosion Sensors).....	45
6.1 Ασύρματοι αισθητήρες διάβρωσης.....	49
7. Αισθητήρας Θερμοκρασίας (Temperature Sensors).....	51
8. Καταπόνηση φορτίων ανέμου.....	54
9. Εφαρμογές Σε Έργα Επιθεώρησης Δομικής Υγείας.....	55
9.1 Θερμογραφία.....	55
9.2 Θερμο-ελαστική μέθοδος.....	56
9.3 Ραντάρ διείσδυσης εδάφους (GPR).....	57
9.4 Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι.....	58
9.5 Μέθοδος ανίχνευσης με κραδασμούς.....	58
9.6 Αναγνώριση βλάβης.....	59
10. Γενικά.....	62
10.1 Επιλογή κατάλληλου συστήματος αισθητήρα.....	62
10.2 Συλλογή μετρήσεων και επιτόπια διαχείριση.....	64



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

10.3 Ασφάλεια δεδομένων	66
10.4 Αποθήκευση δεδομένων	67
10.5 Θόρυβος	68
10.6 Δυσλειτουργία αισθητήρων	68
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Ενσύρματη σύνδεση (Straser et al., 1998) [1]	5
Εικόνα 2-1: FRP-OFBG αισθητήρας [2]	10
Εικόνα 2-2: Σύστημα ανάγνωσης SOFO και εγκατάσταση σε οπλισμό (Διεθνής συγκέντρωση Ηνωμένο Βασίλειο, 28 June – 1 July 2004) [3]	11
Εικόνα 2-3: Καλώδιο οπτικών ινών αντοχής σε ακραίες θερμοκρασίες (Ιστοσελίδα Solifos) [4]	13
Εικόνα 2-4: Τεχνολογία SMARTprofile (Branko Glisic, 2010) [5] ...	14
Εικόνα 2-5: Τοποθέτηση συστήματος παρακολούθησης σε υποσύλωμα (εταιρία SMARTEC και Sofotec) [6]	16
Εικόνα 2-6: Τοποθέτηση αισθητήρων και καλωδίων τους (εταιρία SMARTEC και RouteAero) [7]	17
Εικόνα 2-7: Ευθυγράμμιση ράβδων οπλισμού και τοποθέτηση αισθητήρων μετά την συγκόλληση (εταιρία SMARTEC και RouteAero) [8]	18
Εικόνα 2-8: Τοποθέτηση αισθητήρα στο ένα άκρο (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [9]	20
Εικόνα 2-9: Τοποθέτηση αισθητήρα στα δύο άκρα {δύο παράλληλες τοπολογίες} (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [10]	21
Εικόνα 2-10: Τοποθέτηση αισθητήρων σε πλαίσιο (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [11]	22
Εικόνα 2-11: Τοποθέτηση αισθητήρων σε τοίχο στήριξης (Branko	



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [12]	22
Εικόνα 3-1: Τύποι επιταχυνσιόμετρων (Wang et al., 2014) [13]	26
Εικόνα 3-2: Τύποι επιταχυνσιόμετρων (Maria Pina Limongelli & Mehmet Celebi, 2019) [14]	27
Εικόνα 3-3: Σχεδιασμός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου (Jerome P. Lynch et al., 2003) [15]	29
Εικόνα 3-4: Σχεδιασμός πιεζοαντιστατικού επιταχυνσιόμετρου (Jerome P. Lynch et al., 2003) [16]	31
Εικόνα 4-1: Φύλλο μετρητή καταπόνησης (Ιστοσελίδα Kyowa-ei) [17]	36
Εικόνα 4-2: Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες με προσαρτημένους μετρητές τάσης (Ιστοσελίδα Thorlabs) [18]	36
Εικόνα 4-3: Σπάσιμο αισθητήρα πάνω στην ρωγμή (Tung et al., 2014) [19]	37
Εικόνα 4-4: Αποσυναρμολογούμενοι μετρητές τάσης (Ettouney & Alampalli, 2012) [20]	38
Εικόνα 4-5: Προσαρτημένος καλωδιακός μετρητής (Ettouney & Alampalli, 2012) [21]	39
Εικόνα 4-6: Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (Ιστοσελίδα Motioncontroltips) [22]	40
Εικόνα 4-7: Τυπική μονάδα γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (Ιστοσελίδα Passive-components) [23]	41
Εικόνα 6-1: Τοποθέτηση αισθητήρων στους οπλισμούς (I. Martínez & C. Andrade, 2009) [24]	44



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Εικόνα 6-2: Τοποθέτηση αισθητήρων επί της κατασκευής (I. Martínez & C. Andrade, 2009) [25]	44
Εικόνα 6-3: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού και σκυροδέματος (R.E. Wilmot, 2007) [26]	45
Εικόνα 6-4: Τοποθέτηση εξωτερικά αισθητήρα διάβρωσης (Ettouney & Alampalli, 2012) [27]	47
Εικόνα 6-5: Ασύρματος αισθητήρας διάβρωσης (Budelmann et al., 2015) [28]	47
Εικόνα 7-1: Θερμίστορ (Ιστοσελίδα Passive-Components) [29]	49
Εικόνα 7-2: Αισθητήρας θερμικής αντίστασης (Ιστοσελίδα Labfacility) [30]	50
Εικόνα 7-3: Θερμογραφία οδοστρώματος γέφυρας (Courtesy Keith Ramsey) [31]	51
Εικόνα 8-1: Ανεμόμετρο (Frank Vignola et.al, 2020) [32]	52
Εικόνα 9-1: Τοποθέτηση θερμογραφικού καταγραφέα και εικόνα υπέρυθρων (Courtesy of Dr. Glenn Washer) [33]	53
Εικόνα 9-2: Τοποθέτηση θερμογραφικού καταγραφέα και εικόνα υπέρυθρων (Courtesy of Dr. Glenn Washer) [34]	54
Εικόνα 9-3: Εντοπισμός λεπτομερειών καταστρώματος (Reprinted from ASNT Publication) [35]	55
Εικόνα 9-4: Σταδιακή διάβρωση (Sachidanand Joshi, 2020) [36] ..	58
Εικόνα 9-5: Βλάβη από πρόσκρουση (Courtesy of New York State Department of Transportation) [37]	5

1. Εισαγωγή

1.1 Οφέλη της δομικής παρακολούθησης σε έργα

Οι κατασκευές στο πέρασμα των χρόνων υπόκεινται σε φθορές από τη χρήση των έργων, της περιβαλλοντικές μεταβολές, τις σεισμικές δράσεις και τα κλιματικά φαινόμενα. Με την ενόργανη παρακολούθηση ενεργείται η καταγραφή και αξιολόγηση πιθανών βλαβών ή αστοχιών και η απόδοση της κατασκευής που πιθανό να οδηγήσει σε μοιραία αποτελέσματα, αν ξεπεράσει κάποια όρια ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Μέσα από την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται και ο ορισμός του χρόνου υπολειπόμενης διάρκειας ζωής. Αυτές οι εξελίξεις στην τεχνολογία της ενόργανης παρακολούθησης θα μπορούσε να ειπωθεί ότι συμβάλλουν σε έξυπνες αστικές υποδομές.

Συμπερασματικά υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την πρόοδο και τη διαχείριση των έργων υποδομής όπως παρακάτω ([Frangopol and Messervey 2009, Ko and Ni 2005](#)):

- α) σχεδιασμός του συστήματος βάσει των εκάστοτε περιβαλλοντικών συνθηκών κάθε τοποθεσίας, ανάλογα με τη θερμοκρασία, τον άνεμο και την υγρασία.
- β) πειραματική προσέγγιση σε κατασκευές για αξιοποίηση μελλοντικών χρήσεων σε άλλες δομές.
- γ) από τα δεδομένα παρακολούθησης αντλούνται συμπεράσματα για τον σωστότερο προγραμματισμό των επιθεωρήσεων
- δ) καθορισμός ορίων στις μετρήσεις
- ε) αξιολόγηση μετρήσεων κατά τη διάρκεια κανονικών συνθηκών ή έπειτα από φυσικές κρίσεις
- στ) καταγραφή μετρήσεων δομικής συμπεριφοράς και ακρίβεια στις δομικές εκτιμήσεις

Με όλους αυτούς τους τρόπους επιτυγχάνεται ο κύριος σκοπός της διαχείρισης και επισκευής ενός έργου προς μείωση του κόστους. Το κυριότερο είναι πως η ύπαρξη ενδείξεων σε μεταβολές των κανονικών μετρήσεων, συμβάλλει στην αντιμετώπιση βλαβών ή υποβαθμίσεων έγκυρα. Έτσι προσδίδεται η δομική ασφάλεια υποκινούμενη από καταρρεύσεις γεφυρών κατά το παρελθόν. Όπως γίνεται αντιληπτό

ένα οργανωμένο σύστημα δομικής παρακολούθησης προσφέρει δεδομένα που δεν μπορούν να καταγραφούν με μία οπτική επιθεώρηση. Σε όλα τα μεγάλα έργα υπάρχουν επιθεωρήσεις που πραγματοποιούνται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Όμως στο ενδιάμεσο υπάρχει ο κίνδυνος μιας αστοχίας που θα ενδέχεται να έχει κόστος για τη ζωή. Επειδή όμως η αρτιότητα του κτιρίου μπορεί να διατηρηθεί για αρκετά χρόνια, η τακτική επιθεώρηση μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερο κόστος, ενώ θα μπορούσε να είχε εξοικονομηθεί. Άρα τα οφέλη είναι πολύ περισσότερα όταν υπάρχουν δεδομένα και οι επεμβάσεις ενός πολιτικού μηχανικού είναι πιο στοχευμένες ([Cross et al. 2013](#)). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συντήρησης ή της επισκευής σε μια κατασκευή, είναι η μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας της.

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα χρήσιμη, όταν φθάσει σε επίπεδο να στέλνει επί τόπου ειδοποιήσεις στους υπεύθυνους του έργου πριν φθάσει το σημείο αστοχίας ([Farrar and Worden, 2007](#)).

1.2 Δυσκολίες της δομικής παρακολούθησης σε έργα

Οι δυσκολίες που συναντώνται στα συστήματα δομικής υγείας είναι πολλές, παρόλο που έχει περάσει μία δεκαετία από την εξέλιξή τους. Μερικές καταγράφονται παρακάτω από τους [Farrar and Lieven \(2007\)](#) και [Farrar et al. \(2009\)](#).

Σε μια δομή οι ζημιές είναι πολλών ειδών ειδικά σε μεγάλα έργα. Είναι δύσκολο ένα σύστημα να καταγράφει όλους τους τύπους. Τα συστήματα πρέπει να είναι σε θέση να καταγράφουν τα μικρά μεγέθη ζημιών, άρα να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις δομικές αλλαγές. Σημαντικό ρόλο παίζει ο αριθμός και η θέση των αισθητήρων, να τοποθετούνται εύκολα και να προστατεύονται ώστε να μην καταστραφούν. Ακόμα και έτσι υπάρχει αβεβαιότητα για τον αριθμό και τη θέση των αισθητήρων στη δομή. Έστω και ένας αισθητήρας να επιλεγθεί στη βέλτιστη θέση μπορεί να εξασφαλίσει την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων αισθητήρων. Η ζωή μιας δομής είναι 50-100 χρόνια, άρα και το σύστημα πρέπει να αντέχει σε όλη τη διάρκεια αυτή. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας

μπορούν να δείξουν αλλαγή στην ακαμψία ενός δομικού μέλους ή την μάζα τους, σκυροδέματος και του οδοστρώματος, όμως δεν είναι βέβαιο πως επηρεάζουν το σύνολο της κατασκευής.

Οι πολιτικοί μηχανικοί, λοιπόν, έχουν μπροστά τους μεγάλες προκλήσεις σχετικά με τη μελέτη, την εκτέλεση, τη διάρκεια ζωής και το προγραμματισμό των επιθεωρήσεων για συντήρηση ή επισκευές.

1.3 Τεχνολογία δομικής παρακολούθησης και αισθητήρες

Η τεχνολογία δομικής παρακολούθησης παρέχει μετρήσεις από μηχανικές καταπονήσεις, όπως η παραμόρφωση, η μετατόπιση, η επιτάχυνση, η κατανομή τάσεων ή των φορτίων και οι ρωγμές. Χημικές καταπονήσεις όπως η διάβρωση, η οξείδωση και η ενανθράκωση. Περιβαλλοντικές καταπονήσεις, όπως οι μεταβολές θερμοκρασίας και η υγρασία. Επομένως η επιλογή των αισθητήρων γίνεται βάσει της μελέτης και των εκάστοτε συνθηκών που εν γένη επηρεάζουν την κατασκευή.

Τα ασύρματα συστήματα συμβάλλουν στην μεταφορά δεδομένων που καταγράφονται, σε συσκευή που αποθηκεύει τα δεδομένα ([Lynch and Loh, 2006](#)). Βασικά πλεονεκτήματα των ασύρματων συστημάτων είναι η εύκολη τοποθέτηση, η χρήση μεγάλου αριθμού αισθητήρων, η λήψη ενέργειας από τον ήλιο και το χαμηλό κόστος χρήσης.

Για μια γέφυρα το κόστος χρησιμοποίησης ενός συστήματος παρακολούθησης δομικής υγείας κυμαίνεται από 0,5 έως 3% του συνολικού κόστους κατασκευής. Η διαδικασία διαχείρισης του συστήματος προσθέτει περίπου 5 - 20% μεγαλύτερο κόστος στην κατασκευή το χρόνο. Σε μία γέφυρα μεσαίου μεγέθους για τα πρώτα 10 χρόνια θα απαιτηθεί 2 - 5% των συνολικών χρημάτων κατασκευής της.

Υπάρχουν τρόποι αυτό το κόστος των 10 ετών να επιστραφεί με διάφορους τρόπους, όπως αν ο ιδιοκτήτης παρατηρήσει μία βλάβη να καλύψει ο ίδιος το κόστος. Η άμεση παρακολούθηση του έργου πριν ακόμα αυτό κατασκευαστεί, βοηθάει στην γρήγορη αντιμετώπιση των προβλημάτων. Για παράδειγμα η διόρθωση των καλωδίων προέντασης



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ή αλλαγή στη συνταγή του σκυροδέματος σε επόμενες διαστρώσεις. Σε περίπτωση που αυτές οι αλλαγές γίνουν μετά την κατασκευή του έργου, το κόστος θα είναι πολύ μεγαλύτερο. Η παρακολούθηση του έργου κατά τη φάση της κατασκευής δίνει επιπλέον κίνητρο στους εργάτες για καλύτερα κατασκευαστικά αποτελέσματα. Τα πρώτα 10 χρόνια στην κατασκευή της γέφυρας μπορούν να δώσουν ενδεικτικά αποτελέσματα της απόδοσης της. Στο 10% των νέων γεφυρών που κατασκευάζονται παρουσιάζονται μεταγενέστερες βλάβες που επιφέρουν 30% κόστος σε σχέση με το αρχικό. Το κόστος επισκευών της γέφυρας μπορεί να ξεπερνά και το κόστος κατασκευής. Αυτό μπορεί να προβλεφθεί με τα συστήματα παρακολούθησης τα πρώτα 10 χρόνια ζωής.

Πολλές φορές σε γέφυρες που έχει ξεπεραστεί το προσδόκιμο ζωής πραγματοποιείται οπτική επιθεώρηση, όπου συνήθως γίνεται υποεκτίμηση των ποιοτικών ικανοτήτων και της αντοχής της. Μπορεί αυτό να εμπεριέχει στη διαδικασία μεγάλη ασφάλεια, καθώς μπορεί να κατασκευαστεί εκ νέου η γέφυρα, αλλά όμως είναι αντιοικονομικό. Ένα σύστημα δομικής παρακολούθησης επιφέρει 3% κόστος του συνολικού κόστους ανακατασκευής. Έτσι ενδέχεται μια γέφυρα να εκτιμηθεί ως κατάλληλη για συνέχιση της λειτουργίας της με ή χωρίς επισκευή.

Πολλές φορές η χρήση των συστημάτων δομικής υγείας δεν γίνεται με στοχευμένη διαδικασία από τους ιδιοκτήτες με συνέπεια να μην είναι τόσο χρήσιμα για τον κατασκευαστή. Γενικότερα τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε νέες κατασκευές με καινοτόμα στοιχεία στην κατασκευή, σε κατασκευές με έντονους σεισμικούς, μετεωρολογικούς και διαβρωτικούς παράγοντες και σε έργα που μία δομική παρεμβολή θα επηρέαζε τους χρήστες του ή το υπόλοιπο κατασκευαστικό δίκτυο. Επιπλέον χρησιμοποιούνται σε υφιστάμενες κατασκευές με δομική ανεπάρκεια ή υποβαθμίσεις που παρατηρούνται στην οπτική επιθεώρηση. Οι χρήσεις τους επεκτείνεται σε επισκευές ή ανακαινίσεις τόσο για τον αν είναι απαραίτητες να πραγματοποιηθούν, όσο και για την οργάνωση και εκτέλεση αυτών των εργασιών.

Ο προσδιορισμός των κινδύνων είναι κάτι που απασχολεί του μηχανικούς. Κίνδυνοι όπως η διάβρωση, η απώλεια προέντασης, η καθίζηση θεμελίων, η κρούση, ο ερπυσμός, ο σεισμός, οι

υπερφορτίσεις, η κακή ποιότητα υλικών και οι κακοτεχνίες. Συλλέγοντας αυτούς τους κινδύνους βαθμονομούνται ανάλογα με τη σοβαρότητά τους και λαμβάνονται η κατάλληλες αποφάσεις ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Με τον όρο ζημιά ορίζονται οι αλλαγές που υπόκεινται τα υλικά όπως και στη γεωμετρία τους, που επιφέρουν μείωση της απόδοσης στην κατασκευή.

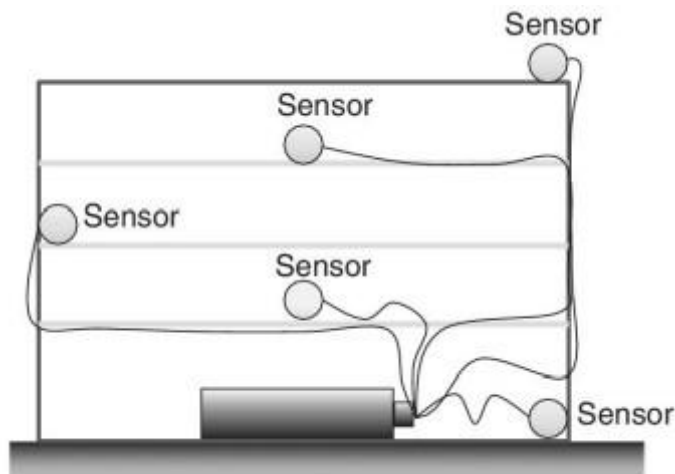
Το πρώτο βήμα είναι η προειδοποίηση του συστήματος όταν ενδέχεται να υπάρχει βλάβη. Το δεύτερο βήμα είναι ο εντοπισμός της θέσης της βλάβης. Το τρίτο βήμα είναι ο προσδιορισμός του είδους της βλάβης και η ταξινόμηση της. Το τέταρτο βήμα είναι ο εντοπισμός της έκτασης και με το τελευταίο βήμα προκύπτει η ανάλυση της υπολειπόμενης ζωής και η ασφάλεια της κατασκευής.

Για τα πρώτα δύο βήματα χρησιμοποιούνται αισθητήρες που καταγράφουν τη δυναμική απόκριση και την καταπόνηση. Για να προσδιοριστεί το είδος της ζημιάς απαιτείται ο αισθητήρας να καταγράφει τους συγκεκριμένους τύπους ζημιάς. Για τα δύο τελευταία βήματα χρειάζονται ειδικά μοντέλα. Στην πρόγνωση της βλάβης βοηθά η εκτίμηση των μελλοντικών φορτίσεων.

Διάφορες μέθοδοι προτείνονται για τη βέλτιστη τοποθέτηση των αισθητήρων. Η πιο συνηθισμένη είναι η μοντελοποίηση μιας σειράς από αισθητήρες και η δοκιμή τους, αφαιρώντας σε μεταγενέστερο χρόνο αυτούς που δεν είναι τόσο χρηστικοί ([Hua-Peng Chen, 2018](#)).

1.3.1 Ενσύρματη παρακολούθηση

Η ενσύρματη τεχνολογία περιλαμβάνει την καταγραφή και τη μεταφορά των μετρήσεων από τη δομή στο κεντρικό σύστημα ([Straser et al., 1998](#))(Εικόνα 1-1). Η επικοινωνία του συστήματος με τους αισθητήρες γίνεται από 10 έως 300 μέτρα απόστασης. Όσο πιο μακριά μεταδίδονται τα αναλογικά σήματα, τόσο μεγαλύτερες παρεμβολές υπάρχουν λόγω θορύβου ([Sohn et al., 2004](#)).



Εικόνα 1-1: Ενσύρματη σύνδεση (Straser et al., 1998) [1]

Τα ενσύρματα συστήματα περιέχουν ενσωματωμένα τη ρύθμιση σήματος, την επεξεργασία των μετρήσεων και την αποθήκευσή τους. Δεν ενδείκνυνται για λειτουργία σε μεγάλες χρονικές περιόδους (Farrar et al., 2009). Σε μεγάλα έργα χρησιμοποιείται αντικεραυνική προστασία, καθώς αισθητήρες ή καλώδια ενδέχεται να είναι εκτεθειμένα. Για αποστάσεις άνω των 100 μέτρων και τοποθέτηση πολλαπλών αισθητήρων προτείνεται η χρήση οπτικών ινών (Catbas et al., 2012).

1.4 Κύκλος ζωής παρακολούθησης

Τα συστήματα παρακολούθησης δομικής υγείας σε έργα, συμβάλλουν στην υλοποίηση μιας κατασκευής από την αρχή της φάσης δημιουργίας και το στάδιο συντήρησης της, μέχρι τη συνολική διάρκεια ζωής του έργου. Για τα προκατασκευασμένα στοιχεία είναι χρήσιμο εργαλείο το δίκτυο ανίχνευσης για τον εντοπισμό των παραμορφώσεων, της ευστάθειας και τον έλεγχο της τάσης σε κρίσιμες περιοχές με σκοπό τη βελτιστοποίηση της δομής. Η φάση των εργασιών είναι ιδιαίτερως σημαντική, καθώς μία πρόωρη ρηγμάτωση μπορεί να αποφέρει κινδύνους και υποβαθμίσεις στη διάρκεια ζωής της δομής. Όπως προκύπτει η χρήση συστημάτων παρακολούθησης συμβάλλει στην διατύπωση πιο ασφαλών συμπερασμάτων, σχετικά με την απόκριση μιας δομής, χωρίς να συμβαίνουν υπερεκτιμήσεις

αυξάνοντας το κόστος. Παράλληλα επιτρέπουν διορθωτικές κινήσεις ορθές ως προς την ερμηνεία και την εκτέλεση αποφάσεων.

Αποδοτικά το σύστημα παρακολούθησης είναι βολικό από πλευράς οικονομίας να τοποθετείται από την αρχή της κατασκευής. Στις επισκευές βοηθάει για την καλύτερη δυνατή επίτευξη αντοχής των δομικών υλικών. Επιπρόσθετα παρακολουθείται η αναμενόμενη αντοχή, όπως και η απόδοση του δομικού συστήματος σε υπερφόρτωση ([Miyamoto, 2009](#)).

1.5 Παρακολούθηση και αξιολόγηση φορτίου

Σε μία κατασκευή τα φορτία που επιβάλλονται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στα στατικά και τα δυναμικά φορτία. Τα στατικά είναι τα μόνιμα, η προένταση, το βάρος της κατασκευής και των μελών που περιβάλλουν την δομή. Αποτέλεσμα των στατικών φορτίων είναι οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις. Τα δυναμικά φορτία χαρακτηρίζονται από λειτουργικά φορτία, φορτία σεισμού ή ανέμου και φορτία από έκρηξη ή πρόσκρουση. Αποτελέσματα των δυναμικών φορτίσεων είναι η επιτάχυνση και η ταχύτητα δόνησης.

Στην υπέρβαση των φορτίων η ενεργοποίηση της ένδειξης βοηθάει τους μηχανικούς για έγκυρη αντιμετώπιση, καθώς ο έλεγχος των στατικών φορτίων στο σύστημα γίνεται περιοδικά. Επίσης σε μια κατασκευή παρακολουθείται ο κυκλοφοριακός φόρτος, ανάλογα με την πυκνότητα κίνησης και το βάρος των οχημάτων. Βάση στατιστικών στοιχείων μπορεί να προβλεφθεί η αύξηση ή η μείωση του κυκλοφοριακού φόρτου στο μέλλον. Ανάγκη δημιουργείται και για τον εντοπισμό της θέσης, του τύπου, της διάρκειας, του πλάτους και της συχνότητας του φορτίου ([Rücker et al., 2006b](#)). Το κυκλοφοριακά φορτία δεν μπορούν να προσδιοριστούν άμεσα. Σε αυτό παίζουν ρόλο η ροή της κυκλοφορίας, η ταχύτητα και η απόσταση των οχημάτων. Σύμφωνα με τα παραπάνω δημιουργούνται υπολογιστικά μοντέλα φορτίων και ακραίων τιμών τους.

Τα φορτία κυκλοφορίας μετριοούνται ως μεγέθη καταπόνησης. Ο τρόπος λήψης είναι ανάλογα με το βάρος των οχημάτων σε μία λωρίδα κυκλοφορίας. Έτσι πραγματοποιείται ζύγιση των οχημάτων, αλλά

λόγω των κραδασμών ερμηνεύονται ως δυναμικά φορτία. Η ζύγιση γίνεται πιο εύκολα όταν η κυκλοφορία είναι πυκνή και αργή ([HuaPeng Chen, 2018](#)).

1.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Σε κάθε δομικό έργο υπάρχουν επιπτώσεις από το περιβάλλον από τις θερμικές μεταβολές ή τον άνεμο. Ενδεχομένως οι θερμικές μεταβολές να επιφέρουν μεγαλύτερη καταπόνηση από τα κυκλοφοριακά φορτία. Οι κυριότερη καταπόνηση είναι η παραμόρφωση που δημιουργεί ρωγμές στο σκυρόδεμα. Συνεπώς λαμβάνονται μετρήσεις για τη θερμοκρασία, την κατανομή και διακύμανσή της μέσα δομή στη ροή του χρόνου. Συμπερασματικά με αυτά που ισχύουν για τη θερμοκρασία σε συνδυασμό με τα μοντέλα προκύπτουν φορτία στη δομή ([Rücker et al., 2006b](#)).

Όσο για τον άνεμο μπορεί να επηρεάσει πολυώροφα κτίρια και γέφυρες. Χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η ταχύτητα και η κατεύθυνση του που θα πρέπει να καταγράφονται. Με παρόμοιο τρόπο έχουν εκτιμηθεί έτοιμα μοντέλα με φορτία ανέμου ανά περιοχή ([Wong and Ni 2009](#)).

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις υπάρχουν και στον χάλυβα οπλισμού εκεί που η οξειδωση του δημιουργεί στρώμα σκουριάς. Το στρώμα σκουριάς εκτείνει τάσεις στο σκυρόδεμα και δημιουργεί ρωγμές. Ομοίως όλα τα προβλήματα από τη διάβρωση του οπλισμού εγκυμονούν κινδύνους για τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια της δομής ([Chen and Alani, 2013 / Chen and Nepal, 2016](#)). Η διάβρωση εμφανίζεται λόγω της ενανθράκωσης και από τα χλωριόντα. Η ταχύτητα προσβολής των οπλισμών της δομής εξαρτάται από την υγρασία, τη θερμοκρασία, το διοξείδιο του άνθρακα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα ([Hua-Peng Chen, 2018](#)).

1.7 Μοντελοποίηση και αβεβαιότητα παραμέτρων

Στη φύση τα φαινόμενα που εξελίσσονται προβλέπονται αλλά όχι με απόλυτη ακρίβεια. Για παράδειγμα οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιέχουν αβεβαιότητα, όπως παράλληλα και οι τάσεις δεν καθορίζονται πάντα ακριβώς. Η ενημέρωση του μοντέλου είναι



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

επιτακτική ανάγκη σε τέτοιες περιπτώσεις, ενώ εξίσου σημαντικό είναι η προσαρμογή τέτοιων αβεβαιοτήτων στα υπολογιστικά μοντέλα ([Frangopol and Messervey, 2009](#)). Οι αβεβαιότητες είναι δύσκολο να καλυφθούν πλήρως από τα μοντέλα ειδικά σε πολύπλοκα συστήματα. Σε θέματα αβεβαιότητας χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα οι πιθανότητες ως εργαλεία για ορθότερη διαδικασία σε παραμετρικά θέματα ([Hua-Peng Chen, 2018](#)).

2. Οπτικές Ίνες (Fibre Optic)

Η τεχνολογία των οπτικών ινών βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη, καθώς τα πλεονεκτήματά της είναι αυτά που τη θέτουν σε εφαρμογή. Η οπτική ίνα είναι μία γυάλινη ίνα που προστατεύεται με επίστρωση πολυμερούς ([Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008](#)). Το μικρό μέγεθος, η αντοχή σε διάβρωση, η θωράκισή της, η δυνατότητα σύνδεσης πολλών αισθητήρων σε μία ίνα, η αξιοπιστία και η δυνατότητα χρήσης σε μεγάλα χιλιόμετρα είναι τα βασικά πλεονεκτήματα ([Ου, 2003](#)). Η διάμετρος μπορεί να είναι της τάξης του 125-500 μm όταν οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι <<γυμνοί>>. Παράλληλα η γεωμετρία τους βοηθά την εγκατάσταση σε σύνθετες δομές εκεί που οι συμβατικοί αισθητήρες μειονεκτούν. Το κόστος μπορεί να φαίνεται μεγάλο, όμως η χρήση είναι αναγκαία για μεγάλα έργα όπου απαιτείται ασφάλεια και οι συνέπειες μιας αστοχίας μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικές συνέπειες. Η εμπειρία έχει δείξει ότι πραγματικά το όφελος ξεπερνά το υψηλό κόστος που χρειάζεται. Η εξέλιξη που υπάρχει στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχει μειώσει σημαντικά το κόστος σε σχέση με παλαιότερα και οι επιδόσεις των οπτικών ινών έχουν βελτιωθεί.

Μπορεί να πει κανείς ότι σε έργα βιομηχανίας πετρελαίου ή φυσικού αερίου είναι η μόνη λύση καθώς θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη για συνεχή και μακροπρόθεσμη παρακολούθηση ([Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008](#)).

Βασικό μειονέκτημα, όμως, η έκθεση των καλωδίων σε διαβρωτικό περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα και η κόπωση που επιφέρει το σύστημα. Για το λόγο αυτό η λύση ήρθε από την ομάδα HIT, η οποία κατάφερε να τοποθετήσει χαλύβδινες ράβδους σε κοινό σωλήνα. Με αυτό το τρόπο μπορεί ταυτοχρόνως να λειτουργήσει ως αισθητήρας καταπόνησης και να παραλάβει δύναμη όπως ένα καλώδιο από χάλυβα.

2.1 Αισθητήρες οπτικών ινών συσκευασμένοι σε FRP

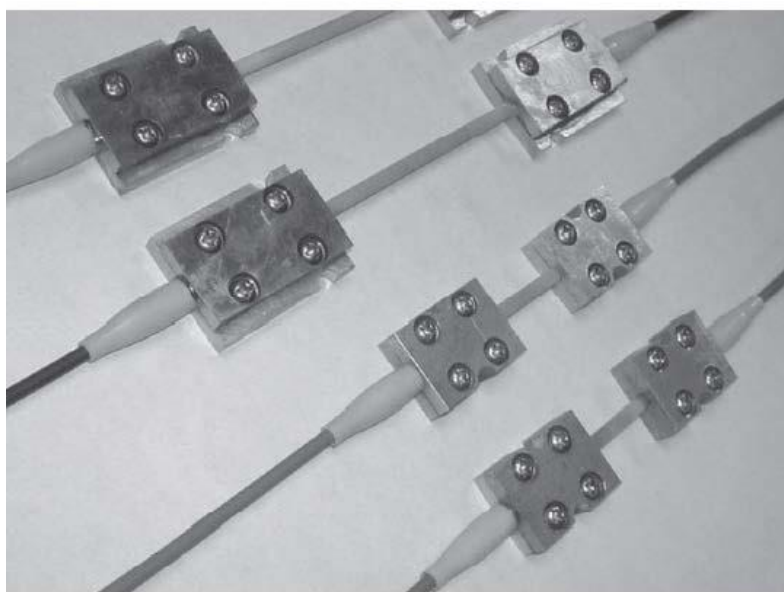
Συνηθέστερος τύπος οπτικών ινών είναι του Bragg (OFBG). Η ευθραυστότητα των ινών χωρίς κάλυψη τις καθιστούν ακατάλληλες για χρήση σε αστικό περιβάλλον. Όταν η κάλυψη γίνεται με κόλλα,

λόγω του ερπυσμού και ταυτόχρονα την γρήγορη παλαίωση της, η διάρκεια ζωής ελαττώνεται γρήγορα. Για τον λόγο αυτό η κάλυψη γίνεται με FRP για να αποτραπεί η θραύση και το βραχυκύκλωμα.

Στην εικόνα 2-1 φαίνεται η κάλυψη της οπτικής ίνας με το συγκολλητικό υλικό. Στην περίπτωση αυτή το υλικό αυτό είναι με FRP.



(a)



(b)

FRP-OFBG αισθητήρες: (a) Αισθητήρες καταπόνησης ενσωματωμένοι σε κατασκευές ωπλισμένου σκυροδέματος και (b) Αισθητήρες καταπόνησης συγκολλημένοι σε χαλύβδινες κατασκευές ή σε επιφάνεια κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος (Vistasp M. Karbhari and Farhad Ansari, 2009)

Εικόνα 2-1: FRP-OFBG αισθητήρας [2]

Σημαντική ανάπτυξη στην τεχνολογία ο συνδυασμός των FRP οπτικών ινών με χρήση αισθητήρων BOTD. Έτσι μπορεί να δώσει λύσεις σε αστικό περιβάλλον χωρίς τον κίνδυνο της θραύσης. Επιπρόσθετα το σύστημα αυτό μπορεί να αισθανθεί την καταπόνησή του, άρα λειτουργεί ως αισθητήρας καταπόνησης ([Karbhari and Ansari, 2009](#)).

2.2 Συμβολομετρικοί αισθητήρες SOFO (SOFO Interferometric Sensors)

Το σύστημα SOFO είναι ένας αισθητήρας οπτικών ινών παραμόρφωσης μεγάλου εύρους με μεγάλη αντοχή στο χρόνο και στις θερμοκρασίες. Ο αισθητήρας περιλαμβάνει ένα ζεύγος ινών, όπου η μία είναι η ίνα μέτρησης που τοποθετείται πάνω στη δομή. Η άλλη ίνα βρίσκεται στον σωλήνα. Έτσι σε περίπτωση παραμόρφωσης μετριέται η διαφορά μήκους μεταξύ των δύο ινών. Για τη λειτουργία αυτού του συστήματος απαιτείται μία φορητή μονάδα ανάγνωσης μέσω ενός καθρέπτη σάρωσης. Σε περίπτωση που οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται, η συσκευή ανάγνωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες δομές με άλλο ζεύγος ινών ([Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008](#)).

Στην εικόνα φαίνεται ένα σύστημα ανάγνωσης με σύνδεση πάνω σε αυτό του υπολογιστή και των ινών που «τρέχουν» κατά μήκος ενός οπλισμού χάλυβα.



Σύστημα ανάγνωσης SOFO και εγκατάσταση σε ωπλισμό (Daniele Inaudi, 2004)

Εικόνα 2-2: Σύστημα ανάγνωσης SOFO και εγκατάσταση σε ωπλισμό (Διεθνής συγκέντρωση Ηνωμένο Βασίλειο, 28 June – 1 July 2004) [3]

Το σύστημα ανάγνωσης μπορεί να μεταφερθεί εύκολα, έχει μπαταρία και είναι αδιάβροχο. Αυτό βοηθάει στην χρήση σε δύσκολο περιβάλλον που μπορεί να υπάρχει σκόνη και υγρασία ειδικά όταν βρίσκεται σε εργοτάξια. Η μέτρηση γίνεται είτε χειροκίνητα με την σύνδεση των

αισθητήρων τον έναν με τον άλλο, είτε αυτόματα μέσω οπτικού διακόπτη. Η διάρκεια της είναι περίπου 10 δευτερόλεπτα και οι μετρήσεις μεταφέρονται σε έναν φορητό υπολογιστή για την επεξεργασία τους. Όπως αναφέρθηκε και πριν η σύνδεση αυτού του συστήματος δεν χρειάζεται να είναι μόνιμη, αλλά είναι αναγκαία η απαραίτητη συχνότητα των μετρήσεων.

2.3 Συσκευασία αισθητήρων

Για τους αισθητήρες δεν υπάρχει κοινός τρόπος για την τοποθέτησή τους και τη ζεύξη των οπτικών καλωδίων. Αυτό προκύπτει λόγω των διάφορων υλικών που υπάρχουν και τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες ([Bronnimann et al., 1998](#)). Για τους αισθητήρες δίνεται έμφαση στη μηχανική επαφή πάνω στο υλικό που παρακολουθείται, αλλά και ταυτόχρονη προστασία των οπτικών ινών ([Inaudi et al., 1994](#)). Η εγκατάσταση θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν στη διαδικασία σχεδιασμού και οι δοκιμές να γίνουν επί τόπου. Κάτι βέβαια απαραίτητο για ορθά αποτελέσματα στις μετρήσεις.

2.4 Κατανεμημένα καλώδια ανίχνευσης

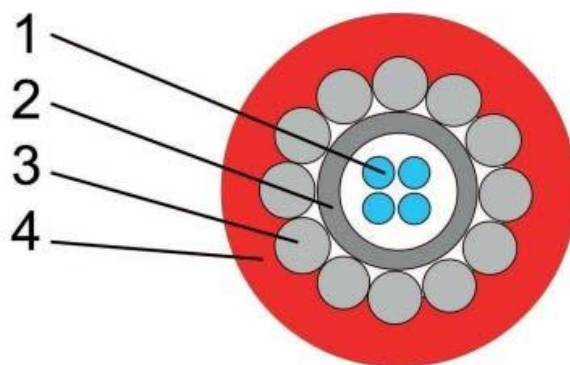
Ο κλασικός σχεδιασμός των καλωδίων των οπτικών ινών διασφαλίζουν την προστασία τους από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία, η βροχή και οι χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα από τις μηχανικές καταπονήσεις, όπως οι πιέσεις, η σύνθλιψη και η διαμήκης καταπόνηση. Με αυτό το τρόπο προκύπτει η αντοχή στο χρόνο. Το καλώδιο παράλληλα μπορεί να μετράει και τις θερμοκρασιακές μεταβολές από τους -20 έως τους $+60^{\circ}\text{C}$ συνδυασμένο με τα συστήματα παρακολούθησης Brillouin ή Raman. Για θερμοκρασίες εκτός αυτών των τιμών χρειάζεται ειδικός σχεδιασμός για τα καλώδια, ειδικά στο σύστημα παρακολούθησης Brillouin, όπου η οπτική ίνα είναι σημαντικό να αποτραπεί από δυνάμεις καταπόνησης. Αυτό διότι ενδέχεται να καταγράψει λανθασμένα αλλαγή θερμοκρασίας λόγω διασταυρούμενης πληροφορίας. Το σύστημα Brillouin πλεονεκτεί ειδικά σε μεγάλα έργα όπως αγωγοί, φράγματα ή σε κατολισθήσεις, για το λόγο της υψηλής ευαισθησίας σε παραμορφώσεις.

Η εγκατάσταση είναι εύλογο να πραγματοποιείται με δύο ξεχωριστά καλώδια. Το ένα για την ανίχνευση της καταπόνησης και το δεύτερο για την ανίχνευση της θερμοκρασίας σε ενιαίο πακέτο.

Οι ίνες πρέπει να προστατεύονται από εξωτερικές καταπονήσεις και να είναι εύκολος ο χειρισμός τους χωρίς τον κίνδυνο βλάβης. Άρα το καλώδιο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να καλύπτουν αυτές τις προδιαγραφές και να αποτρέπουν την επίδραση του νερού και άλλων ουσιών. Οι απώλειες στις μετρήσεις θα πρέπει να παραμένουν χαμηλές.

2.5 Καλώδιο ανίχνευσης θερμοκρασίας

Τα καλώδια ανίχνευσης είναι ειδικά σχεδιασμένα για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Στην εικόνα 1.3 περιγράφονται τα παρακάτω μέρη του. Τα μέρη που αποτελούνται είναι τέσσερις μονότροπες οπτικές ίνες τυλιγμένες από ανοξείδωτο χαλύβδινο σωλήνα και σύρματα ίδιου τύπου και ένα προστατευτικό κάλυμμα πολυμερούς. Η κάλυψη πολυμερούς εγγυάται τη αντιδιαβρωτική προστασία. Η διάμετρος του καλωδίου είναι 3,8 mm.



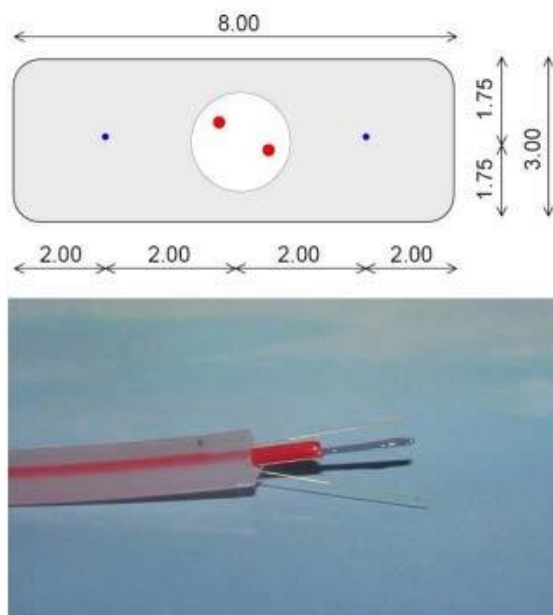
- 1) Οπτικές ίνες, 2) Ανοξείδωτος χαλύβδινος σωλήνας,
- 3) Ανοξείδωτα χαλύβδινα σύρματα, 4) Πολυμερές

Εικόνα 2-3: Καλώδιο οπτικών ινών αντοχής σε ακραίες θερμοκρασίες (Ιστοσελίδα Solifos) [\[4\]](#)

Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία πετρελαίου ή αερίου, για ανίχνευση πυρκαγιάς σε σήραγγες, για χαρτογράφηση της θερμοκρασίας σε χώρους απόρριψης των απορριμμάτων και σε άλλα μεγάλα έργα ([Branko Glisic, Daniele Inaudi, 2008](#)).

2.6 Συνδυασμένη ανίχνευση καταπόνησης – θερμοκρασίας (τεχνολογία SMARTprofile)

Η τεχνολογία SMARTprofile περιλαμβάνει αισθητήρες σε ένα ενιαίο πακέτο. Υπάρχουν δύο συνδεδεμένες ίνες καταπόνησης για να καταγράψουν την τάση και δύο ελεύθερες ίνες για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Ο συνδυασμός αυτών των δύο περιέχεται σε ένα θερμοπλαστικό υλικό πολυαιθυλενίου. Στην εικόνα 1-4 φαίνεται η διατομή με τις διαστάσεις. Ο κόκκινος σωλήνας περιέχει τις ίνες που είναι ελεύθερες, δηλαδή οι ίνες θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας έχει κατασκευασθεί για εφαρμογές πετρελαίου και αερίου και γεωτεχνικές εφαρμογές ([Inaudi and Glisic, 2005](#)). Η χρήση τους δεν μπορεί να τεθεί σε ακραίες θερμοκρασίες ή σε περιβάλλον με υψηλή χημική ρύπανση.



Εικόνα 2-4: Τεχνολογία SMARTprofile (Branko Glisic, 2010) [5]

2.7 Λογισμικό και ένωση συστήματος

Για την παρακολούθηση μιας κατασκευής χρειάζεται η εγκατάσταση ενός μόνιμου συστήματος. Τα δεδομένα που προκύπτουν είναι μεγάλα σε όγκο και η ερμηνεία τους χειροκίνητα είναι δύσκολη. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη ενός λογισμικού που θα αποθηκεύει τα δεδομένα που προκύπτουν από τους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε δομές. Η δομική βάση δεδομένων (SDB) είναι το πρότυπο που συνιστάται για την καταγραφή των πληροφοριών και την αποθήκευσή τους.

2.8 Μήκος αισθητήρα και σύνολο αισθητήρων

Ένας σημειακός αισθητήρας τοποθετείται για την καταγραφή μιας θέσης στη δομή. Αντίθετα κατανομημένοι αισθητήρες κατά μήκος μιας δομής μετρούν παραμέτρους σε διάφορες θέσεις. Οι αισθητήρες παραμόρφωσης τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία για την καταγραφή της μέγιστης τάσης ή της μετατόπισης. Το μήκος του μετρητή αισθητήρα είναι η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων.

Οι παραδοσιακοί αισθητήρες, μετρητές καταπόνησης και τα δονούμενα καλώδια χαρακτηρίζονται αισθητήρες μικρού εύρους. Οι αισθητήρες μεγάλου εύρους μπορούν να θέσουν μια κατασκευή σε πλήρη παρακολούθηση. Σε αντίθεση, βέβαια, με την επιλεγμένη τοποθέτηση αισθητήρων σε δομικά στοιχεία, εκεί που ενδέχεται να υπάρχουν αστοχίες ή υποβαθμίσεις σε σημεία που δεν υπάρχουν αισθητήρες. Γι' αυτό η λύση μεγάλου εύρους αισθητήρων είναι κοινά αποδεκτή για την συνολική παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας.

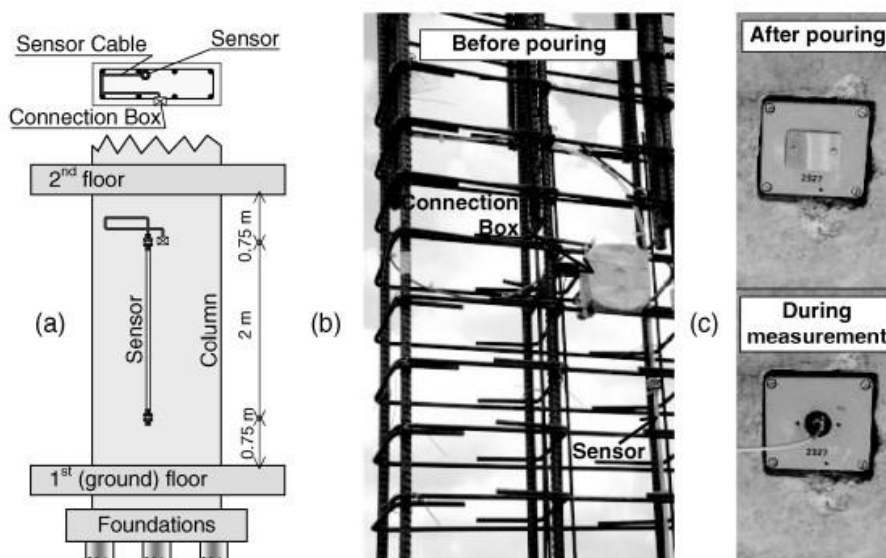
Πιο συγκεκριμένα σε ανομοιογενή υλικά οι αισθητήρες είναι πιθανό να παράξουν σφάλμα από το μεγάλο μήκος τους. Σε ομοιογενή υλικά οι αισθητήρες μικρού εύρους έχουν λιγότερα σφάλματα κατά μήκος του μετρητή. Όμως εξακολουθεί να υφίσταται η χρήση των αισθητήρων μεγάλου εύρους, διότι επιτυγχάνεται η πλήρης κάλυψη των δομικών στοιχείων σε πιθανές δυσλειτουργίες. Συμπερασματικά σε ομοιογενή υλικά η επιλογή αισθητήρων μεγάλου εύρους είναι πιο

σωστή. Γενικά θα μπορούσε να χαρακτηριστεί πως επιλογή του μήκους των αισθητήρων βασίζεται στον τύπο εφαρμογής και το υλικό τοποθέτησης.

Για την ορθή καταγραφή της μέτρησης γίνεται επιτακτική η ανάγκη σωστού χειρισμού στην τοποθέτηση του κάθε αισθητήρα. Έτσι η πληροφορία είναι πλέον αξιόπιστη με την ταυτόχρονη αξιολόγηση των στοιχείων καταπόνησης που τίθενται στην μέτρηση. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απαιτεί την αντίστοιχη εμπειρία του συστήματος παρακολούθησης ([Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008](#)).

2.9 Παράδειγμα ερμηνείας σε μέτρηση παραμόρφωσης

Ξεκινώντας από ένα έργο που βρίσκεται στην Σιγκαπούρη ως πιλοτικό πρόγραμμα το 2001 ([Glisic et al., 2005](#)). Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν στόχος ήταν η αξιολόγηση της κατασκευής σε διάφορες επιδράσεις, ο έλεγχος της απόδοσης του κτιρίου, η μείωση του κόστους και φυσικά η εμπειρία από την παρακολούθηση. Η εγκατάσταση έγινε με αισθητήρες μεγάλου εύρους στα υποστυλώματα εδάφους. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αναλύονται τα αποτελέσματα σε ένα υποστυλώμα.



α) θέση αισθητήρα στο υποστυλώμα, β) αισθητήρας και κουτί σύνδεσης σε ενδιάμεσο πλαίσιο ράβδων, γ) κουτί σύνδεσης μετά την έκχυση του υποστυλώματος

Εικόνα 2-5: Τοποθέτηση συστήματος παρακολούθησης σε υποστύλωμα (εταιρία SMARTEC και Sofotec) [6]

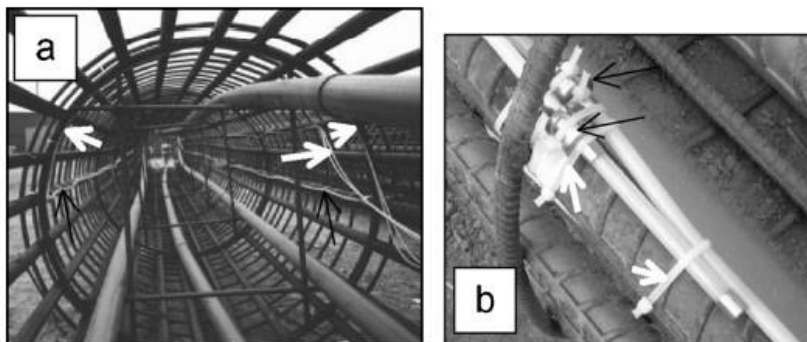
Αρχικά τοποθετούνται αισθητήρες στα υποστυλώματα εδάφους ως πιο κρίσιμα στοιχεία στην κατασκευή. Η χρήση τους υπολογίζεται στον συνολικό προϋπολογισμό του έργου. Επιβάλλεται θλιπτική δύναμη στο κάθε υποστύλωμα. Στην εικόνα 1-5 (α) παρουσιάζεται η θέση του αισθητήρα πάνω στο υποστύλωμα. Το μήκος υπολογίστηκε στα 2 μέτρα, ενώ θα μπορούσε να φτάσει και τα 3,5 μέτρα.

Στην εικόνα 1-5 (β) τοποθετήθηκε ο αισθητήρας και το κουτί σύνδεσης πάνω στις ράβδους με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην εξέρχονται από το υποστύλωμα. Κατά την έκχυση του σκυροδέματος προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα της εικόνας 1-5 (γ). Έτσι στο άνοιγμα αυτό επιτρέπεται η σύνδεση των αισθητήρων.

Η κατασκευή αυτή ελέγχθηκε για 5 χρόνια. Τα στάδια των μετρήσεων ήταν κατά την ανέγερση κάθε ορόφου και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Η περιοδικότητα αυτή βασίστηκε στην μείωση του κόστους παρακολούθησης, αλλά και στο γεγονός πως δεν παρατηρήθηκε κάποιο ζήτημα. Η καταγραφή της θερμοκρασίας δεν εκπονήθηκε, διότι η θερμοκρασία στην Σιγκαπούρη παραμένει σταθερή από 23 έως 33°C όλες τις εποχές.

2.10 Παράδειγμα παρακολούθησης πασσάλων επί τόπου

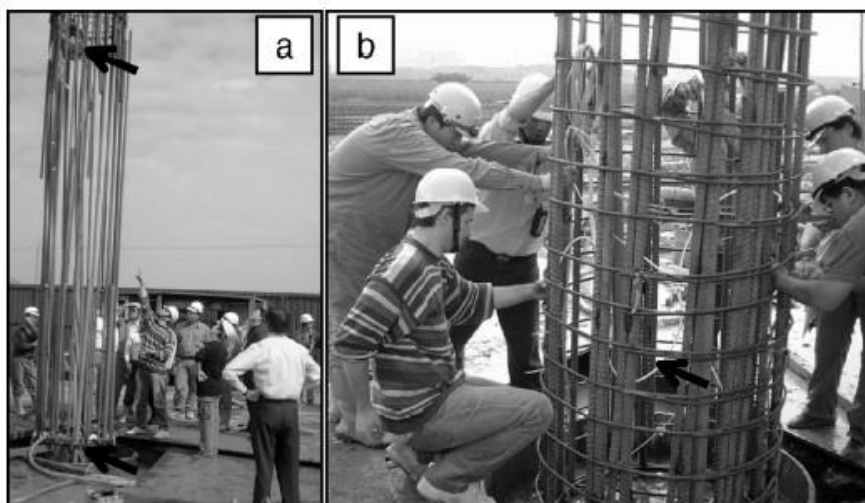
Οι αισθητήρες εγκαταστάθηκαν σε κύριους ράβδους οπλισμού με πλαστικούς δεσμούς. Για να αποτραπεί η επίδραση των αισθητήρων με τα καλώδια τους, τοποθετήθηκαν σε άλλη ράβδο οπλισμού. Η προστασία που θα πρέπει να έχουν οι αισθητήρες είναι δύσκολη σε γεωτεχνικά έργα. Στην εικόνα 1-6, ενδεικτικά, γίνεται η τοποθέτηση των αισθητήρων και των καλωδίων τους με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.



α) αισθητήρες τοποθετημένοι σε ράβδους οπλισμού (μαύρα βέλη) και καλώδια σύνδεσης σε γειτονικές ράβδους οπλισμού (λευκά βέλη), β) λεπτομέρεια τεμαχίων αγκύρωσης (μαύρα βέλη) ενσωματωμένα με πλαστικούς δεσμούς (λευκά βέλη)

Εικόνα 2-6: Τοποθέτηση αισθητήρων και καλωδίων τους (εταιρία SMARTEC και RouteAero) [7]

Το κέλυφος των ράβδων οπλισμού χωρίστηκε σε τρία τμήματα, διότι το μήκος του δεν επιτρέπει την εγκατάσταση απευθείας. Έτσι με την τοποθέτηση των αισθητήρων σε κάθε τμήμα, συναρμολογούνται με συγκόλληση. Πάνω στην συγκολλημένη περιοχή τοποθετούνται οι αισθητήρες μετά την εργασία συγκόλλησης. Για να μην υποστούν βλάβη από την συγκόλληση, προστατεύτηκαν από ειδικά πυρίμαχα υλικά. Στην εικόνα 1-7 παρουσιάζεται η ευθυγράμμιση των ράβδων οπλισμού έπειτα από το κατέβασμα του κελύφους και η τοποθέτηση των αισθητήρων μετά την συγκόλληση. Έπειτα από την εγκατάσταση του κελύφους τα καλώδια ομαδοποιούνται και προστατεύονται από μεταλλικό σωλήνα. Η αρχή των μετρήσεων γίνονται παράλληλα με την έκχυση του σκυροδέματος.



α) τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν τους αισθητήρες που προστατεύονται με πυρίμαχα υλικά, β) τοποθέτηση αισθητήρων (μαύρο βέλος) μετά την συγκόλληση ράβδων οπλισμού

Εικόνα 2-7: Ευθυγράμμιση ράβδων οπλισμού και τοποθέτηση αισθητήρων μετά την συγκόλληση (εταιρία SMARTEC και RouteAero) [8]

2.11 Παρακολούθηση δομικών μελών

Στα δομικά μέλη που παρακολουθούνται τους ασκούνται μόνιμα και κινητά φορτία, όπως και φορτία από το σεισμό ή τον άνεμο. Συνήθως στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας συναντώνται πολώροφα κτίρια, εκεί που το πλήθος των δομικών μελών είναι εκατοντάδες ή χιλιάδες. Άρα η επιλογή των λίγων αισθητήρων πρέπει να μελετηθεί, ώστε να εντοπιστούν τα κυριότερα μέλη προς παρακολούθηση και να είναι οικονομικά προσιτή λύση.

2.11.1 Υποστυλώματα

Τα υποστυλώματα λαμβάνουν αξονικές δυνάμεις και ροπές κάμψης. Ελήφθησαν διατομές με συγκεκριμένες ιδιότητες και παρουσιάζονται οι ακόλουθες βασικές αρχές:

1) Το υποσύλωμα δεν κάμπτεται, άρα η τοποθέτηση του αισθητήρα μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής. Η θέση μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

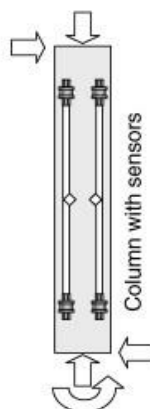


ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

- α) Η εγκατάσταση του αισθητήρα γίνεται κοντά στο κέντρο βάρους αν δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού του μέλους.
- β) Αν είναι πιθανός ο κίνδυνος λυγισμού, η τοποθέτηση του αισθητήρα γίνεται μακριά από το κέντρο βάρους, αλλά όχι κοντά στους άξονες του μέλους.
- 2) Το μήκος του μετρητή πρέπει να είναι μεγάλο, γιατί η κατανομή των δυνάμεων είναι σταθερή και το σφάλμα ελάχιστο. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:
- α) Λόγω της ανομοιογένειας του σκυροδέματος το μεγάλο μήκος του αισθητήρα μετράει με καλύτερο τρόπο τις ατέλειες.
- β) Το μεγάλο μήκος του αισθητήρα σε όλο το μήκος του στοιχείου είναι πιο εύκολο να εντοπίσει την αστοχία.
- 3) Ο προσδιορισμός της θερμικής καταπόνησης, καθώς τα στοιχεία των υποστυλωμάτων είναι εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες (ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην θερμική αγωγιμότητα του υλικού και στον συντελεστή θερμικής διαστολής). 4) Παρακολούθηση των παραμέτρων:
- α) Οι ιδιότητες του υποστυλώματος, το μέτρο ελαστικότητας, το φορτίο και ο συντελεστής θερμικής διαστολής. β) Μέση τάση στο υποσύλωμα.
- γ) Παραμόρφωση του υποστυλώματος.
- δ) Αστοχία υποστυλώματος.
- ε) Συνίσταται ο εξοπλισμός του υποστυλώματος με παράλληλες τοπολογίες, αν υπάρχει αστοχία λόγω λυγισμού και δεν μπορούν οι αισθητήρες να τοποθετηθούν στο κέντρο βάρους ή στις άξονες.
- στ) Εκτίμηση της μέγιστης μέσης καταπόνησης και της μέγιστης καμπυλότητας.
- ζ) Περιορισμένος χαρακτηρισμός ρωγμών.
- η) Προσδιορισμός της εγκάρσιας δύναμης και της ροπής κάμψης (δεν υπάρχει ακρίβεια σε περίπτωση ρωγμών).

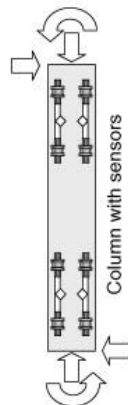
Μία παράλληλη τοπολογία χρησιμοποιείται για την κάμψη στα υποστυλώματα. Η κάμψη παράγεται από τις δυνάμεις που ασκούνται στα άκρα του μέλους. Ο τρόπος παρακολούθησης είναι διαφορετικός όταν η κάμψη επιβάλλεται στο ένα άκρο ή και στα δύο. Η μέγιστη ροπή βρίσκεται στο άκρο που είναι πακτωμένη η κολόνα. Έτσι συνίσταται η εγκατάσταση των αισθητήρων όσο πιο μεγάλους σε μήκος με τις εξής οδηγίες:

- 1) Ο αισθητήρας να βρίσκεται στο μέσο του ύψους του υποστυλώματος.
- 2) Η μέγιστη καμπυλότητα είναι ίση (χωρίς ρωγμές) ή λίγο μεγαλύτερη (με ρωγμές) από δύο φορές την μετρούμενη καμπυλότητα.



Εικόνα 2-8: Τοποθέτηση αισθητήρα στο ένα άκρο (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [9]

Στην περίπτωση πάκτωσης και στα δύο άκρα του υποστυλώματος χρησιμοποιούνται δύο παράλληλες τοπολογίες. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι οι ροπές κάμψης είναι άγνωστες στα δύο άκρα.

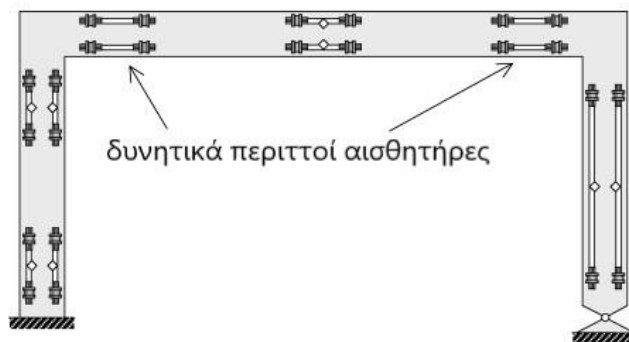


Εικόνα 2-9: Τοποθέτηση αισθητήρα στα δύο άκρα {δύο παράλληλες τοπολογίες} (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [10]

Το μήκος του αισθητήρα είναι περίπου το ένα τέταρτο του συνολικού μήκους στο υποσύλωμα. Σε ένα υποσύλωμα πακτωμένο στο ένα άκρο, χρειάζονται δύο φορές περισσότερους αισθητήρες και σε ένα υποσύλωμα με πακτώσεις στα δύο άκρα, χρειάζονται τέσσερις φορές περισσότερους αισθητήρες από ένα στοιχείο απλής αξονικής φόρτισης. Σε διαξονικά λυγισμένα υποστυλώματα χρειάζονται ακόμα περισσότεροι αισθητήρες. Όπως γίνεται αντιληπτό το κόστος χρήσης γίνεται ιδιαίτερα υψηλό. Συμπερασματικά πραγματοποιείται μία μελέτη και αν η συνεισφορά στη συμβολή των ροπών κάμψεων είναι μικρή, θεωρείται ότι επιβάλλεται μονο-αξονική δύναμη.

2.11.2 Κουφώματα, τοίχοι, πλάκες

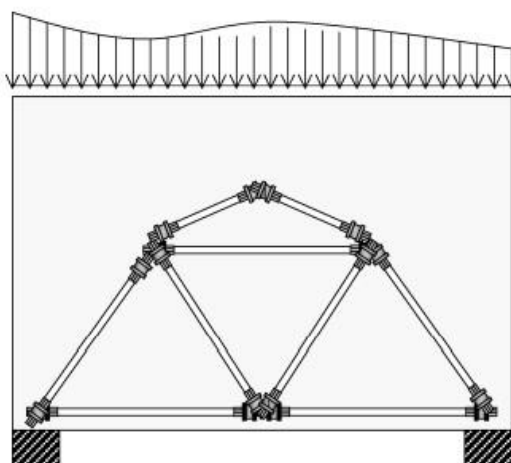
Πλαίσιο ονομάζουμε ένα δομικό σύστημα που περιλαμβάνει δύο κολόνες στα άκρα και μία ενδιάμεση οριζόντια δοκό. Η παρακολούθηση συμβαίνει στα υποστυλώματα όπως αναφέρθηκε παραπάνω και η οριζόντια δοκός με τις απαιτούμενες παράλληλες τοπολογίες, με την επίβλεψη της ύπαρξης κάμψης.



Εικόνα 2-10: Τοποθέτηση αισθητήρων σε πλαίσιο (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [11]

Σε μια πλάκα επιβάλλονται πολλά φορτία όπως οι κανονικές ή διατμητικές τάσεις και η διαξονική κάμψη ή στρέψη. Σε μια πλάκα απαιτούνται τουλάχιστον έξι αισθητήρες. Όπως γίνεται αντιληπτό ο αριθμός αυτός είναι μεγάλος, οπότε και το κόστος θα είναι ανάλογα υψηλό. Άρα θα πρέπει να επιλεχθούν οι κυριότερες πλάκες βάσει καταπόνησης.

Οι τοίχοι στήριξης έχουν συγκεκριμένη μεθοδολογία τοποθέτησης αισθητήρων με τριγωνική μορφή. Καταπονείται κυρίως από κανονικές δυνάμεις, αλλά μπορεί και με ροπές κάμψης ή στρέψης στα άκρα. Η μέθοδος αντηρίδας και η εγκατάσταση των αισθητήρων σε συγκεκριμένες θέσεις φαίνεται στην εικόνα 1-10.



Εικόνα 2-11: Τοποθέτηση αισθητήρων σε τοίχο στήριξης (Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008) [12]

2.11.3 Παρακολούθηση σε όλη τη δομή

Για την παρακολούθηση της υγείας ενός κτιρίου απαιτείται μελέτη για τον εντοπισμό των κρίσιμων δομικών στοιχείων, ώστε να μην υπάρχει υψηλό κόστος από τους πολυάριθμους αισθητήρες. Τα βασικότερα δομικά στοιχεία είναι τα υποστυλώματα και ο πυρήνας. Οι οριζόντιες δοκοί και οι πλάκες δεν συγκαταλέγονται στα κρίσιμα σημεία ελέγχου, καθώς και αστοχία να υπάρξει δεν τίθεται συνήθως θέμα κατάρρευσης της δομής. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν είναι πιθανό να υπάρχουν αισθητήρες σε αυτά τα στοιχεία. Για κτίρια με πολλούς ορόφους απαιτείται στατική και δυναμική ανάλυση. Απαραίτητη είναι η χρήση αισθητήρων σε υποστυλώματα και στη θεμελίωση. Αναλόγως τη μελέτη που προκύπτει, τοποθετούνται έπειτα αισθητήρες στους υπόλοιπους ορόφους όπου κρίνεται απαραίτητο. Σε αυτό παίζει ρόλο οι διαστάσεις του χώρου, οι ιδιότητες των υλικών και η κατανομή των φορτίων ανάλογα με τις καθ' ύψος ή κατά μήκος αλλαγές. Το σύστημα αισθητήρων που θα επιλεγεί, θα πρέπει να ικανοποιεί τις στατικές και δυναμικές μετρήσεις.

Το σύστημα παρακολούθησης της παραμόρφωσης είναι σημαντικό, αλλά υπάρχουν και άλλα συστήματα εξίσου σημαντικά που μπορούν να βοηθήσουν. Στο επίπεδο του εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαξονικά κλισιόμετρα και στα υπόγεια διαξονικά ή τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα. Τα τελευταία χρειάζονται για τον προσδιορισμό στις μετρήσεις που λαμβάνονται από τα φορτία ανέμου ή σεισμού. Ιδιαίτερη έμφαση μπορεί να δοθεί και σε σύστημα GPS συνδυασμένο με οπτικές ίνες για ολική κίνηση του κτιρίου.

2.11.4 Παράδειγμα παρακολούθησης κτιρίου

Ο τρόπος μελέτης παρουσιάζεται παρακάτω:

- 1) Εντοπισμός των κρίσιμων μελών που αν αστοχήσουν θα πραγματοποιηθεί έως κατάρρευση της κατασκευής.
- 2) Αντιπροσωπευτικός αριθμός αισθητήρων στα υποστυλώματα για την παραγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την συνολική δομή.

- 3) Επιλογή συστήματος που θα αντέχει από την αρχή της κατασκευής έως όλη τη διάρκεια ζωής της δομής, συμπεριλαμβανομένης και της υψηλής ακρίβειας των μετρήσεων.
- 4) Το σύστημα παρακολούθησης δεν πρέπει να επηρεάζεται από τις ανομοιογένειες του σκυροδέματος, όπως ρωγμές ή εγκλωβισμένος αέρας.
- 5) Ο προϋπολογισμός του έργου ήταν χαμηλός οπότε επιλέχθηκε μικρός αριθμός αισθητήρων, ώστε από τις μετρήσεις που θα παραχθούν να αξιολογηθούν και να εντοπιστούν σφάλματα και βελτιώσεις επί του μέλλοντος.
- 6) Η τοποθέτηση των αισθητήρων συνίσταται να μην είναι εμφανής, όπως και τα καλώδια τους για αισθητικούς λόγους.

Όπως γίνεται αντιληπτό η ενόργανη παρακολούθηση απαιτεί μεγάλη τριβή για ποιοτικές ενδείξεις και δεδομένα. Ο τύπος του αισθητήρα, το μήκος, η θέση του, το πρόγραμμα επεξεργασίας και οι αλγόριθμοι είναι μια σειρά από στοιχεία που επιλέγονται για την συγκεκριμένη εργασία. Θα πρέπει να προστατεύεται από συνθήκες υγρασίας, την θερμοκρασία, τη διάβρωση και τις παρεμβολές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Η κατασκευή περιλάμβανε 19 ορόφους, που τέθηκαν σε μετρήσεις περιοδικά, μετρήσεις με συνεδρίες 48 ωρών και έπειτα από ακραία φαινόμενα. Η μέτρηση της καταπόνησης παρουσίασαν σταθερότητα με μικρές διακυμάνσεις, κυρίως βάσει της θερμικής διαφοράς μέσα στη μέρα. Λαμβάνοντας υπόψη τα αυξημένα κινητά φορτία τις βραδινές ώρες από τους ανθρώπους που επέστρεφαν στις κατοικίες τους, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στις μετρούμενες τιμές. Τον Μάρτιο του 2005, όταν έγινε σεισμός στην Ινδονησία επηρέασε και την Σιγκαπούρη. Έτσι πραγματοποιήθηκε συνεδρία για την παρακολούθηση των μετρήσεων έναντι της σεισμικότητας και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές.

Η τοποθέτηση τέτοιου συστήματος σε πολώροφο κτίριο στην Σιγκαπούρη ήταν η πρώτη φορά. Με αυτό τον τρόπο το σύστημα δοκιμάστηκε και αξιοποιήθηκε βάσει αποτελεσμάτων για μελλοντικές χρήσεις σε ψηλά κτίρια.

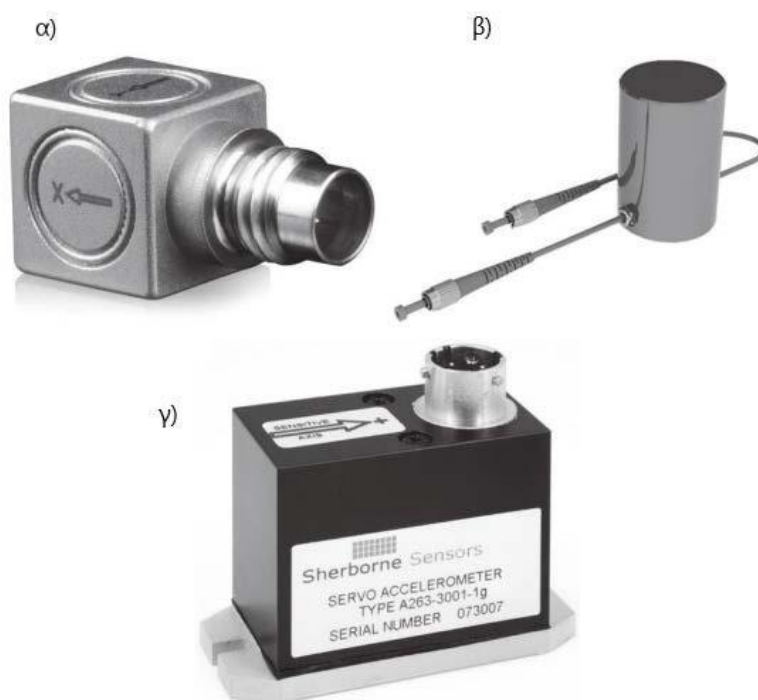


2.12 Συμπεράσματα

Η χρήση αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζει ένα αξιόπιστο μοντέλο παρακολούθησης της δομικής υγείας των κατασκευών. Έχουν αντικαταστήσει τους συμβατικούς αισθητήρες λόγω μεγαλύτερου όφελους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρύτερα σε μεγάλες δομές, γεωτεχνικά έργα και κατασκευές πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αυτό μέσω του μεγάλου εύρους και της κατανομής του. Το κόστος έχει μειωθεί σημαντικά από την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών και τις ανταγωνιστικές εταιρίες που εξελίσσουν τόσο τον τύπο των αισθητήρων, όσο και της σύνδεσης αυτών. Για να παραμείνει, όμως, χαμηλό το κόστος θα πρέπει να αναπτυχθούν και τα προγράμματα ανάλυσης και ερμηνείας των μετρήσεων, ώστε να δίνονται απλοποιημένα αποτελέσματα για γρήγορη και έγκυρη αντιμετώπιση ([Branko Glisic & Daniele Inaudi, 2008](#)).

3. Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers)

Η επιτάχυνση μετριέται σε δυναμικά συστήματα. Πιεζοηλεκτρικοί, οπτικοί, χωρητικοί, σερβομετρικοί, με λέιζερ είναι μερικοί τύποι επιταχυνσιόμετρων (Εικόνα 3-1). Η επιλογή τους γίνεται βάσει της ευαισθησίας και το εύρος των συχνοτήτων απόκρισης. Είναι ανθεκτικά σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, καταπόνησης, πίεσης και ραδιενεργού περιβάλλοντος ([Wang et al., 2014](#)). Το εύρος συχνοτήτων με ακρίβεια στη καταγραφή θα πρέπει να επιτυγχάνεται στο μέγιστο της ισχύος απόκρισης ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Το κόστος είναι χαμηλό, η μέγιστη επιτάχυνση είναι 8g και η ευαισθησία ενός 16 bit είναι 1 mg. Η δειγματοληψία μπορεί να είναι 125-1000 Hz ([Maria Pina Limongelli & Mehmet Çelebi, 2019](#)).



α) Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο (PCB Piezoelectronics), β) Οπτικό επιταχυνσιόμετρο (BestechAustralia), γ) Επιταχυνσιόμετρο σερβομηχανισμού (Tokyo Sokushin)

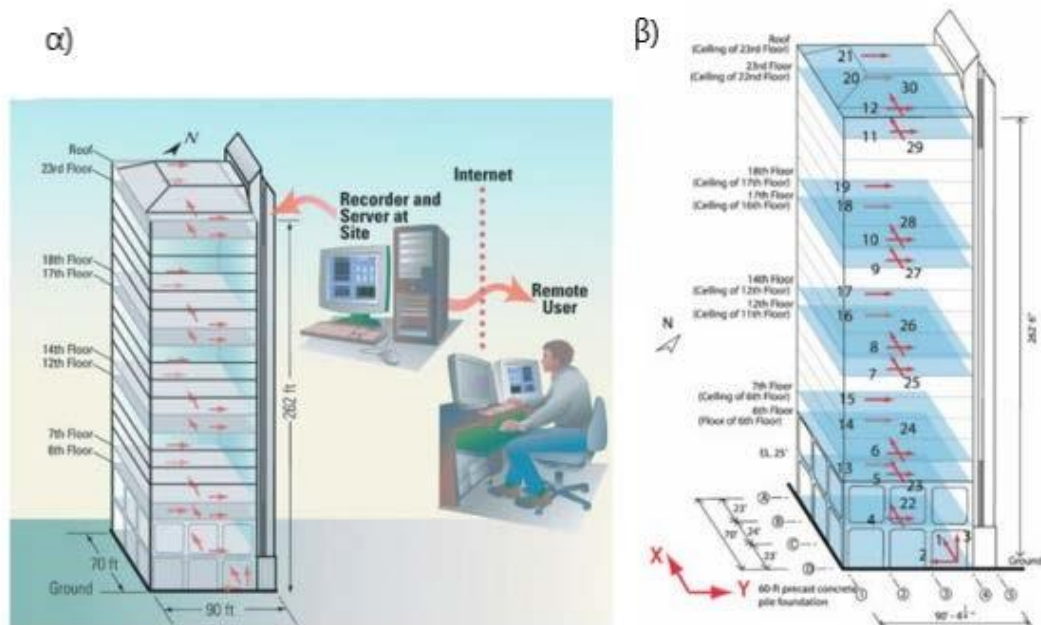
Εικόνα 3-1: Τύποι επιταχυνσιόμετρων (Wang et al., 2014) [13]

Συχνά τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αγωγούς για τον εντοπισμό λέπτυνσης στα τοιχώματά τους ([Seong et](#)

[al., 2004 & Hur et al., 2004 & Lee et al., 2004](#)). Βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει ευαισθησία σε τοπικές βλάβες, έτσι είναι δύσκολος ο εντοπισμός αστοχιών σε πρώιμο στάδιο.

Χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο. Το ιδανικότερο θα ήταν να τοποθετούνταν πολλά επιταχυνσιόμετρα, αλλά πάλι το πρόβλημα είναι οικονομικό. Άρα θα πρέπει να μελετηθεί η εγκατάστασή τους, όπως καταγράφηκε και στα παραπάνω κεφάλαια. Η εγκατάστασή τους γίνεται σε τοπικό επίπεδο και παράλληλα με γειτονικούς ορόφους για να βοηθούν στον καλύτερο υπολογισμό της μετατόπισης. Αφού γίνουν οι μετρήσεις ψηφιοποιούνται και μεταφέρονται σε κεντρικό σύστημα υπολογιστή.

Στο σχήμα 3-2α παρουσιάζονται οι μετακινήσεις που δέχεται το κτίριο και ο τρόπος λήψης και μεταφοράς της δομικής πληροφορίας σε έναν υπολογιστή που βρίσκεται στην τοποθεσία ή είναι απομακρυσμένος. Στο σχήμα 3-2β υπάρχει ένα σύστημα αρίθμησης των επιταχυνσιόμετρων και ο προσανατολισμός που έχουν στο κτίριο.



α) λήψη και μετάδοση μετρήσεων από παρακολούθηση κτιρίου 24 ορόφων με χρήση επιταχυνσιόμετρων, β) σύστημα αρίθμησης και προσανατολισμοί επιταχυνσιόμετρων

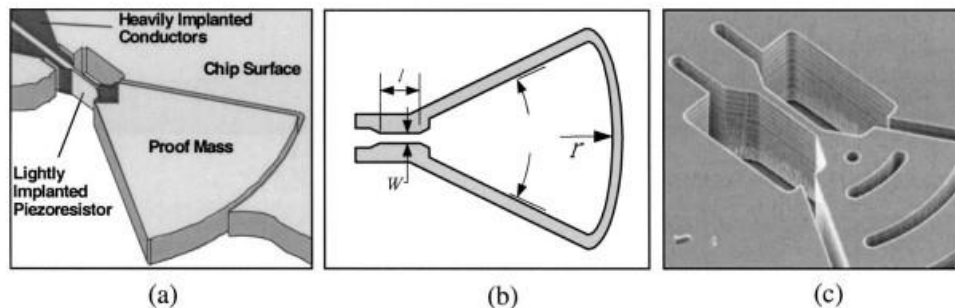
Εικόνα 3-2: Τύποι επιταχυνσιόμετρων (Maria Pina Limongelli & Mehmet Çelebi, 2019) [14]

Οι ιδιοκτήτες ήθελαν με αυτό το τρόπο να παρακολουθούν το κτίριο έπειτα από σεισμό και να μπορούν να δώσουν τον ακριβή χρόνο επαναλειτουργίας μετά από αυτόν. Έγινε πρακτικά μία συσχέτιση του προϋπολογισμού και της αξιοπιστίας με την χρήση αυτού του συστήματος. Στο κτίριο χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο επιταχυνσιόμετρων που μετράει τις αναλογίες μετατόπισης ανά ζεύγος ρών ([Maria Pina Limongelli & Mehmet Celebi, 2019](#)).

3.1 Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα

Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα περιέχουν έναν διαφορικό πυκνωτή που διεγείρεται από τη δομική μάζα. Όμως η εξέλιξη του πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου το έθεσε σε προτεραιότητα χρήσης. Ο χαμηλός θόρυβος σε υψηλές συχνότητες το καθιστά καλύτερο. Βέβαια η χρήση του γίνεται για τον εντοπισμό σοβαρών αστοχιών ([Jerome P. Lynch et al., 2003](#)). Ο χαλαζίας βρίσκεται σε αρκετά επιταχυνσιόμετρα και είναι ανθεκτικός σε βάθος χρόνου και σταθερός στη θερμοκρασία. Οι ενισχυτές τάσεις επιτρέπουν υψηλό επίπεδο κραδασμών ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

Η τοποθέτηση ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου στο πάνω τμήμα ενός στοιχείου κάμψης χρησιμοποιείται για την εκτός επιπέδου αστοχία. Οι πιέσεις που δέχεται ο αισθητήρας δημιουργεί αλλαγές στην ηλεκτρική αντίσταση ([Senturia, 2001](#)). Ο σχεδιασμός ξεκινάει με μία καμπυλωτή μάζα ενσωματωμένη με τον αισθητήρα (Εικόνα 3-3). Όταν προκληθεί μια μεταβολή στην καταπόνησή του υποβάλλεται σε αλλαγή η αντίσταση. Σύμφωνα με τη μελέτη το στοιχείο κάμψης έχει τοποθετηθεί έτσι, ώστε να επιβάλλονται στον αισθητήρα οι πιέσεις. Η καμπυλωτή μάζα εξυπηρετεί στην πλευρική στάση έναντι της κίνησης της μάζας για να παρέχεται η μέγιστη επιτάχυνση. Το παραπάνω σύστημα αποτρέπει τις μη γραμμικές καμπτικές καταγραφές.



α) σύνδεση αισθητήρα-καμπυλωτής μάζας, β) φυσικές διαστάσεις, γ) επίπεδο πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου

Εικόνα 3-3: Σχεδιασμός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου (Jerome P. Lynch et al., 2003) [15]

Για να δίνεται η μέγιστη επιτάχυνση του αισθητήρα, η ακτίνα της καμπύλης (r) μεγιστοποιείται με την ταυτόχρονη μείωση του πλάτους κάμψης w . Για τη διεπαφή με τους μικροελεγκτές χρησιμοποιείται ενισχυτής για την μετατροπή της διαφορικής τάσης σε ενιαία τάση.

Ο εντοπισμός αστοχιών βάσει τοπικών αποκρίσεων γίνεται καλύτερα με τη χρήση πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου, για το λόγο πως δέχονται υψηλότερη συχνότητα σε σχέση με τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα. Ο θόρυβος είναι κάτι που πρέπει να απασχολεί τους υπεύθυνους, ώστε να μην επηρεάζει τις μετρήσεις. Μια ασύρματη μονάδα ανίχνευσης συνδέεται με το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο για την δομική απόκριση του συστήματος ([Jerome P. Lynch et al., 2003](#)).

Τα πλεονεκτήματα είναι η εύκολη εγκατάσταση, η μεγάλη ποικιλία πιεζοηλεκτρικών συστημάτων και το χαμηλό κόστος. Μειονεκτήματα μπορεί να θεωρηθούν οι γνώσεις που απαιτούνται για τους δομικούς κραδασμούς από έμπειρους μελετητές, η δυσκολία μακροχρόνιας λειτουργίας, η ευθραυστότητα και ότι δεν σχετίζονται άμεσα με τη δομική παρακολούθηση. Τέλος για να ολοκληρωθεί όλο αυτό σύστημα εγκατάστασης και να λειτουργεί εναρμονισμένα, χρειάζεται ένας

συνοδευτικός εξοπλισμός που αυτόματα το καθιστά ως αντιοικονομικό ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

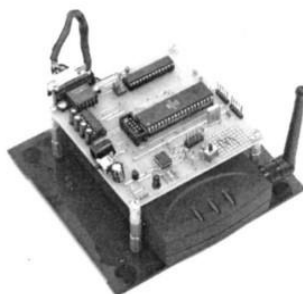
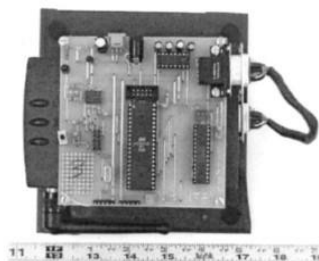
3.2 Ασύρματη δομική παρακολούθηση

Η επέκταση της δομικής παρακολούθησης έχει στραφεί στις ασύρματες επικοινωνίες και τους χαμηλής κατανάλωσης μικροελεγκτές. Το ασύρματο σύστημα παρακολούθησης είναι μόνιμα ενσωματωμένο σε δομικά μέλη για την καταγραφή των μετρήσεων. Το σύστημα χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Τις ασύρματες επικοινωνίες, τη διεπαφή ανίχνευσης και τον υπολογιστικό πυρήνα. Στη διεπαφή μπορούν να ενσωματωθούν πολλοί αισθητήρες που μετρούν διάφορα δεδομένα δομικής απόκρισης. Υπάρχει εκεί ένας μετατροπέας στον πυρήνα του υποσυστήματος μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό Texas Instruments ADS7821 (A/D). Η μετατροπή είναι 16 bit και ο ρυθμός δειγματοληψίας φτάνει έως 100 kHz. Όμως καθορίζεται σταθερός ρυθμός δειγματοληψίας, λαμβάνονται μετρήσεις, μεταφέρονται από τον πυρήνα και αποθηκεύονται στη μνήμη του συστήματος. Αφού αποθηκευτούν οι μετρήσεις, ο πυρήνας μπορεί να φιλτράρει τα δεδομένα και να μεταφέρει τη πληροφορία στις υπόλοιπες μονάδες ανίχνευσης του έργου.

Μία νέα μέθοδος είναι η ενσωμάτωση δύο πυρήνων, με έναν χαμηλής ισχύος μικροελεγκτή 8 bit για την λειτουργία της μονάδας και έναν αυξημένης ισχύος μικροελεγκτή 32 bit για ανάκτηση δεδομένων από τη δομή. Έτσι ο μικροελεγκτής 32 bit λόγω της αυξημένης ισχύος του, ενεργοποιείται η λειτουργία του μόνο όταν απαιτείται για λόγους εργασίας ([Jerome P. Lynch et al., 2003](#)). Οι διαστάσεις της ολικής μονάδας ανίχνευσης είναι 10x10x4 cm (Εικόνα 3-4). Μια πλακέτα της μονάδας περιλαμβάνει τους δύο μικροελεγκτές, τον μετατροπέα του αναλογικού σε ψηφιακό και ό,τι είναι απαραίτητο για την ορθή λειτουργία από ηλεκτρονικά στοιχεία ([Ginsberg, 1990](#)).

Το χαμηλό κόστος χρήσης επιτρέπει μεγαλύτερες κομβικές πυκνότητες. Με την εγκατάσταση πολλαπλών ασύρματων αισθητήρων δημιουργείτε ένα σύμπλεγμα για τον εντοπισμό τοπικών αστοχιών. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η σύνδεση ασύρματου αισθητήρα με τους υπολογιστικούς πόρους. Έτσι ικανοποιείται ταυτόχρονα η επεξεργασία

των δεδομένων δίδοντας αυτονομία στο σύστημα. Όλο αυτό για να αποτελέσει ένα ενιαίο σύστημα χρειάζεται ένα λογισμικό.



Εικόνα 3-4: Σχεδιασμός πιεζοαντιστατικού επιταχυνσιόμετρου
(Jerome P. Lynch et al., 2003) [16]

Με βάση το λογισμικό οι ασύρματοι αισθητήρες λειτουργούν αυτόνομα ή συλλογικά με το υπόλοιπο σύστημα εγκατεστημένων αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα το λογισμικό βρίσκεται στον πυρήνα του ασύρματου αισθητήρα συνδεδεμένο με το υπολογιστικό σύστημα. Έτσι λαμβάνει τις μετρήσεις, τις επεξεργάζεται, τις αποθηκεύει και αντιλαμβάνεται την ανάγκη επικοινωνίας με άλλους ασύρματους αισθητήρες του δικτύου όποτε κρίνεται αναγκαίο.

Η τοποθέτηση του αισθητήρα γίνεται σε κρίσιμες περιοχές για εύρυθμη λειτουργία όλου του δικτύου. Ένας μεμονωμένος αισθητήρας για να μπορεί να αλληλεπιδρά με άλλους και να μεταφέρει στοιχεία σε χώρους αποθήκευσης χρειάζεται έναν πομποδέκτη. Ένας ραδιοπομποδέκτης είναι κατάλληλος για αυτή τη χρήση με το ηλεκτρικό εξάρτημά του. Βέβαια να σημειωθεί πως οι ραδιοσυχνότητες πρέπει να είναι μεταξύ κάποιων ορίων που ποικίλουν βάσει της εκάστοτε χώρας που χρησιμοποιούνται (Lynch & Loh, 2006). Στην Ελλάδα υπάρχουν αναλυτικοί πίνακες από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ).

Τα σήματα που μπορούν να προκύψουν είναι της στενής ζώνης (FM και PM) και ευρέως φάσματος. Το πρόβλημα στα σήματα στενής ζώνης είναι η επιρροή τους από φυσικά φαινόμενα ([Mittag, 2001](#)). Έτσι συνηθίζονται να προτιμάται το σύστημα με τα σήματα ευρέως φάσματος. Η πιθανότητα παρεμβολής μειώνεται σημαντικά ([Bensky, 2004](#)).

Έμφαση δίνεται και στο μήκος διάδοσης του πομποδέκτη. Σε ένα μεγάλο έργο μπορεί η απαίτηση σήματος να ξεπερνάει τα 100 μέτρα. Η κατανάλωση της ισχύος του πομποδέκτη εξαρτάται άμεσα από το μήκος της εμβέλειας ([Rappaport, 2002](#)). Υπάρχει όμως και απώλεια διαδρομής. Αυτό σημαίνει πως η ισχύς του σήματος χάνεται, διότι βρίσκει εμπόδια όπως τοίχους. Το σήμα που διεισδύει στο υλικό επηρεάζει και την συνολική ποσότητα ισχύος που χάνεται ([Seidel and Rappaport, 1992, Davidson and Hill, 1997](#)).

Αν απαιτηθεί μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος, τότε και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε έναν αισθητήρα θα είναι μεγαλύτερη. Η ισχύς περιορίζεται από τα δάπεδα ή την τοιχοποιία και ονομάζεται απώλεια διαδρομής. Οι κόμβοι αισθητήρων επικοινωνούν με κοντινούς κόμβους, αλλά η εμβέλεια τους είναι περιορισμένη για απομακρυσμένους. Το σημείο τοποθέτησης της κεραίας είναι σημαντική παράμετρος, αλλά ο αριθμός τους θα πρέπει να επιλέγεται με προσοχή λόγω του υψηλού κόστους. Μία λύση ανεπιτυχούς σύνδεσης δύο απομακρυσμένων κόμβων είναι η διαμεσολάβηση από κόμβο σε κόμβο. Όμως αυτό επιφέρει επιβάρυνση στο δίκτυο ([Zhao and Guibas, 2004](#)). Επίσης υπάρχει ένα άλλο σύστημα όπου κεντρικοί κόμβοι συλλέγουν μετρήσεις από υποδίκτυα και τα μεταφέρουν σε ένα κεντρικό σύστημα. Οι κεντρικοί κόμβοι είναι ικανοί σε λειτουργία μεγάλης ισχύος και απόδοσης ([Mitchell et al., 2002](#)). Για να επικοινωνούν οι κόμβοι χρειάζεται ένα ψηφιακό ασύρματο ραδιόφωνο, διότι ο αισθητήρας παράγει αναλογικό σήμα ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιείται στην επικοινωνία, την ανίχνευση και την επεξεργασία των μετρήσεων. Έτσι για τη μείωση των δεδομένων η επεξεργασία πραγματοποιείται στη μονάδα ανίχνευσης ([You-Lin Xu & Jia He, 2017](#)). Η επιλογή ασύρματων αισθητήρων και η απουσία καλωδίων, γεννά την

ταυτόχρονη δημιουργία φορητών μέσων στην τροφοδοσία. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μπαταρίες είναι μία λύση που περιορίζει την συνεχή λειτουργία των αισθητήρων και η αντικατάστασή τους είναι δύσκολη λόγω περιορισμένης πρόσβασης στο σημείο που ενδέχεται να υπάρχει ([Lynch & Loh, 2006](#)).

Υπάρχουν δύο κύριες τοπολογίες συστημάτων:

- 1) Η τοπολογία star (single-hop) συλλέγει πληροφορίες τις οποίες μεταβιβάζει σε ένα κεντρικό σύστημα. Αυτό το σύστημα βοηθάει στη γρήγορη συλλογή και αποθήκευση δεδομένων χωρίς απώλειες κατ' αυτή τη διαδρομή ([B. Mukherjee, 1992](#)). Το μειονέκτημα είναι πως η εμβέλεια του είναι περιορισμένη για μεγάλες αποστάσεις.
- 2) Το multi-hop περιλαμβάνει πολλούς κόμβους που μεταφέρουν την πληροφορία προς το κεντρικό σύστημα. Κάθε κόμβος λειτουργεί ταυτόχρονα ως δέκτης και πομπός. Το σύστημα παρέχει τη πληροφορία της ορθής διαδρομής των μετρήσεων από τους κόμβους στο κεντρικό σύστημα ([Pakzad et al., 2008](#)).

Σημαντική προσπάθεια των μελετητών είναι η μετατροπή των αισθητήρων από συλλεκτήρες δεδομένων σε έξυπνα συστήματα ([Dargie et al., 2012 & Torfs et al., 2013](#)). Με αυτό το τρόπο οι αισθητήρες ανίχνευσης μετατρέπονται σε συστήματα με ικανότητα στην επεξεργασία δεδομένων. Έτσι περιορίζεται ο τεράστιος όγκος των δεδομένων που θα έπρεπε ο χρήστης να επεξεργαστεί και εξετάσει ([Straser and Kiremidjian, 1998](#)). Η τοποθέτηση τους γίνεται άμεσα και αν χρειαστεί η επείγουσα παρακολούθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Για να υφίσταται αξιόλογη απόδοση του συστήματος χρειάζεται η χαμηλή κατανάλωση ρεύματος, η ορθή μετάδοση των δεδομένων και η μετάδοση σε μεγαλύτερο εύρος. Προσπάθεια υπάρχει στην αύξηση του χρόνου λειτουργίας, διότι παρατηρείται γρήγορη αποφόρτιση της μπαταρίας.

Έτσι δεν είναι εφικτή η μακροχρόνια παρακολούθηση. Η δημιουργία πιο αποτελεσματικών αλγορίθμων και η φόρτιση του συστήματος από πηγές ενέργειας του περιβάλλοντος μπορούν να παρατείνουν το χρόνο

λειτουργίας ([Park et al., 2008](#)). Η συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων μπορεί να επιφέρει υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ η μείωση του όγκου μπορεί να επιφέρει λανθασμένα συμπεράσματα στις μετρήσεις. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει μία αναλογία κατανάλωσης ενέργειας και συλλογής όγκου δεδομένων ([Mukhopadhyay & Ihara, 2011](#)). Εξέλιξη στην απεξάρτηση από την παροχή ενέργειας η ανάπτυξη αισθητήρων ραδιοσυχνότητας (RFID). Με λίγα λόγια λαμβάνεται η ενέργεια του ραδιοφώνου ώστε να μεταφερθεί η μέτρηση ([Lynch & Loh, 2006](#)).

3.2.1 Εφαρμογή επί του έργου

Για την εφαρμογή της ενόργανης παρακολούθησης δομικής υγείας σε έργα, όπως γέφυρες ή κτιριακές μονάδες, χρειάστηκε η ανάπτυξη της σε εργαστηριακό επίπεδο. Στόχος των ερευνητών ήταν να παρακολουθήσουν την απόδοση των ασύρματων αισθητήρων σε σχέση με τους παραδοσιακούς αισθητήρες με καλώδια.

Η γέφυρα Alamosa Canyon χρησιμοποιήθηκε από τους Straser and Kiremidjian (1998) για την εκπόνηση της παρακολούθησης. Η γέφυρα εκτείνεται στα 15 μέτρα και έχει επτά τμήματα. Υπάρχουν επτά χαλύβδινες δοκοί που στηρίζουν το κατάστρωμα 18 cm. Τοποθετήθηκαν πέντε ασύρματοι αισθητήρες στο βόρειο τμήμα ενός από τα ανοίγματα δοκών. Παράλληλα εγκαταστάθηκε ένα παραδοσιακό σύστημα ανίχνευσης ως βάση σύγκρισης αποτελεσμάτων. Το παραδοσιακό καλωδιακό σύστημα ήταν ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο Piezotronics PCB336. Ο χρόνος εγκατάστασης του ασύρματου συστήματος είναι πολύ πιο σύντομος από την εγκατάσταση καλωδιακού συστήματος. Εκτιμάται πέντε φορές πιο σύντομος χρόνος με αυτόν του συστήματος περίπου στα 30 λεπτά.

Μετά την εγκατάσταση ελέγχεται η σύνδεση του φορητού υπολογιστή με τις ασύρματες μονάδες ανίχνευσης. Οι ασύρματοι αισθητήρες δίνουν ανά πάσα στιγμή την κατάσταση της γέφυρας και λαμβάνουν εντολές από το κεντρικό σύστημα. Το σύστημα αφού εγκατασταθεί δοκιμάζεται σε εξαναγκασμένους κραδασμούς και παρατηρείται η απόδοση και οι μετρήσεις που θα δώσουν τα ασύρματα συστήματα, βάσει της δομικής απόκρισης της επιτάχυνσης.



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

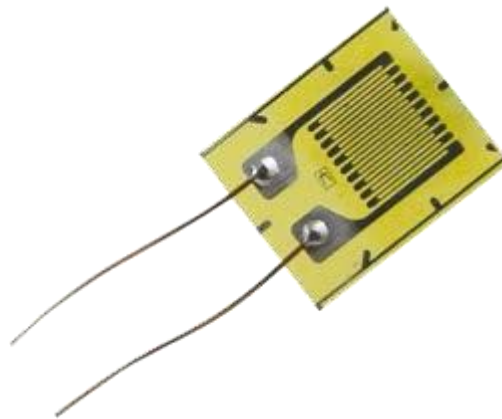
Τα επιταχυνσιόμετρα που τοποθετήθηκαν είναι συνδεδεμένα με τους ασύρματους αισθητήρες. Τα επιταχυνσιόμετρα είναι τα εποξειδικά Crossbow CXL01LF1 MEMS. Τα επιταχυνσιόμετρα PCB336 και τα Crossbow MEMS είναι δίπλα-δίπλα τοποθετημένα. Η επικοινωνία γίνεται βάσει του υπολογιστή ανά πάσα στιγμή.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην εξέλιξη του λογισμικού που υποστηρίζει τους ασύρματους αισθητήρες. Για εξοικονόμηση ενέργειας θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η χρήση της ασύρματης επικοινωνίας. Αυτό που πηγάζει μέσα από την χρήση κινητών τηλεφώνων είναι ότι υπάρχει εξέλιξη και στην αύξηση ζωής της μπαταρίας. Εναλλακτικά η ενέργεια προερχόμενη από τον ήλιο, τον άνεμο κ.λπ, μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της λειτουργίας των αισθητήρων ([Lynch & Loh, 2006](#)).

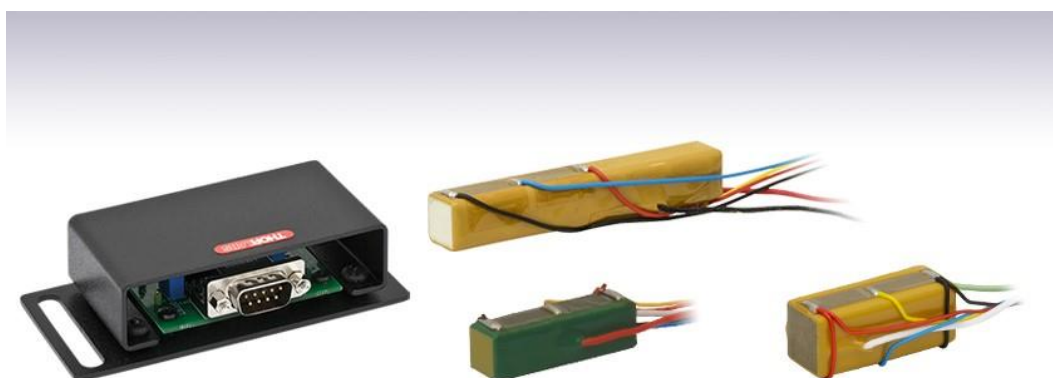
Γενικότερα οι ασύρματοι αισθητήρες δεν είναι τόσο εξελιγμένα συστήματα για παρακολούθηση της δομής σε μεγάλα έργα. Χρησιμοποιούνται κυρίως τα ενσύρματα συστήματα και τα ασύρματα είναι υποστηρικτικά. Ίσως μελλοντικά να έχουν κύριο ρόλο αν λυθούν τα προβλήματα με την κατανάλωση ρεύματος και την εμβέλεια επικοινωνίας ([You-Lin Xu & Jia He, 2017](#)). Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να λειτουργήσουν με την μπαταρία για μερικές ώρες σε πλήρη κατάσταση και για μερικές βδομάδες με διαστήματα αναστολής. Η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιφέρει πτώση στη λειτουργικότητα του συστήματος ([Swartz and Lynch, 2009](#)).

4. Αισθητήρες Καταπόνησης

Οι αισθητήρες καταπόνησης χρησιμοποιούνται σε δοκούς, καταστρώματα και ράβδους οπλισμού (Εικόνα 4-1). Τοποθετούνται με κόλλα σε δομικά στοιχεία και μετρούν δυνάμεις, όπως αξονικές, διατμητικές και καμπτικές. Γενικότερα σε κατασκευές που υπάρχουν διακυμάνσεις θερμοκρασίας επιλέγονται αισθητήρες που προσαρμόζονται σε τέτοια περιβάλλοντα. Οι αισθητήρες τάσης έχουν υποδοχή DC με ίδιο εύρος εξόδου στα 0-15 Volt. Οι μετρούμενες τάσεις μετατρέπονται σε καταπονήσεις ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

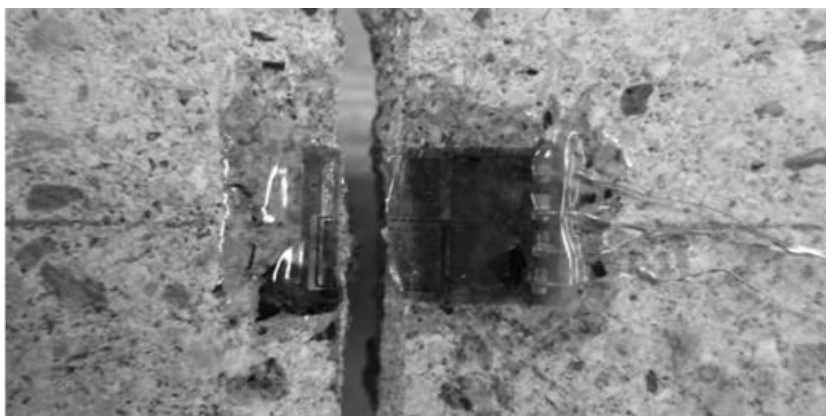


Εικόνα 4-1: Φύλλο μετρητή καταπόνησης (Ιστοσελίδα Kyowa-ei) [17]



Εικόνα 4-2: Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες με προσαρτημένους μετρητές τάσης (Ιστοσελίδα Thorlabs) [18]

Επίσης τα φύλλα ανίχνευσης ανιχνεύουν τις ρωγμές στη δομή. Μία πραγματική μέτρηση δεν μπορεί να θεωρηθεί όταν ο αισθητήρας είναι πάνω από μία ρωγμή (Εικόνα 4-3). Έτσι δεν μπορεί να ληφθεί υπόψιν η καταπόνηση υπό τέτοια συνθήκη ([Deans and Richards, 1979 & Unal and Okumus, 2000](#)). Παράμετροι που επηρεάζουν τις μετρήσεις είναι το περιβάλλον, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, ο τύπος της ρωγμής, το μήκος του αισθητήρα και το πως λαμβάνει ο αισθητήρας την καταπόνηση από τη δομή ([Papini and Spelt, 1992](#)).



Εικόνα 4-3: Σπάσιμο αισθητήρα πάνω στην ρωγμή (Tung et al., 2014) [19]

Εάν η τοποθέτηση των αισθητήρων καταπόνησης γίνει με σωστό τρόπο, οι τάσεις στη δομή θα είναι ίδιες με αυτές στους αισθητήρες. Η εύρεση της καταπόνησης μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση της τάσης

$$\frac{\Delta R}{R} = G \varepsilon$$

όπου $\Delta R/R$ είναι η ηλεκτρομηχανική τάση που ισούται με $G \times \varepsilon$. Το G είναι το πηλίκο της ποσοστιαίας αλλαγής της αντίστασης προς την ποσοστιαία αλλαγή του μήκους λόγω της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης. Το ε είναι η μηχανική τάση.

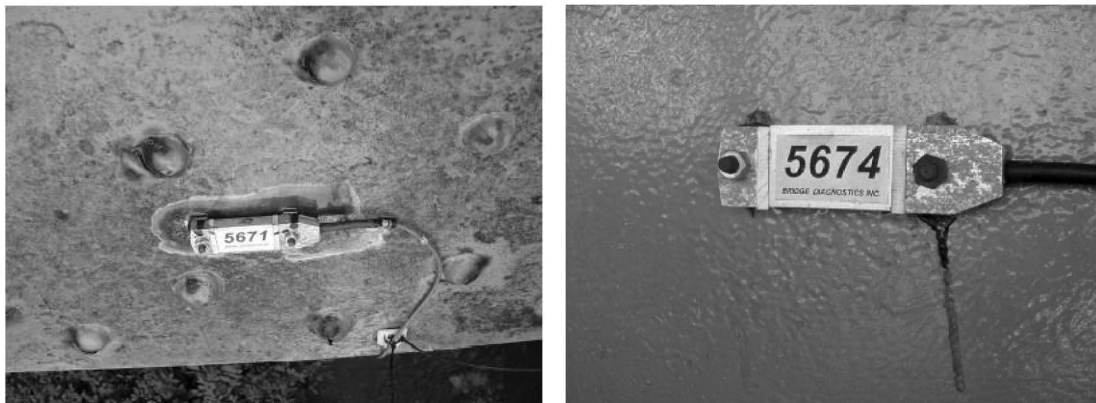
Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων καταπόνησης είναι η εύκολη συγκόλληση, η μέτρηση μέσης τάσης, η λήψη τριαξονικών παραμορφώσεων, η άμεση ένδειξη της καταπόνησης και η απόδοση

στατικών και δυναμικών αποκρίσεων. Οι μελετητές θα πρέπει να έχουν τη γνώση για τη λήψη και ερμηνεία των μετρήσεων, αλλά και για την κατάλληλη τοποθέτηση των αισθητήρων. Γνώση για τα μετρούμενα δεδομένα σε συνθήκες αλλαγής θερμοκρασίας. Τα μειονεκτήματα είναι η μη επαναχρησιμοποίηση των αισθητήρων, η αδυναμία για μακρόχρονη συνεχή χρήση και η σταθερή παροχή ρεύματος. Η προετοιμασία που απαιτείται είναι ο καθαρισμός των επιφανειών πριν την τοποθέτηση των αισθητήρων για καλή συγκόλληση.

4.1 Αποσυναρμολογούμενοι μετρητές τάσης

Οι αποσυναρμολογούμενοι μετρητές τάσεις χρησιμοποιούν συγκεκριμένο αριθμό μετρητών τάσεων που τοποθετούνται σε σταθερό περίβλημα. Στην εικόνα 4-3 παρουσιάζεται ένας αποσυναρμολογούμενος μετρητής τάσης ο οποίος καθίσταται επαναχρησιμοποιήσιμος. Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στα δύο άκρα μιας δομής, οπότε κάθε αλλαγή σχετίζεται με την μετρούμενη καταπόνηση.

Τα πλεονεκτήματα των αποσυναρμολογούμενων μετρητών τάσεων είναι ότι δεν χρειάζονται ιδιαίτερη προετοιμασία επιφάνειας, η εύκολη επισκευή και η τοποθέτησή τους, η λιγότερη εξειδίκευση, το χαμηλό κόστος και η επαναχρησιμοποίησή τους. Τα μειονεκτήματά τους είναι το απαιτούμενο μεγάλο μήκος μετρητή, η δυσκολία εγκατάστασης σε στενά μέρη και τα σφάλματα στην απόκριση από τις δομικές παραμορφώσεις λόγω της κακής συναρμογής στη δομή. Έπειτα το μεγάλο μέγεθος των μετρητών δυσχεραίνει την καταγραφή στην ίδια θέση για διάφορες κατευθύνσεις και η διάρκεια λειτουργίας τους είναι περιορισμένη. Τέλος οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στον συγκολλητικό μηχανισμό ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).



Εικόνα 4-4: Αποσυναρμολογούμενοι μετρητές τάσης (Ettouney & Alampalli, 2012) [20]

4.2 Δονούμενοι μετρητές καλωδίων

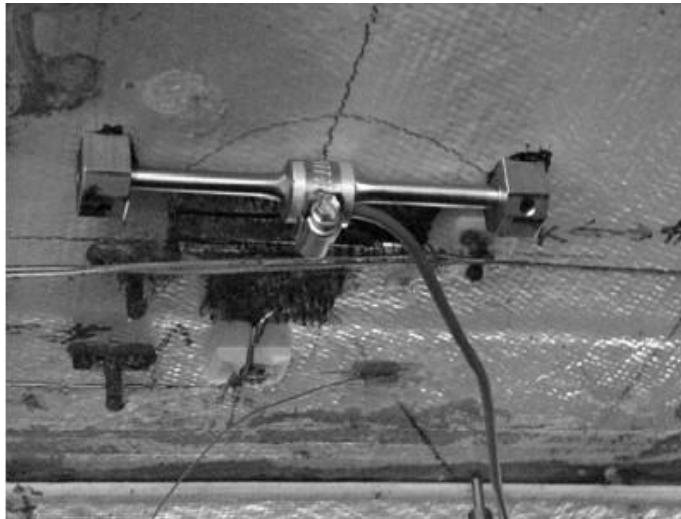
Οι μετρητές δονούμενου σύρματος είναι η δόνηση που δημιουργείται στο σύρμα από μία τάση και την άσκηση μιας δύναμης. Όλο αυτό χρησιμοποιείται σε μετρητές ρωγμών, πιεζόμετρα κυψελών φορτίου και μετρητές καταπόνησης. Ο τύπος της παραμόρφωσης είναι

$$e = K f f^2$$

όπου f η φυσική συχνότητα ενός δονούμενου σύρματος και K μια σταθερά ([Gage-Technique, 2011](#)). Η σταθερά εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας, το μήκος, την πυκνότητα του σύρματος και τη σταθερά της βαρύτητας. Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει την αλλαγή στην παραμόρφωση εάν γνωρίζουμε τη συχνότητα στην αρχική και τελική κατάσταση:

$$\Delta e = K (f f_1^2 - f f_2^2)$$

Οι δονούμενοι καλωδιακοί μετρητές έχουν δύο εξαρτήματα στα άκρα προσαρτημένα στη δομή και έναν σύρμα μεταξύ τους (Εικόνα 4-4). Όταν υπάρχει μία καταπόνηση τα δύο άκρα κινούνται και αυτό επιφέρει αλλαγή στο μήκος του σύρματος, καθώς και φυσική συχνότητα στο σύρμα. Η καταγραφή της φυσικής συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μέτρηση της καταπόνησης.

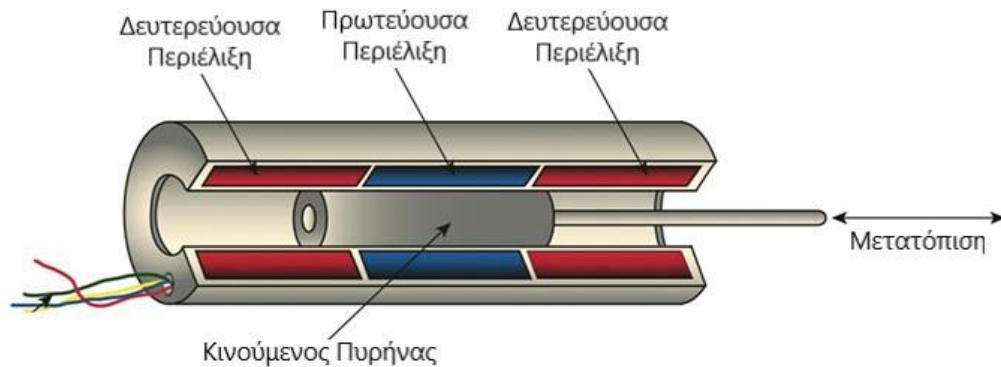


Εικόνα 4-5: Προσαρτημένος καλωδιακός μετρητής (Ettouney & Alampalli, 2012) [21]

Τα πλεονεκτήματα των δονούμενων μετρητών καλωδίων η εύκολη εγκατάσταση, η στιβαρότητα και ανθεκτικότητα ακόμα και στο υγρό στοιχείο. Η δυνατότητα μεταφοράς των μετρήσεων σε μεγάλη απόσταση χωρίς σφάλματα και η μέτρηση θερμοκρασίας στη δομή είναι βασικά χαρακτηριστικά. Τα μειονεκτήματά τους είναι η αδυναμία δυναμικών μετρήσεων, το μεγαλύτερο μέγεθος από τους μετρητές φύλλου και η δυσκολία κατανόησης και ερμηνείας των δεδομένων σε μακράς διάρκειας εφαρμογές.

4.3 Προσδιορισμός θέσης

Η θέση ενός στοιχείου καθορίζεται από έναν γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή. Έτσι η θέση μετατρέπεται σε τάση DC και διαβάζεται μέσω ενός αναγνώστη. Αναλυτικότερα υπάρχει μια βαλβίδα επέκτασης η οποία κινείται μεταξύ κάποιων περιελίξεων του μετασχηματισμού δημιουργώντας μία διακύμανση στην επαγωγή. Η κίνηση γίνεται ανάμεσα σε πρωτογενείς και δευτερογενείς περιελίξεις. Ανάλογα με τη θέση της προέκτασης της βαλβίδας δίνει την ανάλογη τάση εξόδου. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 4-5 και 4-6.



Εικόνα 4-6: Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (Ιστοσελίδα Motioncontroltips) [22]



Εικόνα 4-7: Τυπική μονάδα γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (Ιστοσελίδα Passive-components) [23]

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι η αξιοπιστία, οι σπάνιες αστοχίες και η λεπτομερής μέτρηση ως 0,01 microns. Τα μειονεκτήματα είναι η επίδραση των μεταβολών στη θερμοκρασία, που ενδέχεται να επηρεάσει τις μετρήσεις σε βάθος χρόνου, η δυσκολία εφαρμογής στη δομή, η περιορισμένη ευαισθησία και εύρος λειτουργίας.

5. Μετρητές Δύναμης

Οι δυναμοκυψέλες είναι συσκευές που μετράνε το φορτίο σε ένα δομικό μέλος. Το φορτίο αυτό μετατρέπεται σε σήμα εξόδου μέσω διάφορου μηχανισμού ανίχνευσης του βάρους ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)). Οι υδραυλικές κυψέλες χρησιμοποιούνται όταν δεν απαιτείται παροχή ρεύματος σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Οι κυψέλες φόρτισης μετρητών καταπόνησης έχουν ακρίβεια πολλή υψηλή και κυμαίνεται από 0,03% έως 0,25% κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην ψηφιοποίηση της μετρούμενης δύναμης για ανάλυση και ανάγνωση των αποτελεσμάτων από τον χρήστη. Υπάρχουν τρία είδη κυψελών φόρτισης. Οι υδραυλικές, οι πνευματικές και οι μετρητές καταπόνησης. Οι κυψέλες μετρητών καταπόνησης είναι η συνηθέστερες που χρησιμοποιούνται μέσω μετρούμενης τάσης η οποία ψηφιοποιείται αποδίδοντας βάρος. Γενικότερα οι κυψέλες φόρτισης χρησιμοποιούνται λόγω της ακρίβειας ([Ιστοσελίδα Omega](#)).

Το φορτίο υπολογίζεται από την σχέση:

$$P = e(E A)$$

όπου e η καταπόνηση, το E το μέτρο ελαστικότητας και το A η επιφάνεια της διατομής.

Τα πλεονεκτήματα είναι το μικρό μέγεθος, η ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες, η ευκολία εγκατάστασης σε δύσκολα σημεία, μεγάλη διάρκεια ζωής, το χαμηλό κόστος και η καλή γραμμικότητα εντός του εύρους ελαστικότητας. Τα μειονεκτήματα είναι η χρήση εξωτερικής ενίσχυσης σήματος, διότι παρατηρείται χαμηλή ηλεκτρική έξοδος. Αυτό συμβαίνει συνήθως στους μετρητές καταπόνησης. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην υδατική στεγανότητα και αποφυγή της υγρασίας, καθώς δεν θα πρέπει να παρεμβάλλεται η επαφή κατά τη συγκόλληση του μετρητή στη δομή ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

6. Αισθητήρας Διάβρωσης (Corrosion Sensors)

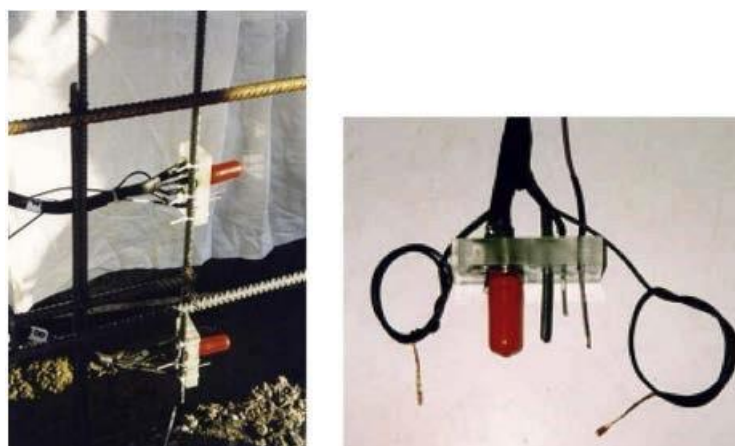
Η διάβρωση είναι φαινόμενο που συναντάται λόγω εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών και είναι παράγοντας σχεδιασμού τόσο για το σκυρόδεμα, όσο και για τους οπλισμούς. Ειδικότερα σε παράκτιες περιοχές με τον άνεμο μεταφέρονται τα διαβρωτικά στοιχεία του θαλασσινού νερού. Όπως παρόμοιος κίνδυνος λαμβάνεται σε βιομηχανικές περιοχές από την παρουσία διοξειδίου του θείου ([R.E. Wilmot, 2007](#)). Η διάβρωση μπορεί να είναι συγκεντρωμένη σε μικρές περιοχές ή σε ένα ολόκληρο σημείο. Υπάρχουν τέσσερα σημαντικά στάδια στρατηγικής για τη διάβρωση στην κατασκευή. Η αναμονή για εμφάνιση αστοχιών, η προγραμματισμένη επίβλεψη και συντήρηση της κατασκευής, η χρήση υλικών που προστατεύουν και παρατείνουν τη ζωή των δομικών μελών από τη διάβρωση και η επίβλεψη κρίσιμων σημείων για διάβρωση.

Η αναμονή για εμφάνιση αστοχιών έχουν να κάνουν με την επισκευή ή αντικατάσταση υλικών μετά την εμφάνιση της διάβρωσης. Η στρατηγική αυτή χρησιμοποιείται μόνο όταν η ασφάλεια δεν είναι κρίσιμης σημασίας για τη δομική ακεραιότητα του έργου. Για τη επίβλεψη και συντήρηση της κατασκευής σημαντική είναι η χρήση των αισθητήρων διάβρωσης, για τον κατάλληλο προγραμματισμό των επιθεωρήσεων. Αν εκλείψουν τα συστήματα διάβρωσης ενδέχεται οι συχνές επιθεωρήσεις να δημιουργούν πρόβλημα με τη διακοπή της χρήσης του έργου και την αύξηση του κόστους. Αντίθετα η μείωση της παρακολούθησης από το σύστημα διάβρωσης επιφέρει καθυστέρηση στους χρόνους επιθεώρησης, άρα και στις κινήσεις επιδιόρθωσης των προβλημάτων. Συνεπώς οι πιθανές αστοχίες να είναι μη αναστρέψιμες και επικίνδυνες. Τα συστήματα διάβρωσης μειώνουν την χρήση υλικών αντιδιαβρωτικής προστασίας και της ποσότητάς τους.

Συνεπώς μεγάλη σημασία χρίζει η επιλογή σημείων κρίσιμων στην κατασκευή που τα αποτελέσματα πιθανής αστοχίας είναι σοβαρά. Τα κρίσιμα σημεία καθορίζονται από την εμπειρία σε θέματα διάβρωσης και τις ενδείξεις από άλλες περιπτώσεις. Για παράδειγμα σε μία δεξαμενή νερού το κρίσιμο σημείο διάβρωσης είναι μεταξύ νερού και αέρα. Έτσι ο αισθητήρας τοποθετείται σε πλωτό σύστημα και

ανεξάρτητα της στάθμης του νερού καταγράφεται η διάβρωση. Ο σχεδιασμός και η τοποθέτηση του αισθητήρα πρέπει να γίνεται με κατάλληλο τρόπο, ώστε οι μετρήσεις να είναι ορθές και να μην υπάρχουν λάθη ([Myer Kutz, 2013](#)).

Υπάρχουν τύποι αισθητήρων κατάλληλοι για εφαρμογή μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και αισθητήρες που τοποθετούνται πριν την χύτευση του σκυροδέματος πάνω στους οπλισμούς (Εικόνα 6-1, 6-2) ([I. Martínez & C. Andrade, 2009](#)). Στην εικόνα 6-1 για την παρακολούθηση της διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς και ένας ανοξειδωτος δίσκος ως αντίθετο ηλεκτρόδιο ([Feliú S et al., 1996](#)). Στην εικόνα 6-2 ο αισθητήρας είναι προσαρτημένος στη δομή μέσω τσιμεντοκονίας και αγώγιμος.



Εικόνα 6-1: Τοποθέτηση αισθητήρων στους οπλισμούς (I. Martínez & C. Andrade, 2009) [24]



Εικόνα 6-2: Τοποθέτηση αισθητήρων επί της κατασκευής (I. Martínez & C. Andrade, 2009) [25]

Η πρώτη ζώνη προστασίας του οπλισμού είναι το σκυρόδεμα. Η διαπερατότητα και η ποιότητα του σκυροδέματος είναι πολλή σημαντική. Η διαπερατότητα σχετίζεται με την αναλογία νερού/τσιμέντου και το μέγεθος των αδρανών. Απαραίτητη είναι μία καλή συμπύκνωση με δονητή. Το πάχος στρώσης σκυροδέματος του οπλισμού συμβάλλει στην προστασία του, αλλά συχνά συναντώνται δυσκολίες στην έκχυση του σκυροδέματος. Έτσι μπορεί το πάχος να μην είναι τόσο μεγάλο λόγω των πρακτικών δυσκολιών. Αυτή η χαρακτηριστική μείωση του πάχους επιφέρει πιο άμεση έναρξη στη διάβρωση.



α)



β)



γ)



δ)

α) είσοδος διαβρωτικών ουσιών με εμφάνιση κηλίδων στο σκυρόδεμα, β) εμφάνιση ρωγμών, γ) θραύση σκυροδέματος, δ) πιθανή αστοχία

Εικόνα 6-3: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού και σκυροδέματος (R.E. Wilmot, 2007) [26]

Ενδεικτικά για 24 mm πάχους καλύμματος σκυροδέματος, ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης υπολογίζεται στα 100 χρόνια. Για 12 mm πάχους σκυροδέματος ο χρόνος έναρξης υπολογίζεται στα 15 χρόνια. Οι αντιδιαβρωτική προστασία των οπλισμών δεν αντικαθιστά την ποιότητα του σκυροδέματος και την κατάλληλη τοποθέτηση των οπλισμών. Στην εικόνα 6-3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της διάβρωσης και των συνεπειών της. Στο σημείο της θραύσης η αστοχία θεωρείται εκτεταμένη και η επισκευή έχει μεγάλο κόστος. Η διάρκεια ζωής καθορίζεται ως η λειτουργικότητα της κατασκευής χωρίς την επέμβαση επισκευής και συντήρησης με επιπλέον κόστος (R.E. Wilmot, 2007).

Οι ιδιότητες του νερού παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάβρωση, δηλαδή το pH, τα επίπεδα θειικών και χλωρίων και η σκληρότητα. Με τη διαπερατότητα του σκυροδέματος υπάρχει ταυτόχρονη χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση. Έτσι με την ηλεκτρική αντίσταση επιτρέπεται η καταγραφή των ρυθμών διάβρωσης του χάλυβα. Η οπτική παρακολούθηση γίνεται επιτακτική σε θέματα διάβρωσης της κατασκευής ([Tae-Hyun Ha, 2004](#)).

Οι αισθητήρες διάβρωσης είναι μία νέα τεχνολογία που καταγράφει τη διάβρωση του σκυροδέματος ή του χάλυβα. Με αυτό το τρόπο παρακολουθείται η αντιδιαβρωτική απόδοση των υλικών και προσδίδει μακροπρόθεσμη χρήση επί του έργου. Το μέγεθός τους ποικίλει. Οι τοποθέτηση μισής κυψέλης ([ASTM 1987](#)) προσδιορίζει την πιθανότητα του χαλύβδινου οπλισμού να διαβρωθεί. Βέβαια οι οπλισμοί έχουν μία παθητική μεμβράνη που λειτουργεί ως ασπίδα κατά της διάβρωσης. Το χαρακτηριστικό της είναι το πολύ υψηλό pH. Στη διάβρωση παίζει μεγάλο ρόλο και η τοποθεσία του έργου. Αν βρίσκεται κοντά σε θάλασσα, εκεί το οξειδωτικό περιβάλλον λόγω του αλμυρού νερού επηρεάζει πιο ενεργά τον χάλυβα οπλισμού.

Τα μειονεκτήματα του συστήματος μισής κυψέλης είναι η επίδραση στις μετρήσεις σε ξηρό περιβάλλον, η δυσκολία εγκατάστασης και απουσία οδηγιών για εφαρμογή στο πεδίο. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα σημεία τοποθέτησης, διότι από τους συγκεκριμένους αισθητήρες δεν μπορούν να ληφθούν δεδομένα για τη διάβρωση σε όλη την κατασκευή. Αυτό διότι οι αισθητήρες μετρούν τοπική διάβρωση. Όπως αναφέρθηκε η υγρασία κατέχει σημαντική επίδραση στη διάβρωση όπως και η θερμοκρασία.

Τα πλεονεκτήματα είναι η εφαρμογή εσωτερικά και εξωτερικά της δομής (Εικόνα 6-4), η ευελιξία, η μακρόχρονη και συνεχής χρήση γεγονός που καθιστά τη δομική παρακολούθηση πιο αξιόπιστη, η άμεση μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης και ο χειρισμός του συστήματος μακριά από το έργο ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)). Επιπρόσθετα προσδίδει ασφάλεια, μείωση του χρόνου διακοπής της λειτουργίας και του κόστους και έγκυρη προειδοποίηση για αστοχίες

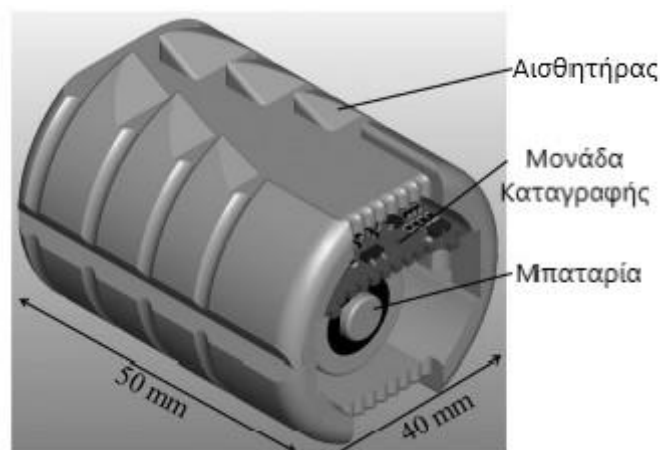
που μπορεί να επιφέρουν μεγαλύτερο κόστος στην επισκευή ([Myer Kutz, 2013](#)).



Εικόνα 6-4: Τοποθέτηση εξωτερικά αισθητήρα διάβρωσης (Ettouney & Alampalli, 2012) [\[27\]](#)

6.1 Ασύρματοι αισθητήρες διάβρωσης

Υπάρχουν και οι αισθητήρες διάβρωσης που μεταφέρουν πληροφορίες με ασύρματη λειτουργία. Το μέγεθος είναι 40mm πλάτους και 50mm μήκους επιτρέποντας την εγκατάστασή τους σε δύσκολα σημεία. Το σημείο ευαισθησίας είναι από σίδηρο ενσωματωμένο σε τέσσερις εγκοπές 10mm (Εικόνα 6-5).



Εικόνα 6-5: Ασύρματος αισθητήρας διάβρωσης (Budelmann et al., 2015) [28]

Η επιλογή των τεσσάρων συρμάτων δείχνει την πρόοδο της διάβρωσης κλιμακωτά και την αντοχή του σε βάθος χρόνου. Η τοποθέτηση του αισθητήρα γίνεται σε οπή διάτρησης (Φ 45-46 mm) και έπειτα γίνεται η αρμολόγηση με κονίαμα. Η εγκατάσταση τους στο φρέσκο σκυρόδεμα ή κονίαμα σε συνδυασμό με την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους δημιουργούν μία ισχυρή σύνδεση μεταξύ αισθητήρα και δομής.

Απαιτήση υπάρχει για την προστασία των ηλεκτρικών εξαρτημάτων από το νερό, όπως τα καλώδια, η μπαταρία και το κύκλωμα. Έτσι το κέλυφος αυτό θα πρέπει να αντέχει σε θερμοκρασία από -30 έως +60 βαθμούς Κελσίου, η σκλήρυνση να είναι γρήγορη, να παρέχεται μόνιμη στεγανότητα και προστασία από αλκαλικά υγρά. Σημαντική παράμετρος το ιξώδες να είναι μέτριο, καθώς αν είναι υψηλό στην ένωση δημιουργούνται κενά, ενώ όταν είναι χαμηλό υπάρχει κίνδυνος εμποτισμού του αισθητήρα. Τα βασικότερα στοιχεία στην ένωση είναι ο χρόνος σκλήρυνσης και το ιξώδες.

Η ασύρματη επικοινωνία επιτυγχάνεται με το σύστημα Bluetooth Low Energy Standard (BLE) και είναι εφικτή η επικοινωνία έως 30 μέτρα. Η λειτουργία Near-Field-Communication (NFC) είναι πιο περιοριστική καθώς η επικοινωνία γίνεται σε ελάχιστα εκατοστά απόστασης. Συσκευές με Android ή iOS χρησιμοποιούνται ως συσκευές συλλογής δεδομένων. Το σύστημα BLE εκτελείται σε συχνότητες 2,4 GHz και η χαμηλή κατανάλωση ρεύματος είναι θετικό πρόσημο για την επιλογή του. Η παρουσία ενός τροφοδοτικού στον αισθητήρα είναι απαραίτητη για την καταγραφή των δεδομένων. Η ζωή του συστήματος υπολογίζεται στα 15-20 χρόνια ([Budelmann et al., 2015](#)).

7. Αισθητήρας Θερμοκρασίας (Temperature Sensors)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων θερμοκρασίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία δομή. Ο ένας τύπος είναι αυτός του βιοϋλικού του αισθητήρα θερμοκρασίας, ο οποίος τοποθετείται σε ένα υλικό και καθώς παραμορφώνεται δίνει ένδειξη αλλαγών της θερμοκρασίας. Ο δεύτερος τύπος είναι αυτός της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Το θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται σε αγωγούς, δεξαμενές και γενικότερα όπου υπάρχει υδάτινο στοιχείο. Ο τρίτος τύπος είναι ο πυρο-ηλεκτρικός εκεί που το ηλεκτρικό φορτίο δημιουργείται από την θερμότητα. Ένας τέταρτος τύπος είναι των θερμοστοιχείων, όπου δύο ανόμοια υλικά με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες καταγράφουν τη θερμοκρασία δομικών στοιχείων ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

Τα θερμοστοιχεία είναι μετρητές που έχουν δύο αγωγούς μονωμένους και συγκολλημένους στο σημείο μέτρησης. Το εύρος θερμοκρασίας που μπορεί να ικανοποιήσει είναι από -250 έως 2500 βαθμούς Κελσίου ([Peak Sensors Ltd., 2007](#)). Προτιμώνται περισσότερο για την αξιοπιστία, το μικρό μέγεθός και την ανθεκτικότητά τους ([W.P., 2007](#)).

Τα θερμίστορ έχουν ένα σφαιρίδιο συνδεδεμένο με δύο καλώδια (Εικόνα 7-1) και μετρούν θερμοκρασία από -100 έως +300 βαθμούς Κελσίου. Γενικά αποφεύγονται σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίας, γιατί δεν είναι τόσο ανθεκτικά όπως τα θερμοστοιχεία και είναι επιρρεπή στις καταπονήσεις ([O'Brien et al., 2008](#)).



Εικόνα 7-1: Θερμίστορ (Ιστοσελίδα Passive-Components) [\[29\]](#)

Οι αισθητήρες θερμικής αντίστασης (RTD)(Εικόνα 7-2) λειτουργούν με την αλλαγή στην αντίσταση των μετάλλων που είναι από πλατίνα ή νικέλιο. Οι αισθητήρες θερμικής αντίστασης αντέχουν σε θερμοκρασιακό περιβάλλον που κυμαίνεται από -250 έως +650 βαθμούς Κελσίου. Παρέχουν υψηλή ακρίβεια, αλλά δεν έχουν την ίδια ανθεκτικότητα, ούτε την ίδια άμεση απόδοση σε σχέση με τα θερμοστοιχεία ([O'Brien et al., 2008](#)). Οι RTD λεπτής μεμβράνης έχουν χαμηλό κόστος, υψηλή ευαισθησία στη θερμική μεταβλητότητα, αλλά έχουν μικρότερη σταθερότητα από τους συρμάτινους αισθητήρες ([Dogan Ibrahim, 2002](#)).



Εικόνα 7-2: Αισθητήρας θερμικής αντίστασης (Ιστοσελίδα Labfacility) [30]

Γενικότερα με τους αισθητήρες θερμοκρασίας παρέχονται πληροφορίες για την σκλήρυνση και την αντοχή του σκυροδέματος, καθώς δεν χρειάζεται η αναμονή 28 ημερών για την επίτευξη μέγιστης αντοχής. Έτσι οι μηχανικοί πληροφορούνται για την αφαίρεση των ξυλοτύπων και το πότε χρονικά μπορεί να γίνει αυτό ([O'Brien et al., 2008](#)).

Με τη θερμογραφία καταγράφεται η επιφανειακή θερμοκρασία του σκυροδέματος, έτσι γνωρίζοντας τις ιδιότητές του, τυχόν αλλαγές μπορούν να προσδιορίσουν αστοχίες ή υποβαθμίσεις. Στην εικόνα 73 φαίνεται η καταγραφή της θερμοκρασίας καταστρώματος σε γέφυρα για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων. Η καταγραφή της θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί εξ' επαφής, αλλά και εξ'

αποστάσεως με την μέθοδο της τηλεπισκόπησης (RS). Η μέθοδος μειώνει το κόστος για την παρακολούθηση της δομικής υγείας και βοηθά στην έγκυρη επέμβαση στην κατασκευή ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)). Πιο συνηθισμένο σύστημα είναι οι υπέρυθρες που προσφέρουν φορητότητα και ικανοποιητική ανάλυση καταγραφής ([Hardy and Bolen, 2005](#)).



Εικόνα 7-3: Θερμογραφία οδοστρώματος γέφυρας (Courtesy Keith Ramsey) [\[31\]](#)

8. Καταπόνηση φορτίων ανέμου

Μια κατασκευή δεν υπόκειται μόνο σε σεισμικές δυνάμεις. Θα πρέπει να προβλεφθούν και τα φορτία ανέμου ειδικότερα σε γέφυρες και ψηλά πολυώροφα κτίρια. Τα φορτία ανέμου εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα της κατασκευής, την ταχύτητα του ανέμου και το γεωγραφικό περιβάλλον που ανήκει η κατασκευή. Ο άνεμος μπορεί να προκαλέσει διαμήκεις, εγκάρσιες και κατακόρυφες δυνάμεις. Το 1940 υπήρξε η αστοχία της γέφυρας Tacoma Narrow Bridge όπου είχε σχεδιαστεί για αντοχή σε ισχυρούς ανέμους, ενώ κατέρρευσε τελικά από ασθενής ανέμους ([Έλενα Ψύλλου, 2011](#)).

Στα παραπάνω η τοποθέτηση ανεμόμετρων συμβάλλουν στην καταγραφή των μετρήσεων (Εικόνα 8-1). Το ανεμόμετρο εξαγει τις μετρήσεις με ένα καλώδιο οπτικής ίνας ([Ding, Yuan & Wu, 2015](#)). Τα πτερύγια του ανεμόμετρου περιστρέφονται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου ([Busch and Kristensen 1976; Coppin 1982](#)).

Χαρακτηριστικό πρόβλημα είναι ότι μετά από δύο χρόνια τα ρουλεμάν του ανεμόμετρου θέλουν αλλαγή. Αυτό διότι με την συνεχή χρήση οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου δεν καταγράφονται.



Εικόνα 8-1: Ανεμόμετρο (Frank Vignola et.al, 2020) [\[32\]](#)

Όταν οι καιρικές συνθήκες το χειμώνα είναι κακές, ο πάγος μπορεί να ακινητοποιήσει στη θέση του το ανεμόμετρο. Συνεπώς κάποια όργανα

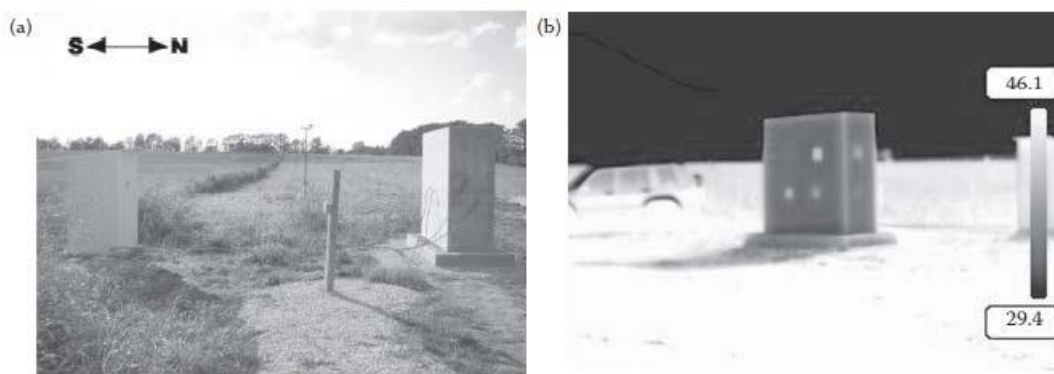
έχουν σύστημα θέρμανσης, ώστε να αποφευχθεί μία τέτοια κατάσταση ([Frank Vignola et.al, 2020](#)).

9. Εφαρμογές Σε Έργα Επιθεώρησης Δομικής Υγείας

9.1 Θερμογραφία

Η θερμική απεικόνιση βασίζεται στη καταγραφή της θερμοκρασίας σε μία επιφάνεια για την εύρεση των ελαττωμάτων κάτω από αυτή ([Ciang et al., 2008](#)). Οι ιδιότητες ενός υλικού έχουν σχέση με τη θερμότητα, έτσι μπορεί να προσδιοριστούν πιθανές υλικές ζημιές ([Stanley, 1997](#)). Στις κατασκευές υπάρχουν φθορές όπως η αποκόλληση εξαρτημάτων σκυροδέματος που προκαλούνται από τη διάβρωση του οπλισμού. Η οπτική επιθεώρηση φέρνει κυκλοφοριακές δυσκολίες με το κλείσιμο λωρίδων, αλλά και εκτενέστερο χρόνο για τους επιθεωρητές. Η λύση δίνεται από τους θερμογράφους IR που μπορούν άμεσα να δώσουν την κατάσταση μεγάλου μέρους της κατασκευής από απόσταση, αποτρέποντας τις παραπάνω επιζήμιες τεχνικές.

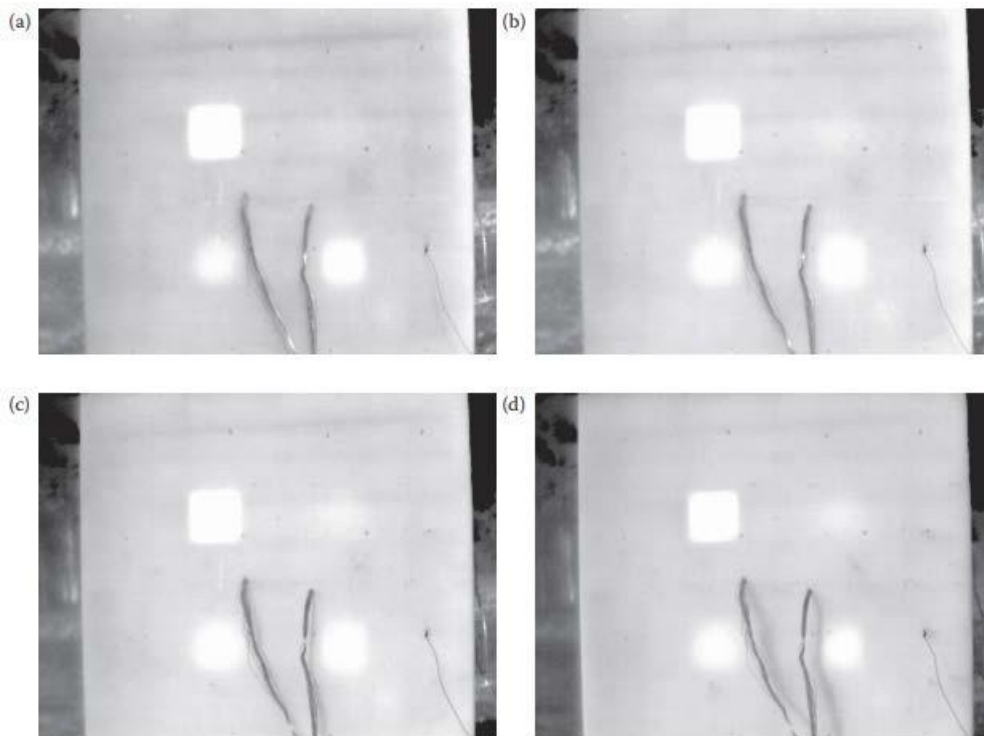
Οι Washer et al. (2008) έκαναν δοκιμές κατασκευάζοντας ένα κιβώτιο σκυροδέματος παρακολουθώντας την επίδραση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε αυτό (Εικόνα 8-1). Στόχοι από φελιζόλ εξοπλίζουν το κιβώτιο με συγκεκριμένα χωροθετημένα χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία IR για τον εντοπισμό βλαβών στο κιβώτιο. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις υφίστανται από τους ανέμους, τη βροχή, την υγρασία, την ηλιακή φόρτιση και τις θερμοκρασιακές μεταβολές.



Εικόνα 9-1: Τοποθέτηση θερμογραφικού καταγραφέα και εικόνα υπέρυθρων (Courtesy of Dr. Glenn Washer) [33]

Στην εικόνα 8-2 φαίνονται οι τέσσερις στόχοι και παρατηρούνται αλλαγές στην αντίθεση σε διαφορετικές ώρες μέσα στην ημέρα.

Συγκεκριμένα για τις ώρες α) 1:00 μ.μ., β) 1:30 μ.μ., γ) 2:30 μ.μ., δ) 4:00 μ.μ. Να σημειωθεί ότι στην εικόνα υπήρχε συνεχόμενη ηλιακή δραστηριότητα, άρα οι αντιθέσεις είναι ευκρινέστερες όπως και τα αποτελέσματα.



Εικόνα 9-2: Τοποθέτηση θερμογραφικού καταγραφέα και εικόνα υπέρυθρων (Courtesy of Dr. Glenn Washer) [34]

9.2 Θερμο-ελαστική μέθοδος

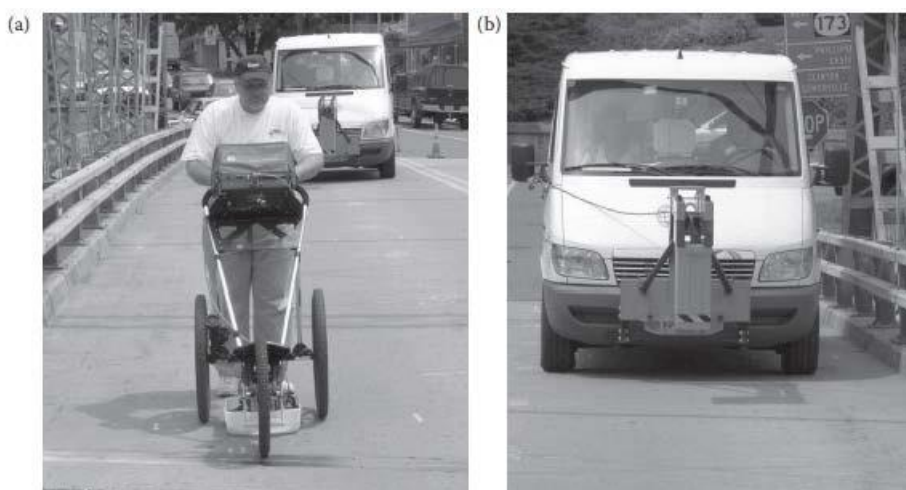
Η θερμο-ελαστική μέθοδος προσδιορίζει τις τάσεις στο πεδίο. Η μέθοδος προσδιορίζει την αλλαγή στη θερμοκρασία. Έτσι εντοπίζεται η επιφανειακή τάση ως συνέπεια της συμπίεσης ή της διαστολής. Για τις αλλαγές στη θερμοκρασία τραβήχτηκαν φωτογραφίες με υπέρυθρες (IR) από θερμική κάμερα. Οι δοκιμές έγιναν σε χαλύβδινο

στύλο. Έτσι δίνονται θερμογραφικά αποτελέσματα ρωγμής στις άκρες του στύλου ([Fuchs and Jalianoos, 2008](#)).

9.3 Ραντάρ διείσδυσης εδάφους (GPR)

Η μέθοδος GPR χρησιμοποιείται σε γέφυρες για τις πληροφορίες καταστρώματος, για τις ιδιότητες σκυροδέματος και τη διαμόρφωση των οπλισμών. Είναι δυνατόν να καταγράψουν τις φθορές του σκυροδέματος και την πιθανότητα αποκόλλησης στοιχείων του ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

Αναφορά έχουμε από [Gucunski et al. \(2008\)](#). Οι κεραιές υψηλών συχνοτήτων καταγράφουν επιφανειακά την κατάσταση του καταστρώματος, ενώ οι κεραιές εδάφους GPR απεικονίζουν με διεξοδικό τρόπο την κατάσταση του καταστρώματος. Στην εικόνα 8-3 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο συλλέγονται πληροφορίες για το κατάρωμα. Η νέα κεραιά εδάφους παρέχει ισχύ 2,6 GHz σε σύγκριση με τις παλιές κεραιές των 1,5 GHz και 2,0 GHz στις κεραιές υψηλών συχνοτήτων. Άρα υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα των νέων κεραιών 2,6 GHz.



Εικόνα 9-3: Εντοπισμός λεπτομερειών καταστρώματος (Reprinted from ASNT Publication) [\[35\]](#)

9.4 Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι είναι ικανές να προσδιορίσουν επιφανειακές ή υπο-επιφανειακές υποβαθμίσεις με μέγεθος μικρότερο από 1 mm. Υποβαθμίσεις όπως ρωγμές κόπωσης, αστοχίες μετάλλων, ακόμα και διάβρωση.

Η τεχνική του δινορεύματος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διάβρωσης, της αγωγιμότητας και της διαπερατότητας ενός υλικού. Σε αυτό το σύστημα το εναλλασσόμενο ρεύμα διεγείρει ένα πηνίο. Εάν παρατηρηθεί κάποιο ελάττωμα δημιουργείται διακύμανση στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Η μέτρηση γίνεται σε κοντινές αποστάσεις και καταγράφονται βλάβες στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια ([Hua-Peng Chen, 2018](#)).

9.5 Μέθοδος ανίχνευσης με κραδασμούς

Η μέθοδος ανίχνευσης με κραδασμούς χρησιμοποιείται για την αναγνώριση βλαβών από απόσταση. Στη μέθοδο αυτή δεν χρειάζεται να είναι γνωστή η θέση της ζημιάς και οι αισθητήρες τοποθετούνται σε οποιοδήποτε σημείο. Ο αριθμός των αισθητήρων τοποθέτησης είναι μειωμένος, παρ' όλα αυτά είναι επαρκής για μεγάλη έκταση κατασκευών ([Humar et al., 2006](#)).

Μειονεκτήματα της μεθόδου θεωρείται η έλλειψη ευαισθησίας σε τοπικές βλάβες. Οι τοπικές βλάβες εμφανίζονται στη δομή σημειακές. Η συχνότητα παίζει ρόλο στα χαρακτηριστικά της καταγραφής που αποδίδονται. Συγκεκριμένα η υψηλή συχνότητα στη μέθοδο ανιχνεύει τοπικές βλάβες και η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας ανιχνεύει μία γενικότερη απόδοση της δομής. Άρα τα χαρακτηριστικά των δεδομένων ερμηνεύονται λόγω υψηλής ακρίβειας στη μέτρηση ή λόγω μεγάλης έκτασης στη βλάβη.

Ως εκ τούτου οι βαθμοί ελευθερίας σε ένα δομικό σύστημα είναι αρκετοί και οι υψηλές συχνότητες σε ένα δίκτυο δεν είναι εύκολα εφικτές. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο περιορισμένος αριθμός

αισθητήρων δεν είναι ικανός να μετρήσει πολλούς βαθμούς ελευθερίας. Έτσι δεν είναι πάντα επιθυμητή η αξιοπιστία της μεθόδου κραδασμών. Επίδραση προκύπτει από τις περιβαλλοντικές μεταβολές, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, όπως και από τις φορτίσεις που επιβάλλονται διάφορες διακυμάνσεις.

Συμπερασματικά επιβάλλεται η μέθοδος να περιλαμβάνει ευαίσθητους δείκτες για εντοπισμό τοπικών αστοχιών. Ο εντοπισμός κατάλληλης θέσης αισθητήρων, επιθυμητού αριθμού αισθητήρων, η εξέλιξη μεθόδων για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα στην καταγραφή ζημιών και η μείωση όσο των δυνατών της περιβαλλοντικής επίδρασης στο σύστημα, είναι τεχνικές που επιβάλλεται ένας καλός μηχανικός να γνωρίζει και να υλοποιεί ([Hua-Peng Chen, 2018](#)).

9.6 Αναγνώριση βλάβης

Για την αναγνώριση των βλαβών απαιτούνται τρία βασικά χαρακτηριστικά. Τα τεχνικά θέματα, η χρησιμότητα και η σχέση κόστους-όφελους. Στα τεχνικά θέματα είναι παράμετροι όπως το μέγεθος της ζημιάς, τι λειτούργησε λανθασμένα στην πρόκληση αστοχίας και τις χρονικές και χωρικές μετρήσεις επί του έργου. Άλλες παράμετροι είναι οι ανάγκες συντήρησης και εργατικού δυναμικού, το μέγεθος του εξοπλισμού, οι περιβαλλοντικές συνέπειες και η απλότητα του συστήματος. Σε ένα έργο θα πρέπει να αναγνωριστούν τα αίτια, το είδος, η θέση, η έκταση, η σοβαρότητα και ο χρόνος μιας βλάβης.

Τα αίτια μια βλάβης ποικίλλουν σε ένα έργο, προκύπτουν από φυσικά φαινόμενα ή πρόσκρουση και η θέση τους σχετίζεται άμεσα με τα αίτια. Το είδος μπορεί να είναι ρωγμές, αποκόλληση στοιχείων σκυροδέματος και υλικών. Η σοβαρότητα μπορεί να είναι ασήμαντη έως ένδειξη για άμεση επέμβαση. Αν υπάρχει διάβρωση ο χρόνος εμφάνισης είναι σταδιακός (Εικόνα 8-4), ενώ σε μια πρόσκρουση είναι άμεση η βλάβη (Εικόνα 8-5).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η κόπωση που μπορεί να επιφέρει ρωγμές απότομες ή αργές και εντοπίζονται σε συνδέσεις μελών χαρακτηρίζοντας αυτές ως τοπικές βλάβες. Η κόπωση ενδέχεται να επιφέρει σημαντική αστοχία. Η διάβρωση επιφέρει υποβάθμιση των

υλικών και είναι μία σταδιακή διαδικασία. Έτσι λόγω της αργής δράσης τα αποτελέσματα μπορεί να επαναδιορθωθούν ή να περιοριστούν πριν επεκταθεί η αστοχία της διάβρωσης. Διάβρωση υπάρχει στο σκυρόδεμα και στους οπλισμούς από την επίδραση της υγρασίας και του αλατιού σε παράκτιες περιοχές. Η ρηγμάτωση του σκυροδέματος δημιουργείται από περιβαλλοντικές συνθήκες και από μηχανικά φορτία που ασκούνται σε δομικά στοιχεία. Στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος είναι αργός, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο χρόνος εμφάνισης είναι άμεσος.



Εικόνα 9-4: Σταδιακή διάβρωση (Sachidanand Joshi, 2020) [36]

Ζημιές μπορούν να προκληθούν και από τα εδάφη. Ειδικότερα με τη διάβρωση του εδάφους, οι καταπονήσεις υπόκεινται στις διεπαφές θεμελίωσης με το έδαφος. Το εύρος ζημιάς κυμαίνεται από μικρό έως μεγάλο.



Εικόνα 9-5: Βλάβη από πρόσκρουση (Courtesy of New York State Department of Transportation) [\[37\]](#)

10. Γενικά

10.1 Επιλογή κατάλληλου συστήματος αισθητήρα

Αρχικά υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή κατάλληλων αισθητήρων. Δεν είναι υπάρχει πουθενά συγκεκριμένη τεχνική, ούτε για την επιλογή, ούτε για την τοποθέτηση ενός συστήματος.

Η επιλογή έχει να κάνει με την δομική φόρτιση και απόκριση της δομής. Στον τρόπο εγκατάστασης παίζει ρόλο το είδος φορτίων, είτε είναι δυναμικά, είτε είναι στατικά. Αυτό σχετίζεται με την προσπάθεια της επιβίωσης μέσα στο χρόνο. Όλα αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στις συνέπειες που μπορεί να έχει μία επιλογή. Σε αυτό το πλαίσιο οι ενδείξεις από μία επιλογή είναι η προειδοποίηση για ελεύθερη δράση ή άμεση και η ένδειξη για κίνδυνο ανθρώπινης ζωής. Συνέπειες που βασίζονται σε φθορά, ρωγμές και φαινόμενα όπως ο σεισμός ή ο άνεμος. Για αυτό πρέπει να πρέπει να προβλεφθούν, να αξιολογηθούν και να αποφασιστούν οι κατάλληλες κινήσεις.

Το είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να συμβαδίζουν με τα υλικά της κατασκευής. Σε σημεία τάνυσης των δοκών δεν επιτρέπεται η δημιουργία οπών σε μία γέφυρα από χάλυβα για την τοποθέτηση αισθητήρων. Η θερμική αγωγιμότητα των υλικών κατασκευής θα πρέπει να προσαρμόζεται με τα υλικά των μετρητών καταπόνησης. Έτσι επιτυγχάνεται η σωστή και αξιόπιστη χρήση για ακριβή αποτελέσματα. Άρα θα πρέπει να υπάρχει γνώση των υλικών που χρησιμοποιούνται και τα χαρακτηριστικά τους αντίστοιχα. Έμφαση δίνεται και στο μήκος του μετρητή για την κατανομή των τάσεων. Η επιλογή των αισθητήρων βασίζεται στο σημείο εφαρμογής (πλάκα, δοκός υποσύλωμα), την κατανομή των καταπονήσεων, τη δομική ακαμψία, την προσβασιμότητα. Η προστασία από το περιβάλλον, τα προβλήματα στο σήμα και η ισχύ στο χρόνο είναι κομμάτια που χρίζουν προσοχής.

Σε όλα τα παραπάνω θα πρέπει να υπάρχουν δεδομένα για τη ζωή και την αντοχή των αισθητήρων, όπως και για την υλοποίηση της κατασκευής. Ο αριθμός, το μέγεθος, το εύρος επέκτασης και η επιλογή

ασύρματων ή ενσύρματων αισθητήρων αξιολογούνται σε συνάρτηση με το κόστος εγκατάστασης. Αν ο χρόνος λειτουργίας και ο όγκος των μετρήσεων είναι μεγάλος, το σύστημα απαιτεί περισσότερη προστασία, μεγαλύτερη ισχύ και ευρύτερο αποθηκευτικό χώρο. Ο χρόνος λειτουργίας μπορεί να είναι ή σύντομος ή μεγάλος ή συνεχής ή περιοδικός. Σε ένα έργο μπορεί να χρειάζονται αισθητήρες για μία χρήση, εκεί που το κόστος είναι μειωμένο και η ανθεκτικότητα είναι αμελητέα. Για πολλαπλή χρήση απαιτούνται άλλες προδιαγραφές προστασίας, επεκτασιμότητας και τεκμηριωμένης εγκατάστασης.

Η φύση των αισθητήρων είναι να αντέχουν σε εργαστηριακούς χώρους, εκεί που διαφέρουν οι συνθήκες σε σχέση με το περιβάλλον μιας εξωτερικής δομής. Βέβαια υπάρχουν και αισθητήρες που έχουν εξελιχθεί για δομικές καταγραφές σε δύσκολες περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες. Οι συνθήκες που συναντώνται είναι ο άνεμος, η θερμοκρασία, η όξινη βροχή, η σκόνη, η υγρασία, το χλωριούχο περιβάλλον και οι κραδασμοί, αλλά και σε όλα σχεδόν τα έργα.

Οι αισθητήρες δεν ανταποκρίνονται σε όλους τους τύπους φόρτισης. Για παράδειγμα μερικά είδη αισθητήρων δεν ανταποκρίνονται άμεσα στην δομική απόκριση της κατασκευής. Έτσι οι μετρήσεις που λαμβάνονται δεν είναι αντιπροσωπευτικές. Η επιλογή γίνεται μεταξύ στατικών και δυναμικών αποκρίσεων και συνάρτηση της συχνότητας με τον χρόνο. Ακόμα υπάρχει ενδεχόμενο αλλαγής θέσης του οργάνου σε μακροπρόθεσμη λειτουργία. Σίγουρα σε όλα σημαντικό ρόλο παίζει η εμπειρία του χειριστή και του μελετητή.

Το κόστος ενός συστήματος δομικής παρακολούθησης βασίζεται στον τύπο και στην τοποθεσία της κατασκευής, στην πολυπλοκότητα του συστήματος και στο κόστος του αισθητήρα ανάλογα με το πλήθος. Πριν την τελική τοποθέτηση και λειτουργία του συστήματος, το σύστημα τίθεται σε δοκιμές οι οποίες συνεπάγονται σε κόστος αρχικών εργασιών. Για το λόγο αυτό ένας καλός αρχικός σχεδιασμός μπορεί να μειώσει το κόστος αρχικών δοκιμών. Οι χειριστές προβλέπουν ότι το όφελος θα υπερέρχει του κόστους.

Το λογισμικό που συνοδεύει τους αισθητήρες θα πρέπει να είναι της ίδιας αξιοπιστίας με τους αισθητήρες. Αν για παράδειγμα οι αισθητήρες είναι υψηλότερης αποδοτικότητας από το λογισμικό και υπάρχει



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

διαφορά μεταξύ τους, η επιλογή ενδέχεται να είναι αντιοικονομική και το σύστημα μη παραγωγικό.

Για τη λειτουργία των αισθητήρων απαιτείται και η τροφοδοσία ενέργειας, είτε από μπαταρίες ή ηλεκτρικά καλώδια, είτε από εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως τα ηλιακά συστήματα. Η μνήμη καθιστά το σύστημα πιο αποδοτικό ανάλογα με την έκταση της, καθώς τα δεδομένα είναι περισσότερα. Το ενιαίο σύνολο δομικής παρακολούθησης μπορεί να λάβει εντολές ανάλογα το είδος, επί τόπου ή σε απόσταση από το έργο. Η τοποθέτηση εάν είναι δύσκολη συνίσταται η χρήση αισθητήρων χωρίς καλώδια για οικονομία και ευκολία εγκατάστασης. Οι μελετητές προβλέπουν το αναμενόμενο εύρος απόκρισης της κατασκευής και στη συνέχεια επιλέγουν τους αισθητήρες, αλλά και το ανάλογο εύρος τους. Άλλοι παράγοντες για την επιλογή των αισθητήρων είναι οι τύποι καλωδίων.

Συνοπτικά για την χρήση συστημάτων παρακολούθησης της δομικής υγείας απαιτούνται συγκεκριμένα στάδια. Αρχικά το κόστος χωρίζεται σε δύο μέρη. Στη δαπάνη όταν η επιλογή του αισθητήρα αποτύχει, που λέγεται άμεσο κόστος και η δαπάνη όταν ένας αισθητήρας δίνει λανθασμένα δεδομένα, που έχει σοβαρότερο κόστος σε χρήματα. Το περιβάλλον και οι δύσκολες συνθήκες που μπορούν να συμβούν, ενδεχομένως να επηρεάσουν την αξιοπιστία των μετρήσεων όπως και την ακρίβεια.

Σε σχέση με τη δομή η οποία είναι σαφώς μεγάλη σε οποιοδήποτε έργο, το σύνολο των αισθητήρων είναι πολύ μικρότερο. Έτσι υπάρχει μία συσχέτιση του αριθμού των αισθητήρων με τη θέση τους στη δομή, αλλά και την οικονομικότητα του ενιαίου συστήματος. Η θέση πρέπει να βρίσκεται σε κατάλληλο σημείο για την ανίχνευση των βλαβών και την αποτελεσματικότητα του συστήματος ([Ettouney & Alampalli, 2012](#)).

10.2 Συλλογή μετρήσεων και επιτόπια διαχείριση

Στη συλλογή δεδομένων σε ένα έργο σημαντικό ρόλο παίζει η αρχειοθέτηση των μετρήσεων, το είδος, ο χρόνος και ο τρόπος πραγματοποίησης της παρακολούθησης. Θα πρέπει, επίσης, να

υπάρχει σύνδεση μεταξύ μέτρησης και από ποιον αισθητήρα συλλέχτηκε. Τα συστήματα μέτρησης ρυθμίζονται καθώς σε αντίθετη περίπτωση λανθασμένης χρήσης, οι μετρήσεις δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα και δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Αν ένας αισθητήρας επιτάχυνσης παρεμβληθεί από ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες και χαθούν δεδομένα από την καταγραφή, τα μετρούμενα στοιχεία χρειάζονται διαδικασία επικύρωσης ([Farrar et al., 2003](#)). Οι φυσικές συχνότητες καταγραφής σε μια γέφυρα ποικίλλουν ανάλογα με της θερμικές διαφορές. Συνεπώς διαχωρίζονται οι αλλαγές που προκαλούνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες ή ζημιές ([Sohn et al., 2004](#)).

Η διαδρομή μιας μέτρησης αποτελείται από τη μέτρηση ενός φυσικού φαινομένου, στη μετατροπή του σήματος σε αναλογική ηλεκτρική μορφή. Το σήμα μετατρέπεται εκ νέου σε ψηφιακή μορφή δίνοντας ευκολία στην αποθήκευση, στην επικοινωνία και την ερμηνεία. Όλη αυτή η διαδρομή που περιγράφηκε πραγματοποιείται χάρη στους ηλεκτροχημικούς μετατροπείς που ενσωματώνονται μέσα στους αισθητήρες ([Shannon, 1949](#)). Οι μετρήσεις στην είσοδο του αισθητήρα φιλτράρονται και απορρίπτονται κάποιες συχνότητες πριν το σήμα ψηφιοποιηθεί. Το φίλτρο αποκοπής των συχνοτήτων επιλέγεται από τον μηχανικό ανάλογα με το τι ταιριάζει περισσότερο σε μια κατασκευή. Πραγματοποιώντας την παραπάνω διαδικασία τα ψηφιακά δεδομένα φιλτράρονται περαιτέρω με ψηφιακό φίλτρο για την αφαίρεση ανεπιθύμητων συχνοτήτων.

Ένα σύστημα με μικρό αριθμό αισθητήρων μπορεί να συλλέξει και αποθηκεύσει δεδομένα για διάστημα έως μερικές εβδομάδες. Αν όμως το σύστημα έχει εκτεταμένο αριθμό αισθητήρων και προβλέπεται η χρήση για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε θα χρειαστεί κάποιος φορητός υπολογιστής που θα εξυπηρετεί τη συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων. Έτσι η επιλογή ή μη φορητού υπολογιστή στο σύστημα έχει να κάνει με τη δυνατότητα στη χωρητικότητα της μονάδας ανίχνευσης, όπως και το μέγεθος των υπολογιστικών πόρων.

Η λειτουργία των συστημάτων συνήθως φτάνει τα 100 Hz και 16 ή 24 bit ανά δείγμα. Ένας αισθητήρας με ρυθμό δειγματοληψίας 100 Hz μπορεί να παράγει 720 kB έως 1,1 MB ανά ώρα και 6,3 GB για έναν

χρόνο. Από ένα κανάλι αισθητήρων πηγάζουν δεδομένα περίπου 26 MB ημερησίως. Για σύστημα με δώδεκα αισθητήρες για εβδομαδιαία καταγραφή συλλέγονται 2,2 GB δεδομένων. Η αποθήκευση σε μία μονάδα ανίχνευσης είναι της τάξης 1-2 GB. Πάντα όμως συνηθίζεται να χρησιμοποιείται φορητός υπολογιστής με χρήση λογισμικού ώστε να υποστηρίζει το σύστημα εγκατάστασης.

Σήμερα υπάρχουν συστήματα ανίχνευσης που έχουν στην εξαγωγή τους υποδοχή δικτύου Ethernet. Συνεπώς υπάρχει δυνατότητα συνδεσιμότητας επί τόπου ([Karbhari and Ansari, 2009](#)).

10.3 Ασφάλεια δεδομένων

Ένα σύστημα παρακολούθησης της δομικής υγείας μιας κατασκευής θα πρέπει να έχει την κατάλληλη ασφάλεια έναντι κακόβουλων επιθέσεων από άλλον υπολογιστή. Εφόσον οι υπολογιστές που χρησιμοποιούνται είναι συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο θα πρέπει να θωρακιστούν για εξασφαλίσουν την προστασία των δεδομένων. Κάθε κατασκευαστής ενός συστήματος ορίζει στα εγχειρίδια κάποιους κωδικούς πρόσβασης προεπιλεγμένους που ενεργοποιούνται από τον εκάστοτε χρήστη. Σε κάθε περίπτωση αυτοί θα πρέπει να αλλάζονται με διαφορετικούς και πιο πολύπλοκους, ώστε να υπάρχει αδυναμία παρέμβασης από τρίτους.

Δεύτερο χαρακτηριστικό για την ασφάλεια του συστήματος είναι η ενημέρωση του λογισμικού. Όσο και να έχει θωρακιστεί ένα σύστημα, πάντα υπάρχουν μεταγενέστερες ευπάθειες λογισμικού. Έτσι ενημερώνεται και το λογισμικό του υπολογιστή, όπως το ίδιο συμβαίνει για τα όργανα. Σημαντική είναι η ενημέρωση των δρομολογητών.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως λόγω του διαδικτύου ενδέχεται πληροφορίες ή κωδικοί να διαρρεύσουν στη διαδρομή από τη συλλογή του κεντρικού συστήματος προς τον άλλον απομακρυσμένο υπολογιστή. Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η κρυπτογράφηση των πληροφοριών πριν την αποστολή τους. Αυτή η παροχή είναι η έκδοση FTP (SFTP). Με αυτό το σύστημα ο παραλήπτης έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να μπορεί να αποκρυπτογραφήσει τις πληροφορίες που δέχεται.

10.4 Αποθήκευση δεδομένων

Η τοποθέτηση, η καταγραφή και η επικοινωνία των μετρήσεων είναι απαιτητική διαδικασία και επιβάλλεται προσοχή για σωστά αποτελέσματα, ωστόσο μεγάλη βάση δίνεται και στην αποθήκευση των πληροφοριών. Μία καλή μορφή αποθήκευσης βοηθάει και στη γρήγορη εξέταση των πληροφοριών.

Έμφαση δίνεται στην αρχειοθέτηση των δεδομένων, καθώς μία σύγκριση των τωρινών με των μελλοντικών μετρήσεων πρέπει να γίνεται με εύκολο και άμεσο τρόπο. Αυτό διότι για έναν μηχανικό είναι δύσκολο να εξετάσει δεδομένα που δεν είναι αρχειοθετημένα και ομαδοποιημένα. Όμως είναι επιτακτικό η δημιουργία αντιγράφων, καθώς ο κίνδυνος απώλειας δεδομένων είναι υπαρκτός στα συστήματα παρακολούθησης της δομικής υγείας, ειδικά για μακροπρόθεσμες λειτουργίες.

Ένας αισθητήρας μέτρησης με λειτουργία 16 χρόνων υποστηρίζεται από σκληρό δίσκο χωρητικότητας 100 GB με ακατέργαστες μετρήσεις. Γενικότερα υπάρχουν, πλέον, μεγάλες δυνατότητες στα μέσα αποθήκευσης. Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης είναι η εγγραφή σε δίσκο DVD. Η χωρητικότητα ενός DVD ξεκινά από τα 4,7 GB που αναλογεί σε 270 μέρες λειτουργίας για έναν μόνο αισθητήρα. Τα Dual Layer DVDs έχουν χωρητικότητα 8,5 GB με δυνατότητα αποθήκευσης 490 ημερών καταγραφής από έναν αισθητήρα. Παρόλο που οι σκληροί δίσκοι έχουν περισσότερες δυνατότητες αποθήκευσης, οι δίσκοι DVD προτιμώνται κυρίως για περιοδική παρακολούθηση ([Karbhari and Ansari, 2009](#)). Νεότερη τεχνολογία είναι οι δίσκοι Blu-ray όπου η χωρητικότητα είναι τα 25 GB και για Dual Layer στα 50 GB. Όμως λόγω του υψηλού κόστους δεν προτιμώνται ακόμα.

Σε μία μακροπρόθεσμη παρακολούθηση σε ένα έργο εκεί που το σύστημα περιλαμβάνει εκατοντάδες αισθητήρες, ο όγκος των δεδομένων καταγραφής θα είναι της τάξης των terrabytes. Σε μελλοντική επισκόπηση των μετρήσεων ο όγκος θα είναι τεράστιος και μη διαχειρίσιμος από έναν μηχανικό. Έτσι το πλεονέκτημα της μείωσης αυτού του όγκου και η αρχειοθέτηση των βασικότερων καταγραφών είναι επιτακτική ανάγκη. Τα δεδομένα που δεν αρχειοθετούνται

βρίσκονται υπό επεξεργασία, συνεπώς μπορεί μεταγενέστερα να αρχειοθετηθούν ή να απορριφθούν. Η μείωση του όγκου των δεδομένων γίνεται με ένα μοντέλο το οποίο καθορίζει τις παραμέτρους καταγραφής. Μελέτη των McNeill & Card έδειξε πως η εφαρμογή του μοντέλου μείωσε κατά 97% την ποσότητα των μετρήσεων.

Στόχος των πολιτικών μηχανικών είναι να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των κατασκευών από τα 50 χρόνια στα 100 χρόνια. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως κανένα σύστημα παρακολούθησης δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε τόσο εκτεταμένη διάρκεια λειτουργίας. Αν ένα σύστημα θεωρείται τώρα σύγχρονο μετά από τόσα χρόνια θα είναι απαρχαιωμένο. Επιπρόσθετα θα πρέπει να εξασφαλιστεί σε περίπτωση απώλειας σημαντικών δεδομένων λόγω βλάβης, ο πλεονασμός των δεδομένων προς αντικατάσταση των απολεσθέντων. Η αντιγραφή σε άλλους σκληρούς δίσκους των δεδομένων δίνει λύση στην περίπτωση απώλειας.

10.5 Θόρυβος

Επίδραση στις μετρήσεις υπάρχει από τον θόρυβο που δημιουργείται και επηρεάζει το σήμα εισόδου. Θα πρέπει ο θόρυβος να μειωθεί τόσο ώστε να μην επηρεάζει τις μετρήσεις. Στη μείωση συμβάλλει η υπερδειγματοληψία του σήματος εισόδου. Έτσι ο υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας μαζί με το μέσο όρο διαδοχικών μετρήσεων μειώνει το θόρυβο συνεπώς και τις παρεμβολές στη διακύμανση των μετρήσεων. Όμως ο υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας δεν ανταποκρίνεται πάντα από τα συστήματα. Ο εξοπλισμός ενδέχεται να μην λειτουργεί σε υψηλό ρυθμό ή το κεντρικό σύστημα να μην μπορεί να διαχειριστεί τον υψηλό όγκο δεδομένων. Ο θόρυβος πηγάζει από το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργώντας ημιτονοειδής διακύμανση με συχνότητα 50 Hz. Ένα φίλτρο εγκοπής δημιουργεί την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα θορύβου. Σημαντική είναι η θωράκιση των καλωδίων της γείωσης και των αισθητήρων που μειώνει τον θόρυβο.

10.6 Δυσλειτουργία αισθητήρων

Σε μία μακροχρόνια παρακολούθηση σε ένα έργο είναι λογικό κάποιοι αισθητήρες να παρουσιάσουν πρόβλημα. Αν για παράδειγμα ένα



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

σύνολο αισθητήρων εγκατασταθούν σε ένα κατάστρωμα, οι αισθητήρες θα πρέπει να καταγράφουν όμοιες μετρήσεις. Όταν ένας μεμονωμένος αισθητήρας καταγράφει διαφορετικές μετρήσεις σε σχέση με τους γειτονικούς, σημαίνει πως οι μετρήσεις είναι λανθασμένες. Αυτό συμβαίνει όταν ένας αισθητήρας έχει αποσυνδεθεί είτε από τη δομή, είτε από το σύστημα με το οποίο είναι συνδεδεμένο. Σπάνια ένας μόνο αισθητήρας μπορεί επηρεαστεί από δομική αλλαγή, αλλά είναι σχεδόν απίθανο καθώς θα είχε επηρεάσει και κάποιους από τους υπόλοιπους.

Τα συστήματα αισθητήρων κατασκευάζονται από τις εταιρίες έχοντας μαζί και το λογισμικό. Άρα είναι κλειστά συστήματα που δεν επιδέχονται διαφορετικών τεχνολογιών εξοπλισμούς ([Karbhari and Ansari, 2009](#)).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία αξίζει να σημειωθεί ότι η σημαντικότητα της παρακολούθησης ενός μεγάλου έργου. Ενδεικτικά καταγράφηκαν πολλά όργανα παρακολούθησης και μέθοδοι καταγραφής της συμπεριφοράς μιας δομής. Διαπιστώθηκε ιδιαίτερα η χρήση περισσότερο των οπτικών ινών ως συνέπεια της εξέλιξης της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών. Για το λόγο αυτό αναλύθηκε εκτενέστερα. Ο ανταγωνισμός των εταιριών πώλησης τέτοιων συστημάτων έχει μειώσει το κόστος χρήσης σημαντικά, ενώ κάτι αντίστοιχο διαφαίνεται να γίνεται και για τα προγράμματα ανάλυσης. Το πρόγραμμα ανάλυσης θα πρέπει να είναι αντίστοιχης αξιοπιστίας με τους αισθητήρες, ώστε το σύστημα να είναι παραγωγικό. Παράλληλα μεγάλη πρόοδος έχει γίνει και στην αύξηση της διάρκειας των μπαταριών, αλλά και στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας που μπορούν να τροφοδοτήσουν τα συστήματα παρακολούθησης. Ο μηχανικός θα πρέπει να προβλέπει ότι το όφελος θα υπερέχει του κόστους.

Βέβαια σημαντικός είναι ο σκοπός των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων που χρειάζεται ο μηχανικός. Συμπερασματικά δεν μπορεί μόνο ένα σύστημα να υποστηρίξει όλες τις αναλύσεις και καταγραφές, διότι κάθε σύστημα προορίζεται για συγκεκριμένες χρήσεις. Έχοντας ζητήματα όπως φορτίσεις, τάσεις, θερμοκρασία, υγρασία, καταπόνηση, διάβρωση και άλλα, δεν γίνεται μόνο ένας τύπος αισθητήρων να εντοπίσει όλα τα παραπάνω. Η επιλογή των αισθητήρων πραγματοποιείται βάσει στατικών ή δυναμικών φορτίων και σε συνάρτηση της συχνότητας με τον χρόνο.

Για την μέτρηση της επιτάχυνσης σε φαινόμενα όπως ο σεισμός προτιμάται η χρήση πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου σε σχέση με τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα, διότι είναι οικονομικότερα, πιο εύκολα στη χρήση και μπορούν να δεχτούν μεγαλύτερη συχνότητα. Εδώ καταγράφηκαν οι ασύρματοι αισθητήρες οι οποίοι προσδίδουν διάφορα προνόμια, με βασικό μειονέκτημα η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και τα προβλήματα με την εμβέλεια που είναι περιορισμένη. Συνεπώς μέχρι και σήμερα προτιμώνται οι ενσύρματοι αισθητήρες με τους ασύρματους ως υποστηρικτικοί. Οι ασύρματοι αισθητήρες



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

συνήθως χρησιμοποιούνται σε σημεία που είναι δύσκολη η τοποθέτησή τους.

Στην εποχή μας υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας έργων που προσδίδουν ασφάλεια στους χρήστες. Είτε είναι δομές ή δρόμοι που εξυπηρετούν την κοινή ωφέλεια, είτε είναι δομές για ιδιωτική χρήση θα πρέπει να παρέχουν υψηλή ασφάλεια. Σε μία χώρα, βεβαίως, όπως η Ελλάδα με έντονη σεισμικότητα, όπως επίσης τα τελευταία χρόνια με εκτεταμένες πλημμύρες και ισχυρούς ανέμους που πλήττουν περιοχές. Κύριο μέλημα των μηχανικών είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής και έπειτα όλα τα υπόλοιπα που βοηθά ένα έργο με την χρήση του. Με αυτό τον τρόπο εξελίχθηκαν συστήματα που παρακολουθούν τις δομές. Έτσι σε περίπτωση ακραίων τιμών πέραν των φυσιολογικών ορίων, η επέμβαση γίνεται άμεσα. Συνεπώς μειώνονται σοβαρά οι πιθανότητες για αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη ζωή, αλλά και για δομικές αστοχίες που επιφέρουν μεγάλο κόστος αποκατάστασης.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alessandro Sabato, Christopher Niezrecki, and Giancarlo Fortino,
Senior Member IEEE (2016), Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review
2. ASNT., (1996), Nondestructive Testing Handbook, 2nd Edition, American Society of Non-Destructive Testing, Columbus, OH
3. Bensky, A. (2004), Short-Range Wireless Communication, 2nd Ed., Elsevier, Amsterdam
4. Biswanath Mukherjee, WDM-based local lightwave networks. I. Single-hop systems. IEEE network, vol. 6, no. 3, pp. 12-27, May, 1992
5. Branko Glisic, Daniele Inaudi (2008), Fibre optic methods for structural health monitoring (p.19–81, 140-155)
6. Bronnimann, R., Nellen, P.M., Anderegg, P.G. et al. (1998), Packaging of fiber optic sensors for civil engineering applications.
Symposium DD, Reliability of Photonics Materials and Structures, San Francisco, paper DD7.2
7. Budelmann, H./Dreßler, I. & Wichmann, H.-J. 15–17th Sept. 2015, Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete Structures with an Innovative rf-based Sensor. In:NDT-CE proceedings, 818–824, Berlin
8. Buildings (IFHS2005), Dubai, United Arab Emirates. (on conference CD, paper #0416)
9. Busch, N. E., and L. Kristensen. 1976. Cup anemometer overspeeding. Journal of Applied Meteorology 15: 1328–1332.
10. Catbas, F.N., KijewskiCorrea, T. and Aktan, A.E. (2012),



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

- Structural Identification of Constructed Facilities: Approaches, Methods, and Technologies for Effective Practice of StId , ASCE, Reston, VA. USA
11. Chen, H.P. and Alani, A.M. (2013), Optimised repair strategy for cracking concrete structures caused by reinforcement corrosion. *ACI Structural Journal* 110(2), 229–238
 12. Chen, H.P. and Nepal, J. (2016), Analytical model for residual bond strength of corroded reinforcement in concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics ASCE* 142(2), 040150791–8
 13. Christian Boller, Fou-Kuo Chang, Yozo Fujino (2009), *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, Chapter 129 - Modal Testing of the Vasco da Gama Bridge, Portugal (Elsa Caetano and Alvaro Cunha) (p.2-3)
 14. Ciang, C.C., Lee, J.R. and Bang, H.J. (2008), Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology* 19, 1– 20
 15. Coppin, P. A. 1982. An examination of cup anemometer overspeeding. *Meteorologische Rundschau* 35: 1–11.
 16. Cross, E.J., Worden, K. and Farrar, C.R. (2013), *Structural health monitoring for civil infrastructure. Health Assessment of Engineering Structures: Bridges and Other Infrastructure*, Haldar (ed.), World Scientific Publishing, Singapore
 17. Daniele Inaudi & Branko Glisic (2010), *Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing*
 18. Davidson, A. and Hill, C. (1997), "Measurement of Building Penetration into Medium Buildings at 900 and 1500 MHz," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 46, No. 1, 161–168
 19. Deans W F and Richards C E (1979), A simple and sensitive method of monitoring crack and load in compact fracture



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

- mechanics specimens using strain gages J. Test. Eval. 7 147–54
20. Ding, Yuan & Wu (2015), Structural Health Monitoring and Integrity Management (p.48)
 21. Dogan Ibrahim (2002), Microcontroller-Based Temperature Monitoring and Control. (p. 88-89)
 22. Farrar, C.R. and Lieven, N.A.J. (2007), Damage prognosis: the future of structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A365, 623–632.
 23. Farrar, C.R. and Worden, K. (2007), An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A365(1851), 303–315.
 24. Farrar, C.R., Worden, K. and DulieuBarton, J. (2009), Principles of structural degradation monitoring. Encyclopaedia of Structural Health Monitoring, Boller, Chang and Fujino (ed.), John Wiley & Sons, Chichester, UK.
 25. Feliú S, Gonzalez JA, Andrade C., Multiple-electrode method for estimating the polarization resistance in large structures. J Appl Electrochem 1996;26: 305–9.
 26. Frangopol and Messervey (2009), Maintenance principles for civil structures. Encyclopaedia of Structural Health Monitoring, Boller, Chang and Fujino (ed.), John Wiley & Sons, Chichester, UK
 27. Frank Vignola, Joseph Michalsky and Thomas Stoffel (2020), Solar and Infrared Radiation Measurements Second Edition (p.275-278)
 28. Fuchs, P. and Jalianoos, F., (2008) "Thermal Stress Measurements on Structural Defects," NDE/NDT for Highwaya and Bridges: Structural Materials Technology (SMT), ASNT, Oakland, CA



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ
ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

29. Gage-Technique (2011) "Demountable Strain Gauges"
<http://www.gagetechnique.demon.co.uk/pdf/gtistraingaugetheory.pdf>. Site accessed February 23, 2011
30. Ginsberg, G. L. (1990), Printed circuit design featuring computer-aided technologies, McGraw-Hill, New York
31. Glisic, B., Inaudi, D., Lau, J.M.et al. (2005), Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors. 7th International Conference on Multi-Purpose High-Rise Towers and Tall
32. Gucunski, N., Rascoe, C., Parrillo, R., and Roberts, R ,(2008) "Comparative Study of Bridge Deck Condition Assessment by High Frequency GPR," NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology (SMT), ASNT, Oakland, CA
33. Gyuhae Park, T. Rosing, M.D. Todd, et al., "Energy harvesting for structural health monitoring sensor networks," J. of Inf. Sys., vol. 14, no. 1, pp. 64- 79, Jan, 2008
34. Hardy, G. and Bolen, J. (2005), "Thermal Inspection," in ASM Handbook, ASM International, Materials Park, OH
35. Hua-Peng Chen (2018), Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures (p.22, 27-37, 83-84, 107, 121-122, 287-291, 296)
36. Humar, J., Bagchi, A. and Xu, H. (2006), Performance of vibrationbased techniques for the identification of structural damage. Structural Health Monitoring (3), 215–241
37. Hur S, Nam S, Cha D, Seong S, Park W, Kim J, Nam J and Lee S (2004), Measurement of the piping elbow integrity using the fiber-optics technique, Key Engineering Materials , 270–273 , 750–755
38. Inaudi, D. and Glisic, B. (2005), Development of distributed strain and temperature sensing cables. 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Part I, Bruges, Belgium. 222-225



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

39. Inaudi, D., Elamari, A., Pflug, L. et al. (1994), Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil engineering structures. *Sensors and Actuators A*, 44, 125–130.
40. International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004
41. Martínez, C. Andrade (2009), Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures
42. Jerome P. Lynch, Aaron Partridge, Kincho H. Law, Thomas W. Kenny, Anne S. Kiremidjian, and Ed Carryer (2003), Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring
43. Karbhari, M.V. (2009), Design principles for civil structures. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, Boller, Chang and Fujino (ed.), John Wiley & Sons, Chichester, UK
44. Ko, J.M. and Ni, Y.Q. (2005), Technology developments in structural health monitoring of largescale bridges. *Engineering Structures* 27(12), 1715–1725
45. Lee N, Bahn C, Lee S, Kim J, Hwang I, Lee J, Kim J and Luk V (2004), Development of an on-line ultrasonic system to monitor flow-accelerated corrosion of piping in nuclear power plants', *Key Engineering Materials* , 270– 273 , 2232–2238.
46. Lynch, J.P. and Loh, K.J. (2006), A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*, 38(2), p. 91–128.
47. Maria Pina Limongelli & Mehmet Çelebi (2019), Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications (p.15-17 ,362)
48. McNeill D and Card L (2005), 'Adaptive Event Detection for SHM System Monitoring', *Sensing Issues in Civil Structural*



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Health Monitoring, Ansari F, ed., Springer, 311–219

49. Mitchell, K., Rao, V. S., and Pottinger, H. J. (2002), 'Lessons Learned About Wireless Technologies for Data Acquisition', in Smart Structures and Materials 2002: Smart Electronics, MEMS, and Nanotechnology, San Diego, CA, March 18–21, Proceedings of the SPIE, Vol. 4700, 331–341
50. Mittag, L. (2001), "Magic in the Air," Embedded Systems Programming, Vol. 14, No. 10, 49–60
51. Miyamoto, A. (2009), Usage management of civil structures. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Boller, Chang and Fujino (ed.), John Wiley & Sons, Chichester, UK
52. Mohammed M. Ettouney, Sreenivas Alampalli (2012), Infrastructure Health in Civil Engineering: Theory and Components, (p.73, 184-201, 242-252, 271-274, 373-376, 401402)
53. Myer Kutz (2013), Handbook of Measurement in Science and Engineering Volume 2, (p. 1007-1013)
54. M. L. Wang, J. P. Lynch and H. Sohn (2014), Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring (p.619-620)
55. NYSDOT. (1997), Bridge Inspection Manual. New York State Department of Transportation, Albany, NY
56. Omega (2011) "OMEGA Engineering Technical," <http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html>. Site accessed February 23, 2011
57. Ou (2003), Some recent advances of intelligent health monitoring systems for infrastructures in the Mainland of China, Proceedings of



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ
ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

58. Rappaport, T. S. (2002), *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
59. Papini M and Spelt J K (1992), Crack detection in adhesive joints: use of strain gages in aggressive environments *J. Adhes. Sci. Technol.* 6 1157–64
60. Peak Sensors, Ltd. (2007), Thermocouple technical information. <http://www.peakensors.co.uk/thermocoupledatasheets.html> (accessed May 12, 2007)
61. Rücker, W., Hille, F. and Rohrmann, R. (2006b), *Guideline for Structural Health Monitoring F08b, SAMCO Final Report*, Berlin, Germany
62. R.E. Wilmot (2007), *Corrosion protection of reinforcement for concrete structures*
63. Sachidanand Joshi (2020), *Bridge Cause Matrix Method to Define Deterioration* (www.constrofacilitator.com)
64. Seidel, S. Y. and Rappaport, T. S. (1992), "914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 2, 207–217
65. Senturia, S. D. (2001), *Microsystem design*, Kluwer Academic, Boston
66. Seong S, Kim J, Hur S, Kim J, Park W and Cha D (2004), The development of fusion sensor techniques for condition monitoring of a check valve, *Key Engineering Materials* , 270–273 , 2220– 2225
67. Shannon C E (1949), 'Communication in the Presence of Noise', *Proceedings of the IRE*, 37 (1), 10–21
68. Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W. and Nadler, B.R. (2004), *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001. Report LA13976MS. Los Alamos National Laboratory*



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

69. Stanley, P. (1997), Applications and potential of thermoelastic stress analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 64, 359–70
70. Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S. (1998), "A Modular, Wireless Damage Monitoring System for Structures," Technical Report 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA
71. Swartz, R.A. and J.P. Lynch (2009), Wireless sensors and networks for structural health monitoring of civil infrastructure systems. In *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, eds
72. S.C. Mukhopadhyay and I. Ihara, "Sensors and technologies for structural health monitoring: a review," in *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 1-14
73. S.N. Pakzad, G.L. Fenves, S. Kim, et al., "Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring," *J. Infrast. Sys.*, vol. 14, no.1, pp. 89-101, Mar, 2008
74. S-T Tung, Y Yao and B Glisic (2014), Sensing sheet: the sensitivity of thin-film full-bridge strain sensors for crack detection and characterization
75. Tae-Hyun Ha, Srinivasan Muralidharan, Jeong-Hyo Bae, YoonCheol Ha, Hyun-Goo Lee, Kyung-Wha Park and Dae-Kyeong Kim
(2004), *Role of Sensors in Corrosion Monitoring and Durability Assessment in Concrete Structures: the State of the Art*
76. T. Torfs, T. Sterken, S. Brebels, et al., "Low power wireless sensor network for building monitoring," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no.3, pp. 909- 915, Jan, 2013



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

77. Unal O and Okumus S C (2000), Stable crack growth detection by strain-gage in plasma sprayed chevron-notched fracture toughness specimens J. Mater. Sci. Lett. 19 939-41
78. Vistasp M. Karbhari and Farhad Ansari (2009), Structural health monitoring of civil infrastructure systems (p.73-76, 273, 284-301, 340, 342-349, 463-468)
79. V.M. Karbhari and F. Ansari, 72-112. Cambridge: Woodhead Publishing
80. Washer, G., Bolleni, N., Fenwick, R., and Alampalli, S. (2008), "Environmental Factors for the Thermographic Inspection of Highway Bridges," NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology (SMT), ASNT, Oakland, CA
81. William J. O'Brien, Carlos T. Formoso, Ruben Vrijhoef, Kerry A. London (2008), Construction Supply Chain Management [Handbook] (Κεφάλαιο 16, p.18)
82. Wong, K.Y. and Ni, Y.Q. (2009), Structural health monitoring of cablesupported bridges in Hong Kong. In book: Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems, Karbhari and Ansari (ed.), Woodhead Publishing, Cambridge, UK
83. W. Dargie, "Dynamic power management in wireless sensor networks: state-of-the-art," IEEE Sens. J., vol. 12, no.5, pp. 1518-1528, Apr, 2012.
84. W.P. 2007. How to choose the right temperature sensor. White Paper WP05-001. <http://www.singleiteration.com/library/document.cfm?id=51> (accessed April 2007)
85. You-Lin Xu, Jia He (2017), Smart civil structures (p.145-146)
86. Zhao, F. and Guibas, L. J. (2004), Wireless Sensor Networks – an Information Processing Approach
87. Έλενα Ψύλλου (2011), Βελτιστοποίηση Διαχείρισης Γεφυρών Με Χρήση Ευφυών Συστημάτων Παρακολούθησης (p.7)



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

88. Ιστοσελίδα Solifos (www.solifos.com)
89. Ιστοσελίδα HBM (www.hbm.com)
90. Ιστοσελίδα Labfacility (www.labfacility.com)
91. Ιστοσελίδα Motioncontroltips (www.motioncontroltips.com)
92. Ιστοσελίδα Passive-components (passive-components.eu)
93. Ιστοσελίδα Passive-Components (passive-components.eu)
94. Ιστοσελίδα Kyowa-ei (www.kyowa-ei.com)
95. Ιστοσελίδα Thorlabs (www.thorlabs.com)
96. Ιστοσελίδα Viator (www.viator.com)
97. Ιστοσελίδα Ktirio (ktirio.gr)
98. 1st International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures, Tokyo, Japan (Keynote lecture)