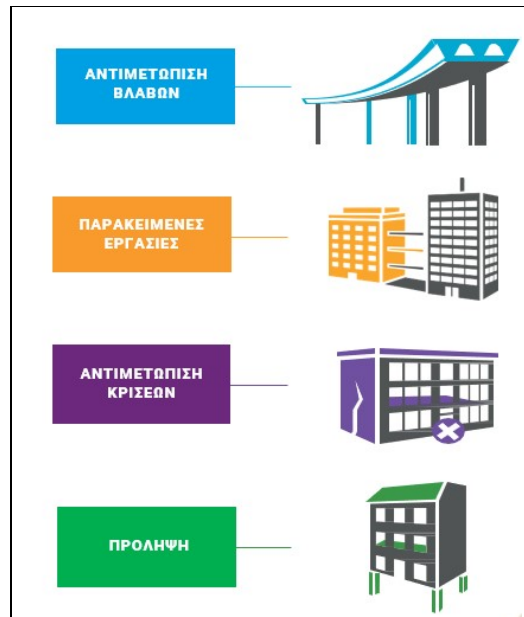




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ,
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σδόνας Χαράλαμπος - Ορέστης

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Ματσόπουλος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

Σδόνας Χ. Ο. (2022).
ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
Διπλωματική Εργασία
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μ/Υ
Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαπανεπιστημιακό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Τεχνο - Οικονομικά Συστήματα», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Sdonas Ch. O. (2022).
USE OF NEW TECHNOLOGIES TO IMPROVE CONTROL AND
MANAGEMENT OF CONSTRUCTIONS STRUCTURAL CONDITION
Diploma Thesis
School of Electrical and Computer Engineering, University of Piraeus, Department of
Industrial Management and Technology, “The Engineering-Economic Systems
Programme” [EESP], National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
1 Εισαγωγή.....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.1.1 Τι είναι παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας(Structural Health Monitoring-SHM)	8
1.1.2 Έννοια της βλάβης	9
1.1.3 Απαιτήσεις για ορθή λειτουργία SHM.....	9
1.1.4 Σε τι αποσκοπεί ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας.....	9
1.1.5 Συστήματα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας	10
1.1.6 Τεχνικές παρακολούθησης υγιούς λειτουργίας.....	10
1.1.7 Σε τι έργα απευθύνεται το SHM	11
1.1.8 Μέλη που απαρτίζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	11
1.2 Μεθοδολογία εγκατάστασης συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας	13
1.3 Αισθητήρες.....	14
1.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	14
1.3.2 Κατηγορίες αισθητήρων.....	17
1.3.3 Μέθοδοι εφαρμογής και εγκατάστασης αισθητήρων.....	18
1.3.4 Προδιαγραφές επιλογής αισθητήρων.....	18
2 Συστήματα Ενόργανης Δομικής Παρακολούθησης	19
2.1.1 Επιταχυνσιογράφος.....	19
2.1.2 Αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας (Velocimeter)	19
2.1.3 Μετρητής παραμόρφωσης (Strain gauge).....	21
2.1.4 Σύστημα Παρακολούθησης Θερμοκρασίας Περιβάλλοντος	23
2.1.5 Σύστημα Παρακολούθησης Στάθμης Υδάτων	23
2.1.6 Σύστημα Παρακολούθησης Ύψους Βροχής.....	24
3 Ακολουθία Ενόργανης Δομικής Παρακολούθησης	25
3.1 Επεξεργασία δεδομένων.....	25
3.2 Αποθήκευση των επεξεργασμένων δεδομένων.....	25
3.3 Διάγνωση.....	25
3.4 Μονάδες ένδειξης μετρήσεων αισθητήρων και διαμορφωτές σήματος.....	26
3.5 Κάρτες συλλογής δεδομένων	27
3.6 Πρόγραμμα συλλογής δεδομένων	30
3.7 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	31
4 Εφαρμογή Ενόργανης Δομικής Παρακολούθησης σε Κατασκευές.....	34
4.1 Γέφυρες	34
4.1.1 Γενικά.....	34
4.1.2 Μετρούμενα μεγέθη απόκρισης γεφυρών.....	36
4.1.3 Παρακολούθηση απόκρισης γεφυρών	39
4.1.4 Στατικές δοκιμές γεφυρών	42
4.1.5 Δυναμικές δοκιμές γεφυρών	46
4.1.6 Δοκιμές περιβαλλοντικής διέγερσης.....	51
4.1.7 Περιοδική παρακολούθηση.....	53
4.2 Ανεμογεννήτριες	53
4.3 Κτίρια	54

5	Παραδείγματα Εφαρμογών.....	55
5.1	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας, σε πραγματικό χρόνο, των νοσοκομείων των Βετεράνων.....	55
5.1.1	Γενικά.....	55
5.1.2	Νοσοκομείο βετεράνων στο San Diego της Καλιφόρνια.....	58
5.1.3	Νοσοκομείο βετεράνων στο Μέμφις του Τένεσι, κέντρο νοσηλείας.....	59
5.1.4	Νοσοκομείο βετεράνων στο Σιάτλ της Ουάσινγκτον, πτέρυγα διάγνωσης και θεραπείας.....	62
5.1.5	Νοσοκομείο βετεράνων Marion, Illinois.....	63
5.2	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας κτιρίου επιστήμης και μηχανικής στο πανεπιστήμιο της Νεβάδα στο Λας Βέγκας.....	65
5.2.1	Γενικά.....	66
5.2.2	Σύστημα αισθητήρων.....	66
5.2.3	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας και εντοπισμός βλάβης.....	68
5.3	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας στην Εγνατία οδό.....	68
5.3.1	Εισαγωγή.....	68
5.3.2	Χαρακτηριστικά γέφυρας.....	69
5.3.3	Ενοργάνωση με σύστημα αισθητήρων.....	69
5.3.4	Δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής.....	71
5.3.5	Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος.....	72
5.4	Ενοργάνωση πενταώροφου κτιρίου ΤΕΕ Πάτρας.....	73
5.4.1	Γενικά.....	73
5.4.2	Διάταξη αισθητήρων.....	74
5.4.3	Ιδιοσυχρότητες και ιδιομορφές ταλάντωσης κτιρίου.....	74
5.4.4	Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος.....	77
5.5	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας του τείχους της ακρόπολης.....	77
5.5.1	Εισαγωγή.....	77
5.5.2	Ενοργάνωση και παρακολούθηση δομικής συμπεριφοράς.....	77
5.5.3	Διαδικασία παρακολούθησης.....	80
5.5.4	Μετρήσεις.....	80
5.6	Ενόργανη παρακολούθηση γέφυρας Ρίου-Αντίρριου (Χαρίλαος Τρικούπης).....	81
5.6.1	Εισαγωγή.....	81
5.6.2	Τι περιλαμβάνει το σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	83
5.6.3	Αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων.....	86
5.6.4	Λογισμικό διαχείρισης συστήματος.....	87
5.6.5	Διασφάλιση ποιότητας αποτελεσμάτων συστήματος.....	87
5.6.6	Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος.....	87
5.7	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας Burj Khalifa.....	88
5.7.1	Εισαγωγή.....	88
5.7.2	Έρευνα που αναπτύχθηκε για την δημιουργία του συστήματος παρακολούθησης του πύργου.....	88
5.7.3	Περιγραφή προσωρινού συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	89
5.7.4	Περιγραφή μόνιμου συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	90
5.7.5	Ανασκόπηση συστήματος.....	91
6	Συμπεράσματα - Προοπτικές.....	93
7	Βιβλιογραφία.....	94

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ, ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**
Σδόνας Χ. Ο. (Επιβλέπων: Δρ. Γεώργιος Ματσόπουλος)

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας των κατασκευών με χρήση συστήματος αισθητήρων και την δυνατότητα εύρεσης των καταλληλότερων θέσεων για την τοποθέτηση αυτών με αποτέλεσμα την απόκτηση των απαραίτητων πληροφοριών που συμβάλλουν στην κατανόηση της κατάστασης της δομής.

Με χρήση αισθητήρων πραγματοποιείται παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της δομικής κατάστασης κατασκευών σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η αβεβαιότητα σε κάθε περίπτωση και προλαμβάνονται ανεπιθύμητες καταστάσεις, βελτιστοποιώντας έτσι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των εκάστοτε κατασκευών.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
School of Electrical and Computer Engineering, University of Piraeus, Department of
Industrial Management and Technology, “The Engineering-Economic Systems
Programme” [EESP]

DIPLOMA THESIS

**USE OF NEW TECHNOLOGIES TO IMPROVE CONTROL AND
MANAGEMENT OF CONSTRUCTIONS STRUCTURAL
CONDITION**

Sdonas Ch. O. (Supervised by Dr. George Matsopoulos)

Abstract

This thesis studies the structural health monitoring (SHM) problem, in other words the monitoring of structural integrity using a set of sensors, and, the possibility of finding the most appropriate locations for placing these sensors in order to obtain the necessary information to help us understand the state of a structure.

Using sensors, a real-time and continuous structural asset monitoring is performed, that ensures peace of mind on structures control and safety, and offers optimized operating and maintenance budget.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο καθηγητή Γεώργιο Ματσόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια καθώς και για τις απαραίτητες συμβουλές που μου προσέφερε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα αποδώσω επίσης στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για την υποστήριξη τους.

1 Εισαγωγή

Αρχικά αναλύεται η έννοια της ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών καθώς και τα μέσα με τα οποία επιτυγχάνεται. Αναλυτικότερα αναφέρονται τα επιμέρους είδη των αισθητήρων καθώς και τα υπόλοιπα μέρη που απαρτίζουν το σύστημα επικοινωνίας και καταγραφής.

Έπειτα παρατίθενται κάποια παραδείγματα εφαρμογών στα οποία υπάρχει σύστημα ενόργανης παρακολούθησης. Αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο είναι εγκατεστημένο το σύστημα, τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των δεδομένων, οι θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων καθώς και οι τρόποι με τους οποίους επεξεργάζονται τα δεδομένα που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση.

1.1 Γενικά

Η επιστήμη του πολιτικού μηχανικού ως βασική προτεραιότητα έχει τη διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής. Αυτό ως αποτέλεσμα δημιουργεί την ανάγκη για πρόβλεψη από τον μηχανικό όλων των δυσμενών καταστάσεων στις οποίες μία κατασκευή εκτίθεται κατά τη διάρκεια της ζωής της καθώς και την συνεχή παρακολούθηση αυτής, με σκοπό να αποφευχθεί η αστοχία. Κλήθηκε λοιπόν να αναπτύξει κατάλληλες τεχνικές και μέσα για να μπορέσει να σχεδιάσει ένα επαρκή στατικά μοντέλο και εν συνεχεία να εκτιμήσει όσο το δυνατόν καλύτερα την κατάσταση μιας κατασκευής σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της ζωής της. Στη πορεία αναπτύχθηκαν κάποιες τεχνικές για επιθεώρηση των κατασκευών ανά τακτά χρονικά διαστήματα ούτως ώστε να προβλεφθεί πιθανή αστοχία. Ο περιοδικός έλεγχος μέσω κάποιων είτε ημι-καταστροφικών είτε μη καταστροφικών μεθόδων, μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες όμως δεν καλύπτει την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση. Αυτό ήρθε με την ανάπτυξη της τεχνολογίας η οποία έφερε τους αισθητήρες και έκανε ικανή την παρακολούθηση μίας κατασκευής σε πραγματικό χρόνο.

1.1.1 Τι είναι παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας(Structural Health Monitoring-SHM)

Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας των κατασκευών ορίζεται ως ο τρόπος με τον οποίο μέσω ενός συστήματος είναι δυνατή η επί τόπου καταγραφή της συμπεριφοράς μίας κατασκευής. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, παρέχονται στο μηχανικό αξιόπιστα δεδομένα από τα οποία προκύπτουν τυχόν αστοχίες και μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η δομή, η ασφαλής χρήση της καθώς και η εναπομείνουσα ζωή της. Τα στοιχεία που προκύπτουν είναι απαραίτητα για την επιλογή της πιθανής εφαρμογής καθώς και για την υλοποίηση μιας απαιτούμενης ενίσχυσης. Μία έγκαιρη διάγνωση κάποιας αστοχίας και η άμεση παρέμβαση για ενίσχυση της είναι σίγουρα οικονομικότερη σε σχέση με αυτή που το πρόβλημα θα φανεί εκ των υστέρων, λόγω του ότι προλαμβάνονται αστοχίες πριν εξαπλωθούν και μεγεθυνθεί το πρόβλημα. Επίσης μειώνεται και το λειτουργικό κόστος προγραμματίζοντας πιθανή απαιτούμενη ενίσχυση ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κτιρίου.

1.1.2 Έννοια της βλάβης

Ως βλάβη ορίζονται όλες οι αλλαγές οι οποίες συμβαίνουν σε ένα δομικό σύστημα και επιδρούν αρνητικά στην κατάσταση της δομής του. Η έννοια της βλάβης κατανοείται συγκρίνοντας δύο διαφορετικές στιγμές, την κατασκευή στο αρχικό στάδιο της ζωής της και αυτή με αλλοιωμένη δομή. Αλλοίωση (αλλαγή) μπορεί να παρουσιαστεί είτε στα υλικά, είτε στις συνδέσεις μεταξύ των υλικών, είτε στη συνολική δομή της κατασκευής. Ανάλογα με τον βαθμό μίας βλάβης καθορίζεται η εναπομένουσα ζωή του δομικού συστήματος, ως το σημείο που η λειτουργία του καθίσταται αδύνατη, φτάνοντας δηλαδή στην αστοχία.

1.1.3 Απαιτήσεις για ορθή λειτουργία SHM

Για να λειτουργεί σωστά το SHM θα πρέπει:

1. Να αναγνωριστεί η βλάβη σε αρχικό στάδιο.
2. Να εντοπιστεί με σύστημα αισθητήρων το μέγεθος της βλάβης
3. Να εκτιμηθεί η σοβαρότητα της βλάβης
4. Να εκτιμηθεί την εναπομένουσα ζωή της κατασκευής (Doebbling et al, 1996)

1.1.4 Σε τι αποσκοπεί ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας

Ο βασικός στόχος του SHM είναι η εξασφάλιση της υγιούς λειτουργίας της κατασκευής και η μείωση των δαπανών συντήρησης. Πρακτικά αυτό σημαίνει την αντικατάσταση των τεχνικών επιθεώρησης που πρέπει να γίνονται κυκλικά ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα με ένα ενσωματωμένο σύστημα συνεχούς παρακολούθησης, το οποίο θα καθιστά δυνατό τον εντοπισμό των βλαβών σε αρχικό στάδιο και ενημερώνει το μηχανικό για την κατάσταση της δομής ακόμα και σε πραγματικό χρόνο ώστε να αποφευχθεί μια πιθανή δομική αστοχία. Με την πάροδο του χρόνου το SHM έχει κατακτήσει τη θέση μίας μεθόδου ελέγχου της οποίας τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και πολύ βοηθητικά στο έργο του πολιτικού μηχανικού. Με την παράλληλη εξέλιξη της τεχνολογίας εξελίσσονται και τα μέσα στα οποία στηρίζεται, δίνοντας σαφέστερα, με μεγαλύτερο κύρος αποτελέσματα για την κατάσταση των δομών. Το δυσκολότερο μέρος της διαδικασίας είναι η αποσαφήνιση όλων εκείνων των παραμέτρων που σχετίζονται με την αστοχία ώστε να ενημερωθούμε άμεσα, πριν μια πιθανή βλάβη.

Οι φυσικές καταστροφές πληθαίνουν χρόνο με τον χρόνο, επηρεάζοντας δισεκατομμύρια ανθρώπους με αποτέλεσμα τη δαπάνη τρισεκατομμυρίων δολαρίων.

Η γήρανση των κατασκευών αναμένεται να κοστίζει πάνω από \$1 τρισ. μόνο στις ΗΠΑ. Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα κονδύλια των υποδομών εκτιμάται ότι θα αυξηθούν από \$4 τρισ./έτος το 2012 σε περισσότερα από \$9 τρισ./έτος έως το 2025.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring) αποτελεί ένα νέο επιστημονικό πεδίο, σκοπός του οποίου είναι η παροχή αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με την δομική κατάσταση των κατασκευών (ατέλειες, αστοχίες, κλπ).

Η παρακολούθηση μιας κατασκευής μας δίνει την πραγματική απόκριση της κατασκευής στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Με την εκμετάλλευση αυτής της πληροφορίας μπορούν να διορθωθούν θεωρητικές κανονιστικές προσεγγίσεις κατασκευής άλλα και να προσδιοριστούν εκ νέου όρια ασφαλής χρήσης της εκάστοτε κατασκευής.

1.1.5 Συστήματα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

- Φάσμα καταπόνησης (load spectrum)
Το σύστημα αυτό καταγράφει το σύνολο των φορτίων τα οποία επιβάλλονται στη κατασκευή κατά τη διάρκεια της ζωής του, από τη φάση της κατασκευής έως τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και προκαλούν το φαινόμενο της κόπωσης. Αυτό σημαίνει ότι με συνεχώς μικρότερης έντασης καταπονήσεις, η ικανότητα της κατασκευής να ανταπεξέλθει μειώνεται. Το σύστημα λειτουργεί κάνοντας χρήση του φάσματος φορτίσεων της κατασκευής.
- Παρακολούθηση υγιούς λειτουργίας
Τα συστήματα αυτά βασίζονται στην παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και καταγράφουν τις ακριβείς τιμές όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατασκευή με τη δυνατότητα να εκτιμούν το μέγεθος και την έκταση της αστοχίας.

Τα συστήματα αυτά κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Ολοκληρωμένα:** Συστήματα τα οποία μπορούν να αντιμετωπίσουν μια πιθανή βλάβη. Έχουν δηλαδή ολοκληρωμένο σύστημα αποτελούμενο από αισθητήρες, το οποίο εν συνεχεία επεξεργάζεται τα δεδομένα που του παρέχονται, έχοντας τη λογική της δομικής ακεραιότητας και έχει τη δυνατότητα να επιβάλλει τεχνικές αντιμετώπισης της ασκούμενης επίδρασης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή που ασκείται.
- **Μερικώς ολοκληρωμένα:** Συστήματα τα οποία με τη βοήθεια των αισθητήρων παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατάσταση της δομής στον πολιτικό μηχανικό, έχοντας τη λογική της δομικής ακεραιότητας, χωρίς όμως να μπορεί να αντιδράσει σε οποιοδήποτε ερέθισμα.

1.1.6 Τεχνικές παρακολούθησης υγιούς λειτουργίας

Διακρίνουμε δύο τεχνικές παρακολούθησης υγιούς λειτουργίας:

- **Τοπικές τεχνικές:**
Αναφέρεται σε μικρής κλίμακας έργα. Πρέπει να γνωρίζουμε εκ των προτέρων το σημείο της πιθανής αστοχίας καθώς και τη φύση της.
- **Καθολικές τεχνικές:**
Απευθύνεται κυρίως σε έργα μεγαλύτερης κλίμακας, όμως μπορεί να εφαρμοστεί και σε μικρότερης έκτασης έργα. Μπορεί να παρακολουθήσει τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά της δομής.

1.1.7 Σε τι έργα απευθύνεται το SHM

Ο έλεγχος δομικής υγείας των κατασκευών, όπως είδαμε και παραπάνω, εφαρμόζεται με πολύ σημαντικό ρόλο στα έργα πολιτικού μηχανικού. Ανάλογα με τη σπουδαιότητα του κάθε έργου κρίνεται και η ανάγκη για εφαρμογή της μεθόδου. Τέτοια έργα μπορεί να είναι χώροι με μεγάλη ιστορική και πολιτισμική αξία, όπως αρχαιολογικοί χώροι, μνημεία και κτίρια τα οποία κρίνεται αναγκαίο να προφυλάξουμε έναντι μίας πιθανής βλάβης.

Απευθύνεται ακόμη σε έργα μεγάλης σπουδαιότητας για τον κόσμο, όπως νοσοκομεία, σχολεία και άλλα έργα τα οποία είναι τόπος συγκέντρωσης μεγάλου πληθυσμού. Σημαντικό είναι να ελέγχονται και τα έργα υποδομής όπως γέφυρες και έργα οδοποιίας. Δεν είναι όμως αναγκαία η εφαρμογή ενόργανης παρακολούθησης σε όλες τις κατασκευές πολιτικού μηχανικού λόγω του κόστους της. Κάποιοι λόγοι που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μία συμβατική κατασκευή θα ήταν πιθανόν η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των υλικών κατά τη διάρκεια της φάση της κατασκευής ενός έργου, είτε κατά την διάρκεια εκτέλεσης απαραίτητων επεμβάσεων για την ενίσχυση μίας υφιστάμενης κατασκευής. Γενικά όμως θα ήταν χρήσιμο και για ερευνητικούς σκοπούς, εφαρμόζοντας τη μέθοδο κατά το σχεδιασμό των κατασκευών και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα για βελτίωση της μελέτης.

1.1.8 Μέλη που απαρτίζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

Για να έχουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ΠΔΑ πρέπει να παρέχονται κάποιες βασικές πληροφορίες και σε σχέση με τις ενέργειες που προκάλεσαν τις βλάβες στην κατασκευή.

Για να γίνει δυνατό αυτό πρέπει οι υπεύθυνοι να είναι καταρτισμένοι σε διάφορους επιστημονικούς τομείς ως προς τις κατασκευές, τις ιδιότητες των υλικών, να κατέχουν γνώσεις αναφορικά με την τεχνολογία και λειτουργία των αισθητήρων, να έχουν την ικανότητα αναγνώρισης μίας βλάβης καθώς επίσης βασικές είναι οι γνώσεις πληροφορικής με προϋπόθεση να μπορούν να συλλέξουν και να επεξεργαστούν σωστά τα δεδομένα που αποδίδονται από το σύστημα. Μπορούμε να καταλάβουμε λοιπόν ότι είναι ένα αρκετά πολύπλοκο και εξειδικευμένο πεδίο που αποτελείται από τα παρακάτω συστήματα:

- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ

1.1.8.1 Σύστημα αισθητήρων

Το δίκτυο των αισθητήρων είναι το πρώτο και βασικό κομμάτι για τη σωστή παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας μίας δομής. Οι συσκευές αυτές, οι οποίες εντοπίζουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά του υλικού στο οποίο είναι τοποθετημένες, συλλέγουν στοιχεία τα οποία ο χρήστης δεν θα μπορούσε να εντοπίσει. Είναι απαραίτητη λοιπόν η σωστή μελέτη για τον εντοπισμό των κατάλληλων θέσεων εγκατάστασής τους καθώς και η εύρεση του καταλληλότερου αισθητήρα ανάλογα με τα επιθυμητή περιοχή

παρακολούθησης. Υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων που μπορούν να αντιληφθούν και να μετρήσουν αλλαγές στη θερμοκρασία, στη κίνηση, στην υγρασία, στο φως κ.α.

Σήμερα διατίθενται αρκετοί τύποι αισθητήρων όπως μηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης και άλλων τύπων, επιταχυνσιόμετρα, ανεμόμετρα, αισθητήρες παραμόρφωσης, οπτικών ινών αισθητήρες αλλαγής θέσης κ.α. Οι συσκευές παρακολούθησης έχουν δυνατότητες υπολογισμού, μπορούν να έχουν κάποια περιορισμένη μνήμη για να συγκρατούν τα δεδομένα τα οποία έχουν συλλέξει. Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού μίας συγκεκριμένης τιμής, πάνω από την οποία θεωρούνται σημαντικές οι καταγραφές από τον αισθητήρα ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση μεγάλου όγκου άχρηστων δεδομένων.

Ένα ακόμη σημαντικό που έρχεται να προστεθεί είναι η δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων. Με αυτό τον τρόπο οι συνδέσεις και η επικοινωνία είναι αρκετά ασφαλέστερες σε σχέση με αυτές με σύνδεση καλωδίων λόγω μείωσης θορύβου ο οποίος δημιουργείται στο καλώδιο, αποφεύγονται τα σφάλματα ως προς την πολυπλοκότητα της ενσύρματης σύνδεσης κ.α. Βέβαια αυτές οι συσκευές ανεξάρτητα, έχουν μικρές δυνατότητες καθώς η έκταση της περιοχής που μπορούν να ελέγξουν είναι περιορισμένη. Με συνδυασμένη χρήση όλων των αισθητήρων ως σύστημα και συλλογή των πληροφοριών που παρέχονται από διαφορετικά σημεία της κατασκευής μπορούν να αποδοθούν πολύ σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση μίας κατασκευής. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται και στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού η χρήση οπτικών ινών για παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας και ανίχνευση λαβών, κυρίως σε στοιχεία μεγάλου μήκους.

1.1.8.2 Σύστημα μεταφοράς δεδομένων

Τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από τους αισθητήρες πρέπει να μεταφερθούν στο σύστημα στο οποίο θα γίνει η αξιολόγηση και επεξεργασία τους. Ανάλογα το διατιθέμενο σύστημα η μεταφορά γίνεται με καταγραφή των δεδομένων από το χρήστη/εκτυπωτή και στη συνέχεια προχωράνε στην αξιολόγηση τους από τον ειδικό, όμως ευρέως, λόγω της αυτοματοποίησης των συστημάτων, η μεταφορά των δεδομένων πραγματοποιείται με χρήση δικτύου αυτόματα μετά την καταγραφή.

Με αυτό τον τρόπο, η πληροφορία είναι άμεσα διαθέσιμη στον υπολογιστή ή ακόμα και στο κινητό του υπεύθυνου επιστήμονα ο οποίος την παρακολουθεί και η αξιολόγηση γίνεται αμεσότερα, προλαμβάνοντας πιθανούς κινδύνους αστοχίας.

1.1.8.3 Σύστημα επεξεργασίας δεδομένων

Εκτός των πληροφοριών που σχετίζονται με αλλαγές στη δομή, παράλληλα αποθηκεύονται και πληροφορίες από εξωτερικούς παράγοντες οι οποίοι δεν έχουν καμία σχέση με τη προς μελέτη πληροφορία και δυσχεραίνουν τη διαδικασία αναγνώρισης και ερμηνείας του σήματος. Αν σε μία δομή οι αισθητήρες είναι διαφορετικού τύπου, πρέπει να υποστούν διαφορετική επεξεργασία για αφαίρεση του θορύβου.

1.1.8.4 Σύστημα αποθήκευσης δεδομένων

Μετά το φιλτράρισμα τους τα δεδομένα αποθηκεύονται ούτως ώστε να γίνει δυνατή η ανάλυση τους. Το μέσο αποθήκευσης πρέπει να είναι ικανό να ανακτά τα δεδομένα ανά πάσα στιγμή και το σημείο στο οποίο είναι αποθηκευμένα θα πρέπει να παρέχει αρκετά

στοιχεία για την αναγνώρισή του. Ανάλογα με την περίπτωση της επί παρακολούθησης κατασκευής κάποια δεδομένα τα οποία μπορεί να είναι κάποιο διάγραμμα ίσως είναι προτιμότερα από τυχαίες καταγραφές. Με τον περιορισμό όμως των δεδομένων για την καλύτερη διαχείρισή τους ίσως απορρίπτουν πληροφορίες οι οποίες να είναι σημαντικές για μελλοντική έρευνα.

1.1.8.5 Σύστημα ανίχνευσης βλαβών

Ο εντοπισμός μίας πιθανής βλάβης είναι μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, η οποία αναγνωρίζεται με την αλλαγή κάποιων από τις παραμέτρους της πρότυπης κατασκευής. Τα δεδομένα τα οποία έχουν συλλέξει οι αισθητήρες, έχουν επεξεργαστεί και αποθηκευτεί, μετατρέπονται σε φυσικές ποσότητες που συνδέονται άμεσα με τη κατασκευή. Δεν μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι η μετατροπή αυτή είναι ακριβείς αλλά γίνεται προσπάθεια για να διατυπωθεί όσο γίνεται ακριβέστερα.

1.2 Μεθοδολογία εγκατάστασης συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

- Εύρεση βέλτιστων θέσεων για ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων.
Εντοπίζονται μέσω προσομοιώσεων της κατασκευής και υπολογισμών συμφώνα με την αναμενόμενη συμπεριφορά της δομής, στα σημεία δηλαδή που η κατασκευή δέχεται μεγαλύτερες καταπονήσεις.
- Επιλογή κατάλληλου τύπου αισθητήρες.
Επιλέγεται το είδος του αισθητήρα ανάλογα με τα μεγέθη που θέλουμε να εντοπίζει, την ακρίβεια του ως προς τις μετρήσεις, το περιβάλλον τοποθέτησης κ.α.
- Εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων
Η εγκατάσταση του δικτύου πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό ώστε να διασφαλίζεται η σωστή εφαρμογή στα υπό παρακολούθηση δομικά στοιχεία και κατά συνέπεια την ακρίβεια των μετρούμενων τιμών.
- Σύνδεση αισθητήρων με δίκτυο
Γίνεται η σύνδεση των αισθητήρων με δίκτυο ούτως ώστε οι πληροφορίες που έχει συλλέξει το δίκτυο των αισθητήρων να μεταφερθούν στο χρήστη.
- Εγκατάσταση και σύνδεση αποκωδικοποιητή σήματος με σύστημα αισθητήρων.
Αποσαφηνίζουν το σήμα και από ηλεκτρονική το φέρουν σε φυσική μορφή. Είναι σε θέση να φιλτράρουν το σήμα, να το ενισχύουν, να αφαιρούν το θόρυβο κ.α. Συνήθως είναι απαραίτητη και μία κάρτα δεδομένων που μετατρέπει το σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό.
- Σύνδεση με Η/Υ και εμφάνιση αποτελεσμάτων σε μορφή κατανοητή προς το χρήστη.
Τα αποτελέσματα είναι τώρα αναγνώσιμα από το χρήστη και στη διάθεση του για αποσαφήνιση και επεξεργασία.

1.3 Αισθητήρες

Οι αισθητήρες είναι συσκευές οι οποίες ανιχνεύουν ένα σήμα ή μια διέγερση και παράγουν μία μετρήσιμη έξοδο. Είναι υπεύθυνοι δηλαδή για τη μετατροπή των φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων σε ηλεκτρικό σήμα και όταν αυτό αποκωδικοποιηθεί η αξιολόγηση τους γίνεται από το χρήστη. Υπάρχουν δύο ειδών τεχνολογίες αισθητήρων. Είναι αυτές οι οποίες συλλέγουν πληροφορίες για τη δομή και αυτοί οι οποίοι μπορούν να ελέγχουν το σύστημα. Δεν υπάρχει διαφορά στον αισθητήρα που χρησιμοποιείται στις δύο αυτές τεχνολογίες αλλά στο τρόπο που διαχειρίζονται την πληροφορία. Σε ένα σύστημα συλλογής πληροφοριών παρέχονται πληροφορίες για την κατάσταση της δομής στο χρήστη ενώ στο σύστημα ελέγχου το σήμα από τον αισθητήρα πηγαίνει στον ελεγκτή ο οποίος παράγει μια τιμή που ρυθμίζει τη λειτουργία του συστήματος. Οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν δυνάμεις, ταλαντώσεις, μετακινήσεις κ.α.

1.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

➤ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

Με τον όρο συμβατότητα περιγράφεται το κατά πόσο το αισθητήριο όργανο επηρεάζει τη μετρούμενη τιμή. Από άποψη συμβατότητας καταλληλότερος είναι ένας αισθητήρας που έχει μηδενική επιρροή πάνω στο φυσικό μέγεθος.

➤ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Βαθμονόμηση είναι οι μονάδες τις οποίες μετρά η κλίμακα του αισθητήρα. Κατά τη βαθμονόμηση εφαρμόζονται στον αισθητήρα οι γνωστές μετρήσιμες τιμές του μεγέθους που θέλουμε να προσδιορίσουμε και μετρούνται οι αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού σήματος εξόδου. Η ακρίβεια της βαθμονόμησης επηρεάζει την ακρίβεια του συστήματος.

➤ ΕΥΡΟΣ

Τα όρια εντός των οποίων λειτουργεί ο αισθητήρας με αξιοπιστία και περιγράφεται με μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Το εύρος μπορεί να αναφέρεται και σε παραμέτρους στις οποίες ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει εντός κάποιων ορίων όπως είναι η πίεση, η υγρασία, η θερμοκρασία κ.α.

➤ ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ

Επαναληψιμότητα αναφέρεται ως η δυνατότητα παραγωγής της ίδιας τιμής εξόδου αν ο αισθητήρας δεχτεί ίδιου βαθμού δύναμη σε διαφορετικό χρόνο.

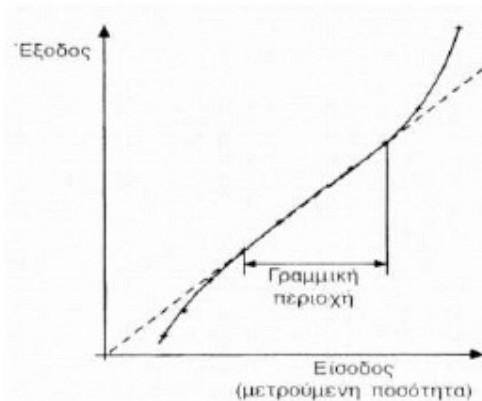
➤ ΑΚΡΙΒΕΙΑ

Αναμενόμενο σφάλμα μεταξύ πραγματικών και ιδανικών αποτελεσμάτων. Ιδανικότερο είναι το σφάλμα να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρό.



Εικόνα 1. Σχέση ακρίβειας-επαναληψιμότητας

- **ΣΦΑΛΜΑ**
Διαφορά πραγματικής τιμής από τη μετρήσιμη.
- **ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ**
Το στατικό σφάλμα είναι αυτό που παραμένει σταθερό και βρίσκεται σε όλες τις τιμές εισόδου μίας συσκευής. Αν είναι γνωστό το σφάλμα αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς να επηρεαστεί η ακρίβεια της συσκευής.
- **ΑΝΟΧΗ**
Το μέγιστο ποσοστό σφάλματος που μπορεί να υπάρξει κατά τη λειτουργία του αισθητήρα
- **ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ**
Η μέγιστη προσέγγιση γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς σε ορισμένο εύρος (γραφική παράσταση δεδομένων εξόδου ως προς την είσοδο). Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών. Μπορεί επίσης να εκφραστεί ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας της μέγιστης απόκλισης από την ευθεία γραμμή της συνάρτησης



Εικόνα 2. Γραμμικότητα αισθητήρα

- **ΘΟΡΥΒΟΣ**
Θόρυβος παράγεται μαζί με το σήμα από τον αισθητήρα και σε μεγάλες ποσότητες περιορίζει την απόδοση του συστήματος. Επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως πηγές ήχου, πηγές τάσης υψηλής συχνότητας κ.α. Από τον τύπο του αισθητήρα καθορίζεται κατά πόσο επηρεάζεται η ακρίβεια και η διακριτική ικανότητα του από τον θόρυβο.

➤ **ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ**

Διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα ορίζεται ως το μικρότερο διάστημα που μπορεί να γίνει αντιληπτό και να μετρηθεί από αυτόν. Όσο μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα διαθέτει ένας αισθητήρας τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί να καταγράψει.

➤ **ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ**

Ευαισθησία ορίζεται ως η μικρότερη ασυνέχεια που μπορεί να ανιχνευθεί από τον αισθητήρα.

Ορίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\text{Ευαισθησία} = (\text{Μέγιστη τιμή εξόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εξόδου}) / (\text{Μέγιστη τιμή εισόδου} / \text{Ελάχιστη τιμή εισόδου})$$

Αν η ευαισθησία των τιμών εισόδου ως προς την έξοδο είναι γραμμική σε όλο το εύρος τιμών, τότε είναι ίδια για όλο το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα, διαφορετικά η ευαισθησία διαφοροποιείται ως προς τις τιμές.

➤ **ΑΠΟΚΡΙΣΗ**

Ο χρόνος που απαιτείται ώστε να μετρηθεί η τελική τιμή μιας εισόδου. Εκφράζεται ως ποσοστό συγκριτικά με το χρόνο. Π.χ. Έφτασε στο 90% της τελικής τιμής της εξόδου σε χρόνο 5 δευτερολέπτων.

➤ **ΕΥΚΡΙΝΕΙΑ**

Ευκρίνεια ορίζεται ως η διάκριση μεταξύ δύο ασυνεχειών.

➤ **ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ**

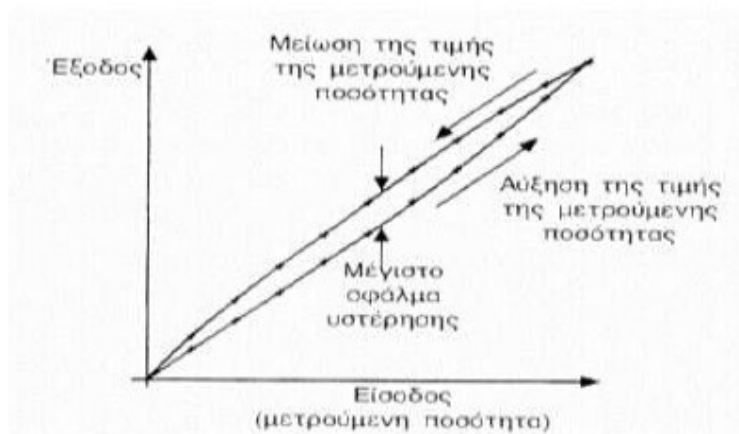
Ως Ευσταθία ορίζεται το σφάλμα εξόδου όταν η τιμή εισόδου παραμένει σταθερή για κάποιο χρονικό διάστημα.

➤ **ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ**

Ως διαφορά φάσης ορίζεται η διαφορά μεταξύ της έναρξης καταγραφής δύο αισθητήρων.

➤ **ΥΣΤΕΡΙΣΗ**

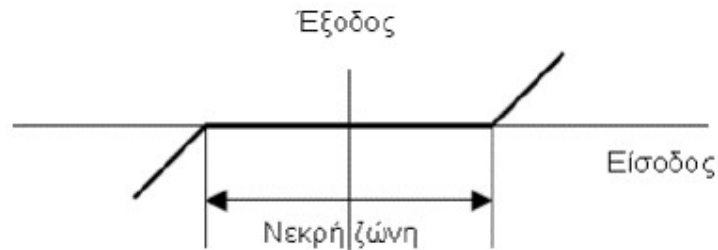
Το μέγεθος του αναμενόμενου σφάλματος σε σχέση με τη μετρήσιμη τιμή (όταν το ερέθισμα ακολουθεί διακύμανση). Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη τιμή που μετρά ένας αισθητήρας να αυξάνεται με σταθερό ρυθμό και όταν φτάσει στην μέγιστη τιμή της ξεκινά να μειώνεται με τον ίδιο σταθερό ρυθμό μέχρι το μηδενισμό της. Το σφάλμα είναι η απόσταση που αποκτούν μεταξύ τους στο γράφημα.



Εικόνα 3. Γραφική παράσταση υστέρησης

➤ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ

Η μέγιστη αλλαγή στη δομή ως την οποία δεν επηρεάζεται το αποτέλεσμα. Αυτή η περιοχή συνήθως είναι γύρω από το μηδέν και δεν ανταποκρίνεται στις μεταβολές της μετρούμενης ποσότητας.



Εικόνα 4. Νεκρή ζώνη

1.3.2 Κατηγορίες αισθητήρων

❖ Οι αισθητήρες ανάλογα τον τύπο τους ταξινομούνται σύμφωνα με στις παρακάτω κατηγορίες:

- Θερμικούς
- Μηχανικούς
- Χημικούς
- Μαγνητικούς
- Ακτινοβολίας

Στη παρακολούθηση της δομικής υγείας των κατασκευών κυρίως χρησιμοποιούνται μηχανικοί αισθητήρες οι οποίοι είναι ικανοί να μετρήσουν ταχύτητα, επιτάχυνση, θέση, δύναμη κ.α.

❖ Μία επιπλέον διάκριση που μπορεί να γίνει είναι ανάλογα με το εάν ο αισθητήρας για να λειτουργήσει παράγει ο ίδιος την ενέργεια ή αν είναι απαραίτητη μια εξωτερική πηγή ενέργειας για το σκοπό αυτό. Στην πρώτη

περίπτωση οι αισθητήρες ορίζονται ως παθητικοί ενώ στην δεύτερη ενεργητικοί.

1.3.3 Μέθοδοι εφαρμογής και εγκατάστασης αισθητήρων

Οι Αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής μπορεί να είναι ενσύρματοι ή ασύρματοι. Οι Ασύρματοι αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν σε μία δομή χωρίς συνδέσεις και καλώδια, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς ενσύρματους. Το αρνητικό των ασύρματων αισθητήρων είναι το μεγαλύτερο κόστος των συσκευών όμως, αποφεύγοντας τη χρήση καλωδίων επιτυγχάνουμε χαμηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης στο σύστημά μας καθώς επίσης, έτσι, μπορεί έτσι να αυξηθεί ο αριθμός των αισθητήρων που θα χρησιμοποιήσουμε έχοντας καλύτερα αποτελέσματα ως προς τις παρεχόμενες στο χρήστη πληροφορίες.

1.3.4 Προδιαγραφές επιλογής αισθητήρων

Οι απαιτήσεις της παρακολούθησης της δομικής υγείας των κατασκευών με χρήση αισθητήρων οδηγούν σε κάποια δεδομένα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να πληροί ένας αισθητήρας. Ανάλογα με το πόσο κοντά είναι σε αυτά, θεωρείται πληρέστερος και καταλληλότερος για την εκάστοτε χρήση.

Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν λειτουργικό έναν αισθητήρα είναι:

- Χαμηλό κόστος απόκτησης
- Χαμηλό κόστος εφαρμογής
- Ανάγκη συντήρησης
- Χαμηλή ενεργειακή απαίτηση
- Διάρκεια ζωής
- Ακρίβεια
- Αξιοπιστία
- Χρόνος συλλογής δεδομένων
- Χρόνος μεταφοράς πληροφοριών (Ταυτόχρονη δυνατότητα μετάδοσης)
- Αναλυτικά δεδομένα
- Μη επιρροή από εξωτερικούς παράγοντες

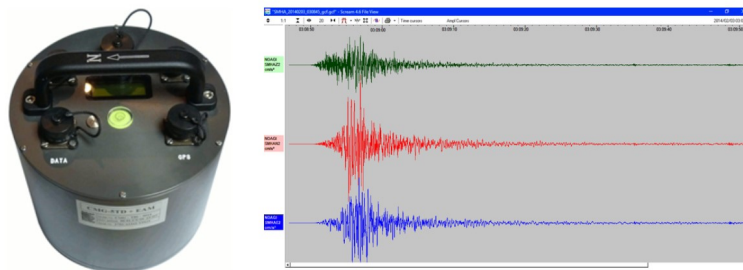
2 Συστήματα Ενόργανης Δομικής Παρακολούθησης

Πληθώρα συστημάτων ενόργανης παρακολούθησης παρέχονται στην αγορά για την καταγραφή των φυσικών μεγεθών που επηρεάζουν τις κατασκευές. Ορισμένα από τα συστήματα αυτά παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Οι αισθητήρες επιλέγονται έτσι ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη πληροφορία σχετικά με τη δομική κατάσταση της κατασκευής. Στο εμπόριο διατίθεται σημαντικό πλήθος αισθητήρων διαφόρων τύπων. Συγκεκριμένα διατίθενται μηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης και άλλων τύπων, μετρητές μετατοπίσεων και αποκλίσεων, επιταχυνσιόμετρα, ανεμόμετρα, μετρητές παραμορφώσεων με οπτικές ίνες κ.α.

2.1.1 Επιταχυνσιογράφος

Οι επιταχυνσιογράφοι αποτελούν ειδική κατηγορία σειсмоγραφικών οργάνων. Τα σεισογραφήματα των οργάνων αυτών παρέχουν τη σεισμική επιτάχυνση σε συνάρτηση με τον χρόνο λόγω της ιδιοσυχνότητάς τους η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη δεσπόζουσα συχνότητα του σεισμού. Η βασική τους χρησιμότητα είναι σε εφαρμογές Τεχνικής Σεισμολογίας, γι' αυτό και εγκαθίστανται σε τεχνικές κατασκευές (κτήρια, γέφυρες, φράγματα, πυρηνικούς σταθμούς κλπ.).



Εικόνα 5. Σύγχρονος ψηφιακός επιταχυνσιογράφος CMG-5TDE (Guralp Systems Ltd) και η καταγραφή του σεισμού της Κεφαλονιάς (Ιανουάριος 2014) από επιταχυνσιογράφο αυτού του τύπου.

2.1.2 Αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας (Velocimeter)

Οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας μετρούν τη γραμμική ταχύτητα ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας μεθόδους εξ επαφής ή χωρίς επαφή. Σημαντικές προδιαγραφές που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή αισθητήρα γραμμικής ταχύτητας περιλαμβάνουν τη μέγιστη ταχύτητα, το μέγιστο εύρος μετρήσεων, την ακρίβεια και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η μέγιστη ταχύτητα αντιπροσωπεύει τη μέγιστη γραμμική ταχύτητα που μπορεί να μετρηθεί. Το μέγιστο εύρος μετρήσεων είναι το μέγιστο εύρος ή η απόσταση όπου ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει την ταχύτητα. Η ακρίβεια μέτρησης της συσκευής μετράται σε ποσοστό επί τοις εκατό του πλήρους εύρους μέτρησης ($\pm\%$ full scale). Η ακρίβεια μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους, και μπορεί να περιλαμβάνει τη μη-γραμμικότητα, την υστέρηση και το βαθμό διακριτότητας

των μετρήσεων. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι το εύρος εκείνων των θερμοκρασιών στο οποίο πρέπει να λειτουργεί η συσκευή.

Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας χρησιμοποιούν προεκτάσεις καλωδίων, μαγνητική επαγωγή, μικροκύματα, οπτικές ίνες ή laser, πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους, ραντάρ ή ραδιοφωνική συχνότητα, παραμορφωσιόμετρα και υπερηχητικά κύματα. Στους αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας με προέκταση καλωδίων, το μετακινούμενο αντικείμενο συνδέεται με ένα καλώδιο, το οποίο συνδέεται και με ένα ποτενσιόμετρο. Καθώς το αντικείμενο μετακινείται, η τιμή της αντίστασης του ποτενσιόμετρου μεταβάλλεται. Οι αισθητήρες μαγνητικής επαγωγής λειτουργούν χωρίς επαφή και χρησιμοποιούν επαγωγικό ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργούμενο από μαγνητικό πεδίο για τη μέτρηση της γραμμικής ταχύτητας. Οι αισθητήρες μικροκυμάτων χρησιμοποιούν τεχνολογία που βασίζεται σε μικροκύματα για τον καθορισμό της ταχύτητας, ενώ οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούν οπτικές ίνες ή τεχνολογία laser για τον καθορισμό της. Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων γραμμικής ταχύτητας, ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό συμπιέζεται και δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο το οποίο μετράται από ενισχυτή ηλεκτρικού φορτίου. Συχνά πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μέτρησης της ταχύτητας ταλάντωσης.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν τεχνολογία ραντάρ εκπέμπουν κύματα τα οποία ανακλώνται στην επιφάνεια του παρακολουθούμενου αντικειμένου και κατόπιν επιστρέφουν στον αισθητήρα. Η ταχύτητα καθορίζεται μετρώντας τη διαφορά της συχνότητας (φαινόμενο Doppler). Στα παραμορφωσιόμετρα (strain gage devices), ευαίσθητες σε παραμορφώσεις μεταβλητές αντιστάσεις, συνδέονται με τμήματα της κατασκευής, τα οποία παραμορφώνονται κατά τη μέτρηση. Τυπικά, τα παραμορφωσιόμετρα χρησιμοποιούνται ως στοιχεία κυκλώματος γέφυρας Wheatstone, το οποίο χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων. Οι υπερηχητικοί αισθητήρες βασίζονται στην ίδια αρχή με τους αισθητήρες radar, αλλά κάνουν χρήση υπερηχητικών κυμάτων.

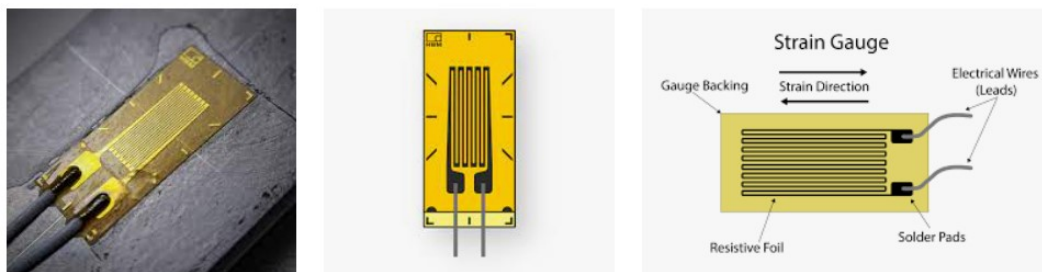
Οι συνήθεις ηλεκτρικοί έξοδοι των αισθητήρων γραμμικής ταχύτητας περιλαμβάνουν τάση, ρεύμα, ραδιοσυχνότητα (RF), διακόπτη κυκλώματος ή σύστημα συναγερμού (switch or alarm), σειριακή ή παράλληλη έξοδο, Ethernet, SERCOS, SSI, and συμβατού με TTL. Οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας μπορεί να είναι συσκευές διαφόρων ειδών, όπως στοιχείο αισθητήρα ή chip, αισθητήρας ή διάταξη μετατροπής (transducer), όργανο ή μετρητής), gauge ή δείκτης (indicator), καταγραφέας και αθροιστές. Ένα στοιχείο αισθητήρα ή chip, είναι μια μη πολύπλοκη συσκευή, όπως ένα παραμορφωσιόμετρο, ή μια συσκευή ενσωματωμένη δυνατότητα επεξεργασίας/διαχείρισης σήματος. Ένας αισθητήρας ή μια διάταξη μετατροπής είναι μια πιο πολύπλοκη συσκευή με δυνατότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης σήματος, η οποία τροφοδοτείται με ρεύμα και παρέχει στην έξοδο π.χ. τάση DC, βρόχο ηλεκτρικού φορτίου 4-20mA κλπ. Ένα όργανο ή μετρητής συνιστούν μια αυτοδύναμη μονάδα η οποία παρέχει ως έξοδο π.χ. απεικόνιση, τοπικά ή κοντά στην συσκευή. Αυτοί οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν επεξεργασία και διαχείριση του σήματος. Ένας μετρητής (gauge) ή δείκτης (indicator) είναι μια συσκευή που παρέχει (συνήθως αναλογική) απεικόνιση και όχι ηλεκτρονικές εξόδους όπως π.χ. ένας μετρητής τάσης (tension gage). Ένας καταγραφέας (recorder) ή αθροιστής (totalizer) είναι ένα όργανο που καταγράφει, αθροίζει ή παρακολουθεί μετρήσεις στο χρόνο.

Τα συνήθη χαρακτηριστικά των αισθητήρων γραμμικής ταχύτητας περιλαμβάνουν πολλαζονικές μετρήσεις, εφαρμογές σε οχήματα και μέσα μεταφοράς, διασφάλιση ασφαλούς κατασκευής (intrinsically safe (IS) construction). Οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας μπορούν να δώσουν επιπρόσθετες μετρήσεις της διαμέτρου, κατεύθυνσης, απόστασης ή μετατόπισης, ροής, μήκους, πάχους, κλίσης ή γωνίας και ταλάντωσης.

2.1.3 Μετρητής παραμόρφωσης (Strain gauge)

Τα παραμορφωσιόμετρα είναι όργανα μέτρησης που μετατρέπουν τη δύναμη, την πίεση, τον εφέλκυσμό, κλπ., σε ηλεκτρικό σήμα. Είναι οι πιο διαδεδομένες συσκευές μέτρησης που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρική καταγραφή μηχανικών ιδιοτήτων. Το παραμορφωσιόμετρο είναι ένας ωμικός ελαστικός αισθητήρας του οποίου η αντίσταση συναρτάται με την εφαρμοζόμενη παραμόρφωση.

Σε πολλά είδη παραμορφωσιόμετρων η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από την παραμόρφωση. Τέτοια είδη είναι οι μετρητές πιεζοαντοχής (piezoresistive) ή ημιαγωγοί semiconductor, ανθρακοωμικοί (carbon-resistive), συνδεδεμένων μεταλλικών συρμάτων bonded metallic wire και λεπτού ελάσματος foil gauges. Αναφορικά, με αυτούς τους μετρητές, η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται γραμμικά με την παραμόρφωση. Η αντίσταση ενός ηλεκτρικά αγωγίμου αντικειμένου μεταβάλλεται όταν διαφοροποιούνται οι γεωμετρικές διαστάσεις του, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ελαστικών παραμορφώσεων. Στη συνέχεια η γέφυρα Wheatstone μετασχηματίζει την προηγούμενη διαφοροποίηση σε απόλυτη τάση. Η τιμή που προκύπτει εξαρτάται γραμμικά από την παραμόρφωση μέσω μιας σταθεράς η οποία καλείται συντελεστής μέτρησης (gauge factor). Οι συσκευές χωρητικότητας, των οποίων η χωρητικότητα εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της παραμόρφωσης. Μεταβάλλοντας το εμβαδό της πλάκας ή το κενό μεταβάλλεται και η χωρητικότητα. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία συνίσταται ο πυκνωτής, είναι σχετικά ασήμαντες, έτσι τα υλικά των παραμορφωσιόμετρων επιλέγονται ανάλογα με τις μηχανικές απαιτήσεις. Αυτό επιτρέπει στα παραμορφωσιόμετρα να είναι περισσότερο rugged, παρέχοντας σε αυτά σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραμορφωσιόμετρα αντίστασης.



Εικόνα 6. Μετρητής παραμόρφωσης

Στην περίπτωση των φωτοηλεκτρικών παραμορφωσιόμετρων μια δέσμη φωτός διέρχεται από μια μεταβαλλόμενη σχισμή, η οποία ενεργοποιείται από ένα μηκυνσιόμετρο (extensometer), και κατευθύνεται σε ένα φωτοηλεκτρικό στοιχείο. Καθώς το άνοιγμα της σχισμής μεταβάλλεται, η ποσότητα του φωτός που φθάνει στο φωτοηλεκτρικό στοιχείο cell μεταβάλλεται επίσης, προκαλώντας μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος

που παράγεται από το προαναφερθέν στοιχείο. Τα ημιαγώγιμα ή τα πιεζοηλεκτρικά παραμορφωσιόμετρα κατασκευάζονται από φεροηλεκτρικά υλικά. Αναφορικά με τα φεροηλεκτρικά υλικά, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, μεταβάλλεται το ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνεια τους κατά τη μηχανική ένταση των κρυστάλλων. Η ωμική επίδραση ορίζεται ως η μεταβολή της αντίστασης ενός υλικού λόγω εφαρμοσμένης έντασης και αυτός ο όρος χρησιμοποιείται ευρέως για τα ημιαγώγιμα υλικά. Τα οπτικά παραμορφωσιόμετρα είναι τα φωτοελαστικά, ιντερφερόμετρα και τα ολογραφικά ιντερφερόμετρα. Σχετικά με τα παραμορφωσιόμετρα οπτικών ινών ο αισθητήρας μετρά την παραμόρφωση μεταβάλλοντας τη συχνότητα του φωτός που ανακλάται ελαφρώς στη σχάρα ίνας Bragg, η οποία είναι ενσωματωμένη στο εσωτερικό της ίδιας της ίνας.

Η μορφή του μετρητή αφορά στο σχήμα της σχάρας, τον αριθμό και τον προσανατολισμό των σχαρών για πολλαπλών-σχαρών (ροζέτα) μετρητή, τα κολλημένα τεμάχια και διάφορα άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Ως προς τη διευθέτηση, τα παραμορφωσιόμετρα διακρίνονται σε μονοαξονικά, διγραμμικά, λωριδοειδείς μετρητές (strip gauges), διαφράγματα, ροζέτα σχήματος ταυ, ροζέτα σχήματος δέλτα και ορθογώνια ροζέτα. Ειδικές εφαρμογές των παραμορφωσιόμετρων είναι η παρακολούθηση και η διάδοση ρωγμών, το μηκυνσιόμετρο (extensometer) όπως και οι μετρήσεις θερμοκρασίας, παραμένουσας αντοχής, διαμητικού μέτρου ελαστικότητας και τέλος η διάταξη μετατροπής.

Οι τρεις βασικές προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή παραμορφωσιόμετρων είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης (συμπεριλαμβανομένων του ρυθμού μεταβολής, του μεγέθους και της χρονικής εξάρτησης) και τέλος η σταθερότητα που απαιτείται κατά την εφαρμογή.

Το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας είναι το εύρος της θερμοκρασίας περιβάλλοντος όπου το παραμορφωσιόμετρο λειτουργεί χωρίς μόνιμες διαφοροποιήσεις των μετρητικών ιδιοτήτων του. Άλλες επίσης σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι το ενεργό μήκος μέτρησης, ο συντελεστής μέτρησης, η ονομαστική αντίσταση και το ευαίσθητο σε παραμόρφωση υλικό. Το μήκος μέτρησης του παραμορφωσιόμετρου είναι το ενεργό ή το ευαίσθητο σε παραμορφώσεις μήκος της μεταλλικής πλάκας (grid).

Οι ακραίοι βρόχοι και τα επικολλημένα τεμάχια δεν είναι ευαίσθητα σε παραμορφώσεις λόγω του σχετικά μεγάλου εμβαδού της διατομής τους και της χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης. Η ευαισθησία σε παραμόρφωση, k , ενός παραμορφωσιόμετρου είναι ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ των σχετικών με την αντίσταση διαφοροποιήσεων. Η ευαισθησία σε παραμόρφωση είναι αδιάστατη και γενικά καλείται συντελεστής μέτρησης. Η αντίσταση ενός παραμορφωσιόμετρου ορίζεται ως η ηλεκτρική αντίσταση που μετράται μεταξύ δυο μεταλλικών ελασμάτων (ribbons) ή επιφανειών επαφής οι οποίες αποσκοπούν στην υλοποίηση της σύνδεσης των μετρητικών καλωδίων. Το κύριο στοιχείο που καθορίζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός παραμορφωσιόμετρου είναι το ευαίσθητο σε παραμόρφωση υλικό που χρησιμοποιείται στη σχάρα του ελάσματος (foil grid).

Κοινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των παραμορφωσιόμετρων περιλαμβάνουν την επένδυση των μεταλλικών ελασμάτων (ribbon leads), την επένδυση των συρμάτων (lead wires), την επικόλληση τεμαχίων (solder tabs), τη κρυογενική χρήση (cryogenic use), την

δυνατότητα εγκατάστασης με ενσωμάτωση embeddable, την προστασία με κάλυμα (encapsulated), την υδατοστεγανότητα, και τη συγκολλησιμότητα.

Η λειτουργία πολλών τύπων παραμορφωσιόμετρων βασίζεται στην ηλεκτρική αντίσταση σε παραμόρφωση. Αυτοί οι τύποι περιλαμβάνουν τα πιεζοωμικά ή ημιαγώγιμα, ανθρακο-ωμικά, συγκολλημένων μεταλλικών συρμάτων (bonded metallic wire) παραμορφωσιόμετρα καθώς και ελασματοειδή όργανα μέτρησης (foil gauges). Για αυτά τα παραμορφωσιόμετρα η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται επίσης γραμμικά με την παραμόρφωση.

2.1.4 Σύστημα Παρακολούθησης Θερμοκρασίας Περιβάλλοντος

Το θερμόμετρο καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ώστε να είναι εφικτή η συσχέτιση αυτής με τη συμπεριφορά της κατασκευής.



Εικόνα 7. Μετρητής θερμοκρασίας

2.1.5 Σύστημα Παρακολούθησης Στάθμης Υδάτων

Με σκοπό την παρακολούθηση της στάθμης υδάτων υποκείμενων ποταμών / ρεμάτων είτε σε παράκτιες κατασκευές, σε επιλεγμένες θέσεις επί των τεχνικών μπορούν να εγκατασταθούν αισθητήρες μέτρησης της στάθμης υδάτων.



Εικόνα 8. Σύστημα Μέτρησης στάθμης υδάτων

2.1.6 Σύστημα Παρακολούθησης Ύψους Βροχής

Με σκοπό την παρακολούθηση του ύψους βροχής, σε επιλεγμένες θέσεις επί των τεχνικών μπορούν να εγκατασταθούν βροχόμετρα.



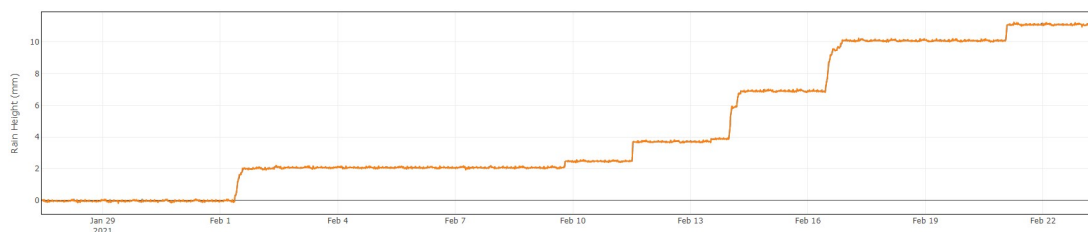
Εικόνα 9. Σύστημα Μέτρησης ύψους βροχής

Βροχομετρικά δεδομένα:

Τα δεδομένα βροχόπτωσης των μετεωρολογικών σταθμών δίνουν μια εκτίμηση για το ύψος βροχής σε mm σε σχέση με το χρόνο. Ακολουθούν παράδειγματα δεδομένων καταγραφής ενός βροχόμετρου.

► ΤΑΤΟΙ

ΗΜΕΡΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ	23	24	24	24	24	24	24	24	25	25
ΩΡΑ UTC	21	00	03	06	09	12	15	18	21	00
ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ mm	0	0	0	2	0	7,5	49,2	63	0	0



Εικόνα 10-11. Το ύψος βροχής στην περιοχή του Τατοίου για περίοδο καταγραφής τριών ημερών (άνω εικόνα) και συνεχής καταγραφή ενός μήνα ύψους βροχής (κάτω εικόνα)

3 Ακολουθία Ενόργανης Δομικής Παρακολούθησης

3.1 Επεξεργασία δεδομένων

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται από τους αισθητήρες περιέχουν και εξωγενείς πληροφορίες οι οποίες είναι απαραίτητο να φιλτραριστούν καθώς είναι μη οικονομικό να αποθηκευθούν. Είναι σημαντικό, για τη σωστή ερμηνεία των καταγραφών που συλλέχθηκαν, αυτές να καθαρισθούν και να επεξεργαστούν με κατάλληλο τρόπο. Με την εφαρμογή αποτελεσματικής και ορθής επεξεργασίας των καταγραφών επιτυγχάνεται εύκολη, γρήγορη και ακριβής ερμηνεία τους.

Η επεξεργασία των καταγραφών είναι ένα σημαντικό στάδιο όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα αισθητήρων. Για παράδειγμα, μια γέφυρα ενδέχεται να παρακολουθείται με τη χρήση οπτικών ινών, ποτενσιομέτρων, ηλεκτρονικών μηκυνσιομέτρων, επιταχυσιομέτρων και με κάμερες. Αρκετοί από αυτούς τους αισθητήρες ενδέχεται να απαιτούν εντελώς διαφορετική προσαρμογή σήματος (τάση λειτουργίας, calibration factor) για την απόκτηση των δεδομένων τους. Το μόνο κοινό στοιχείο μεταξύ αυτών των διαφορετικών συστημάτων είναι ο κεντρικός υπολογιστής που επεξεργάζεται και αποθηκεύει τα δεδομένα. Είναι σημαντικό αυτός ο υπολογιστής να είναι δυνατό να επεξεργάζεται τα δεδομένα από όλους τους αισθητήρες και να τα συσχετίζει με κοινό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα ενός αισθητήρα μπορούν να συσχετισθούν με τα δεδομένα από άλλους αισθητήρες. Το ιδανικό θα ήταν αυτή η επεξεργασία να γίνεται πριν την αποθήκευση των δεδομένων.

Σε μια πιο προχωρημένη επεξεργασία τα δεδομένα διορθώνονται για θερμοκρασιακά φαινόμενα.

3.2 Αποθήκευση των επεξεργασμένων δεδομένων

Ο όρος αποθήκευση δεδομένων χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αποθήκευση δεδομένων τα οποία φιλτραρίστηκαν κατάλληλα και είναι διαθέσιμα για διάγνωση.

3.3 Διάγνωση

Το πιο σημαντικό στάδιο σε ένα σύστημα ΠΔΚ σχετίζεται με την διάγνωση ή την ερμηνεία των δεδομένων που συλλέχθηκαν και φιλτραρίστηκαν. Σε αυτό το στάδιο της ΠΔΚ οι μετρήσεις μετατρέπονται σε ποσότητες που σχετίζονται άμεσα με την απόκριση της κατασκευής. Για παράδειγμα οι μετρήσεις παραμόρφωσης μπορούν να γίνουν ποσότητες καμπτικής δυσκαμψίας, οι επιμηκύνσεις να γίνουν τάσεις ή οι επιταχύνσεις να γίνουν διαγράμματα φασματικής πυκνότητας συναρτήσει της συχνότητας. Η μετατροπή των δεδομένων σε δείκτες απόκρισης πάντα εξαρτάται από βασικές παραδοχές οι οποίες είναι σπάνια ακριβείς. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν προς το παρόν περιεκτικές διαδικασίες για την υπερνίκηση των δυσκολιών ως προς την ερμηνεία των δεδομένων.

Οι αισθητήρες είναι τα στοιχεία τα οποία βρίσκονται πάνω στην κατασκευή και καταγράφουν τις μεταβολές του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους. Οι δύο πιο κοινοί τύποι

αισθητήρων είναι οι ηλεκτρονικοί και οι οπτικοί. Ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας μεταβιβάζει ηλεκτρικά σήματα σε όρους ηλεκτρικού φορτίου ή μεταβολής τάσης. Ο οπτικός αισθητήρας μεταβιβάζει σήματα φωτός.

Σε συμβατικά συστήματα συλλογής δεδομένων η μονάδα ανάγνωσης λαμβάνει τα δεδομένα από τον αισθητήρα και τα μετατρέπει σε μεγέθη με φυσική έννοια. Σε αντίστοιχα συστήματα που λειτουργούν μέσω υπολογιστή, τα σήματα του αισθητήρα δεν μπορούν συνήθως να αναγνωσθούν από τον υπολογιστή. Τα σήματα πρέπει να διέλθουν από διαμορφωτή σήματος και από την κάρτα συλλογής δεδομένων πριν αναγνωσθούν από τον υπολογιστή.

Διαφορετικοί αισθητήρες συνήθως απαιτούν ειδικούς διαμορφωτές σήματος, ενώ μία κάρτα συλλογής δεδομένων μπορεί να λαμβάνει δεδομένα από μια ποικιλία διαμορφωτών σήματος. Οι διαμορφωτές σήματος έχουν πολλαπλή λειτουργία. Ενισχύουν τα ασθενή σήματα, απομονώνουν, φιλτράρουν, γραμμικοποιούν, διεγείρουν και γεφυρώνουν τις διατάξεις μετατροπής σήματος για την παραγωγή υψηλού επιπέδου σήματος. Το εξαγόμενο του διαμορφωτή σήματος, το οποίο περιέχει τα χαρακτηριστικά του μετρούμενου φυσικού φαινομένου, είναι αναλογικό. Η λειτουργία της κάρτας συλλογής δεδομένων είναι να μετατρέψει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό σήμα για τον υπολογιστή. Επίσης διατίθενται και συσκευές οι οποίες είναι ταυτόχρονα διαμορφωτές σήματος και κάρτες συλλογής δεδομένων.

Επιπροσθέτως, ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων που λειτουργεί με υπολογιστή, απαιτεί την χρήση λογισμικού συλλογής δεδομένων. Αυτό το πρόγραμμα ανιχνεύει τα δεδομένα από την κάρτα συλλογής δεδομένων, αναλύει και επεξεργάζεται τα δεδομένα, λαμβάνει προκαθορισμένες αποφάσεις και αποθηκεύει τα επεξεργασμένα δεδομένα στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή.

3.4 Μονάδες ένδειξης μετρήσεων αισθητήρων και διαμορφωτές σήματος

Οι μονάδες ενδείξεων και οι διαμορφωτές σήματος είναι τα συνιστώντα μέρη που αναλύουν και επεξεργάζονται το σήμα του αισθητήρα. Οι μονάδες ενδείξεων είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε συμβατικά συστήματα καταγραφής δεδομένων και διαθέτουν όργανα ενδείξεων για την απεικόνιση των μεγεθών που μετρούνται από τους αισθητήρες. Οι διαμορφωτές σήματος είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε συστήματα καταγραφών που λειτουργούν με υπολογιστή και παράγουν αναλογική τάση. Κατά τα άλλα δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο συσκευών. Επιπλέον υπάρχουν μερικές συσκευές που συνδυάζουν αυτές τις δύο λειτουργίες.

Οι ηλεκτρικοί αισθητήρες συνήθως χρειάζονται την εισαγωγή τάσης και ρεύματος και οι οπτικοί αισθητήρες χρειάζονται την εισαγωγή σημάτων φωτός. Αυτά τα σήματα αναπαράγονται επίσης στις συσκευές ενδείξεων και στους διαμορφωτές σήματος.

Γενικώς αυτές οι συσκευές επιτελούν τις παρακάτω λειτουργίες:

Παραγωγή σήματος εισόδου για τον αισθητήρα:

Οι αισθητήρες, όπως τα μηκυνσιόμετρα και οι αισθητήρες θερμικής αντίστασης απαιτούν την παροχή συνεχούς ρεύματος ή την παροχή ρεύματος διέγερσης. Οι μετρητές μετατοπίσεων (LVDT) απαιτούν την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος για την

λειτουργία τους και οι οπτικοί αισθητήρες απαιτούν υψηλής έντασης πολωμένου φωτός. Αυτά τα απαιτούμενα σήματα παράγονται στις συσκευές επίδειξης ενδείξεων και στους διαμορφωτές σήματος.

Ενίσχυση:

Οι διαμορφωτές σήματος ενισχύουν τα χαμηλού επιπέδου σήματα που λαμβάνουν από τους αισθητήρες. Μέσω αυτής της διαδικασίας αυξάνεται η διακριτότητα του οργάνου και μειώνεται ο θόρυβος του σήματος. Για την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, το σήμα του αισθητήρα πρέπει να ενισχύεται τόσο ώστε το μέγιστο εύρος τάσης του διαμορφωμένου σήματος να ισούται με το μέγιστο εύρος του σήματος που μπορεί να εισαχθεί στην κάρτα συλλογής δεδομένων.

Φιλτράρισμα:

Μέσω αυτής της διαδικασίας απομακρύνεται ο θόρυβος (άχρηστα σήματα) που λαμβάνεται από τον αισθητήρα. Αυτός ο θόρυβος παράγεται από εξωτερικές πηγές όπως γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος, ηλεκτρικούς κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, λαμπτήρες φθορισμού, κολλητήρια, οθόνες καθοδικού σωλήνα, υπολογιστές, ηλεκτρικές καταιγίδες, συγκολλήσεις, ραδιοφωνικούς πομπούς καθώς και από εσωτερικές πηγές όπως ημιαγωγούς, αντιστάσεις και πυκνωτές.

Μόνωση:

Όταν η είσοδος της κάρτας συλλογής δεδομένων και το σήμα που φθάνει στον διαμορφωτή σήματος είναι γειωμένα, προκύπτουν προβλήματα όταν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο γειώσεων. Αυτή η διαφορά δυναμικού οδηγεί στο φαινόμενο που είναι γνωστό ως κύκλωμα γείωσης. Αυτό ενδεχομένως να προκαλέσει ανακριβή απεικόνιση του συλλεγόμενου σήματος. Αν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο γειώσεων είναι πολύ μεγάλη, υπάρχει περίπτωση να καταστραφεί το σύστημα μέτρησης. Η χρήση μονωμένων υπομονάδων διαμόρφωσης σήματος αποκλείει την εμφάνιση φαινομένων κυκλώματος γείωσης και εξασφαλίζει ότι το σήμα συλλέγεται με ακρίβεια. Μια άλλη αιτία για την οποία απαιτείται μόνωση είναι αυτή κατά την οποία το καταγραφικό σύστημα ενδεχομένως να παρουσιάζει αιφνίδιες μεταβολές τάσης. Η μόνωση του σήματος του αισθητήρα από τον υπολογιστή είναι ένα μέτρο ασφαλείας για την προστασία του υπολογιστή από πιθανή βλάβη.

Δημιουργία κυκλώματος γέφυρας:

Μερικοί αισθητήρες όπως τα μηκυνσιόμετρα και οι αισθητήρες θερμικής αντίστασης λειτουργούν ως μέρος κυκλώματος γέφυρας Wheatstone. Οι διαμορφωτές σήματος και οι μονάδες ενδείξεων τέτοιων αισθητήρων παρέχουν τις απαιτούμενες αντιστάσεις για την υλοποίηση του κυκλώματος γέφυρας Wheatstone.

3.5 Κάρτες συλλογής δεδομένων

Τα σήματα που παράγονται από τους διαμορφωτές σήματος είναι αναλογικά και για αυτό τον λόγο δεν μπορούν να εισαχθούν απευθείας σε έναν υπολογιστή. Η κάρτα συλλογής δεδομένων μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό, το οποίο είναι αναγνωρίσιμο από τον υπολογιστή. Η κάρτα συλλογής δεδομένων καλείται συνδεδεμένη κάρτα στην περίπτωση κατά την οποία είναι εγκατεστημένη εντός του υπολογιστή και χρησιμοποιεί το τροφοδοτικό του υπολογιστή. Αλλιώς καλείται περιφερειακή μονάδα και έχει δική της τροφοδοσία ρεύματος. Το ψηφιακό σήμα από την περιφερειακή μονάδα μεταφέρεται στον υπολογιστή μέσω ειδικού καλωδίου. Μερικοί κατασκευαστές παράγουν

μονάδες οι οποίες είναι ταυτοχρόνως κάρτες συλλογής δεδομένων και διαμορφωτές σήματος. Αυτές οι μονάδες ενδέχεται να είναι είτε περιφερειακές είτε εγκατεστημένες εντός του υπολογιστή.

Οι βασικές προδιαγραφές που διατίθενται για τα περισσότερα προϊόντα συλλογής δεδομένων είναι: το πλήθος των καναλιών, ο ρυθμός δειγματοληψίας, η διακριτότητα, το όριο διακύμανσης και η μεγέθυνση. Αυτές οι προδιαγραφές αναλύονται περιληπτικά παρακάτω.

Πλήθος καναλιών:

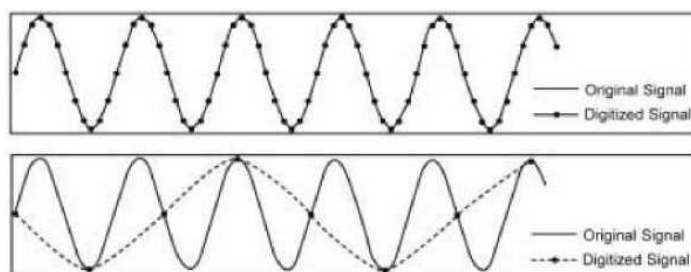
Το πλήθος των αναλογικών σημάτων που μπορούν να συνδεθούν ταυτοχρόνως στην κάρτα συλλογής δεδομένων καλείται πλήθος καναλιών. Το πλήθος των καναλιών για αναλογικές εισόδους μονού πέρατος (single-ended) είναι συνήθως διπλάσιο από την περίπτωση κατά την οποία οι αναλογικές εισοδοί χρησιμοποιούνται με διαφορικό τρόπο (differential mode).

Οι εισοδοί μονού πέρατος αναφέρονται όλες σε μία κοινή γείωση. Αυτές οι εισοδοί χρησιμοποιούνται όταν τα σήματα εισόδου είναι <1Volt, τα καλώδια από την πηγή του μετρούμενου μεγέθους στην κάρτα συλλογής δεδομένων είναι μικρού μήκους (<4.5m) και όλα τα εισαγόμενα σήματα μπορούν να έχουν κοινή γείωση. Στην περίπτωση κατά την οποία τα σήματα δεν καλύπτουν αυτά τα κριτήρια, οι εισοδοί πρέπει συνδεθούν στην κάρτα συλλογής δεδομένων με διαφορικό τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση, τα σφάλματα θορύβου μειώνονται επειδή ο κοινός θόρυβος από τα δύο καλώδια αλληλοεξουδετερώνεται.

Στις περιπτώσεις μονού πέρατος, ένα από τα δύο καλώδια του αναλογικού σήματος συνδέεται στο κανάλι εισόδου της κάρτας συλλογής δεδομένων και το άλλο συνδέεται στην κοινή γείωση. Στην περίπτωση του διαφορικού τρόπου σύνδεσης, και τα δύο καλώδια συνδέονται στα κανάλια εισόδου της κάρτας συλλογής δεδομένων.

Ρυθμός δειγματοληψίας (Sampling rate):

Αυτή η παράμετρος καθορίζει με ποια συχνότητα θα γίνονται οι μετατροπές του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Μία κάρτα συλλογής δεδομένων πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη για να διακριτοποιήσει ένα ικανοποιητικό αριθμό από σημεία σε κάποιο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να παραχθεί μία κατά το δυνατόν ακριβέστερη απεικόνιση του αρχικού σήματος. Προφανώς όταν το σήμα αλλάζει γρηγορότερα από την ικανότητα ψηφιοποίησης της κάρτας συλλογής δεδομένων, τότε εισάγονται σφάλματα στα μετρημένα δεδομένα. Δεδομένα που διακριτοποιούνται πολύ αργά ενδεχομένως να παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική συχνότητα. Η διαστρέβλωση του σήματος αναφέρεται ως πλαστό σήμα (aliasing) (δες Εικόνα 12.).



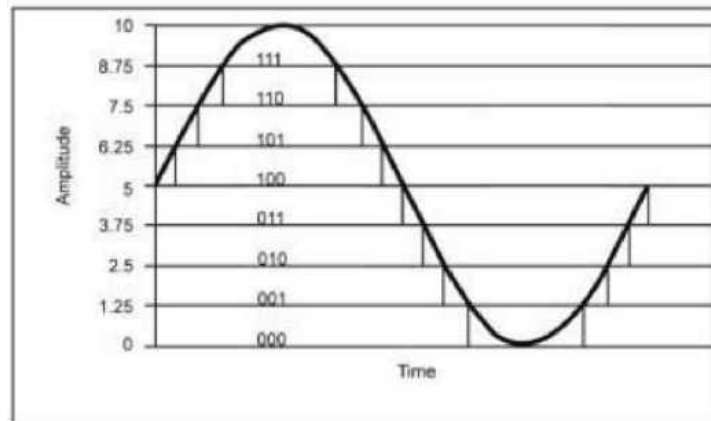
Εικόνα 12. Επίδραση ρυθμού δειγματοληψίας στο ψηφιοποιημένο σήμα : Επαρκής δειγματοληψία (επάνω) και υποδειγματοληψία (aliasing) (κάτω)

Γενικώς, σε πολυκαναλικές κάρτες συλλογής δεδομένων, η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό γίνεται μέσω από έναν ψηφιοποιητή (analog to digital converter, ADC) με εναλλαγή μεταξύ των καναλιών. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται πολυσύνθεση και είναι σαφώς φθηνότερη από την περίπτωση χρήσης ξεχωριστού ψηφιοποιητή για κάθε κανάλι. Όμως, επειδή ο πολυσύνθετος αλλάζει θέση από κανάλι σε κανάλι, δημιουργείται μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των σημάτων των καναλιών. Τα συστήματα συλλογής δεδομένων για πού πραγματοποιούν ταυτόχρονη καταγραφή πολλών καναλιών χρησιμοποιούν ειδική διάταξη κυκλώματος για τη συλλογή δεδομένων για κάθε κανάλι. Παρόλα αυτά, για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η χρήση της (ακριβής) ειδικής διάταξης κυκλώματος δεν είναι απαραίτητη για την ταυτόχρονη καταγραφή.

Η ψηφιοποίηση όλων των καναλιών με τη σειρά με τη διαδικασία της πολυσύνθεσης ονομάζεται σάρωση. Όταν χρησιμοποιείται μία κάρτα συλλογής δεδομένων με υψηλό ρυθμό ψηφιοποίησης, όλα τα κανάλια σαρώνονται σε microseconds. Η χρονική καθυστέρηση που προκύπτει μεταξύ του χρόνου ψηφιοποίησης για τα διαφορετικά κανάλια είναι αμελητέα για τις περισσότερες εφαρμογές. Για αυτό τον λόγο τα συλλεγόμενα δεδομένα εμφανίζονται ως ταυτόχρονα ψηφιοποιημένα. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον χρησιμοποιείται ο ίδιος ψηφιοποιητής για όλα τα κανάλια, ο ενεργός ρυθμός δειγματοληψίας για κάθε ξεχωριστό κανάλι μειώνεται ανάλογα με το πλήθος των καναλιών που ψηφιοποιούνται. Για παράδειγμα ένα σύστημα συλλογής δεδομένων με 10 κανάλια και ρυθμό δειγματοληψίας 1.25 MS/s (million samples per second) θα παρουσιάζει ρυθμό δειγματοληψίας για κάθε κανάλι 125 kS/s (thousands samples per second) στην περίπτωση που όλα τα κανάλια είναι ενεργά.

Διακριτότητα (Resolution):

Η διακριτότητα μιας κάρτας συλλογής δεδομένων περιγράφεται ως με τον όρο "bit". Σε μία κάρτα με "n bit" διακριτότητα το σήμα της τάσης διαιρείται σε 2^n ίσες υποδιαίρεσεις. Θεωρητικά, η μισή τιμή της προκύπτουσας υποδιαίρεσης είναι η ελάχιστη μεταβολή τάσης που μπορεί να ανιχνεύσει μια κάρτα συλλογής δεδομένων. Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας μιας κάρτας συλλογής δεδομένων θεωρίστε έναν μετατροπέα με διακριτότητα 3 bit. Ο μετατροπέας αυτός διαιρεί το εύρος του αναλογικού σήματος σε 8 ίσες υποδιαίρεσεις. Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται ένα ημιτονοειδές σήμα και η αντίστοιχη ψηφιακή του μορφή όπως διακριτοποιείται από έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με την παραπάνω διακριτότητα.



Εικόνα 13. Ψηφιοποιημένο ημιτονοειδές σήμα με διακριτότητα 3 bit

Κάθε υποδιαίρεση απεικονίζεται με έναν αριθμό σε δυαδικό κώδικα μεταξύ του 000 και του 111. Προφανώς, η ψηφιακή απεικόνιση που προκύπτει από μετατροπέα διακριτότητας 3 bit δεν απεικονίζει ικανοποιητικά το πραγματικό αναλογικό σήμα. Μέσω της αύξησης της διακριτότητας, το πλήθος των υποδιαίρεσεων αυξάνει και προκύπτει μια καλύτερη απεικόνιση. Για παράδειγμα ένας μετατροπέας διακριτότητας 16 bit υποδιαιρεί το εύρος του αναλογικού σήματος σε 65536 τμήματα οπότε προκύπτει μια ακριβής ψηφιακή απεικόνιση του αναλογικού σήματος.

Όριο διακύμανσης (Range):

Το όριο διακύμανσης αναφέρεται στο ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο τάσης το οποίο μπορεί να καλύψει η κάρτα συλλογής δεδομένων. Μερικές κάρτες προσφέρουν επιλεγόμενα όρια διακύμανσης, όπως για παράδειγμα -10V έως +10V και 0 έως 10V. Καθώς η κάρτα συλλογής δεδομένων διαιρεί το εύρος του σήματος σε ίσα τμήματα, ένα μικρότερο όριο διακύμανσης οδηγεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, π.χ. στο παράδειγμα μας συνιστάται να χρησιμοποιηθεί το όριο 0 έως 10 V για την καταγραφή σήματος αποκλειστικά θετικής τάσης.

Μεγέθυνση (Gain):

Με τον όρο μεγέθυνση ονομάζεται ο συντελεστής κατά τον οποίο ένα σήμα ενισχύεται. Μερικές κάρτες συλλογής δεδομένων προσφέρουν επιλεγόμενη ενίσχυση, όπως για παράδειγμα, 1, 5, 10 και 50. Μέσω της μεγέθυνσης ενισχύεται το αναλογικό σήμα χαμηλής τάσης πριν την ψηφιοποίησή του με αποτέλεσμα την αύξηση της ακρίβειας της ψηφιακής μετατροπής. Επί παραδείγματι, θεωρήστε μία κάρτα συλλογής δεδομένων διακριτότητας 12 bit και επιλεγόμενου εύρους από 0 έως 10V. Η θεωρητικά μικρότερη ανιχνεύσιμη μεταβολή τάσης είναι $10/(2^{\chi} 212) = 0.0012V$. Στην περίπτωση που αυτή η κάρτα χρησιμοποιείται για ένα σήμα που μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 0.05V, η ακρίβεια της μέτρησης δεν θα είναι ικανοποιητική, καθώς κάθε μεταβολή τάσης κάτω από $0.0012/0.05 = 2.4\%$ της μεγαλύτερης τιμής του σήματος δεν θα είναι ανιχνεύσιμη. Στην περίπτωση κατά την οποία αυτή η κάρτα προσφέρει επιλογή μεγέθυνσης 50 τότε η ακρίβεια της μέτρησης θα αυξηθεί κατά 50 φορές. Τονίζεται ότι η επιλεγόμενη μεγέθυνση δεν θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε το ενισχυμένο σήμα να έχει τιμές εκτός του ορίου ανάγνωσης της κάρτας συλλογής δεδομένων.

3.6 Πρόγραμμα συλλογής δεδομένων

Το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων είναι ένα απαραίτητο στοιχείο ενός συστήματος συλλογής δεδομένων με υπολογιστή. Μέσω αυτού του προγράμματος καθοδηγείται ο υπολογιστής πόσο συχνά και πότε διαβάζει την κάρτα συλλογής δεδομένων, πως να επεξεργάζεται τα συλλεγόμενα δεδομένα και τι να αποθηκεύει. Μερικοί κατασκευαστές καρτών συλλογής δεδομένων παρέχουν και τα αντίστοιχα λογισμικά μαζί με την κάρτα. Αυτά τα προγράμματα είναι γενικής φύσεως και ενδεχομένως δεν καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις κάθε ειδικού έργου καταγραφής απόκρισης μιας κατασκευής. Για τον λόγο αυτό ενδέχεται σε μία εννοργάνωση να πρέπει να αναπτυχθεί ειδικό πρόγραμμα συλλογής δεδομένων.

Μερικοί προμηθευτές καρτών συλλογής δεδομένων παρέχουν προγράμματα οδηγών (driver) μαζί με αυτές τις κάρτες. Αυτά τα προγράμματα-οδηγοί διαχειρίζονται τη συνεργασία της κάρτας συλλογής δεδομένων με τους πόρους του υπολογιστή, όπως είναι οι επεξεργαστές, η μνήμη άμεσης πρόσβασης και η εγγράψιμη μνήμη. Μέσω των προγραμμάτων-οδηγών παρακάμπτονται προβλήματα προγραμματισμού για την

ενσωμάτωση των καρτών και παρέχεται στον χρήστη ένα εύχρηστο διαδραστικό περιβάλλον επικοινωνίας. Εν συντομία, τα προγράμματα-οδηγοί είναι προγράμματα διασύνδεσης μεταξύ του προγράμματος συλλογής δεδομένων και της κάρτας συλλογής δεδομένων και πρέπει να εγκαθίστανται στον υπολογιστή πριν την λειτουργία του προγράμματος συλλογής δεδομένων.

Τονίζεται ότι οι οδηγοί προγραμμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού. Για τον λόγο αυτό το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων πρέπει να έχει γίνει σε γλώσσα προγραμματισμού συμβατή με το πρόγραμμα οδηγό (driver software).

Οι περισσότεροι προμηθευτές καρτών συλλογής δεδομένων προσφέρουν το κατάλληλο λογισμικό το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη προγραμμάτων συλλογής δεδομένων με εύκολο και συνήθως γραφικό τρόπο. Μερικά από αυτά τα προγράμματα είναι αρκετά ισχυρά αλλά μερικά μπορεί να έχουν περιορισμούς και να μην είναι κατάλληλα για χρήση για κάποιο ειδικό έργο. Αν και η χρήση λογισμικών είναι συνήθως ευεργετική, ο χρήστης πρέπει να κατανοεί, πως οι περιορισμοί του λογισμικού ενδέχεται να επηρεάσουν τις προϋποθέσεις διεξαγωγής κάποιου ειδικού έργου ενοργάνωσης.

Οι ικανότητες που πρέπει να διαθέτει ένα λογισμικό συλλογής δεδομένων εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του κάθε ειδικού έργου καταγραφής της απόκρισης μιας κατασκευής. Για παράδειγμα με ένα τέτοιο λογισμικό ενδέχεται να σαρώνονται απλώς τα δεδομένα με σταθερό ρυθμό και να αποθηκεύονται αυτά στον σκληρό δίσκο. Ένα πιο ανεπτυγμένο λογισμικό ενδέχεται να σαρώνει τα δεδομένα αρχικά, να τα επεξεργάζεται και να αποθηκεύει μόνο αυτά τα οποία κρίνονται σημαντικά με βάση κάποια κριτήρια. Το πρώτο παράδειγμα ενδείκνυται για μικρές περιόδους παρακολούθησης ή για περιπτώσεις που η μεταβολή των δεδομένων δεν είναι γρήγορη. Για μικρές περιόδους παρακολούθησης ένα γρήγορα μεταβαλλόμενο σήμα μπορεί εύκολα να καταγραφεί επιλέγοντας ένα υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας. Από την άλλη, η επιλογή γρήγορου ρυθμού δειγματοληψίας δεν ενδείκνυται για μεγάλα διαστήματα παρακολούθησης. Αυτό προκύπτει από τους περιορισμούς του χώρου του σκληρού δίσκου και από τη δυσκολία διαχείρισης και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων. Για συνεχείς παρακολουθήσεις ενδείκνυται η δημιουργία χωριστού αρχείου για κάθε ημέρα ή για κάθε σημαντική καταγραφή. Ο ρυθμός δειγματοληψίας πρέπει να είναι λογικά μικρός έτσι ώστε να είναι εύκολη η διαχείριση των αρχείων και να μην απαιτείται μεγάλος χώρος αποθήκευσης στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται για την συνεχή καταγραφή της απόκρισης μιας γέφυρας σε φορτία κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή συνιστάται η επιλογή ενός υψηλού ρυθμού δειγματοληψίας κι η αποθήκευση μόνο των μέγιστων, ελάχιστων και μέσων τιμών των μεγεθών απόκρισης. Με τον τρόπο αυτό, σε περιπτώσεις συνεχούς καταγραφής, οι σημαντικότερες πληροφορίες της απόκρισης αποθηκεύονται και το πλήθος των καταγραφών είναι μικρότερο και ευκολότερα διαχειρίσιμο.

3.7 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Οι αισθητήρες είναι γενικώς ο πιο αδύναμος κρίκος στα μετρητικά συστήματα επειδή πρέπει να μετατρέψουν τα χαρακτηριστικά της μηχανικής κίνησης σε ηλεκτρικό σήμα. Ο υπόλοιπος εξοπλισμός σχετίζεται με τον μετασχηματισμό του ηλεκτρικού ή φωτεινού σήματος σε αριθμό και την αποθήκευσή του.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, τα οποία επηρεάζουν την αποδοτικότητά τους είναι τα παρακάτω:

- Ευαισθησία (sensitivity) ενός οργάνου είναι το πηλίκο της ηλεκτρικής τάσης εξόδου προς το μηχανικό μέγεθος που μετράται (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση). Αυτό ισχύει για αισθητήρες (transducers) μετατροπής ενέργειας (π.χ. αυτούς που δεν απαιτούν τροφοδοσία). Για τους παθητικούς αισθητήρες (π.χ. αυτούς που απαιτούν τροφοδοσία, μηκυνσιόμετρα, επιταχυνσιόμετρα piezoresistive), η ευαισθησία ορίζεται σε όρους «ηλεκτρικής τάσης εξόδου ανά μονάδα της μέτρησης» ανά μονάδα της τάσης του ρεύματος εισαγωγής (mV/mm/V).
- Ως εγκάρσια ευαισθησία (cross-axis or transverse sensitivity) ορίζεται η ευαισθησία σε κίνηση παράλληλα προς επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στον άξονα κύριας ευαισθησίας. Δηλώνεται ως ποσοστό της ευαισθησίας του κύριου άξονα. Προφανώς η εγκάρσια ευαισθησία πρέπει να είναι κατά το δυνατό μικρότερη.
- Η διακοιτότητα (resolution) είναι η μικρότερη μεταβολή στο μετρούμενο μέγεθος η οποία μπορεί να παράγει την μικρότερη μεταβολή στο ηλεκτρικό σήμα εξόδου η οποία είναι δυνατό να καταγραφεί.
- Απόκοιση συχνοτήτων (frequency response) είναι το εύρος συχνοτήτων (frequency range) πάνω από το οποίο το ηλεκτρικό σήμα εξόδου είναι σταθερό για σταθερή μηχανική κίνηση. Αυτή η σταθερότητα συνήθως εκφράζεται σε όρους dB. Για παράδειγμα, 3 dB μεταξύ 5 και 200 Hz σημαίνει ότι ο αισθητήρας παράγει μια εξαγόμενη τάση με διακύμανση 30% μεταξύ 5 και 200 Hz.
- Μετάθεση φάσης (phase shift) είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της δημιουργίας της κίνησης και της παραγωγής του ηλεκτρικού σήματος του συστήματος. Η φάση μετάθεσης κάθετα προσανατολισμένων αισθητήρων πρέπει να είναι μικρή, ώστε η προκύπτουσα κίνηση η οποία υπολογίζεται από την διανυσματική πρόσθεση υποθετικά ταυτόχρονα μετρούμενων συνιστωσών να μην διαστρεβλώνεται.
- Απαιτήσεις βαθμονόμησης (calibration requirements) είναι η επιτρεπόμενη διακύμανση στο ηλεκτρικά παραγόμενο σήμα από σταθερού εύρους μηχανική κίνηση, όταν υπάρχουν αλλαγές στο εύρος συχνοτήτων των δεδομένων, αλλαγές στο περιβάλλον, αλλαγές στο εύρος του μεγέθους των δεδομένων ή στην ώρα.
- Περιβαλλοντική ευαισθησία (environmental sensitivity), όπως η απόκριση του αισθητήρα σε υγρασία, θερμοκρασία ή ακουστικό θόρυβο πρέπει να είναι γνωστή, καθώς οι αισθητήρες πρέπει να λειτουργούν πολλές φορές σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Η περιβαλλοντική ευαισθησία είναι μια παράμετρος των απαιτήσεων ρύθμισης.
- Το μέγεθος και η μάζα είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό του αισθητήρα. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα ταχύτητας, σε χαμηλές συχνότητες, αυξάνει αναλογικά με την μάζα του αισθητήρα. Ένας μεγάλος αισθητήρας είναι πιο ευαίσθητος στις μικρές συχνότητες αλλά ενδέχεται να είναι δύσκολη η εγκατάστασή του και είναι πιθανό να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του συστήματος που εννοργανώνεται.

Πολλές από τις προδιαγραφές των αισθητήρων δίνονται σε ντεσιμπέλ (dB). Αυτό γίνεται καθώς κάθε ποσότητα που μεταβάλλεται κατά τάξεις μεγέθους (π.χ. 1 - 10000), περιγράφεται καλύτερα σε λογαριθμική μορφή. Για παράδειγμα 1.0dB μεταβολή συμβαίνει όταν:

$$20 \log_{10} \frac{P}{P_0} = 1.0$$

Στην παραπάνω σχέση η τιμή P είναι το μετρημένο μέγεθος και η τιμή P₀ είναι το μέγεθος αναφοράς. Σε έναν αισθητήρα με τιμή V₀=4.4V/in/sec μείωση -3dB συμβαίνει όταν:

$$\begin{aligned} -3 &= 20 \log_{10} \frac{V}{4.4} \Rightarrow \log_{10} V - \log_{10} 4.4 = -\frac{3}{20} \Rightarrow \log_{10} V = -0.15 + 0.64 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \log_{10} V = 0.49 \Rightarrow V = 10^{0.49} \Rightarrow V = 3.1 \text{ V / in / sec} \end{aligned}$$

Οι αισθητήρες και τα άλλα όργανα μέσω των οποίων γίνονται οι μετρήσεις της απόκρισης κατασκευών ποικίλουν ως προς τον τύπο και τον τρόπο λειτουργίας.

4 Εφαρμογή Ενόργανης Δομικής Παρακολούθησης σε Κατασκευές

4.1 Γέφυρες

4.1.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό η πλειονότητα των κατασκευών που έχουν η και πρόκειται να ενοργανωθούν στην Ελλάδα είναι έργα γεφυροποιίας τα οποία αποτελούν και τα κρίσιμα στοιχεία ενός σύγχρονου συστήματος αυτοκινητοδρόμων. Για τον λόγο αυτό σε πολλά σημεία του κειμένου γίνεται αναφορά στην ενοργάνωση γεφυρών. Παρόλα αυτά οι αρχές και οδηγίες ενοργάνωσης γεφυρών έχουν άμεση εφαρμογή και στην ενοργάνωση άλλων σημαντικών τεχνικών έργων Πολιτικού Μηχανικού.

Ο τύπος των οργάνων και των αντίστοιχων διατάξεων που θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να γίνουν μετρήσεις σε μια γέφυρα εξαρτώνται από τον σκοπό για τον οποίο θα γίνουν οι μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές είναι πιθανό να πρέπει να γίνουν πριν ακόμη αρχίσει η μελέτη της γέφυρας. Τέτοιες μετρήσεις αφορούν στην διάγνωση του υπεδάφους στο οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί η γέφυρα. Το είδος των στρώσεων του εδαφικού σχηματισμού στο οποίο θα θεμελιωθεί η γέφυρα πρέπει να είναι γνωστό από την φάση της προμελέτης. Επίσης είναι σημαντικό να καθορισθεί και να προσδιορισθεί τυχούσα υπάρχουσα μετακίνηση, η οποία είναι πιθανό να είναι και σε εξέλιξη, μεταξύ των πρανών του εδάφους που πρόκειται να γεφυρωθεί. Οι παραπάνω δύο παράμετροι είναι δυνατό να καθορίσουν τον τύπο της γέφυρας που θα κατασκευασθεί. Στην περίπτωση αυτή, περίοδος προκαταρκτικών μετρήσεων, είναι πιθανό να πρέπει να γίνουν ή να αξιοποιηθούν μετρήσεις σχετικές με την καταγραφή της απόκρισης των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε σεισμικές φορτίσεις. Στην περίπτωση αυτή καθορίζεται το φάσμα σχεδιασμού, που πρέπει να ληφθεί για τον σχεδιασμό της γέφυρας, βάσει της απόκρισης των τοπικών εδαφικών συνθηκών.

Οι μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους ή μέσα σε αυτό είναι δυνατό και χρήσιμο να συνεχίσουν να συλλέγονται μετά την κατασκευή της γέφυρας. Εκτός από τις μετρήσεις γεωτεχνικού χαρακτήρα γίνονται μετρήσεις στον φορέα της γέφυρας σε διάφορες φάσεις κατασκευής. Τέτοιες περιπτώσεις σχετίζονται με τον έλεγχο των πασσάλων θεμελίωσης μέσω δοκιμαστικών φορτίσεων, τον έλεγχο των βάθρων (παραμόρφωση υπό αξονική φόρτιση, ποιότητα υλικών δόμησης) και τον έλεγχο των εφεδράνων που πιθανά χρησιμοποιούνται. Οι μετρήσεις στην φάση κατασκευής έχουν μεγάλη σημασία στην κατασκευή του καταστρώματος. Για παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση κατασκευής καταστρώματος το οποίο είναι προεντεταμένο. Είναι γνωστό ότι κατά τον σχεδιασμό τέτοιων γεφυρών το στατικό σύστημα φθάνει σε οριακή κατάσταση αντοχής αρκετές φορές. Η κατάσταση αυτή είναι κρισιμότερη στην περίπτωση τμηματικής προέντασης. Τα αντιφορτία της προέντασης σε αυτή την περίπτωση πρέπει να είναι τόσα ώστε για τα μόνιμα φορτία η άνω ίνα του καταστρώματος να βρίσκεται οριακά υπό σύνθλιψη (ή ελαφρύ εφελκυσμό). Στην περίπτωση αυτή η φορτιστική κατάσταση είναι απολύτως ελεγχόμενη όταν μετράται η παραμόρφωση της άνω και κάτω ίνας των ανοιγμάτων του φέροντος οργανισμού στις αμφιέριστες γέφυρες. Στην περίπτωση μονολιθικών γεφυρών οι

παραπάνω μετρήσεις πρέπει να γίνουν στην άνω και κάτω ίνα του ανοίγματος και της στήριξης. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται ακριβώς οι παραμορφώσεις και άρα οι αντίστοιχες τάσεις, λόγω των μόνιμων φορτίων, λόγω της συστολής ξήρανσης, λόγω των αντιφορτίων και της αξονικής φόρτισης της προέντασης, λόγω της μακροχρόνιας δράσης του ερπυσμού και λόγω της επιβολής των φορτίων καταστρώματος και λειτουργίας. Η επαλληλία των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά την επιβολή των παραπάνω φορτιστικών καταστάσεων γίνεται κατά την μελέτη του φορέα αλλά καλό είναι να μετρούνται και να ελέγχονται κατά τη φάση της κατασκευής. Αυτές οι μετρήσεις γίνονται για τον έλεγχο της συμφωνίας των υπολογισμών με τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τις διάφορες φάσεις κατασκευής. Για την μέτρηση των παραμορφώσεων είναι δυνατή η χρήση μηκυνσιομέτρων (strain gauges), LVDT ή οπτικών ινών. Για την επαλήθευση των παραμορφώσεων πρέπει να γίνει υπολογισμός των βυθίσεων του φορέα, οι οποίες είναι δυνατό να μετρούνται επίσης για επαλήθευση των υπολογισμών. Οι βυθίσεις του φορέα της γέφυρας είναι δυνατό να μετρούνται με LVDT, η μετρητή Laser. Η εγκατάσταση των παραπάνω οργάνων κατά την φάση κατασκευής του φορέα και η λειτουργία τους μετά την ολοκλήρωση του έργου είναι σημαντική. Μέσω αυτών των συσκευών είναι δυνατή η μέτρηση των παραμορφώσεων από τα φορτία λειτουργίας, από μακροχρόνιες δράσεις όπως είναι ο ερπυσμός στο σκυρόδεμα και από δοκιμαστικές φορτίσεις. Με την μέτρηση των παραμορφώσεων στην άνω και κάτω ίνα του καταστρώματος της γέφυρας είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την εξέλιξη του φαινομένου της κόπωσης στα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκε η γέφυρα. Πράγματι, υπό τα φορτία λειτουργίας, σε μια γέφυρα (μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων για πολλά χρόνια) παρατηρείται σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων ακόμη και στην περίπτωση που τα φορτία είναι εντός των τιμών σχεδιασμού. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντική η δυνατότητα εξαγωγής μετρήσεων για την παραμόρφωση των ακραίων ινών του καταστρώματος και μετά την φάση κατασκευής. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μετρήσεις των παραμορφώσεων και ο υπολογισμός από αυτές των βυθίσεων σε γέφυρες που κατασκευάζονται με προβολοδόμηση. Ο ορθός υπολογισμός των βυθίσεων στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητος για την ορθή κατασκευή της γέφυρας. Παρομοίως με τις γέφυρες προεντεταμένου καταστρώματος, μετρήσεις παραμορφώσεων είναι δυνατό να γίνουν και στους ελκυστήρες ή τα καλώδια κρεμαστών γεφυρών τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσο και στη φάση λειτουργίας.

Κατά την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση γεφυρών προσδιορίζονται μια σειρά από παράμετροι οι οποίες καθορίζουν τα φορτία σχεδιασμού τους, ειδικότερα στην περίπτωση που θεωρούνται οι σεισμικές δράσεις. Ειδικότερα προσδιορίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς, ο οποίος προκύπτει συναρτήσει της δεσπόζουσας ιδιοπεριόδου της γέφυρας και του συντελεστή πλαστιμότητας μετατοπίσεων. Ο έλεγχος και ο προσδιορισμός των δεσποζουσών ιδιοπεριόδων υφισταμένων γεφυρών γίνεται προκειμένου να ελεγχθούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του φορέα που λήφθηκαν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του η πρέπει να θεωρηθούν κατά την αποτίμηση της αντοχής του. Για τον λόγο αυτό γίνονται μετρήσεις των επιταχύνσεων σε διάφορες θέσεις του καταστρώματος και των βάθρων. Από τις σύγχρονες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι δυνατό να προσδιορισθούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας γέφυρας από διέγερση οποιουδήποτε εξωτερικού αιτίου. Το εξωτερικό αυτό αίτιο είναι δυνατό να είναι σεισμός, άνεμος, διερχόμενα οχήματα ή επιβαλλόμενες διεγέρσεις. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο να διατίθεται σημαντικός αριθμός αισθητήρων καθώς οι προς επεξεργασία μετρήσεις πρέπει οπωσδήποτε να είναι ταυτόχρονες προκειμένου να εφαρμοσθούν οι αλγόριθμοι προσδιορισμού των ιδιοπεριόδων και να παραχθούν αξιόπιστα και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Τέτοια δίκτυα είναι σκόπιμο να είναι εγκατεστημένα μόνιμα,

ιδίως στην περίπτωση μεγάλων γεφυρών, καθώς με τη χρήση των μετρήσεών τους, είναι δυνατός ο υπολογισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών του έργου σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση αυτή εντοπίζονται εύκολα αλλαγές στην απόκριση του ενοργανωμένου φορέα και άρα είναι δυνατός ο εντοπισμός βλαβών. Στην περίπτωση που συλλέγονται οι καταγραφές μέσω δικτύου είναι δυνατό να εκτιμηθούν πιθανές βλάβες στον φέροντα οργανισμό γεφυρών άμεσα (από ισχυρούς σεισμούς ή άλλες δράσεις) και άρα να ληφθούν αποφάσεις για τη χρήση ή όχι της γέφυρας το συντομότερο δυνατό.

Ο έλεγχος της ποιότητας των υλικών κατασκευής και πιθανής ρηγματώσής τους μετά την ολοκλήρωση του φορέα είναι δυνατό να γίνει με μη καταστροφικές μεθόδους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κρουσίμετρα για την μέτρηση της επιφανειακής αντοχής του σκυροδέματος και συσκευές εκπομπής και καταγραφής υπερήχων για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας. Σε περίπτωση γέφυρας με ολόσωμη σύνδεση καταστρώματος και βάθρων, με την μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας στην στήριξη και στο άνοιγμα πριν την λειτουργία και κατά τη λειτουργία του φορέα είναι πιθανό να διαπιστωθεί ο σχηματισμός ρηγματώσεων στις θέσεις αυτές. Στην περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν προβλέπονταν από την μελέτη, παρέχεται η δυνατότητα για την λήψη συμπληρωματικών μέτρων, όπως για παράδειγμα προστασία του χάλυβα του οπλισμού από διάβρωση λόγω υγρασίας.

4.1.2 Μετρούμενα μεγέθη απόκρισης γεφυρών

Στις μέρες μας είναι δυνατή η μέτρηση πολλών μεγεθών απόκρισης μιας γέφυρας. Υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης εντατικών μεγεθών, παραμορφώσεων και επιταχύνσεων. Τα μεγέθη αυτά είτε μετρούνται άμεσα είτε προκύπτουν μετά από υπολογισμούς με τη χρήση μετρήσεων σε διάφορες θέσεις. Στη δεύτερη περίπτωση γίνεται μέτρηση των παραμορφώσεων και μετά από αναλυτικούς υπολογισμούς προκύπτει το εντατικό μέγεθος που προκαλεί αυτές τις παραμορφώσεις. Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε ένα στατικό σύστημα είναι η ροπή, η τέμνουσα δύναμη και η αξονική δύναμη. Η ροπή και η αξονική δύναμη δημιουργούν παρόμοιου τύπου παραμορφώσεις. Λόγω της αξονικής δύναμης αναπτύσσονται βραχύνσεις ή εφελκυσμοί (ανάλογα με το πρόσημο της αξονικής δύναμης) στις ακραίες ίνες του δομικού στοιχείου. Λόγω της δράσης της ροπής δημιουργούνται ετερόσημες παραμορφώσεις στις ακραίες ίνες του δομικού στοιχείου. Λόγω της δράσης της τέμνουσας δύναμης αναπτύσσονται διατμητικές παραμορφώσεις υπό γωνία (κυρίως κοντά στις στηρίξεις). Από τη γεωμετρία των παραμορφώσεων και μετά από υπολογισμούς είναι δυνατό να προκόψουν τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Ειδικότερα η αξονική δύναμη προκύπτει με απλή εφαρμογή του νόμου του Hook για το μέτρο ελαστικότητας που διαθέτει το υλικό κατασκευής του φορέα. Το μέτρο ελαστικότητας είτε λαμβάνεται από απλές σχέσεις της βιβλιογραφίας είτε προσδιορίζεται επιτόπου μέσω υπερήχων. Με όμοιο τρόπο είναι δυνατός ο υπολογισμός της αξονικής έντασης στοιχείων που καταπονούνται σε καθαρό εφελκυσμό όπως καλώδια προέντασης και ελκυστήρες αναρτημένων γεφυρών. Για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης ροπής, υπολογίζεται η αναπτυσσόμενη καμπυλότητα της διατομής (μέσω των παραμορφώσεων) και από το διάγραμμα M-φ του δομικού στοιχείου προσδιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή. Μετά τον υπολογισμό της δρώσας αξονικής φόρτισης και ροπής είναι δυνατός ο υπολογισμός του βέλους κάμψης του φορέα. Το αναλυτικά υπολογιζόμενο βέλος κάμψης του δομικού στοιχείου, στην περίπτωση αυτή, θα είναι μικρότερο από το βέλος κάμψης του πραγματικού φορέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της δράσης της τέμνουσας δύναμης δημιουργείται πρόσθετο βέλος κάμψης, κυρίως κοντά στις στηρίξεις. Η διαφορά μεταξύ του υπολογιζόμενου βέλους κάμψης (όπου θεωρούνται μόνο η δράση της αξονικής

δύναμης και της ροπής) και του μετρούμενου βέλους κάμψης δίνει τις βυθίσεις λόγω της δράσης της τέμνουσας δύναμης. Στην περίπτωση ύπαρξης προέντασης πρέπει να συνυπολογίζεται το αρνητικό βέλος κάμψης λόγω της δράσης του αντιφορτίου. Επίσης το βέλος κάμψης λόγω της δράσης της τέμνουσας δύναμης είναι δυνατό να υπολογιστεί και αναλυτικά βάσει της θεωρίας της διατμητικής παραμόρφωσης των διατομών (με τη χρήση του μέτρου διάτμησης G). Λόγω πιθανής απόκλισης μεταξύ υπολογιζόμενων και μετρούμενων μεγεθών παραμόρφωσης είναι πιθανό να απαιτηθεί ισοβαρής διόρθωση των μεγεθών παραμόρφωσης και άρα των μεγεθών έντασης. Η μεθοδολογία που παρατέθηκε μπορεί να εφαρμοσθεί σε φορείς γεφυρών κατασκευασμένους από χάλυβα ή σε φορείς γεφυρών κατασκευασμένους από προεντεταμένο σκυρόδεμα (εφόσον υπάρχει λειτουργία των διατομών σε στάδιο 1). Στην περίπτωση φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου είναι πιθανό αρκετές διατομές να λειτουργούν σε στάδιο 2, απαιτείται ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας (π.χ. με υπερήχους) κατά το μήκος του φορέα και η εκτέλεση των παραπάνω υπολογισμών θεωρώντας σταθερό μέτρο ελαστικότητας σε τμήματα κατά μήκος του φορέα, με διαφορετική τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε κάθε τμήμα.

Εκτός από την μέτρηση των μεγεθών παραμόρφωσης και έντασης υπάρχουν σημαντικοί λόγοι για την μέτρηση της απόκρισης φορέων γεφυρών σε δυναμικές φορτίσεις. Οι τομείς στους οποίους αξιοποιούνται τέτοιες μετρήσεις αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το μέγεθος που μετράται άμεσα σε περιπτώσεις δυναμικής καταπόνησης γεφυρών είναι η επιτάχυνση στη θέση που τοποθετείται ο αισθητήρας. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι επιταχύνσεις που μετρούνται στην ανωδομή των γεφυρών απαλλαγμένες από την επιτάχυνση του εδάφους. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει αισθητήρας στο έδαφος ή σε άλλο σημείο, ως προς το οποίο να προκύπτουν οι επιταχύνσεις της ανωδομής. Η ύπαρξη σημείου αναφοράς στο έδαφος για το οποίο να καταγράφονται οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση της δυναμικής καταπόνησης φορέων γεφυρών από σεισμική διέγερση. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός απόλυτων μεγεθών επιτάχυνσης. Λόγω της δυνατότητας που υπάρχει, μετά από αριθμητικές ολοκληρώσεις, να προσδιορίζονται οι ταχύτητες και οι μετακινήσεις από τις καταγεγραμμένες επιταχύνσεις έχει αναπτυχθεί σημαντικά ο σχετικός επιστημονικός κλάδος. Τόσο οι επιταχύνσεις που καταγράφονται άμεσα όσο και οι παραγόμενες μετακινήσεις δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την απόκριση του φορέα κατά την επιβαλλόμενη ταλάντωση. Οι παραγόμενες απόλυτες μετακινήσεις δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την αναπτυσσόμενη ένταση στον φορέα και για τον τρόπο παραμόρφωσής του. Η αναπτυσσόμενη ένταση (ροπή κάμψης, τέμνουσα και ορθή δύναμη) είναι δυνατό να προσδιοριστεί στα βάθρα, στα ελαστομερή εφέδρανα, στο κατάστρωμα και σε υπάρχοντες ελκυστήρες μιας γέφυρας. Προφανώς η κατανόηση της απόκρισης του φορέα (ένταση και παραμόρφωση) είναι ρεαλιστικότερη και ακριβέστερη όσο πυκνότερη είναι η ενοργάνωσή του. Εκτός από τα παραπάνω μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης, με τη χρήση των καταγραφών επιταχυνσιομέτρων, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας. Με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, αναλύεται η τυχαία ταλάντωση, που καταγράφηκε, σε απλούστερες μορφές ταλάντωσης και με κατάλληλη επεξεργασία προκύπτουν οι συχνότητες των δεσποζουσών ιδιομορφών του φορέα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο έλεγχος της ορθότητας σχεδιασμού μια νέας γέφυρας ή ο επανασχεδιασμός μιας παλαιότερης. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι για να γίνει η παραπάνω αξιοποίηση των καταγραφών δεν απαιτείται κάποιος ειδικός τύπος ταλάντωσης. Προφανώς η βέλτιστη περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία οι επιταχύνσεις που καταγράφονται προέρχονται από σεισμική διέγερση στη βάση της κατασκευής. Οι αντίστοιχες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί αξιοποιούν ταλαντώσεις οι οποίες είναι πιθανό να προέρχονται από

κυκλοφορούντα οχήματα ή από μηχανικά επιβαλλόμενες εξαναγκασμένες ταλαντώσεις. Επαναλαμβάνεται στο σημείο αυτό ότι για την ακριβέστερη εφαρμογή των αναπτυσσόμενων μεθοδολογιών απαιτείται η πυκνή ενοργάνωση του φορέα της γέφυρας με αισθητήρες και η ταυτόχρονη καταγραφή της διέγερσης από όλους τους αισθητήρες.

Ειδικότερα οι ποσότητες που μετρούνται σε μια κατασκευή από οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι:

- Παραμόρφωση (strain): Στην περίπτωση αυτή μετράται η κατανομή της παραμόρφωσης κατά το μήκος μιας διατομής. Μετρήσεις είναι δυνατό να γίνουν στο σκυρόδεμα, στους οπλισμούς και στα καλώδια προέντασης. Με γνωστό τον νόμο τάσης - παραμόρφωσης των υλικών, είναι δυνατόν να προσδιορισθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην θέση που γίνονται οι μετρήσεις.
- Μετακίνηση (deflection): Μετράται η κατανομή της κατά το μήκος μιας κατασκευής και η μεταβολή της συναρτήσει των επιβαλλόμενων φορτίσεων. Οι μετρήσεις γίνονται σε ολόκληρη την κατασκευή ή σε ένα δομικό στοιχείο. Με τις μετρήσεις μετακίνησης καθορίζονται τα χαρακτηριστικά φορτίου - παραμόρφωσης και καθορίζονται τα όρια της ελαστικής απόκρισης, η καμπυλότητα και η μεταβολές σε αυτή.
- Εντοπισμός και μέτρηση ρωγμών: Η θέση, ο τύπος και το εύρος των ρηγμάτων σχετίζονται με τη φόρτιση. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του επιτρεπτού επιπέδου φόρτισης και για να προκύψουν οι τάσεις αστοχίας ή των οριακών καταστάσεων αντοχής.
- Δυνάμεις (forces): Μετράται το μέγεθός τους και το είδος τους. Γίνονται μετρήσεις στο σκυρόδεμα, στους οπλισμούς, στις στηρίξεις και μερικές φορές στα σημεία φόρτισης. Η γνώση των εσωτερικών δυνάμεων οι οποίες σχετίζονται με τις εφαρμοζόμενες εξωτερικές φορτίσεις είναι χρήσιμη στην διερεύνηση υφισταμένων κατασκευών.
- Θερμοκρασία: Μετράται η κατανομή της θερμοκρασίας στη μάζα του σκυροδέματος, στις περιπτώσεις που αναπτύσσονται διαφορετικές τιμές μεταξύ άνω και κάτω ίνας.
- Ερπυσμός και συστολή ξήρανσης: Η μέτρηση αυτών των μεγεθών γίνεται σε κατασκευές που υπόκεινται σε διαρκή φόρτιση. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με παρόμοιο τρόπο με την μέτρηση της παραμόρφωσης (1), αλλά πρέπει να λαμβάνεται φροντίδα ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα και η συντήρηση του συστήματος μέτρησης καθόλη την μακρά περίοδο των μετρήσεων.
- Ιδιότητες υλικών: Αυτές πρέπει να μετρούνται προκειμένου να αξιοποιηθούν άλλες μετρήσεις για τον προσδιορισμό της απόκρισης ολόκληρης της κατασκευής και προκειμένου να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων με τους αναλυτικούς υπολογισμούς. Η μέτρηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι σημαντική καθώς αυτές αλλάζουν με τη μεταβολή των συνθηκών περιβάλλοντος όπως είναι η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία.

- Δυναμική απόκριση: Μετράται η απόκριση μιας κατασκευής όταν υπόκειται σε δυναμικές φορτίσεις. Αυτές οι φορτίσεις ενδέχεται να είναι σεισμικές, κόπωσης και επαναλαμβανόμενες. Μετρούνται επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις.

Ο εξοπλισμός για την μέτρηση των παραπάνω μεγεθών ποικίλει από απλά χειροκίνητα όργανα (που εφαρμόζονται σημειακά) μέχρι ηλεκτρονικές συσκευές (για τις οποίες απαιτούνται περίπλοκες διατάξεις για την απόκτηση των μετρήσεων). Για την αποτίμηση της αντοχής, η σπουδαιότερη μέτρηση είναι αυτή της παραμόρφωσης. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι ότι η παραμόρφωση και η τάση συνδέονται μεταξύ τους με μια θεμελιώδη σχέση μέσω του μέτρου ελαστικότητας στην περίπτωση ελαστικής απόκρισης (π.χ. προεντεταμένους φορείς). Αν και η παραμόρφωση είναι το απευθείας μετρούμενο μέγεθος και η τάση είναι μέγεθος που προκύπτει από υπολογισμούς, περισσότερο χρησιμοποιείται η τάση για τον έλεγχο μιας κατασκευής να φέρει φορτία καθώς με τη χρήση του δεύτερου μεγέθους ο μηχανικός έχει καλύτερή αντίληψη για τη φέρουσα ικανότητα μιας κατασκευής. Επίσης λόγω των υψηλών δυνατοτήτων που υπάρχουν σήμερα για προσομοίωση και ανάλυση φορέων κατασκευών, η μέτρηση της δυναμικής τους απόκρισης σε εξωτερικά αίτια είναι εξίσου σημαντική και αξιοποιήσιμη τα τελευταία χρόνια.

4.1.3 Παρακολούθηση απόκρισης γεφυρών

Με την ενοργάνωση της γέφυρας και την ρύθμιση του καταγραφέα το σύστημα καταγραφής δεδομένων είναι έτοιμο για την συλλογή δεδομένων. Μόλις εγκατασταθεί το σύστημα καταγραφέα - αισθητηρίων στην κατασκευή, γίνεται σύνδεση με φορητό υπολογιστή (ο οποίος πρέπει να διαθέτει κατάλληλο λογισμικό) για τον προγραμματισμό των ρυθμίσεων καταγραφής. Για τη ρύθμιση του συστήματος εισάγεται αρχικά η πληροφορία της θέσης του φορητού υπολογιστή στην οποία είναι συνδεδεμένο (κατά την διάρκεια της ρύθμισης - προγραμματισμού) το σύστημα καταγραφής και ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων. Αρχικά εισάγονται οι παράμετροι του σταθμού.

Αυτές είναι:

- Το κωδικό όνομα του σταθμού (καθοριζόμενο από τον χρήστη).
- Ο αριθμός σειράς του οργάνου (serial number, ενδέχεται να αναγνωρίζεται αυτόματα ή εισάγεται από τον χρήστη)
- Επιλογή των καναλιών καταγραφής στα οποία είναι συνδεδεμένα τα αισθητήρια όργανα.
- Το γεωγραφικό πλάτος της θέσης στην οποία είναι εγκατεστημένο το όργανο.
- Το γεωγραφικό μήκος της θέσης στην οποία είναι εγκατεστημένο το όργανο.
- Το γεωγραφικό υψόμετρο της θέσης στην οποία είναι εγκατεστημένο το όργανο.
- Ο κωδικός του σειριακού χρόνου που παράγεται από τον καταγραφέα
- Σχόλια

- Προσωπικός κωδικός του χρήστη

Στην περίπτωση ύπαρξης συσκευής τηλεπικοινωνίας (modem) πρέπει να εισαχθούν τα χαρακτηριστικά της συσκευής. Η συσκευή τηλεπικοινωνίας ενδέχεται να είναι ενσωματωμένη στον καταγραφέα ή εξωτερική.

Τα χαρακτηριστικά σε αυτή την περίπτωση είναι:

- Χαρακτήρες έναρξης της κλήσης
- Χαρακτήρες λήξης της κλήσης
- Χαρακτήρες διακοπής κλήσης
- Εντολή αυτόματης απάντησης σε κλήση
- Εντολή αυτόματου τερματισμού κλήσης
- Νούμερο κυρίως τηλεφώνου
- Νούμερο δευτερεύοντος τηλεφώνου
- Χρόνος αναμονής, σε δευτερόλεπτα, για την απόκριση του μόντεμ
- Χρόνος μεταξύ προσπαθειών επανάκλησης
- Μέγιστο πλήθος προσπαθειών επανάκλησης
- Ενεργοποίηση της αυτόματης κλήσης και επιλογή των περιπτώσεων για τις οποίες θα γίνεται αυτόματη κλήση. Αυτές οι περιπτώσεις πρέπει να επιλεγούν και αφορούν την αυτόματη κλήση στην περίπτωση κατά την οποία: Ανιχνευθεί καταγράψιμη μεταβολή, πέσει ή μπαταρία του συστήματος, διακοπεί το ρεύμα, ανιχνευθούν ακρότατες τιμές θερμοκρασίας, διαπιστωθεί κακή λειτουργία του συστήματος παγκόσμιου προσδιορισμού θέσης (GPS).

Για τον καθορισμό των παραμέτρων των καναλιών είναι δυνατόν να καθορισθούν παράμετροι ομαδικά, για κανάλια με κοινές παραμέτρους. Σε αυτή την περίπτωση καθορίζονται:

- Το εύρος (χρόνος) της χρονοϊστορίας της διέγερσης που θα καταγραφεί πριν την ανάπτυξη του μεγέθους διέγερσης για το οποίο έχει οριστεί να αρχίσει η καταγραφή
- Το εύρος (χρόνος) της χρονοϊστορίας της διέγερσης που θα καταγραφεί μετά την ανάπτυξη του μεγέθους διέγερσης για το οποίο έχει οριστεί να σταματήσει η καταγραφή
- Η ελάχιστη διάρκεια μιας καταγραφής

- Χώρος κύριας αποθήκευσης της καταγραφής
- Χώρος δευτερεύουσας αποθήκευσης της καταγραφής
- Πλήθος σημείων καταγραφής ανά δευτερόλεπτο
- Το φίλτρο έναντι ψευδών καταγραφών
- Ομαδικές πηγές έναρξης καταγραφής. Στην περίπτωση που το αναπτυσσόμενο μετρούμενο μέγεθος υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή στα κανάλια τα οποία έχουν προεπιλεγεί, τότε αρχίζει η καταγραφή. Ομοίως η καταγραφή σταματάει, όταν σε κάποιο από τα προεπιλεγμένα κανάλια η απόκριση πέσει κάτω από μια προεπιλεγμένη τιμή. Υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού έναρξης ή λήξης της καταγραφής από το πληκτρολόγιο με κατάλληλη προεπισημανση.
- Η καταγραφή σταματάει ή ξεκινά όταν η βαρύτητα ενεργοποίησης (detrigger or trigger weight) πέσει κάτω ή ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή.

Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι στην περίπτωση κατά την οποία τρία κανάλια έχουν επισημανθεί με μονάδα τότε σε οποιοδήποτε από αυτά τα κανάλια ξεπεραστεί το μέγεθος μέτρησης, για το οποίο υπάρχει εντολή να αρχίσει η καταγραφή, θα συλλεχθούν δεδομένα. Τονίζεται ότι αυτό θα συμβεί όταν στην βαρύτητα ενεργοποίησης τεθεί μονάδα. Τα υπόλοιπα κανάλια δεν έχουν δυνατότητα να ενεργοποιήσουν την συλλογή δεδομένων. Στην περίπτωση κατά την οποία τρία κανάλια έχουν επισημανθεί με μονάδα και το πληκτρολόγιο έχει επισημανθεί με δύο τότε απαιτείται η ενεργοποίηση δύο καναλιών ή μόνο του πληκτρολογίου όταν η βαρύτητα ενεργοποίησης τεθεί ίση με δύο.

Ο καθορισμός των παραμέτρων των καναλιών είναι επίσης πολύ σημαντική εργασία. Στην περίπτωση αυτή καθορίζονται:

- Ο αριθμός του καναλιού για το οποίο καθορίζονται οι παράμετροι
- Το κωδικό όνομα του καναλιού
- Η σχετική θέση του αισθητήρα ως προς τον καταγραφέα. Ειδικότερα εισάγονται η απόσταση προς τον Βορά, την Ανατολή και το υψόμετρο του αισθητήρα σε σχέση με τον καταγραφέα. Επίσης εισάγονται ο προσανατολισμός του άξονα του αισθητήρα ως προς τον ορίζοντα (δείχνει τον προσανατολισμό του άξονα ευαισθησίας ως προς κατακόρυφο επίπεδο ± 90) και το αζιμούθιο (0 - 359) σε ωρολογιακή φορά από τον Νότο.
- Το ποσοστό του μετρούμενου μεγέθους (% του μέγιστου μεγέθους απόκρισης που μπορεί να καταγράψει το σύστημα) κατά την υπέρβαση του οποίου αρχίζει η καταγραφή
- Το ποσοστό του μετρούμενου μεγέθους (% του μέγιστου μεγέθους απόκρισης που μπορεί να καταγράψει το σύστημα) κάτω από το οποίο σταματάει η καταγραφή

- Το ποσοστό του μετρούμενου μεγέθους (% του μέγιστου μεγέθους απόκρισης που μπορεί να καταγράψει το σύστημα) κατά την υπέρβαση του οποίου ενεργοποιείται ειδοποίηση (alarm)
- Ο τύπος του φίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί από τον καταγραφέα για τον καθορισμό της έναρξης της καταγραφής. Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της έναρξης ή λήξης της εγγραφής μέσω προκαθορισμένου ποσοστού της πλήρους κλίμακας μέτρησης και μέσω καθορισμού του ορίου του λόγου STA/LTA (της μέσης τιμής του μετρούμενου μεγέθους για προκαθορισμένο μικρό χρονικό διάστημα προς την μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους για προκαθορισμένο μεγάλο χρονικό διάστημα). Στην δεύτερη περίπτωση ο υπολογισμός γίνεται για πολλά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα κατά το μήκος της διέγερσης.

Στην φάση καθορισμού των παραμέτρων του συστήματος καταγραφής εισάγονται στοιχεία για τον ψηφιακό καταγραφέα που σχετίζονται με τον τύπο του αρχείου των καταγραφών (format) το οποίο θα δημιουργηθεί και την ταχύτητα καταγραφής και μετάδοσης δεδομένων. Υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού των καναλιών τα οποία αφορά η παραπάνω ρύθμιση.

Στην περίπτωση καταγραφής και απεικόνισης των καταγραφών σε πραγματικό χρόνο πρέπει να γίνονται οι ρυθμίσεις οι οποίες σχετίζονται τον τρόπο μετάδοσης και το μέγεθος των καταγραφών. Μετά τον καθορισμό όλων των παραπάνω παραμέτρων γίνεται δοκιμή του συστήματος με εντολή ελέγχου για την οποία είναι προγραμματισμένο το σύστημα από την κατασκευάστρια εταιρεία και ελέγχονται οι καταγραφές αυτής της περίπτωσης μέσω σχετικού λογισμικού. Σχεδόν όλες οι εταιρείες, κατασκευής συστημάτων ενοργάνωσης - καταγραφών, διαθέτουν λογισμικό απεικόνισης των καταγραφών, το οποίο πρέπει να παρέχεται σε κάθε περίπτωση.

Μετά την ενοργάνωση γίνονται περιοδικές επισκέψεις (πυκνές αρχικά) για τον έλεγχο καλής λειτουργίας του συστήματος. Η συλλογή των καταγραφών και το άδειασμα της μνήμης των οργάνων γίνεται είτε επί τόπου είτε από συνδεδεμένο υπολογιστή (στο γραφείο - κέντρο παρακολούθησης) μέσω μόντεμ.

4.1.4 Στατικές δοκιμές γεφυρών

Από πολύ παλιά, παλαιότερα από ότι για άλλες κατασκευές, έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές για την αποτίμηση της δομικής κατάστασης και ασφάλειας σε γέφυρες. Πολλές από τις αρχές που ισχύουν για τις δοκιμές γεφυρών είναι κοινές και για τις άλλες κατασκευές. Οι στατικές δοκιμές δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα γεφυρών να ανθίστανται σε κινητά φορτία οχημάτων.

Η στατική δοκιμή γεφυρών δεν είναι μια νέα δραστηριότητα και εφαρμόζεται για αιώνες. Στις αρχές του 20ου αιώνα οι γέφυρες δοκιμάζονταν υπό ομοιόμορφα κατανομημένα φορτία που προσομοίωναν την ακριβή κυκλοφορία. Αν δεν σημειώνονταν κατάρρευση ή δεν εμφανίζονταν υπερβολικές παραμορφώσεις υπό τα φορτία δοκιμής η γέφυρα θεωρούνταν «γερή». Σε μερικές Ευρωπαϊκές χώρες συνηθίζονταν η απόδειξη της ικανότητας ανάληψης φορτίων της γέφυρας μέσω δοκιμών πριν την δώσουν σε κυκλοφορία. Σε αυτές τις δοκιμές η γέφυρα φορτιζονταν με φορτία ισοδύναμα των φορτίων λειτουργίας και η απόκρισή της και η παραμόρφωσή της παρακολουθούσαν

κυρίως μέσω χειροκίνητων μετρητικών διατάξεων. Συνεπώς, αυτές οι πρώτες δοκιμές συσχετίζουν την δομική κατάσταση της γέφυρας μόνο με την καμπτική της δυσκαμψία.

Αρκετός από τον εξοπλισμό και την τεχνολογία που απαιτούνται για την στατική δοκιμή γεφυρών εφαρμόστηκε για πολλά χρόνια. Μέχρι προσφάτως, η χρήση τους περιορίζονταν σε εργαστηριακές δοκιμές και περιστασιακά σε δοκιμές πεδίου οι οποίες εκπονούνταν από ακαδημαϊκούς σε ειδικά ερευνητικά προγράμματα. Στις αρχές της δεκαετίας του 70, στο Οντάριο, το γραφείο έρευνας των κατασκευών του υπουργείου μεταφορών εισήγαγε τις περιοδικές δοκιμές γεφυρών αυτοκινητοδρόμων με κύριο σκοπό την εκτίμηση της ικανότητας των γεφυρών να φέρουν τα φορτία λειτουργίας. Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος επιθεώρησης ελέγχθηκαν περισσότερες από 250 γέφυρες στο Οντάριο. Στις περισσότερες από τις δοκιμές αποδείχθηκε ότι η ικανότητα των γεφυρών να φέρουν φορτία ήταν μεγαλύτερη από αυτή που αιτιολογούνταν από την ανάλυση. Ένα ευρύ πρόγραμμα ελέγχου γεφυρών καθιερώθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής από το τμήμα συγκοινωνιών της Φλόριδας. Επιπροσθέτως του περιορισμένου αριθμού κυβερνητικών εγκαταστάσεων ελέγχου γεφυρών, πολλές εξειδικευμένες εταιρείες στην Βόρειο Αμερική μπορούν να εκτιμήσουν την δομική κατάσταση γεφυρών μέσω δοκιμών.

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις στατικές δοκιμές ως ένα αποτελεσματικό μέσο για την αποτίμηση της δομικής κατάστασης μιας γέφυρας.

4.1.4.1 Μέθοδοι στατικών δοκιμών γεφυρών

Σε ευρεία έννοια, οι δοκιμές γεφυρών είναι είτε στατικές είτε δυναμικές. Σε περιπτώσεις δοκιμής γεφυρών, οι φορτίσεις θεωρούνται στατικές όταν αυτές μεταφέρονται ή τοποθετούνται στις γέφυρες πολύ αργά έτσι ώστε να μην προκαλούν δυναμικά φαινόμενα στη γέφυρα. Στην περίπτωση της δοκιμής με οχήματα, τα φορτία θεωρούνται στατικά όταν τα οχήματα μεταφέρονται στην γέφυρα με αργή ταχύτητα. Οι στατικές δοκιμές υποδιαιρούνται σε δοκιμές απόκρισης, διαγνωστικές δοκιμές και δοκιμές επαλήθευσης. Οι δοκιμές δυναμικών φορτίων, όπως δηλώνει και ο όρος, εκτελούνται με κινούμενα φορτία τα οποία ενεργοποιούν την δυναμική απόκριση της γέφυρας.

4.1.4.2 Δοκιμές απόκρισης

Οι δοκιμές απόκρισης εκτελούνται είτε για την διερεύνηση της μηχανικής απόκρισης γεφυρών είτε για την αποτίμηση της ακρίβειας των μεθόδων ανάλυσης. Στην δεύτερη περίπτωση το αντικείμενο είναι η αποτίμηση των αναλυτικών μεθόδων προκειμένου αυτές να εφαρμοσθούν με ακρίβεια για το σχεδιασμό και την αποτίμηση παρόμοιων γεφυρών. Κατά την διάρκεια αυτών των δοκιμών τα εφαρμοζόμενα φορτία, συνήθως, διατηρούνται μικρότερα ή ίσα από το επίπεδο των μέγιστων φορτίων λειτουργίας. Μια δοκιμή απόκρισης παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πώς κατανέμεται η φόρτιση μεταξύ των διαφόρων δομικών στοιχείων της γέφυρας. Η δοκιμή αυτή δεν δίνει άμεσες πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα των διαφόρων στοιχείων της γέφυρας να ανθίστανται σε φορτίσεις.

Πρόσφατα παραδείγματα τέτοιων δοκιμών στον Καναδά, αναφέρονται από τους Bakht et al. (1999) και Bakht and Mufti (1999). Η πρώτη εκπονήθηκε σε έξι ξύλινες γέφυρες στην περιοχή της Νέας Σκωτίας. Το κύριο αντικείμενο ήταν να καθορισθούν τα χαρακτηριστικά της κατανομής της φόρτισης των γεφυρών. Μια δεύτερη σειρά τέτοιων δοκιμών έγινε στην Βρετανική Κολούμπια σε δύο πλακοσκεπείς γέφυρες με κλειδιά

διάτμησης. Στόχος αυτών των δοκιμών ήταν να βαθμονομηθεί μια αναλυτική μέθοδος και κατόπιν να εκτιμηθεί το μέγεθος των διατμητικών τάσεων στα κλειδιά διάτμησης για όλες τις πλακοσκεπείς γέφυρες στους δασικούς δρόμους της πολιτείας αυτής. Σε αντίθεση με προηγούμενες αντιλήψεις, βρέθηκε ότι οι τάσεις στις συγκολλήσεις των κλειδιών διάτμησης ήταν πολύ χαμηλές και για αυτό τον λόγο δεν υπήρχε περίπτωση για αστοχία έναντι κοπώσεως σε αυτή τη θέση.

4.1.4.3 Δοκιμές Διάγνωσης

Είναι εντελώς σπάνιο η απόκριση ενός δομικού στοιχείου μιας γέφυρας να μην επηρεάζεται από την αλληλεπίδρασή του με τα άλλα δομικά στοιχεία της γέφυρας. Η ύπαρξη αυτής της αλληλεπίδρασης σε ορισμένους τύπους γεφυρών μπορεί να προσομοιωθεί με ακρίβεια. Όμως, υπάρχουν ορισμένες συνθήκες όπου μια ρεαλιστική εκτίμηση αυτής της αλληλεπίδρασης αποτελεί αντικείμενο εικασιών. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μπορεί να είναι επιβλαβές ή ευεργετικό στην απόκριση του θεωρούμενου στοιχείου. Στην περίπτωση που αυτό είναι επιβλαβές, ενδεχομένως να υπάρχουν ενδείξεις ορατής καταπόνησης στο στοιχείο. Στην περίπτωση που η αλληλεπίδραση είναι ευεργετική, υπάρχει περίπτωση αυτό να μην αξιοποιηθεί ποτέ. Μία διαγνωστική δοκιμή είναι η πιο σίγουρη διαδικασία για τον καθορισμό της αιτίας της καταπόνησης ή του βαθμού αναβάθμισης της ικανότητας μεταφοράς φορτίου ενός στοιχείου μιας γέφυρας.

Δεν υπάρχει σαφής διαφορά μεταξύ των δοκιμών απόκρισης και διάγνωσης αλλά η πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται για την εκπόνηση δοκιμής αποτίμησης μιας μεθόδου ανάλυσης. Η δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται για την διάγνωση της επιρροής της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων της γέφυρας. Για παράδειγμα, μια δοκιμή απόκρισης μπορεί να διεξάγεται για την αποτίμηση μιας καθορισμένης μεθόδου προσδιορισμού της κατανομής της εγκάρσιας φόρτισης σε μία γέφυρα με πλάκα επί δοκών. Μια δοκιμή διάγνωσης μπορεί να διεξάγεται για τον καθορισμό των συνθηκών στρωφικής πάκτωσης (rotational restrain conditions) στα άκρα ενός βάθρου γέφυρας. Μέσω ενός μεγάλου αριθμού δοκιμών, επιβεβαιώθηκε ότι οι δοκιμές διάγνωσης μπορούν να εφαρμοσθούν καλύτερα για τον προσδιορισμό των αιτιών της καταπόνησης που ενδεχομένως να υπάρχει σε μια γέφυρα λόγω της αθέλητης αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων ή για τον εντοπισμό της ευμενούς αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων. Το αίτιο της καταπόνησης σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να εξαιρεθεί μέσω απλών διορθωτικών μέτρων. Η ευεργετική αλληλεπίδραση, από την άλλη, μπορεί να αξιοποιηθεί στον καθορισμό μιας αυξημένης ικανότητας της γέφυρας για ανάληψη φορτίων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες περιπτώσεις εκτέλεσης διαγνωστικών δοκιμών σε γέφυρες, π.χ. Bakht & Csagoly (1979, 1980) και Bakht & Jaeger (1987, 1990).

4.1.4.4 Δοκιμές Επαλήθευσης

Μια δοκιμή επαλήθευσης εκπονείται για τον καθορισμό της ικανότητας της γέφυρας να αναλαμβάνει φορτία. Κατά τη δοκιμή αυτή, η κατασκευή υπόκειται σε εξαιρετικά υψηλά στατικά φορτία τα οποία προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ένταση στη γέφυρα από αυτά που αναπτύσσονται μέσω της στατικής επιβολής των μέγιστων φορτίων λειτουργίας.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η υποβολή μιας γέφυρας σε ένα επαρκώς υψηλό φορτίο επαλήθευσης δεν αποτελεί πάντοτε επιβεβαίωση της φέρουσας ικανότητας της. Απαιτείται η εκπόνηση αναλύσεων οι οποίες να βασίζονται σε έγκυρη αιτιολόγηση των αιτίων για τα οποία η γέφυρα έφερε τα φορτία που της επιβλήθηκαν και να καθορίζουν υπό ποιες συνθήκες πρέπει να θεωρείται αυτή η φέρουσα ικανότητα εξασφαλισμένη και για μελλοντικές καταπονήσεις.

Λόγω των πολύ υψηλών φορτίων που επιβάλλονται σε μια γέφυρα κατά τις δοκιμές επαλήθευσης, υπάρχει πάντα η πιθανότητα να προκληθούν μόνιμες βλάβες στη γέφυρα κατά τη δοκιμή. Όμως θα πρέπει να τονισθεί ότι η πιθανότητα να αναπτυχθούν μόνιμες βλάβες κατά την δοκιμή είναι σημαντικά μικρή, σε περίπτωση κατά την οποία η δοκιμή σχεδιάζεται και εκτελείται προσεκτικά και μεθοδολογικά. Από περισσότερες από 250 δοκιμές που έγιναν σε γέφυρες του Οντάριο σε καμία δεν προκλήθηκαν βλάβες λόγω των δοκιμών. Παρά το γεγονός ότι δεν προκλήθηκαν βλάβες σε καμία γέφυρα του Οντάριο, οι δοκιμές και ειδικότερα οι δοκιμές επαλήθευσης θα πρέπει να εκτελούνται από επαγγελματίες με κατάλληλα προσόντα και μόνο αφού ο αρμόδιος φορέας για την γέφυρα επιβεβαιώσει ότι αποδέχεται την πιθανότητα να προκληθεί ζημιά στην γέφυρα λόγω της δοκιμής.

Μία καλοσχεδιασμένη δοκιμή επαλήθευσης εκτελείται με βαθμιαία αύξοντα φορτία, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο ότι τα φορτία δεν θα λάβουν τέτοιες τιμές ώστε να ξεπεραστεί η γραμμική ελαστική συμπεριφορά του φορέα.

Υπάρχουν πολύ λίγα δημοσιευμένα παραδείγματα δοκιμών επαλήθευσης που έγιναν εκτός του Οντάριο, ενώ παραδείγματα τέτοιων δοκιμών στο Οντάριο έχουν αναφερθεί από τους Bakht (1981, 1988), Bakht & Csagoly (1979), Bakht & Mufti (1992a, b).

4.1.4.5 Εξοπλισμός για εκτέλεση δοκιμών

Κατά την στατική δοκιμή γεφυρών απαιτείται γενικώς ο ίδιος εξοπλισμός όπως και στις άλλου τύπου δοκιμές ΠΔΚ. Οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό για την ΠΔΚ γεφυρών δίνονται στα κεφάλαια 1 και 2 αλλά και σε άλλα μέρη αυτού του εγχειριδίου.

Ένα καλό σύστημα φορτίσεων το οποίο να μπορεί να εφαρμόζεται σε διάφορες στατικές δοκιμές θα πρέπει να έχει κατά προτίμηση τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό των πραγματικών φορτίων οχημάτων της γέφυρας.
- Θα πρέπει να είναι εύκολο στον χειρισμό έτσι ώστε να επιβάλλεται και να απομακρύνεται από την γέφυρα γρήγορα.
- Θα πρέπει να είναι εύκολα μεταφερόμενο.
- Θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμο έτσι ώστε να μπορεί να αυξάνεται και να μειώνεται κατάλληλα.
- Μετά την εφαρμογή του στη γέφυρα, η κατανομή του βάρους του θα πρέπει να είναι επαναλήψιμη και με δυνατότητα γρήγορης σταθεροποίησης.

- Σε δοκιμές επαλήθευσης θα πρέπει να είναι δυνατή η κίνησή του τόσο με τηλεχειριστήριο όσο και χειροκίνητα.

Με τα προηγούμενα επιθυμητά χαρακτηριστικά κρίνεται ακατάλληλη η φόρτιση με έρμα όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην δοκιμή πασσάλων. Οχήματα φορτωμένα με αδρανή ή δεξαμενές νερού είναι επίσης ακατάλληλα για δοκιμές επαλήθευσης. Προκειμένου να επιβληθούν συγκεντρωμένα φορτία στην άνω επιφάνεια καταστρωμάτων γεφυρών, θα πρέπει να χρησιμοποιείται φορητός γρύλος ο οποίος θα πρέπει να είναι πακτωμένος στο κάτω μέρος του πλαισίου ενός βαριά φορτωμένου οχήματος.

4.1.4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις

Διάφορες απροσδόκητες "εκπλήξεις" προέκυψαν κατά τη διάρκεια δοκιμών γεφυρών που έγιναν στον Καναδά τη δεκαετία του 1990. Σε πολλές περιπτώσεις τα όργανα έμοιαζαν να δίνουν «ψευδείς μετρήσεις». Μερικές φορές φαινόταν ότι αυτές οι μετρήσεις έπρεπε να αγνοηθούν ως αποτέλεσμα βλάβης του οργάνου. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως βρέθηκε ότι αυτές οι απρόσμενες ενδείξεις από τα όργανα προέρχονταν από απρόσμενη συμπεριφορά της γέφυρας.

Αυτή η απρόσμενη συμπεριφορά τονίζει το γεγονός ότι μερικά θέματα της συμπεριφοράς των γεφυρών δεν περιλαμβάνονται στις παραδοχές του σχεδιασμού τους και ενδέχεται να ξεφεύγουν της προσοχής ακόμη και του πιο έμπειρου σχεδιαστή και αναλυτή γεφυρών. Μερικά από αυτά τα θέματα που εντοπίστηκαν κατά τη δοκιμή γεφυρών βρέθηκε να έχουν σημαντική επιρροή στην ικανότητα ανάληψης φορτίου της γέφυρας ενώ άλλα ασήμαντη. Από τις διάφορες περιπτώσεις πραγματοποίησης δοκιμών σε γέφυρες, προέκυψε σαφώς ότι στις περισσότερες περιπτώσεις γεφυρών η ικανότητα ανάληψης φορτίου είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει υπολογιστικά. Ενδέχεται όμως να υπάρξουν και περιπτώσεις κατά τις οποίες η ικανότητα ανάληψης φορτίου από τη γέφυρα να είναι μικρότερη από την αναμενόμενη. Μία προσεκτικά σχεδιασμένη και εκτελεσμένη δοκιμή είναι πολύ σημαντική στην εκτίμηση της αντοχής και των αδυνάτων σημείων μια υφιστάμενης γέφυρας.

4.1.5 Δυναμικές δοκιμές γεφυρών

Αν και όχι τόσο παλιές όσο οι στατικές δοκιμές, οι δυναμικές δοκιμές γεφυρών δεν είναι νέες. Από το 1920 όλες οι γέφυρες των αυτοκινητοδρόμων στην Ελβετία, με άνοιγμα μεγαλύτερο από 20m, δοκιμάζονταν σε δυναμική φόρτιση. Αυτές οι δοκιμές διεξάγονταν και διεξάγονται μέσω ενός οχήματος με σταθερό τύπο αξόνων, το οποίο διέτρεχε την γέφυρα με διαφορετικές ταχύτητες και περνούσε πάνω από προεξοχή προκαθορισμένου μεγέθους πάνω στη γέφυρα.

Οι δυναμικές δοκιμές γεφυρών μπορεί να υποδιαιρεθούν σε τέσσερις ξεχωριστές κατηγορίες:

- δοκιμές ιστορικού των τάσεων
- δοκιμές Ανοχής Δυναμικών Φορτίσεων
- δοκιμές περιβαλλοντικών διεγέρσεων
- δοκιμές ελεύθερης ταλάντωσης (pull back)

Οι παραπάνω κατηγορίες δοκιμών παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

4.1.5.1 Δοκιμές ιστορικού των τάσεων

Αυτές οι δοκιμές γίνονται προκειμένου να καθορισθεί η κατανομή της διακύμανσης των τάσεων σε δομικά στοιχεία της γέφυρας που καταπονούνται σε κόπωση. Τα δεδομένα, τα οποία καταγράφονται συνεχώς για μικρή χρονική περίοδο, λόγω της διέλευσης οχημάτων από τη γέφυρα, χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του χρόνου ζωής του μέλους της γέφυρας λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα της κόπωσης. Με τις σύγχρονες συσκευές, οι οποίες είναι δυνατό να αποθηκεύουν μεγάλο πλήθος δεδομένων, η κατάλληλη τεχνική είναι η συνεχής καταγραφή των παραμορφώσεων με λογικό ρυθμό δειγματοληψίας και κατόπιν η επεξεργασία των δεδομένων για να προκύψει η εν τω χρόνω κατανομή των τάσεων.

4.1.5.2 Δοκιμές Ανοχής Δυναμικών φορτίσεων (ΑΔΦ)

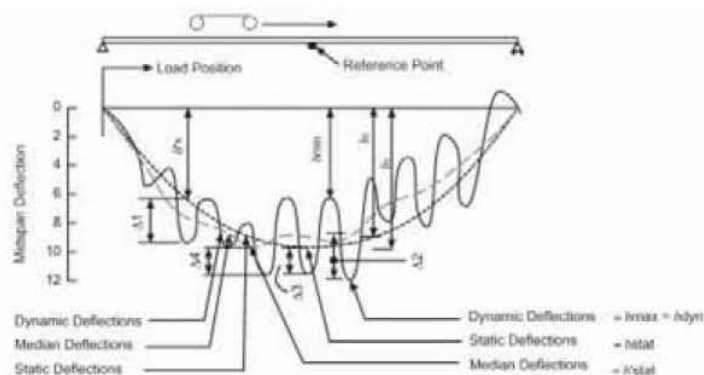
Ο συντελεστής κρούσης (impact factor) ή συντελεστής Ανοχής Δυναμικής Φόρτισης είναι μία αφηρημένη έννοια, η οποία δύσκολα ποσοτικοποιείται. Ο δυναμικός έλεγχος γεφυρών συχνά εκτελείται για ερευνητικούς σκοπούς προκειμένου να αποκτηθεί πληροφορία σχετικά με τις αντιπροσωπευτικές τιμές της ΑΔΦ οι οποίες χρησιμοποιούνται στην διαμόρφωση διατάξεων των κανονισμών. Μερικοί κανονισμοί αποτίμησης υφισταμένων γεφυρών όπως ο ΟΗΒDC, (1992) και ο CHBDC, (2000) επιτρέπουν τον καθορισμό της ΑΔΦ μέσω δυναμικών δοκιμών. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, ο καθορισμός της ΑΔΦ παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες.

4.1.5.3 Καθορισμός Δυναμικής Επαύξεσης

Οι Fuller et al. (1931) πρότειναν η αύξηση από την επιβολή των δυνάμεων λόγω της φύσης τους ως δυναμικές να καθορίζεται ως δύναμη εκφρασμένη σε ποσοστό της στατικής δύναμης. Η προκύπτουσα με αυτό τον τρόπο ψευδοδυναμική δύναμη είναι μεγαλύτερη από την στατική δύναμη. Έχοντας υπόψη ότι η αύξηση της δύναμης λόγω της δυναμικής φύσης της δεν είναι κατ' ανάγκη ίδια με την αύξηση των τάσεων λόγω της δυναμικής φύσης των επιβαλλόμενων δυνάμεων, ορίζεται για τις τελευταίες συντελεστής που προκύπτει από το πηλίκο των τάσεων κατά την δυναμική επιβολή των κινητών φορτίων προς τις τάσεις κατά την στατική επιβολή των κινητών φορτίων.

Οι ερευνητές που ερμήνευαν τις καταγραφές από δυναμικές δοκιμές συχνά χρησιμοποιούσαν τον όρο δυναμική επαύξηση για το ίδιο μέγεθος που οι Fuller et al. (1931) όριζαν ως αύξηση από την επιβολή των δυνάμεων λόγω της φύσης τους ως δυναμικές. Επίσης με τον ίδιο όρο περιέγραφαν αυτό που ορίζονταν ως αύξηση της παραμόρφωσης λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων. Όμως δεν υπάρχει ενιαίος τρόπος με τον οποίο αυτή η αύξηση να υπολογίζεται από τις καταγραφές. Οι διαφορετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της δυναμικής επαύξεσης μπορούν να ερμηνευθούν καλύτερα με τη βοήθεια της Εικόνας 8 που ακολουθεί. Το σχήμα αυτό προέκυψε από καταγραφές πραγματικής δυναμικής δοκιμής σε γέφυρα με απλά εδραζόμενη πλάκα με δοκούς κατά τη διέλευση οχήματος με δύο άξονες (Biggs & Suer, 1956). Το σχήμα δείχνει την μεταβολή των δυναμικών και στατικών παραμορφώσεων στο μεσαίο άνοιγμα μιας δοκού συναρτήσει του χρόνου. Οι δυναμικές παραμορφώσεις λήφθηκαν όταν το όχημα της δοκιμής διέρχονταν από τη γέφυρα με κανονική ταχύτητα. Οι στατικές παραμορφώσεις λήφθηκαν όταν το όχημα διέρχονταν από τη γέφυρα με πολύ μικρή ταχύτητα, έτσι ώστε να μην εισάγονται φαινόμενα δυναμικής ενίσχυσης των παραμορφώσεων. Το σχήμα αυτό επίσης δείχνει την μέση παραμόρφωση που προέκυψε θεωρώντας το μέσο όρο διαδοχικών

ακραίων τιμών της δυναμικής παραμόρφωσης. Οι μέσες αυτές δυναμικές παραμορφώσεις δεν συμπίπτουν με τις στατικές παραμορφώσεις. Όμως, μέσω αριθμητικής επεξεργασία είναι δυνατή η αφαίρεση (φιλτράρισμα) του δυναμικού μέρους της απόκρισης οπότε προκύπτει μία μέση απόκριση ή οποία είναι κοντά στην στατική απόκριση ειδικότερα σε γέφυρες με άνοιγμα πάνω από 20 m.



Εικόνα 14. Βυθίσεις μεσαίου ανοίγματος δοκού λόγω κινητού φορτίου (από Biggs and Suer, 1956)

Τονίζεται ότι στο σχήμα έχει εισαχθεί μία τεχνητή κλίμακα παραμορφώσεων αυτό προκειμένου να διευκολυνθεί η ερμηνεία των καταγραφών της δοκιμής. Στο σχήμα που δίνεται χρησιμοποιείται η κλίμακα των παραμορφώσεων για τις οποίες η δ_{stat} είναι 10 μονάδες. Με αυτό τον καθορισμό οι διάφορες ποσότητες παραμόρφωσης έχουν τις ακόλουθες τιμές. $\delta_{stat}=10$, $\delta_{max}=12.3$, $\delta'_{stat}=9.9$, $\delta_{min}=6.2$, $\delta_1=9.1$, $\delta_2=9.8$, $\delta^*_s=6.4$, $\Delta_1=3.2$, $\Delta_2=3.1$, $\Delta_3=2.0$, $\Delta_4=2.0$.

Οι Bakht & Pinjarkar (1990) αναφέρουν ότι έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι ορισμοί για τον καθορισμό της δυναμικής επαύξησης από τις καταγραφές δοκιμών ή παρόμοιων παραμέτρων. Μερικοί από τους πιο σημαντικούς ορισμούς περιγράφονται παρακάτω. Για λόγους ευκολίας όλες αυτές οι διαφορετικές παράμετροι εις το εξής θα αναφέρονται ως συντελεστές δυναμικής ενίσχυσης και θα συμβολίζονται με το γράμμα I. Οι διάφοροι ορισμοί σημειώνονται παρακάτω και δίνονται οι διάφορες τιμές του I, που αντιστοιχούν στα δεδομένα του προηγούμενου σχήματος.

$$I = \frac{\Delta_1}{\delta_s^*} (= 0.500)$$

$$I = \frac{\Delta_3}{\delta_{stat}} (= 0.200)$$

$$I = \frac{\Delta_4}{\delta_{stat}} (= 0.202)$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_{min}}{\delta_{max} + \delta_{min}} (= 0.330)$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_2}{\delta_2} (= 0.255)$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_1}{\delta_1} (= 0.352)$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_{stat}'}{\delta_{stat}'} (= 0.242)$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_{stat}}{\delta_{stat}} (= 0.230)$$

Όπως παρατηρείται η τιμές του I που προέκυψαν από τις παραπάνω εξισώσεις κυμαίνονται μεταξύ 0.2 και 0.5.

Οι Bakht & Pinjarkar (1990) ανασκόπησαν 26 δημοσιευμένες αναφορές στις οποίες χρησιμοποιούνταν κάποια από τις παραπάνω σχέσεις για τον υπολογισμό του I. Σε σχεδόν όλες από τις αναφορές υπάρχει από μικρή έως καθόλου ανάλυση για την αιτιολόγηση της χρήσης του εκάστοτε από τους παραπάνω ορισμούς του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης. Αυτό δείχνει ότι κάθε ένας από τους διάφορους ορισμούς θεωρήθηκε αξιωματικά και δεν απαιτείται αιτιολόγηση. Η μεταβολή του I στις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν δείχνει ακριβώς το αντίθετο. Αυτό το οποίο μπορεί να θεωρηθεί αξιωματικά είναι ο καθορισμός του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης για την απόκριση της κατασκευής σε δεδομένη στιγμή. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτόν, προκύπτει $I = \Delta / \delta^{\wedge}$ όπου Δ είναι η διαφορά μεταξύ στατικής και δυναμικής απόκρισης την θεωρούμενη στιγμή και δ_s είναι η αντίστοιχη στατική απόκριση.

Ο αξιωματικός καθορισμός του συντελεστή ενίσχυσης που δόθηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί αιτιολογημένα σε όλες τις αναλυτικές διερευνήσεις. Παρόλα αυτά η χρήση του είναι περιορισμένη στον σχεδιασμό γεφυρών καθώς η τιμή του μεταβάλλεται με τον χρόνο και την θέση της φόρτισης. Αυτό που απαιτείται για λόγους σχεδιασμού γεφυρών είναι μια απλή τιμή του συντελεστή ενίσχυσης μέσω της οποίας να υπολογίζεται η μέγιστη δυναμική απόκριση από την μέγιστη στατική απόκριση, οπότε:

$$\Delta_{max} = \delta_{stat}(1+I) \tag{3.9}$$

Ιδεατά ο συντελεστής ενίσχυσης, που προκύπτει από τη σχέση (3.9), πρέπει να δίνει την ίδια τιμή του δ_{max} όπως μετρήθηκε κατά την δοκιμή, π.χ. 12.30. Σε καμία από

τις σχέσεις (3.1) - (3.7) για τον καθορισμό του δ_{max} δεν προκύπτει η σωστή τιμή εκτός από τη σχέση (3.8) η οποία είναι ουσιαστικά η ίδια με τη σχέση (3.9).

4.1.5.4 Παράγοντες που οδηγούν σε παραπλανητικά συμπεράσματα

Στην τεχνική βιβλιογραφία αναφέρονται σημαντικές διακυμάνσεις του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης για κάποια δεδομένη απόκριση, ακόμα και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η γέφυρα και το όχημα φόρτισης είναι τα ίδια. Από αυτές τις παρατηρήσεις συμπεραίνεται ότι ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης δεν είναι μία αιτιοκρατική (ντετερμινιστική) ποσότητα. Για τον καθορισμό μιας τιμής αυτού του συντελεστή για λόγους σχεδιασμού, πρέπει να είναι γνωστές οι στατιστικές ιδιότητες της διασποράς των δεδομένων και ειδικότερα η μέση τιμή και η διακύμανση του συντελεστή ενίσχυσης. Οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις στατιστικές ιδιότητες του συντελεστή ενίσχυσης, ο οποίος υπολογίζεται από τις καταγραφές των δοκιμών, αναλύονται παρακάτω. Αν δεν γίνει προσεκτική χρήση τους, αυτοί οι παράγοντες μπορεί να οδηγήσουν σε παραπλανητική ερμηνεία των καταγραφών.

Τύπος του οχήματος

Είναι γνωστό ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης για μια γέφυρα επηρεάζεται σημαντικά από τη σχέση των δυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος με αυτά της γέφυρας. Παρά το γεγονός αυτό, οι περισσότερες δυναμικές δοκιμές σε γέφυρες διεξάγονται με συγκεκριμένου τύπου ειδικά οχήματα δοκιμών. Οι καταγραφές από τέτοιες δοκιμές, για προφανείς λόγους δεν μπορούν να θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών κυκλοφορίας. Οι συντελεστές ενίσχυσης που προκύπτουν από τέτοιες δοκιμές με την χρήση συγκεκριμένου τύπου ειδικών οχημάτων δοκιμής δίνουν μόνο μια ποιοτική εικόνα του προβλήματος της δυναμικής των γεφυρών. Αυτοί οι συντελεστές δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της τελικής τιμής του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης (impact factor) που θα χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό ή την αποτίμηση μιας γέφυρας. Μία αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης μπορεί να υπολογισθεί ρεαλιστικά μόνο όταν τα δεδομένα συλλέγονται υπό συνθήκες συνήθους κυκλοφορίας και για σχετικά μακρές χρονικές περιόδους.

Μία καλοσχεδιασμένη δοκιμή επαλήθευσης εκτελείται με βαθμιαία αυξανόμενα φορτία, εξασφαλίζοντας ότι αυτά δεν αυξάνουν τόσο ώστε να ξεπεραστεί το όριο ελαστικής συμπεριφοράς της γέφυρας.

Βαρος του οχήματος

Διάφοροι ερευνητές έχουν διαπιστώσει από την παρατήρηση καταγραφών ότι ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης λόγω της δοκιμής με πρότυπο όχημα μειώνεται με την αύξηση του βάρους του οχήματος. Με βάση αυτή την πληροφορία, μπορεί να αναμένεται ότι οι συντελεστές ενίσχυσης που προκύπτουν από ελαφριά οχήματα (που δεν σχετίζονται με τις δράσεις των φορτίων σχεδιασμού) έχουν μη αντιπροσωπευτικά υψηλές τιμές. Τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε ελαφρώς φορτωμένα οχήματα δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό δυναμικών συντελεστών, εκτός από τις περιπτώσεις που απαιτείται η αποτίμηση τους ειδικά για ελαφρύτερα οχήματα.

Θέση του οχήματος ως προς το σημείο αναφοράς

Ας θεωρήσουμε μία γέφυρα επί πέντε δοκών με τρεις λωρίδες κυκλοφορίας, η οποία είναι εννοημένη για μέτρηση της δυναμικής της απόκρισης. Η γέφυρα αυτή φέρει ένα φορτηγό στην δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας έτσι ώστε οι δύο δοκοί κάτω από αυτή τη

λωρίδα να φέρουν όλο το φορτίο του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο αριστερές δοκοί οι οποίες βρίσκονται μακριά από το σημείο επιβολής του φορτίου φέρουν ένα μικρό μερίδιο της φόρτισης. Όμως, η δυναμική ενίσχυση του μικρού μέρους του στατικού φορτίου που φέρουν αυτές οι δύο αριστερές δοκοί είναι πιθανό να είναι αρκετά υψηλή. Έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές ότι ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης σε σημεία μακριά από το σημείο της φόρτισης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή σε σημείο κάτω από την θέση φόρτισης. Προφανώς, ο πρώτος συντελεστής ενίσχυσης δεν είναι κατάλληλος για την εκτίμηση της επιρροής της στατικής φόρτισης σε ολόκληρη τη διατομή της γέφυρας.

Οι στατιστικές ιδιότητες του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης, όπως υπολογίζονται από τις καταγραφές των δοκιμών, μπορούν να θεωρηθούν ρεαλιστικές μόνο στην περίπτωση κατά την οποία τα δεδομένα που προέρχονται από περιοχές εκτός των ζωνών επιρροής αγνοηθούν.

Οι Chan & O'Connor (1990) επιχείρησαν να υπολογίσουν την δυναμική ενίσχυση των φορτίων διατομής μέσω της καταγραφής του αθροίσματος των παραμορφώσεων σε όλες τις δοκούς. Από τις καταγραφές των δυναμικών δοκιμών σε μία γέφυρα επί δοκών μικρού ανοίγματος, υπολόγισαν ανησυχητικά υψηλές τιμές της συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης. Οι Bakht et al., (1992) ισχυρίστηκαν ότι οι υψηλές τιμές των δυναμικών ενισχύσεων που αναφέρθηκαν από αυτούς τους ερευνητές προέρχονται από την θεώρηση δεδομένων σχετικά με την απόκριση των δοκών που βρίσκονταν μακριά από την θέση των επιβαλλόμενων φορτίων.

4.1.6 Δοκιμές περιβαλλοντικής διέγερσης

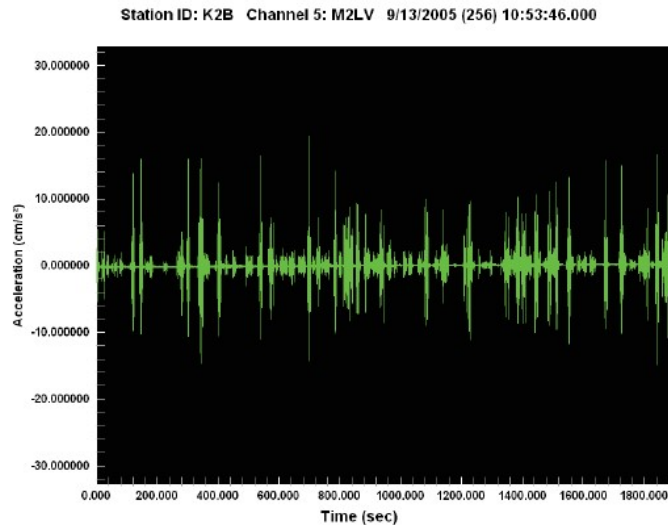
Οι δοκιμές από περιβαλλοντική διέγερση εκπονούνται για τον καθορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής η οποία διεγείρεται από άνεμο, ανθρώπινη δραστηριότητα ή κυκλοφορία οχημάτων. Τυπικά η απόκριση της κατασκευής μετράται από στρατηγικά τοποθετημένα επιταχυνσιόμετρα. Παράδειγμα μιας καταγραφής επιταχυνσιομέτρου δίνεται στην εικόνα 8, στο οποίο οι επιταχύνσεις σχεδιάζονται συναρτήσει του χρόνου. Η επιλογή των θέσεων και του πλήθους των αισθητήρων απαιτεί όχι μόνο ειδικευση στις δυναμικές δοκιμές αλλά και λεπτομερή γνώση της συμπεριφοράς της κατασκευής. Για τον καθορισμό της διάταξης των αισθητήρων σε μια δοκιμή περιβαλλοντικής διέγερσης, είναι χρήσιμη μια εκ των προτέρων λεπτομερής ανάλυση της κατασκευής π.χ. με πεπερασμένα στοιχεία.

Το διάγραμμα των επιταχύνσεων συναρτήσει του χρόνου, όπως αυτό του σχήματος, μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση $f(t)$ η οποία περιγράφεται παρακάτω.

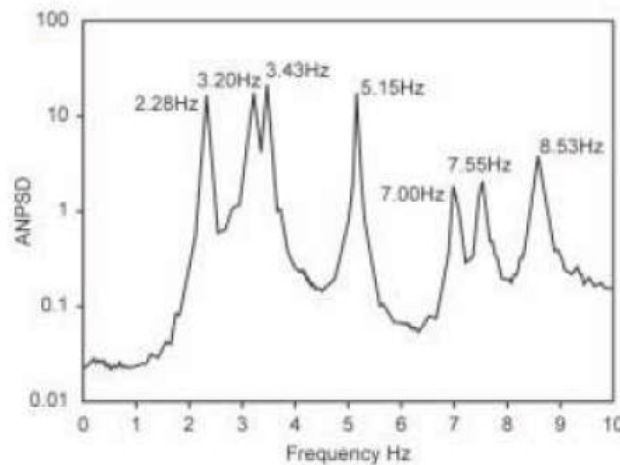
$$f(t) = A_1 \sin 2\pi f_1 t + A_2 \sin 2\pi f_2 t + A_3 \sin 2\pi f_3 t + A_4 \sin 2\pi f_4 t + \dots$$

όπου f_1, f_2, f_3, f_4 , κλπ, είναι οι διάφορες φυσικές συχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής και A_1, A_2, A_3, A_4 , κλπ, είναι τα ιδιομορφικά εύρη ή ιδιομορφικοί λόγοι. Το ιδιομορφικό εύρος για κάθε συχνότητα είναι στενά συσχετισμένο με τη φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density- PSD). Οι καταγραφές από περιβαλλοντική διέγερση αναλύονται σε συχνότητες και PSD με ειδικά λογισμικά. Οι καταγραφές των PSD κατόπιν κανονικοποιούνται για να γίνουν ισοβαρείς. Κατόπιν, από τα κανονικοποιημένα PSD που αντιστοιχούν σε καταγραφές για συγκεκριμένη διεύθυνση διέγερσης, υπολογίζεται η μέση

κανονικοποιημένη PSD, (ANPSD). Ένα παράδειγμα διαγράμματος ANPSD δίνεται στην Εικόνα 9. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα επιταχύνσεων αντιπροσωπεύει μόνο ένα μέρος των δεδομένων που οδηγούν στη φασματική πυκνότητα ισχύος, όπως αυτή της Εικόνας 9. Μια δοκιμή περιβαλλοντικής διέγερσης από την οποία προκύπτει διάγραμμα ANPSD, ονομάζεται και ιδιομορφική δοκιμή.



Εικόνα 15. Καταγραφή κατακόρυφης ταλάντωσης γέφυρας λόγω κυκλοφοριακού φόρτου



Εικόνα 16. Μέσο κανονικοποιημένο διάγραμμα φασματικής πυκνότητας ισχύος καταγραφών που αντιστοιχούν σε κατακόρυφη ταλάντωση (από Ventura et al., 1996)

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 9, σε ένα διάγραμμα ANPSD αναγνωρίζονται διάφορες εξάρσεις συχνοτήτων, οι περισσότερες από τις οποίες είναι πιθανόν να είναι οι φυσικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Το διάγραμμα όμως ενδεχομένως περιλαμβάνει και τις συχνότητες της κυρίαρχης δύναμης διέγερσης, όπως είναι ένα βαρύ φορτηγό. Προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι το διάγραμμα ANPSD περιέχει μόνο φυσικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, οι απεικονιζόμενες ιδιοσυχνότητες θα πρέπει να συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αναλυτικά υπολογιζόμενες ιδιοσυχνότητες. Εάν το

διάγραμμα περιέχει ιδιοσυχνότητες που δεν ερμηνεύονται, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί και να επανασχεδιασθεί το διάγραμμα ANPSD μέχρι να απομακρυνθούν οι συχνότητες των δυνάμεων διέγερσης και να προκύπτει σε κάθε δοκιμή το ίδιο διάγραμμα.

Στην περίπτωση μόνιμα εγκατεστημένων δικτύων επιταχυνσιομέτρων σε μια κατασκευή, τότε το διάγραμμα ANPSD που προκύπτει από τις καταγραφές τους μπορεί να θεωρηθεί ως μία "υπογραφή" της κατασκευής. Οποιαδήποτε αλλαγή στην μορφή αυτού του διαγράμματος δηλαδή αλλαγή στις ιδιομορφές ταλάντωσης της κατασκευής αποτελεί ένδειξη μεταβολής στη δυσκαμψία είτε στη μάζα της κατασκευής.

4.1.7 Περιοδική παρακολούθηση

Η περιοδική παρακολούθηση διεξάγεται για την διερεύνηση επιβλαβών αλλαγών οι οποίες ενδέχεται να συμβαίνουν σε μια κατασκευή ή στην λειτουργική της κατάσταση. Τα περισσότερα από τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος παρακολούθησης είναι κοινά με αυτά των στατικών και δυναμικών δοκιμών που περιεγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Συνήθως, η συνεχής παρακολούθηση εφαρμόζεται μόνο σε κατασκευές οι οποίες είναι πολύ μεγάλης σπουδαιότητας ή υπάρχει η υποψία για την δομική της ακεραιότητα. Στην δεύτερη περίπτωση η κατασκευή ενδεχομένως εκτέθηκε σε ακραία φαινόμενα όπως καταστρεπτικούς σεισμούς και τυφώνες ή κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή της εφαρμόστηκαν καινοτόμες τεχνικές των οποίων η συμπεριφορά σε μακρό χρονικό διάστημα δεν έχει πιστοποιηθεί. Παρομοίως, μέσω της περιοδικής παρακολούθησης είναι δυνατός ο έλεγχος σε μια γέφυρα η οποία επισκευάστηκε με καινοτόμες τεχνικές. Οι περιοδικές παρακολουθήσεις σε συνδυασμό με την εκτέλεση δοκιμών πεδίου μπορεί να συνεισφέρουν επίσης στην επέκταση του χρόνου ζωής μίας ταχέως επιδεινούμενης κατασκευής. Επειδή οι λεπτομέρειες και οι τεχνικές όλων των εναλλακτικών μεθόδων περιοδικής παρακολούθησης είναι πολύ εκτεταμένες για να καλυφθούν στο σύνολο τους, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρησιμότητα αυτού του υποσυστήματος ΠΔΚ, κυρίως μέσω ενός αριθμού εφαρμογών.

4.2 Ανεμογεννήτριες

Η ενόργανη δομική παρακολούθηση στις ανεμογεννήτριες είναι ιδιαίτερα σημαντική. Δύναται να ελεγχθεί η διατήρηση της ιδιοσυχνότητας σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας με εγκατάσταση επιταχυνσιογράφων στην κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ασφάλεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας καθώς οποιαδήποτε μεταβολή της ιδιοσυχνότητας σχεδιασμού της σημαίνει μεταβολή του στατικότητας της κατασκευής. Αυτό είναι δυνατό καθώς μια ανεμογεννήτρια βρίσκεται υπο συνεχή καταπόνηση φορτίων ανέμου κάτι το οποίο προκαλεί κόπωση στην κατασκευή και στατική καταπόνηση.

Επίσης με την παρακολούθηση της κατασκευής με χρήση οπτικών ινών στη βάση της κατασκευής είναι δυνατή η επανεκτίμηση της διάρκειας ζωής της ανεμογεννήτριας (χρόνος σχεδιασμού 15 έτη) εφόσον καταπονείται σε μικρότερο βαθμό από το σχεδιασμό της (έλεγχος κόπωσης της κατασκευής υπό πραγματικές συνθήκες) όπως αναλύεται στο παράδειγμα εφαρμογής 5.2 παρακάτω.

4.3 Κτίρια

Σε κτίρια η εφαρμογή της ενόργανης δομικής παρακολούθησης πραγματοποιείται ώστε να λάβουμε δεδομένα για έλεγχο της ιδιοσυχνότητας του κτιρίου σε βάθος χρόνου, την ελαστική απόκριση σε περίπτωση σεισμικού γεγονότος, τον έλεγχο παραλαβής φορτίου και άλλα κατά περίπτωση.

Ο έλεγχος της ιδιοσυχνότητας του κτιρίου με εγκατάσταση επιταχυνσιογράφων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από σεισμικό γεγονός σε σεισμικό γεγονός είτε παρακολουθώντας την απόκριση της κατασκευής σε άλλες μικρότερες περιβαλλοντικές διεγέρσεις (ambient loading). Οι δοκιμές από περιβαλλοντική διέγερση εκπονούνται για τον καθορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής η οποία διεγείρεται από άνεμο, ανθρώπινη δραστηριότητα ή κυκλοφορία οχημάτων.

Επιπροσθετα δύναται η τοποθέτηση αισθητήρων μέτρησης αξονικής παραμόρφωσης σε κύρια υποστυλώματα του κτιρίου για καταγραφή και έλεγχο της ορθής και συνεχούς παραλαβής των κατακόρυφων φορτίων του κτιρίου και την ασφαλή μεταφορά τους στο έδαφος.



Εικόνα 17. Εγκατάσταση αισθητήρα μέτρησης αξονικής παραμόρφωσης σε υποστώμα κτιρίου

5 Παραδείγματα Εφαρμογών

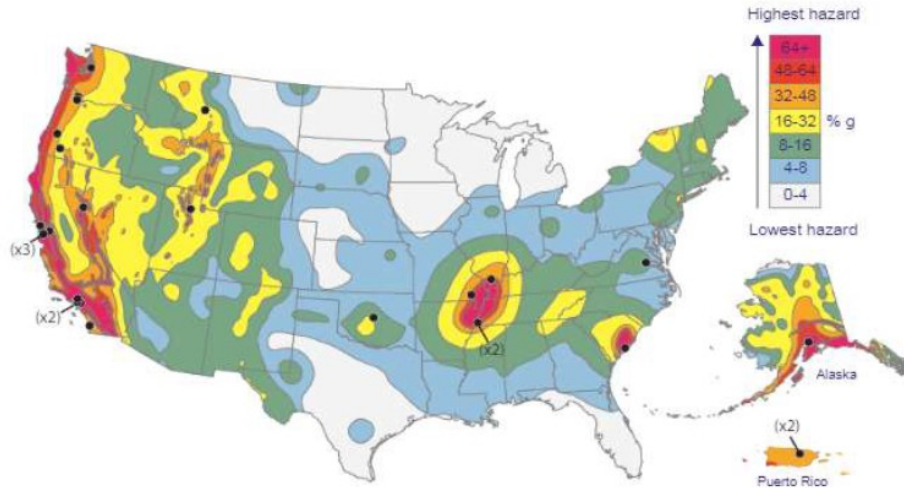
5.1 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας, σε πραγματικό χρόνο, των νοσοκομείων των Βετεράνων.

5.1.1 Γενικά

Με το σεισμό του 1971, με μέγεθος 6.6 ρίχτερ, ο οποίος χτύπησε την κοιλάδα του San Fernando της νότιας Καλιφόρνια, κατεδαφίστηκαν αρκετά νοσοκομεία (Olive View UCLA Medical Center= σύστημα παροχής πρωτοβάθμιας φροντίδας υγείας στα νότια της κοιλάδα του San Fernando), καθώς και τα νοσοκομεία των βετεράνων (Veterans Affairs-VA), τα οποία είναι χτισμένα από το 1925, δηλαδή πριν την εφαρμογή κανονισμών. Αυτό είχε ως απόηχο τη ανάγκη διατήρησης της ακεραιότητας των κτιρίων άμεσης ανάγκης και σημαντικότητας μετά από ένα τέτοιο γεγονός. Ήταν αναγκαίο λοιπόν να εφαρμοστεί κάποιο πρόγραμμα το οποίο θα εξασφαλίζει τη σεισμική επάρκεια αυτών των κτισμάτων, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους σε αντίστοιχες συνθήκες. Κρίθηκε σωστό λοιπόν να τοποθετηθούν αισθητήρες σε κρίσιμα σημεία των κτιρίων, ούτως ώστε να παρακολουθείται η κατάσταση στην οποία βρίσκονται. Αυτό έγινε με συνεργασία των νοσοκομείων των βετεράνων και του εθνικού σχεδίου ισχυρής σεισμικής κίνησης της γεωλογικής υπηρεσίας Ηνωμένων Πολιτειών (National Strong Motion Project-NSMP), με εγκατάσταση αναλογικών επιταχυνσιογράφων.

5.1.1.1 Μέθοδοι εντοπισμού βλαβών

Λόγω της ανάγκης διατήρησης της ακεραιότητας των νοσοκομείων εφαρμόστηκαν περιοδικοί έλεγχοι, οπτικοί αλλά και βάση των στοιχείων που προέκυπταν από τις μετρήσεις σε πιθανές σεισμικές δονήσεις, ώστε να αξιολογείται η κατάσταση στην οποία βρίσκονται και να διενεργούνται οι απαραίτητες ενέργειες συντήρησης ή επισκευής τους ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία τους. Ο εντοπισμός μίας πιθανής επερχόμενης βλάβης προμηνύεται με κάποιες αλλαγές οι οποίες μπορούν να ανιχνευθούν στη κατασκευή, όπως στη συχνότητα, στις ιδιομορφές κ.α. Οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και για την ανίχνευση βλαβών γίνεται με βάση τα μετρούμενα στοιχεία των δονήσεων. Διαφοροποιούνται ανάλογα με την ένταση, τη συχνότητα, την έκταση των μετρούμενων δεδομένων, το είδος της εξεταζόμενης δομής και το δείκτης βλάβης (μια παράμετρο που προσδιορίζει την ευαισθησία της δομής να υποστεί βλάβη). Η επιλογή του δείκτη βλάβης και ο καθορισμός των κρίσιμων τιμών είναι οι σημαντικότερες παράμετροι για την επιτυχία του αλγορίθμου να ανιχνεύσει τη ύπαρξη μιας βλάβης.



Εικόνα 18. Θέσεις νοσοκομείων σε χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας

Στην παραπάνω εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι τα νοσοκομεία VA, τα οποία απεικονίζονται με τις μαύρες κουκκίδες πάνω στο χάρτη (εδώ αναπαρίστανται τα 24), βρίσκονται σε ζώνες υψηλού σεισμικού κινδύνου. Ο χάρτης αυτός είναι ο κώδικας στον οποίο βασίζεται ο αντισεισμικός σχεδιασμός στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Τα χρώματα υποδεικνύουν τα επίπεδα της οριζόντιας μετακίνησης, η οποία υπάρχει η πιθανότητα να ξεπεραστεί σε μία περίοδο 50 χρόνων. Η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους μετριέται σε ένα ποσοστό της επιτάχυνσης βαρύτητας g επί της εκατό.

5.1.1.2 Σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη μελέτη

Το σύστημα που σχεδιάστηκε για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των νοσοκομείων των βετεράνων αποτελείται από δύο μέρη, αυτό της συλλογής πληροφοριών και αυτό της ανάλυσης τους. Στο πρώτο συγκαταλέγονται επιταχυνσιόμετρα, συσκευές ψηφιοποίησης, διακομιστές δικτύων και όλα τα απαραίτητα υλικά συστημάτων τα οποία απαιτούνται για την καταγραφή και συλλογή των δεδομένων και εν συνεχεία για τη διάθεση όλων αυτών των πληροφοριών στο σύστημα επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Τα επιταχυνσιόμετρα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στους ορόφους της κατασκευής, ανάλογα με το εμβαδόν, τον αριθμό των ορόφων και των πτερύγων του κτιρίου.

5.1.1.3 Εγκατάσταση και υλικό για την παρακολούθηση

Για την επιλογή των βέλτιστων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των νοσοκομειακών κτιρίων. Ερευνήθηκαν ως προς τις απαιτήσεις των δεδομένων καλούνται να καταγράψουν, την ανθεκτικότητά τους, την ποιότητα και φυσικά το κόστος.

Η εγκατάσταση του εξοπλισμού έγινε ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Τα στατικά και αρχιτεκτονικά σχέδια καθώς και οι γεωλογικές αναφορές διατίθενται στους μελετητές.

- Διαμορφώνεται το σχέδιο με τις θέσεις των αισθητήρων από πολιτικό μηχανικό.
- Όλοι οι παράγοντες της μελέτης ερευνούν και ορίζουν τις βέλτιστες θέσεις των αισθητήρων, τις διαδρομές των καλωδίων κ.α.
- Οι υπεύθυνοι μηχανικοί σε συνεργασία με ηλεκτρολόγο πραγματοποιούν τις εγκαταστάσεις καθώς επίσης ο τεχνικός εγκατάστασης ελέγχει ξανά τις θέσεις των αισθητήρων, του καταγραφέα και των καλωδίων.
- Γίνεται βαθμονόμηση των αισθητήρων πριν από την τοποθέτησή τους για εξασφάλιση σωστής λειτουργίας.

5.1.1.4 Ενοργανωμένα κτίρια νοσοκομείων

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα νοσοκομεία των βετεράνων στα οποία έχει εφαρμοστεί το σύστημα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας.

State	Medical Center Location	Building Number	Building Name	Number of Stories		Seismic Hazard	Number of Sensors	
				Below Ground	Above Ground		In structure	Ground level
AK	Anchorage	B100	New Hospital Building	-	2	VH	21	3
CA	Palo Alto	100	Outpatient Clinic	1	4	VH	24	3
CA	Palo Alto	101	Outpatient Clinic	1	4	VH	12	
CA	Menlo Park	334	Center Core Building	1	3	VH	24	3
CA	Livermore	62	MS and N	1	6	VH	24	3
CA	San Francisco	200	AmbCare/Clinical Support	1	4	VH	16	3
CA	Los Angeles	1	Out Patient Clinic	1	6	VH	24	3
CA	Sepulveda	10	Outpatient Clinical Care	-	3	VH	24	3
CA	West Los Angeles	114	Research Lab	1	4	VH	12	3
CA	West Los Angeles	500	Main Hospital	1	7	VH	24	3
CA	San Diego	1	Main Hospital	1	6	VH	60	3
IL	Marion	1	Main Hospital	1	4	H	48	3
MO	Poplar Bluff	1	Medical / Nursing / PCC	-	7	H	48	3
MT	Fort Harrison	154	Main Hospital	-	6	H	24	3
NV	Reno	12	New Bed Building/Clinic	-	6	VH	36	3
PR	San Juan	10	Nursing Building	-	2	H	12	3
PR	San Juan	B30	New Bed Tower	1	6	H	24	3
OK	Oklahoma City	1	Main Hospital	1	11	ML	60	3
OR	Roseburg	1	Main Hospital	-	5	VH	36	3
OR	White City	201	Primary Care Clinic	-	2	H	12	-
OR	Portland	100	Main Hospital	2	9	H	39	-
SC	Charleston	1	Main Hospital	-	5	VH	48	3
TN	Memphis	7	Spinal Chord Injury	-	3	VH	12	3
TN	Memphis	1A	Bed Tower	-	3	VH	24	
UT	Salt Lake City	14	Main Hospital	1	4	VH	24	3
VA	Richmond	500	Main Hospital	1	5	ML	36	3
WA	Seattle	100 D and T	Main Hosp. Diag. and Treatment Wing	1	7	VH	27	3
WA	Vancouver	11	Barnes Rehab Building	-	3	H	24	3

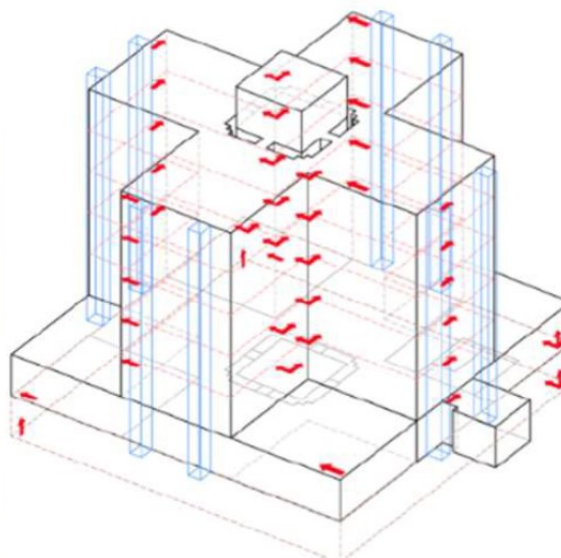
Εικόνα 19. Πίνακας ενοργανωμένων νοσοκομείων βετεράνων

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον τρόπο ενοργάνωσης κάποιων εξ αυτών.

5.1.2 Νοσοκομείο βετεράνων στο San Diego της Καλιφόρνια



(α.)



(β.)

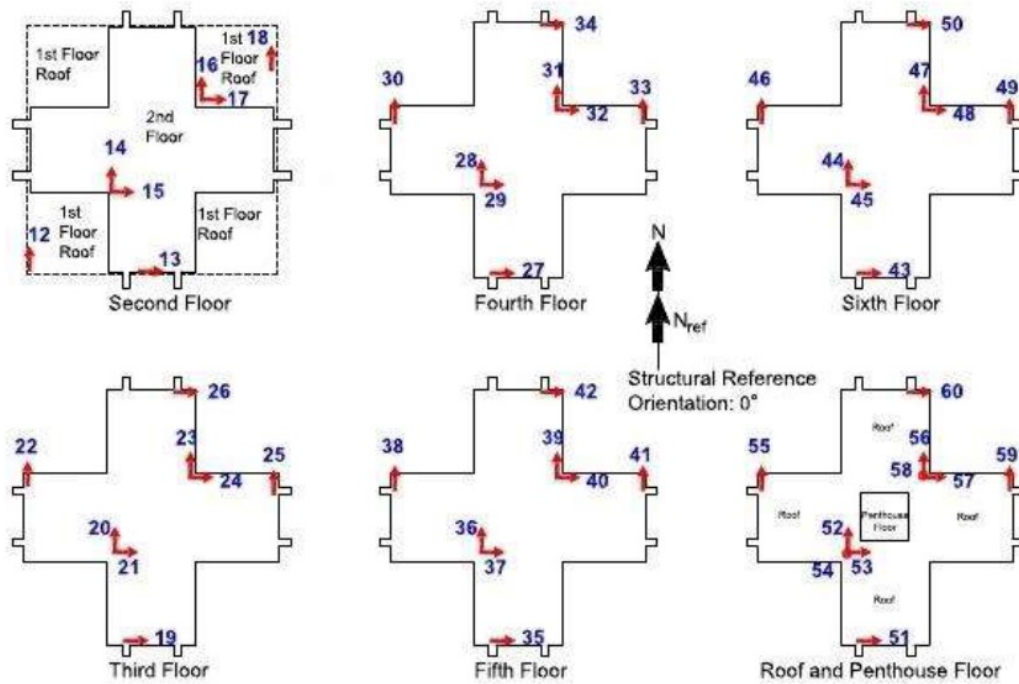
Εικόνα 20. (α.) Νοσοκομείο βετεράνων San Diego, (β.) Ενοργανωμένο προσομοίωμα κτιρίου

Το κεντρικό κτίριο του νοσοκομείου των βετεράνων στο San Diego της Καλιφόρνια απαρτίζεται από έναν πυρήνα στο κέντρο και τέσσερα περύγια. Κάθε περύγιο έχει πλάτος 48,16m, το μήκος του είναι 45,42m και το ύψος ορόφου είναι 5,18m. Το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου είναι 79.423 τετραγωνικά μέτρα.

Η ενοργάνωση έχει γίνει με 60 επιταχυνσιόμετρα κατανομημένα στους ορόφους του κτιρίου. Αυτά είναι επιταχυνσιόμετρα Force-balance, χρησιμοποιούνται σε έργα πολιτικού μηχανικού και μπορούν να μετρήσουν επιταχύνσεις πάνω από 4g. Έχοντας ρυθμιζόμενο πλήρους κλίμακας φάσμα καταγραφής από 0.2 έως 4 g, καθιστά κατάλληλο τον αισθητήρα για μέτρηση χαμηλής εντάσεως θορύβων περιβάλλοντος. Τα επιταχυνσιόμετρα είναι συνδεδεμένα ενσύρματα με μία IP 24-bit βασισμένη σε μία συσκευή ψηφιοποίησης που βρίσκεται στο κτίριο. Αυτή η συσκευή λειτουργεί είτε με συνεχή λειτουργία και καταγραφή των δεδομένων, είτε καταγράφοντας μόνο τη στιγμή του συμβάντος. Όλα τα κτίρια είναι καταρτισμένα με συσκευές μέτρησης και παρακολούθησης με παρόμοιο τρόπο. Τα επιταχυνσιόμετρα είναι μονίμως παραταγμένα στις θέσεις που αναμένεται η μετατόπιση, κυρίων δηλαδή στις γωνίες των ορόφων της κατασκευής.

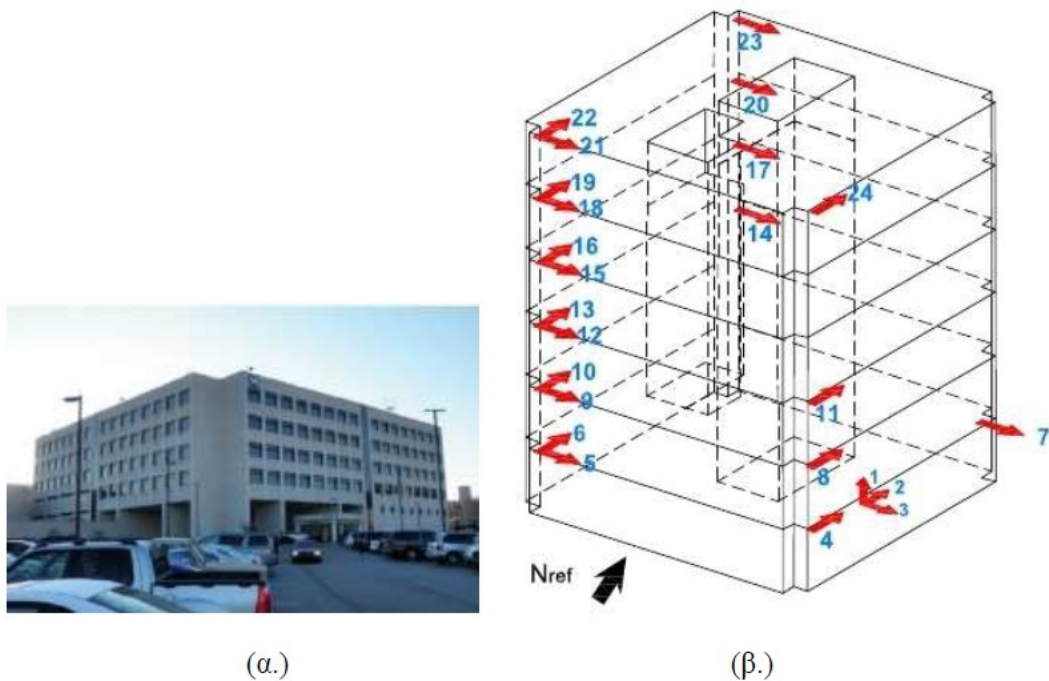
Σε κάθε κτίριο είναι τοποθετημένα τουλάχιστον 3 επιταχυνσιόμετρα, προσανατολισμένα οριζόντια και σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, ούτως ώστε να μπορούν να ανιχνεύσουν και να καταγράψουν οποιαδήποτε πιθανή μετατόπιση από τη θέση αναφοράς σε όλες τις κατευθύνσεις (Βορρά-Νότου και Ανατολής-Δύσης). Πιθανή περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα μετριέται από τις καταγραφές δύο επιταχυνσιόμετρων με διαφορετικές θέσεις και ίδια φορά. Επίσης κάθε κτίριο περιέχει στο ισόγειο ή υπόγειο έναν αισθητήρα ο οποίος μετρά την αλλαγή θέσεις και στις 3 κατευθύνσεις(x,y,z). Επίσης είναι τοποθετημένοι αισθητήρες και με κατακόρυφη φορά για

να υπολογίζουν την κίνηση και σε αυτό το επίπεδο. Παρακάτω παρατίθενται οι εικόνες με τις εντοπισμένες κατόψεις του κτιρίου και τις θέσεις των αισθητήρων.



Εικόνα 21. Κατόψεις οροφών με τις θέσεις των αισθητήρων

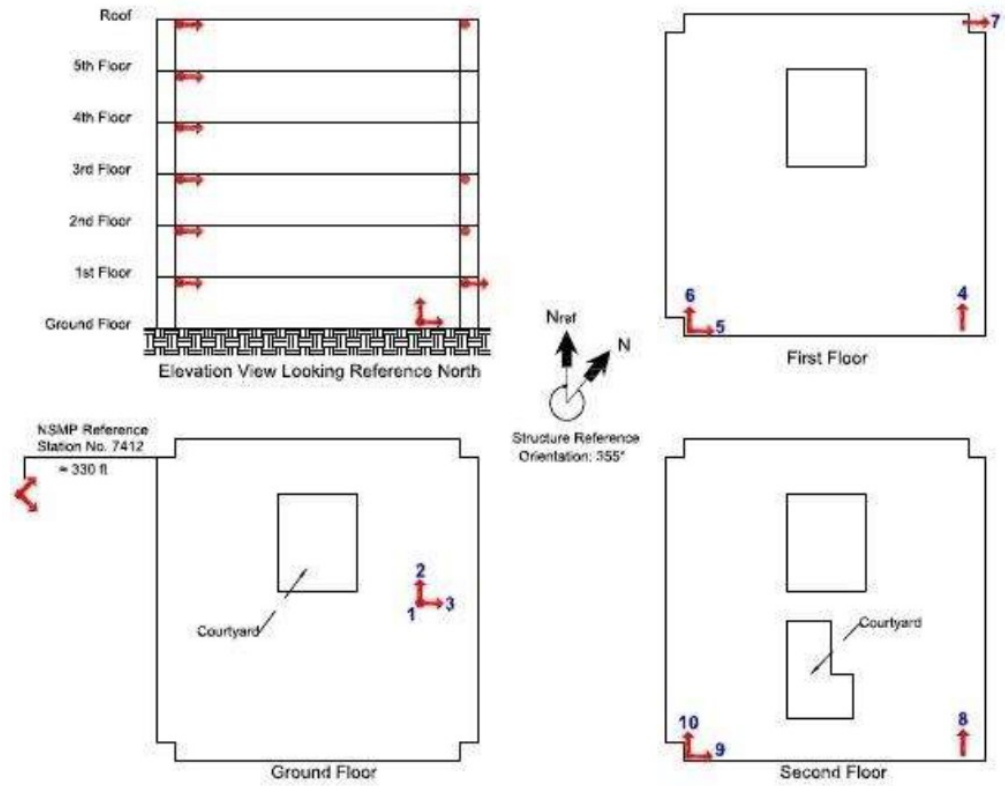
5.1.3 Νοσοκομείο βετεράνων στο Μέμφις του Τένεσι, κέντρο νοσηλείας



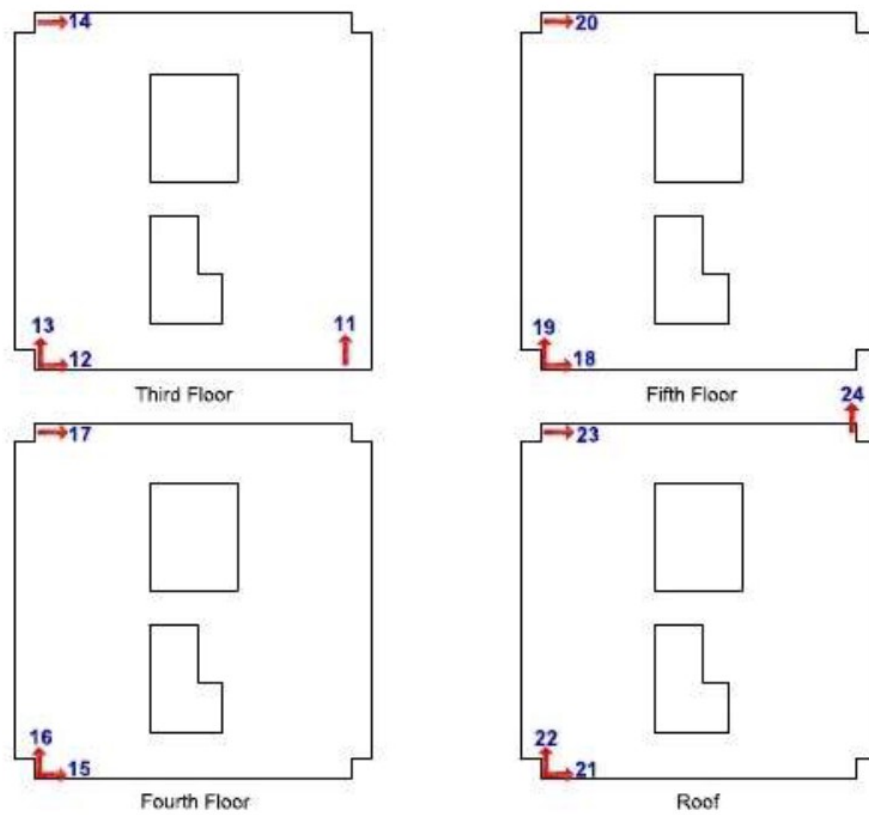
Εικόνα 22. (α) Νοσοκομείο βετεράνων Μέμφις Τένεσι, (β) Εντοπισμένο προσομοίωμα κτιρίου Μέμφις

Το κτίριο που θα εξετάσουμε είναι κέντρο νοσηλείας στο συγκρότημα του νοσοκομείου βετεράνων στη πόλη Μεμφίς στο Τενεσί. Αποτελείται από έξι ορόφους με συνολικό εμβαδόν 60.770 τετραγωνικά μέτρα. Το κτίριο είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και η κάτοψη του είναι ένα τετράγωνο κτίριο που στις γωνίες του υπάρχει εσωτερική εγκοπή. Στο κέντρο του κτιρίου υπάρχουν μία εσωτερική αυλή που ξεκινάει στο ισόγειο και μία η οποία ξεκινάει στον δεύτερο όροφο του κτιρίου. Ο σκελετός και τα τοιχώματα είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα για να αντιστέκονται σε κατακόρυφες και πλευρικές δυνάμεις.

Στο κτίριο έχουν τοποθετηθεί 24 επιταχυνσιόμετρα. Στο βάση του ισογείου της κατασκευής, είναι τοποθετημένο ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων το οποίο είναι σε θέση να καταγράφει την επιτάχυνση που αναπτύσσει το έδαφος και στις 3 διευθύνσεις (x , y , z). Τα επιταχυνσιόμετρα είναι τοποθετημένα στις γωνίες του κτιρίου, παράλληλα με τις πλευρές του. Στην οροφή του ισογείου είναι τοποθετημένα 4 επιταχυνσιόμετρα, στην οροφή του πρώτου ορόφου 3, στην οροφή του δεύτερου 4 για καταγραφή της απόκρισης του κτιρίου σε οριζόντια δύναμη και στις δύο διευθύνσεις, στην οροφή του τρίτου και τέταρτου ορόφου υπάρχουν 3 με ίδια διάταξη για την παρακολούθηση της κίνησης των πλακών και στην οροφή του πέμπτου ορόφου υπάρχουν 4 επιταχυνσιόμετρα για την μέτρηση της πλευρικής κίνησης της οροφής. Η στρέψη του ορόφου μπορεί να μετρηθεί από δύο όμοια προσανατολισμένα επιταχυνσιόμετρα που βρίσκονται στον ίδιο όροφο. Η σχετική μετακίνηση του ορόφου όπως και οι τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ορόφων προσδιορίζονται από επιταχυνσιόμετρα που βρίσκονται στην ίδια γωνία του κτιρίου και κατά μήκος του ίδιου οριζόντιου άξονα. Επίσης είναι τοποθετημένο σε μία κοντινή τοποθεσία ένα επιταχυνσιόμετρο αναφοράς, το οποίο είναι 3 αξόνων και καταγράφει την εδαφική κίνηση. Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να δούμε τις θέσεις των αισθητήρων πάνω στην κατασκευή.



Εικόνα 23. Όψεις και κατόψεις εντοργανωμένου κτιρίου Μεμφίς



Εικόνα 24. Εντοργανωμένες κατόψεις κτιρίου Μεμφίς

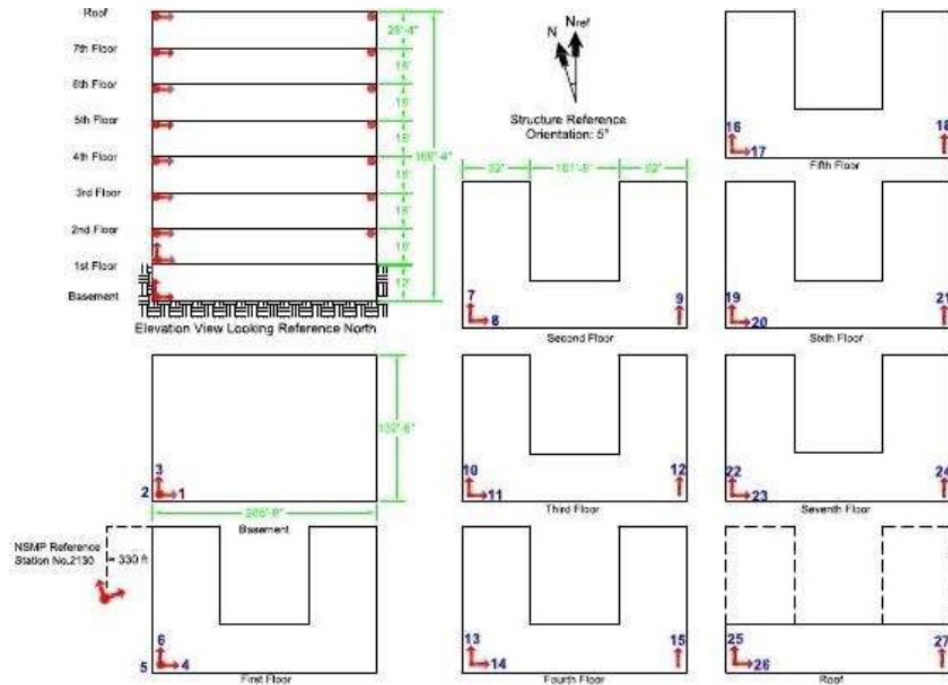
5.1.4 Νοσοκομείο βετεράνων στο Σιάτλ της Ουάσινγκτον, πτέρυγα διάγνωσης και θεραπείας



Εικόνα 25. Νοσοκομείο βετεράνων Σιάτλ

Η πτέρυγα διάγνωσης και θεραπείας του νοσοκομείου του Σιάτλ κατασκευάστηκε το 1981 και στη συνέχεια ανασκευάστηκε. Απαρτίζεται από ένα υπόγειο, 4 βασικούς ορόφους και έναν ενδιάμεσο όροφο μεταξύ των υπέργειων ορόφων. Το εμβαδόν της κατασκευής είναι 23.226m² ενώ μαζί με τους ενδιάμεσους ορόφους είναι 61.810m². Η κατασκευή είναι σύμμικτη με σκελετό από χάλυβα και πλάκες σκυροδέματος. Οι διαστάσεις της κατασκευής είναι 115m επί 55m και το ύψος μεταξύ των ορόφων είναι 5,5m ενώ το καθαρό ύψος είναι 3m.

Η ενοργάνωση του κτιρίου απαρτίζεται από 27 επιταχυνσιόμετρα. Υπάρχει ένας αισθητήρας επιτάχυνσης τριών αξόνων στο υπόγειο για να μπορέσει να μετρήσει την επιτάχυνση του εδάφους και στις 3 διευθύνσεις (x, y, z). Στους ορόφους είναι ομοίμορφα διατεταγμένα 21 επιταχυνσιόμετρα για καταγραφή των οριζόντιων κινήσεων. Η στροφή, οι τάσεις μεταξύ των ορόφων καθώς και οι σχετικές μετακινήσεις μπορούν να βρεθούν με τους υπάρχοντες αισθητήρες όπως αναλύθηκε στα παραπάνω παραδείγματα. Σε κοντινή τοποθεσία είναι τοποθετημένο και ένα επιταχυνσιόμετρο αναφοράς για την καταγραφή των επιταχύνσεων του εδάφους. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θέσεις των αισθητήρων στις κατόψεις και όψη της κατασκευής.



Εικόνα 26. Διάταξη αισθητήρων στο νοσοκομείο του Σιάτλ

5.1.5 Νοσοκομείο βετεράνων Marion, Illinois

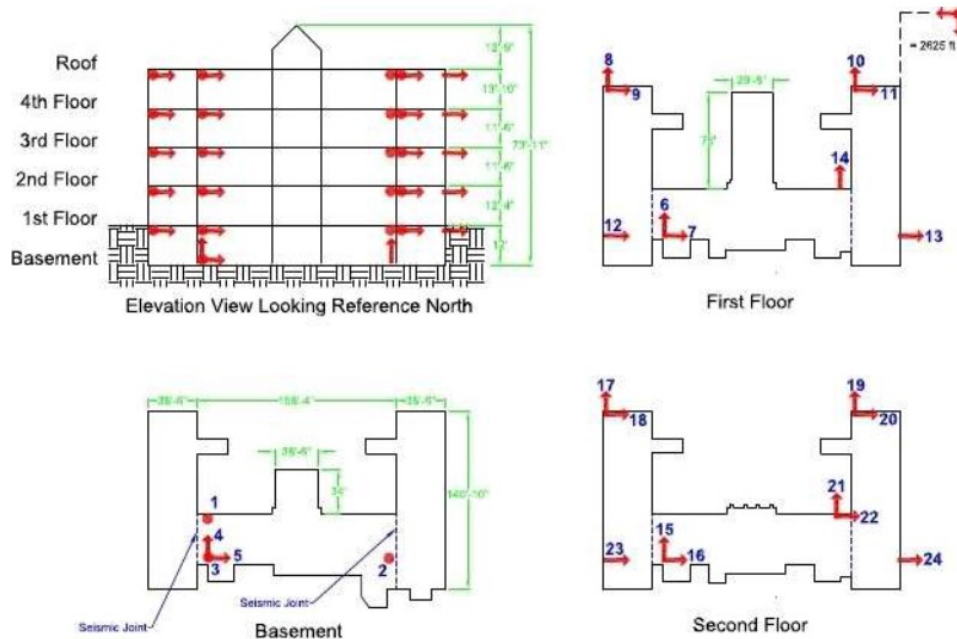


Εικόνα 27. Νοσοκομείο βετεράνων Marion Illinois

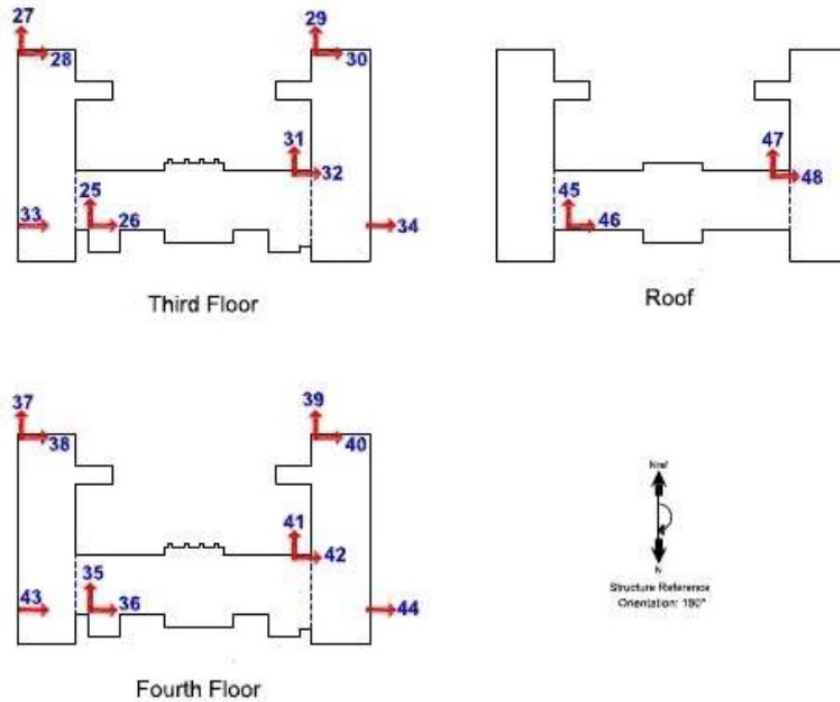
Το κεντρικό κτίριο του νοσοκομείου των βετεράνων στη πόλη Μάριον του Ιλινόις χτίστηκε το 1940, υποβλήθηκε σε ενισχύσεις το 1988 και είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το εμβαδόν του είναι περίπου 7.595m². Το σχήμα του κτιρίου

είναι ακανόνιστο, όπως μπορούμε να δούμε στις εικόνες παρακάτω, με ένα πυρήνα στο κέντρο, δύο φτερά δεξιά και αριστερά και μία προεξοχή στη μέση του κτιρίου. Οι διαστάσεις των περυγίων είναι περίπου 43m με 11,7m. Αποτελείται από τέσσερις ορόφους, ένα υπόγειο και ένα ρετιρέ. Το υπόγειο είναι 3,66m κάτω από το έδαφος και το ύψος των ορόφων είναι 3,76m του 1ου, 3,51m του 2ου και 3ου, 4,22m του 4ου και τέλος το ρετιρέ έχει ύψος 3,89m.

Το κτίριο είναι ενοργανωμένο με 48 επιταχυνσιόμετρα κατανομημένα στους ορόφους. Ένα επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων έχει τοποθετηθεί στη βάση της κατασκευής για να μπορεί να μετρά την επιτάχυνση του εδάφους. Στο υπόγειο είναι επίσης τοποθετημένα δύο επιταχυνσιόμετρα με κατακόρυφο προσανατολισμό τα οποία μπορούν να μετρήσουν την ταλάντωση του κτιρίου. Δεκαεννέα επιταχυνσιόμετρα είναι τοποθετημένα στο κεντρικό τμήμα των ορόφων για να μετρήσουν και να υπολογίσουν τις μετακινήσεις και στρέψη. Η στρέψη, οι σχετικές μετακινήσεις και οι τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ορόφων υπολογίζονται όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω παραδείγματα. Ένα επιταχυνσιόμετρο αναφοράς βρίσκεται σε ελεύθερο πεδίο κοντά στη κατασκευή για την καταγραφή των επιταχύνσεων του εδάφους. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται τα ενοργανωμένα σχέδια της κατασκευής.



Εικόνα 23. Ενοργανωμένες κατόψεις και τομή νοσοκομείου Marion



Εικόνα 28. Ενοργανωμένες κατόψεις νοσοκομείου Marion

5.2 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας κτιρίου επιστήμης και μηχανικής στο πανεπιστήμιο της Νεβάδα στο Λας Βέγκας

Η απόφαση για ενοργάνωση και παρακολούθηση της δομικής υγείας του κτιρίου επιστήμης και μηχανικής στο πανεπιστήμιο της Νεβάδα, μίας από τις πιο σεισμογενείς πολιτείες των Ηνωμένων Πολιτειών, πάρθηκε από το Γεωλογικό Ερευνητικό κέντρο των Η.Π.Α σε συνεργασία με το τμήμα μηχανικών του πανεπιστημίου έτσι ώστε να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο η κατάσταση της κατασκευής.



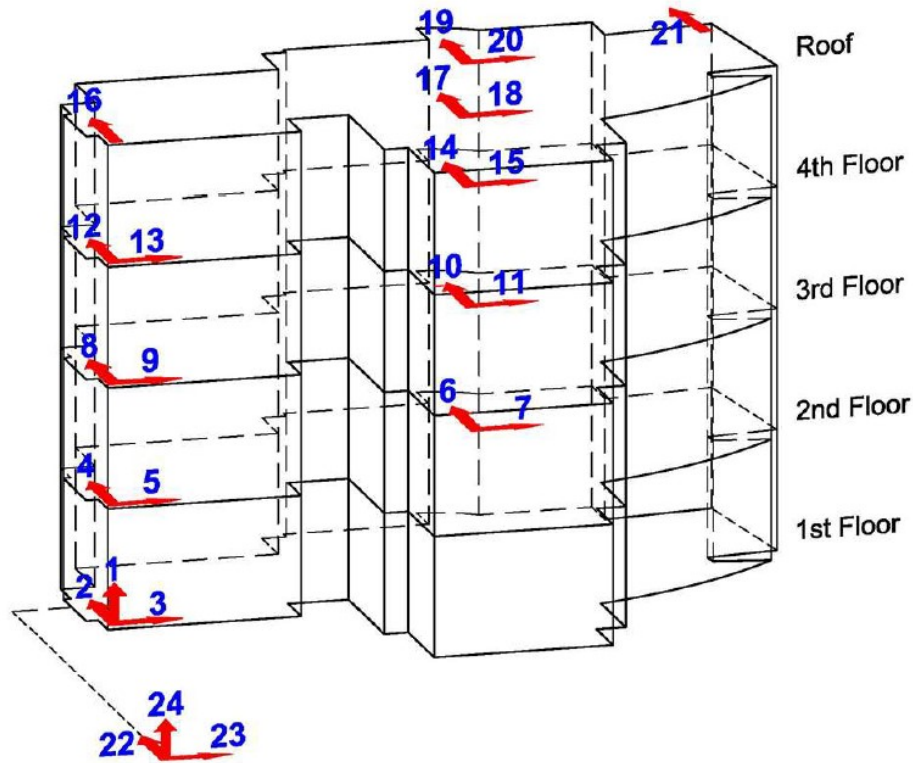
Εικόνα 29. Κτίριο επιστήμης και μηχανικής του πανεπιστημίου της Νεβάδας κατόψεις νοσοκομείου Marion

5.2.1 Γενικά

Το κτίριο αυτό είναι το πρώτο στο οποίο εφαρμόστηκε το σύστημα αυτό στο Λας Βέγκας και ως αποτέλεσμα έχει τα στοιχεία που καταγράφονται από τους αισθητήρες να δίνουν δεδομένα τα οποία θα βοηθήσουν στην κατανόηση της επιρροής μιας σεισμικής δόνησης στη δομή και αυτό κατά συνέπεια οδηγεί στην έγκαιρη εκτίμηση της κατάστασης της κατασκευής καθώς επίσης και στη συλλογή πληροφοριών για να σχεδιάζονται ασφαλέστερα οι κατασκευές στο μέλλον. Το κτίριο αυτό είναι το πρώτο κτίριο φιλικό προς το περιβάλλον το οποίο παρακολουθείται με σύστημα αισθητήρων για τη δομική του επάρκεια. Σκοπός λοιπόν αυτής της εφαρμογής είναι να βελτιωθεί ο σχεδιασμός και κατά συνέπεια η κατασκευή των κτιρίων τα οποία είναι φτιαγμένα με γνώμονα το περιβάλλον, ούτως ώστε να αντέχουν τις δυνάμεις που τους ασκεί ένας πιθανός σεισμός.

5.2.2 Σύστημα αισθητήρων

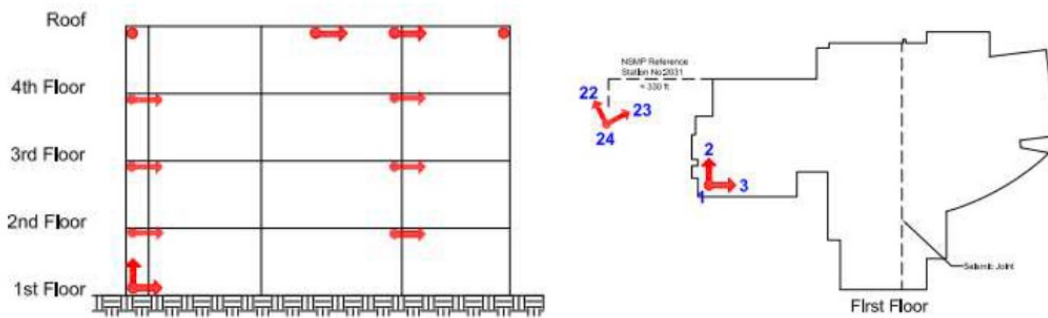
Το σύστημα αισθητήρων που έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή είναι από τα πιο προηγμένα. Έχουν εγκατασταθεί είκοσι ένας αισθητήρες κίνησης, όπως μπορούμε να δούμε και στη παρακάτω εικόνα, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στα σημεία των ορόφων στα οποία περιμένουμε να έχει η κατασκευή τη μέγιστη λόγω σεισμού ταλάντωση. Στο κάθε όροφο έχουν τοποθετηθεί τουλάχιστον δύο αισθητήρες, με τρόπο ώστε να μπορεί να μετρηθεί η όποια μετακίνηση και στις δύο διευθύνσεις (Βορρα-Νότου, Ανατολής-Δύσης). Στο ισόγειο έχουν τοποθετηθεί και τριαξονικοί αισθητήρες οι οποίοι αποτελούνται από τρεις κάθετους μεταξύ τους ανιχνευτές κίνησης και μπορούν να υπολογίσουν τη κίνηση κατά x, y, z. Η περιστροφή της κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί από δύο αισθητήρες που έχουν ίδια φορά αλλά είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικό σημείο.



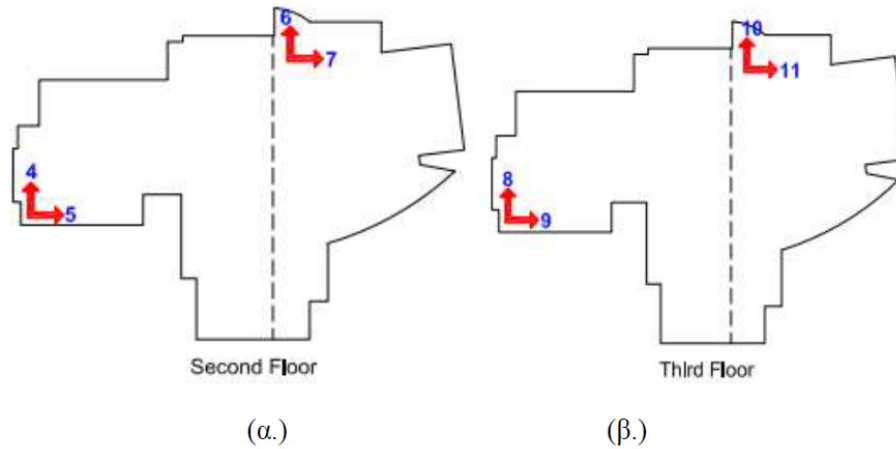
Εικόνα 30. Εννοργανωμένο προσομοίωμα του κτιρίου

Επί της ουσίας οι αισθητήρες μπορούν να εντοπίσουν:

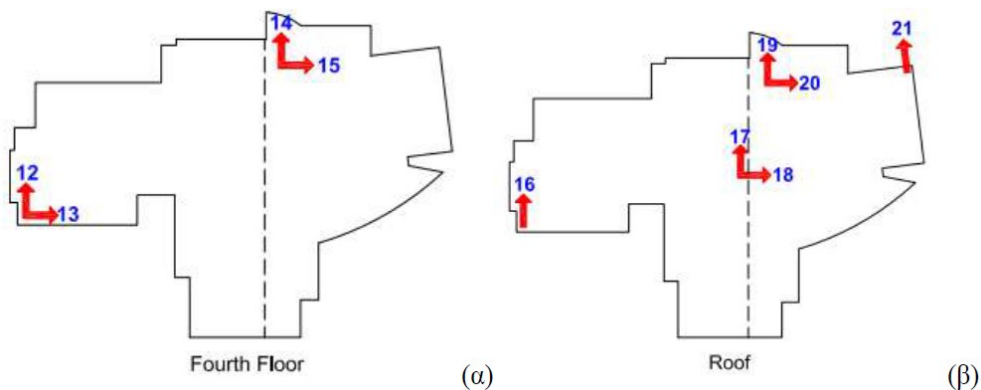
- Ταλάντωση και περιστροφή
- Το χρόνο που απαιτείται έως ότου το σεισμικό κύμα φτάσει από τη βάση στη κορυφή
- Πως διαμορφώνεται το πλαίσιο της κατασκευής κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης, δηλαδή τις ιδιομορφές ταλάντωσης.



Εικόνα 31. (α) Ενοργανωμένη όψη κτιρίου, (β) Ενοργανωμένη κάτοψη 1ου ορόφου



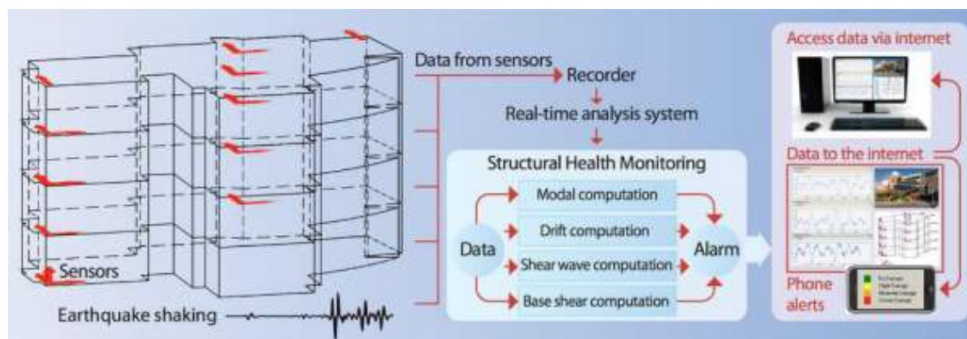
Εικόνα 32. (α) Ενοργανωμένη κάτοψη 2ου ορόφου, (β) Ενοργανωμένη κάτοψη τρίτου ορόφου



Εικόνα 33. (α) Ενοργανωμένη κάτοψη 4ου ορόφου, (β) Ενοργανωμένη κάτοψη οροφής κτιρίου

5.2.3 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας και εντοπισμός βλάβης

Η ανάγκη για παρακολούθηση μίας σημαντικής κατασκευής σε πραγματικό χρόνο είναι επιτακτική για την αξιολόγηση της. Έτσι η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή ενός ανοιχτού κώδικα που εφαρμόζεται επί τόπου στο σύστημα ανάλυσης δεδομένων. Σύμφωνα με αυτό, παρέχονται πληροφορίες σχετικές με τις μετακινήσεις και τις παραμορφώσεις που υφίσταται η κατασκευή κατά τη διάρκεια του σεισμού. Ανεξάρτητοι αλγόριθμοι ελέγχουν τα χαρακτηριστικά της δομής για μεταβολές που υποδεικνύουν βλάβη και δίνουν χρήσιμα δεδομένα για την εκτίμηση της κατάστασης της δομής από τους μηχανικούς αλλά και σε καθηγητές και φοιτητές για μελέτη και έρευνα πάνω στο αντικείμενο αυτό.



Εικόνα 34. Σχηματική απεικόνιση συστήματος παρακολούθησης κατασκευής

5.3 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας στην Εγνατίας οδό.

5.3.1 Εισαγωγή

Η επιλογή για ενοργάνωση της συγκεκριμένης γέφυρας έγινε λόγω του ότι είναι ένα έργο με δομή αντιπροσωπευτική ως προς τα έργα Ελληνικής οδοποιίας και μέσω αυτού μπορούν να προκύψουν πληροφορίες σημαντικές για την κατανόηση της συμπεριφοράς αλλά και για τον μελλοντικό σχεδιασμό αντίστοιχων έργων.

Ως προς την δομή της είναι κατασκευασμένη ως δύο ανεξάρτητες γέφυρες ανά κατεύθυνση, πανομοιότυπες όμως μεταξύ τους. Το σύστημα παρακολούθησης τοποθετήθηκε στο ένα από τα δύο τμήματα.



(α.)

(β.)

Εικόνα 35. (α) Όψη της 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας, (β) κάτωψη της 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας

5.3.2 Χαρακτηριστικά γέφυρας

Η 2η χαραδρογέφυρα της παράκαμψης Καβάλας, βρίσκεται στην Εγνατία οδό και έχει μήκος 180m. Η γέφυρα αποτελείται από τέσσερα ανοίγματα (στηρίζονται σε δύο ακρόβαθρα και τρία μεσόβαθρα) και το κάθε άνοιγμα αποτελείται από τέσσερις προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς (μήκοςx0,45). Οι δοκοί στηρίζονται με ελαστομεταλλικά εφένδρανα στις κεφαλές των μεσόβαθρων και ακρόβαθρων. Η πλάκα που συνδέει τα ανοίγματα είναι συνεχής, επι τόπου σκυροδοτούμενη χωρίς αρμό στα μεσόβαθρα και με ελαστομεταλλικό αρμό στις περιοχές πριν τα ακρόβαθρα. Στις δοκούς των μεσόβαθρων υπάρχουν σεισμικοί σύνδεσμοι που ενεργοποιούνται με υπέρβαση της σεισμικής δράσης σχεδιασμού. Η θεμελίωση των μεσόβαθρων γίνεται με φρέατα στο βραχώδες υπόβαθρο.

5.3.3 Ενοργάνωση με σύστημα αισθητήρων

Η ενοργάνωση έγινε με κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης της κατασκευής το οποίο εγκαταστάθηκε το 2005. Οι παράμετροι καθορίστηκαν από την Εγνατία Οδό σε συνεργασία με το ινστιτούτο τεχνικής σεισμολογίας και αντισεισμικών κατασκευών και αποτελούνται από 4 καταγραφικές μονάδες με δυνατότητα υποστήριξης 12 αισθητήρων (Επιταχυνσιόμετρα Episenso) η κάθε μία δηλαδή με συνεργασία του συστήματος παρέχονται 48 αισθητήρων. Τα αποτελέσματα δίνονται σε γραφικές απεικονίσεις κυματομορφής. Η έναρξη καταγραφής των επιταχυνσιογράφων γίνεται είτε δίνοντας εντολή οι διαχειριστές αλλά και με οποιαδήποτε διέγερση μεγαλύτερη των προκαθορισμένων τιμών. Παρέχουν επίσης την δυνατότητα τηλεματικής παρακολούθησης της κατάστασης του συστήματος καθώς και εφαρμογής ρυθμίσεων σε αυτό καθώς είναι καταρτισμένο με GPS και modem κινητής τηλεφωνίας (GSM/GPRS).



(α.)



(β.)

Εικόνα 36. (α) Καταγραφική μονάδα, πίνακας ρευματοληψίας και κεραία GPS (β) Καταγραφική μονάδα και προστατευτικό πλαίσιο



(α.)



(β.)

Εικόνα 37. (α) Ρευματοδοτηση και αισθητήρας. (β) Πλατφόρμα για πρόσβαση στη κορυφή του πυλώνα

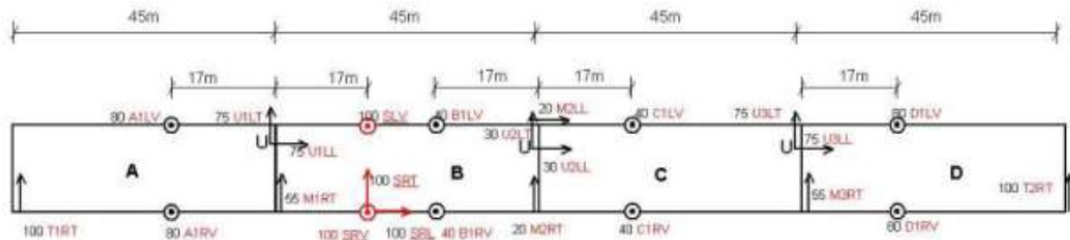


Εικόνα 38. Εσωτερικό πλατφόρμας

Παράλληλα με τις έρευνες έγινε και η υλοποίηση κάποιων έργων υποδομής για την ενοργάνωση τα οποία ήταν η δημιουργία προστατευτικών μεταλλικών κλωβών για τα συστήματα καταγραφής, η δημιουργία θέσεων ρευματοληψίας καθώς επίσης κατασκευάστηκαν 3 μεταλλικές πλατφόρμες που καθιστούν δυνατή την πρόσβαση από το επίπεδο του οδοστρώματος στη κορυφή κάθε πυλώνα. Αυτή η κατασκευή έγινε λόγω της

ανάγκης για πρόσβαση και παρακολούθηση των θέσεων στήριξης των κύριων δοκών στις κεφαλές των βάθρων. Μετά από έρευνες αποφασίστηκε επαρκής η χρήση 24 αισθητήρων (2 καταγραφείς Kinematics K2).

Η εγκατάσταση της καταγραφικής μονάδας έγινε στο μέσο του ανοίγματος και σε κάθε πλευρά. Στη μία πλευρά πάνω στο πεζοδρόμιο ενώ στην άλλη που δεν υπήρχε, έγινε στο πίσω μέρος του διαχωριστικού στο ίδιο ύψος. Αισθητήρας, όπως προαναφέρθηκε, τοποθετήθηκαν και στις κεφαλές των μεσοβάθρων για παρακολούθηση της λειτουργίας των ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Όλοι οι αισθητήρες καλύφθηκαν με πλαστικό λόγω των δύσκολων συνθηκών που επικρατούν τη χειμερινή περίοδο στην περιοχή. Επίσης έχει τοποθετηθεί μετρητής θερμοκρασίας ώστε να καταγράφεται ανά πάσα στιγμή. Οι συσκευές συνδέθηκαν μεταξύ τους με ενσύρματη μορφή σύνδεσης ώστε η καταγραφή των αισθητήρων να γίνεται με κοινή εκκίνηση. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ενοργάνωσης της γέφυρας.

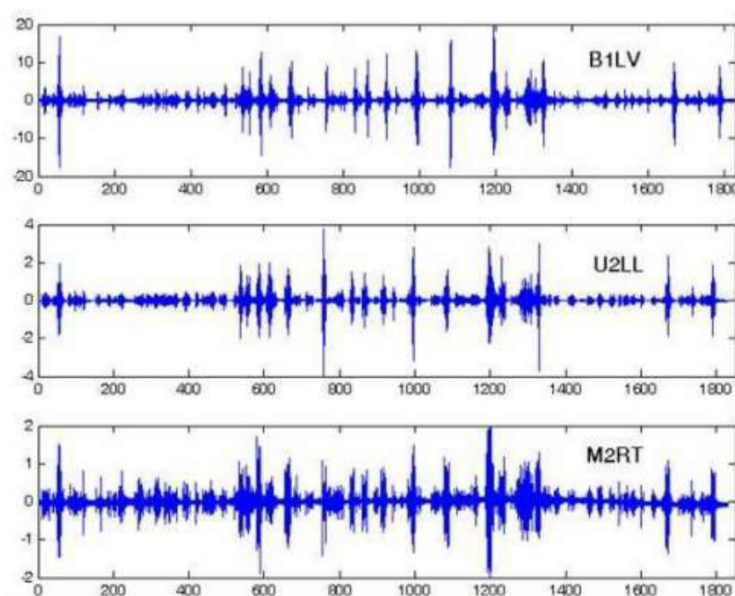


Εικόνα 39. Σχηματική απεικόνιση διάταξης αισθητήρων

5.3.4 Δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής

Από τα δεδομένα που καταγράφηκαν από το σύστημα των αισθητήρων και με ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού οι υπεύθυνοι παρακολούθησης της δομής μπορούν να εντοπίσουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής. Τα στοιχεία που προκύπτουν από την ανάλυση και είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό της δομικής κατάστασης της κατασκευής είναι οι ιδιοσυχνότητες, ο συντελεστής απόσβεσης και οι ιδιομορφές ταλάντωσης της κατασκευής στα κρίσιμα σημεία της.

Με κατάλληλη μεθοδολογία του λογισμικού μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα στις ταλαντώσεις που προέρχονται από λειτουργικά φορτία και σε αυτές που προέρχονται από σεισμικά φορτία. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα στοιχεία 3 επιταχυνσιογράφων που είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία στη δομή.



Εικόνα 40. Αποτελέσματα τριών επιταχυνσιογράφων από διαφορετικά σημεία

Οι χρονιοιστορίες απόκρισης της παραπάνω εικόνας, αναλύθηκαν με το λογισμικό που αναλύσαμε προηγουμένως για τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά τους και ως αποτέλεσμα δόθηκε η αναγνώριση βασικών ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και συντελεστών απόσβεσης όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

No	Τύπος Ιδιομορφών	Καταγραφή	Καταγραφή	Αναλυτικό μοντέλο
		Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
1	1 ^η εγκάρσια	0.81	2.6	0.55
2	1 ^η διαμήκης	1.29	4.8	0.59
3	2 ^η εγκάρσια	1.61	3.8	0.69
4	3 ^η εγκάρσια	2.36	0.88	1.24
5	1 ^η καμπτική (deck)	3.41	1.00	2.79
6	2 ^η καμπτική (deck)	3.46	0.98	2.85
7	3 ^η καμπτική (deck)	3.51	0.96	2.87

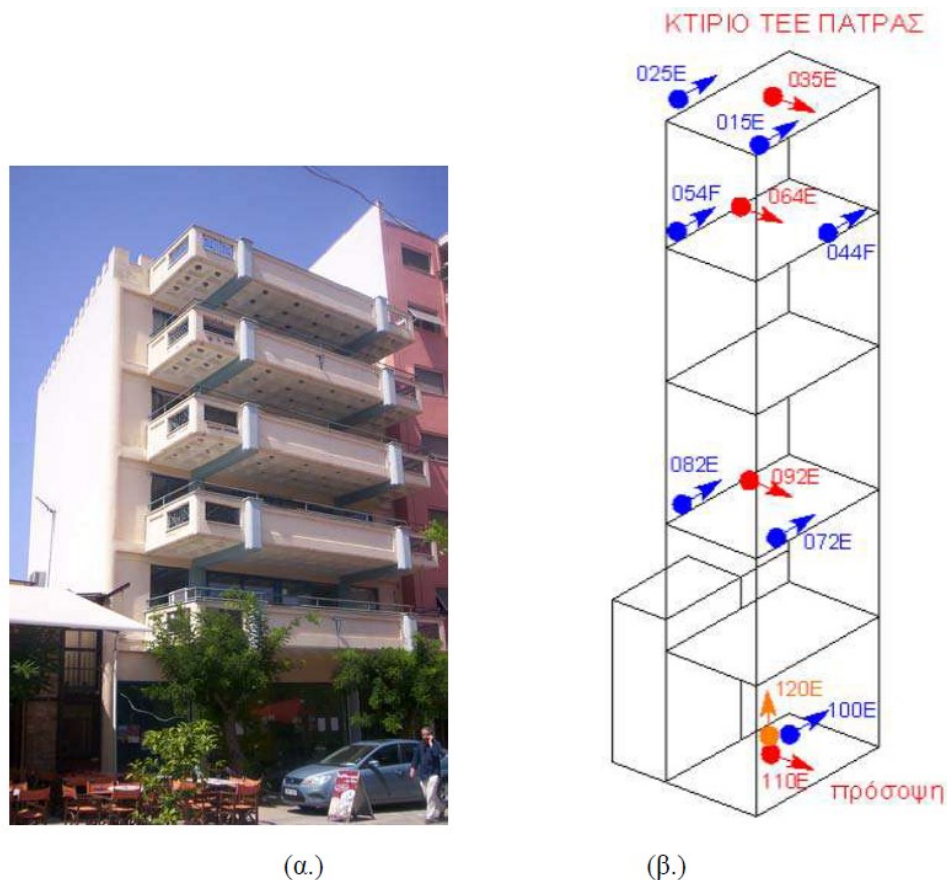
Εικόνα 41. Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων που λήφθηκαν από τα επιταχυνσιόμετρα

5.3.5 Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος

Ως συμπέρασμα, προέκυψε ότι το αναλυτικό μοντέλο, το οποίο προέκυψε από προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων διαφέρει αισθητά από τα στοιχεία που καταγράφηκαν στην πραγματική κατασκευή. Αυτό καθιστά απαραίτητη την παρακολούθηση της δομικής υγείας των κατασκευών λόγω της εκτεταμένης πληροφόρησης που προκύπτει από αυτή και καθιστά την λειτουργία ασφαλέστερη όπως επίσης συμβάλει στην πληρέστερη μελέτη και σχεδιασμό μελλοντικών κατασκευών αυτού του τύπου.

5.4 Ενοργάνωση πενταώροφου κτιρίου ΤΕΕ Πάτρας

5.4.1 Γενικά



Εικόνα 42. (α) Κτίριο ΤΕΕ Πάτρας, (β) Ενοργανωμένο προσομοίωμα κατασκευής

Στο παραπάνω κτίριο στεγάζεται το κτίριο του ΤΕΕ στην πάτρα. Αμέσως μετά τον κύριο σεισμό της 8ης Ιουνίου 2008, από το ΙΤΣΑΚ επιλέχθηκε να ενοργανωθεί πενταώροφο κτίριο οπλισμένου σκυροδέματος του οποίου η μελέτη έγινε 1992. Επιλέχθηκε να τοποθετηθούν 12 αισθητήρες οι οποίοι είναι μοναξονικά επιταχυνσιόμετρα, εύρους $\pm 4g$, συνδεδεμένα μεταξύ τους με καλώδιο στη κεντρική μονάδα καταγραφής δεδομένων (Kinematics, τύπου K2). Το σύστημα είναι κοινής εκκίνησης, κοινού χρόνου και το επίπεδο διέγερσης για ενεργοποίηση των αισθητήρων είναι ρυθμιζόμενο. Στο έδαφος είναι τοποθετημένοι 3 αισθητήρες στις 3 κατευθύνσεις ώστε να μετρούν τις 3 εδαφικές σεισμικές συνιστώσες.

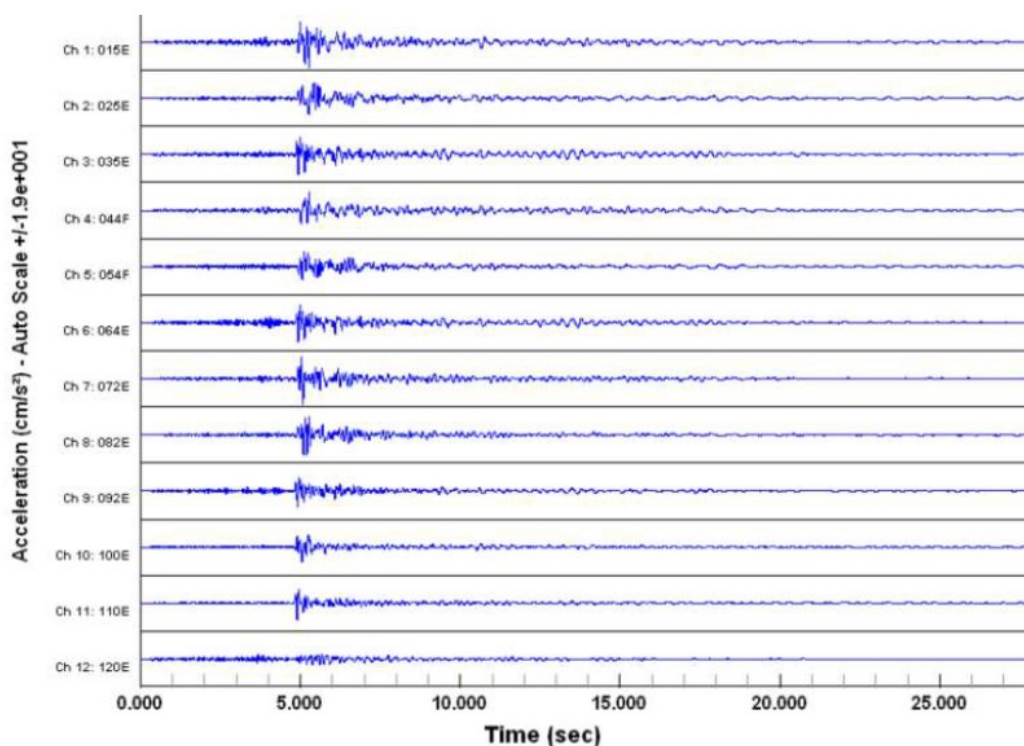
Το όνομα των επιταχυνσιόμετρων διαμορφώνεται ως εξής: τα δύο πρώτα ψηφία δείχνουν τον αριθμό του καναλιού, το επόμενο τον όροφο και το γράμμα στο τέλος δείχνει τον τύπο του αισθητήρα, όπου E=Episensor και F=Force-Balanced.

5.4.2 Διάταξη αισθητήρων

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η διάταξη των αισθητήρων, οι οποίοι είναι επιταχυνσιόμετρα και τα βέλη δείχνουν τη θετική φορά μέτρησης. Η φορά μέτρησης είναι σημαντική ώστε να γίνει σωστά ο υπολογισμός των ιδιομορφών ταλάντωσης. Στη παρακάτω εικόνα αναπτύσσονται οι επιταχύνσεις που προέρχονται από τους αισθητήρες επιτάχυνσης από μία σεισμική διέγερση.

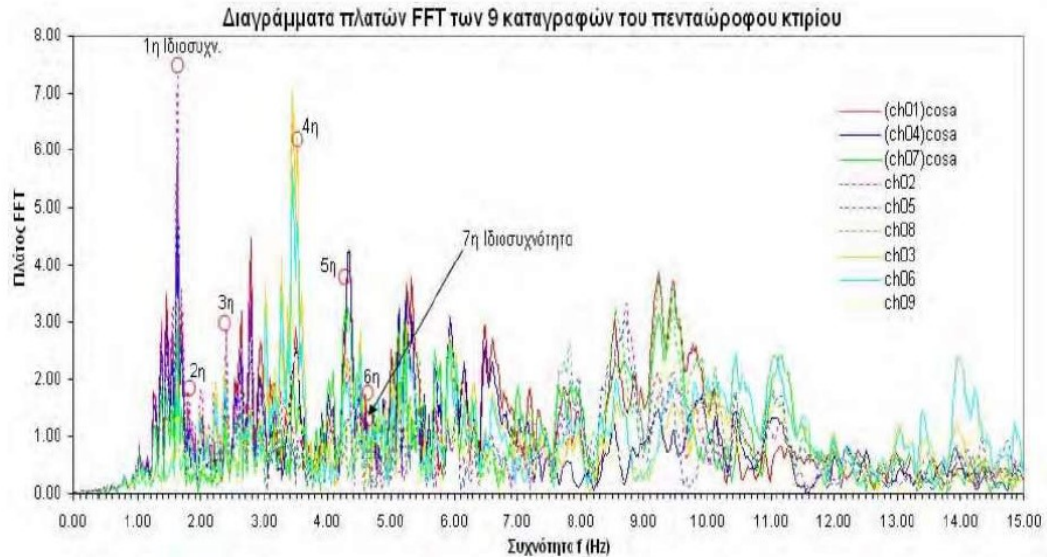
5.4.3 Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ταλάντωσης κτιρίου

Παρακάτω προσδιορίζονται οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής καθώς και οι ιδιομορφές ταλάντωσης του κτιρίου όπως προέκυψαν τις επιταχύνσεις που αναπτύχθηκαν από μία σεισμική διέγερση που επηρέασε την κατασκευή. Αυτά τα αποτελέσματα καθιστούν ευκολότερη την κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής καθώς επίσης συντελούν στη ακριβέστερη μελέτη προσομοίωσης της κατασκευής.



Εικόνα 43. Αποτελέσματα επιταχυνσιόμετρων από σεισμική δόνηση

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι ιδιομορφές με την παρεμβολή του θορύβου, ενώ στον πίνακα εμφανίζονται οι τελικές τους τιμές.



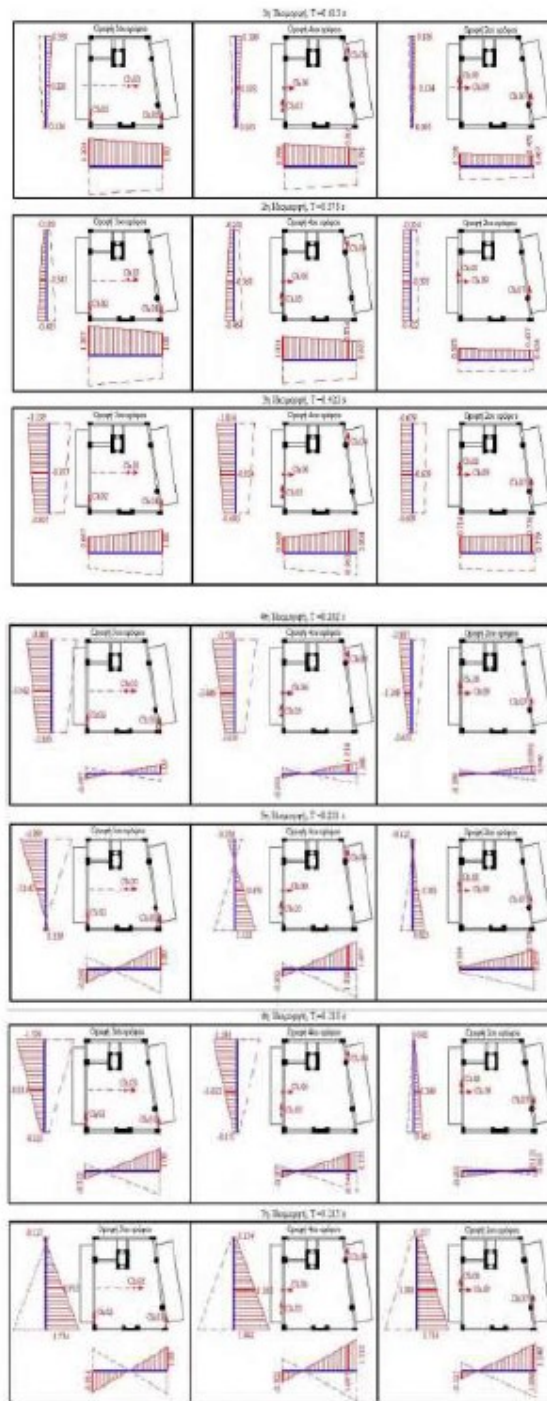
Εικόνα 44. Διαγράμματα για τις 9 καταγραφές επιταχύνσεων και εντοπισμός 7 ιδιοσυχνοτήτων κτίριου

T=	0.613	0.578	0.422	0.282	0.231	0.218	0.215	s
f=	1.63	1.73	2.37	3.54	4.32	4.59	4.66	Hz
$\omega=$	10.242	10.870	14.891	22.242	27.143	28.840	29.280	rad/s

	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7
φ_{09}	0.134	-0.393	-0.639	-1.249	0.301	0.249	1.086
φ_{08}	0.558	0.503	0.714	-0.399	0.104	-0.201	-0.327
φ_{07}	0.470	0.437	0.776	0.892	0.829	0.151	1.086
φ_{06}	0.193	-0.368	-0.824	-2.446	0.476	-0.632	1.162
φ_{05}	0.996	1.031	0.668	-0.583	-0.300	-0.203	-0.502
φ_{04}	0.816	0.834	0.963	1.114	1.024	0.744	1.097
φ_{03}	0.228	-0.347	-0.957	-3.142	0.545	-0.814	0.915
φ_{02}	1.204	1.307	0.667	-0.697	-0.568	-0.312	-0.914
φ_{01}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Εικόνα 45. Ιδιοπερίοδοι, ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές

Στη συνέχεια με κατάλληλη επεξεργασία έγινε ο προσδιορισμός των σημαντικότερων πραγματικών ιδιομορφών ταλάντωσης για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση που δέχτηκε το κτίριο του TEE στη πάτρα. Το αποτέλεσμα προέκυψε ήταν οι 7 σημαντικότερες ιδιομορφές ταλάντωσης όπως παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 46. Επτά πρώτες ιδιομορφές κτιρίου TEE

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από το πρόγραμμα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας, έγινε ανάλυση της κατασκευής με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

5.4.4 Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος

Με το σύστημα παρακολούθησης της δομικής υγείας του πεντάροφου, κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα, κτιρίου του ΤΕΕ στην Πάτρα, συλλέχτηκαν όλα τα απαιτούμενα στοιχεία για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων, ιδιοπεριόδων και ιδιομορφών της κατασκευής από την μέτρηση των στοιχείων των επιταχυνσιογράφων για την αποτίμηση της κατάστασης της κατασκευής μέσω στατικών προγραμμάτων.

Τα παραδείγματα καταγραφών που έχουν αναλυθεί παραπάνω, είναι από τον σεισμό της 8^{ης} Ιουνίου του 2008 στην περιοχή Αχαΐας-Ηλείας. Προσδιορίστηκε ο τρόπος ενοργάνωσης της κατασκευής και οι προδιαγραφές τις οποίες έπρεπε να πληροί το σύστημα. Στη συνέχεια έγινε συλλογή των καταγραφών των αισθητήρων και βρέθηκαν οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές ταλάντωσης για την προσομοίωση της κατασκευής με πρόγραμμα για μελέτη της στατικής της επάρκειας.

Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αναλυθεί οποιαδήποτε στιγμή και σε οποιαδήποτε φόρτιση η κατάσταση της κατασκευής και να προσδιοριστεί η κατάσταση στην οποία βρίσκεται και κατά συνέπεια η ικανότητα της να λειτουργεί με ασφάλεια.

5.5 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας του τείχους της ακρόπολης

5.5.1 Εισαγωγή

Τα τείχη της Ακρόπολης αποτελούν σπουδαίο έργο της πολιτιστικής μας κληρονομιάς και η παρακολούθηση για την διασφάλιση της δομικής υγείας του μνημείου κρίνεται απαραίτητη λόγω των σοβαρών ζημιών τις οποίες έχει υποστεί κατά καιρούς από ανθρώπινες επεμβάσεις και φυσικές καταστροφές, καθώς επίσης και την έκθεση του σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Κρίθηκε λοιπόν σωστό, για την διασφάλιση της ακεραιότητας του, να παρακολουθείται με ένα δίκτυο αισθητήρων οπτικών ινών οι οποίοι είναι σε θέση να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο τη κατασκευή και εν συνεχεία να γίνεται αξιολόγηση της κατάστασης από ειδικούς.

5.5.2 Ενοργάνωση και παρακολούθηση δομικής συμπεριφοράς



(α.)

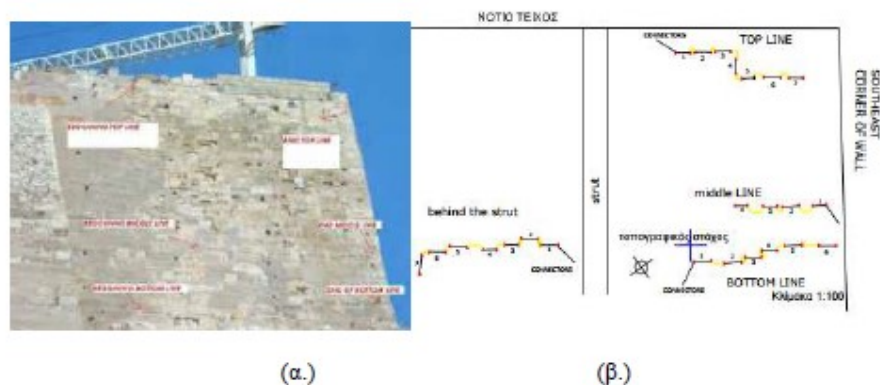
(β.)

Εικόνα 47. (α) & (β) Αγκύρωση αισθητήρα παραμόρφωσης

Λόγω της εμφανής ρηγματώσης των τειχών αλλά και του κινδύνου για επέκταση των ρωγμών επιλέχθηκαν αισθητήρες τύπου Fiber Bragg Gratings και τεχνολογίας SmartRod ο οποίος είναι ένας αισθητήρας συνδεδεμένος με μια ράβδο και μπορεί είτε να συνδεθεί στην επιφάνεια μιας κατασκευής ή να ενσωματωθεί σ' αυτή. Οι εργασίες που έγιναν για την εγκατάσταση των αισθητήρων έγιναν με τρόπο ώστε να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα του τείχους. Η στερέωση των αισθητήρων έγινε με βλήτρα από ανοξείδωτο χάλυβα και στερεώνεται ξεχωριστά με δύο αγκυρόπλακες και ανοξείδωτα αγκύρια. Σε κάποια σημεία δεν ήταν δυνατή η διάτρηση του τείχους λόγω προβλημάτων στην περιοχή (σαθρό ή πολύ σκληρό).

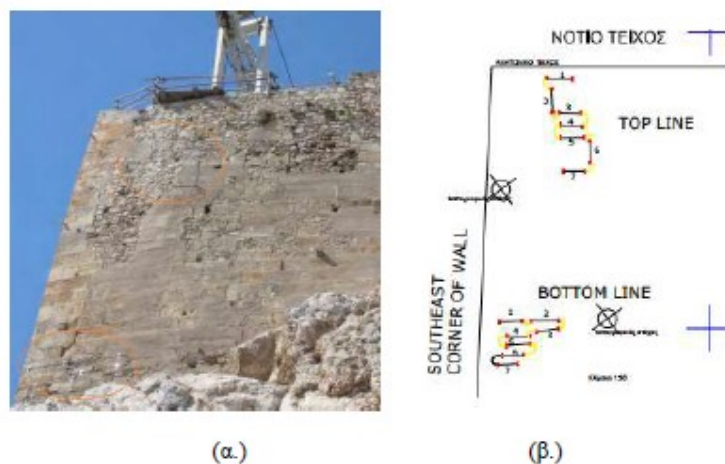
ΝΟΤΙΟ ΤΕΙΧΟΣ

Τα χαρακτηριστικά του νότιου τείχους είναι το πλάτος στη βάση 5-6m, στην κορυφή 1-1,5m και το ύψος του 10-20m. Σ' αυτό τοποθετήθηκαν τέσσερις σειρές smartrods.



Εικόνα 48. Διάταξη αισθητήρων νότιας όψης τείχους ακρόπολης

ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΤΕΙΧΟΣ

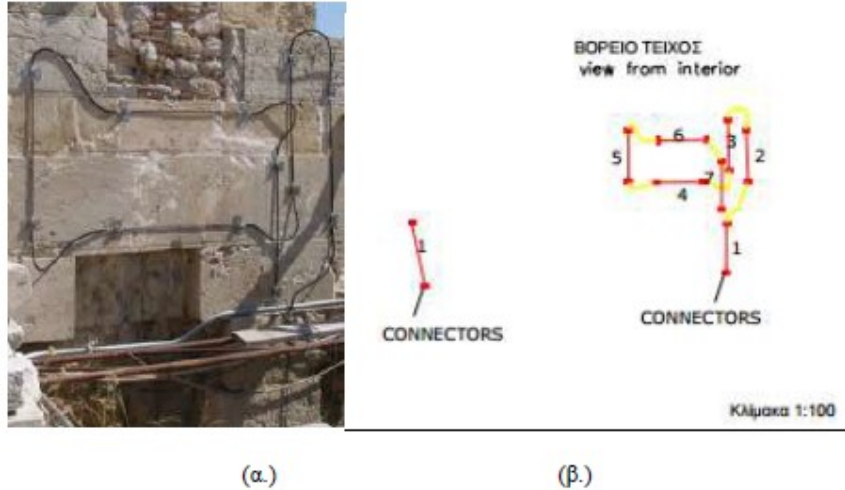


Εικόνα 49. Διάταξη αισθητήρων ανατολικής όψης τείχους της ακρόπολης

Στο Ανατολικό Τείχος υπάρχει κύρτωση προς τα έξω της εξωτερικής επιφάνειας του. Ο αισθητήρας αποδείχθηκε ιδανικός λόγω της ευκαμψίας του, έχοντας την δυνατότητα να πλαισιώσει ιδανικά το καμπύλο τμήμα του τείχους για την συνεχή και σωστή παρακολούθηση του.

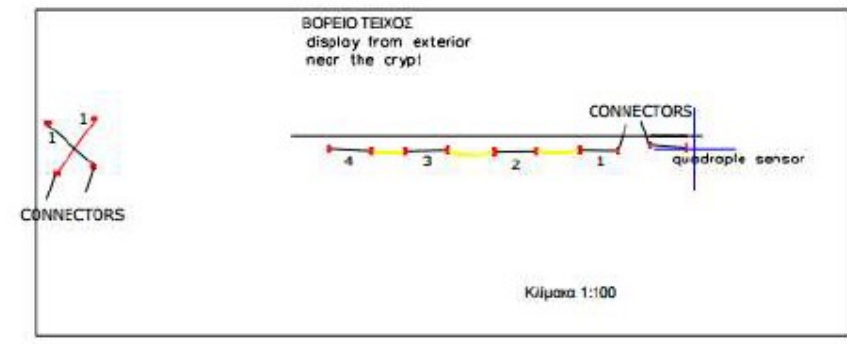
Στο συγκεκριμένο τείχος μπορούμε να διακρίνουμε τις δύο διατάξεις των αισθητήρων SmartRod, μία στο πάνω μέρος του και μία κάτω.

ΒΟΡΕΙΟ ΤΕΙΧΟΣ



Εικόνα 50. (α), (β) Διάταξη αισθητήρων στο εσωτερικό της βόρειας όψης του τείχους

Τα χαρακτηριστικά Βόρειου τείχους είναι τα εξής: Πλάτος στη βάση 1-2m, στη κορυφή 0,5- 1m και ύψος 4-6m. Στην εξωτερική πλευρά τοποθετήθηκαν μια σειρά 5 smartrods ενώ στην εξωτερική ενώ στην εσωτερική μια σειρά 7 αισθητήρων. Οι διάταξη των αισθητήρων είναι τέτοια ώστε να ελέγχουν το ελεύθερο άκρο από την εξωτερική πλευρά και την μεταβολή στη κλίση του τείχους στην εσωτερική.



Εικόνα 51. Διάταξη αισθητήρων στο εξωτερικό της βόρειας όψης του τείχους

Με την παρακολούθηση της συγκεκριμένης θέσης σκοπός είναι ο εντοπισμός της επίδρασης των συσσωρευμένων φορτίων των μαρμάρων.

5.5.3 Διαδικασία παρακολούθησης

- Λήψη μετρήσεων των αισθητήρων

Οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για τον εντοπισμό πιθανών παραμορφώσεων.

- Σύγκριση μετρήσεων ως προς την πρότυπη συμπεριφορά της δομής

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων απαιτείται η μελέτη όλων των πειραματικών δεδομένων σε συνεργασία με τις θεωρητικές μελέτες. Η αστοχία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί καθώς επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους.

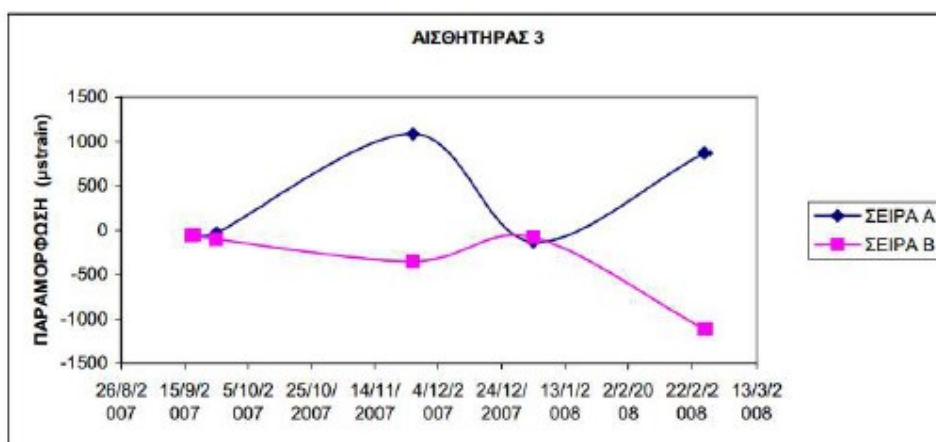
- Όρια συναγερμού κατά την παρακολούθηση

Κατά την παρακολούθηση καθορίζονται κάποια όρια από τα οποία και πέρα οι παραμορφώσεις χρειάζονται επέμβαση.

5.5.4 Μετρήσεις

Πριν την τοποθέτηση των αισθητήρων, λήφθηκε μέτρηση από αυτούς ώστε να εξασφαλιστεί η λειτουργία τους και να βαθμονομηθούν σωστά. Επίσης έγινε και ταυτοποίηση των αισθητήρων πριν την ανάρτησή τους και ολοκληρώθηκε με την τοπογραφική αποτύπωση. Η αρχική μέτρηση ορίζεται ως μέτρηση αναφοράς, το σημείο δηλαδή με το οποίο θα συγκρίνονται τα αποτελέσματα για να προσδιοριστεί αν έχει επέλθει πιθανή αστοχία.

Τα διαγράμματα τροφοδοτούνται από τα δεδομένα εισόδου καθώς αυτά ενημερώνονται συνεχώς σε πραγματικό χρόνο και από αυτά προσδιορίζεται η κατάσταση της δομής.



Εικόνα 52. Παράδειγμα από μέτρηση αισθητήρα (α εξωτερική φορά, β εσωτερική φορά)

5.6 Ενόργανη παρακολούθηση γέφυρας Ρίου-Αντίρριου (Χαρίλαος Τρικούπης)

5.6.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της συγκεκριμένης γέφυρας καθίσταται σημαντική καθώς είναι ένα έργο μεγάλης σπουδαιότητας και οι γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της κατασκευής ως προς τις εξωτερικές φορτίσεις που τις ασκούνται, όπως είναι ο άνεμος, τα φορτία που δέχεται από τη διέλευση οχημάτων αλλά και πιθανές σεισμικές δονήσεις μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την συμπεριφορά της κατασκευής και να ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του έργου και η ασφαλή χρήση του. Με τη διαρκή παρακολούθηση της δομής μπορούν να προληφθούν πιθανές αστοχίες, καθώς μας δίνονται πληροφορίες για τα φορτία που ασκούνται και τη συμπεριφορά της δομής ως προς αυτά, δίνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής επεμβάσεων σε τρωτά σημεία καθώς επίσης είναι δυνατή και η άμεση αξιολόγηση μετά από κάποιον σεισμό για την ακεραιότητα αλλά και την ασφαλή λειτουργία της γέφυρας.

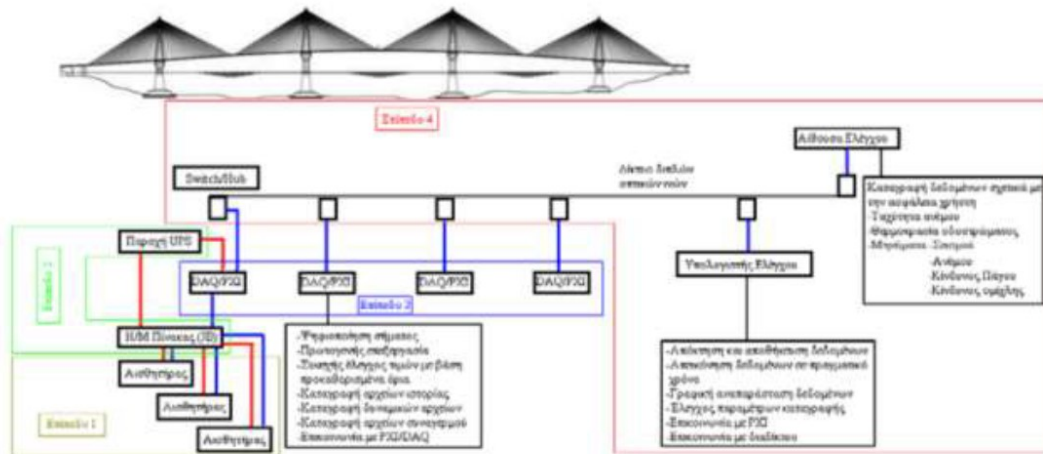
Το σύστημα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής έχει ως στόχο την καταγραφή των επιταχύνσεων, δυνάμεων, μετατοπίσεων κ.τ.λ. και τα υλικά που θα το απαρτίζουν πρέπει να εξασφαλίζουν την αποδοτικότητα του. Τα στοιχεία που είναι προς παρακολούθηση περιγράφονται στο παρακάτω πίνακα ο οποίος προέρχεται από τη μελέτη για την σωστή λειτουργία του συστήματος.

ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ	ΣΤΟΧΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΟ ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΚΑΙ ΛΟΙΠΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Ταχύτητα ανέμου Διεύθυνση ανέμου	Χαρακτηρισμός φορτίων ανέμου	0-50 m/sec (0-180 χαω)
Θερμοκρασία/ σχετική υγρασία αέρα	Χαρακτηρισμός περιβαλλοντικών συνθηκών	50o C(25o C θερμ. αναφοράς) RH=70%
Θερμοκρασία καταστρώματος	Απόκριση καταστρώματος από θερμικά φορτία	1070mm (συνολικά)
Επιτάχυνση Καταστρώματος	Απόκριση σε σεισμό/ισχυρό άνεμο	<2,7g Σεισμός <0,4g Ισχυρός Άνεμος 0,14 έως 0,77 Hz (40 πρώτες ιδιοσυχνότητες)
Επιτάχυνση πυλώνων	Απόκριση σε σεισμό	<1,9g στην κορυφή <1,9g στην στάθμη του καταστώματος <1,0 g στην βάση
Επιτάχυνση Εδάφους	Χαρακτηρισμός Σεισμικών φορτίων	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0,48g
Επιτάχυνση Καλωδίων	Απόκριση σε ισχυρό άνεμο	Θεμελειώδεις συχνότητες καλωδίων 0,45 έως 1,23 Hz
Δυνάμεις καλωδίων	Απόκριση σε σεισμό/άνεμο/φορτία κυκλοφορίας	75% Fguts-199 kN
Ανοιγμα/κλείσιμο αρμών διαστολής	Απόκριση σε σεισμό/άνεμο/θερμοκρασιακ ές μεταβολές	+1260/-1150 mm
Δυνάμεις στις ράβδους σύνδεσης καταστρώματος-πυλώνων	Απόκριση σε σεισμό/άνεμο/τεκτονική μετακίνηση	Δύναμη απελευθέρωσης καταστώματος 10000 kN
Θερμοκρασία οδοστρώματος	Ασφάλεια Χρήστη έναντι πάγου	
Ανίχνευση νερού στην βάση του πυλώνα		

5.6.2 Τι περιλαμβάνει το σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

Το σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας απαρτίζεται από τα τέσσερα μέλη που περιγράφονται παρακάτω:

- Αισθητήρες
- Σύστημα τροφοδοσίας και μεταφοράς σήματος
- Ψηφιοποίηση και επεξεργασία σήματος
- Δίκτυο επικοινωνίας και διαχείρισης σήματος



Εικόνα 53. Σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας γέφυρας Χαρίλαος Τρικούπης σε 4 επίπεδα λειτουργίας

5.6.2.1 Αισθητήρες

Για την παρακολούθηση των διαφόρων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τη δομή απαιτήθηκαν αισθητήρες διάφορων ειδών, ανάλογα τις ανάγκες του κάθε μεγέθους. Χρησιμοποιήθηκαν λοιπόν αισθητήρες επιτάχυνσης εδάφους, επιταχυνσιογράφοι πυλώνων, επιταχυνσιογράφοι καταστρώματος, επιταχυνσιογράφοι καλωδίων, μετεωρολογικοί σταθμοί 3D, Μαγνητικά μηκηνσιόμετρα στους αρμούς, Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας καταστρώματος, Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας οδοστρώματος κ.α.



(α.)

(β.)



(γ.)

(δ.)

Εικόνα 54. (α) Επιταχυνσιόμετρο, (β) Μετεωρολογικός σταθμός, (γ) Παραμορφωσιόμετρο και (δ) Δυναμοκυψέλες καλωδίων

5.6.2.2 Σύστημα τροφοδοσίας και μεταφοράς σήματος

Για την τροφοδοσία των αισθητήρων απαιτείται ένας ηλεκτρικός πίνακας. Κάθε πίνακας αντιστοιχεί σε μία ομάδα αισθητήρων.



Εικόνα 55. Ηλεκτρολογικός πίνακας

5.6.2.3 Ψηφιοποίηση και επεξεργασία σήματος

Από τους αισθητήρες παράγεται σήμα σε αναλογική μορφή. Φτάνοντας στη μονάδα ψηφιοποίησης που βρίσκεται σε κάθε πυλώνα, αλλάζει μορφή σε ψηφιακή ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά της προς το τμήμα διαχείρισης των δεδομένων.



Εικόνα 56. Συσκευή ψηφιοποίησης σήματος

5.6.2.4 Δίκτυο επικοινωνίας και διαχείρισης σήματος

Για να καταστεί δυνατή η μεταφορά των δεδομένων προς τον χρήστη και από κει στην επεξεργασία και αξιολόγηση τους, πρέπει να εισέλθουν σε ένα δίκτυο διπλών οπτικών ινών που εξασφαλίζει τη μετάδοση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.



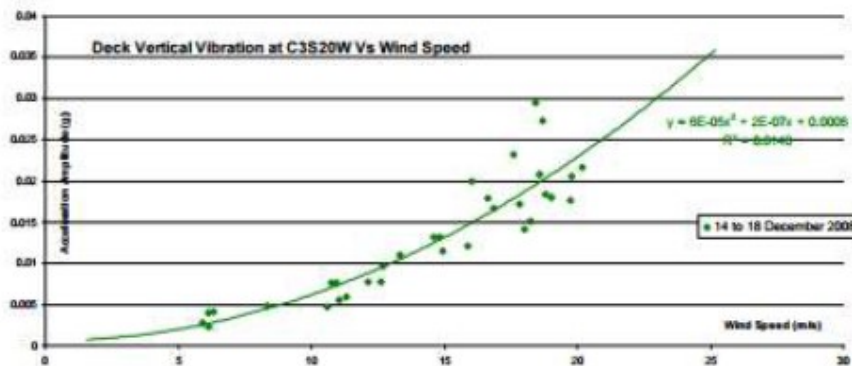
Εικόνα 57. Δίκτυο διπλών οπτικών ινών

5.6.3 Αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων

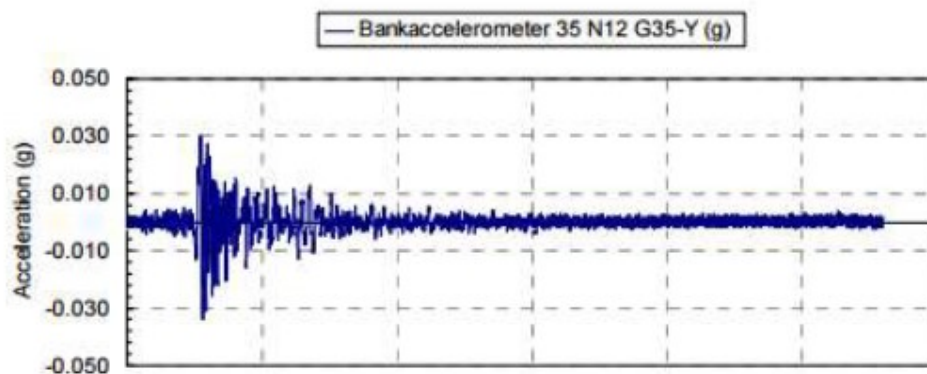
Η καταγραφή των δεδομένων είναι μία εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία και παίζει σημαντικό ρόλο στη παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας.

Η καταγραφή των δεδομένων για τη βέλτιστη χρήση τους διακρίνεται σε δυο κατηγορίες:

1. Αρχεία ιστορικού
Αυτού του είδους τα αρχεία χρησιμεύουν για παρακολούθηση φαινομένων με αργή πορεία εξέλιξης όπως η επίδραση των φορτίων ανέμου στη κατασκευή, η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών στην παραμόρφωση της κ.α.
2. Δυναμικά αρχεία
Τα δυναμικά αρχεία χρησιμεύουν στον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής. Με τα δυναμικά αρχεία μπορούν να προσδιοριστούν η σεισμική απόκριση της κατασκευής έναντι μίας διέγερσης, δημιουργία φασμάτων απόκρισης, καταγραφή ιδιοσυχνοτήτων κατασκευής, δυναμική απόκριση κατασκευής υπό φορτία ανέμου.



Εικόνα 58. Σχέση μέγιστης επιτάχυνσης καταστρώματος με την ταχύτητα του ανέμου



Εικόνα 59. Δυναμική επιτάχυνση σε σεισμό

5.6.4 Λογισμικό διαχείρισης συστήματος

Με χρήση κατάλληλου λογισμικού τα δεδομένα επεξεργάζονται και διαχειρίζονται σωστή ούτως ώστε η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας να είναι αποτελεσματική.

Βασικές λειτουργίες τις οποίες εκτελεί το λογισμικό είναι:

- Παρουσίαση των μετρούμενων μεγεθών που υπερβαίνουν τα ορισμένα όρια
- Γραφική απεικόνιση και επεξεργασία των δεδομένων
- Παρουσίαση σε πραγματικό χρόνο
- Καθορισμών ορίων συναγερμού
- Δυνατότητα βαθμονόμησης συστήματος
- Εξασφάλιση επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή για απομακρυσμένη παρακολούθηση
- Παροχή των απαιτούμενων πληροφοριών στο χρήστη
- Αυτοματοποιημένη διαχείριση συστήματος

Για να έχουμε αυτοματοποιημένη διαχείριση του συστήματος παρακολούθησης, στόχος είναι το σύστημα να λαμβάνει κάποιες αποφάσεις χωρίς να χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση για την καθοδήγησή του. Αυτό θα μπορούσε να είναι ο διαχωρισμός των χρήσιμων καταγραφών, προσαρμογή των καταγραφών στο είδος της φόρτισης για τη δυνατότητα περαιτέρω αναλύσεων, δυνατότητα εντοπισμού του προβλήματος από το ίδιο το σύστημα και πληροφόρηση του χρήστη για πιθανή ανάγκη επέμβασης σ' αυτό καθώς επίσης και αναγνώριση είδους της φόρτισης η οποία προκάλεσε τη βλάβη για διευκόλυνση του χρήστη.

5.6.5 Διασφάλιση ποιότητας αποτελεσμάτων συστήματος

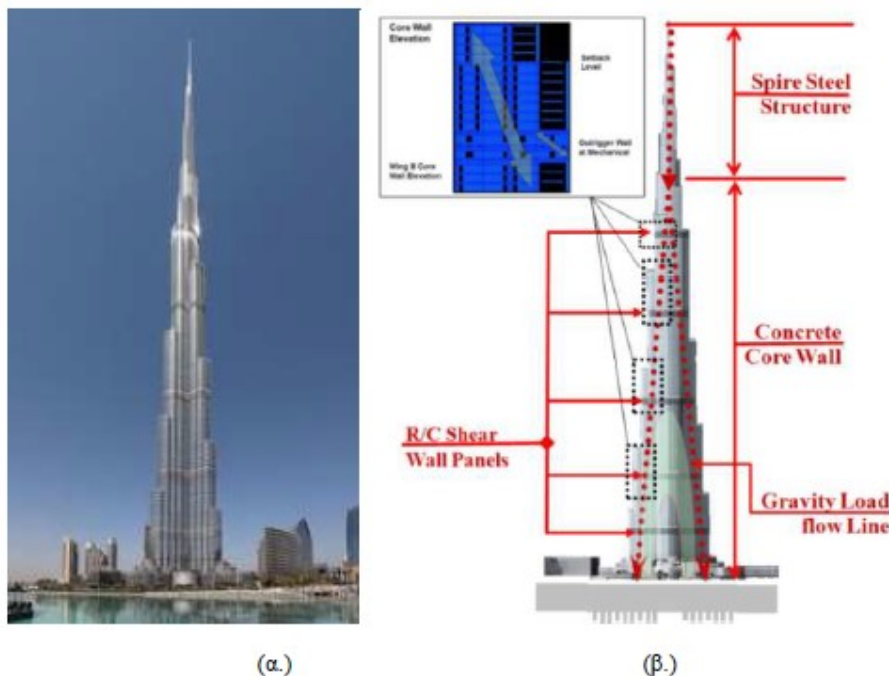
Για τη διασφάλιση των εγκυρότητας των αποτελεσμάτων και της σωστής λειτουργίας του συστήματος παρακολούθησης παρακολουθούνται συνεχώς τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Κάθε απόκλιση των καταγραφών από την πραγματικότητα καταγράφεται και αξιολογείται από έμπειρους τεχνικούς. Κάθε χρόνο γίνεται πλήρης έλεγχος του συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας ενώ κάθε πέντε χρόνια γίνεται έλεγχος και βαθμονόμηση των αισθητήρων.

5.6.6 Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος

Λόγω της σπουδαιότητας του έργου η ύπαρξη του συστήματος παρακολούθησης είναι αναγκαία για τη σωστή διαχείρισή του. Έτσι με τη βοήθεια του συστήματος λαμβάνονται πληροφορίες για την κατάσταση της κατασκευής που διαφορετικά δεν θα ήταν διαθέσιμες με άλλο τρόπο. Οι πληροφορίες που λαμβάνουν οι υπεύθυνοι παρακολούθησης είναι σημαντικές τόσο για τη δομική κατάσταση του έργου ανά πάσα στιγμή αλλά και τη

συμπεριφορά του έναντι κάθε πιθανού φαινομένου που θα το επηρεάσει αλλά και τη διασφαλισμένη ικανότητα να λειτουργεί χωρίς κίνδυνο.

5.7 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας Burj Khalifa



Εικόνα 60. (α) Πύργος Burj Khalifa, (β) Κατασκευαστική μορφή πύργου

5.7.1 Εισαγωγή

Ο ουρανοξύστης Μπουρτζ Χαλίφα ή Μπουρτζ Ντουμπάι όπως είναι γνωστό, βρίσκεται στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα στη πόλη του Ντουμπάι και είναι το ψηλότερο κτίριο παγκοσμίως με ύψος 828 μέτρα και 460,000 τ.μ. Η κατασκευή αποτελείται από 160 ορόφους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται από γραφεία, διαμερίσματα χώρους αναψυχής, πάρκα δραστηριοτήτων, καταστήματα κ.α.. Συστεγάζεται επίσης με το ξενοδοχείο Armani Hotel Dubai. Ο σχεδιασμός της μορφής του είναι εμπνευσμένος από ένα λουλούδι της ερήμου καθώς και με βάση την ισλαμική αρχιτεκτονική. Τα υλικά που απαρτίζουν την κατασκευή είναι, οπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής από τη θεμελίωση έως τον 156 όροφο και από εκεί έως την κορυφή του πύργου αποτελείται από ενισχυμένο δομικό χάλυβα. Η ανάγκη λοιπόν για παρακολούθηση καθίσταται αναγκαία για ένα τέτοιο κτίριο που εξυπηρετεί εκατομμύρια κόσμου καθώς η κατασκευή εκτίθεται σε πληθώρα φορτίων είτε εξαιτίας των καιρικών φαινομένων είτε λόγω κάποιου σεισμού και η ύπαρξη μιας πιθανής αστοχίας πρέπει να είναι σε θέση να προβλεφθεί και να αντιμετωπιστεί εγκαίρως.

5.7.2 Έρευνα που αναπτύχθηκε για την δημιουργία του συστήματος παρακολούθησης του πύργου

Η έρευνα και η δημιουργία του συστήματος παρακολούθησης ενός τέτοιου έργου είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και ίσως το δυσκολότερο αν σκεφτεί κανείς την έκταση του συγκεκριμένου έργου.

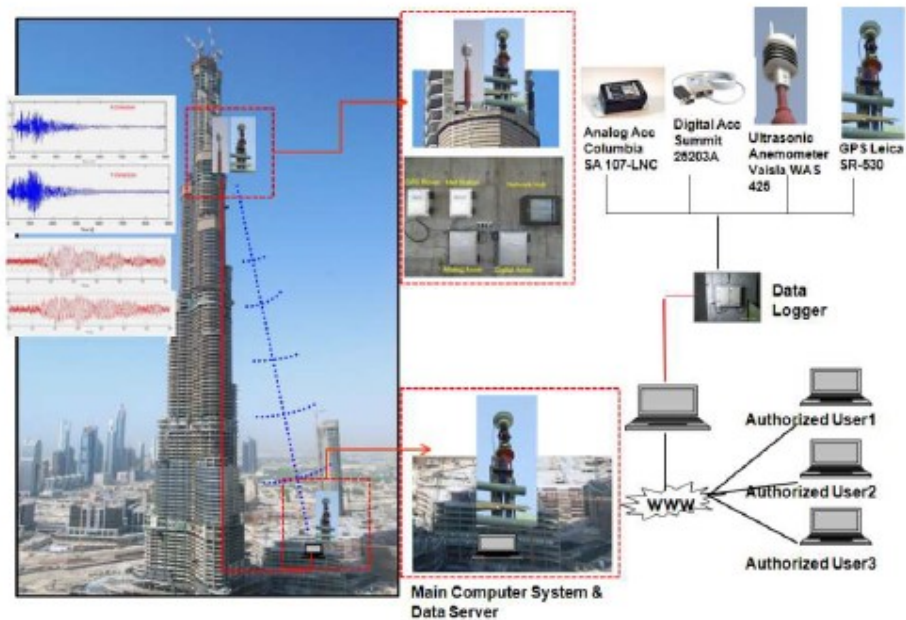
Σκοπός ήταν:

- Παρακολούθηση των φρεατοπασσάλων οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και τη μεταφορά των φορτίων που λαμβάνουν στο έδαφος.
- Παρακολούθηση των καθιζήσεων της θεμελίωσης, παραμορφώσεις τοιχίων πυρήνα που αντιστέκονται στις πλευρικές φορτίσεις ανέμου ή σεισμού και βράχυνσης υποστυλωμάτων και πιθανές πλευρικές μετακινήσεις ως αποτέλεσμα της γεωμετρικής και στατικής ασυμμετρίας του.
- Παρακολούθηση παραμορφώσεων και τάσεων που αναπτύσσονται λόγω βαρύτητας στα κατακόρυφα στοιχεία της κατασκευής.
- Εγκατάσταση προσωρινού συστήματος παρακολούθησης πραγματικού χρόνου κατά τη φάση της κατασκευής.
- Εγκατάσταση μόνιμου συστήματος παρακολούθησης πραγματικού χρόνου για τη παρακολούθηση των μετακινήσεων και της σεισμικής του απόκρισης.
- Παροχή αξιόπιστων δεδομένων όσον αφορά την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κορυφής του πύργου σε σχέση με τα φορτία ανέμου και σεισμού που θα δεχτεί.
- Παρακολούθηση των φορτίων ανέμου που δέχεται η κατασκευή σε ολόκληρο το ύψος της, ανάλογα τα στοιχεία της κάθε θέσης
- Σύγκριση των μετρούμενων τιμών ως προς την πρότυπη συμπεριφορά της.

5.7.3 Περιγραφή προσωρινού συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

Ο πύργος ήταν καταρτισμένος με ένα προσωρινό σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο το οποίο έγινε σε συνεργασία της Samsung με το Πανεπιστήμιο Νοτρ Νταμ και σκοπό είχε την παρακολούθηση και καταμέτρηση των επιταχύνσεων που αναπτύσσονταν κατά τη φάση της κατασκευής, το οποίο χρησιμοποιείται και ως σύστημα ταυτοποίησης και είναι σε θέση να καταγράφει ιδιοσυχνότητες, αποσβέσεις κ.α.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα παρακολούθησης των μετακινήσεων που υφίσταται η κατασκευή με την εγκατάσταση ενός ολοκληρωμένου δικτύου GPS στον 138 όροφο και ενός σταθερού σταθμού ο οποίος έχει προσαρτηθεί, καθώς επίσης στον ίδιο όροφο τοποθετήθηκε και ένας μετεωρολογικός σταθμός ο οποίος μετρά τη θερμοκρασία, την υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου που αναπτύσσεται, δηλαδή όλες τις δυσμενείς συνθήκες στις οποίες είναι εκτεθειμένη η κατασκευή και μπορούν να επηρεάσουν τη δομή της.



Εικόνα 61. Εγκαταστάσεις και λειτουργία προσωρινού συστήματος παρακολούθησης

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής δεν παρατηρήθηκαν σημαντικά φορτία ανέμου αλλά επηρεάστηκε από ένα σεισμό που συνέβη στο Μπαντάρ Αμπάς του Ιράν. Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι μετρούμενες επιταχύνσεις που καταγράφηκαν λόγω του σεισμού στο επίπεδο του ορόφου 139. Οι επιταχύνσεις που καταγράφησαν ήταν 2.76milli-g κατά x και 3.82milli-g κατά την y διεύθυνση και είναι οι μεγαλύτερες που έχουν καταγραφεί στην κατασκευή. Δεδομένου του ότι η κατασκευή δεν ήταν καταρτισμένη με επιταχυνσιόμετρο στη βάση της, δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί ανάλυση χρονοιστορίας. Με την ανάπτυξη του παραπάνω προγράμματος δημιουργήθηκε ένα σύστημα τελευταίας τεχνολογίας παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας σε πραγματικό χρόνο το οποίο είναι πιθανώς πρώτο στο είδος του στην ιστορία των ψηλών κτιρίων.

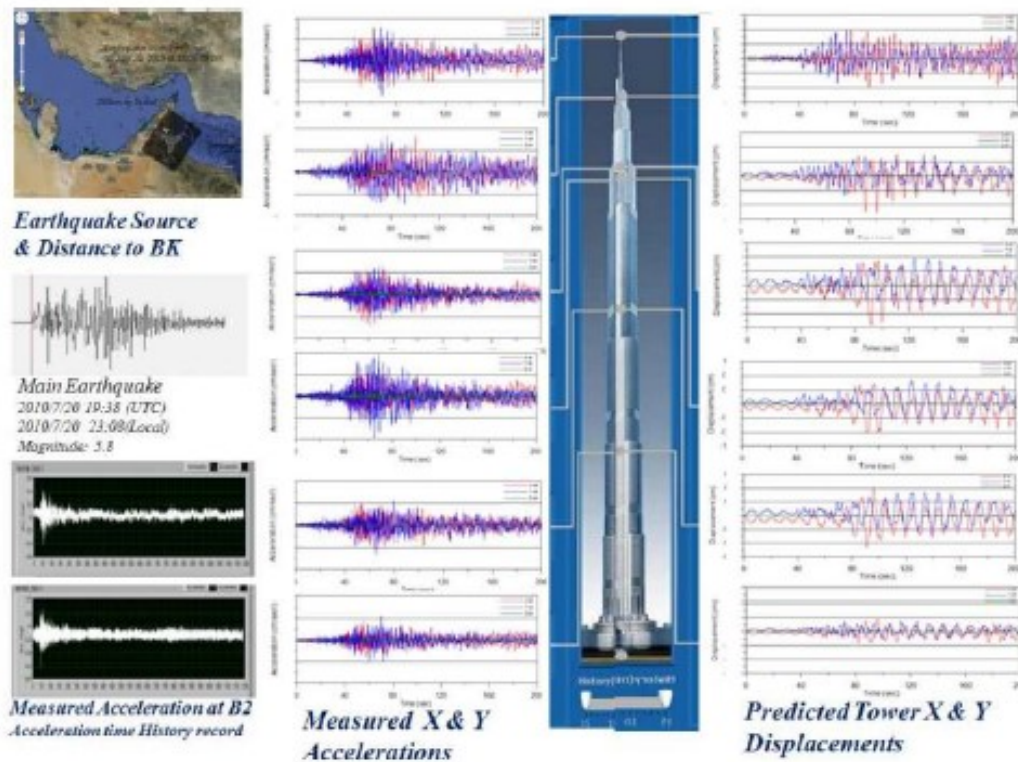
5.7.4 Περιγραφή μόνιμου συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

Εδώ παρουσιάζεται η ανάπτυξη και εγκατάσταση του πλήρους κλίμακας συστήματος παρακολούθησης του ουρανοξύστη το οποίο αποτελείται από:

- 3 ζεύγη επιταχυνσιόμετρων τα οποία είναι τοποθετημένα στο επίπεδο της θεμελίωσης για την καταγραφή των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στη βάση της κατασκευής,
- 6 ζεύγη αισθητήρων επιτάχυνσης οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στα επίπεδα 73, 123, 155(πάνω στο σκυρόδεμα), 160M3, Tier23A και στο ψηλότερο σημείο του πύργου ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση σε όλα τα σημεία,
- ένα σύστημα GPS για μέτρηση της μετατόπισης του κτιρίου στο επίπεδο 160M3,
- 23 αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου οι οποίοι είναι κατανομημένοι σε όλα τα επίπεδα της κατασκευής καθώς και στη κορυφή της,

- ένα μετεωρολογικό σταθμό στο επίπεδο 160M3 της κατασκευής για τη μέτρηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας.

Τα δεδομένα της απόκρισης του κτιρίου είναι απόρρητα και δεν είναι διαθέσιμα για ανάγνωση, ωστόσο, σύμφωνα με τα γνωστά στοιχεία, η απόκριση της κατασκευής σε κάποιον σεισμό που δέχτηκε ήταν πολύ καλή σε σχέση με την προβλεπόμενη απόκριση της κατασκευής. Αν και το μέγεθος του σεισμού ήταν μικρό, η συχνότητα του σεισμού ήταν κοντινή με αυτή της κορυφής και ήρθαν σε συντονισμό. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι καταγραφές από το σύστημα παρακολούθησης και κατά συνέπεια η απόκριση της κατασκευής.



Εικόνα 62. Καταγραφές αισθητήρων

5.7.5 Ανασκόπηση συστήματος

Η ανάπτυξη του συστήματος παρακολούθησης του ουρανοξύστη burj khalifa, παρέχει συνεχή και αξιόπιστη ενημέρωση για την κατάσταση της κατασκευής, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ασφαλή λειτουργία του καθώς και την έγκαιρη επέμβαση σε περίπτωση κάποιας αστοχίας.

Το σύστημα παρακολούθησης υγιούς λειτουργίας περιλαμβάνει τους παρακάτω ελέγχους:

- Έλεγχος σε όλες τις κατηγορίες σκυροδέματος για επιβεβαίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων όπως αντοχή, μέτρο ελαστικότητας κ.α.
- Έλεγχος για πιθανή καθίζηση στη κατασκευή, παραμόρφωση των υποστυλωμάτων και πλευρικές φορτίσεις σε όλα τα στάδια της κατασκευής.
- Έλεγχος για ανάπτυξη τάσεων στα υποστυλώματα και τοιχία.
- Έλεγχος για αλλαγή της κλίσης του κτιρίου μέσω του gps σε πραγματικό χρόνο.
- Παρακολούθηση μέσω του προσωρινού συστήματος παρακολούθησης πιθανές επιταχύνσεις και μετακινήσεις που συνέβησαν στον πύργο κατά τη διάρκεια της κατασκευής του.
- Παρακολούθηση κατασκευής μέσω του μόνιμου συστήματος παρακολούθησης για μέτρηση πιθανής επιτάχυνσης, μετακίνησης καθώς και των δυναμικών χαρακτηριστικών της δομής όπως ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές κ.α. Επίσης είναι σε θέση να μετρήσει την ταχύτητα που αναπτύσσει ο άνεμος καθώς και τη διεύθυνση του σε διάφορες στάθμες της δομής.

6 Συμπεράσματα - Προοπτικές

Η ενόργανη παρακολούθηση αποτελεί έναν νέο κλάδο που μπορεί να δώσει λύσεις σε προβλήματα που κάποτε θεωρούταν άλυτα. Αυτό διότι καταγράφεται η πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής παρέχοντας απαραίτητα δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα.

Μέσω του συστήματος των αισθητήρων καθίσταται εφικτή και πληρέστερα κατανοητή η συμπεριφορά της δομής ως προς την επιβαλλόμενη φόρτιση.

Οι υποδομές επηρεάζονται από το χρόνο (γήρανση), από το περιβάλλον, από τις ανθρώπινες ενέργειες, από φυσικές καταστροφές και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι έχουν κατασκευαστεί με παλαιότερους κανονισμούς (ξεπερασμένες μέθοδοι σχεδιασμού / κατασκευής) εμφανίζεται η ανάγκη να καταγραφεί και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους. Οι εφαρμογή της ενόργανης παρακολούθησης μπορεί να βοηθήσει στην μείωση κόστους αποκατάστασης μέσω την έγκαιρης και ακριβής ενημέρωσης και κυρίως στην αποφυγή δυσμενών καταστάσεων, όπως για παράδειγμα πιθανή κατάρρευση κατασκευής.

7 Βιβλιογραφία

1. Force-balance (Servo) Sensors. (2000, Ιούνιος). Αναρτήθηκε από: <http://www.sensorland.com/HowPage019.html>
2. Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας κατασκευών. (2008). Αναρτήθηκε από: <http://www.crd.gr/el/%CE%B5%CE%BD%CF%8C%CF%81%CE%B3%CE%B1%CE%BD%CE%B7-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CF%8D%CE%B8%CE%B7%CF%83%CE%B7>
3. SEISMIC DESIGN PRINCIPLES. (2006, 10/Νοεμβρίου). Αναρτήθηκε από: <https://www.wbdg.org/resources/seismic-design-principles>
4. ΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ. (2012). Αναρτήθηκε από: <http://www.telestatic.gr/content/articles/2/5/texnika-8emata/>
5. Αισθητήρας επιτάχυνσης. Αναρτήθηκε από: <https://physicsandroid.wordpress.com/%CE%B1%CE%B9%CF%83%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82-%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%84%CE%AC%CF%87%CF%85%CE%BD%CF%83%CE%B7%CF%82/>
6. Kalkan, E. ,Banga, K. ,Ulusoy, H. S. ,Fletcher, J. P. B. ,Leith, W. S. ,Reza, S. et al. (2012). Advanced Earthquake Monitoring System for U.S. Department of Veterans Affairs Medical Buildings-Instrumentation. U.S. Geological Survey: Virginia.
7. ΚΩΤΣΙΔΗ, Η.Α. (2012). Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για την μέτρηση παραμορφώσεων σε σύνθετα υλικά και συνδέσμους με κολλητικά μέσα. ΕΜΠ: Αθήνα
8. ΤΡΑΧΑΛΑΚΗ,Σ. (2012). Εκτίμηση δυναμικών χαρακτηριστικών κατασκευών με ενόργανη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Πολυτεχνείο Κρήτης: Χανιά.
9. Kalkan, E. ,Savage, W. ,Reza, S. ,Knight, E. & Tian, Y. (2013). UNLV's Environmentally Friendly Science and Engineering Building is Monitored for Earthquake Shaking.
10. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΣ, Π. ,ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ-ΒΛΑΜΗΣ, Α. ,ΠΑΝΑΓΗΣ, Α. (2009). ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ “ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΤΡΙΚΟΥΠΗΣ” (πρώην ΡΙΟΥ-ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ).
11. Kalkan, E. ,Ulusoy, H.S. & Banga, K. (2013). Real-time seismic monitoring of Veterans Affairs hospital buildings. SPIE Smart Structures: San Diego.

12. Kalkan, E. ,Uluso, H.S. , Leith, W. K. ,Friberg, P. & Banga, K. (2012). Design and Implementation of A Structural Health Monitoring and Alerting System for Hospital Buildings.
13. ΜΑΚΑΡΙΟΣ, Τ. ,ΣΑΛΟΝΙΚΙΟΣ, Θ. ,ΛΕΚΙΔΗΣ, Β. ,ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ, Χ. & ΔΗΜΟΣΘΕΝΟΥΣ, Μ. (2009). Αποτίμηση ιδιοπεριόδων και ιδιομορφών ταλάντωσης πενταώροφου κτιρίου από την απόκρισή του κατά τη διάρκεια της μετασεισμικής ακολουθίας του σεισμού Αχαιάς-Ηλείας.
14. ΑΣΤΡΕΙΝΙΔΗΣ, Ε. ,ΕΓΓΛΕΖΟΣ, Δ. (2008). Ενόργανη Παρακολούθηση Παραμορφώσεων του Τείχους της Ακρόπολης με Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Σύγκριση Μετρήσεων και Αναλυτικών Προβλέψεων.
15. Ψύλλος, Γ. Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών, θεωρία και εφαρμογές. ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ: ΑΘΗΝΑ.
16. ΖΑΡΑΒΕΛΛΑ, Ε. (2010). ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ:ΠΑΤΡΑ
17. Καλκάνης, Κ. & Καντεράκης, Γ. (2015) ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ. Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. : ΑΘΗΝΑ
18. Λεκίδης, Β. ,Καρακώστας, Χ. , Πανέτσος, Π. & Διαμαντουλάκη, Ι. (2009). Ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης σημαντικών έργων με σκοπό την πληρέστερη συντήρησή τους. ΤΕΕ: ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ.
19. ΠΑΝΕΤΣΟΣ, Π. ,ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΑΚΗΣ, Μ. & ΑΣΤΡΕΙΝΙΔΗΣ, Ε. Ενόργανη παρακολούθηση παραμορφώσεων γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών
20. YONG, G. (2005). STRUCTURAL HEALTH MONITORING STRATEGIES FOR SMART SENSOR NETWORKS. University of Illinois:Urbana.
21. Γιαννούλα, Δ. (2015). Ενόργανη παρακολούθηση και αποτίμηση σεισμικής τρωτότητας του κτιρίου της νέας φιλοσοφικής σχολής Α.Π.Θ. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: Θεσσαλονίκη.
22. Ting-Hua Yi1, Hong-Nan Li1, "Methodology Developments in Sensor Placement for HealthMonitoring of Civil Infrastructures", International Journal of Distributed Sensor Networks, Hindawi Publishing Corporation, Vol 2012, Article ID 612726, 11 pages, doi:10.1155/2012/612726