



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

«Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος
Ανάπτυξη»

Διπλωματική Εργασία

«Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών, αισθητήρες και
τοποθέτηση τους για βέλτιστη συλλογή στοιχείων».

Μακρυδάκη Ελένη



Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Μούσας Βασίλειος

ΑΘΗΝΑ 2017

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην τεχνική ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών και στον τρόπο με τον οποίο, ανάλογα με τα επιθυμητά κριτήρια τα οποία είναι το κόστος καθώς και η προσβασιμότητα κάθε στοιχείου, επιλέγονται ο αριθμός καθώς και οι θέσεις των κόμβων στους οποίους θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες για την απόκτηση των επιθυμητών πληροφοριών που αφορούν την δομή.

Στην παρούσα εργασία κρίθηκε απαραίτητη η έρευνα για την κατανόηση της δημιουργίας και λειτουργίας ενός συστήματος ενόργανης παρακολούθησης καθώς και για τα επιμέρους είδη που την απαρτίζουν. Επίσης έρευνα έγινε και στον τομέα της στατικής καταπόνησης που υφίσταται μία κατασκευή από διάφορους παράγοντες και κυρίως λόγω σεισμού. Απαραίτητη διαδικασία για την κατανόηση της συμπεριφοράς της δομής καθώς και για απόκτηση όλων των απαραίτητων στοιχείων για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης των αισθητήρων αποτέλεσε η ιδιομορφική ανάλυση μέσω του προγράμματος SAP2000.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Μούσα Βασίλειο για την καθοδήγηση, την συνεχή ενθάρρυνση και τον χρόνο τον οποίο μου αφιέρωσε σ' αυτήν την προσπάθεια για να καταφέρουμε να φτάσουμε σ' αυτό το αποτέλεσμα. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Πνευματικό Νικόλαο για την βοήθεια του. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αρραβωνιαστικό μου για την υπομονή και την στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης μου καθώς και την οικογένεια μου.

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 την κατάλληλη προσομοίωση και ανάλυση της κατασκευής μέσω του προγράμματος SAP2000 είναι δυνατή η απόκτηση πληροφοριών που αφορούν τις ιδιομορφές ταλάντωσης όπως είναι οι μέγιστες μετακινήσεις των κόμβων σε κάθε μία από αυτές καθώς και η συμμετοχή της μάζας σε κάθε ιδιομορφή. Με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων αυτών καθίσταται δυνατή η διακριτοποίηση των κόμβων στους οποίους η μετακίνηση είναι σημαντική και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης του είναι σημαντικά και αντιπροσωπευτικά ως προς την κατάσταση της κατασκευής.

Οι κόμβοι της δομής μπορούν να ταξινομηθούν με αύξουσα σειρά και ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα κριτήρια που θέτει ο χρήστης επιλέγεται ο αριθμός των κόμβων καθώς και οι θέσεις στις οποίες είναι δυνατή η τοποθέτηση του συστήματος.

Λέξεις Κλειδιά: Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών, ιδιομορφική ανάλυση, συστήματα αισθητήρων, Structural Health Monitoring, SHM, sensor placement, modal analysis

Title: «Structural health monitoring, sensor systems & placement optimization».

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. The current sensor technology and several real world applications are presented. Subsequently it is shown that with proper simulation and analysis of a given structure through the SAP2000 program, it is possible to obtain information about its modes of oscillation such as the maximum displacement and the mass participation. Finally a method is proposed for post-processing the SAP2000 results using a spreadsheet application that can reveal the most significant nodes of the structure in terms of seismic data collection. The proposed system may also take into account any budget and positioning restrictions and may suggest a selected set of sensor positions (nodes) that would offer the best coverage for monitoring the structure under investigation.

Key Words: Structural Health Monitoring, SHM, sensor placement, modal analysis.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
2	ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	18
2.1	Γενικά	18
2.1.1	Τι είναι παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring - SHM)	18
2.1.2	Έννοια της βλάβης	19
2.1.3	Απαιτήσεις για ορθή λειτουργία SHM.....	19
2.1.4	Σε τι αποσκοπεί ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας.....	19
2.1.5	Συστήματα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας	20
2.1.6	Τεχνικές παρακολούθησης υγιούς λειτουργίας.....	21
2.1.7	Σε τι έργα απευθύνεται το SHM	21
2.1.8	Μέλη που απαρτίζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	21
2.1.8.1	Σύστημα αισθητήρων.....	22
2.1.8.2	Σύστημα μεταφοράς δεδομένων	23
2.1.8.3	Σύστημα επεξεργασίας δεδομένων	23
2.1.8.4	Σύστημα αποθήκευσης δεδομένων	23
2.1.8.5	Σύστημα ανίχνευσης βλαβών.....	24
2.2	Μεθοδολογία εγκατάστασης συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	24
2.3	Αισθητήρες	25
2.3.1	Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	25
	Ικανότητες αίσθησης	29
2.3.2	Κατηγορίες αισθητήρων.....	29
2.3.3	Μέθοδοι εφαρμογής και εγκατάστασης αισθητήρων	30
2.3.4	Σύνθετοι αισθητήρες επιτάχυνσης(1-D, 2-D, 3-D).....	30
2.3.5	Προδιαγραφές επιλογής αισθητήρων	31
2.3.6	Αισθητήρες επιτάχυνσης.....	31
2.3.7	Από τι αποτελείται και πως λειτουργεί ένας επιταχυνσιογράφος.....	32
2.3.8	Κατηγορίες αισθητήρων επιτάχυνσης ανάλογα με τη λειτουργία τους.....	32
2.3.8.1	Επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού βρόγχου	34
2.3.8.2	Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου	37
2.3.9	Επιλογή κατάλληλου αισθητήρα επιτάχυνσης.....	38
2.3.10	Συστήματα επικοινωνίας και καταγραφής.....	38
3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	43
3.1	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας, σε πραγματικό χρόνο, των νοσοκομείων των Βετεράνων.	43
3.1.1	Γενικά.....	43

3.1.1.1	Μέθοδοι εντοπισμού βλαβών	43
3.1.1.2	Σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη μελέτη	44
3.1.1.3	Εγκατάσταση και υλικό για την παρακολούθηση	45
3.1.1.4	Ενοργανωμένα κτίρια νοσοκομείων	46
3.1.2	Νοσοκομείο βετεράνων στο San Diego της Καλιφόρνια	47
3.1.3	Νοσοκομείο βετεράνων στο Μέμφις του Τένεσι ,κέντρο νοσηλείας	49
3.1.4	Νοσοκομείο βετεράνων στο Σιάτλ της Ουάσινγκτον, πτέρυγα διάγνωσης και θεραπείας	51
3.1.5	Νοσοκομείο βετεράνων Marion, Illinois	53
3.2	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας κτιρίου επιστήμης και μηχανικής στο πανεπιστήμιο της Νεβάδα στο Λας Βέγκας	55
3.2.1	Γενικά.....	56
3.2.2	Σύστημα αισθητήρων	57
3.2.3	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας και εντοπισμός βλάβης.....	59
3.3	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας 2 ^{ης} χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας στην Εγνατίας οδό.	59
3.3.1	Εισαγωγή.....	59
3.3.2	Χαρακτηριστικά γέφυρας.....	60
3.3.3	Ενοργάνωση με σύστημα αισθητήρων.....	60
3.3.4	Δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής	62
3.3.5	Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος	64
3.4	Ενοργάνωση πενταώροφου κτιρίου ΤΕΕ Πάτρας.....	65
3.4.1	Γενικά.....	65
3.4.2	Διάταξη αισθητήρων	66
3.4.3	Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ταλάντωσης κτιρίου	66
3.4.4	Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος	70
3.5	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας του τείχους της ακρόπολης.....	71
3.5.1	Εισαγωγή.....	71
3.5.2	Ενοργάνωση και παρακολούθηση δομικής συμπεριφοράς.....	71
3.5.3	Διαδικασία παρακολούθησης.....	75
3.5.4	Μετρήσεις	75
3.6	Ενόργανη παρακολούθηση γέφυρας Ρίου-Αντίρριου (Χαρίλαος Τρικούπης).....	76
3.6.1	Εισαγωγή.....	76
3.6.2	Τι περιλαμβάνει το σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας	78
3.6.2.1	Αισθητήρες	78
3.6.2.2	Σύστημα τροφοδοσίας και μεταφοράς σήματος	79
3.6.2.3	Ψηφιοποίηση και επεξεργασία σήματος.....	80

3.6.2.4	Δίκτυο επικοινωνίας και διαχείρισης σήματος	81
3.6.3	Αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων	81
3.6.4	Λογισμικό διαχείρισης συστήματος.....	82
3.6.5	Διασφάλιση ποιότητας αποτελεσμάτων συστήματος	83
3.6.6	Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος	83
3.7	Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας Burj Khalifa	84
3.7.1	Εισαγωγή.....	84
3.7.2	Έρευνα που αναπτύχθηκε για την δημιουργία του συστήματος παρακολούθησης του πύργου	85
3.7.3	Περιγραφή προσωρινού συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας 85	
3.7.4	Περιγραφή μόνιμου συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.....	86
3.7.5	Ανασκόπηση συστήματος	88
4	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	90
4.1	Γενικά	90
4.2	Προσομοίωση της κατασκευής και τρόπος ταλάντωσης	90
4.3	Ιδιοσυχνότητες κατασκευών.....	91
4.4	Ιδιομορφές κατασκευής.....	92
4.5	Πλαστιμότητα και πλάστιμη συμπεριφορά κατασκευής.....	93
4.6	Κέντρο μάζας (ΚΜ) και κέντρο ελαστικής στροφής (ΚΕΣ).....	93
4.7	Φάσμα απόκρισης.....	94
4.8	Φάσμα σχεδιασμού	96
4.8.1	Ελαστικά και ανελαστικά φάσματα σχεδιασμού	96
4.8.2	Παραδοχές ισοδυναμίας μεταξύ ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς	97
4.8.2.1	Παραδοχή ίσων μετακινήσεων	97
4.8.2.2	Παραδοχή ίσων ενεργειών	98
4.9	Στοιχεία εκτίμησης κατάστασης κατασκευής	100
4.9.1	Κόπωση	100
4.9.2	Φαινόμενο ολιγοκυκλικής φόρτισης.....	100
4.9.3	Εναπομένουσα ζωή της κατασκευής λόγω κόπωσης.....	101
4.10	Μέθοδοι ανάλυσης κατασκευών	101
4.10.1	Ελαστικές αναλύσεις.....	102
4.10.1.1	Δυναμική φασματική ανάλυση (Γραμμική, Ελαστική)	102
4.10.1.2	Απλοποιημένη φασματική – Ισοδύναμη στατική ανάλυση.....	102
4.10.1.3	Γραμμική ανάλυση χρονοιστορίας	103

4.10.2	Ανελαστικές αναλύσεις.....	103
4.10.2.1	Ανελαστική στατική ανάλυση (Pushover analysis).....	103
4.10.2.2	Δυναμική ανελαστική ανάλυση.....	103
5	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	106
5.1	Εργαλεία προσομοίωσης-ανάλυσης δυναμικής συμπεριφοράς.....	106
5.2	Εργαλεία προσομοίωσης-ανάλυσης δυναμικής συμπεριφοράς.....	106
5.3	Το SAP2000.....	107
5.4	Αποτελέσματα ανάλυσης με το πρόγραμμα SAP2000.....	107
5.5	Παράδειγμα χρήσης της εφαρμογής.....	108
6	Εύρεση βέλτιστων θέσεων αισθητήρων σε παραδείγματα εφαρμογών.....	119
6.1	Εισαγωγή.....	119
6.2	Περιορισμοί στην εφαρμογή ενόργανης παρακολούθησης.....	119
6.3	Τεχνικές βελτιστοποίησης θέσεων αισθητήρων σε κατασκευές.....	119
6.3.1	Υπολογισμός του δείκτη μετατόπισης.....	120
6.4	Παρουσίαση της εφαρμογής βελτιστοποίησης σε Excel.....	121
6.4.1	Περιγραφή λειτουργίας του προγράμματος.....	122
6.4.1.1	1 ^ο Βήμα: Καθορισμός του πλήθους των modes που θα ληφθούν υπόψη στην ανάλυση της κατασκευής.....	122
6.4.1.2	2 ^ο Βήμα: Υπολογισμός του Δείκτη Μετατόπισης κάθε κόμβου.....	123
6.4.1.3	3 ^ο Βήμα: Επιλογή των απαιτούμενων modes και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων σε φθίνουσα σειρά.....	125
6.4.1.4	4 ^ο Βήμα: Περιορισμοί χρήστη και επιλογή επικρατέστερων θέσεων για την τοποθέτηση αισθητήρων.....	126
6.4.2	Δημιουργία Γραφικής Διεπαφής Χρήστη (GUI) για τη λειτουργία του προγράμματος.....	126
6.4.2.1	Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI) της εφαρμογής.....	126
6.4.2.1	Εντολές σύνδεσης Γραφικής Διεπαφής Χρήστη (GUI) και υπολογιστικών φύλλων της εφαρμογής.....	127
6.5	Μελέτη περιπτώσεων κλασικών κατασκευών.....	128
6.5.1	Παράδειγμα 1.....	129
6.5.2	Παράδειγμα 2.....	132
6.5.3	Παράδειγμα 3.....	135

6.5.4	Παράδειγμα 4	138
6.5.5	Παράδειγμα 5	141
6.5.6	Παράδειγμα 6	144
6.5.7	Παράδειγμα 7	147
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		150
Βιβλιογραφία.....		152
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		157
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		158

Πίνακας περιεχομένων σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σχέση ακρίβειας-επαναληψιμότητας.....	26
Σχήμα 2-2 Γραμμικότητα αισθητήρα.....	27
Σχήμα 2-3 Γραφική παράσταση υστέρησης.....	28
Σχήμα 2-4 Νεκρή ζώνη.....	29
Σχήμα 2-5 (α.), (β.) Διάφορες μορφές επιταχυνσιόμετρων.....	32
Σχήμα 2-6 Σύστημα ανοιχτού βρόγχου.....	33
Σχήμα 2-7 Σύστημα κλειστού βρόγχου.....	33
Σχήμα 2-8 Παράδειγμα λειτουργίας ποτενσιόμετρου.....	34
Σχήμα 2-9 Επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντιστάσης.....	35
Σχήμα 2-10 Παράδειγμα αισθητήρα ΓΜΔΜ.....	36
Σχήμα 2-11 (α.) Τομή πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, (β.) Λειτουργία αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού συστήματος.....	37
Σχήμα 2-12 Σύστημα κλειστού βρόγχου.....	37
Σχήμα 3-1 Θέσεις νοσοκομείων σε χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας.....	44
Σχήμα 3-2 Πίνακας εντοπισμένων νοσοκομείων βετεράνων.....	46
Σχήμα 3-3 (α.) Νοσοκομείο βετεράνων San Diego, (β.) Εντοπισμένο προσομοίωμα κτιρίου	47
Σχήμα 3-4 Κατόψεις οροφών με τις θέσεις των αισθητήρων.....	48
Σχήμα 3-5 (α) Νοσοκομείο βετεράνων Μέμφισ Τένεσι, (β) Εντοπισμένο προσομοίωμα κτιρίου Μέμφισ.....	49
Σχήμα 3-6 Όψεις και κατόψεις εντοπισμένου κτιρίου Μέμφισ.....	50
Σχήμα 3-7 Εντοπισμένες κατόψεις κτιρίου Μέμφισ.....	51
Σχήμα 3-8 Νοσοκομείο βετεράνων Σιάτλ.....	51
Σχήμα 3-9 Διάταξη αισθητήρων στο νοσοκομείο του Σιάτλ.....	52
Σχήμα 3-10 Νοσοκομείο βετεράνων Marion Illinois.....	53
Σχήμα 3-11 Εντοπισμένες κατόψεις και τομή νοσοκομείου Marion.....	54
Σχήμα 3-12 Εντοπισμένες κατόψεις νοσοκομείου Marion.....	55
Σχήμα 3-13 Κτίριο επιστήμης και μηχανικής του πανεπιστημίου της Νεβάδα.....	56
Σχήμα 3-14 Εντοπισμένο προσομοίωμα του κτιρίου.....	57
Σχήμα 3-15(α) Εντοπισμένη όψη κτιρίου, (β) Εντοπισμένη κάτοψη 1 ^{ου} ορόφου.....	58
Σχήμα 3-16 (α) Εντοπισμένη κάτοψη 2 ^{ου} ορόφου, (β) Εντοπισμένη κάτοψη τρίτου ορόφου/.....	58
Σχήμα 3-17 Εντοπισμένη κάτοψη 4 ^{ου} ορόφου, (β) Εντοπισμένη κάτοψη οροφής κτιρίου	58
Σχήμα 3-18 Σχηματική απεικόνιση συστήματος παρακολούθησης κατασκευής.....	59
Σχήμα 3-19 (α) Όψη της 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας, (β) κάτοψη της 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας.....	60
Σχήμα 3-20(α) Καταγραφική μονάδα, πίνακας ρευματοληψίας και κεραία GPS (β) Καταγραφική μονάδα και προστατευτικό πλαίσιο.....	61
Σχήμα 3-21 (α) Ρευματοδοτηση και αισθητήρας, (β) Πλατφόρμα για πρόσβαση στη κορυφή του πυλώνα.....	61
Σχήμα 3-22 Εσωτερικό πλατφόρμας.....	61
Σχήμα 3-23 Σχηματική απεικόνιση διάταξης αισθητήρων.....	62
Σχήμα 3-24 Αποτελέσματα τριών επιταχυνσιογράφων από διαφορετικά σημεία.....	63
Σχήμα 3-25 Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων που λήφθηκαν από τα επιταχυνσιόμετρα	64
Σχήμα 3-26 (α) Κτίριο ΤΕΕ Πάτρας, (β) Εντοπισμένο προσομοίωμα κατασκευής.....	65
Σχήμα 3-27 Αποτελέσματα επιταχυνσιόμετρων από σεισμική δόνηση.....	66

Σχήμα 3-28 Διαγράμματα για τις 9 καταγραφές επιταχύνσεων και εντοπισμός 7 ιδιοσυχνοτήτων κτιρίου.....	67
Σχήμα 3-29 Ιδιοπερίοδοι, ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές.....	67
Σχήμα 3-30 Επτά πρώτες ιδιομορφές κτιρίου ΤΕΕ.....	69
Σχήμα 3-31(α) & (β) Αγκύρωση αισθητήρα παραμόρφωσης.....	71
Σχήμα 3-32 Διάταξη αισθητήρων νότιας όψης τείχους ακρόπολης	72
Σχήμα 3-33 Διάταξη αισθητήρων ανατολικής όψης τείχους της ακρόπολης	73
Σχήμα 3-34(α), (β) Διάταξη αισθητήρων στο εσωτερικό της βόρειας όψης του τείχους.....	73
Σχήμα 3-35 Διάταξη αισθητήρων στο εξωτερικό της βόρειας όψης του τείχους.....	75
Σχήμα 3-36 Σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας γέφυρας Χαρίλαος Τρικούπης σε 4 επίπεδα λειτουργίας.....	78
Σχήμα 3-37 (α) Επιταχυνσιόμετρο, (β) Μετεωρολογικός σταθμός, (γ) Παραμορφοσιόμετρο και (δ) Δυναμοκυψέλες καλωδίων	79
Σχήμα 3-38 Ηλεκτρολογικός πίνακας.....	79
Σχήμα 3-39 Συσκευή ψηφιοποιήσεις σήματος.....	80
Σχήμα 3-40 Δίκτυο διπλών οπτικών ινών	81
Σχήμα 3-41 Σχέση μέγιστης επιτάχυνσης καταστρώματος με την ταχύτητα του ανέμου.....	82
Σχήμα 3-42 Δυναμική επιτάχυνση σε σεισμό	82
Σχήμα 3-43 (α) Πύργος Burj Khalifa, (β) Κατασκευαστική μορφή πύργου	84
Σχήμα 3-44 Εγκαταστάσεις και λειτουργία προσωρινού συστήματος παρακολούθησης	86
Σχήμα 3-45 Καταγραφές αισθητήρων.....	87
Σχήμα 4-1 Θεμελιώδεις ιδιοπερίοδοι κατασκευών	91
Σχήμα 4-2 Απεικόνιση 3 πρώτων ιδιομορφών μιας κατασκευής	92
Σχήμα 4-3 Απόσταση Κ.Β. από Κ.Ε.Σ.....	93
Σχήμα 4-4 Παράδειγμα φάσματος απόκρισης για διάφορους σεισμούς.....	94
Σχήμα 4-5 Ελαστικό φάσμα απόκρισης	95
Σχήμα 4-6 Παράδειγμα φάσματος σχεδιασμού	96
Σχήμα 4-7 Πραγματική συμπεριφορά κατασκευής.....	97
Σχήμα 4-8 Ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κατασκευών με την παραδοχή ίσων μετακινήσεων	98
Σχήμα 4-9 Ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κατασκευών με την παραδοχή ίσων ενεργειών.....	98
Σχήμα 4-10 Φάσμα σχεδιασμού EC8.....	99
Σχήμα 4-11 Διάγραμμα ολιγοκυκλικής φόρτισης.....	100
Σχήμα 5-1 Σχεδιασμός προσομοιώματος κατασκευής.....	108
Σχήμα 5-2 Ορισμός των στηρίξεων.	109
Σχήμα 5-3 Ορισμός των υλικών που απαρτίζουν τα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής. ..	110
Σχήμα 5-4 Ορισμός διατομών κατασκευής.....	110
Σχήμα 5-5 Εφαρμογή ορισμένων διατομών στα επιμέρους στοιχεία	111
Σχήμα 5-6 Ορισμός φορτίων σχεδιασμού	111
Σχήμα 5-7 Εφαρμογή φορτίων βαρύτητας.....	112
Σχήμα 5-8 Ορισμός διαφραγμάτων ορόφων	112
Σχήμα 5-9 Εφαρμογή ορισμένων διαφραγμάτων	113
Σχήμα 5-10 Ορισμός μάζας που συμμετέχει.....	113
Σχήμα 5-11 Ορισμός χαρακτηριστικών των ιδιομορφών	114
Σχήμα 5-12 Run analysis.....	114
Σχήμα 5-13 Ιδιομορφές ταλάντωσης	115
Σχήμα 5-14 Διάγραμμα ροπών.....	115
Σχήμα 5-15 Joints Displacements	116
Σχήμα 5-16 Εξαγωγή joints displacements σε excel.....	116
Σχήμα 5-17 Εξαγωγή modal participating mass ratio σε excel.....	117

Σχήμα 6-1 Καθορισμός απαιτούμενου πλήθους modes για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης (50%).....	122
Σχήμα 6-2 Καθορισμός απαιτούμενου πλήθους modes για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης (90%).....	123
Σχήμα 6-3 Καθορισμός απαιτούμενου πλήθους modes για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης (99%).....	123
Σχήμα 6-4 Υπολογισμός του Δείκτη μετατόπισης κάθε κόμβου από τα δεδομένα του SAP2000.....	124
Σχήμα 6-5 Επιλογή των απαιτούμενων modes και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων σε φθίνουσα σειρά.....	125
Σχήμα 6-6 Απεικόνιση των Δεικτών μετατόπισης αποτελεσμάτων σε φθίνουσα σειρά σπουδαιότητας.....	126
Σχήμα 6-7 Επιλογή των καταλληλότερων θέσεων για την τοποθέτηση των αισθητήρων για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις προεπιλογής (50%, 90%, 99%) των σχημάτων 6-1,2,3	126
Σχήμα 6-8 Η Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI) του προγράμματος	127
Σχήμα 6-9 Κάτοψη παραδείγματος 1	129
Σχήμα 6-11 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 1	129
Σχήμα 6-10 3D απεικόνιση παραδείγματος 1	130
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του πρώτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη	131
Σχήμα 6-13 Κάτοψη παραδείγματος 2	132
Σχήμα 6-14 3D απεικόνιση παραδείγματος 2	133
Σχήμα 6-15 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 2.....	133
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του δεύτερου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη	134
Σχήμα 6-16 Κάτοψη παραδείγματος 3	135
Σχήμα 6-18 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 3.....	135
Σχήμα 6-17 3D απεικόνιση παραδείγματος 3	136
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του τρίτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη	137
Σχήμα 6-19 Κάτοψη παραδείγματος 4.....	138
Σχήμα 6-21 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 4.....	138
Σχήμα 6-20 3D απεικόνιση παραδείγματος 4	139
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του τέταρτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη.....	140
Σχήμα 6-22 Κάτοψη παραδείγματος 5	141
Σχήμα 6-21 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 5.....	141
Σχήμα 6-23 3D απεικόνιση παραδείγματος 5	142
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του πέμπτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη	143
Σχήμα 6-25 Κάτοψη παραδείγματος 6	144
Σχήμα 6-27 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 6.....	144
Σχήμα 6-26 3D απεικόνιση παραδείγματος 6	145
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του έκτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη	146
Σχήμα 6-28 Κάτοψη παραδείγματος 7	147

Σχήμα 6-30 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 7	147
Σχήμα 6-29 3D απεικόνιση παραδείγματος 7	148
Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του έβδομου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη	149

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχικά αναλύεται η έννοια της ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών καθώς και τα μέσα με τα οποία επιτυγχάνεται. Αναλυτικότερα αναφέρονται τα επιμέρους είδη των αισθητήρων, εστιάζοντας στους αισθητήρες επιτάχυνσης, τα γνωστά επιταχυνσιόμετρα τα οποία και μας αφορούν στην παρούσα μελέτη, 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.

Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος καταπόνησης των κατασκευών υπό την επίρεια σεισμικών φορτίσεων ή δυνάμεων κόπωσης από τις οποίες επηρεάζεται η εναπομένουσα διάρκεια ζωής της κατασκευής. Συγκεκριμένα αναλύεται πώς με την προσομοίωση και ανάλυση των κατασκευών με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων εντοπίζονται οι ιδιομορφές σύμφωνα με τις οποίες ταλαντώνεται μία δομή.

Στο επόμενο κεφάλαιο πραγματεύεται ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνεται και αναλύεται μία δομή με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων για την αξιολόγηση της κατάστασης της και τον υπολογισμό της εναπομένουσας ζωής της. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση του προγράμματος SAP2000, το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη και μέσω του οποίου θα γίνει η ιδιομορφική ανάλυση της δομής.

Τέλος αναλύονται παραδείγματα κατασκευών τα οποία, μέσω του προγράμματος SAP2000 υφίστανται ιδιομορφική ανάλυση και από τα δεδομένα που προκύπτουν, με κατάλληλη επεξεργασία, εντοπίζονται οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων σύμφωνα με τους περιορισμούς που θα θέσει ο χρήστης ως προς το κόστος το οποίο μπορεί να διατεθεί και με την δυνατότητα πρόσβασης στον εκάστοτε κόμβο.

2 ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

2.1 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.

2.1.1 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 εναπομείνασα 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.

2.1.2 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.

2.1.3 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)

2.1.4 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.

2.1.5 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 συνεχή μικρότερης έντασης καταπονήσεις, η ικανότητα της κατασκευής να ανταπεξέλθει μειώνεται. Το σύστημα λειτουργεί κάνοντας χρήση του φάσματος φορτίσεων της κατασκευής.

- Παρακολούθησης 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.

2.1.6 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.

2.1.7 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.

2.1.8 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

2.1.8.1 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 όμως 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.

2.1.8.2 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.

2.1.8.3 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 ερμηνεία του σήματος. Αν σε μία δομή οι αισθητήρες είναι διαφορετικού τύπου, πρέπει να υποστούν διαφορετική επεξεργασία για αφαίρεση του θορύβου.

2.1.8.4 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.

2.1.8.5 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.

2.2 Μεθοδολογία εγκατάστασης συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

- Εύρεση βέλτιστων θέσεων για ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων.

Εντοπίζονται μέσω προσομοιώσεων της κατασκευής και υπολογισμών σύμφωνα 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.

2.3 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.

2.3.1 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.



Σχήμα 2-1 Σχέση ακρίβειας-επαναληψιμότητας

▪ ΣΦΑΛΜΑ

Διαφορά πραγματικής τιμής από τη μετρήσιμη.

▪ ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ

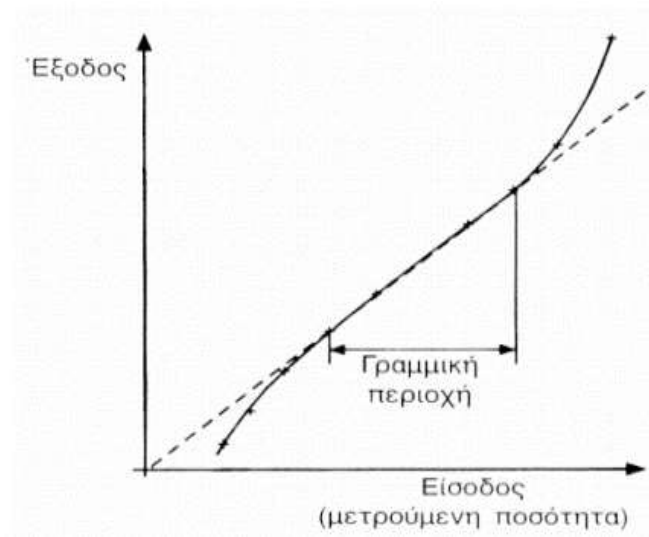
Το στατικό σφάλμα είναι αυτό που παραμένει σταθερό και βρίσκεται σε όλες τις τιμές εισόδου μίας συσκευής. Αν είναι γνωστό το σφάλμα αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς να επηρεαστεί η ακρίβειας της συσκευής.

▪ 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.



Σχήμα 2-2 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:

$$\text{Ευαισθησία} = \frac{\text{Μέγιστη τιμή εξόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εξόδου}}{\text{Μέγιστη τιμή εισόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εισόδου}}$$

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

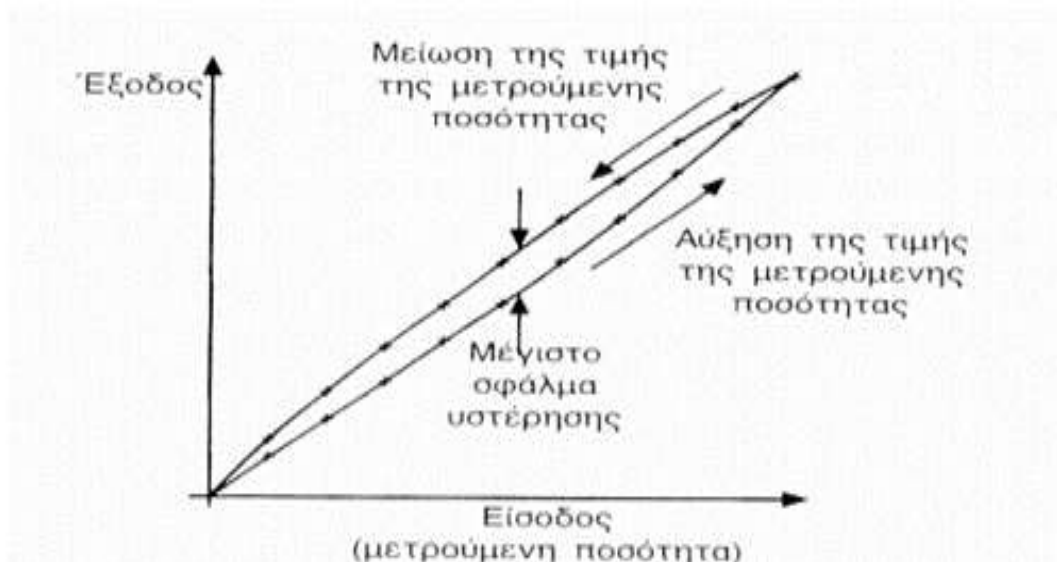
Ως Ευσταθία ορίζεται το σφάλμα εξόδου όταν η τιμή εισόδου παραμένει σταθερή για κάποιο χρονικό διάστημα.

- ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ

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

- ΥΣΤΕΡΙΣΗ

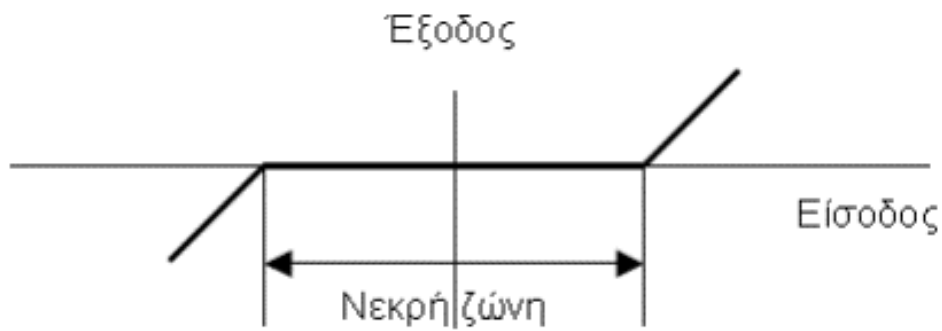
Το μέγεθος του αναμενόμενου σφάλματος σε σχέση με τη μετρήσιμη τιμή (όταν το ερέθισμα ακολουθεί διακύμανση). Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη τιμή που μετρά ένας αισθητήρας να αυξάνεται με σταθερό ρυθμό και όταν φτάσει στην μέγιστη τιμή της ξεκινά να μειώνεται με τον ίδιο σταθερό ρυθμό μέχρι το μηδενισμό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



Σχήμα 2-3 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.



Σχήμα 2-4 Νεκρή ζώνη

Ικανότητες αίσθησης

Οι αισθητήρες είναι σε θέση να αναγνωρίσουν χαρακτηριστικά όπως:

- μετακίνηση
- επιτάχυνση
- πίεση
- υγρασία
- θερμοκρασία
- παραμορφώσεις
- ακουστικές εκπομπές
- ηλεκτρικό δυναμικό
- χρόνο κ.α.

2.3.2 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.

2.3.3 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.

2.3.4 Σύνθετοι αισθητήρες επιτάχυνσης(1-D, 2-D, 3-D)

Οι αισθητήρες που διατίθενται στην αγορά, ανάλογα τους άξονες που είναι σε θέση να μετρήσουν την αναπτυσσόμενη επιτάχυνση είναι τριών τύπων και διακρίνονται στα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα, τα οποία μετρούν την μετακίνηση στη διεύθυνση στην οποία είναι τοποθετημένα, τα διαξονικά, που μετρούν τη επιτάχυνση στην επιφάνεια, δηλαδή αποτελούνται από δύο κάθετους μεταξύ τους άξονας και τα τριαξονικά τα οποία μετρούν την επιτάχυνση και στις τρεις διευθύνσεις x, y, z. Επίσης κάποια επιταχυνσιόμετρα είναι σε θέση να μετράνε και τις ροπές που αναπτύσσονται στους άξονες δηλαδή ως προς x, y, z. Στην αγορά ένας 3D αισθητήρας θεωρείται ότι έχει 6 άξονες μέτρησης εφόσον διαθέτει και μέτρηση ροπών.

Παραδείγματα αισθητήρων παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

2.3.5 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

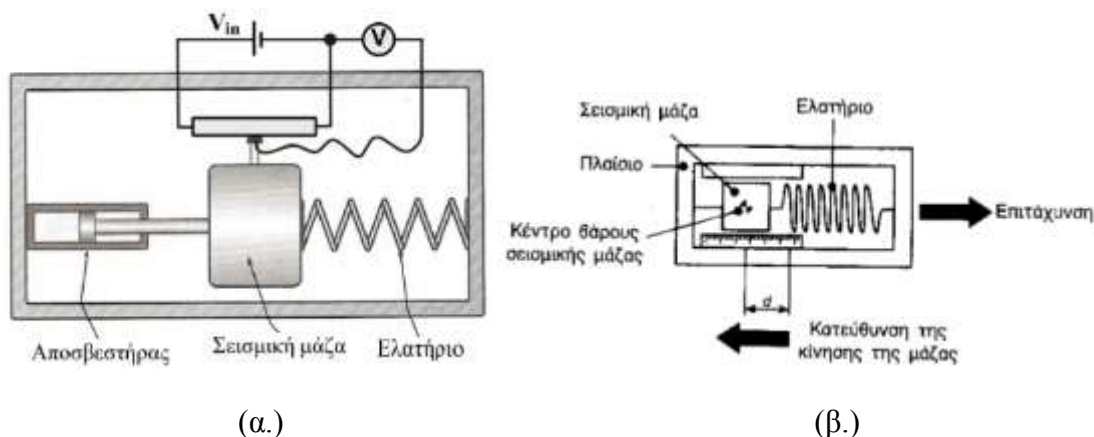
2.3.6 Αισθητήρες επιτάχυνσης

«Στην απλούστερη περίπτωση, ένας αισθητήρας επιτάχυνσης αποτελείται από μία μάζα που συναρμολογείται πάνω σε σπειροειδή ελατήρια με τέτοιο τρόπο ώστε η μάζα να μπορεί να μετακινηθεί σε μία διεύθυνση. Αν υπάρξει επιτάχυνση a σε αυτή την διεύθυνση, η μάζα m μετακινείται κατά απόσταση x . Αυτή η αλλαγή στη θέση μπορεί να μετρηθεί μέσω διαφόρων μεθόδων και έτσι μπορούμε να έχουμε την τιμή της τρέχουσας επιτάχυνσης.» (Glück, 2005)

Επιτάχυνση ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας. Οι μονάδες του είναι το m/s^2 όμως μπορεί επίσης να προσδιοριστεί με βάση την επιτάχυνση βαρύτητας g η οποία ισούται με $9.81 m/s^2$.

Το επιταχυνσιόμετρο είναι μία συσκευή η οποία μπορεί να μετρήσει τη μηχανική κίνηση και να τη μετατρέψει σε ηλεκτρική μορφή έξοδο. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο επιταχυνσιόμετρο μπορεί να είναι στατικές ή δυναμικές. Στατική δύναμη θεωρείται η επιτάχυνση βαρύτητας g ενώ δυναμικές είναι οι δυνάμεις που προέρχονται από αλλαγές στην ταχύτητα ή στην διεύθυνση της κίνησης όπως επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, στροφές κ.α.

2.3.7 Από τι αποτελείται και πως λειτουργεί ένας επιταχυνσιογράφος



Σχήμα 2-5 (α.), (β.) Διάφορες μορφές επιταχυνσιόμετρων

Ένα επιταχυνσιόμετρο αποτελείται από ένα περίβλημα το οποίο πακτώνεται στην προς μέτρηση επιφάνεια. Στο εσωτερικό του υπάρχει σώμα με μάζα το οποίο στηρίζεται στο περίβλημα μέσω ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα. Ο αποσβεστήρας είναι ένα σύστημα που η δύναμη αντίδρασης του είναι ανάλογη της ταχύτητας μετατόπισης. Για την αποφυγή άσκοπων καταγραφών η έναρξη της αποθήκευσης των δεδομένων συμβαίνει με την πρώτη ισχυρή διέγερση που θα συμβεί στο υλικό και σταματά με την ασθενέστερη. Η λειτουργία του βασίζεται στην εξίσωση κίνησης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή στον οποίο επιβάλλεται μία δύναμη. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου συστήματος είναι η μάζα του, η δυσκαμψία του ελατηρίου και ο συντελεστής απόσβεσης του αποσβεστήρα.

2.3.8 Κατηγορίες αισθητήρων επιτάχυνσης ανάλογα με τη λειτουργία τους

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορεί να είναι διαφόρων τύπων ανάλογα με τη λειτουργία τους. Μπορεί να βασίζονται είτε στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, με χρήση πιεζοκρύσταλλο ο οποίος πιέζεται από μάζα ανάλογη της επιτάχυνσης που δέχεται αυτή και παράγει τάση λόγω πιεζοηλεκτρικού φαινομένου ανάλογη της επιτάχυνσης, είτε τη μέτρηση των αλλαγών στην χωρητικότητα ενός πυκνωτή που παρέχει μέτρηση επιτάχυνσης, είτε με τη η χρήση της αλλαγής της αντίστασης κάποιου υλικού η οποία είναι ανάλογη της πίεσης που δέχεται, είτε με χρήση των ιδιοτήτων του φωτός κ.α.

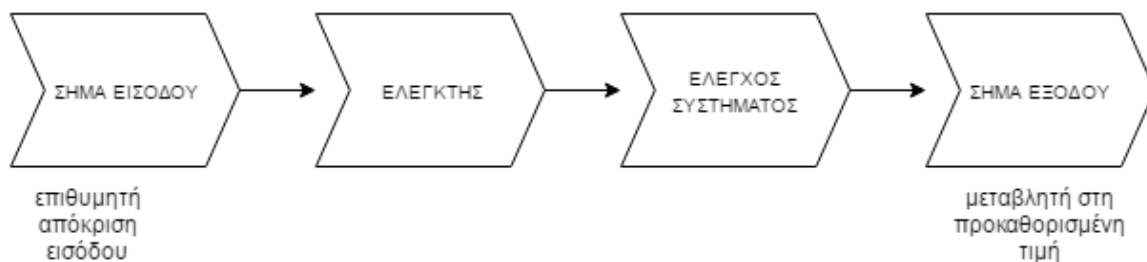
Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα το σύστημα ελέγχου τους:

1. Επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού βρόγχου
2. Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου

Αναλυτικά:

- Επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού βρόγχου

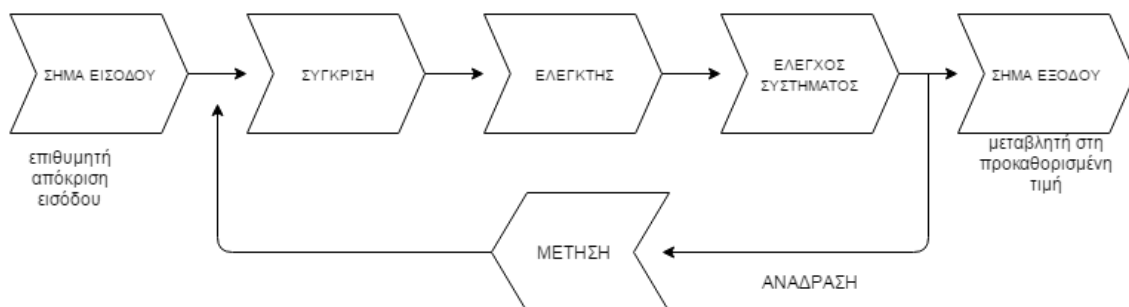
Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου επικοινωνούν με το περιβάλλον από την είσοδο και την έξοδο και αποτελούνται από κάποιες βαθμίδες οι οποίες είναι η είσοδος, ο ελεγκτής, το σύστημα υπό έλεγχο και η έξοδος. Η είσοδος στη προκειμένη περίπτωση είναι η διέγερση του συστήματος και η έξοδος το αποτέλεσμα προς το χρήστη. Ο τρόπος λειτουργίας βασίζεται στο ότι η τιμή της παραμέτρου στην είσοδο του συστήματος είναι προκαθορισμένη και δεν αλλάζει ακόμη και αν η πληροφορία εξόδου είναι ανακριβής, το οποίο αποτελεί μειονέκτημα της μεθόδου. Είναι ένα σύστημα χωρίς ανάδραση όπου ανάδραση ορίζεται ως η ανατροφοδότηση της εξόδου ενός συστήματος στην είσοδο του. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η ταχύτητα εκτέλεσης καθώς και το χαμηλό του κόστος.



Σχήμα 2-6 Σύστημα ανοιχτού βρόγχου

- Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου

Τα συστήματα κλειστού βρόγχου εκμεταλλεύονται την ιδιότητα της ανάδρασης. Στη περίπτωση αυτή η τιμή της εξόδου επηρεάζει άμεσα την τιμή της εισόδου. Το σύστημα κλειστού βρόγχου μετράει την τιμή της παραμέτρου στην έξοδο και αν σε σύγκριση με την επιθυμητή τιμή είναι διαφορετικές η αφαίρεση τους θεωρείται ως σφάλμα. Το σφάλμα αυτό στη συνέχεια τροποποιείται σε σήμα ελέγχου και ρυθμίζει την έξοδο του συστήματος έως ότου πλησιάσει το μηδέν ώστε να προκύπτουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτό ανοιχτού βρόγχου όπως το ότι είναι αυτορρυθμιζόμενο, ελαχιστοποιεί τα σφάλματα, δεν απαιτεί συνεχή τη παρουσία του χειριστή κ.α. Κάποιο από τα μειονεκτήματα ωστόσο, είναι το υψηλό τους κόστος που έχει η δημιουργία και λειτουργία του.



Σχήμα 2-7 Σύστημα κλειστού βρόγχου

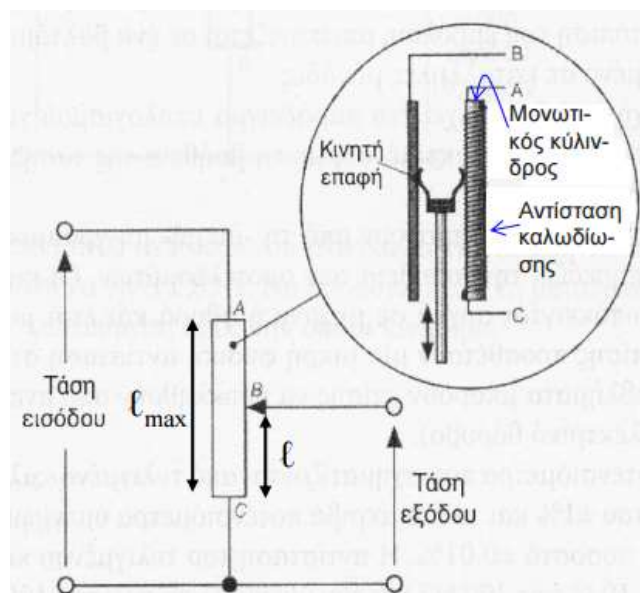
2.3.8.1 Επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού βρόγχου

Παρακάτω θα δούμε κάποια επιταχυνσιόμετρα που βασίζονται στην τεχνολογία ανοιχτού βρόγχου. Αυτά είναι:

1. Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο
2. Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης (ελεύθερη ή προσκολλημένη)
3. Επιταχυνσιόμετρα με γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (ΓΜΔΜ)
4. Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα
5. Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα
6. Επιταχυνσιόμετρα οπτικών ινών

- Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο

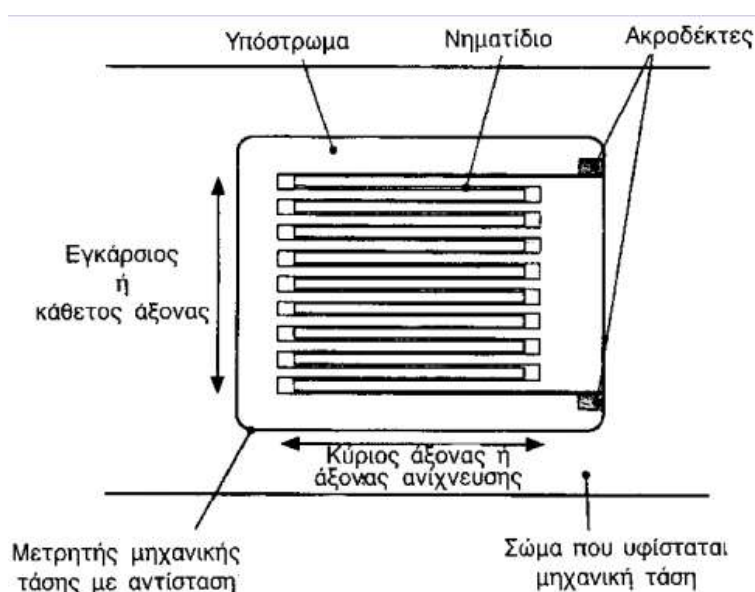
Σε αυτό το είδος επιταχυνσιόμετων χρησιμοποιείται ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της μετατόπισης θέσης της μάζας ως προς το περίβλημα. Η λειτουργία του ποτενσιόμετρου βασίζεται στην απόσταση που θα πάρει το B από το C (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα). Η αντίσταση στηρίζεται στο πλαίσιο του αισθητήρα ενώ η κινητή επαφή κινείται ταυτόχρονα με τη μάζα. Κάποια από τα χαρακτηριστικά μέτρησης είναι η δυνατότητα καταγραφής επιταχύνσεων μερικών δεκάδων g με εύρος συχνοτήτων μερικών δεκάδων Hz, ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου $\pm 1\%$ και ακρίβεια γύρω στο 1% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20 °C.



Σχήμα 2-8 Παράδειγμα λειτουργίας ποτενσιόμετρου

- Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης

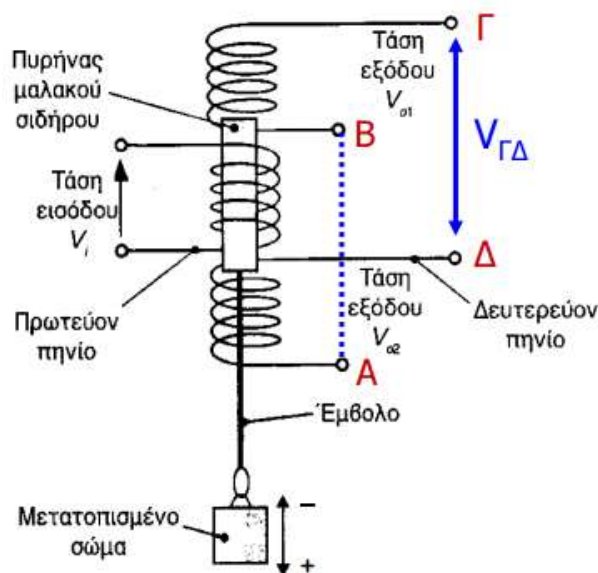
Τα αισθητήρια που λειτουργούν με μετατροπέα πιεζοαντίστασης, η πιεζοαντίσταση παίρνει το ρόλο του ελατηρίου. Προσκολλώνται στην προς μέτρηση επιφάνεια και μετρά τις αλλαγές τάσης λόγω θλίψης ή εφελκυσμού. Καθώς μεταβάλλονται οι διαστάσεις του μετρητή αλλάζουν και οι ηλεκτρικές του ιδιότητες και αυτό υποδεικνύει μετατόπιση. Κάποια από τα χαρακτηριστικά μέτρησης είναι η δυνατότητα καταγραφής επιταχύνσεων μερικών δεκάδων g με εύρος συχνοτήτων μερικών δεκάδων Hz, ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου $\pm 2\%$ και ακρίβεια γύρω στο 1% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20 °C



Σχήμα 2-9 Επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης

- Επιταχυνσιόμετρα με γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή(LVDT)

Τα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιούν γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή λειτουργούν όταν εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει στο πρωτεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή, παράγεται εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και λόγω του νόμου Faraday επάγεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο. Μετά από αυτό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα και προκαλεί ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο σε φάση και με ίδιο πλάτος. Για τη μέτρηση των μετατοπίσεων πρέπει ο πυρήνας να συνδέεται με τα προς μέτρηση αντικείμενα. Τα πηνία συνδέονται με το πλαίσιο και ο σπλισμός με τη μάζα. Χαρακτηριστικά μέτρησης είναι η δυνατότητα καταγραφής επιταχύνσεων μερικών δεκάδων g με εύρος συχνοτήτων μερικών δεκάδων Hz και ακρίβεια γύρω στο 2% πλήρους απόκλισης για θερμοκρασία γύρω στους 20 °C.



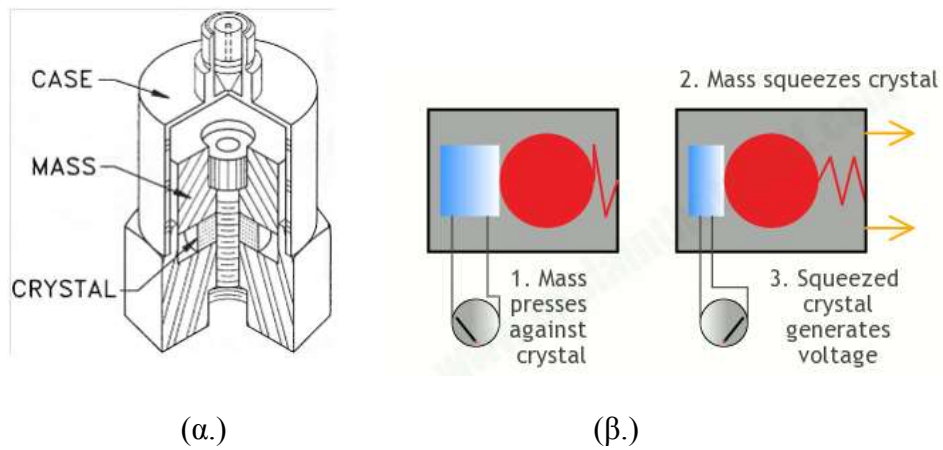
Σχήμα 2-10 Παράδειγμα αισθητήρα ΓΜΑΜ

- Ημιαγωγικά επιταχυνσιόμετρα

Η λειτουργία των ημιαγωγικών επιταχυνσιόμετρων γίνεται με χρήση ημιαγωγού μετρώνας μετατοπίσεις και αδρανειακές δυνάμεις και έχουν ως δυνατότητα μέτρησης επιτάχυνσης μερικών δεκάδων g.

- Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα

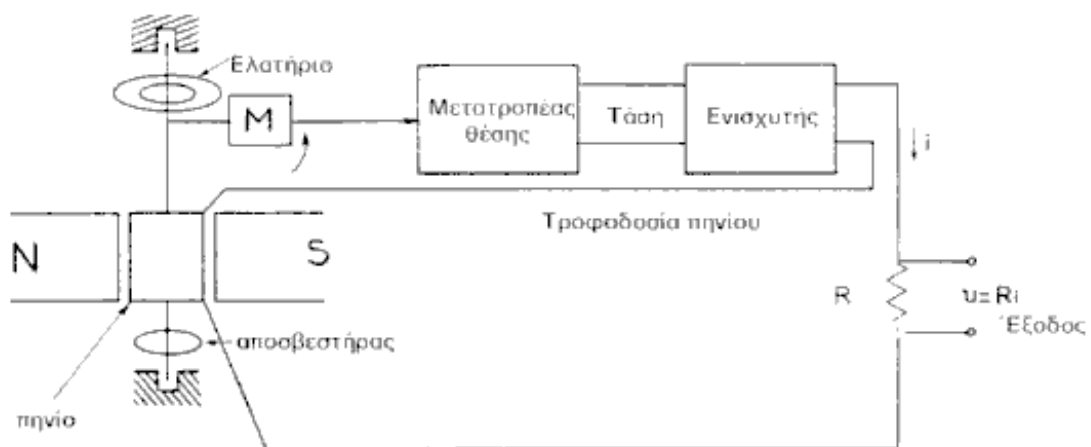
Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα λειτουργούν με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο όταν πιέζεται ο κρύσταλλος εμφανίζεται ηλεκτρικό φορτίο αντίθετο πρόσημου στις πλευρές του, το οποίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης που του ασκείται μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια που δημιουργείται σε ηλεκτρική. Η μετατροπή γίνεται μέσω υλικού κρυσταλλικής δομής, π.χ. με κρυστάλλους χαλαζία, τιτανικό βάριο. Όπως στα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιείται η γενική μέθοδος αίσθησης η οποία λειτουργεί με βάση την επιτάχυνση που αναπτύσσεται πάνω σε μια μάζα που είναι αναρτημένη από ένα ελατήριο. Αναλυτικότερα αποτελείται από μία μάζα η οποία είναι συνδεδεμένη μέσω βίδας με τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στο εσωτερικό του πλαισίου. Όταν το σύστημα δέχεται δύναμη επιτάχυνσης, η μάζα πιέζει τον κρύσταλλο και μετρώντας τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση που υφίσταται το σύστημα. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα αισθητήρων χρησιμοποιούνται ευρέως καθώς έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως μεγάλη τάση εξόδου, μεγάλη φυσική συχνότητα ω (μπορούν να εντοπίσουν απότομες επιταχύνσεις), έχουν μικρό όγκο και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές συχνότητες. Το μειονέκτημα τους είναι η δυσκολία τους στη μέτρηση σταθερής επιτάχυνσης.



Σχήμα 2-11 (α.) Τομή πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, (β.) Λειτουργία αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού συστήματος

2.3.8.2 Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου

Τα κλειστού βρόγχου επιταχυνσιόμετρα είναι περισσότερο ακριβείς σε σχέση αυτά ανοιχτού βρόγχου. Αποτελούνται από μία μάζα, στην οποία όταν εμφανιστεί επιτάχυνση γ , ασκείται μία αδρανειακή δύναμη $F = M \times \gamma$ που τείνει να κινήσει τη μάζα. Όταν δεν υπάρχει επιτάχυνση η μάζα αυτή βρίσκεται στην αρχική της θέση, δηλαδή μια θέση αναφοράς και κάθε μετακίνηση από αυτή δηλώνει κάποια αλλαγή στη κίνηση. Η μετατόπιση μετριέται από το μετατροπέα θέσης και με μετατροπή του σε ηλεκτρικό σήμα που μετά από ενίσχυση μεταφέρεται από έναν ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα, με ένταση ανάλογη της επιτάχυνσης που έχει δεχτεί η μάζα, το σήμα γίνεται δύναμη. Στόχος της νεοδημιουργηθείσας αυτής δύναμης είναι να εφαρμοστεί στη μάζα του συστήματος και να το ισοροπήσει. Παρακάτω παραθέτεται ένα σύστημα κλειστού βρόγχου όπως έχει αναλυθεί.



Σχήμα 2-12 Σύστημα κλειστού βρόγχου

Χαρακτηριστικά στοιχεία των επιταχυνσιόμετρων αυτού του τύπου είναι τα εξής:

- Περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας μέχρι 100 Hz.
- Εύρος μετρήσεων επιτάχυνσης από μερικά g έως αρκετές δεκάδες g
- Τάση εξόδου για μέγιστη επιτάχυνση είναι περίπου $\pm 7.5V$
- Ευαισθησία στη κάθετη διεύθυνση είναι 0.01-0.1%
- Ακρίβεια έχουν καλύτερη του 0.1% της πλήρους κλίμακας
- Θερμοκρασιακή επίδραση στην ευαισθησία είναι πολύ μικρή, περίπου 0.02% / °C
- Βάρος ίσο με μερικές δεκάδες γραμμάρια

2.3.9 Επιλογή κατάλληλου αισθητήρα επιτάχυνσης

Η επιλογή του καταλληλότερου αισθητήρα επιτάχυνσης κρίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της υπό παρακολούθηση δομής. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για την επιλογή του είναι:

- Το εύρος πλάτους επιτάχυνσης (μετριέται σε ποσοστό του g)
- Το εύρος συχνοτήτων (μετριέται σε Hz)
- Περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία κ.α.)

Τα επιταχυνσιόμετρα που βρίσκονται διαθέσιμα προς αγορά ικανοποιούν διαφορετικές παραμέτρους όσον αφορά την ικανότητα μέτρησης. Ανάλογα το είδος της επιτάχυνσης που θέλουμε να καταγραφεί, επιλέγουμε τον αντίστοιχο αισθητήρα επιτάχυνσης, ο οποίος θα δώσει τα εγκυρότερα αποτελέσματα. Σημαντικό λοιπόν κριτήριο, όπως είδαμε και παραπάνω, είναι το εύρος συχνοτήτων. Σε μία σύντομη σεισμική διέγερση καταλληλότερος είναι ένας επιταχυνσιογράφος με γρήγορη απόκριση ο οποίος θα καταγράψει το γεγονός χωρίς σφάλματα, ενώ σε μία σεισμική δόνηση αργής ταλάντωσης, καλύτερα αποτελέσματα θα δώσει ο αισθητήρας με αργή απόκριση.

2.3.10 Συστήματα επικοινωνίας και καταγραφής

- Αισθητήρες

Οι αισθητήρες επιτάχυνσης, όπως είδαμε και αναλύσαμε παραπάνω ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους διακρίνονται σε πολλούς τύπους για να καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες. Σε ένα σύστημα παρακολούθησης οι αισθητήρες ανάλογα τον τύπο τους μπορεί να είναι είτε ενεργητικοί, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται η τροφοδοσία τους με ρεύμα για να λειτουργήσουν, είτε παθητικοί όπου παράγουν μόνοι τους την ενέργεια που απαιτείται για την

λειτουργία και καταγραφή των δεδομένων. Επίσης μία άλλη διάκριση που μπορεί να γίνει είναι ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων στο σύστημα ο οποίος μπορεί να πραγματοποιηθεί ενσύρματα είτε ασύρματα. Οι ενσύρματοι αισθητήρες για τη μεταφορά του σήματος απαιτούν τη σύνδεση τους με τον καταγραφέα μέσω καλωδίων, ενώ οι ασύρματοι λειτουργούν με βάση την τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας wifi μέσω δικτύου για σύνδεση με κατάλληλο καταγραφέα και μεταφορά των δεδομένων που έχουν συλλεγεί από τις καταγραφές.

Παραδείγματα αισθητήρων παρατίθενται στο παράρτημα Α.

- Ενισχυτής σήματος στον αισθητήρα

Για τον διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο που πιθανόν αναπτύσσεται, υπάρχουν οι ενισχυτές σήματος. Οι ενισχυτές σήματος είναι απαραίτητοι για την ενίσχυση του σήματος πριν φτάσει στον καταγραφέα ούτως ώστε τα δεδομένα να είναι σαφή και αξιόπιστα. Σημαντική απαίτηση είναι η αντίσταση εισαγωγής του να είναι μεγαλύτερη από αυτή του αισθητήρα ούτως ώστε να μην απαιτεί μεγάλο ποσό ενέργειας απ' αυτόν επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο τη λειτουργία του και να έχει εύρος συχνοτήτων υψηλότερο από το όργανο αίσθησης. Οι ενισχυτές, ανάλογα τον τρόπο λειτουργίας του χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Ενισχυτές με ευαισθησία στην φόρτιση (π.χ. Πιεζοηλεκτρικό)
 - ❖ Ευαισθησία στη μεταβολή φορτίου στην έξοδο του αισθητήρα
 - ❖ Δεν επηρεάζονται από το μήκος του καλωδίου μεταξύ ενισχυτή καταγραφέα
2. Ενισχυτές με ευαισθησία στη τάση(π.χ. Πιεζοαντίστασης)
 - ❖ Ευαισθησία στην μεταβολή της τάσης (Το εξαγόμενο ρεύμα είναι ανάλογο της μεταβολής της τάσης.)
 - ❖ Επηρεάζεται από το μήκος των καλωδίων μεταξύ ενισχυτή καταγραφέα

- Καλώδια

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις ενός συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας πρέπει να είναι ηλεκτρικά αόρατα πράγμα που σημαίνει ότι δεν πρέπει να παρεμβαίνουν και να επηρεάζουν το σήμα με θόρυβο.

Τα χαρακτηριστικά που τα διακρίνουν είναι:

- ❖ Αντίσταση/Μονάδα μήκους(συνάρτηση της διαμέτρου του καλωδίου)
- ❖ Χωρητικότητα/Μονάδα μήκους

Οι πλέον χρησιμοποιούμενοι τύποι καλωδίων είναι οι εξής:

1. Κοινό καλώδιο
 - ❖ Καλύπτει μικρά μήκη
 - ❖ Έχει πλαστική ή ελαστική μόνωση
2. Ομοαξονικό καλώδιο
 - ❖ Αποτελείται από έναν (ή περισσότερους) αγωγούς ρεύματος, οι οποίοι περιβάλλονται με μονωτή αγωγιμότητας που γειώνεται για μείωση θορύβου.

3. Μονωμένα καλώδια πολλών αγωγών
 - ❖ Δεν υπάρχουν παρεμβολές από θόρυβο
 - Καταγραφείς

Οι καταγραφείς είναι συσκευές οι οποίοι καταγράφουν το εισερχόμενο σήμα που προέρχεται από τον αισθητήρα και στη συνέχεια το καταστούν διαθέσιμο για επεξεργασία από τον χρήστη. Οι καταγραφείς μπορεί να είναι αναλογικοί είτε ψηφιακοί. Οι αναλογικοί καταγραφείς καταγράφουν συνεχώς το σήμα, αλλά για την διαχείριση και χρήση των δεδομένων απαιτείται ψηφιοποιητής. Αντίθετα οι ψηφιακοί καταγραφείς παρέχουν απευθείας τα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή. Οι ψηφιακοί αισθητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται πλέον κατά κόρον και λειτουργούν ως εξής:

1. Δέχονται την μεταβολή τάσης του ρεύματος από τον αισθητήρα και εν συνεχεία τη μετατρέπουν στις προκαθορισμένες μονάδες, μετρήσιμου πλέον μεγέθους.
2. Τα μετρήσιμα δεδομένα αποθηκεύονται στην μνήμη που διαθέτει ο καταγραφέας, η οποία μπορεί να είναι μόνιμος ή αφαιρούμενος σκληρός δίσκος.

Θεωρητικά, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, μεταβάλλοντας δηλαδή την τάση να μεταβάλλεται αντίστοιχα και το μετρούμενο μέγεθος, ένας καταγραφέας θα έπρεπε να είναι σε θέση να μετρήσει διάφορα μεγέθη. Στην πράξη όμως αυτό καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία και έτσι οι κατασκευαστές αισθητήρων παρέχουν αντίστοιχους καταγραφείς κατάλληλους για συγκεκριμένα μεγέθη.

Η δυσκολία κρίνεται λόγω των διάφορων οργάνων συλλογής δεδομένων τα οποία μπορεί να απαρτίζουν έναν καταγραφέα και είναι τα εξής:

- ❖ Συσκευή τροφοδοσίας
- ❖ Συσκευή μετασχηματισμού
- ❖ Συσκευή μείωσης τάσης(από A/C 220V σε D/C 12V)
- ❖ Τυχών απαιτούμενος ενισχυτής σήματος
- ❖ Συσκευής αποστολής δεδομένων μέσω δικτύου (modem)
- ❖ Συσκευή δορυφόρου
- ❖ Βύσματα και διακόπτες λειτουργίας
 - Τα βύσματα εξόδου της τάσης και εισαγωγής του σήματος στον καταγραφέα που προέρχεται από τον αισθητήρα, διαμορφώνονται με βάση τις απαιτήσεις του αισθητήρα. Έχουν δηλαδή τάση εξόδου και τάση σήματος προσαρμοσμένες ανάλογα τον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα που χρησιμοποιείται.

Οι καταγραφείς τελευταίας τεχνολογίας έχουν πολλά κανάλια με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να παρέχουν δυνατότητα σύνδεσης αρκετών αισθητήρων (12-16). Επίσης σε κατασκευές όπου κρίνεται η ανάγκη για χρήση μεγαλύτερου αριθμού αισθητήρων, μπορεί να συνδεθεί ο καταγραφέας με άλλους αντίστοιχης τεχνολογίας και να παρέχονται ταυτόχρονες μετρήσεις μεγάλου αριθμού οργάνων αίσθησης.

Οι καταγραφείς μπορούν να ρυθμιστούν καθώς και να ελεγχθούν μέσω κατάλληλου λογισμικού που τους συνοδεύει. Μέσω του λογισμικού αυτού μπορούν να γίνουν οι παρακάτω ρυθμίσεις και έλεγχοι:

- ❖ Η θύρα σύνδεσης του αποθηκευτικού μέσου
- ❖ Το πλήθος των καταγραφών που εκτελούνται στην μονάδα του χρόνου
- ❖ Ο τύπος και το πλήθος των αισθητήρων που είναι συνδεδεμένοι με κάθε είσοδο
- ❖ Ο συντελεστής αναγωγής της μεταβολής της τάσης σε μετρούμενο μέγεθος
- ❖ Οι αντίστοιχες μονάδες μετατροπής
- ❖ Το μέγεθος της απόκρισης από το οποίο και μετά θα γίνει η καταγραφή
- ❖ Τα κανάλια για τα οποία θα ενεργοποιείται η καταγραφή
- ❖ Το χρονικό εύρος της αποθήκευσης, πριν και μετά την καταγραφή έναρξης
- ❖ Έλεγχος καλής λειτουργίας συστήματος

Παραδείγματα των συσκευών που αναλύθηκαν παραπάνω βρίσκονται στο Παράρτημα Β.

3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

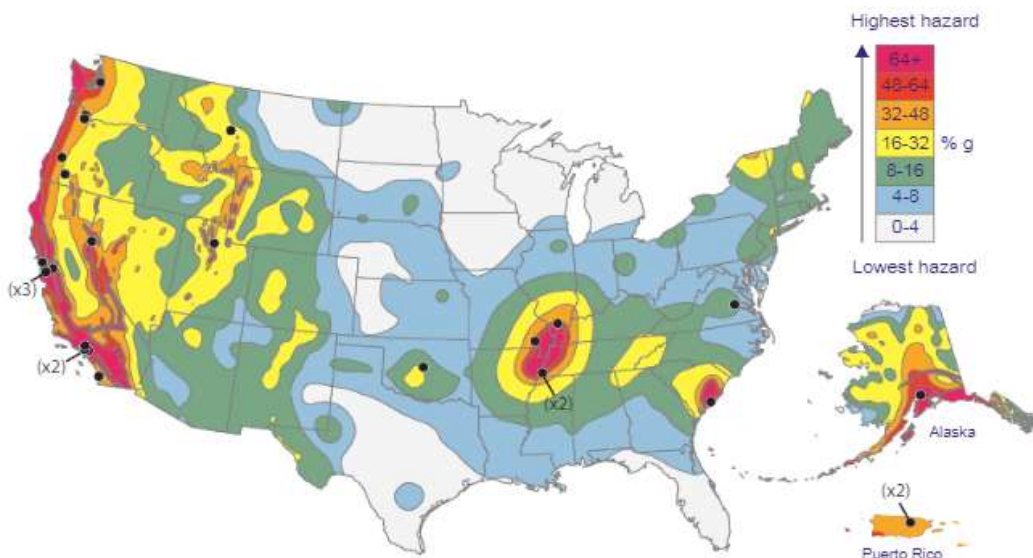
3.1 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας, σε πραγματικό χρόνο, των νοσοκομείων των Βετεράνων.

3.1.1 Γενικά

Με το σεισμό του 1971, με μέγεθος 6.6 ρίχτερ, ο οποίος χτύπησε την κοιλάδα του San Fernando της νότιας Καλιφόρνια, καταδαφίστηκαν 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.

3.1.1.1 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 δείκτη 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.



Σχήμα 3-1 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 μετρείται σε ένα ποσοστό της επιτάχυνσης βαρύτητας g επί της εκατό.

3.1.1.2 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.

3.1.1.3 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 ανθεκτικότητα 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.

3.1.1.4 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

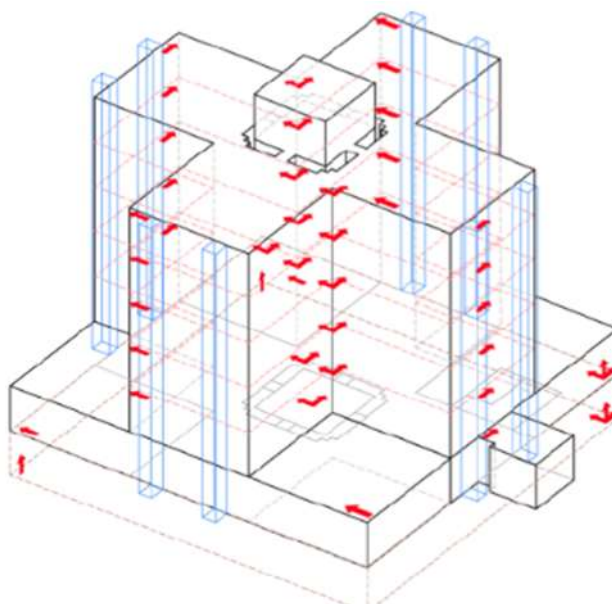
Σχήμα 3-2 Πίνακας ενοργανωμένων νοσοκομείων βετεράνων

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον τρόπο ενοργάνωσης κάποιων εξ αυτών.

3.1.2 Νοσοκομείο βετεράνων στο San Diego της Καλιφόρνια



(α.)



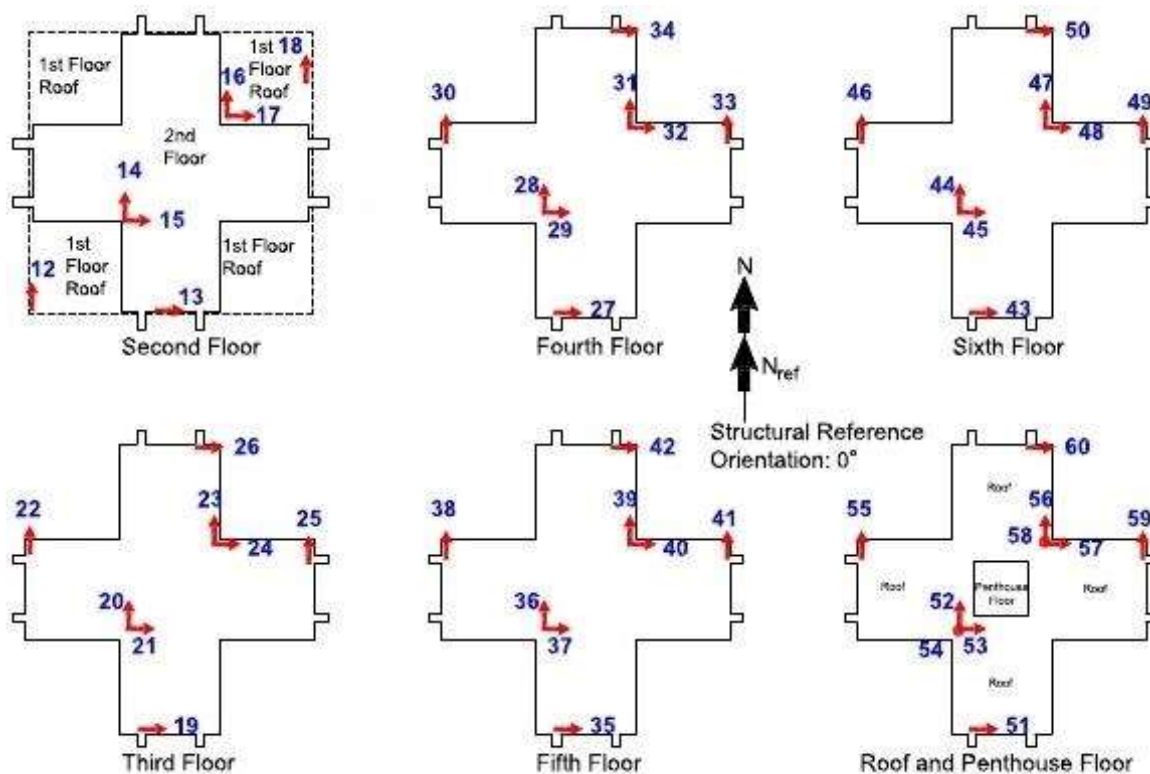
(β.)

Σχήμα 3-3 (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 πτερύγια. Κάθε πτερύγιο 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.

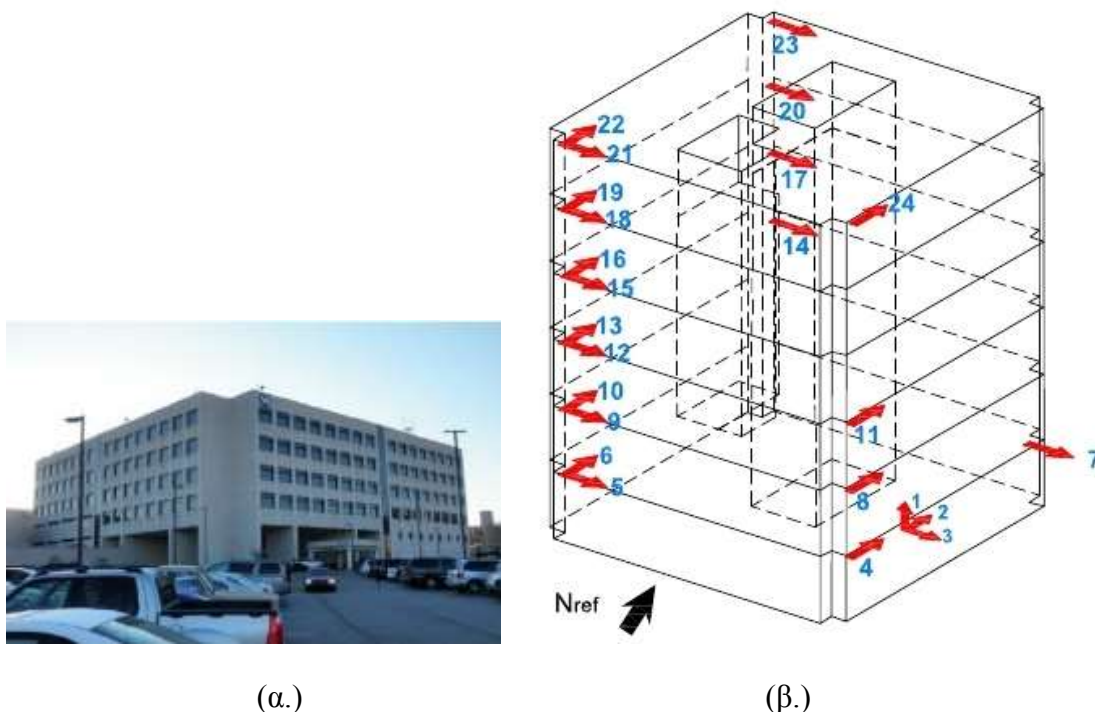
Η ενοργάνωση έχει γίνει με 60 επιταχυνσιόμετρα κατανεμημένα στους ορόφους του κτιρίου. Αυτά είναι επιταχυνσιόμετρα Force-balance, χρησιμοποιούνται σε έργα πολιτικού μηχανικού και μπορούν να μετρήσουν επιταχύνσεις πάνω από 4g. Έχοντας ρυθμιζόμενο πλήρους κλίμακας φάσμα καταγραφής από 0.2 έως 4 g, καθιστά 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 μετρείται 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.



Σχήμα 3-4 Κατόψεις οροφών με τις θέσεις των αισθητήρων

3.1.3 Νοσοκομείο βετεράνων στο Μέμφις του Τένεσι ,κέντρο νοσηλείας

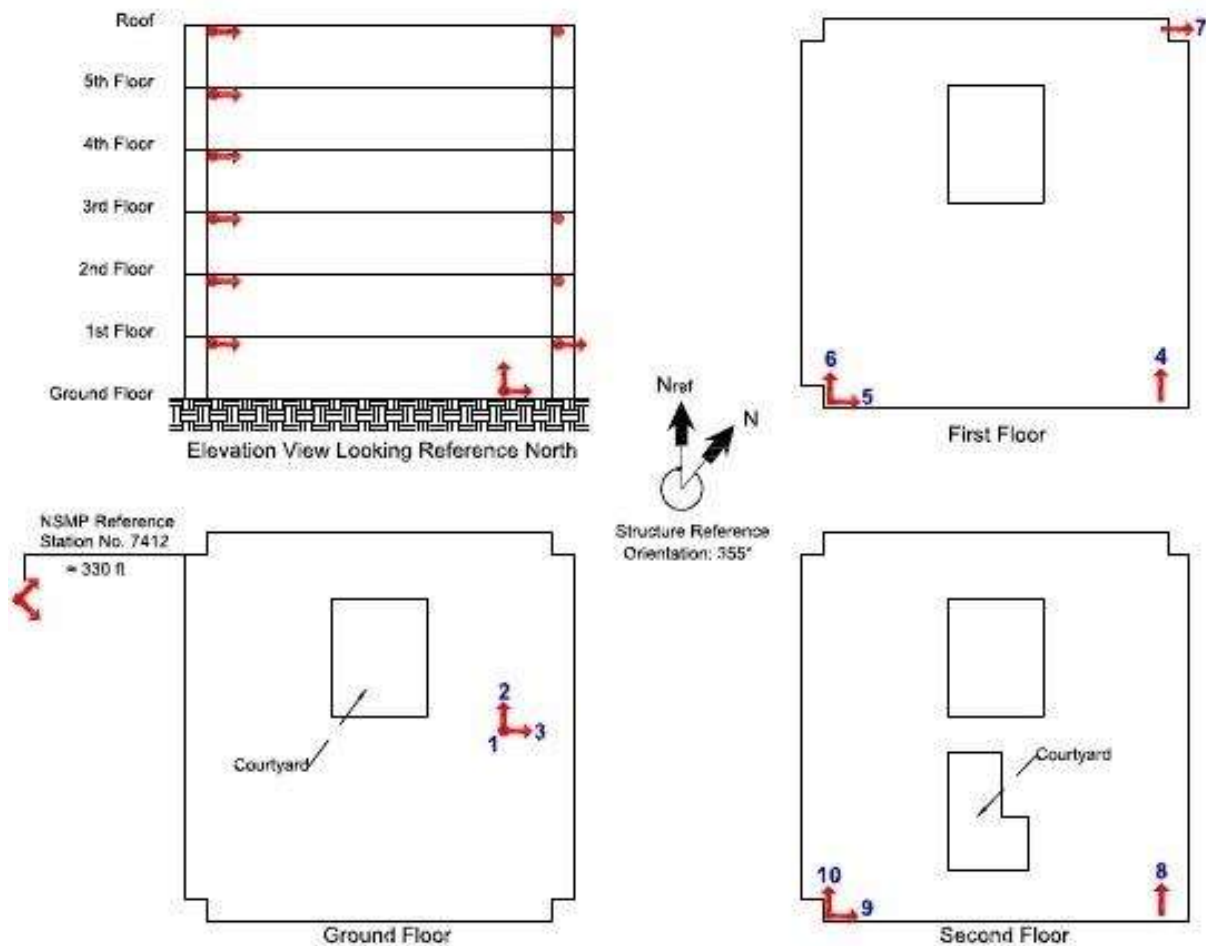


Σχήμα 3-5 (α) Νοσοκομείο βετεράνων Μέμφις Τένεσι , (β) Ενοργανωμένο προσομοίωμα κτιρίου Μεμφις

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 καταγράψει 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 δευτέρου 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.



Σχήμα 3-6 Όψεις και κατόψεις ενοργανωμένου κτιρίου Μεμμις



Σχήμα 3-7 Ενοργανωμένες κατόψεις κτιρίου Μεμψις

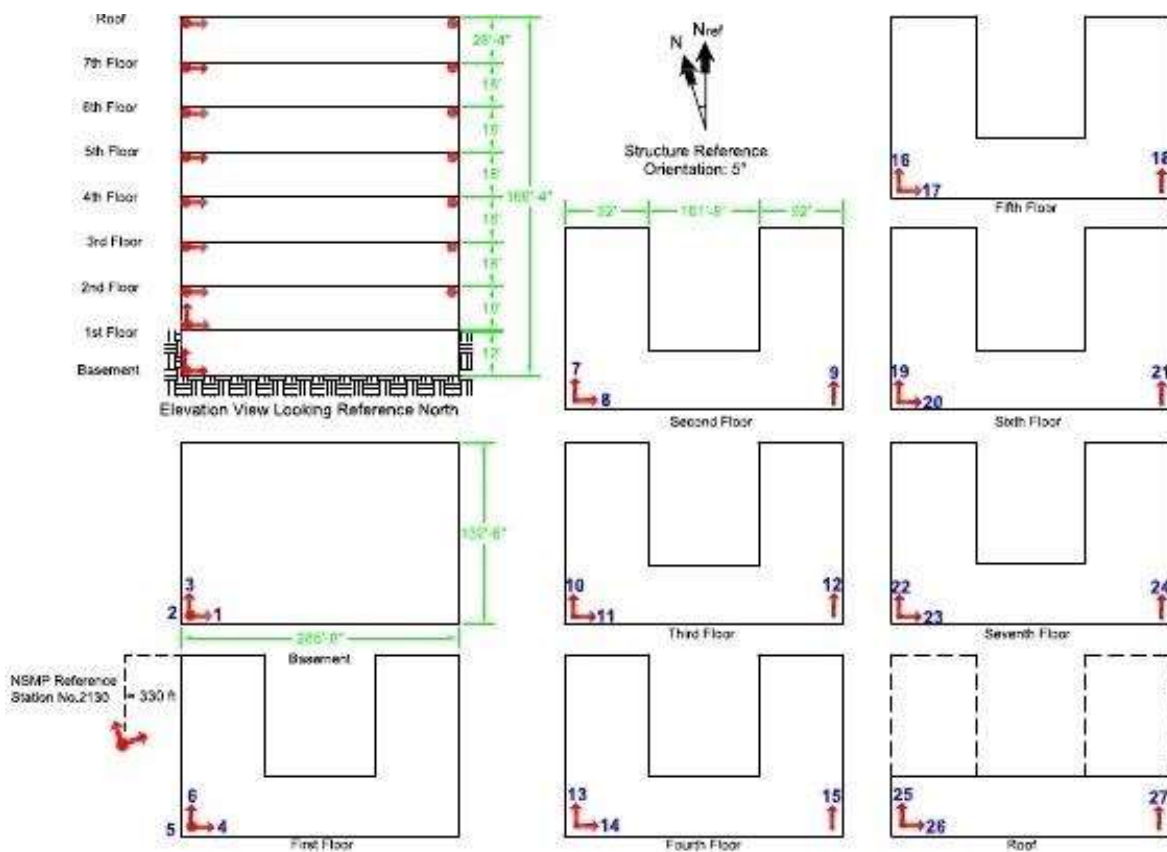
3.1.4 Νοσοκομείο βετεράνων στο Σιάτλ της Ουάσινγκτον, πτέρυγα διάγνωσης και θεραπείας



Σχήμα 3-8 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 ομοιόμορφα 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.



Σχήμα 3-9 Διάταξη αισθητήρων στο νοσοκομείο του Σιάτλ

3.1.5 Νοσοκομείο βετεράνων Marion, Illinois

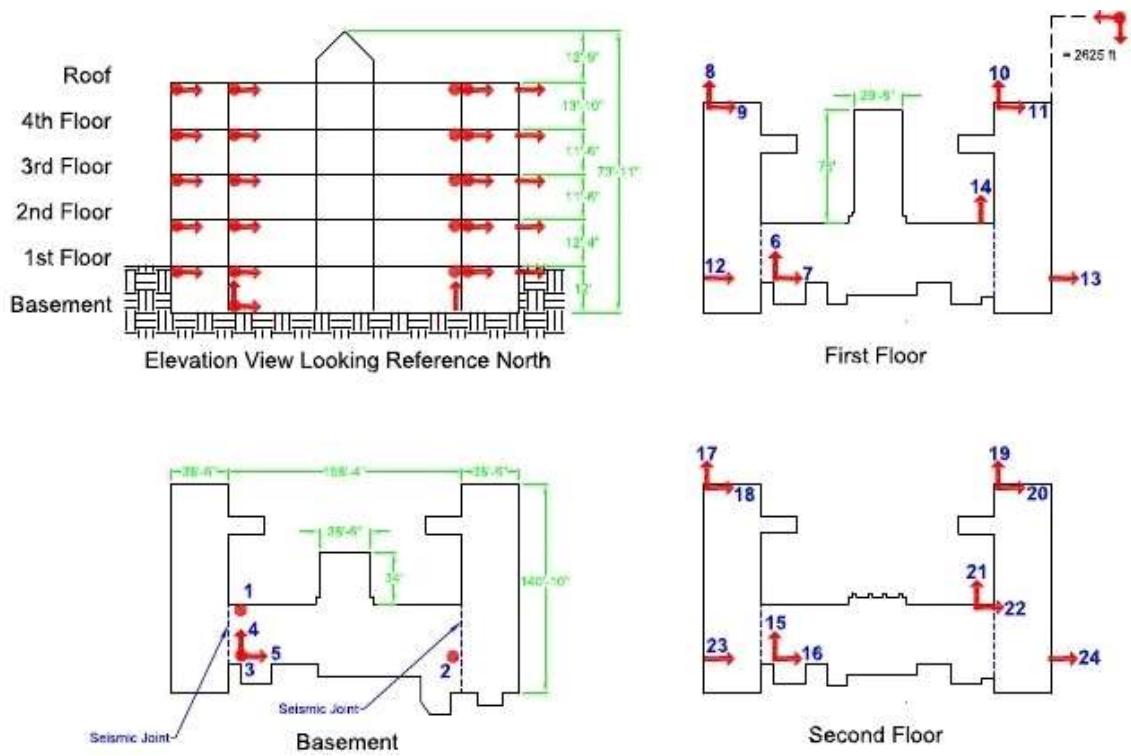


Σχήμα 3-10 Νοσοκομείο βετεράνων Marion Illinois

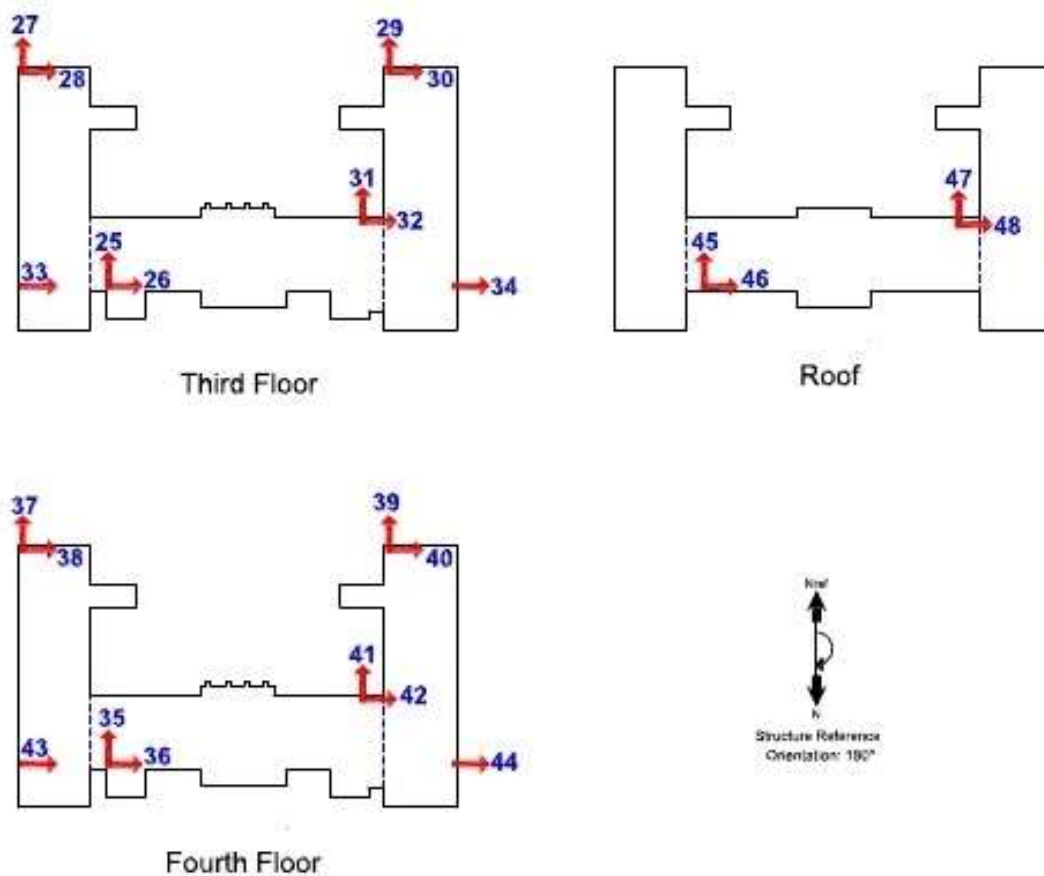
Το κεντρικό κτίριο του νοσοκομείου των βετεράνων στη πόλη Μάριον του Ιλινόις χτίστηκε το 1940, υποβλήθηκε σε ενισχύσεις το 1988 και είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το εμβαδόν του είναι περίπου 7.595m^2 . Το σχήμα του κτιρίου είναι ακανόνιστο, όπως μπορούμε να δούμε στις εικόνες παρακάτω, με ένα πυρήνα στο κέντρο, δύο φτερά δεξιά και αριστερά και μία προεξοχή στη μέση του κτιρίου. Οι διαστάσεις των πτερυγίων 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 1^{ου}, 3,51m του 2^{ου} και 3^{ου}, 4,22m του 4^{ου} 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.



Σχήμα 3-11 Ενοργανωμένες κατόψεις και τομή νοσοκομείου Marion



Σχήμα 3-12 Ενοργανωμένες κατόψεις νοσοκομείου Marion

3.2 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.



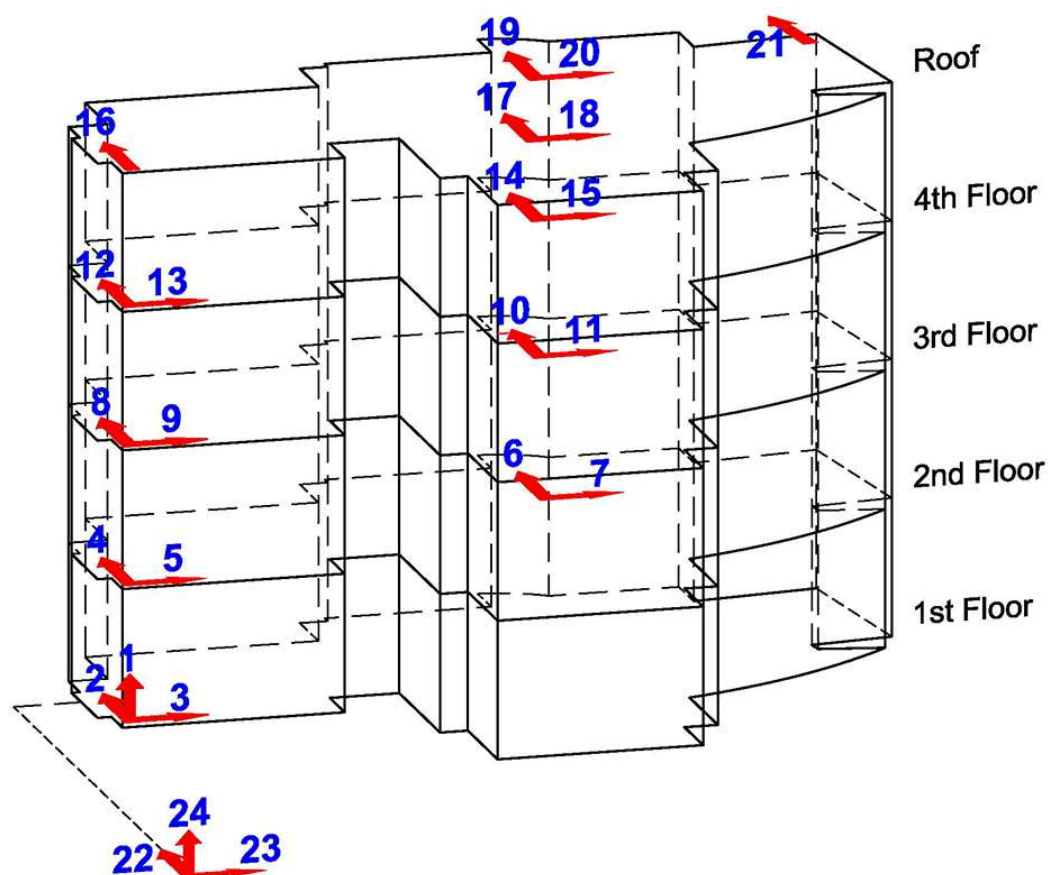
Σχήμα 3-13 Κτίριο επιστήμης και μηχανικής του πανεπιστημίου της Νεβάδα

3.2.1 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.

3.2.2 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.

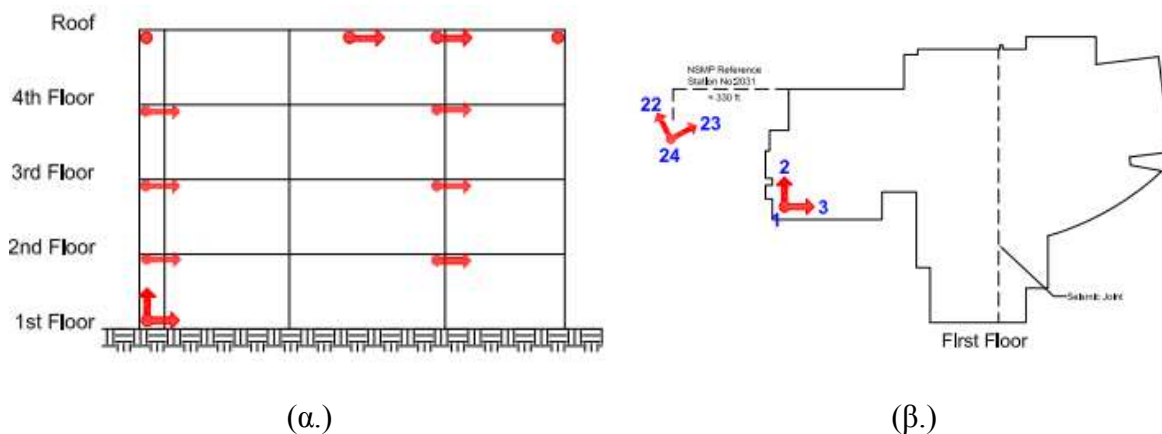


Σχήμα 3-14 Ενοργανωμένο προσομοίωμα του κτιρίου

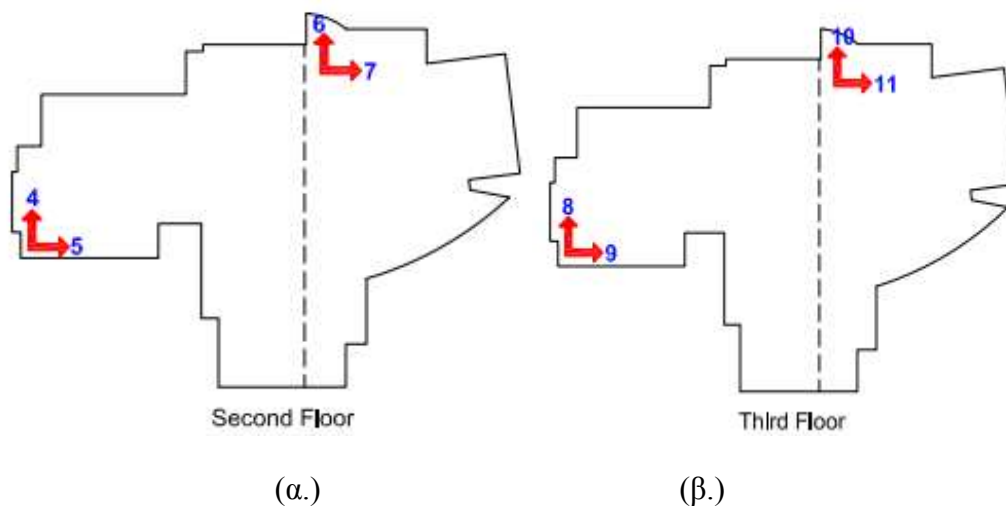
Επί της ουσίας οι αισθητήρες μπορούν να εντοπίσουν:

- Ταλάντωση και περιστροφή

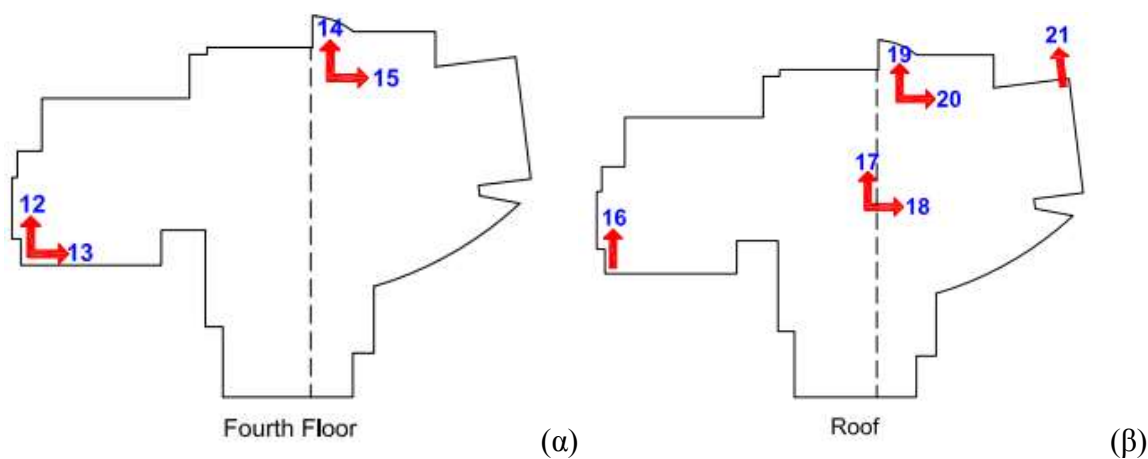
- Το χρόνο που απαιτείται έως ότου το σεισμικό κύμα φτάσει από τη βάση στη κορυφή
- Πως διαμορφώνεται το πλαίσιο της κατασκευής κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης, δηλαδή τις ιδιομορφές ταλάντωσης.



Σχήμα 3-15(α) Ενοργανωμένη όψη κτιρίου, (β) Ενοργανωμένη κάτοψη 1^ο ορόφου



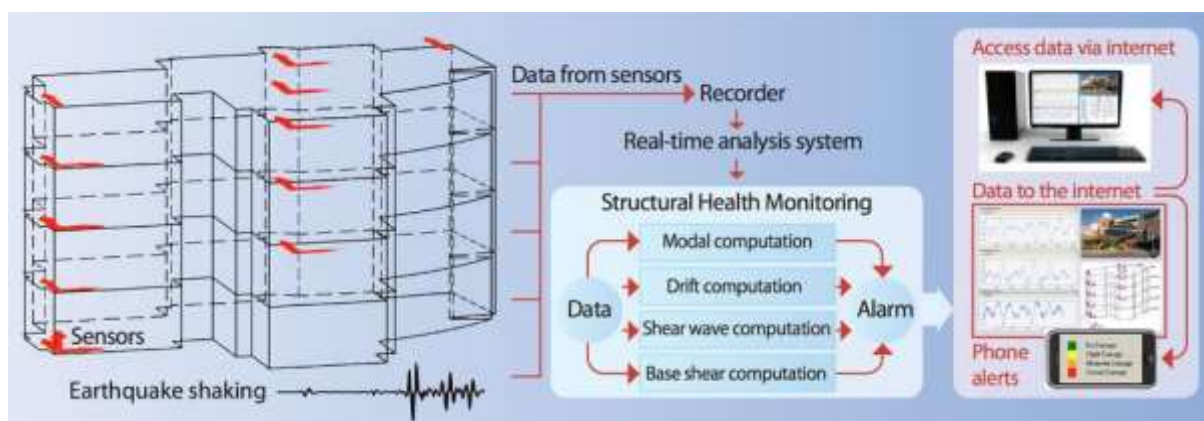
Σχήμα 3-16 (α) Ενοργανωμένη κάτοψη 2^ο ορόφου, (β) Ενοργανωμένη κάτοψη τρίτου ορόφου/



Σχήμα 3-17 Ενοργανωμένη κάτοψη 4^ο ορόφου, (β) Ενοργανωμένη κάτοψη οροφής κτιρίου

3.2.3 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.



Σχήμα 3-18 Σχηματική απεικόνιση συστήματος παρακολούθησης κατασκευής

3.3 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας 2^{ης} χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας στην Εγνατίας οδό.

3.3.1 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.)

Σχήμα 3-19 (α) Όψη της 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας, (β) κάτοψη της 2ης χαραδρογεφυρας παράκαμψης Καβάλας

3.3.2 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 εφέδρανα 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.

3.3.3 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 Epi-senso) 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.)

Σχήμα 3-20(α) Καταγραφική μονάδα, πίνακας ρευματοληψίας και κεραία GPS (β)
Καταγραφική μονάδα και προστατευτικό πλαίσιο



(α.)



(β.)

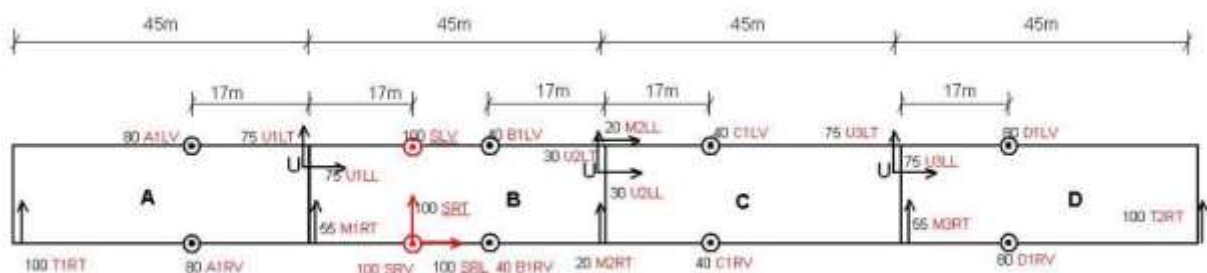
Σχήμα 3-21 (α) Ρευματοδοτηση και αισθητήρας, (β) Πλατφόρμα για πρόσβαση στη κορυφή του
πυλώνα



Σχήμα 3-22 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.

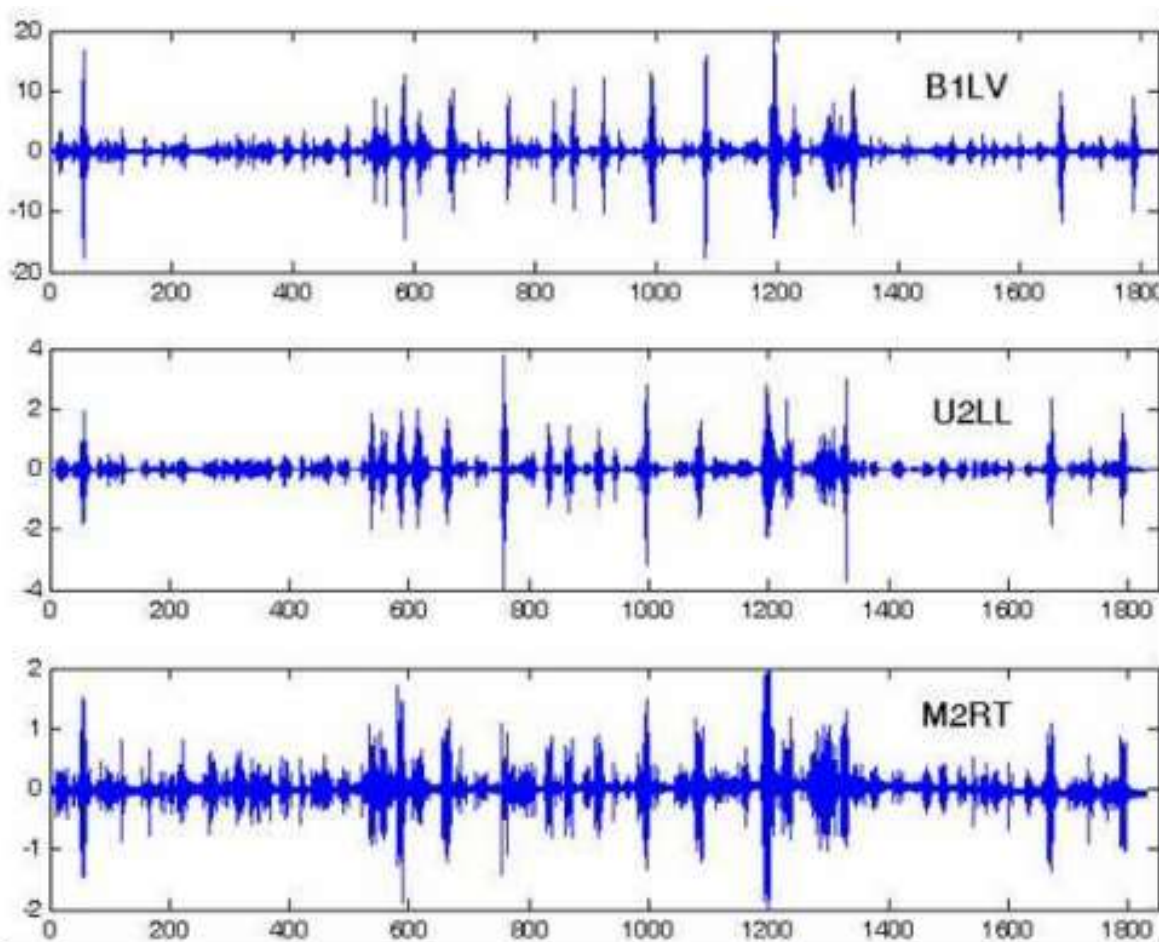


Σχήμα 3-23 Σχηματική απεικόνιση διάταξης αισθητήρων

3.3.4 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.



Σχήμα 3-24 Αποτελέσματα τριών επιταχυνσιογράφων από διαφορετικά σημεία

Οι χρονοιστορίες 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

Σχήμα 3-25 Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων που λήφθηκαν από τα επιταχυνσιόμετρα

3.3.5 Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος

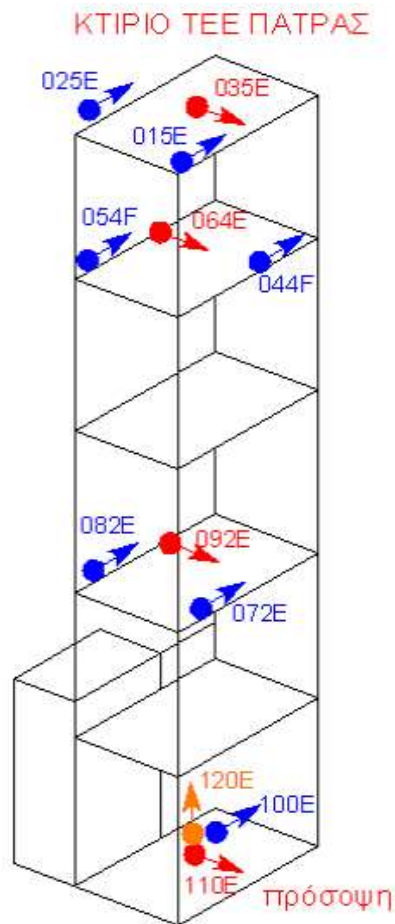
Ως συμπέρασμα, προέκυψε ότι το αναλυτικό μοντέλο, το οποίο προέκυψε από προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων διαφέρει αισθητά από τα στοιχεία που καταγράφηκαν στην πραγματική κατασκευή. Αυτό καθιστά απαραίτητη την παρακολούθηση της δομικής υγείας των κατασκευών λόγω της εκτεταμένης πληροφόρησης που προκύπτει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

3.4 Ενοργάνωση πενταώροφου κτιρίου ΤΕΕ Πάτρας

3.4.1 Γενικά



(α.)



(β.)

Σχήμα 3-26 (α) Κτίριο ΤΕΕ Πάτρας, (β) Ενοργανωμένο προσομοίωμα κατασκευής

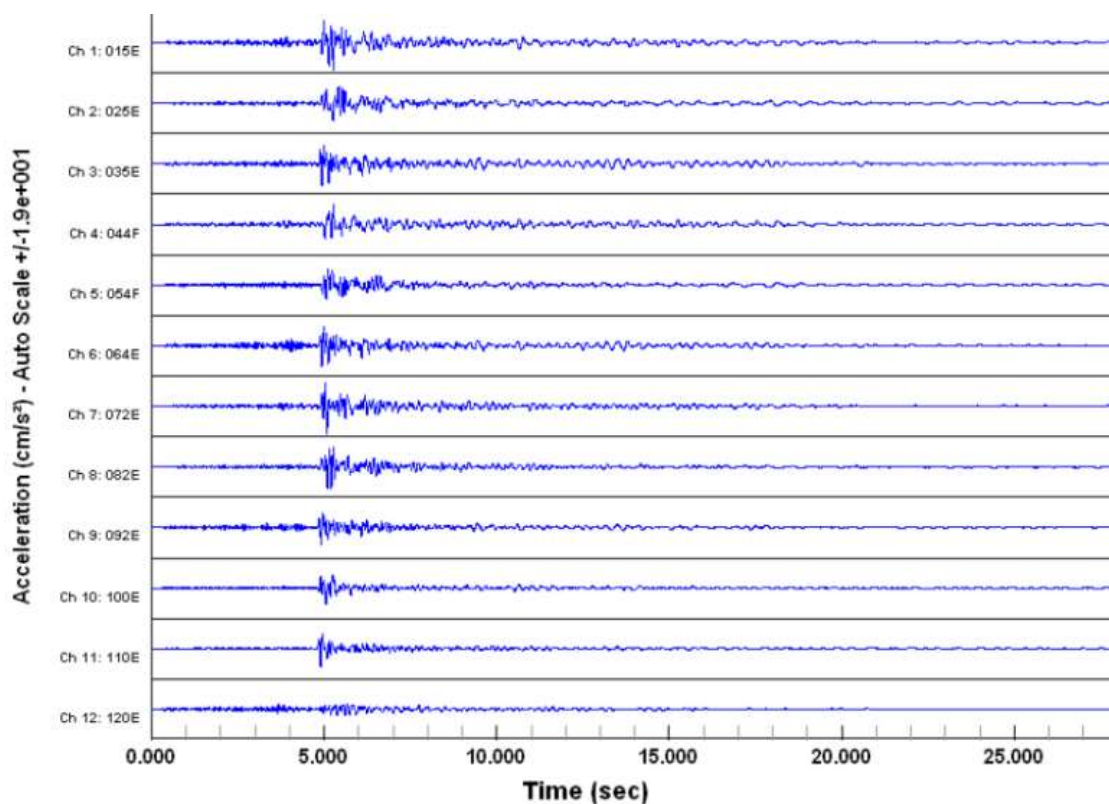
Στο παραπάνω κτίριο στεγάζεται το κτίριο του ΤΕΕ στην πάτρα. Αμέσως μετά τον κύριο σεισμό της 8ης Ιουνίου 2008, από το ΙΤΣΑΚ επιλέχθηκε να ενοργανωθεί πενταώροφο κτίριο οπλισμένου σκυροδέματος του οποίου η μελέτη έγινε 1992. Επιλέχθηκε να τοποθετηθούν 12 αισθητήρες οι οποίοι είναι μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα, 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.

3.4.2 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.

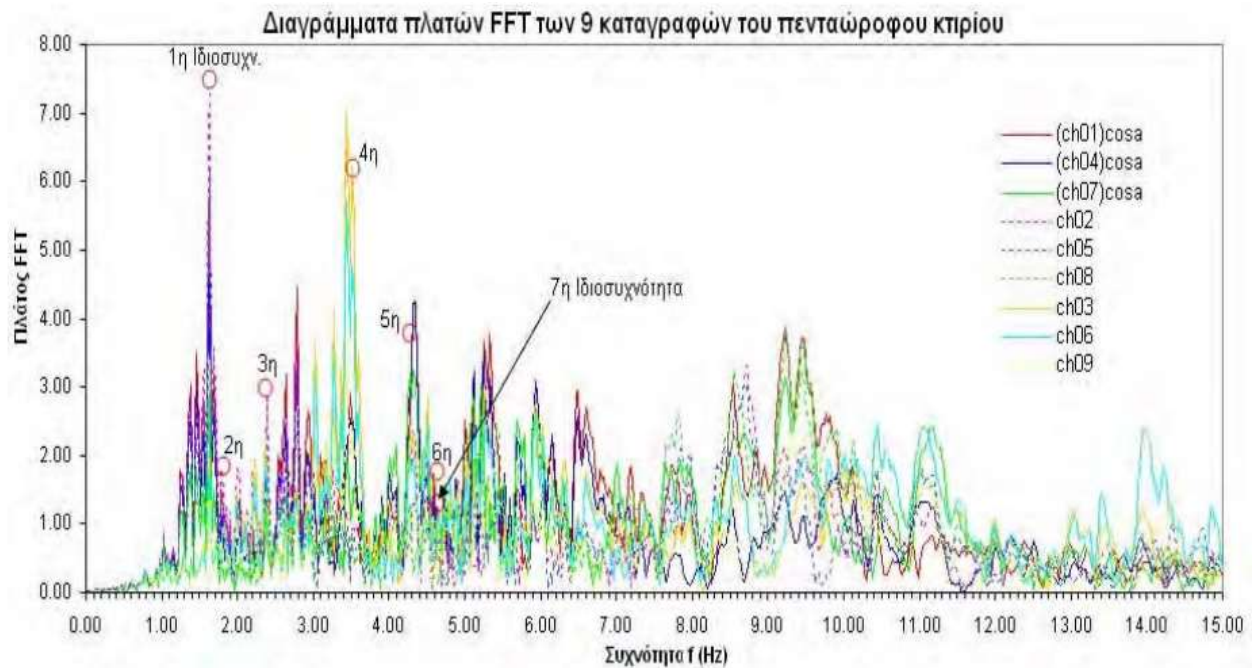
3.4.3 Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ταλάντωσης κτιρίου

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.



Σχήμα 3-27 Αποτελέσματα επιταχυνσιόμετρων από σεισμική δόνηση

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

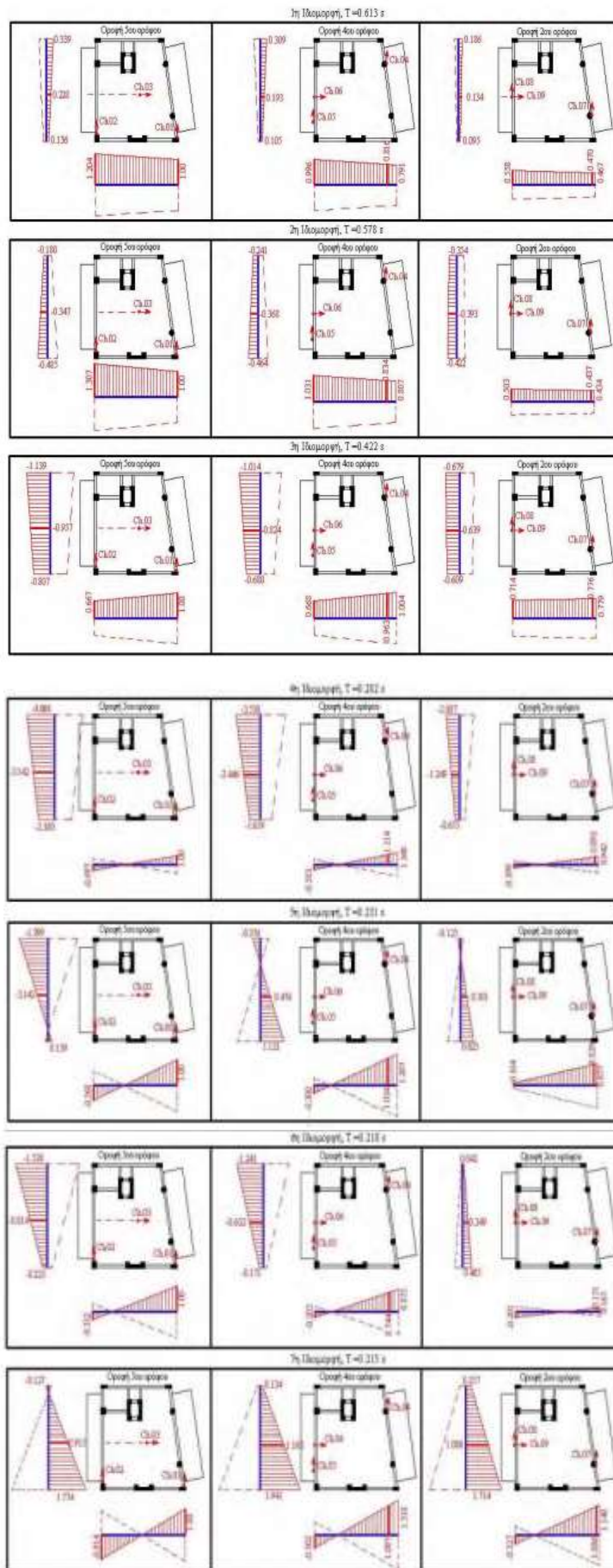


Σχήμα 3-28 Διαγράμματα για τις 9 καταγραφές επιταχύνσεων και εντοπισμός 7 ιδιοσυχνοτήτων κτιρίου

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
ω =	10.242	10.870	14.891	22.242	27.143	28.840	29.280	rad/s

	$\varphi 1$	$\varphi 2$	$\varphi 3$	$\varphi 4$	$\varphi 5$	$\varphi 6$	$\varphi 7$
$\varphi 09$	0.134	-0.393	-0.639	-1.249	0.301	0.249	1.086
$\varphi 08$	0.558	0.503	0.714	-0.399	0.104	-0.201	-0.327
$\varphi 07$	0.470	0.437	0.776	0.892	0.829	0.151	1.086
$\varphi 06$	0.193	-0.368	-0.824	-2.446	0.476	-0.632	1.162
$\varphi 05$	0.996	1.031	0.668	-0.583	-0.300	-0.203	-0.502
$\varphi 04$	0.816	0.834	0.963	1.114	1.024	0.744	1.097
$\varphi 03$	0.228	-0.347	-0.957	-3.142	0.545	-0.814	0.915
$\varphi 02$	1.204	1.307	0.667	-0.697	-0.568	-0.312	-0.914
$\varphi 01$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Σχήμα 3-29 Ιδιοπερίοδοι, ιδιοσυχνοτητες και ιδιομορφες



Σχήμα 3-30 Επτά πρώτες ιδιομορφές κτιρίου TEE

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

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

3.4.4 Ανασκόπηση εφαρμογής συστήματος

Με το σύστημα παρακολούθησης της δομικής υγείας του πενταόροφου, κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα, κτιρίου του ΤΕΕ στην Πάτρα, συλλέχθηκαν 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 8ης 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.

3.5 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας του τείχους της ακρόπολης

3.5.1 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.

3.5.2 Ενοργάνωση και παρακολούθηση δομικής συμπεριφοράς



(α.)

(β.)

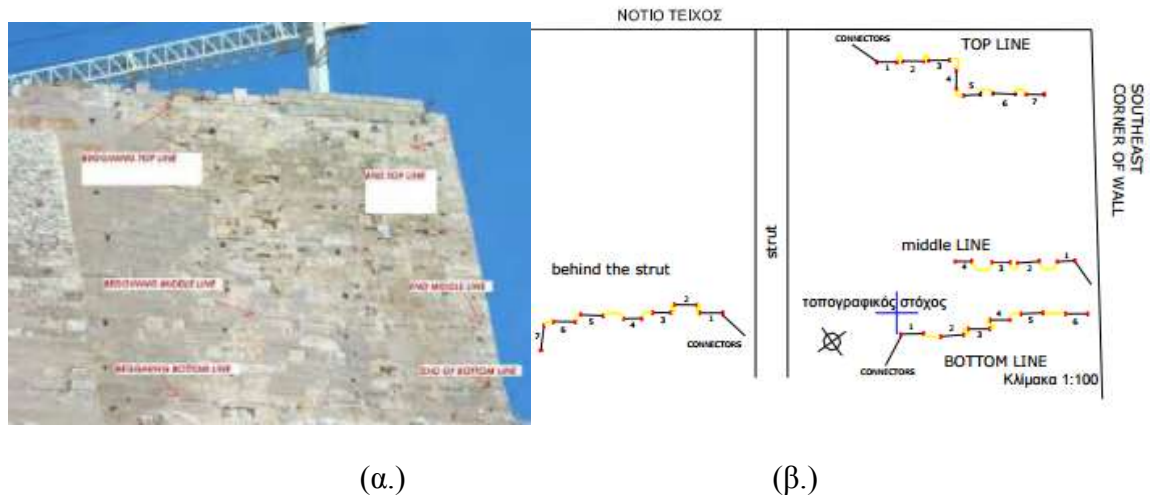
Σχήμα 3-31(α) & (β) Αγκύρωση αισθητήρα παραμόρφωσης

Λόγω της εμφανής ρηγμάτωσης 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.

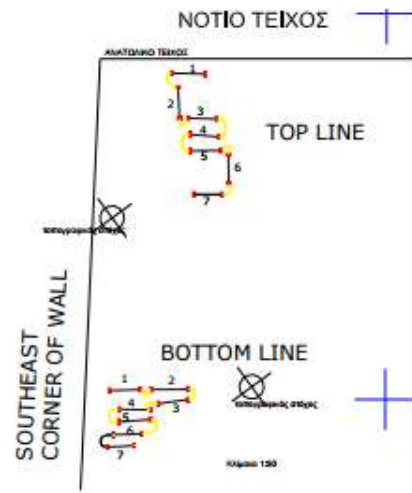


Σχήμα 3-32 Διάταξη αισθητήρων νότιας όψης τείχους ακρόπολης

ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΤΕΙΧΟΣ



(α.)



(β.)

Σχήμα 3-33 Διάταξη αισθητήρων ανατολικής όψης τείχους της ακρόπολης

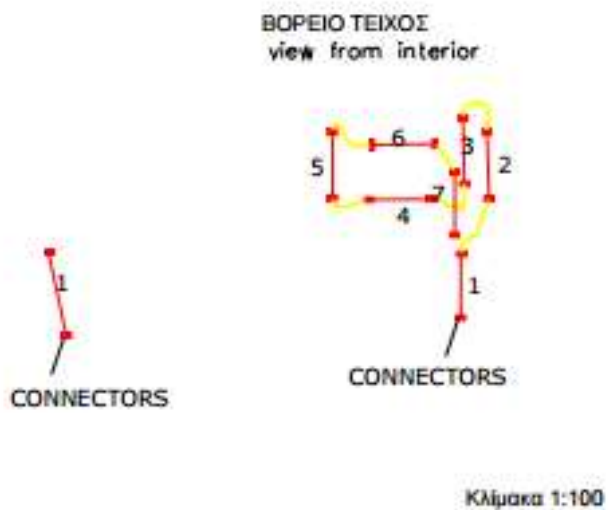
Στο Ανατολικό Τείχος υπάρχει κύρτωση προς τα έξω της εξωτερικής επιφάνειας του. Ο αισθητήρας αποδείχθηκε ιδανικός λόγω της ευκαμψίας του, έχοντας την δυνατότητα να πλαισιώσει ιδανικά το καμπύλο τμήμα του τείχους για την συνεχή και σωστή παρακολούθησή του.

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

ΒΟΡΕΙΟ ΤΕΙΧΟΣ



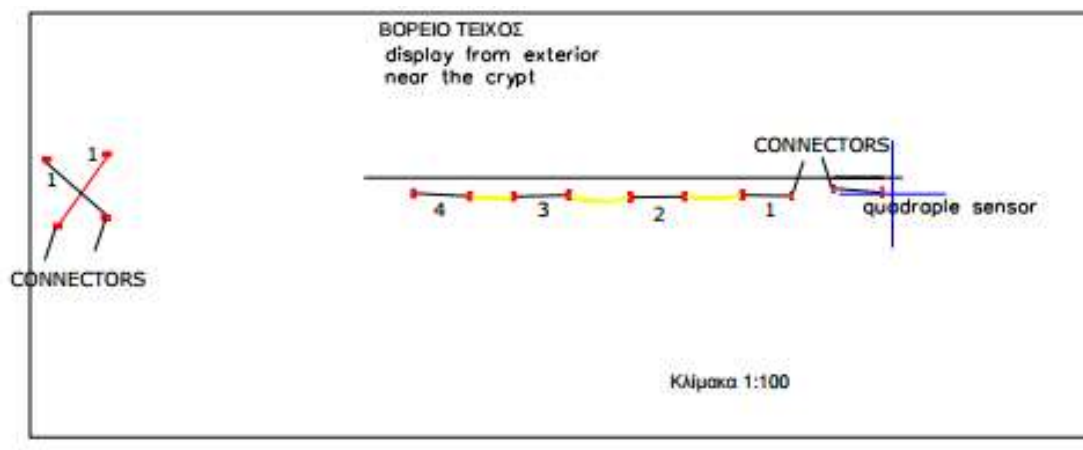
(α.)



(β.)

Σχήμα 3-34(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.



Σχήμα 3-35 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.

3.5.3 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.

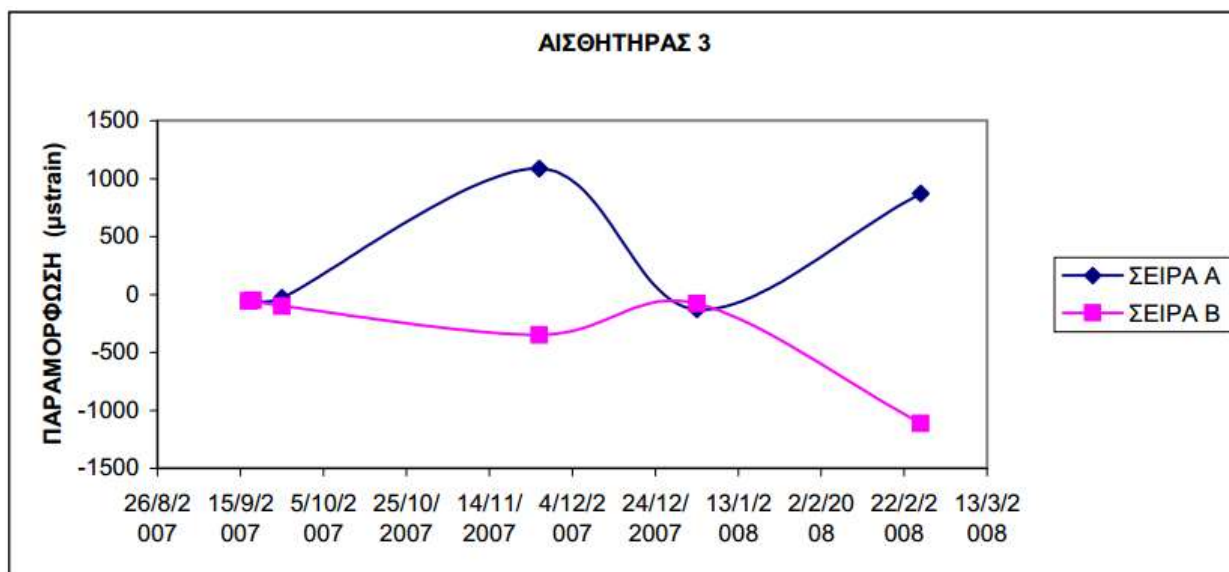
- Όρια συναγερμού κατά την παρακολούθησης

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

3.5.4 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 οποίου 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 1 Παράδειγμα από μέτρηση αισθητήρα (α εξωτερική φορά, β εσωτερική φορά)

3.6 Ενόργανη παρακολούθηση γέφυρας Ρίου-Αντίρριου (Χαρίλαος Τρικούπης)

3.6.1 Εισαγωγή

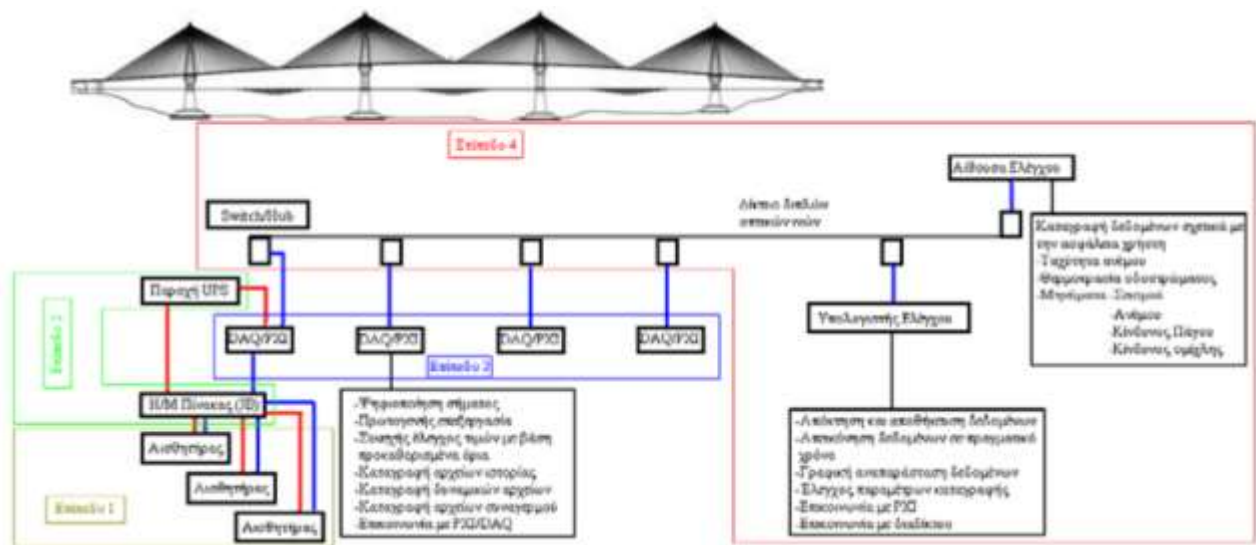
Η παρακολούθηση της συγκεκριμένης γέφυρας καθίσταται σημαντική καθώς είναι ένα έργο μεγάλης σπουδαιότητας και οι γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της κατασκευής ως προς τις εξωτερικές φορτίσεις που τις ασκούνται, όπως είναι ο άνεμος, τα φορτία που δέχεται από τη διέλευση οχημάτων αλλά και πιθανές σεισμικές δονήσεις μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την συμπεριφορά της κατασκευής και να ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του έργου και η ασφαλής 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 καταστρώματος <1,0 g στην βάση
Επιτάχυνση Εδάφους	Χαρακτηρισμός Σεισμικών φορτίων	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0,48g
Επιτάχυνση Καλωδίων	Απόκριση σε ισχυρό άνεμο	Θεμελιώδεις συχνότητες καλωδίων 0,45 έως 1,23 Hz
Δυνάμεις καλωδίων	Απόκριση σε σεισμό/άνεμο/φορτία κυκλοφορίας	75% Fguts-199 kN
Άνοιγμα/κλείσιμο αρμών διαστολής	Απόκριση σε σεισμό/άνεμο/θερμοκρασιακές μεταβολές	+1260/-1150 mm
Δυνάμεις στις ράβδους σύνδεσης καταστρώματος-πυλώνων	Απόκριση σε σεισμό/άνεμο/τεκτονική μετακίνηση	Δύναμη απελευθέρωσης καταστρώματος 10000 kN
Θερμοκρασία οδοστρώματος	Ασφάλεια Χρήστη έναντι πάγου	
Ανίχνευση νερού στην βάση του πυλώνα		

3.6.2 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 διαχείριση σήματος



Σχήμα 3-36 Σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας γέφυρας Χαρίλαος Τρικούπης σε 4 επίπεδα λειτουργίας

3.6.2.1 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.)

Σχήμα 3-37 (α) Επιταχυνσιόμετρο, (β) Μετεωρολογικός σταθμός, (γ) Παραμορφωσιόμετρο και (δ) Δυναμοκνυέλες καλωδίων

3.6.2.2 Σύστημα τροφοδοσίας και μεταφοράς σήματος

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



Σχήμα 3-38 Ηλεκτρολογικός πίνακας

3.6.2.3 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.



Σχήμα 3-39 Συσσκευή ψηφιοποιήσεις σήματος

3.6.2.4 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.



Σχήμα 3-40 Δίκτυο διπλών οπτικών ινών

3.6.3 Αποτελεσματική καταγραφή δεδομένων

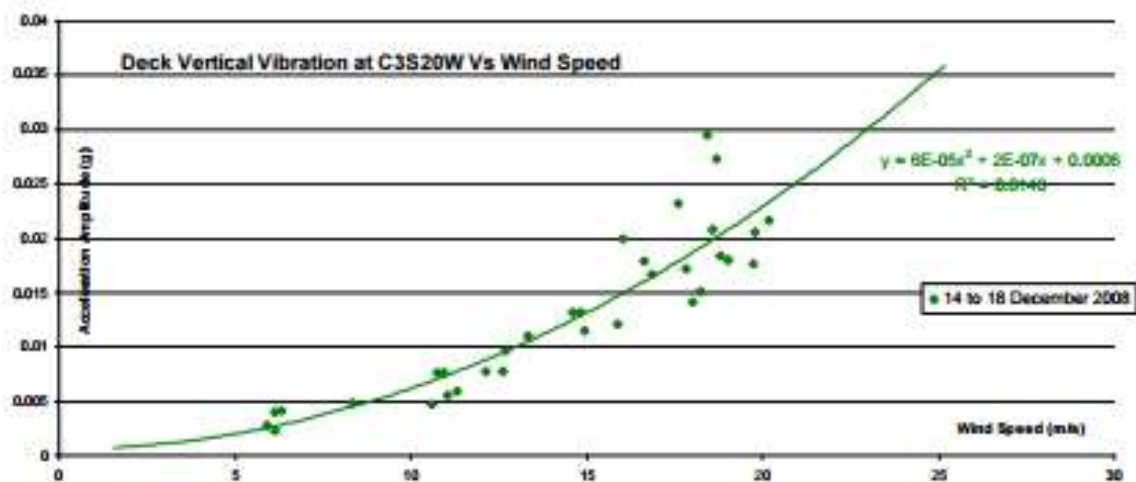
Η καταγραφή των δεδομένων είναι μία εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία και παίζει σημαντικό ρόλο στη παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας. Η καταγραφή των δεδομένων για τη βέλτιστη χρήση τους διακρίνεται σε δυο κατηγορίες:

1. Αρχεία ιστορικού

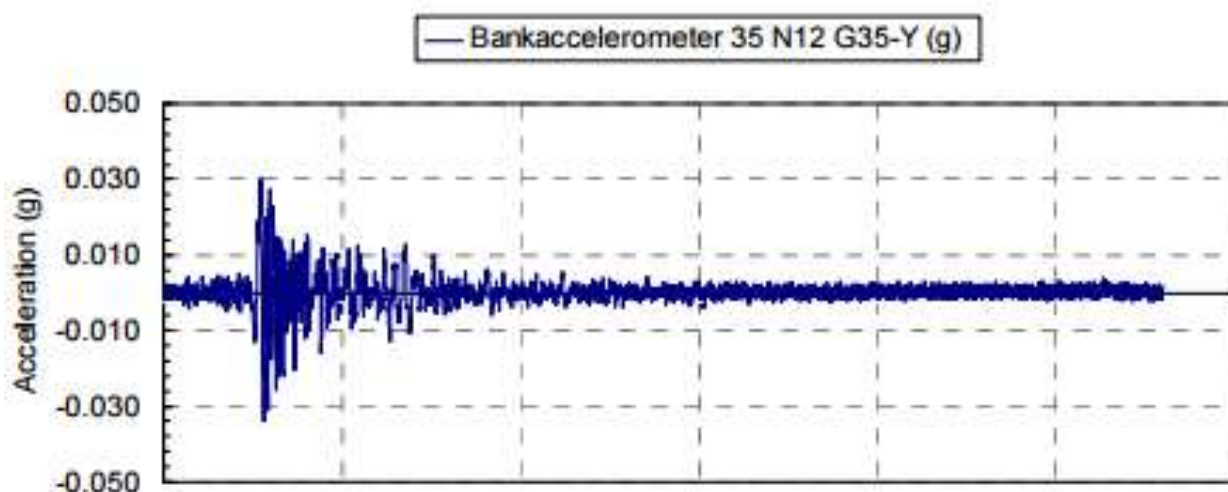
Αυτού του είδους τα αρχεία χρησιμεύουν για παρακολούθηση φαινομένων με αργή πορεία εξέλιξης όπως η επίδραση των φορτίων ανέμου στη κατασκευή, η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών στην παραμόρφωση της κ.α.

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.



Σχήμα 3-41 Σχέση μέγιστης επιτάχυνσης καταστρώματος με την ταχύτητα του ανέμου



Σχήμα 3-42 Δυναμική επιτάχυνση σε σεισμό

3.6.4 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 περεταίρω 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.

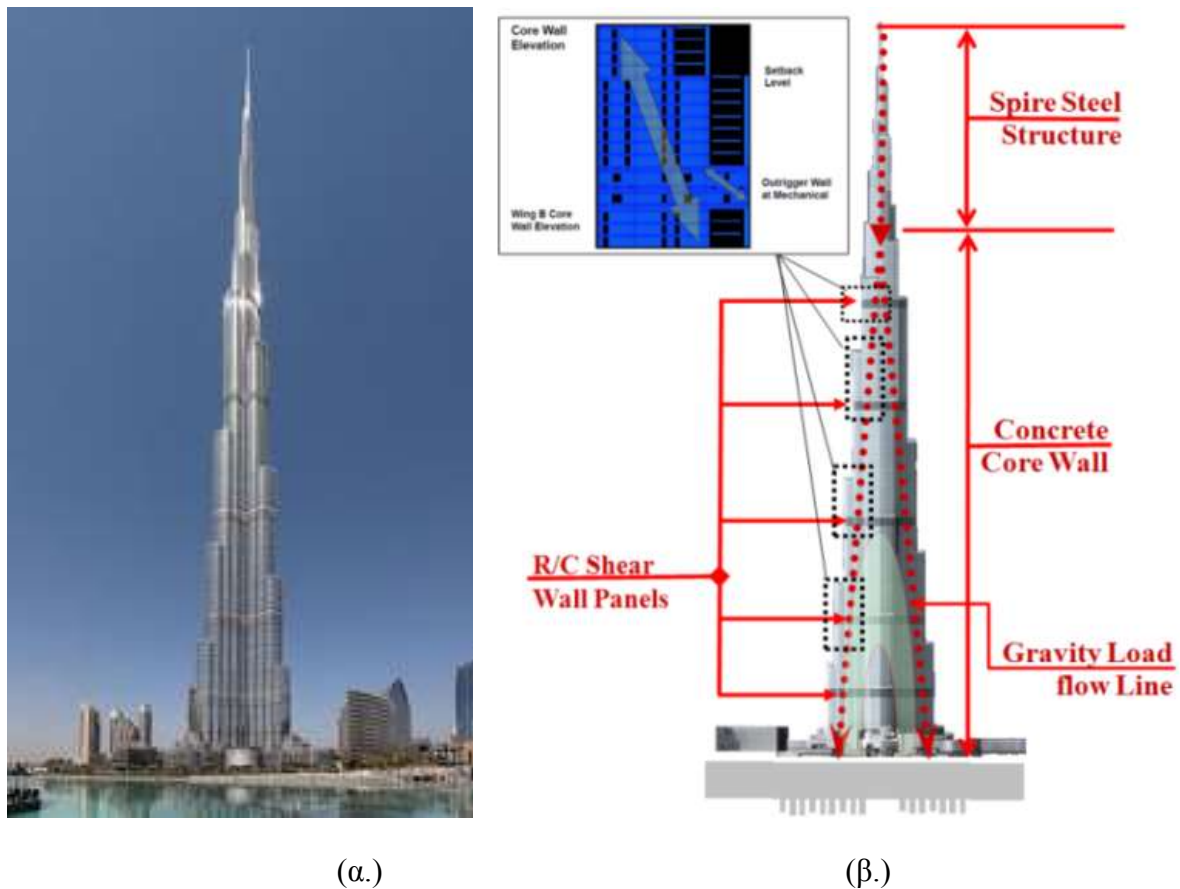
3.6.5 Διασφάλιση ποιότητας αποτελεσμάτων συστήματος

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.

3.6.6 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.

3.7 Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας Burj Khalifa



Σχήμα 3-43 (α) Πύργος Burj Khalifa, (β) Κατασκευαστική μορφή πύργου

3.7.1 Εισαγωγή

Ο ουρανοξύστης Μπουρτζ Χαλίφα ή Μπουρτζ Ντουμπαί όπως είναι γνωστό, βρίσκεται στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα στη πόλη του Ντουμπαί 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 κόσμο 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.

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

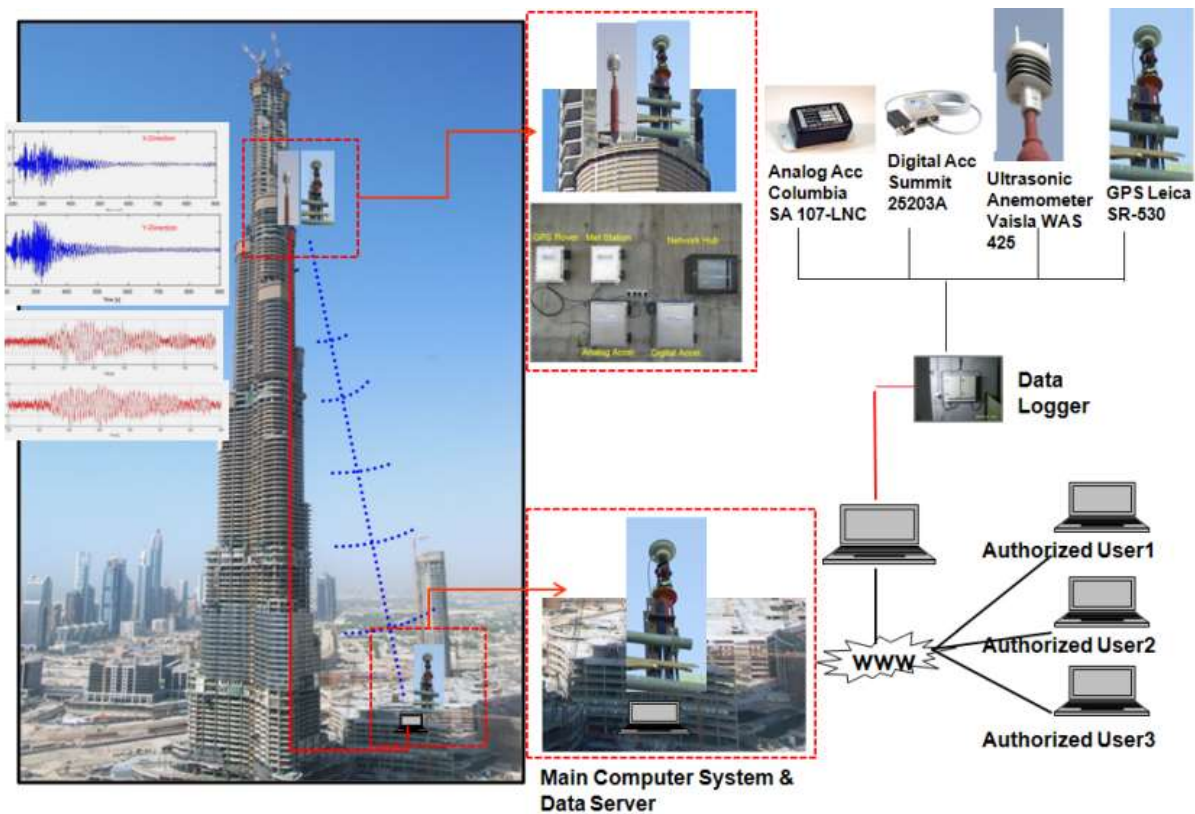
Η έρευνα και η δημιουργία του συστήματος παρακολούθησης ενός τέτοιου έργου είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και ίσως το δυσκολότερο αν σκεφτεί κανείς την έκταση του συγκεκριμένου έργου. Σκοπός ήταν:

- 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.

3.7.3 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.



Σχήμα 3-44 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 κατεγράφησαν 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 χρονιστορίας. 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.

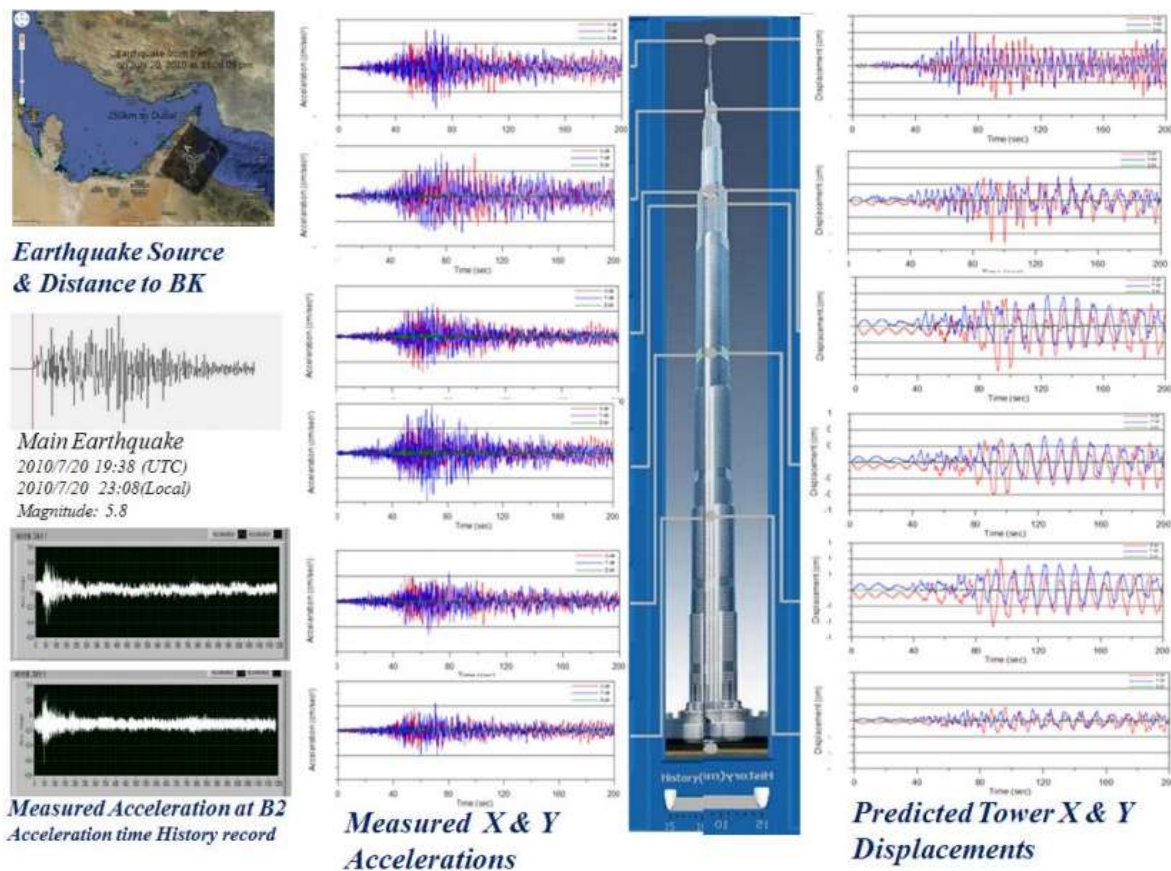
3.7.4 Περιγραφή μόνιμου συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

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 καταναμημένοι 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 θερμοκρασία.

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.



Σχήμα 3-45 Καταγραφές αισθητήρων

3.7.5 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.

4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

4.1 Γενικά

Ένας σεισμός, ανάλογα την ένταση του, μπορεί να προκαλέσει ακανόνιστη κίνηση και παραμόρφωση του εδάφους. Αυτό ως αποτέλεσμα, λόγω των κινήσεων που προκλήθηκαν από το σεισμό στο έδαφος, έχει τη μεταφορά δυνάμεων σε όποια κατασκευή υπάρχει σ' αυτό. Λόγω της θεμελίωσης των κατασκευών στο έδαφος, αυτές ανταποκρίνονται, ανάλογα και με τον τρόπο θεμελίωσης και κατά συνέπεια με την ελαστικότητα τους σε σχέση με το έδαφος, ως συνέχεια του εδάφους. Οι τάσεις που αναπτύσσονται, οδηγούν σε παραμορφώσεις της δομής του ή ακόμα και στην οριστική αποδιοργάνωσή της δηλαδή στη κατάρρευση.

4.2 Προσομοίωση της κατασκευής και τρόπος ταλάντωσης

Η απλούστερη προσομοίωση της μορφή μίας κατασκευής είναι η απεικόνιση των κατακόρυφων δομικών της στοιχείων σαν πρόβολο πακτωμένο στο έδαφος με τη συνολική μάζα τοποθετημένη στο ελεύθερο άκρο του προβόλου. Ο πρόβολος θεωρείται αβαρής και χαρακτηρίζεται από το μήκος του και την πλευρική δυσκαμψία του. Μία κατασκευή με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή με περισσότερες από μία μάζες κατανεμημένες στον πρόβολο, κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης που υφίσταται το έδαφος, αρχικά κινείται η βάση της κατασκευής χωρίς να κινούνται τα ανώτερα τμήματά της και διαδοχικά η κίνηση μεταφέρεται στους ορόφους έως την κορυφή της. Συνεπώς όταν η κίνηση των ορόφων φτάσει αυτή της βάσης, η δεύτερη έχει ήδη αλλάξει μορφή κίνησης.

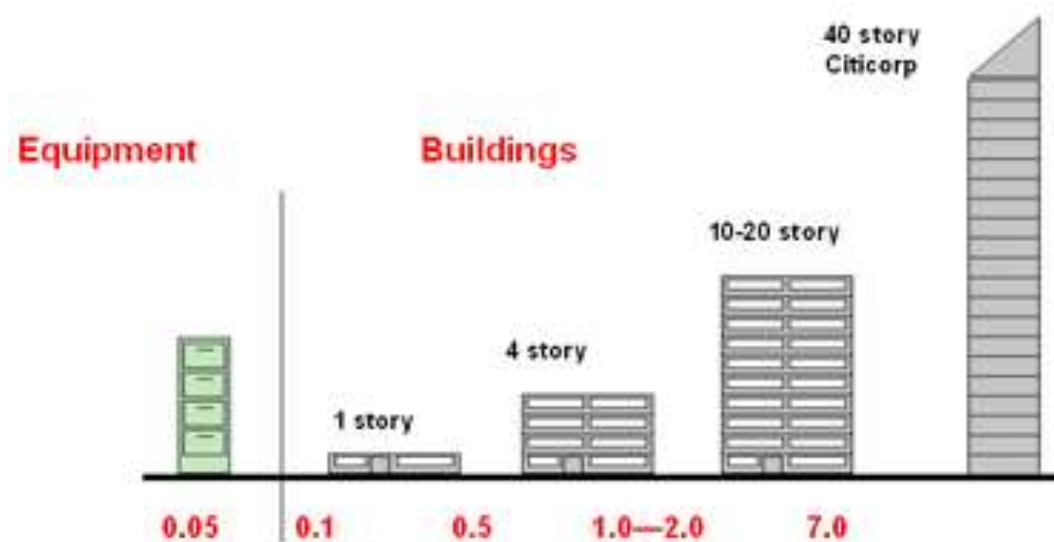
Η υστέρηση αυτή συμβαίνει λόγω των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται στη δομή και εξαρτάται από την δυσκαμψία και τις μάζες των ορόφων. Όπως μπορούμε να αντιληφθούμε λοιπόν, η μάζα (μέγεθος, σχήμα κ.α.) του κτιρίου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απόκριση μίας κατασκευής σε πιθανή σεισμική διέγερση. Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα μίας κατασκευής και συνεπώς τα κατακόρυφα φορτία τα οποία δέχεται, τα και όσο συντομότερη θα είναι και η αστοχία που θα επέλθει. Σημαντική παρατήρηση ως προς τα παραπάνω είναι ότι και κάθε στοιχείο ξεχωριστά δέχεται αντίστοιχες δυνάμεις με το σύνολο της κατασκευής και μπορεί να ανταποκριθεί με διαφορετικό τρόπο.

Οι αδρανειακές δυνάμεις που δρουν στα επιμέρους επίπεδα της κατασκευής είναι ανάλογες των μαζών και των συνολικών επιταχύνσεων των επιμέρους ορόφων. Συνεπώς επηρεάζεται από την επιτάχυνση του εδάφους όπως επίσης και από τη μάζα της κατασκευής που συμμετέχει σ' αυτό (σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα η Δύναμη που δέχεται ένα σώμα είναι ανάλογη της μάζας του επί την επιτάχυνση). Ως προς το συνολικό σχεδιασμό μίας

κατασκευής με αντισεισμική συμπεριφορά, προτιμότερες είναι οι κατασκευές με συμπαγή δομή και κατά συνέπεια με μεγαλύτερη δυσκαμψία. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής θα είναι και η σεισμική δράση που θα δεχτεί σε σχέση με αυτή του εδάφους, αν θα έχει δηλαδή μικρότερη ή μεγαλύτερη επιτάχυνση από αυτή του σεισμού.

4.3 Ιδιοσυχνότητες κατασκευών

Για κάθε κατασκευή υπάρχουν ορισμένες συχνότητες στις οποίες μπορεί να ταλαντώνεται ελεύθερα. Κάθε μία από αυτές τις συχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης είναι οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Από τα παραπάνω προκύπτει και ο όρος της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ο οποίος εκφράζει το ρυθμός με τον οποίο ταλαντώνεται η κατασκευή. Ιδιοπερίοδος εκφράζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για μία πλήρη ταλάντωση της κατασκευής. Στη περίπτωση που η ιδιοπερίοδος της κατασκευής ταυτίζεται με αυτή του σεισμού τότε έχουμε τη μέγιστη ταλάντωση και η κατασκευή θα δεχτεί τις δύο μέγιστες φορτίσεις. Αν η μετακίνηση του εδάφους δεν υπερβεί τα όρια αντοχής της κατασκευής τότε αυτή θα λειτουργήσει ελαστικά και θα ταλαντωθεί έως ότου η ενέργεια του σεισμού απορροφηθεί πλήρως, ανεξάρτητα με το αν ο σεισμός έχει τελειώσει.



Σχήμα 4-1 Θεμελιώδεις ιδιοπερίοδοι κατασκευών

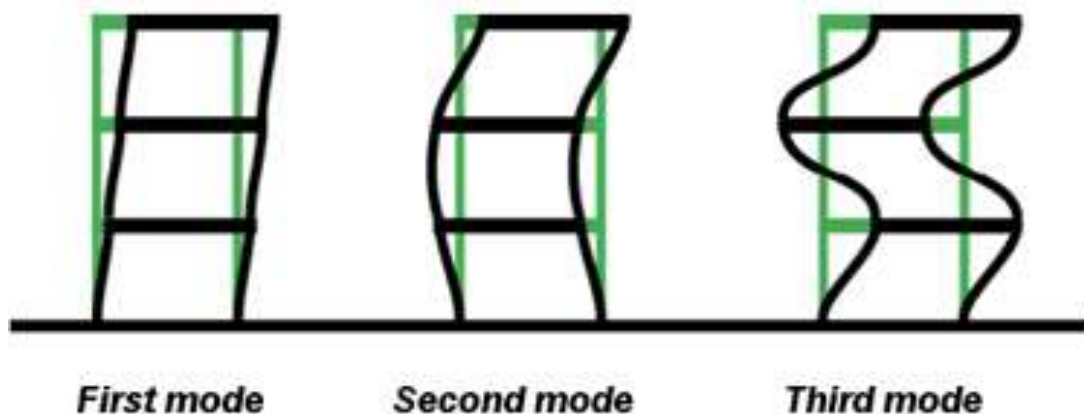
Σε κάθε ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης η κατασκευή διατηρεί μία σταθερή παραμορφωμένη δομή καθ' όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης, η οποία ονομάζεται ιδιομορφή. Αντίθετα με την μορφή το πλάτος της ταλάντωσης μεταβάλλεται με το χρόνο.

4.4 Ιδιομορφές κατασκευής

«Εάν μία κατασκευή διεγερθεί με αρμονική διέγερση που έχει συχνότητα ίση με μία από τις ιδιοσυχνότητες της θα αποκριθεί με μία συγκεκριμένη μορφή ταλάντωσης η οποία ονομάζεται ιδιομορφή». Στη πράξη μία κατασκευή δεν έχει μόνο μία θεμελιώδη ιδιοπερίοδο και συνεπώς ιδιοσυχνότητα, αλλά πολλές διαφορετικές. Η ποσότητα και η μορφή των ιδιομορφών αυτών, εξαρτάται από τους συνδυασμούς κίνησης (βαθμοί ελευθερίας κίνησης) που μπορεί να πάρει το σύνολο της κατασκευής λόγω της διαφορετικής ιδιομορφής κάθε στοιχείου που το απαρτίζει, ανάλογα με τη δυσκαμψία του.

Ιδιομορφή είναι μία σταθερή παραμόρφωση που συμβαίνει για συγκεκριμένη συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) και το σύστημα διατηρεί σταθερή τη μορφή της καθ' όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης. Αυτό που διαφοροποιείται είναι το πλάτος της ταλάντωσης το οποίο μεταβάλλεται με το χρόνο. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το σχήμα της παραμορφωμένης κατασκευής παραμένει σταθερό ως προς το χρόνο και αυτό που αλλάζει είναι το εύρος των μετακινήσεων. Ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας κίνησης έχουμε αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες και συνεπώς ιδιομορφές ανεξάρτητες και διαφορετικές μεταξύ τους.

Μία ιδιομορφή, για παράδειγμα 6 βαθμών ελευθερίας συμπεριφέρεται όπως 6 ανεξάρτητα συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας με δική του, ξεχωριστή ιδιοσυχνότητα. Η συμμετοχή της κάθε ιδιομορφής είναι διαφορετική σε κάθε παραμόρφωση. Κάθε ιδιομορφή ενεργοποιεί ένα ποσοστό του συνόλου της μάζας, πράγμα που δείχνει το πόσο συμμετέχει η ιδιομορφή στη συνολική μάζα της κατασκευής. Η μάζα που συμμετέχει σε κάθε ιδιομορφή ονομάζεται ιδιομορφική μάζα. Οι ελάχιστες ιδιομορφές στις οποίες μπορούμε να βασιστούμε ώστε να έχουμε αντιπροσωπευτική άποψη για τις κατασκευές είναι ανάλογες του ποσού τις μάζας που συμμετέχει σ' αυτές. Συνήθως η συμμετοχή των 3 πρώτων ιδιομορφών, αυτών δηλαδή με τις χαμηλότερες ιδιοσυχνότητες, περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικό ποσοστό της συνολικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-2 Απεικόνιση 3 πρώτων ιδιομορφών μιας κατασκευής

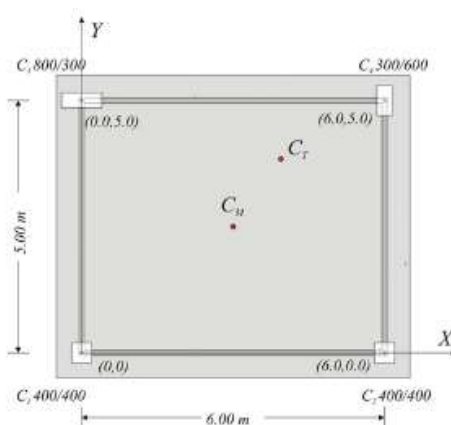
4.5 Πλαστιμότητα και πλάστιμη συμπεριφορά κατασκευής

Πλαστιμότητα ονομάζεται η ικανότητα της κατασκευής να αναπτύσει παραμορφώσεις, ολόκληρη ή στα επιμέρους δομικά στοιχεία της, χωρίς να επέρχεται θραύση, μένοντας δηλαδή στην ελαστική περιοχή. Η πλαστιμότητα των επιμέρους στοιχείων της κατασκευής αποτελεί σημαντικό παράγοντα ως προς την ακεραιότητα τους μετά από ένα σεισμό για το λόγο του ότι απορροφάται μεγαλύτερο ποσό ενέργειας και εκτονώνεται με αυτόν το φαινόμενο του σεισμού χωρίς αστοχίες. Ένα στοιχείο με ψαθυρή συμπεριφορά, αποδίδει όλη την σεισμική ενέργεια που απορροφά πίσω στη δομή με τη μορφή κινητικής ενέργειας και αυτό μετά το πέρας της φόρτισης βρίσκεται στη περιοχή των πλαστικών παραμορφώσεων, χωρίς την δυνατότητα της επαναφορά στην ελαστική περιοχή μετά το πέρας της φόρτισης.

Πλάστιμη συμπεριφορά κατασκευής κατά τη διάρκεια μίας σεισμικής διέγερσης σημαίνει ότι αν και κάποια στοιχεία έχουν εισέλθει στη πλαστική περιοχή, έχοντας υποστεί βλάβες, χωρίς όμως η κατασκευή να βρίσκεται σε κίνδυνο κατάρρευσης.

4.6 Κέντρο μάζας (ΚΜ) και κέντρο ελαστικής στροφής (ΚΕΣ)

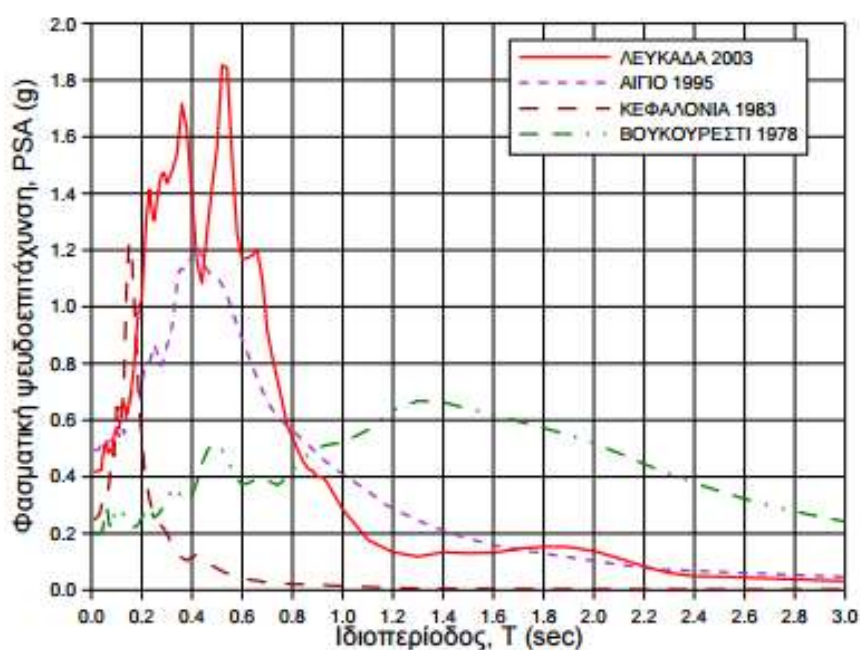
Ως κέντρο μάζας ορίζεται το σημείο του κέντρου βάρους όλων των επιμέρους στοιχείων της κατασκευής. Αν η μάζα της κατασκευής είναι κατανομημένη ομοιόμορφα τότε το κέντρο μάζας συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του σχήματος της κάτοψης. Το κέντρο μάζας είναι το σημείο που συναθροίζονται όλες οι αδρανειακές δυνάμεις των επιμέρους δομικών στοιχείων που προκύπτουν από μια σεισμική δράση. Για τη διατήρηση της ισορροπίας της κατασκευής με την εμφάνιση μιας σεισμικής δράσης, ασκούνται δυνάμεις ανάλογες με το μέγεθος της μάζας της κατασκευής όπου το κέντρο εφαρμογής τους πρέπει να συμπίπτει όσο γίνεται με το κέντρο μάζας της κατασκευής για την αποφυγή της οριζόντιας περιστροφής ή της στρέψης. Το κέντρο ελαστικής στροφής είναι το σημείο δράσης της σεισμικής δύναμης και επηρεάζεται από την κατανομή των κατακόρυφων δομικών στοιχείων κατά τις διευθύνσεις x και y στο διάφραγμα της πλάκας. Όταν δεν ταυτίζονται το κέντρο μάζας με το κέντρο ελαστικής στροφής στο σύστημα αναπτύσσεται στροφή ανάλογη με τη μεταξύ τους απόσταση, η οποία ονομάζεται εκκεντρότητα κατά x και y και πρέπει να είναι μικρότερη από 0,5.



Σχήμα 4-3 Απόσταση Κ.Β. από Κ.Ε.Σ.

4.7 Φάσμα απόκρισης

Φάσμα απόκρισης καλείται ένα φάσμα το οποίο δημιουργείται για τον προσδιορισμό της απόκρισης της κατασκευής σε μία συγκεκριμένη σεισμική δόνηση. Είναι μία γραφική παράσταση που απεικονίζει την μέγιστη επιτάχυνση που θα συμβεί στη βάση της κατασκευής (θεμελίωση) σύμφωνα με την ιδιοπερίοδο της, για μία συγκεκριμένη σεισμική δόνηση. Χωρίς να γίνουν λοιπόν οι κατάλληλοι υπολογισμοί για τη συνολική απόκριση της κατασκευής, με τη χρήση της ιδιοπεριόδου και του ποσοστού απόσβεσης, προσδιορίζεται η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση καθώς επίσης μπορούμε να δούμε τι τύπου κατασκευές επηρέασε περισσότερο ο συγκεκριμένος σεισμός, ανάλογα με την θεμελιώδη τους ιδιοπερίοδο.



Σχήμα 4-4 Παράδειγμα φάσματος απόκρισης για διάφορους σεισμούς

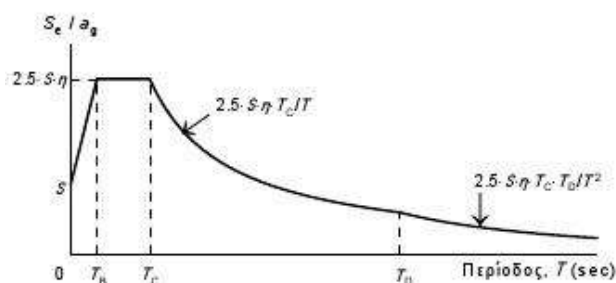
Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο παραπάνω φάσμα απόκρισης, για διαφορετικούς σεισμούς και περιοχές έχουμε διαφορετικές τιμές στα φάσματα. Για παράδειγμα, ο σεισμός της Λευκάδας (κόκκινη, συνεχής γραμμή) μέγιστες τιμές επιταχύνσεων πήραν κτίρια με ιδιοπεριόδους κοντά στο 0,5s, ενώ σε αυτόν του Βουκουρεστίου, μέγιστες τιμές πήραν οι κατασκευές με επιταχύνσεις κοντά στα 1,3s. Αναλύοντας λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε να διακρίνουμε ότι στο σεισμό της Λευκάδας, επλήγησαν περισσότερο δύσκαμπτες κατασκευές (με μικρή περίοδο ταλάντωσης), ενώ σε αυτόν του Βουκουρεστίου, μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετώπισαν οι περισσότερο εύκαμπτες κατασκευές (με μεγαλύτερη περίοδο ταλάντωσης).

Έτσι λόγω της μοναδικότητας του κάθε φάσματος απόκρισης και της σπανιότητας επανάληψης του συγκεκριμένου σεισμού, για την διευκόλυνση του μελλοντικού

σχεδιασμού τοποθετήθηκαν πολλά φάσματα απόκρισης στους ίδιους άξονες και εν συνεχεία χαράσσεται η περιβάλλουσα αυτών. Το φάσμα αυτό ονομάζεται ομαλοποιημένο φάσμα απόκρισης. Τα στοιχεία που προσδίδει είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για το μελλοντικό σχεδιασμό κατασκευών διότι μπορούν να αξιολογηθούν οι πραγματικές επιταχύνσεις που αναπτύχθηκαν σε διάφορους σεισμούς ώστε οι κατασκευές των επόμενων χρόνων να είναι ασφαλέστερες και με δυνατότητα να αντέχουν σε παρόμοιες συνθήκες σεισμικών διεγέρσεων. ε

«Φάσμα απόκρισης των μετατοπίσεων μίας συγκεκριμένη σεισμική διέγερσης, ονομάζουμε την περιβάλλουσα των μέγιστων μετατοπίσεων απόκρισης όλων των δυνατών μονοβάθμιων σχηματισμών, για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Υπολογίζονται για διάφορες τιμές απόσβεσης. Αντίστοιχα ορίζονται και φάσματα ταχυτήτων και επιταχύνσεων.» [X. Καραγιάννης, 2008]

Ελαστικό φάσμα απόκρισης (S_e =ελαστική φασματική επιτάχυνση)



$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$$

όπου:

$$a_g = \gamma_i \cdot a_{gR}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{\zeta + 5}} \geq 0.55 = \text{συντελεστής απόσβεσης (το } \zeta \text{ τίθεται επί τοις εκατό)}$$

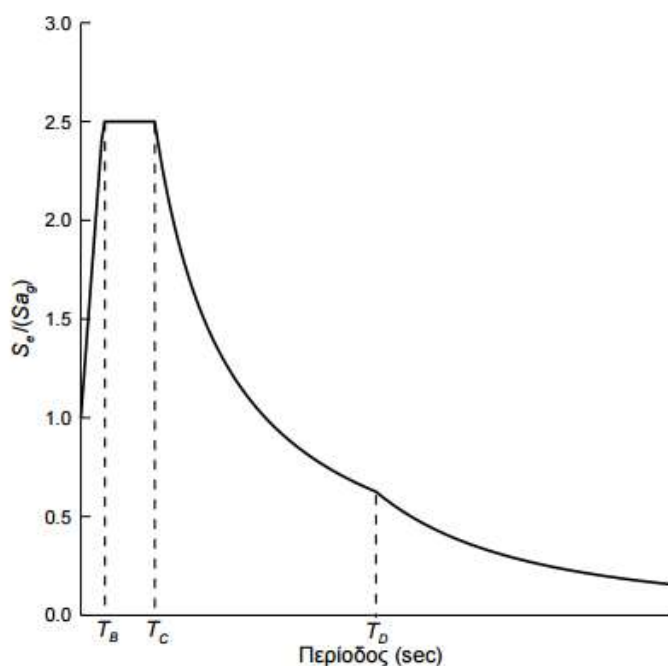
S = συντελεστής εδάφους

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	a_{gR} (g)	Κατηγορία Σπουδαιότητας		Κατηγορία Εδάφους				
			γ_i	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)	S	
Z1	0.16	I	0.80	A	0.15	0.40	2.50	1.00
Z2	0.24	II	1.00	B	0.15	0.50	2.50	1.20
Z3	0.36	III	1.20	C	0.20	0.60	2.50	1.15
		IV	1.40	D	0.20	0.80	2.50	1.35
				E	0.15	0.50	2.50	1.40

Σχήμα 4-5 Ελαστικό φάσμα απόκρισης

4.8 Φάσμα σχεδιασμού

Όπως αναλύσαμε παραπάνω, τα φάσματα απόκρισης είναι για συγκεκριμένους σεισμούς, συγκεκριμένης περιοχής και με συγκεκριμένη απόσβεση. Μπορούμε λοιπόν να καταλάβουμε ότι δεν είναι αξιοκρατικά σε βαθμό τέτοιο ώστε να βασιστούμε εξ' ολοκλήρου πάνω σε ένα φάσμα απόκρισης για το σχεδιασμό μίας μελλοντικής κατασκευής. Για το λόγο αυτό, στο σχεδιασμό νέων κατασκευών, χρησιμοποιείται ένα στατιστικά επεξεργασμένο, ομαλοποιημένο φάσμα απόκρισης που μπορεί να καλύψει όλες τις μορφές φασμάτων των πιθανών σεισμών στους οποίους είναι εκτεθειμένη μία περιοχή. Δεν αντιστοιχεί σε κάποια συγκεκριμένη δόνηση αλλά περιλαμβάνει ένα πλήθος σεισμών των οποίων οι ιδιότητες μελετώνται. Για να σχεδιαστεί ένα φάσμα σχεδιασμού λαμβάνονται υπ' όψιν οι ενεργές τιμές της εδαφικής κίνησης της περιοχής και οι εδαφικές συνθήκες στη περιοχή της κατασκευής.

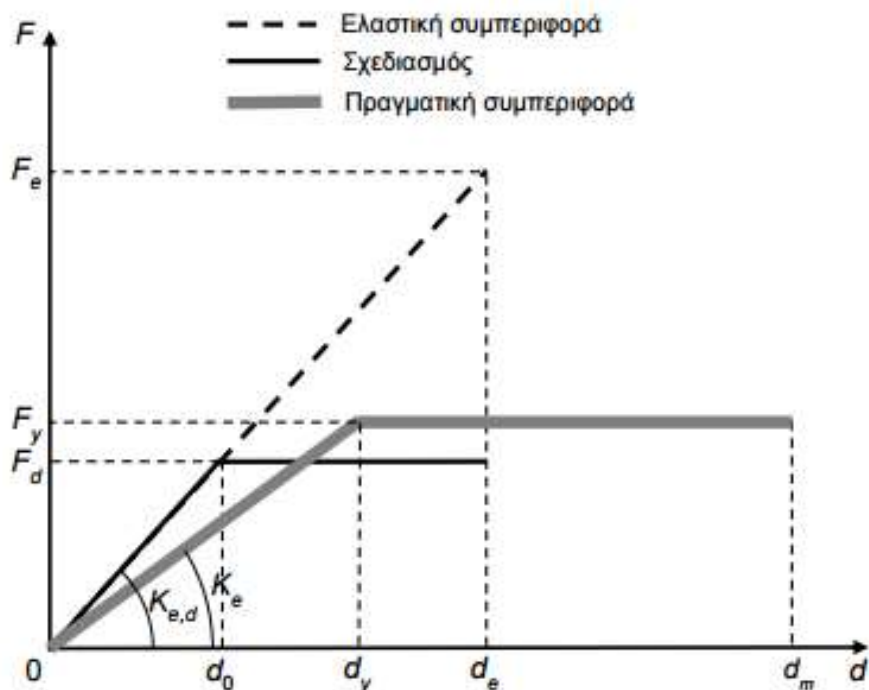


Σχήμα 4-6 Παράδειγμα φάσματος σχεδιασμού

4.8.1 Ελαστικά και ανελαστικά φάσματα σχεδιασμού

Για τον υπολογισμό των σεισμικών φορτίων σε συνθήκες πιο κοντά στην πραγματική απόκριση των κατασκευών χρησιμοποιείται το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού το οποίο ως παραδοχή έχει την εφαρμογή μικρότερων φορτίων εξ' αιτίας της απορρόφησης ενέργειας από πλάστικη συμπεριφορά δομικών στοιχείων (παραμορφώσεις). Με τις σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης λαμβάνεται η παραδοχή ύπαρξης αστοχιών στα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ασφαλή χρήση της (Ανελαστική απόκριση). Με την αποδοχή βλαβών και την ανελαστική απόκριση των κατασκευών, η μέθοδος ανάλυσης που μπορεί να εφαρμοστεί είναι η δυναμική ανελαστική ανάλυση, η οποία όμως

είναι δύσχρηστη λόγω του απαιτούμενου όγκου δεδομένων, της απαίτησης εξειδίκευσης του χρήστη καθώς και βάση του χρόνου που απαιτείται ώστε να ολοκληρωθεί. Είναι λοιπόν προτιμότερη η χρήση μεθόδων ελαστικών αναλύσεων, με τις οποίες εφαρμόζοντας ειδικούς ρυθμιστικούς συντελεστές μπορεί να ληφθεί υπόψιν και να αναλυθεί η ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών.



Σχήμα 4-7 Πραγματική συμπεριφορά κατασκευής

4.8.2 Παραδοχές ισοδυναμίας μεταξύ ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς

Τα ανελαστικά φάσματα σχεδιασμού, τα οποία πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλους τους σύγχρονους κανονισμούς. Αυτά προκύπτουν από τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές:

4.8.2.1 Παραδοχή ίσων μετακινήσεων

Για κατασκευές εύκαμπτες, με ιδιοπερίοδο μεγαλύτερη του T_c, η μέγιστη τιμή μετακίνησης μεταξύ ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς, συμβαίνει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές αλλά η τιμή της μέγιστης μετακίνησης παραμένει σχεδόν η ίδια. Αυτό ορίζεται ως παραδοχή ίσων μετακινήσεων.



Σχήμα 4-8 Ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κατασκευών με την παραδοχή ίσων μετακινήσεων

4.8.2.2 Παραδοχή ίσων ενεργειών

Αντίθετα με τις εύκαμπτες κατασκευές και την παραδοχή ίσων μετακινήσεων, στις δύσκαμπτες δεν ισχύει αυτή η συμπεριφορά. Εδώ η μέγιστη ανελαστική μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την ελαστική όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο παρακάτω σχήμα, όμως εδώ υπάρχει η θεώρηση των ίσων ενεργειών, πράγμα που σημαίνει ότι χρειάστηκαν ίδιο ποσό ενέργειας για διαφορετικές μετακινήσεις μεταξύ ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς. Η παραδοχή των ίσων ενεργειών θεωρεί ότι τα εμβαδά που περικλείονται από τις δύο μετακινήσεις (μπλε και κόκκινη διαγράμμιση του σχήματος) είναι ίσα μεταξύ τους.



Σχήμα 4-9 Ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κατασκευών με την παραδοχή ίσων ενεργειών

Ευρωκώδικας 8 – Φάσμα σχεδιασμού (§3.2.2.5)

Περιοχή ιδιοπεριόδων

Εξίσωση

$$0 \leq T \leq T_B$$

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D$$

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \geq \beta \cdot a_g$$

$$T_D \leq T \leq 4s$$

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^3} \right] \geq \beta \cdot a_g$$

$S_d(T)$: φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού

T : θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής

a_g : μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

$$a_g = \gamma_i a_{gR}$$

γ_i : συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου

a_{gR} : μέγιστη σεισμική επιτάχυνση στον βράχο

q : συντελεστής συμπεριφοράς

S : συντελεστής εδάφους

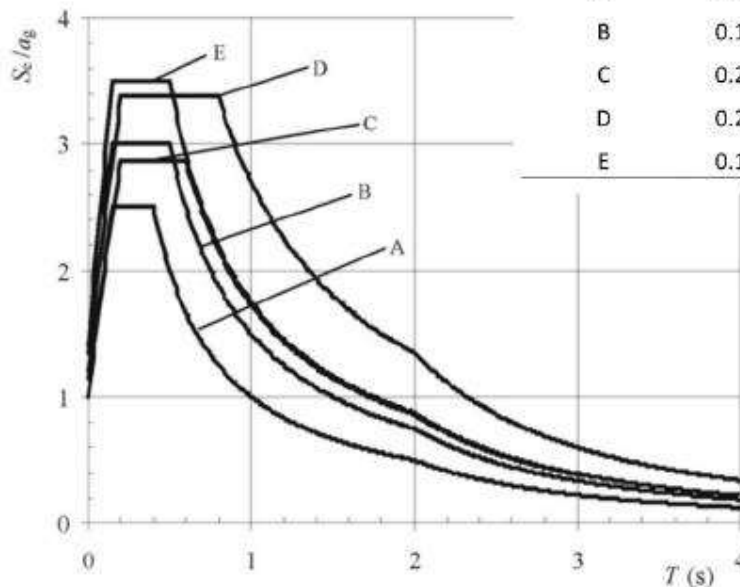
T_B, T_C, T_D : χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος

$$\beta = 0.2$$

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	a_{gR} (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Κατηγορία Σπουδαιότητας	γ_i
I	0.80
II	1.00
III	1.20
IV	1.40

Κατηγορία Εδάφους	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)	S
A	0.15	0.40	2.50	1.00
B	0.15	0.50	2.50	1.20
C	0.20	0.60	2.50	1.15
D	0.20	0.80	2.50	1.35
E	0.15	0.50	2.50	1.40



Σχήμα 4-10 Φάσμα σχεδιασμού EC8

4.9 Στοιχεία εκτίμησης κατάστασης κατασκευής

4.9.1 Κόπωση

Όταν μία δομή δέχεται επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, αυξομειούμενης τάσης, υπάρχει το ενδεχόμενο να δημιουργηθούν ρωγμές στο υλικό και να επέλθει σταδιακή αστοχία ακόμη και αν οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από τις μέγιστες που θα μπορούσε να δεχτεί η δομή μας.

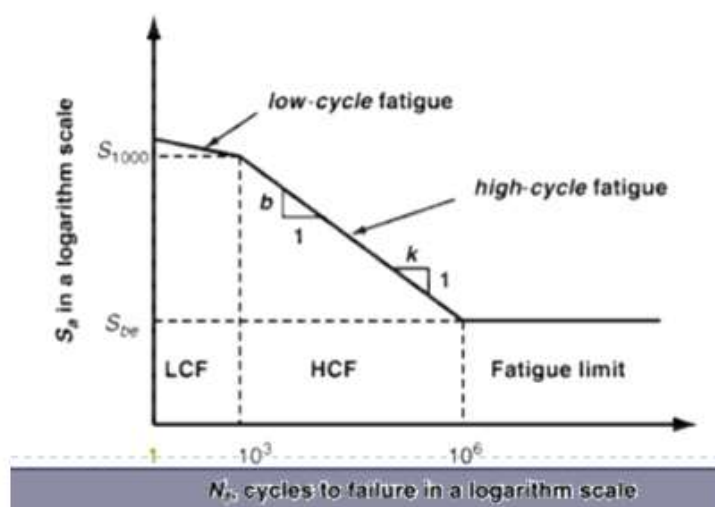
Σύμφωνα με την *Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών* (ASTM International) η κόπωση ορίζεται ως: «Κόπωση είναι η διαδικασία προοδευτικής τοπικής μόνιμης δομικής αλλαγής που λαμβάνει χώρα σε ένα υλικό υποκείμενο σε συνθήκες οι οποίες προκαλούν αυξομειούμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε ένα ή περισσότερα σημεία, με πιθανό αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών ή πλήρους αστοχίας μετά από ένα μεγάλο αριθμό αυξομειώσεων»

Για να επέλθει αστοχία από κόπωση στη κατασκευή πρέπει να επέλθουν τα παρακάτω στάδια:

1. Δημιουργία της ρωγμής
2. Διάδοση της επικρατούσας ρωγμής
3. Τελική θραύση

4.9.2 Φαινόμενο ολιγοκυκλικής φόρτισης

Ως φαινόμενο ολιγοκυκλικής φόρτισης (Low-cycle fatigue) ορίζεται ως η αστοχία που επέρχεται από σεισμικές δράσεις. Αφορά την έκθεση της κατασκευής σε ένα πλήθος κύκλων σεισμικών δονήσεων, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις και κατά συνέπεια κατάρρευση του φορέα. Σε τέτοια μορφή αστοχίας μπορεί να επέλθουν οι συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων.



Σχήμα 4-11 Διάγραμμα ολιγοκυκλικής φόρτισης

4.9.3 Εναπομένουσα ζωή της κατασκευής λόγω κόπωσης

Κατά συνέπεια των ανωτέρων συνθηκών αν μία κατασκευή υφίσταται επαναλαμβανόμενες μικρής έντασης σεισμικές δυνάμεις, στα επιμέρους υλικά είτε στο σύνολο της δομής μπορεί να επέλθει αστοχία εξαιτίας της κόπωσης. Κατά συνέπεια η ζωή της κατασκευής μπορεί να περιοριστεί σημαντικά σε σχέση με την υπολογισθείσα, λόγω κυκλικής επαναλαμβανόμενης εφαρμογή τάσεων κόπωσης και γι' αυτό το λόγο η συνεχής παρακολούθηση μίας δομής μπορεί να δώσει τα κατάλληλα αποτελέσματα για την πρόληψη μίας αστοχίας λόγω κόπωσης και να εξασφαλίσει την ασφάλεια χρήσης του κτιρίου προγραμματίζοντας τις απαιτούμενες επεμβάσεις σε μία χρονική στιγμή συμφέρουσα και ως προς το κόστος επισκευής (λιγότερες απαιτούμενες ενέργειες από πρόληψη βλάβης) και ως προς τη λειτουργία (προγραμματισμένη επισκευή).

4.10 Μέθοδοι ανάλυσης κατασκευών

Για την σωστή εκτίμηση της κατάστασης μίας κατασκευής, είναι σημαντική η ακριβής και σωστή αποτύπωσή της και εν συνεχεία η εκτίμηση του καταλληλότερου τρόπου ανάλυσης της για όσο το δυνατόν πιο ακριβή και έγκυρα αποτελέσματα.

«Οι προτεινόμενες μέθοδοι, διακρίνονται στις ελαστικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται και για την ανάλυση νέων κατασκευών, με κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες των υφιστάμενων κατασκευών, και στις ανελαστικές, οι οποίες αν και είναι πιο απαιτητικές όσον αφορά τους υπολογισμούς, δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα μέσω της λεπτομερούς προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δομικών μελών.» [Δ. Μπάρος, 2006]

Σύμφωνα λοιπόν με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω οι μέθοδοι ανάλυσης μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ελαστικές αναλύσεις
- Ανελαστικές αναλύσεις

4.10.1 Ελαστικές αναλύσεις

4.10.1.1 Δυναμική φασματική ανάλυση (Γραμμική, Ελαστική)

Η δυναμική φασματική μέθοδος, η οποία είναι μια δυναμική ανάλυση που μπορεί να εντοπίσει τη μέγιστη απόκριση των κατασκευών, λειτουργεί χρησιμοποιώντας την επαλληλία των σημαντικών ιδιομορφών σε συνδυασμό με ομαλοποιημένο φάσμα σχεδιασμού. Σημαντικές είναι οι ιδιομορφές οι οποίες συμπεριλαμβάνουν ποσοστό 90% της συνολικής μάζας του συστήματος.

Μεθοδολογία:

- Υπολογισμός σημαντικών ιδιομορφών και κατά συνέπεια ιδιοπεριόδων
- Υπολογισμός μέγιστης απόκρισης της κάθε ιδιομορφής με το φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού
- Επαλληλία μέγιστων αποκρίσεων ιδιομορφών για την εκτίμηση της μέγιστης απόκρισης του συστήματος
- Επαλληλία μέγιστων αποκρίσεων για ταυτόχρονη δράση όλων των συνιστωσών του σεισμού

Η εφαρμογή της μεθόδου της δυναμικής φασματικής ανάλυσης είναι δυνατή σε κάθε τύπο κτιρίου.

4.10.1.2 Απλοποιημένη φασματική – Ισοδύναμη στατική ανάλυση

Η απλοποιημένη φασματική μέθοδος προκύπτει από την δυναμική φασματική με χρήση μόνο της πρώτης ιδιομορφής. Είναι μία στατική ανάλυση με ισοδύναμη οριζόντια φόρτιση (σεισμική δράση) και με χρήση ομαλοποιημένου φάσματος σχεδιασμού. Το φάσμα σχεδιασμού προσδιορίζει τη φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού με τη χρήση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, δηλαδή αυτής της πρώτης ιδιομορφής. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί άμεσα η σεισμική απόκριση της κατασκευής.

Μεθοδολογία:

- Υπολογισμός θεμελιώδους ιδιοπεριόδου κατά x και y και προσδιορισμός φασματικής επιτάχυνσης σχεδιασμού και στις δύο διευθύνσεις
- Υπολογισμός τέμνουσας βάσης (συνολικό μέγεθος σεισμικών φορτίων) κατά x και y
 - ❖ $V_0 = M \times \Phi_d(T)$
 - όπου M = συνολική ταλαντωμένη μάζα
 - Φ_d = φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού
 - T = θεμελιώδης ιδιοπερίοδος κατασκευής
- Κατανομή τέμνουσας βάσης στους ορόφους
- Υπολογισμός μέγιστων μετατοπίσεων κατασκευής

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε κανονικά κτίρια και προϋποθέτει διαφραγματική λειτουργία των ορόφων.

4.10.1.3 Γραμμική ανάλυση χρονοιστορίας

Εξετάζει την απόκριση της κατασκευής όταν επιβάλλονται σ' αυτή, και στις 3 διευθύνσεις, φορτίσεις με μορφή επιταχυνσιογραφήματος. Εφαρμόζεται στην κατασκευή σεισμική φόρτιση από επιταχυνσιογράφημα εδαφικών δονήσεων και για κάθε χρονική στιγμή της διέγερσης πραγματοποιείται δυναμική επίλυση. Η απόκριση του συστήματος είναι ευαίσθητη σε μικρομεταβολές των βασικών παραμέτρων του όπως μάζα, δυσκαμψία κ.α.

Η συγκεκριμένη μέθοδος προϋποθέτει γραμμικά ελαστική συμπεριφορά κατασκευής καθώς επίσης πολυπλοκότητα στα αποτελέσματα εξόδου. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων της η εφαρμογή της είναι σπάνια.

4.10.2 Ανελαστικές αναλύσεις

4.10.2.1 Ανελαστική στατική ανάλυση (Pushover analysis)

Με την ανάλυση pushover γίνεται εκτίμηση των ανελαστικών παραμορφώσεων οι οποίες αναπτύσσονται στα μέλη της κατασκευής όταν αυτή εκτίθεται σε μία σεισμική δράση. Αναλύει τη μη γραμμική, ανελαστική απόκριση του συστήματος υπό την δράση στατικών οριζόντιων δυνάμεων ως προσομοίωση σεισμικής δράσης. Συμπεριλαμβάνεται σε πολλούς κανονισμούς τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό, όπως EC8, ΚΑΝ.ΕΠΕ, FEMA, ASCE. Κατά την ανάλυση pushover εξετάζεται ο φορέας υπό δράση σταθερών αδρανειακών φορτίων που αναπαρίστανται ως οριζόντιες δυνάμεις οι οποίες αυξάνουν μονότονα.

Βασικά αποτελέσματα της μεθόδου:

- Καμπύλη αντίστασης (ή καμπύλη ικανότητας)
 - Αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ της τέμνουσας βάσης και του ορόφου και του κόμβου ελέγχου, ο οποίος είναι το Κ.Μ. στην κορυφή του φορέα.
- Στοχευόμενη μετακίνηση
 - Αναμενόμενη μετακίνηση ορόφου, ορίζει σημείο επιτελεστικότητας.

Χρησιμοποιείται σε συνδιασμό με την δυναμική φασματική μέθοδο για περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων.

4.10.2.2 Δυναμική ανελαστική ανάλυση

Η δυναμική ανελαστική μέθοδος χρησιμοποιεί προσομοιώματα κατασκευών με ανελαστική συμπεριφορά. Η απόκριση της κατασκευής ελέγχεται με επαναληπτική διαδικασία, εφαρμογής σεισμικής φόρτισης, με μορφή επιταχυνσιογραφημάτων εδαφικής κίνησης.

Εξαρτάται από δύο παράγοντες για να λειτουργήσει αποτελεσματικά, από την σωστή μεταφορά του προσομοιώματος με μη γραμμική συμπεριφορά καθώς και από την επιλογή του κατάλληλου επιταχυνσιογραφήματος.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου πλησιάζουν την πραγματική συμπεριφορά της δομής και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε κατασκευή και έδαφος με την προϋπόθεση της χρήσης περισσότερων επιταχυνσιογραφημάτων για ελαχιστοποίηση των λαθών.

Παρά την ακρίβεια της μεθόδου η εφαρμογή της για αποτίμηση κατασκευών δεν ενδείκνυται λόγω του μεγάλου υπολογιστικού όγκου καθώς και της δυσκολίας από την πλευρά του χρήστη για επιλογή κατάλληλου επιταχυνσιογραφήματος όπως και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Η χρήση της περιορίζεται για ερευνητικούς σκοπούς όπως και για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων άλλων μεθόδων.

5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

5.1 Εργαλεία προσομοίωσης-ανάλυσης δυναμικής συμπεριφοράς

Για την ανάλυση και κατανόηση της συμπεριφοράς των κατασκευών απαιτείται η προσομοίωση τους με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων προσομοίωσης. Μέσω της προσομοίωσης μπορεί να αναπαραχθεί και κατά συνέπεια να αποτιμηθεί η συμπεριφορά των δομών υπό την επίρεια επιβαλλόμενων φορτίσεων. Μια αποτελεσματική μέθοδος, σύμφωνα με την οποία το μοντέλο προσομοιώνεται με ένα αριθμό περιοχών που ονομάζονται στοιχεία είναι η μέθοδος ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Κάνοντας χρήση ενός μεγάλου αριθμού στοιχείων κάνουμε εφικτή την αντιπροσωπευτική προσέγγιση της πραγματικής κατασκευής.

Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Κάθε κόμβος έχει κάποιες δυνατότητες μετατόπισης, δηλαδή βαθμούς ελευθερίας. Αυτό σημαίνει ότι σε μία τρισδιάστατη δομή οι βαθμοί ελευθερίας είναι τρεις, σε μία δισδιάστατη δύο και σε μονοδιάστατη μία. Σύμφωνα με την ανάλυση, από τις μετατοπίσεις των κόμβων υπολογίζονται οι μετατοπίσεις όλων των επιμέρους σημείων των στοιχείων και στη συνέχεια με τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και τάσεων προκύπτει το στατικό μοντέλο της κατασκευής.

Με την προσομοίωση των κατασκευών και την ανάλυση τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνουμε πληροφορίες όπως την παραμόρφωση και τις μέγιστες μετατοπίσεις που υφίσταται η κατασκευή λόγω διαφόρων ειδών φορτίσεων, συμπεριλαμβανομένου του σεισμού ούτως ώστε να γίνει η εκτίμηση των καταλληλότερων κόμβων για την τοποθέτηση των αισθητήρων και την καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης της δομής.

5.2 Εργαλεία προσομοίωσης-ανάλυσης δυναμικής συμπεριφοράς

Στην αγορά διατίθενται πλήθος προγραμμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε ανάγκη ανάλυσης κατασκευών. Κάποια από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και ανάλυση των κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

- STRAAD
- StereoSTATIKA
- Next
- SCADA PRO
- Etabs
- Sap2000 κ.α.

5.3 Το SAP2000

Στην συγκεκριμένη εργασία η προσομοίωση θα γίνει με το πρόγραμμα Sap2000. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορεί να εκτελεστεί μοντελοποίηση, ανάλυση, σχεδιασμός και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Μετά την μοντελοποίηση της κατασκευής το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα τους κόμβους στις ενώσεις των δομικών στοιχείων. Διαθέτει ενσωματωμένους ευρωπαϊκούς και διεθνείς κανονισμούς σύμφωνα με τους οποίους μπορούν να εφαρμοστούν στα στοιχεία της δομής οι επιβαλλόμενες φορτίσεις σεισμικές, ανέμου, μόνιμα και κινητά φορτία. Στην συνέχεια εκτελείται η δυναμική ανάλυση της δομής υπό την επιθυμητή φόρτιση ή φορτίσεις σε συνδυασμό και τέλος τα αποτελέσματα παρατίθενται στον χρήστη.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορεί να εκτελέσει 6 διαφορετικές στατικές αναλύσεις

- Γραμμική στατική ανάλυση υπό την δράση κατακόρυφων φορτίων
- Γραμμική στατική ανάλυση υπό την δράση κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων
- Ιδιομορφική ανάλυση
- Φασματική ανάλυση
- Ανάλυση Χρονοϊστορίας
- Στατική, μη-γραμμική, υπερωθητική ανάλυση (Pushover)

5.4 Αποτελέσματα ανάλυσης με το πρόγραμμα SAP2000

Αυτά μπορεί να είναι η παραμορφωμένη δομή του φορέα, δηλαδή οι ιδιομορφές ταλάντωσής του, τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών, τις γενικευμένες μετατοπίσεις, τις δυνάμεις και ροπές που αναπτύσσονται στις διατομές των στοιχείων και προσδιορίζονται με τη χρήση των τομών διατομών, τα διαγράμματα δυνατών έργων για τον εντοπισμό και ενίσχυση των πιο αδύναμων στοιχείων και των γραμμών επιρροής, ως αποτέλεσμα των ασκούμενων μετατοπίσεων και τάσεων.

Τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν και σε μορφή πινάκων, οι οποίοι μπορούν να απεικονίσουν τα δεδομένα της εισόδου, τα αποτελέσματα της ανάλυσης και του σχεδιασμού. Οι πίνακες δίνουν δυνατότητες επεξεργασίας, όπως ταξινόμηση και αντιγραφή σε άλλα προγράμματα, αλλά και εξαγωγής των πινάκων αυτών σε άλλες μορφές αρχείων όπως Access, Excel, Word, HTML ή TXT.

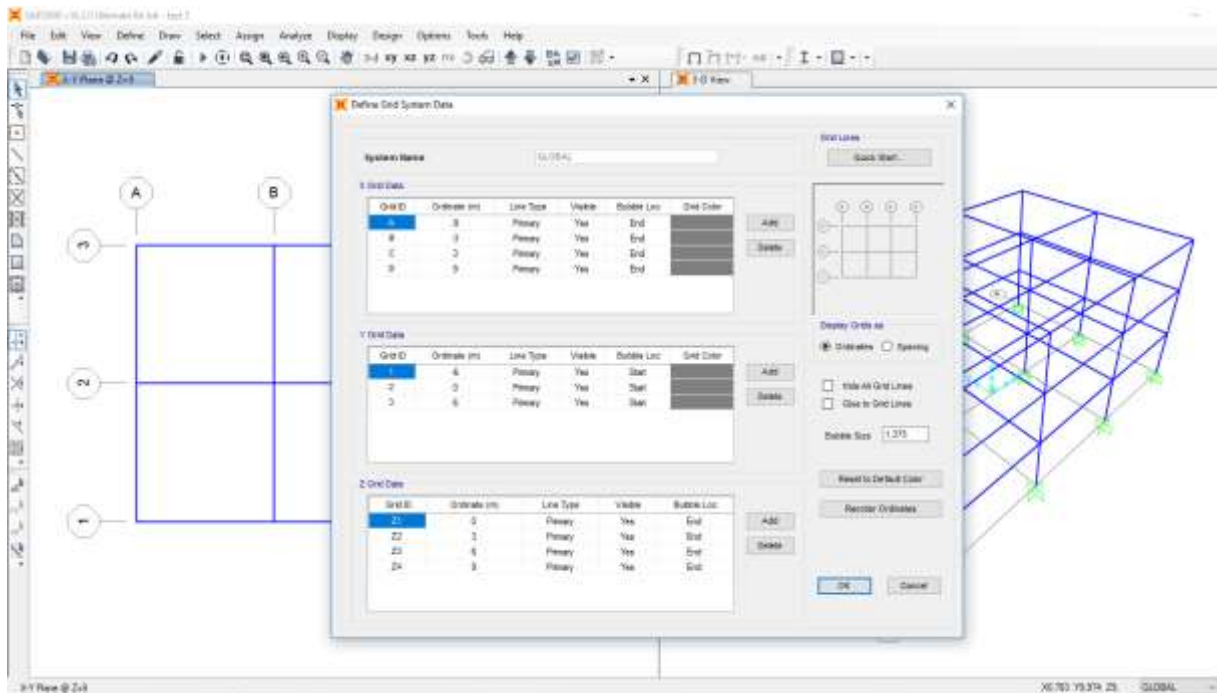
Εν συνεχεία αυτά τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από το πρόγραμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλα προγράμματα όπως το Matlab από το οποίο μπορούν να δοθούν πολύτιμα αποτελέσματα σχετικά με την ανάλυση και εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων της κατασκευής.

5.5 Παράδειγμα χρήσης της εφαρμογής

Στην προκειμένη περίπτωση, για να αποκτηθούν τα απαραίτητα δεδομένα, αρκεί να εφαρμοστεί ιδιομορφική ανάλυση στις υπό εξέταση κατασκευές. Η ιδιομορφική ανάλυση υπολογίζει τις ιδιομορφές ταλάντωσης της κατασκευής, μέσω των οποίων γίνεται κατανοητή η συμπεριφορά της.

Παρακάτω θα αναλυθούν ο τρόπος προσομοίωσης και ανάλυσης ενός παραδείγματος κατασκευής μέσω του προγράμματος Sap2000 με όλα τα απαραίτητα βήματα για την ανάλυση της κατασκευής

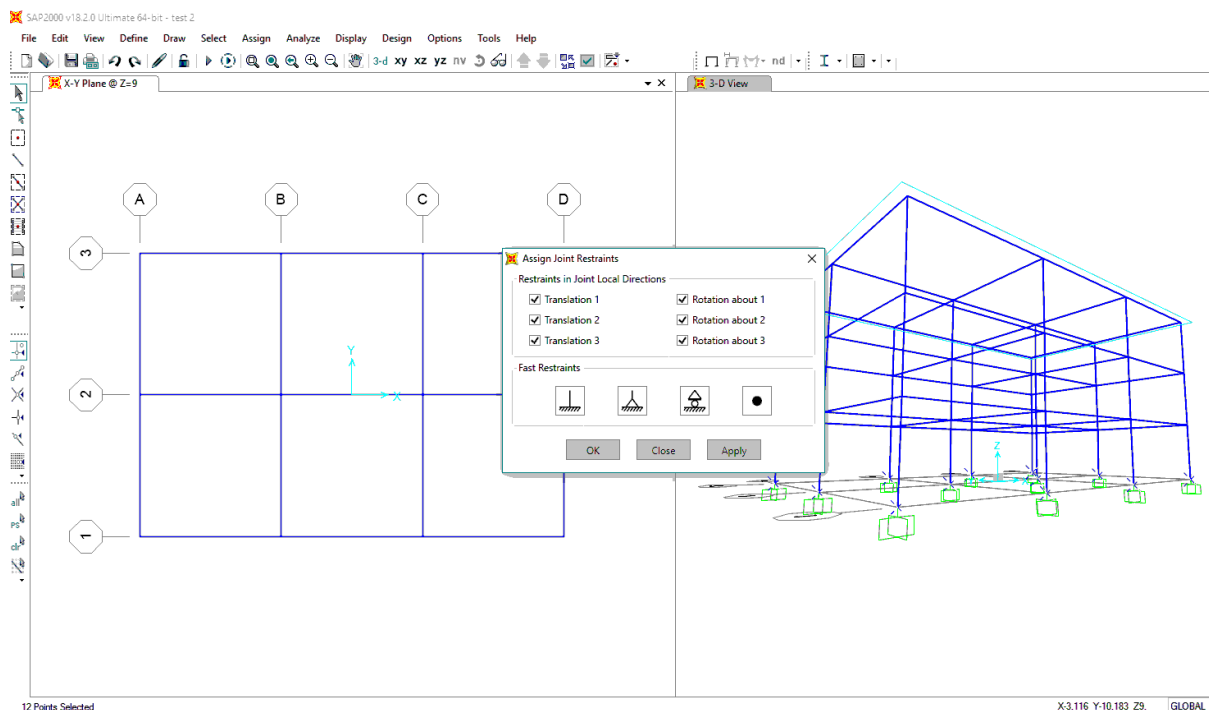
1. Ορίζουμε τον κάναβο σύμφωνα με τις επιθυμητές διαστάσεις και σχεδιάζουμε την κατασκευή.



Σχήμα 5-1 Σχεδιασμός προσομοιώματος κατασκευής

2. Ορίζονται ως πακτώσεις όλοι η κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος.

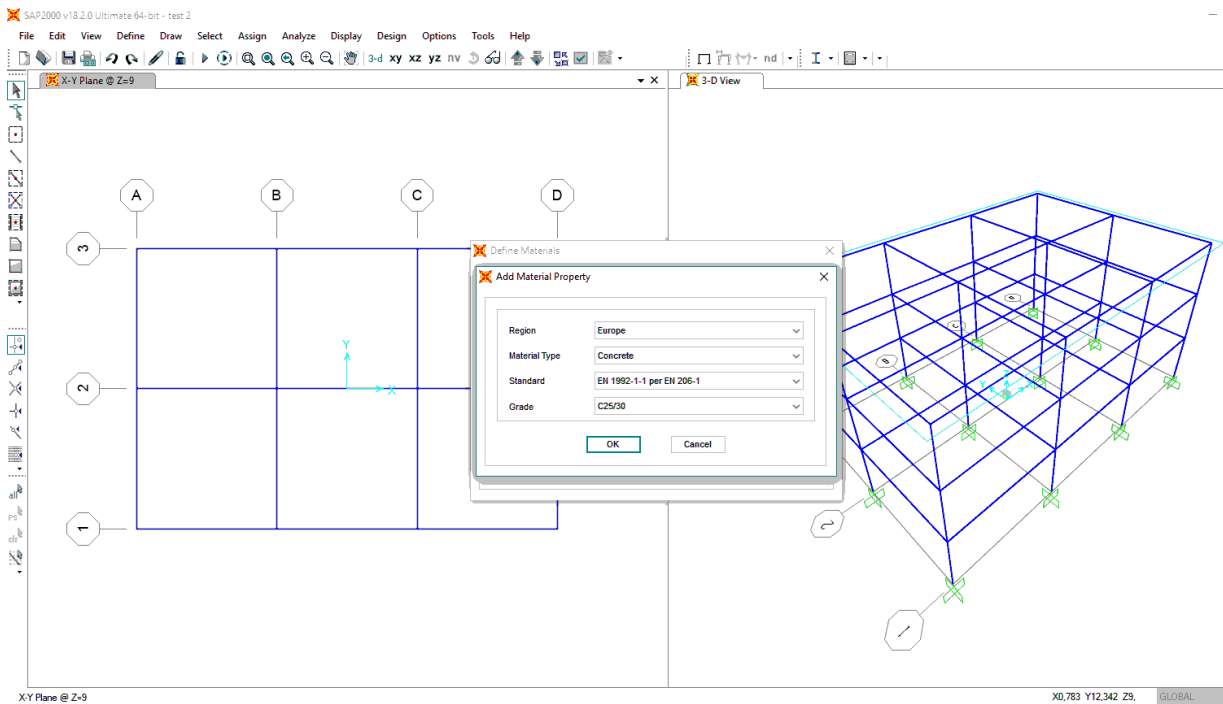
Assign→ Joints→ Restraints



Σχήμα 5-2 Ορισμός των στηρίξεων.

3. Ορίζονται τα υλικά της κατασκευής.

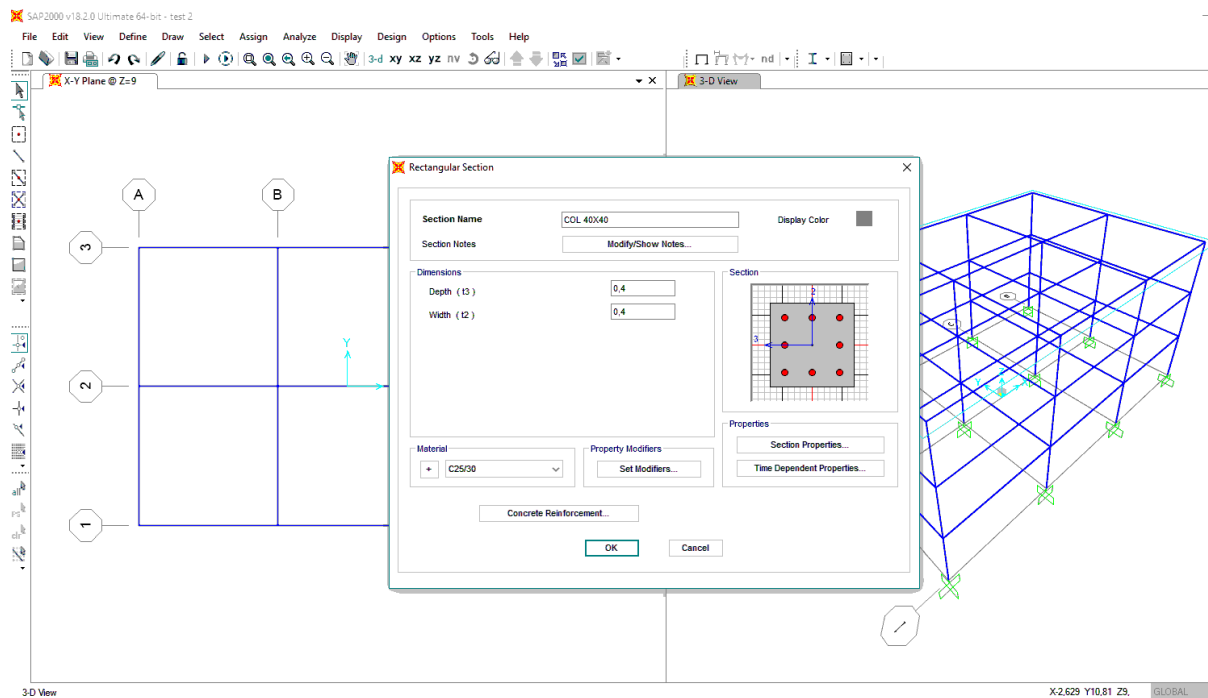
Define→ Materials→ Add new material



Σχήμα 5-3 Ορισμός των υλικών που απαρτίζουν τα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής.

4. Ορίζονται οι διατομές που απαρτίζουν την κατασκευή με ορισμό των διαστάσεων και υλικών.

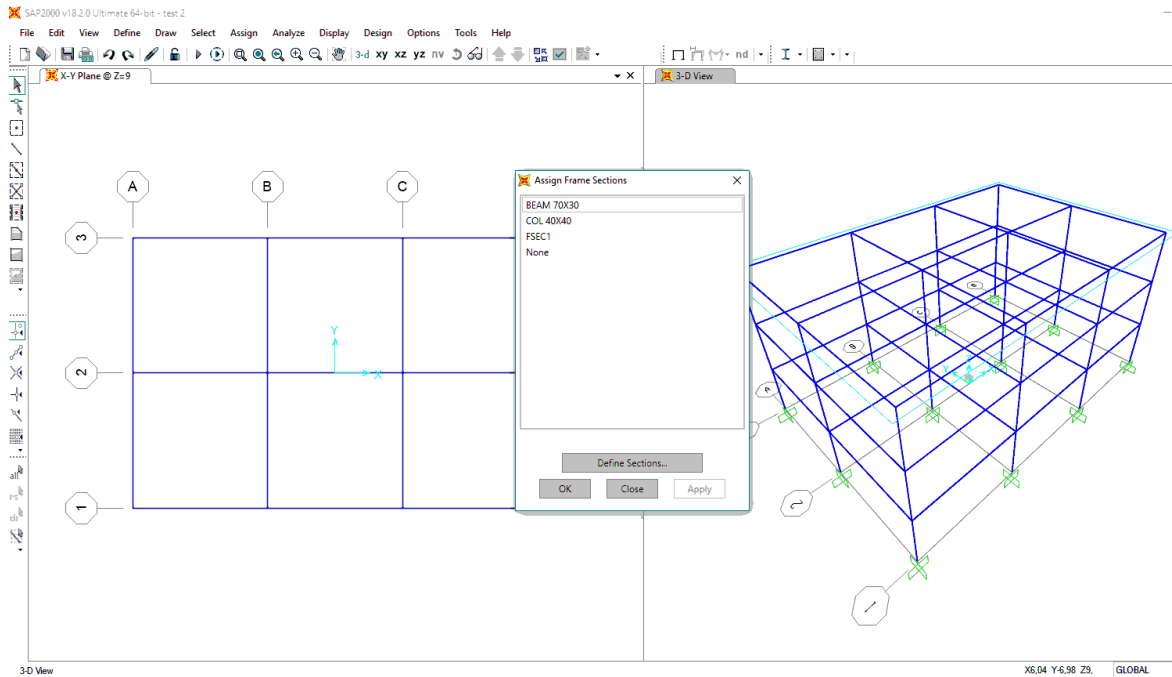
Define → Section properties → Frame section → Add new property



Σχήμα 5-4 Ορισμός διατομών κατασκευής

5. Γίνεται εφαρμογή των ορισμένων διατομών στα αντίστοιχα δομικά στοιχεία.

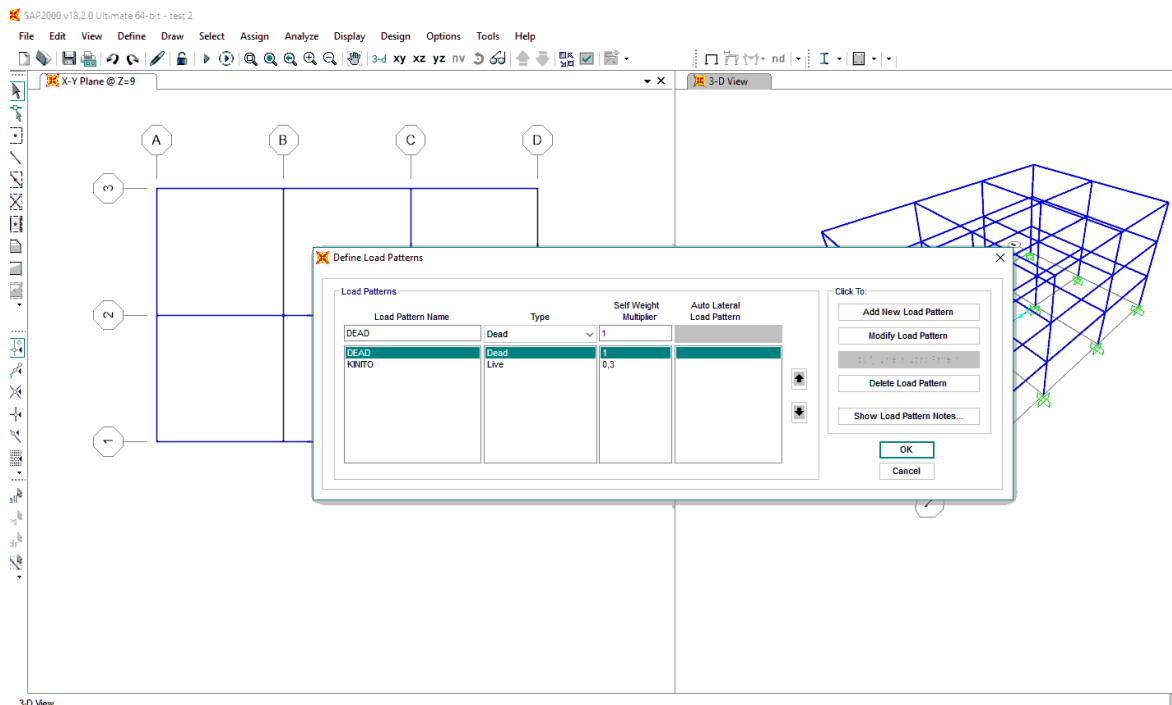
Assign→ Frame→ Frame section



Σχήμα 5-5 Εφαρμογή ορισμένων διατομών στα επιμέρους στοιχεία

6. Οριζόντια μόνιμα και κινητά φορτία σχεδιασμού

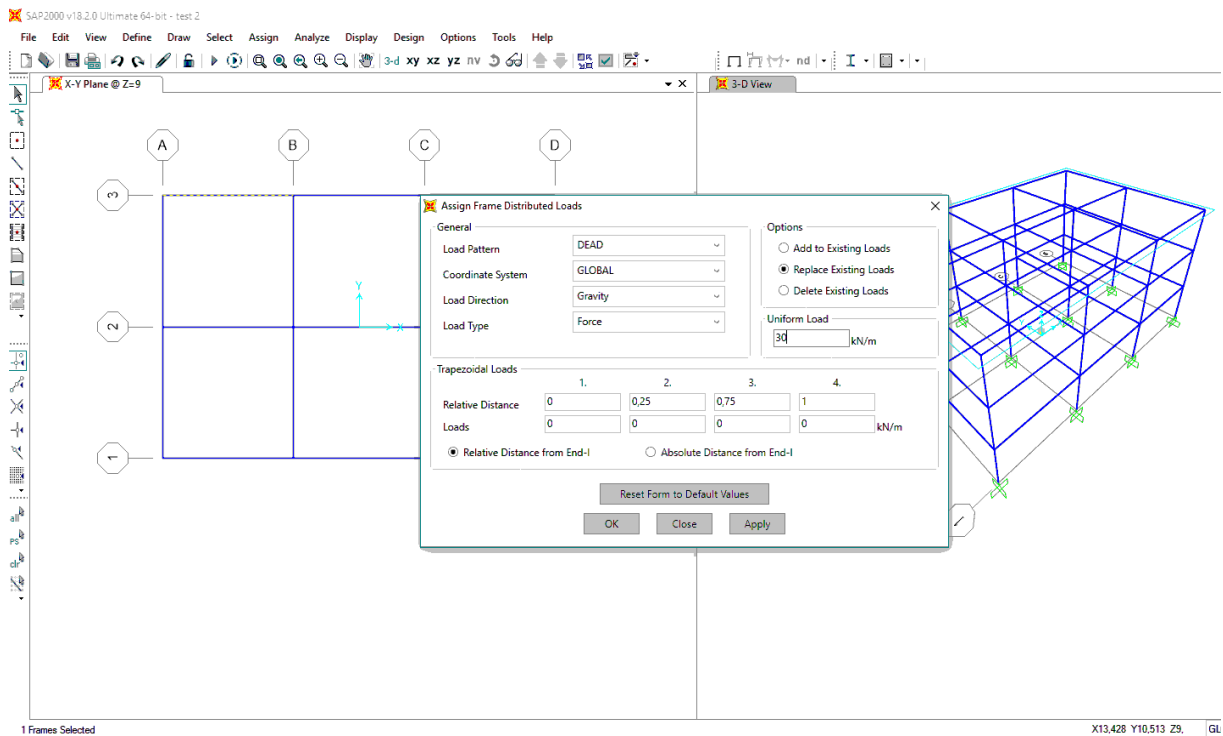
Define→ Load Patterns



Σχήμα 5-6 Ορισμός φορτίων σχεδιασμού

7. Υπολογισμός και εφαρμογή φορτίων βαρύτητας στα επιμέρους δομικά στοιχεία.

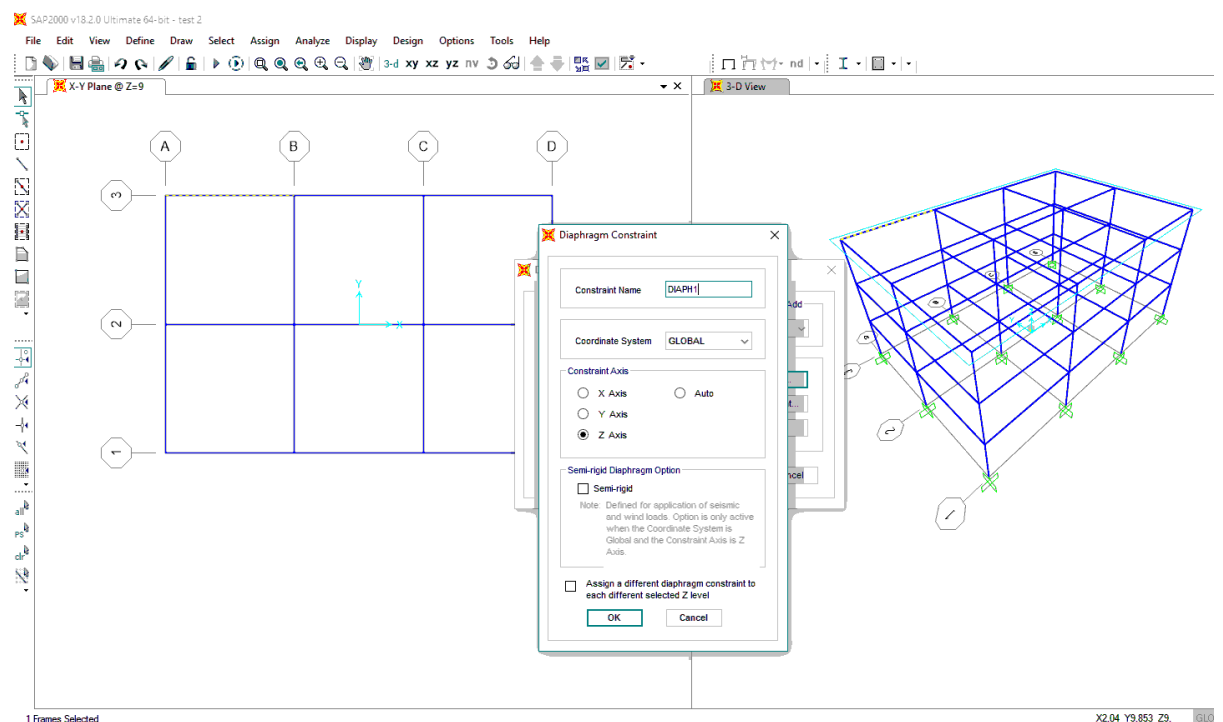
Assign→ Frame loads→ Distributed (Μία για μόνιμα- Μια για κινητά)



Σχήμα 5-7 Εφαρμογή φορτίων βαρύτητας

8. Ορισμός διαφράγματος για εξασφάλιση διαφραγματικής λειτουργίας πλακών.

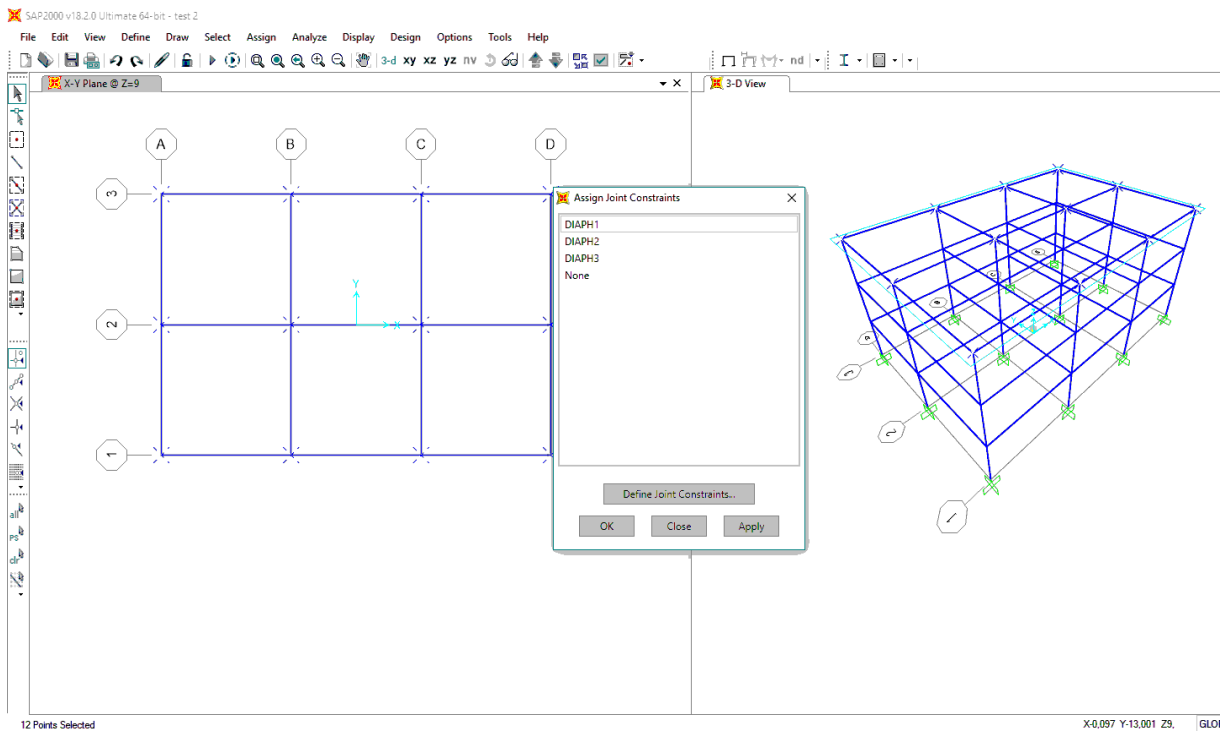
Define → Joint constraints → Diaphragm → Add new diaphragm (ένα για κάθε όροφο)



Σχήμα 5-8 Ορισμός διαφραγμάτων ορόφων

9. Εφαρμογή ορισμένων διαφραγμάτων στους επιμέρους ορόφους

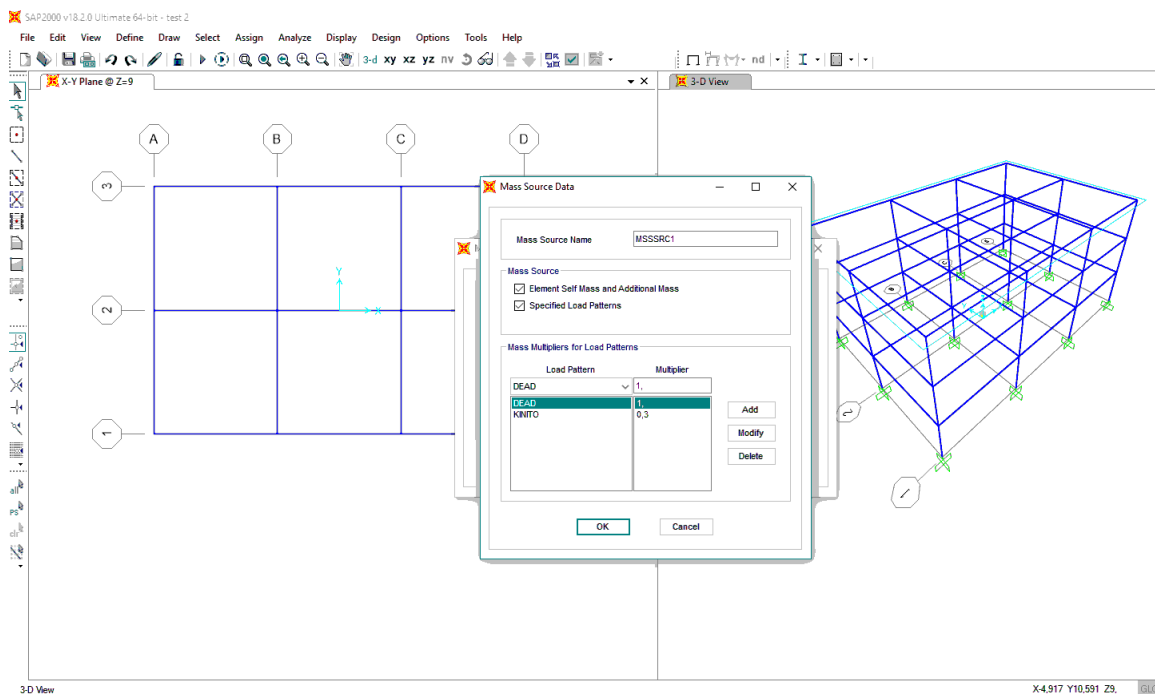
Assign → Joints → Constraints (έχοντας προηγουμένως επιλέξει τους κόμβους του ορόφου)



Σχήμα 5-9 Εφαρμογή ορισμένων διαφραγμάτων

10. Ορίζεται το ποσοστό της μάζας που συμμετέχει στην ταλάντωση

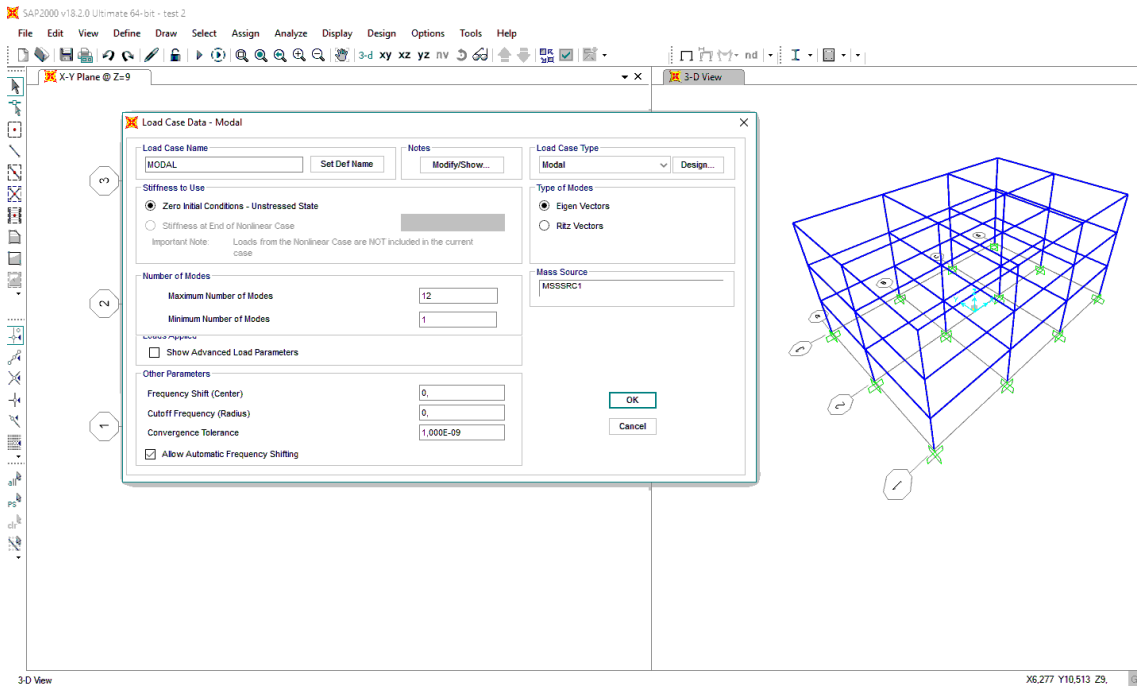
Define → Mass source → Modify /show mass source



Σχήμα 5-10 Ορισμός μάζας που συμμετέχει

11. Ορίζονται οι παράμετροι και ο αριθμός των επιθυμητών ιδιομορφών.

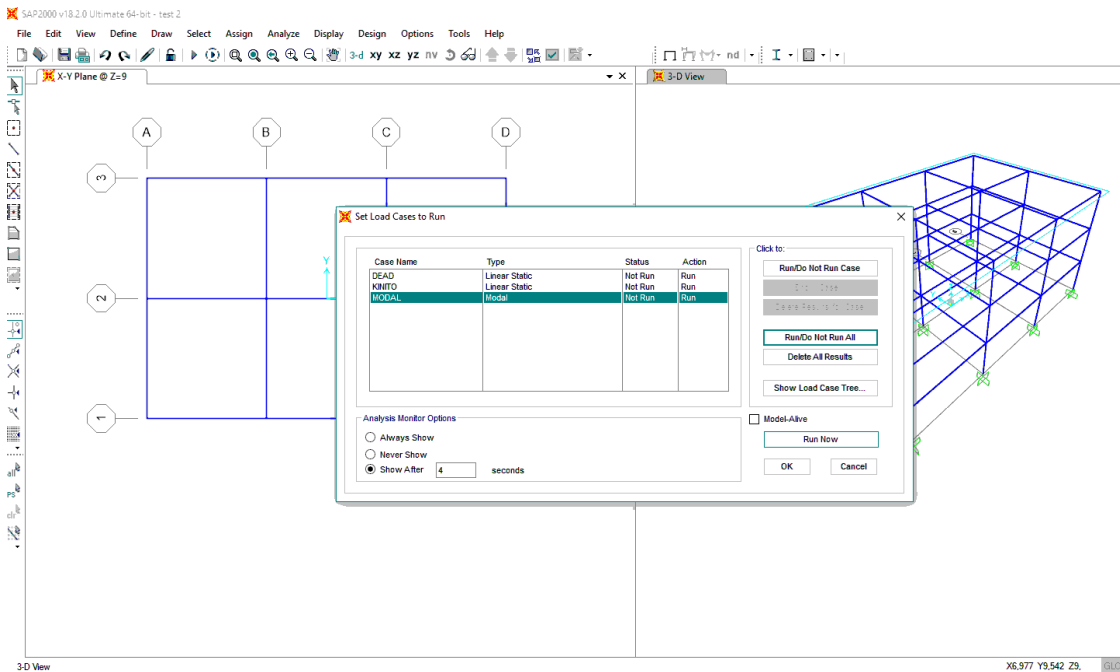
Define → Load Cases → Modal



Σχήμα 5-11 Ορισμός χαρακτηριστικών των ιδιομορφών

12. Run Analysis (Εκτέλεση ανάλυσης της κατασκευής)

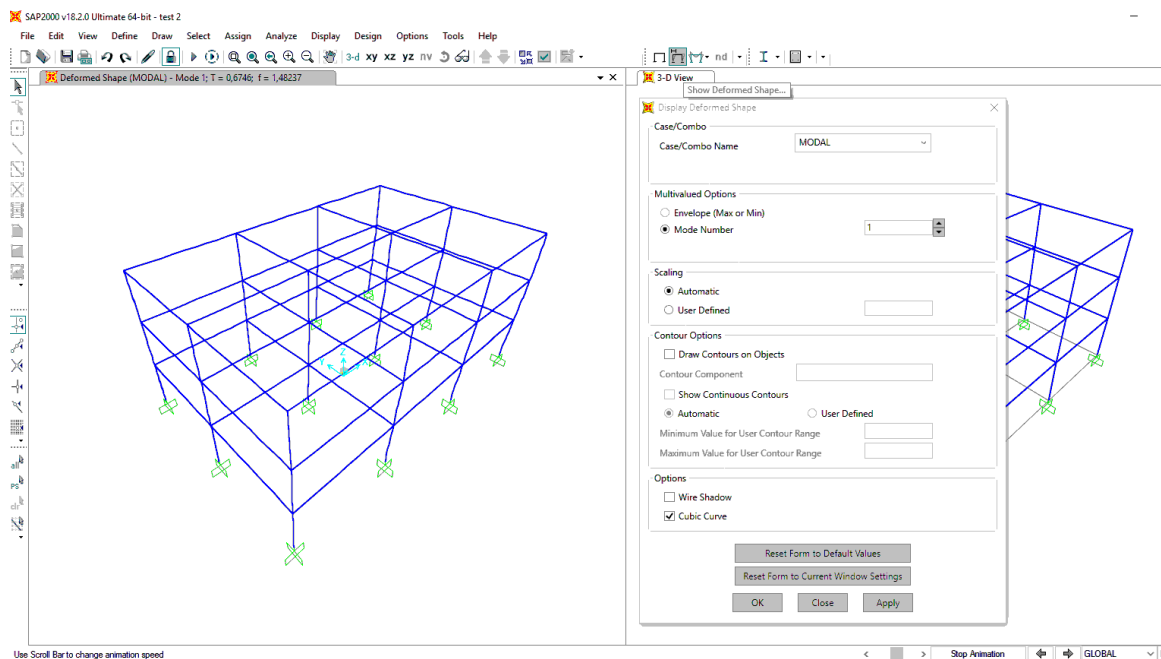
Run Analysis → Run all → Run



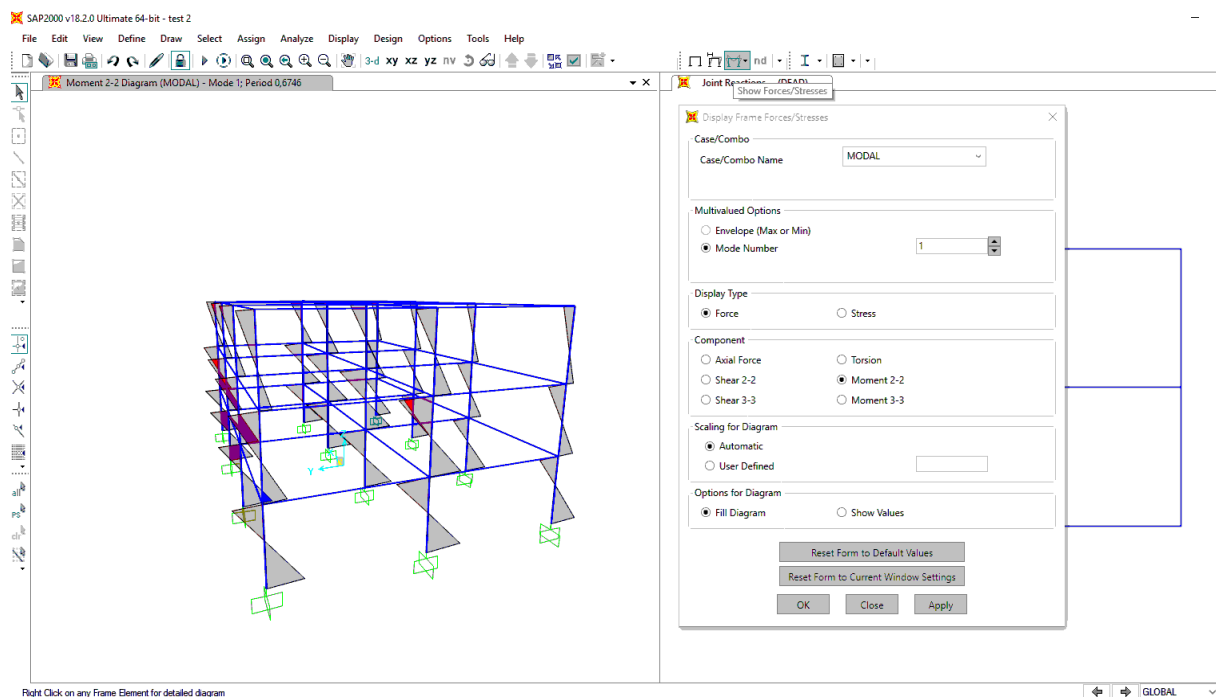
Σχήμα 5-12 Run analysis

Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα της τα οποία απεικονίζονται στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος. Αυτά μπορεί να είναι οι

ιδιομορφές ταλάντωσης, οι τάσεις που αναπτύσσονται στους κόμβους, τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών κ.α.

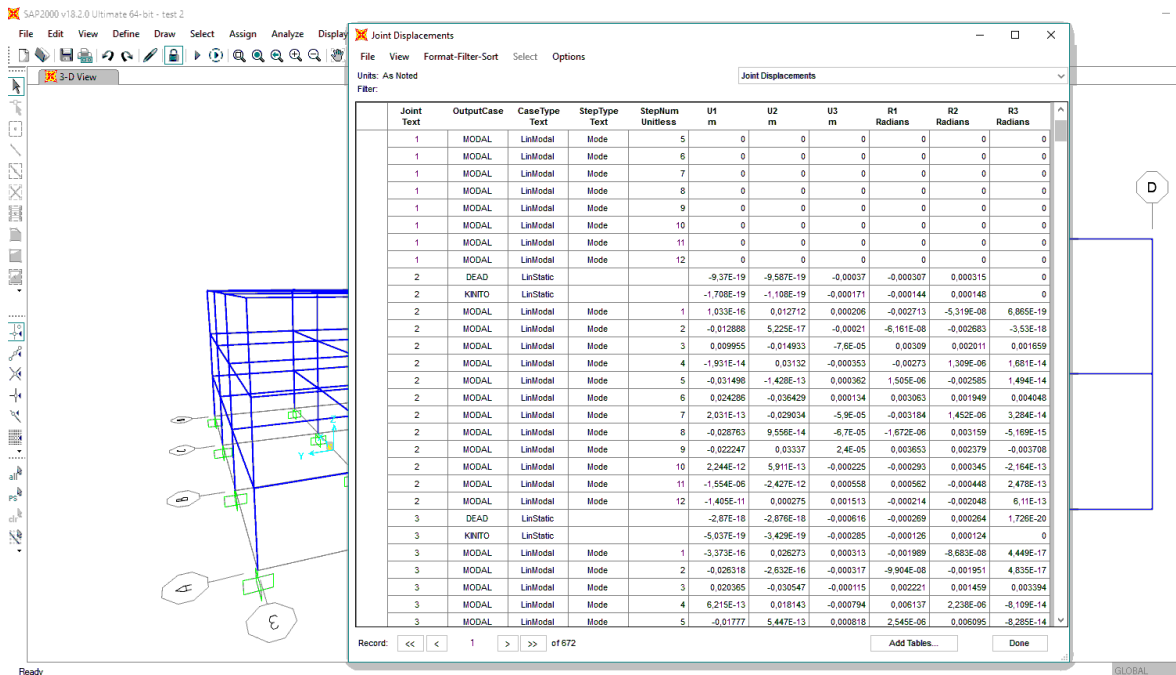


Σχήμα 5-13 Ιδιομορφές ταλάντωσης

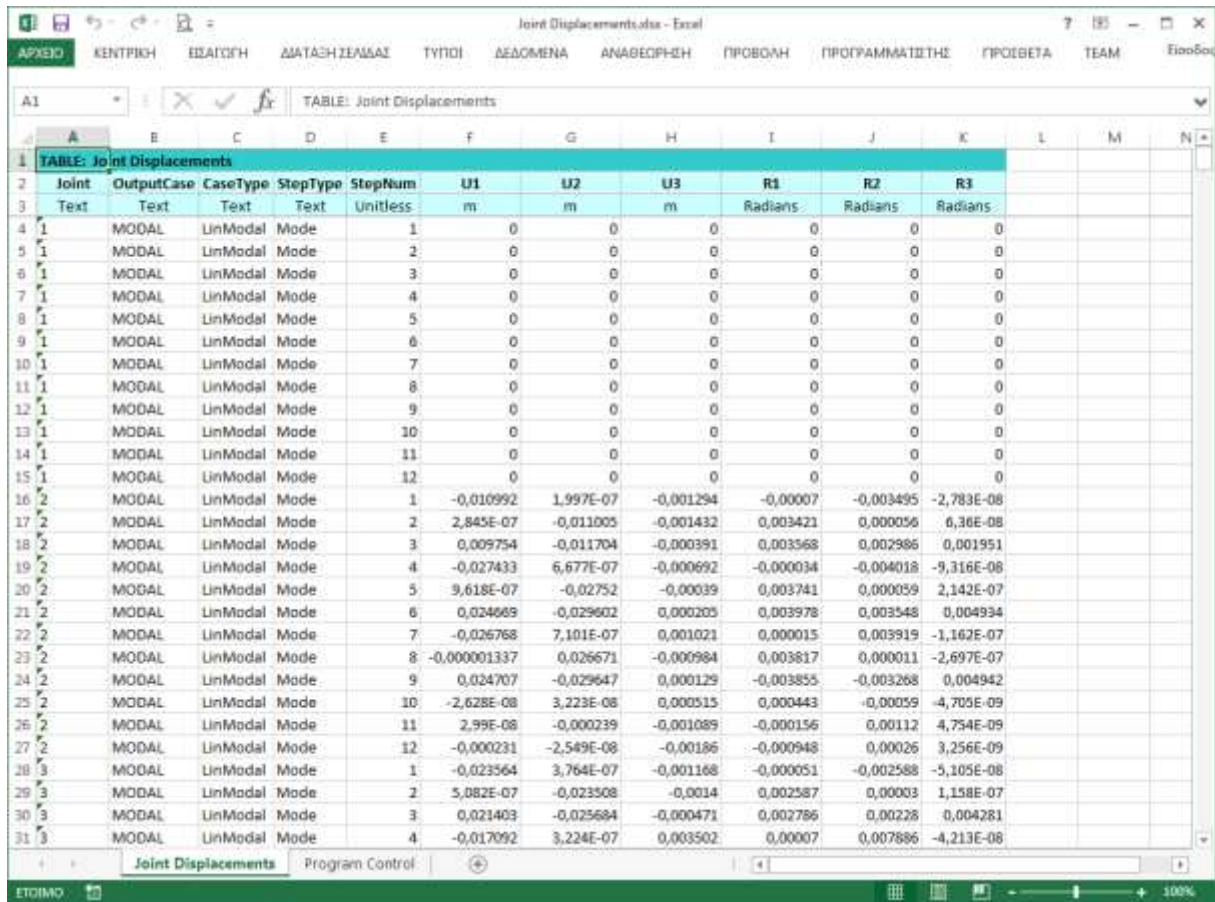


Σχήμα 5-14 Διάγραμμα ροπών

Επίσης τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι δυνατό να αποτυπωθούν σε πίνακες τους οποίους ο χρήστης μπορεί να διαβάσει και να επεξεργαστεί είτε εντός του προγράμματος είτε κάνοντας εξαγωγή στις μορφές που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5-15 Joints Displacements



Σχήμα 5-16 Εξαγωγή joints displacements σε excel

Modal Participating Mass Ratios - Excel

ΑΡΧΕΙΟ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΥΠΟΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΗΣ ΠΡΟΔΟΣΕΤΑ TEAM

Α1 TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0,485924	0,87222	7,844E-13	6,953E-15	0,87222	7,844E-13	6,953E-15	7,932E-13	0,04737	1,25E-10	7,932E-13	0,04737	1,25E-10
MODAL	Mode	2	0,490661	7,906E-12	0,8719	1,335E-14	0,87222	0,8719	2,031E-14	0,05806	6,433E-13	6,392E-10	0,05806	0,04737	7,642E-10
MODAL	Mode	3	0,398633	1,096E-10	5,537E-10	5,837E-14	0,87222	0,8719	7,867E-14	6,634E-11	1,255E-11	0,86605	0,05806	0,04737	0,86605
MODAL	Mode	4	0,101923	0,10323	1,683E-12	1,458E-14	0,97545	0,8719	9,326E-14	5,382E-12	0,23048	2,421E-11	0,05806	0,27785	0,86605
MODAL	Mode	5	0,16089	1,598E-12	0,10429	1,113E-15	0,97545	0,9762	9,437E-14	0,28164	4,057E-12	1,239E-10	0,3397	0,27785	0,86605
MODAL	Mode	6	0,128238	3,066E-11	1,673E-10	7,189E-14	0,97545	0,9762	1,663E-13	3,864E-10	6,726E-11	0,10742	0,3397	0,27785	0,97347
MODAL	Mode	7	0,098718	0,02436	5,623E-15	5,57E-15	0,99981	0,9762	1,722E-13	3,114E-18	0,01499	6,813E-12	0,3397	0,29284	0,97347
MODAL	Mode	8	0,098411	4,54E-15	0,02359	4,402E-16	0,99981	0,99979	1,727E-13	0,01909	1,109E-16	3,921E-11	0,35879	0,29284	0,97347
MODAL	Mode	9	0,070087	2,806E-11	1,482E-10	2,139E-13	0,99981	0,99979	3,866E-13	1,075E-10	1,499E-11	0,0265	0,35879	0,29284	0,99997
MODAL	Mode	10	0,067031	1,35E-16	7,601E-16	0,51299	0,99981	0,99979	0,53299	2,934E-13	9,394E-14	2,456E-14	0,35879	0,29284	0,99997
MODAL	Mode	11	0,063113	1,921E-15	0,000002839	2,091E-12	0,99981	0,99979	0,53299	0,3206	4,303E-13	2,598E-14	0,6794	0,29284	0,99997
MODAL	Mode	12	0,062389	0,000002284	1,52E-15	3,468E-14	0,99981	0,99979	0,53299	1,337E-14	0,26388	1,168E-14	0,6794	0,55672	0,99997

Modal Participating Mass Ratios Program Control

Σχήμα 5-17 Εξαγωγή modal participating mass ratio σε excel

6 Εύρεση βέλτιστων θέσεων αισθητήρων σε παραδείγματα εφαρμογών

6.1 Εισαγωγή

Στο στάδιο αυτό της εργασίας θα γίνει προσομοίωση κάποιων κατασκευών μέσω του προγράμματος SAP2000. Τα αποτελέσματα του προγράμματος θα είναι οι θέσεις και οι τιμές των μετατοπίσεων που συμβαίνουν στα φέροντα στοιχεία των επιμέρους δομών υπό την επίδραση κάποιας σεισμικής δράσης. Αυτά θα προκύψουν από την ιδιομορφική ανάλυση της δομής από την οποία θα ληφθούν οι μετατοπίσεις των κόμβων σε μορφή πίνακα. Ο πίνακας αυτός θα εξαχθεί σε μορφή excel και εν συνεχεία τα δεδομένα θα επεξεργαστούν μέσω του προγράμματος Matlab το οποίο θα δώσει και τις βέλτιστες θέσεις των αισθητήρων ανάλογα με τις προϋποθέσεις και περιορισμούς που θα εφαρμοστούν από τον χρήστη.

6.2 Περιορισμοί στην εφαρμογή ενόργανης παρακολούθησης

Οι περιορισμοί που υποβάλλονται αφορούν κυρίως το κόστος του συστήματος παρακολούθησης. Ανάλογα με το διαθέσιμο ποσό επιλέγονται και οι δυνατές θέσεις. Φυσικά το βέλτιστο θα ήταν η παρακολούθηση να γίνεται με αισθητήρες σε κάθε πιθανό κόμβο, αυτό όμως θα είχε ως αποτέλεσμα ένα πολύ μεγάλο κόστος εγκατάστασης αλλά και παρακολούθησης καθώς και ένα πολύ μεγάλο πλήθος περιττών δεδομένων.

Με τον περιορισμό όμως των διαθέσιμων αισθητήρων, απαιτείται η ταξινόμηση των πιθανών θέσεων ενοργάνωσης με σειρά προτεραιότητας ως προς τα δεδομένα που θα αποκτηθούν, ώστε να γίνει όσο είναι εφικτό, πληρέστερα κατανοητή η συμπεριφορά της δομής ως προς την επιβαλλόμενη φόρτιση.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι η προσβασιμότητα σε έναν κόμβο πιθανής ενοργάνωσης. Για παράδειγμα, θα μπορούσε η βέλτιστη θέση ως προς τις παρεχόμενες πληροφορίες να είναι σε ένα σημείο όπου η πρόσβαση δεν είναι εφικτή οπότε αυτό το σημείο ακυρώνεται και πρέπει ο αισθητήρας να τοποθετηθεί στην επόμενη από τις βέλτιστες θέσεις.

6.3 Τεχνικές βελτιστοποίησης θέσεων αισθητήρων σε κατασκευές

Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Έχοντας N υποψήφιες θέσεις, βρείτε τις M θέσεις όπου $M < N$, οι οποίες προσφέρουν την καλύτερη απόδοση για το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης.

Το πλήθος όλων των διαφορετικών συνδυασμών των M αισθητήρων δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{N!}{M!(N-M)!}$$

Για μια κατασκευή που έχει απλή γεωμετρία ή λίγους βαθμούς ελευθερίας, αρκεί η προσέγγιση με την εμπειρία και με δοκιμή-και-λάθος για να βρεθεί η λύση. Για μεγάλης κλίμακας πολύπλοκες κατασκευές όμως, των οποίων το μοντέλο έχει δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες βαθμούς ελευθερίας, η εξαντλητική αναζήτηση απαιτεί υπερβολικά μεγάλο χρόνο ή είναι αδύνατη. Για το λόγο αυτό έχουν αναζητηθεί άλλες προσεγγίσεις για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού, πιο αποδοτικές και πιο σύντομες [62].

Το πρόβλημα μπορεί να διαιρεθεί σε τρία απλούστερα ερωτήματα. Πρώτον, ποιός είναι ο μικρότερος αριθμός αισθητήρων που πρέπει να εγκατασταθούν για μια επιτυχή παρακολούθηση; Δεύτερον, πού πρέπει να τοποθετηθούν αυτοί οι αισθητήρες καθώς και όσοι επιπλέον υπάρχουν στη διάθεσή μας; Τέλος, πώς θα μετρηθεί η αποδοτικότητα των διαφόρων συνδυασμών και θα αξιολογηθεί;

Για το πρώτο πρόβλημα η απάντηση είναι ότι ο ελάχιστος αριθμός δεν μπορεί να είναι μικρότερος από το πλήθος των ιδιομορφών που θέλουμε να λάβουμε υπόψη. Το δεύτερο πρόβλημα απασχολεί την ερευνητική κοινότητα για μεγάλο διάστημα και έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, από απλούς υπολογισμούς έως σύνθετους επαναληπτικούς ή ακόμη και σταντικειμενικές συναρτήσεις μεθόδων βελτιστοποίησης. Το τρίτο πρόβλημα εξαρτάται σημαντικά από το τί θέλουμε να παρατηρήσουμε/μετρήσουμε με την ενόργανη παρακολούθηση. Ο συνδυασμός που αποδίδει τέλεια για μια συγκεκριμένη εφαρμογή δεν είναι απαραίτητα ο καλύτερος και για μια άλλη έρευνα ή μελέτη.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας π.χ., δεν μας ενδιαφέρει ο διαχωρισμός των διαφορετικών ιδιομορφών της κατασκευής, οπότε δεν χρειάζεται να εφαρμόσουμε τεχνικές όπως η Modal Assurance Criterion (MAC) [63], που πριμοδοτεί τους κόμβους όπου οι διάφορες ιδιομορφές δεν αλληλοκαλύπτονται (είναι ορθογώνιες μεταξύ τους). Αντίθετα, μας ενδιαφέρει η διαταραχή που υφίσταται ο κόμβος είτε σαν μετατόπιση ή περιστροφή και εστιάζουμε στους κόμβους θα εμφανίσουν τη μεγαλύτερη συνολική διαταραχή. Επιπλέον, η παρούσα εργασία εστιάζει σε τυπικές κατασκευές με διαχειρίσιμο πλήθος κόμβων και βαθμών ελευθερίας που όμως απαιτούν την ενοργάνωση τους με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

6.3.1 Υπολογισμός του δείκτη μετατόπισης

Στη συνέχεια της εργασίας θα παρουσιαστεί μια απλή μέθοδος ταξινόμησης και επιλογής των επικρατέστερων θέσεων για τη τοποθέτηση αισθητήρων με κριτήριο την καταγραφή των από τις δονήσεις που καταγράφονται στους κόμβους. Τα σημεία αυτά έχουν αφενός τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλαβών μετά από μια σεισμική δόνηση, και αφετέρου από τα δεδομένα αυτά μπορούν να εξαχθούν πιο σαφή συμπεράσματα για τους υπόλοιπους κόμβους.

Τα δεδομένα προέρχονται από το πρόγραμμα SAP2000 και ένα δείγμα τους παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη επεξεργασία των δεδομένων αυτών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα λογιστικών φύλλων EXCEL με το οποίο γίνονται όλοι οι αναγκαίοι υπολογισμοί.

Ο βασικός υπολογισμός αφορά στη δημιουργία ενός Δείκτη Μετατόπισης ο οποίος είναι ένα τεχνητό μέγεθος που έχει σκοπό να μας δώσει μια εκτίμηση του πόσο θα διαταραχθεί συνολικά ένας κόμβος.

Ο Δείκτης Μετατόπισης υπολογίζεται με τα εξής βήματα: Πρώτα, για κάθε κατεύθυνση μετακίνησης πολλαπλασιάζεται το εύρος της με την αντίστοιχη συμμετοχή μάζας σε αυτή τη κατεύθυνση. Μετά υπολογίζονται τα τετράγωνα των ποσοτήτων αυτών, αθροίζονται και τέλος εξάγεται η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ιδιομορφή που μας ενδιαφέρει και για κάθε κόμβο της κατασκευής μας.

Το πλήθος των ιδιομορφών I που χρειαζόμαστε καθορίζεται εξ ορισμού από τον τρέχοντα κανονισμό που ορίζει να καλύπτουν το 90% της συμμετέχουσας μάζας. Ο χρήστης μπορεί να αυξήσει ή μειώσει το ποσοστό αυτό και να συμπεριλάβει περισσότερες ή λιγότερες ιδιομορφές. Η τελική τιμή του δείκτη προκύπτει από το άθροισμά των επιμέρους τιμών όλων των ιδιομορφών που συμμετέχουν και υπολογίζεται για κάθε ένα κόμβο.

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει η επιλογή των επικρατέστερων σημείων εφαρμογής των αισθητήρων. Για το λόγο αυτό όλοι οι κόμβοι ταξινομούνται με βάση τον δείκτη μετατόπισης κατά φθίνουσα σειρά ώστε στην αρχή της λίστας να εμφανίζονται οι επικρατέστεροι.

Στη τελική φάση της επιλογής, ο χρήστης επιλέγει το πλήθος π.χ., I των αισθητήρων που θα τοποθετηθούν και επιλέγει τους πρώτους I από τους κόμβους της λίστας. Αν κάποιοι κόμβοι πρέπει να εξαιρεθούν (π.χ. έχουν δυσκολία πρόσβασης) τότε η επιλογή προχωρά στον αμέσως επόμενο.

Οι παραπάνω υπολογισμοί υλοποιήθηκαν σε ένα λογιστικό φύλλο Excel το οποίο, αφού διαβάσει τα δυο αρχεία δεδομένων που παραδίδει το SAP2000 για την υπο μελέτη κατασκευή, εκτελεί τους υπολογισμούς σταδιακά επιτρέποντας ταυτόχρονα στον χρήστη να αλλάξει τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις. Για τη διευκόλυνση του χρήστη έχει σχεδιαστεί και ένα γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας (GUI) ώστε να μην επεμβαίνει στα στοιχεία του λογιστικού φύλλου.

6.4 Παρουσίαση της εφαρμογής βελτιστοποίησης σε Excel

Το προτεινόμενο σύστημα επιλογής θέσεων αισθητήρων υλοποιήθηκε σε προγραμματιζόμενο λογιστικό φύλλο, η περιγραφή του οποίου ακολουθεί:

Το πρόγραμμα με την εκκίνηση του διαβάζει αυτόματα τα δεδομένα από το SAP2000 και τα μεταφέρει στα λογιστικά φύλλα που περιέχει. Στη συνέχεια ενεργοποιείται και το GUI και επιτρέπει στον χρήστη να θέσει κάποιες δικές του επιλογές και με τα διαθέσιμα πλήκτρα να προχωρήσει στους υπολογισμούς και να δει το αποτέλεσμα. Επίσης ο χρήστης μπορεί να

παρακάμψει το GUI και δίνοντας δεδομένα κατευθείαν στο φύλλο (κίτρινα κελιά) να προχωρήσει στους υπολογισμούς με τα αντίστοιχα πλήκτρα στο φύλλο.

6.4.1 Περιγραφή λειτουργίας του προγράμματος

6.4.1.1 1^ο Βήμα: Καθορισμός του πλήθους των modes που θα ληφθούν υπόψη στην ανάλυση της κατασκευής.

Στο πρώτο φύλλο ο χρήστης ορίζει το ποσοστό της μετατόπισης που θέλει να καλύπτουν οι modes που θα χρησιμοποιήσει. (προεπιλογή θεωρείται το 90% του ΚΑΝΕΠΕ).

Ο χρήστης επιλέγει το ποσοστό και το πρόγραμμα ορίζει το απαιτούμενο αριθμό modes

ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Χ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Υ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Ζ (ΣΤΡΟΦΗ)	ΑΠΑΙΤΟΥΜ. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ	ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ
1	0,872220	0,000000	0,000000	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
2	0,872220	0,871900	0,000000	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
3	0,872220	0,871900	0,866050	ΑΡΚΕΙ	3
4	0,975450	0,871900	0,866050	ΑΡΚΕΙ	
5	0,975450	0,976200	0,866050	ΑΡΚΕΙ	
6	0,975450	0,976200	0,973470	ΑΡΚΕΙ	
7	0,999810	0,976200	0,973470	ΑΡΚΕΙ	
8	0,999810	0,999790	0,973470	ΑΡΚΕΙ	
9	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
10	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
11	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
12	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΟΙ ΜΟΔΕΣ ΝΑ ΚΑΛΥΠΤΟΥΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ:			50%	ΠΛΗΘΟΣ ΜΟΔΕΣ:	3

Σχήμα 6-1 Καθορισμός απαιτούμενου πλήθους modes για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης (50%)

ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Χ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Υ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Ζ (ΣΤΡΟΦΗ)	ΑΠΑΙΤΟΥΜ. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ	ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ
1	0,872220	0,000000	0,000000	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
2	0,872220	0,871900	0,000000	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
3	0,872220	0,871900	0,866050	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
4	0,975450	0,871900	0,866050	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
5	0,975450	0,976200	0,866050	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
6	0,975450	0,976200	0,973470	ΑΡΚΕΙ	6
7	0,999810	0,976200	0,973470	ΑΡΚΕΙ	
8	0,999810	0,999790	0,973470	ΑΡΚΕΙ	
9	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
10	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
11	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
12	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΟΙ ΜΟΔΕΣ ΝΑ ΚΑΛΥΠΤΟΥΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ:	90%			ΠΛΗΘΟΣ ΜΟΔΕΣ:	6

Σχήμα 6-2 Καθορισμός απαιτούμενου πλήθους modes για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης (90%)

ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Χ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Υ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Ζ (ΣΤΡΟΦΗ)	ΑΠΑΙΤΟΥΜ. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ	ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ
1	0,872220	0,000000	0,000000	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
2	0,872220	0,871900	0,000000	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
3	0,872220	0,871900	0,866050	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
4	0,975450	0,871900	0,866050	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
5	0,975450	0,976200	0,866050	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
6	0,975450	0,976200	0,973470	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
7	0,999810	0,976200	0,973470	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
8	0,999810	0,999790	0,973470	ΔΕΝ ΑΡΚΕΙ	
9	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	9
10	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
11	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
12	0,999810	0,999790	0,999970	ΑΡΚΕΙ	
ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΟΙ ΜΟΔΕΣ ΝΑ ΚΑΛΥΠΤΟΥΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ:	99%			ΠΛΗΘΟΣ ΜΟΔΕΣ:	9

Σχήμα 6-3 Καθορισμός απαιτούμενου πλήθους modes για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης (99%)

6.4.1.2 2^ο Βήμα: Υπολογισμός του Δείκτη Μετατόπισης κάθε κόμβου.

TABLE: Joint Displacements				TABLE: Modal Part. Mass Ratios				Displacement Index				
ΚΟΜΒΟΙ	ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ Χ U1(m)	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ Υ U2(m)	ΣΤΡΟΦΗ ΚΑΤΑ Ζ - R3(radians)	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Χ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ) U1	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Υ (ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ) U2	ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ Ζ (ΣΤΡΟΦΗ) R3	U1 × UX	U2 × UY	R3 × RZ	$\sqrt{(U1 \times UX)^2 + (U2 \times UY)^2 + (R3 \times RZ)^2}$	Cum. SUM of Indices
1	1	0	0	0	0,8722200	0,0000000	0,0000000	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0,0000000	0,8719000	0,0000000	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0,0000000	0,0000000	0,8660500	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0,1032300	0,0000000	0,0000000	0	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0,0000000	0,1042900	0,0000000	0	0	0	0	0
1	6	0	0	0	0,0000000	0,0000000	0,1074200	0	0	0	0	0
1	7	0	0	0	0,0243600	0,0000000	0,0000000	0	0	0	0	0
1	8	0	0	0	0,0000000	0,0235900	0,0000000	0	0	0	0	0
1	9	0	0	0	0,0000000	0,0000000	0,0265000	0	0	0	0	0
1	10	0	0	0	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0	0	0	0	0
1	11	0	0	0	0,0000000	0,0000028	0,0000000	0	0	0	0	0
1	12	0	0	0	0,0000023	0,0000000	0,0000000	0	0	0	0	0
2	1	-0,010992	1,997E-07	-2,783E-08				-0,00959	1,57E-18	-3,5E-18	0,009587442	SUM of
2	2	2,845E-07	-0,011005	6,36E-08				2,25E-18	-0,0096	4,07E-17	0,00959526	0,019182702
2	3	0,009754	-0,0111704	0,001951				1,07E-12	-6,5E-12	0,00169	0,001689664	0,020872365
2	4	-0,027433	6,677E-07	-9,316E-08				-0,00283	1,12E-18	-2,3E-18	0,002831909	0,023704274
2	5	9,618E-07	-0,02752	2,142E-07				1,54E-18	-0,00287	2,65E-17	0,002870061	0,026574335
2	6	0,024669	-0,02960	0,004934				7,42E-13	-5E-12	0,00053	0,00053001	0,027104345
2	7	-0,026768	7,101E-07	-1,162E-07				-0,00065	3,99E-21	-7,9E-19	0,000652068	0,027756413
2	8	-0,00001337	0,026671	-2,697E-07				-6,1E-21	0,000629	-1,1E-17	0,000629169	0,028385582
2	9	0,024707	-0,029647	0,004942				7,06E-13	-4,4E-12	0,000131	0,000130963	0,028516545
2	10	-2,628E-08	3,223E-08	-4,705E-09				-8,8E-24	2,45E-23	-1,2E-22	1,18451E-22	0,028516545
2	11	2,99E-08	-0,000239	4,754E-09				5,74E-23	-6,8E-10	1,24E-22	6,78521E-10	0,028516546
2	12	-0,000231	-2,549E-08	3,256E-09				-5,3E-10	-3,9E-23	3,8E-23	5,27604E-10	0,028516547
3	1	-0,023564	3,764E-07	-5,105E-08				-0,02055	2,95E-18	-6,4E-18	0,020552992	SUM of
3	2	5,082E-07	-0,023508	1,158E-07				4,02E-18	-0,0205	7,4E-17	0,020496625	0,041049617
3	3	0,021403	-0,025684	0,004281				2,35E-12	-1,4E-11	0,003708	0,00370756	0,044757177
3	4	-0,017092	3,224E-07	-4,213E-08				-0,00176	5,43E-19	-1E-18	0,001764407	0,046521584
3	5	4,053E-07	-0,017017	9,476E-08				6,48E-19	-0,00177	1,17E-17	0,001774703	0,048296287
3	6	0,016017	-0,01922	0,003203				4,81E-13	-3,2E-12	0,000344	0,000344066	0,048640354
3	7	0,0272	-0,00000969	1,594E-07				0,000663	-5,4E-21	1,09E-18	0,000662592	0,049302946
3	8	0,0000181	-0,027284	3,646E-07				8,22E-21	-0,00064	1,43E-17	0,00064363	0,049946575
3	9	-0,02445	0,029339	-0,00489				-7E-13	4,35E-12	-0,00013	0,000129585	0,05007616
3	10	4,616E-08	-5,543E-08	7,758E-09				1,55E-23	-4,2E-23	1,91E-22	1,95751E-22	0,05007616
3	11	-6,146E-08	0,000375	-9,108E-09				-1,2E-22	-1,1E-09	-2,4E-22	1,06463E-09	0,05007616
3	12	-0,000314	5,06E-08	-6,158E-09				-7,2E-10	7,69E-23	-7,2E-23	7,17176E-10	0,05007616
4	1	-0,031165	0,000000481	-6,444E-08				-0,02718	3,77E-18	-8,1E-18	0,027182736	SUM of
4	2	6,294E-07	-0,031199	1,446E-07				4,98E-18	-0,0272	9,24E-17	0,027202408	0,054385144
4	3	0,028616	-0,034339	0,005723				3,14E-12	-1,9E-11	0,004956	0,004956404	0,059341549

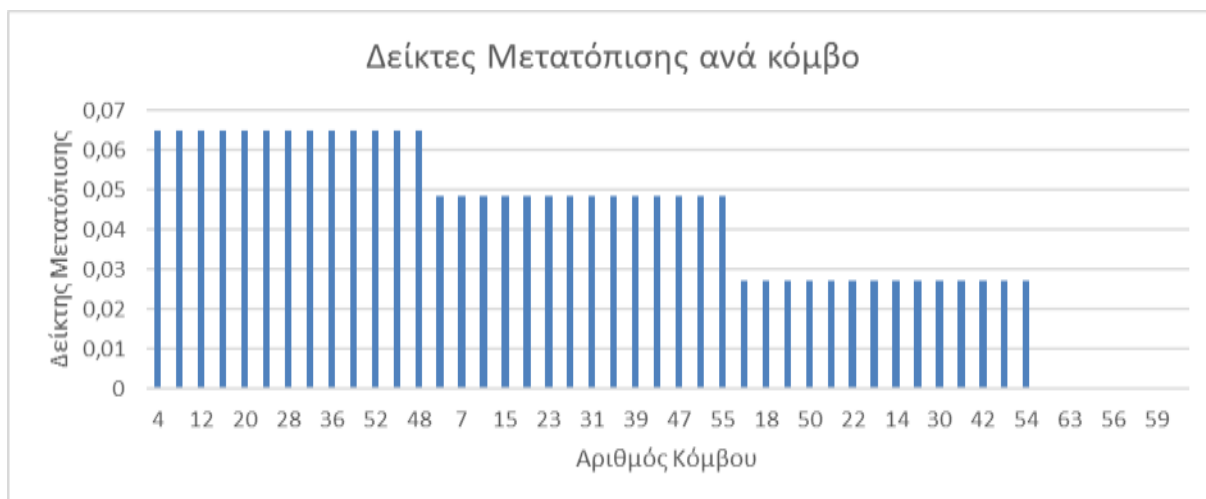
No. of Modes: 12
No. of Nodes: 64
Open User Form

Σχήμα 6-4 Υπολογισμός του Δείκτη μετατόπισης κάθε κόμβου από τα δεδομένα του SAP2000.

6.4.1.3 3^ο Βήμα: Επιλογή των απαιτούμενων modes και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων σε φθίνουσα σειρά.

Highest Mode (>=90%):			
6		Copy & Sort Descending	
KOMBOI	SUM of Indices of important modes	KOMBOI	Total Displ. Index
		Φθίνουσα ταξινόμηση	
1	0	4	0,064771727
1	0	8	0,064771727
1	0	12	0,064770855
1	0	16	0,064770752
1	0	20	0,064770751
1	0	24	0,064770751
1	0	28	0,064769879
1	0	32	0,064769776
1	0	36	0,064769775
1	0	40	0,064769775
1	0	52	0,064769671
2	0	44	0,064768903
2	0	48	0,064768799
2	0	3	0,048640354
2	0	7	0,048640354
2	0	11	0,048640354
2	0,027104345	15	0,048640354
2	0	19	0,048640354
2	0	23	0,048640354
2	0	27	0,048640354
2	0	31	0,048640354
2	0	35	0,048639482
2	0	39	0,048639482
3	0	43	0,048639482
3	0	47	0,048639482
3	0	51	0,048639377
3	0	55	0,048639377
3	0	2	0,027104345
3	0,048640354	18	0,027104345
3	0	34	0,027104241
3	0	50	0,027104136
3	0	6	0,027103473
3	0	22	0,027103473
3	0	10	0,02710337
3	0	14	0,02710337
4	0	26	0,02710337
4	0	30	0,02710337
4	0	38	0,027103368

Σχήμα 6-5 Επιλογή των απαιτούμενων modes και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων σε φθίνουσα σειρά.



Σχήμα 6-6 Απεικόνιση των Δεικτών μετατόπισης αποτελεσμάτων σε φθίνουσα σειρά σπουδαιότητας.

6.4.1.4 4^ο Βήμα: Περιορισμοί χρήστη και επιλογή επικρατέστερων θέσεων για την τοποθέτηση αισθητήρων.

Μέγιστος αριθμός XY Accelerometers:		Μέγιστος αριθμός XY Accelerometers:		Μέγιστος αριθμός XY Accelerometers:	
5		5		5	
Accel. No.	ΚΟΜΒΟΣ	Accel. No.	ΚΟΜΒΟΣ	Accel. No.	ΚΟΜΒΟΣ
1	4	1	4	1	4
2	8	2	8	2	8
3	20	3	12	3	12
4	24	4	16	4	20
5	12	5	20	5	24

Σχήμα 6-7 Επιλογή των καταλληλότερων θέσεων για την τοποθέτηση των αισθητήρων για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις προεπιλογής (50%, 90%, 99%) των σχημάτων 6-1,2,3 .

6.4.2 Δημιουργία Γραφικής Διεπαφής Χρήστη (GUI) για τη λειτουργία του προγράμματος

6.4.2.1 Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI) της εφαρμογής.

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name:

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File:

Mass Partitip. File:

Building Case SUMMARY: Nodes Found: Modes Found:

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %:

No. of Significant Modes to process:

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

Frame3

No. of Available Accelerometers:

Sorted List of Optimal Positions:

Σχήμα 6-8 Η Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI) του προγράμματος .

6.4.2.1 Εντολές σύνδεσης Γραφικής Διεπαφής Χρήστη (GUI) και υπολογιστικών φύλλων της εφαρμογής.

```
Private Sub CommandButton3_Click()
    TextBox3.Text = ThisWorkbook.Sheets(2).Range("H20").Value
    TextBox2.Text = ThisWorkbook.Sheets(2).Range("H19").Value
End Sub
```

```

Private Sub CommandButton4_Click()
    TextBox7.Text = ThisWorkbook.Sheets(1).Range("F14").Value
End Sub

Private Sub CommandButton5_Click()
    Call copysort2
End Sub

Private Sub CommandButton6_Click()
    TextBox9.Text = ThisWorkbook.Sheets(2).Range("AC6")
End Sub

Private Sub CommandButton9_Click()
    End
End Sub

Private Sub TextBox6_Change()
    ThisWorkbook.Sheets(1).Range("D14").Value = TextBox6.Text
End Sub

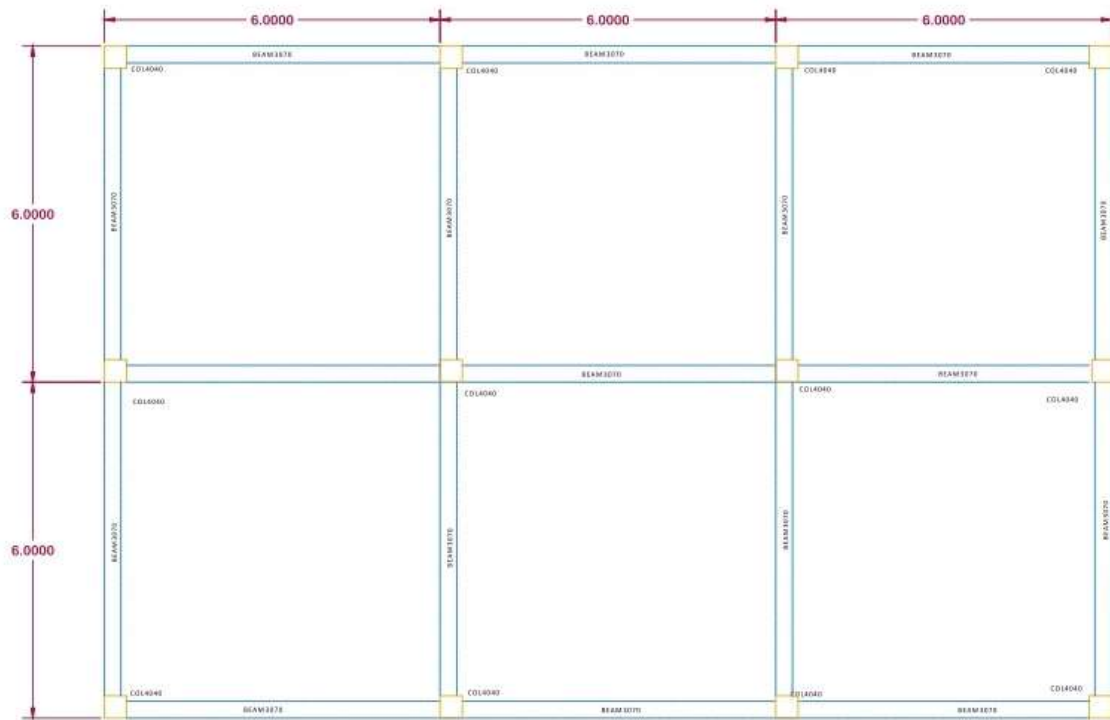
Private Sub TextBox8_Change()
    ThisWorkbook.Sheets(2).Range("Z4").Value = TextBox8.Text
End Sub

```

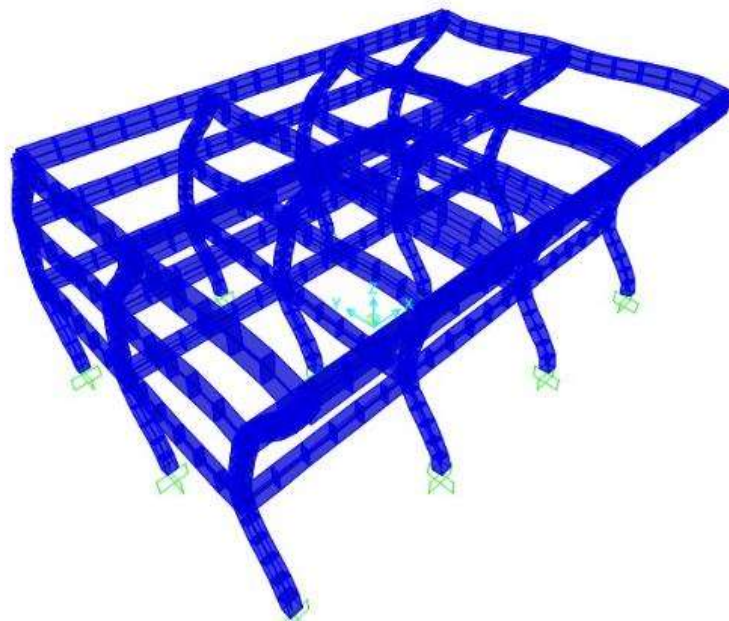
6.5 Μελέτη περιπτώσεων κλασικών κατασκευών

Παρακάτω θα αναλυθούν κάποια παραδείγματα κατασκευών μέσω του προγράμματος Sap2000 από το οποίο θα προκύψει ο πίνακας μέγιστων μετακινήσεων και συμμετέχουσας μάζας των ιδιομορφών. Οι πίνακες αυτοί εξάγονται σε αρχείο excel, όπως προαναφέρθηκε, όπου με κατάλληλη επεξεργασία προκύπτουν οι βέλτιστες θέσεις για την τοποθέτηση των αισθητήρων. Η ταξινόμηση των θέσεων-κόμβων γίνεται αύξουσα σειρά ως προς τις παρεχόμενες πληροφορίες που είναι σε θέση να αποφέρουν για την κατάσταση της δομής.

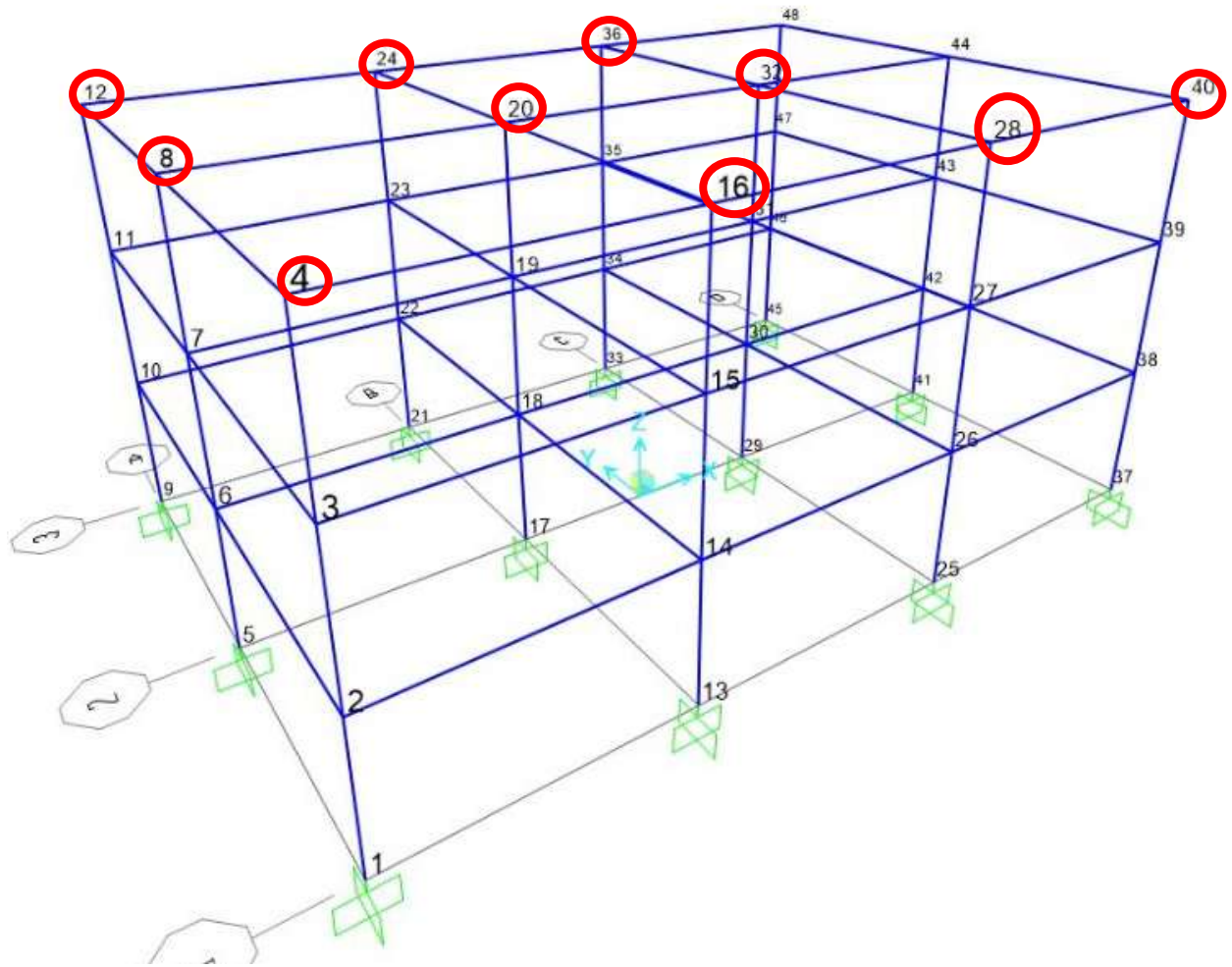
6.5.1 Παράδειγμα 1



Σχήμα 6-9 Κάτοψη παραδείγματος 1



Σχήμα 6-10 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 1



Σχήμα 6-11 3D απεικόνιση παραδείγματος 1

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα_1

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 48 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90%

No. of Significant Modes to process: 6

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

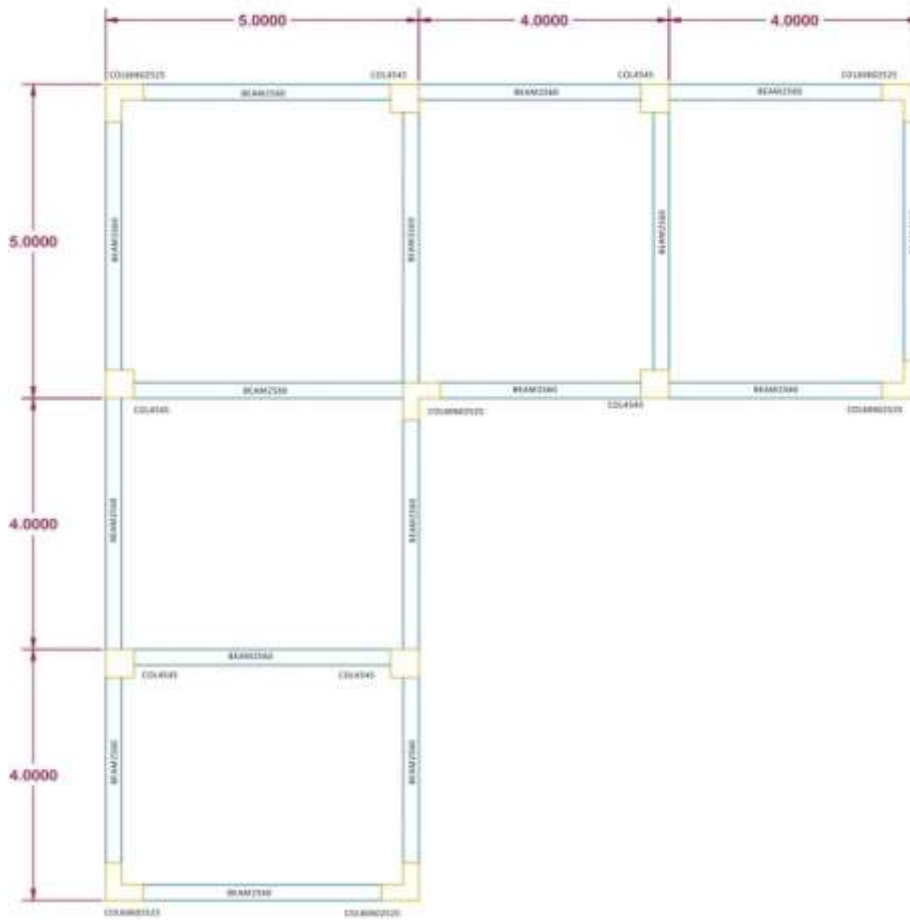
Frame3

No. of Available Accelerometers: 10

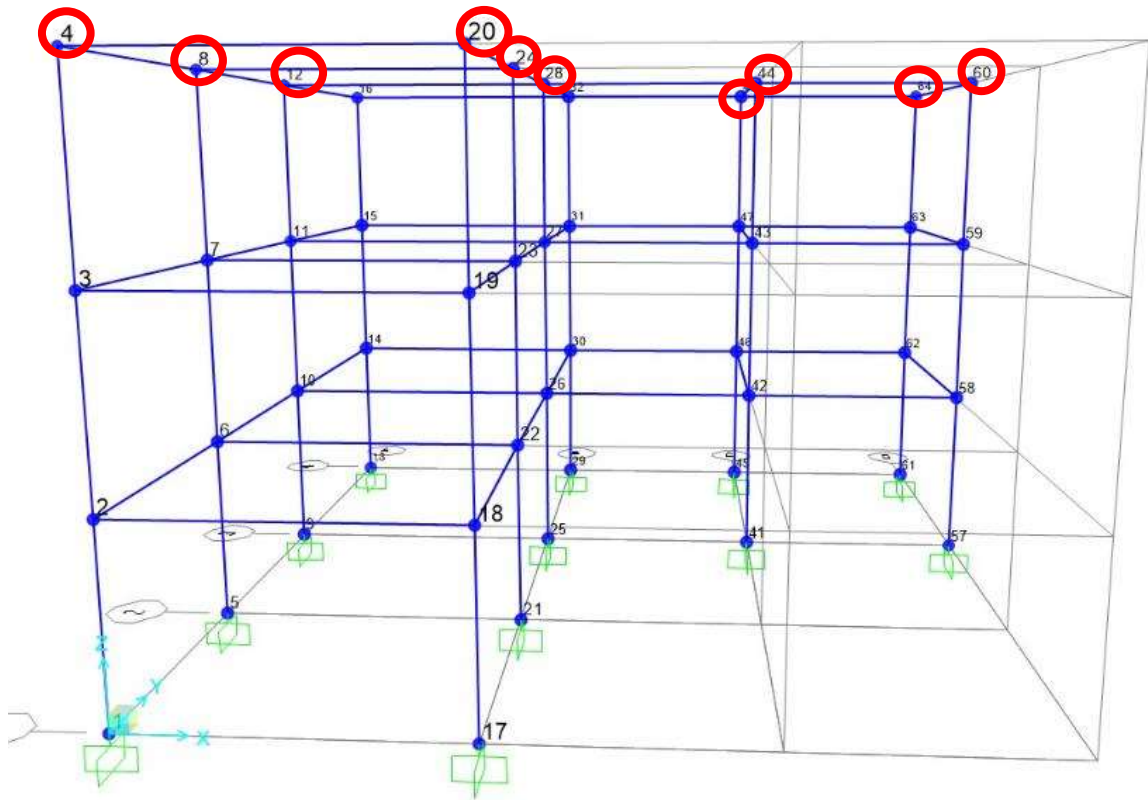
Sorted List of Optimal Positions: 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40,

Σχήμα 6-12 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του πρώτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη

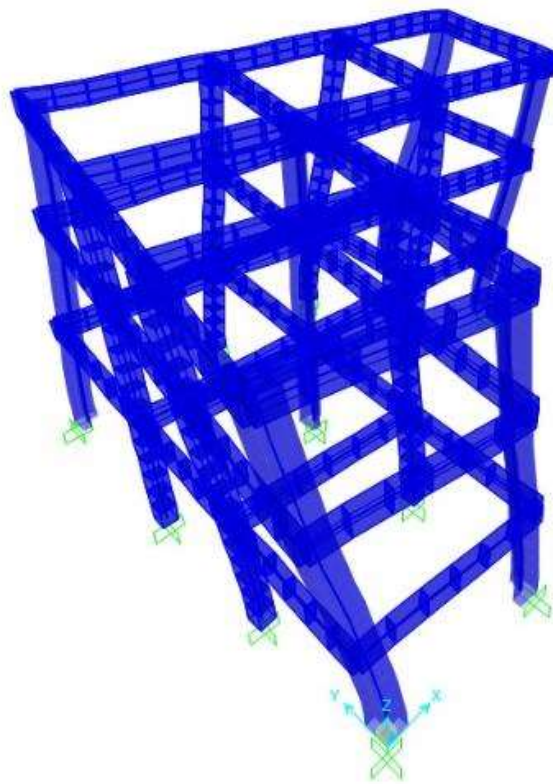
6.5.2 Παράδειγμα 2



Σχήμα 6-13 Κάτοψη παραδείγματος 2



Σχήμα 6-14 3D απεικόνιση παραδείγματος 2



Σχήμα 6-15 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 2

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα 2

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx Change Filename

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx Change Filename

Read SAP2000 Data Files

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 48 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90% Apply

No. of Significant Modes to process: 6

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

Calculate Node Index

Frame3

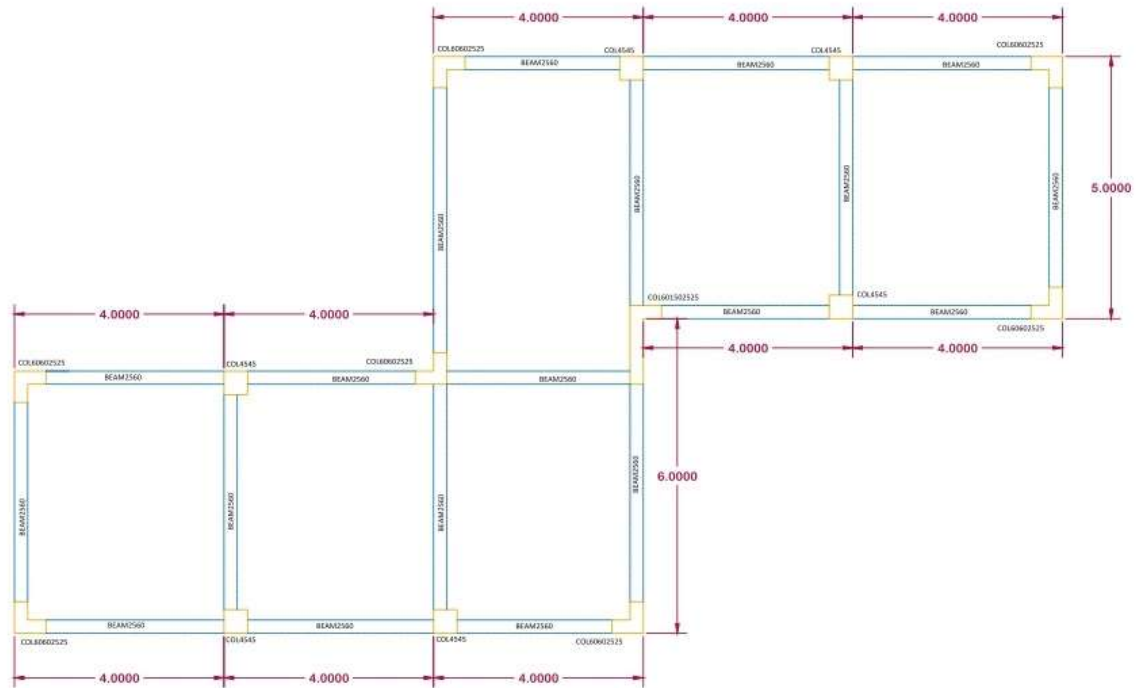
No. of Available Accelerometers: 10 Apply

Sorted List of Optimal Positions: 20, 60, 4, 64, 24, 44, 8, 48, 28, 12,

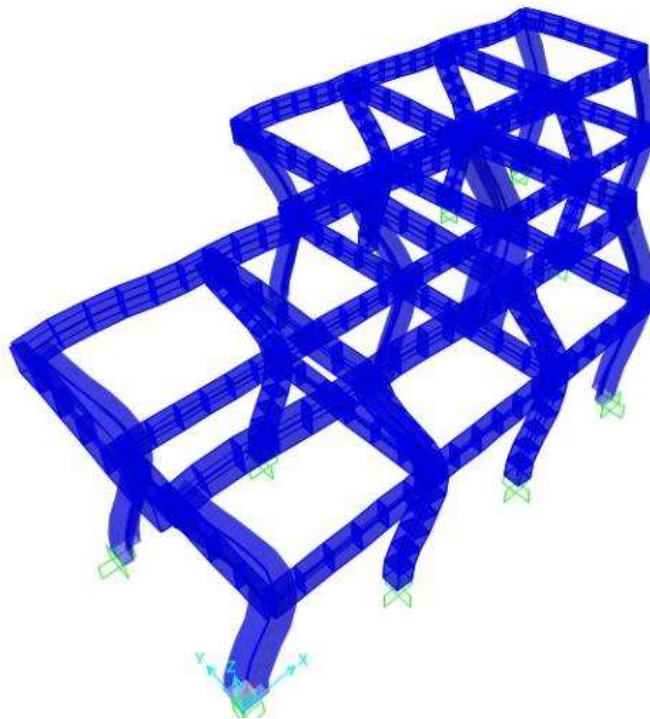
SAVE PRINT EXIT

Σχήμα 6-16 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του δεύτερου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διαπαφής χρήστη

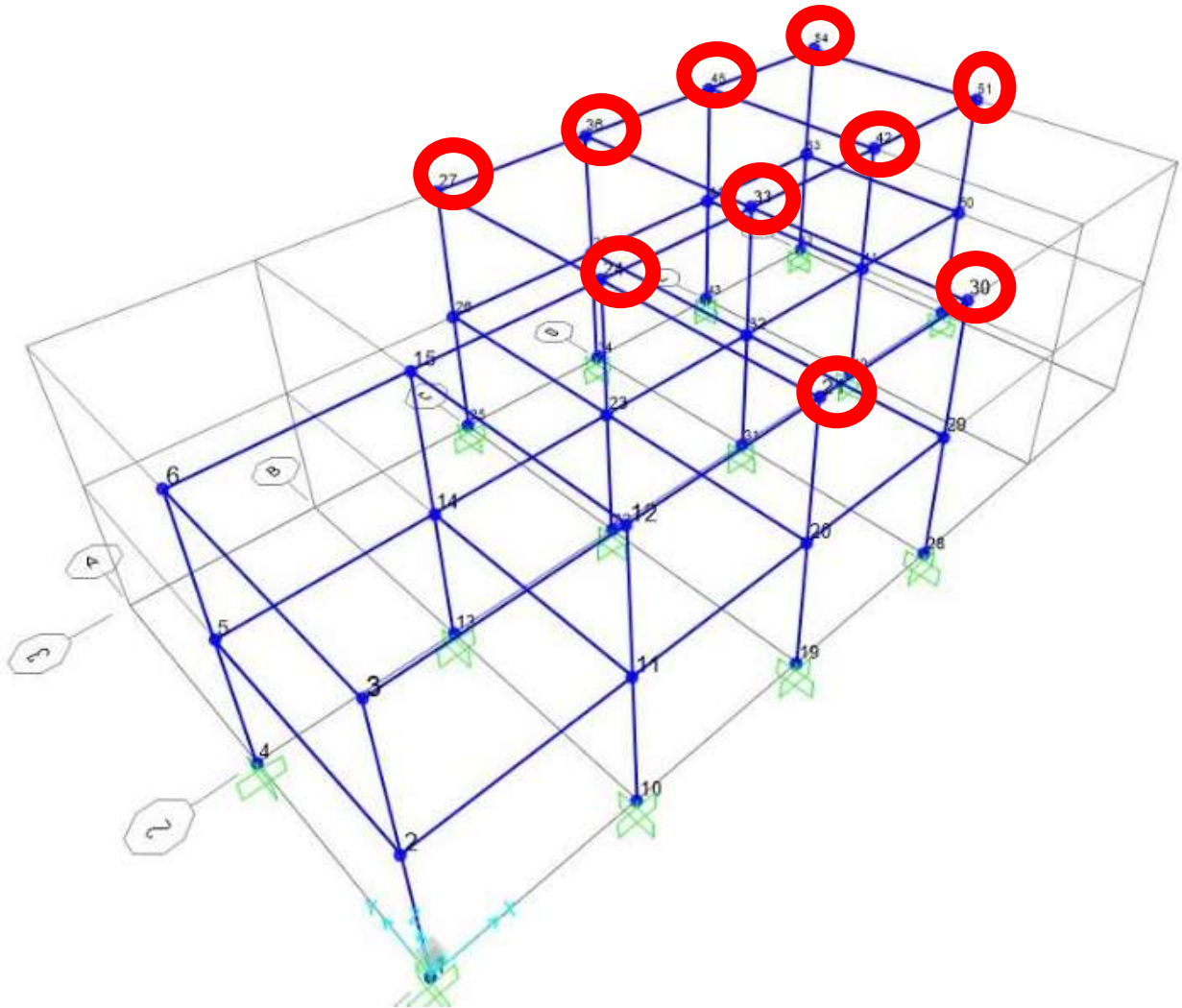
6.5.3 Παράδειγμα 3



Σχήμα 6-17 Κάτοψη παραδείγματος 3



Σχήμα 6-18 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 3



Σχήμα 6-19 3D απεικόνιση παραδείγματος 3

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα 3

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 42 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90%

No. of Significant Modes to process: 6

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

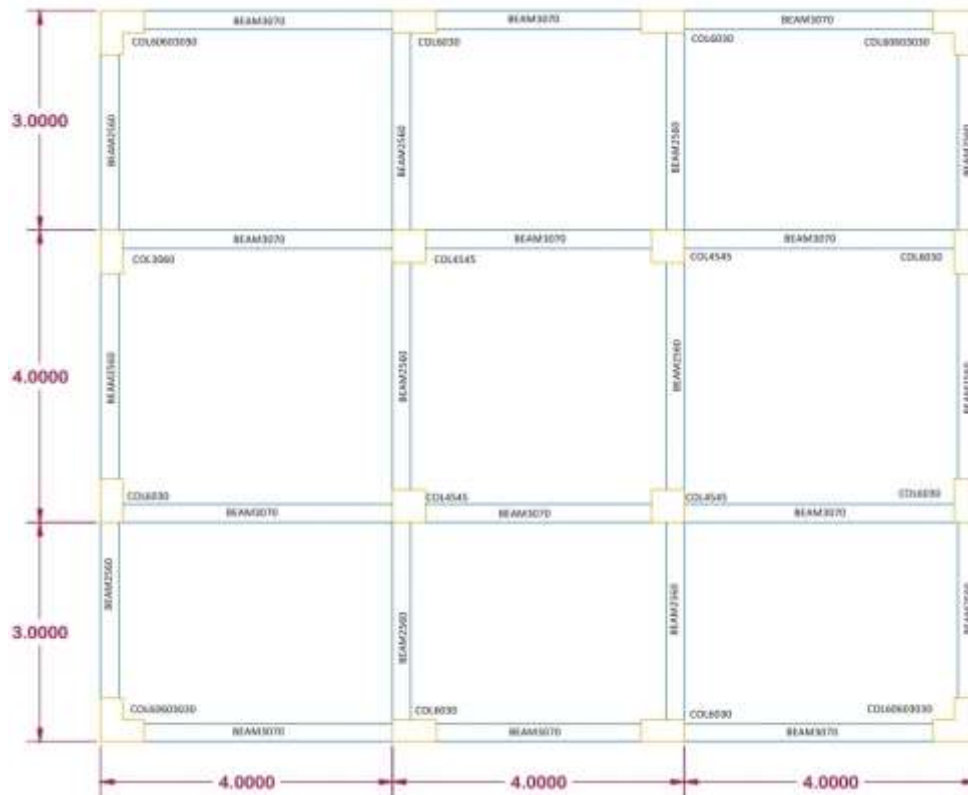
Frame3

No. of Available Accelerometers: 10

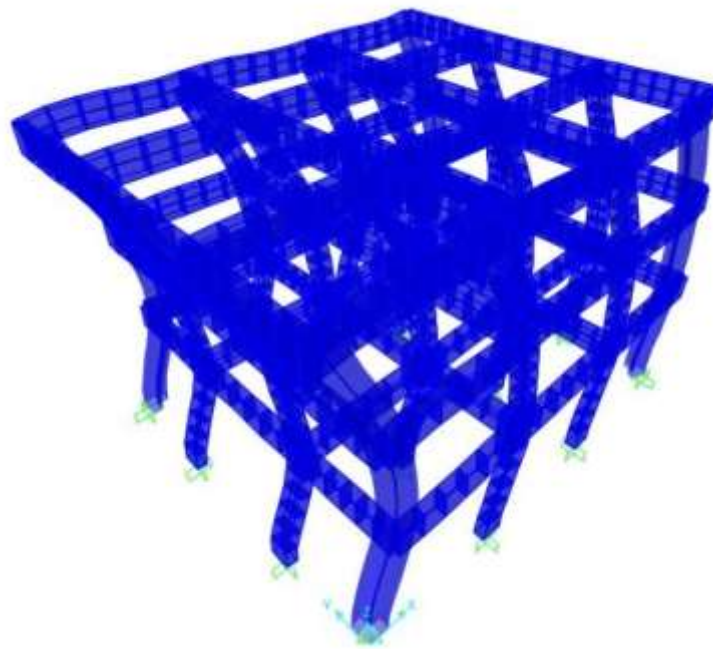
Sorted List of Optimal Positions: 54, 51, 45, 42, 30, 36, 33, 21, 27, 24,

Σχήμα 6-20 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του τρίτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη

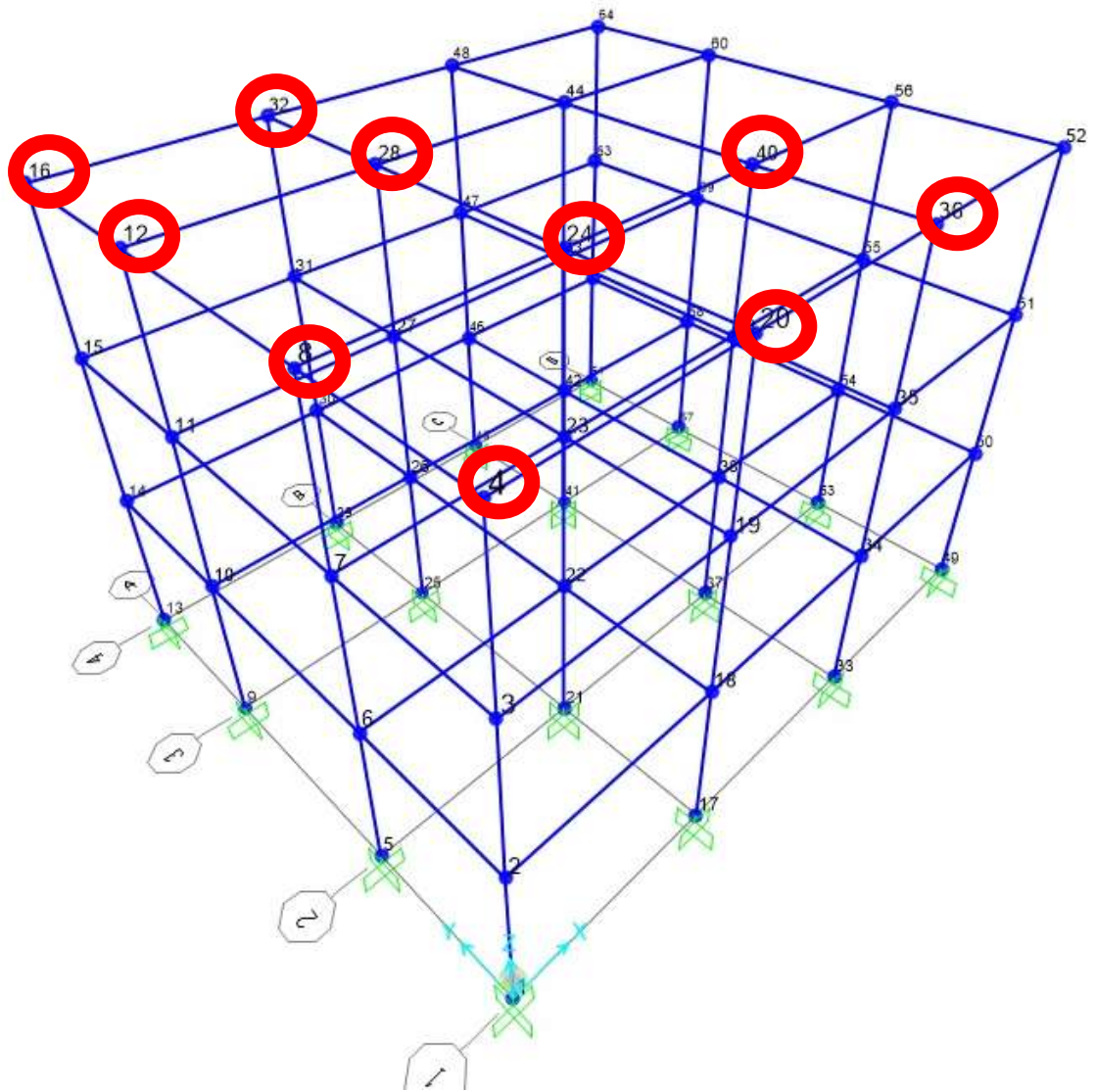
6.5.4 Παράδειγμα 4



Σχήμα 6-21 Κάτοψη παραδείγματος 4



Σχήμα 6-22 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 4



Σχήμα 6-23 3D απεικόνιση παραδείγματος 4

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα 4

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 64 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90%

No. of Significant Modes to process: 6

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

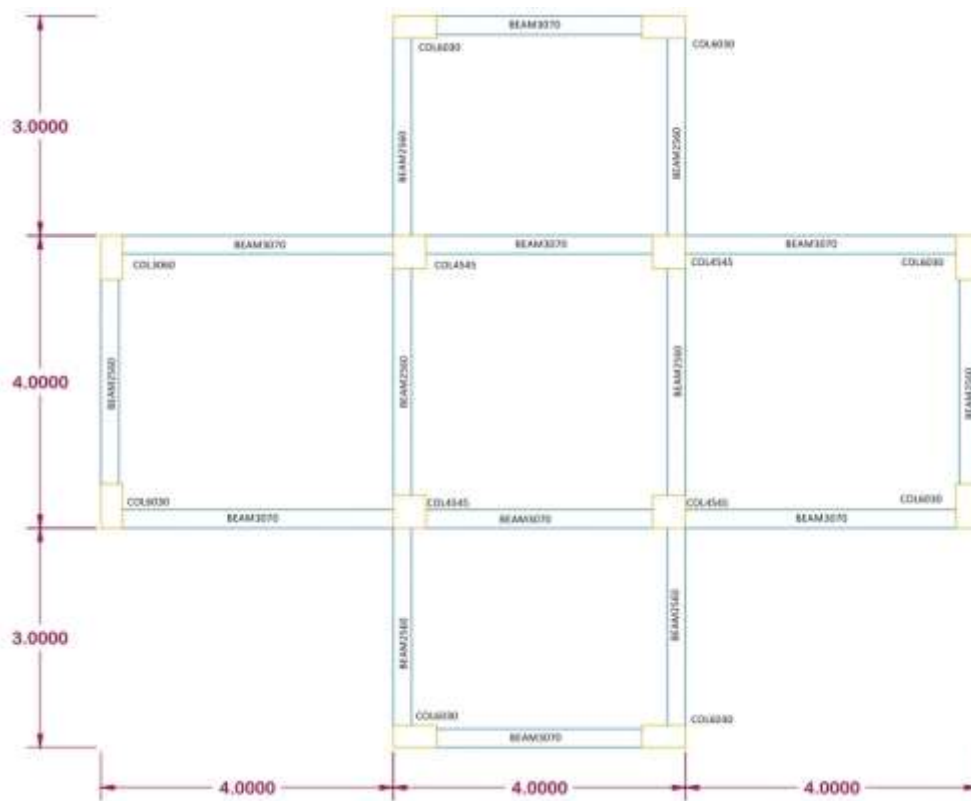
Frame3

No. of Available Accelerometers: 10

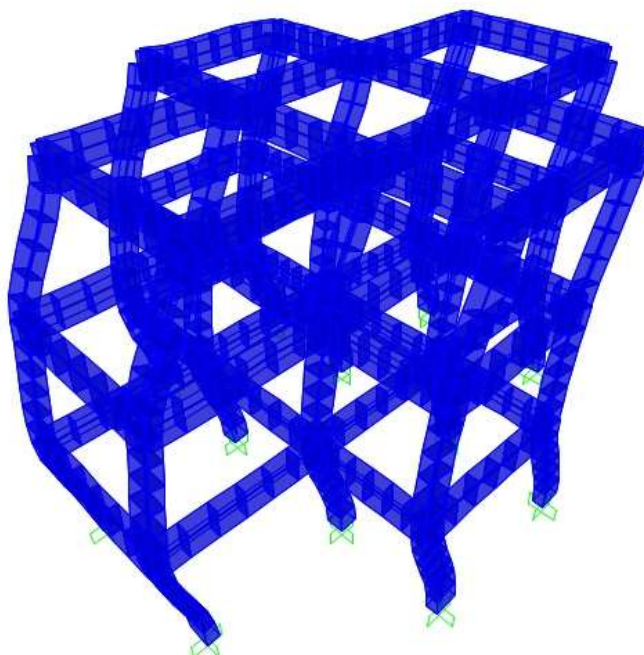
Sorted List of Optimal Positions: 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40,

Σχήμα 6-24 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του τέταρτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη

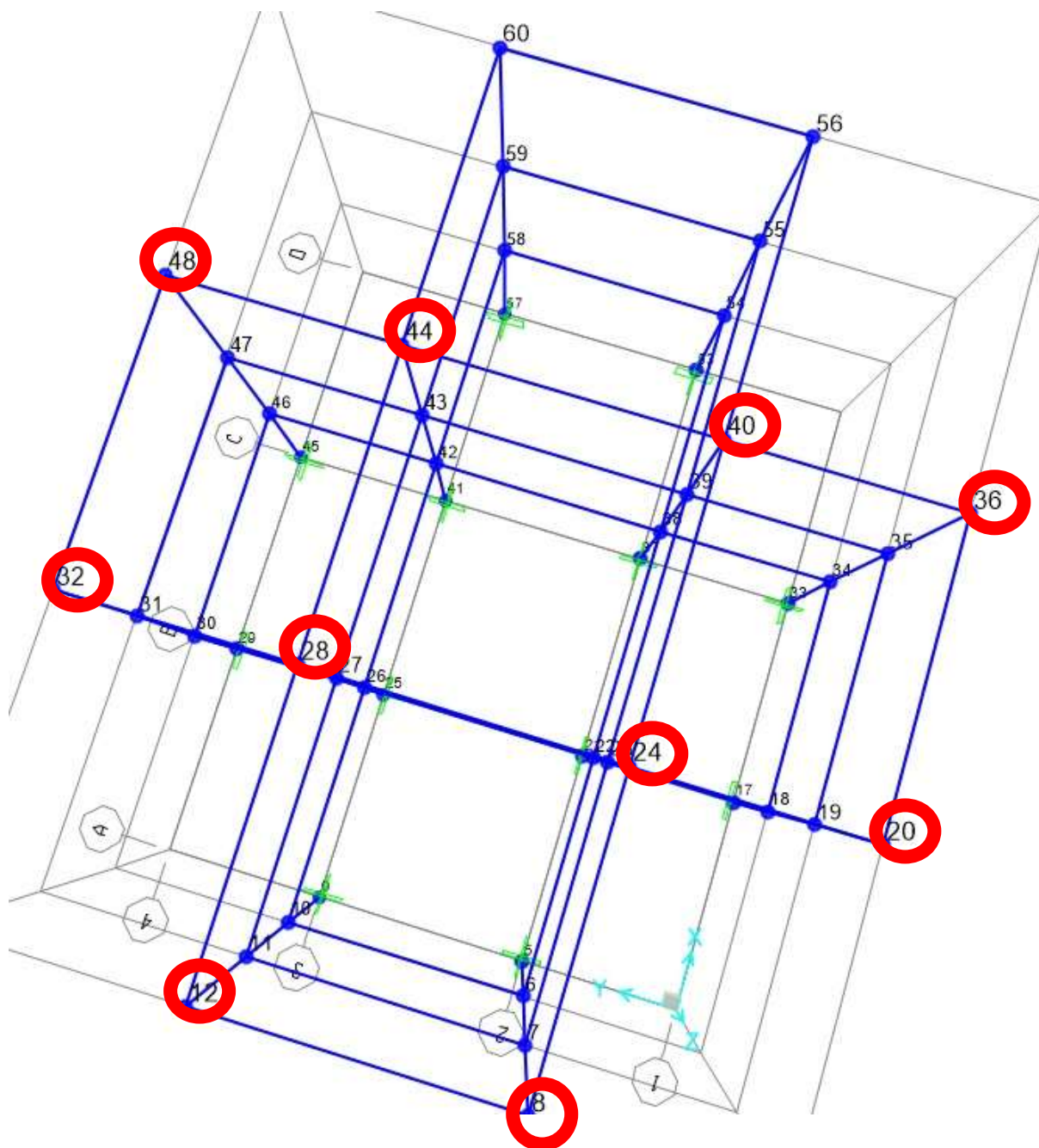
6.5.5 Παράδειγμα 5



Σχήμα 6-25 Κάτοψη παραδείγματος 5



Σχήμα 6-26 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 5



Σχήμα 6-27 3D απεικόνιση παραδείγματος 5

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα 5

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 48 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90%

No. of Significant Modes to process: 6

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

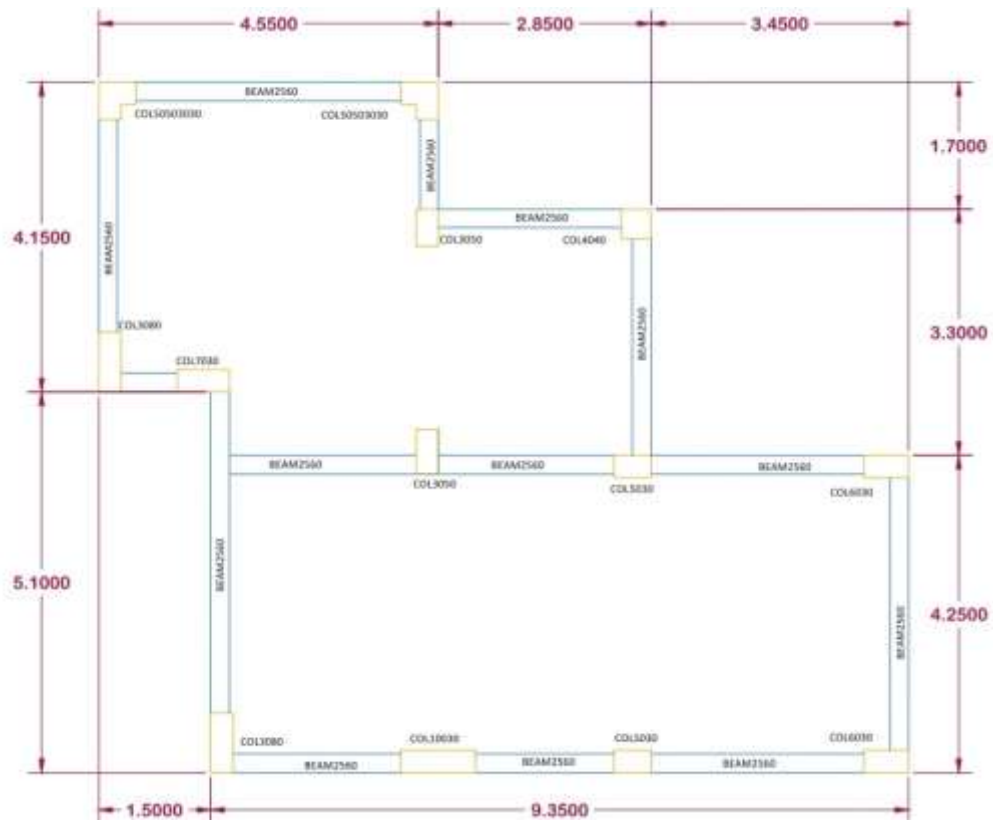
Frame3

No. of Available Accelerometers: 10

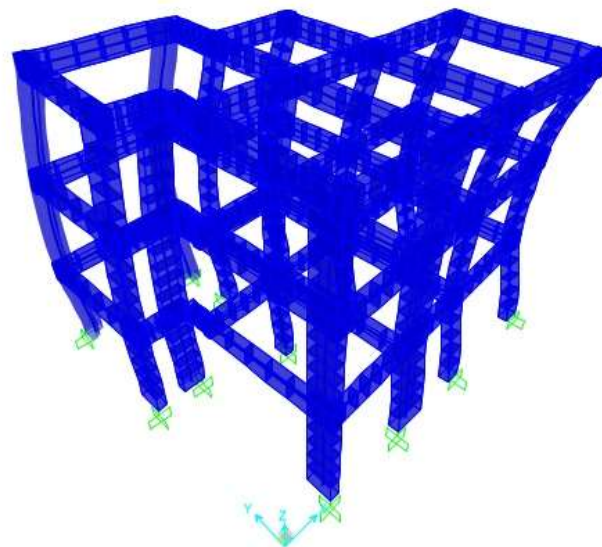
Sorted List of Optimal Positions: 8, 12, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48,

Σχήμα 6-28 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του πέμπτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη

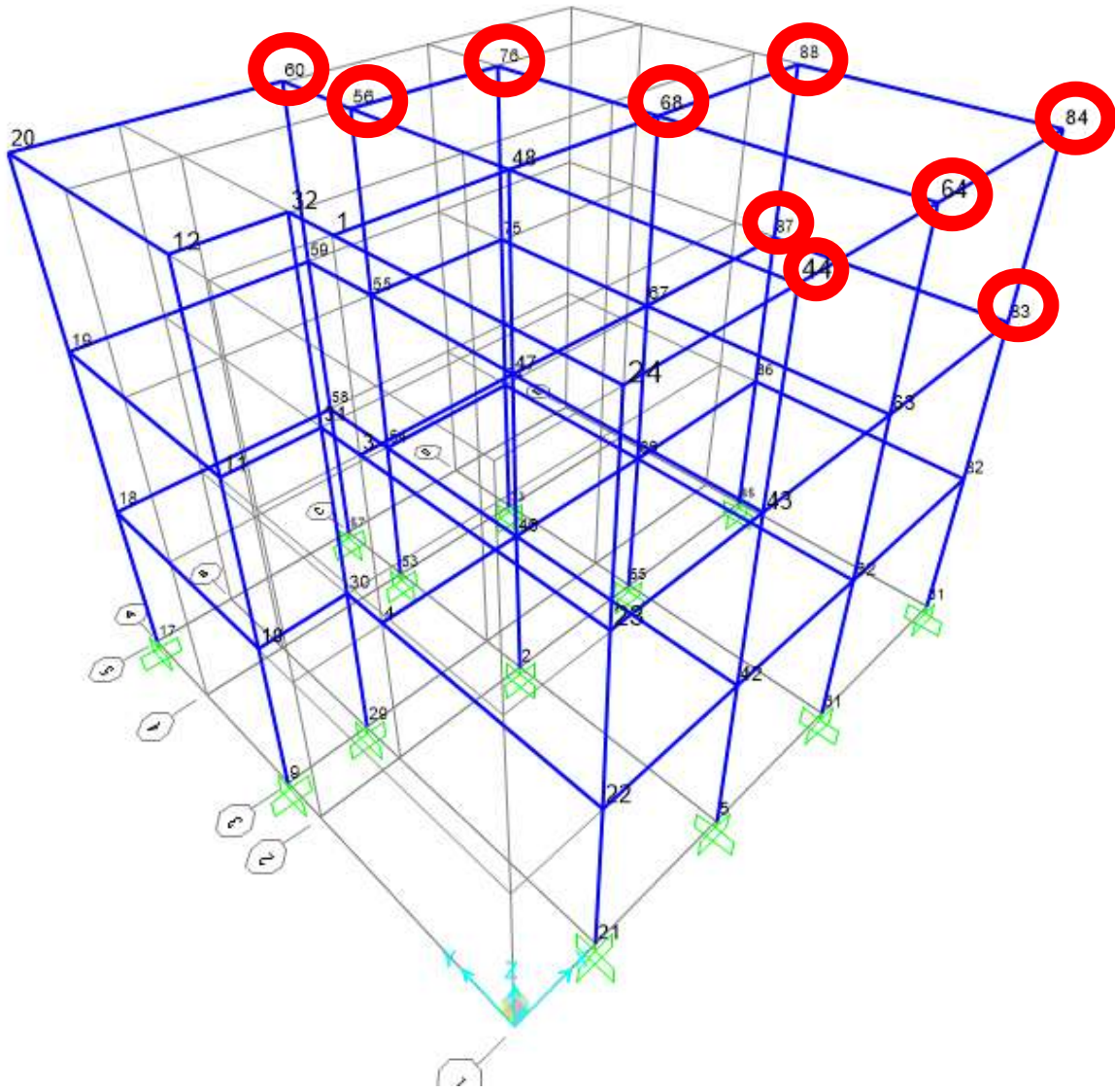
6.5.6 Παράδειγμα 6



Σχήμα 6-29 Κάτοψη παραδείγματος 6



Σχήμα 6-30 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 6



Σχήμα 6-31 3D απεικόνιση παραδείγματος 6

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα 6

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 55 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90%

No. of Significant Modes to process: 5

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

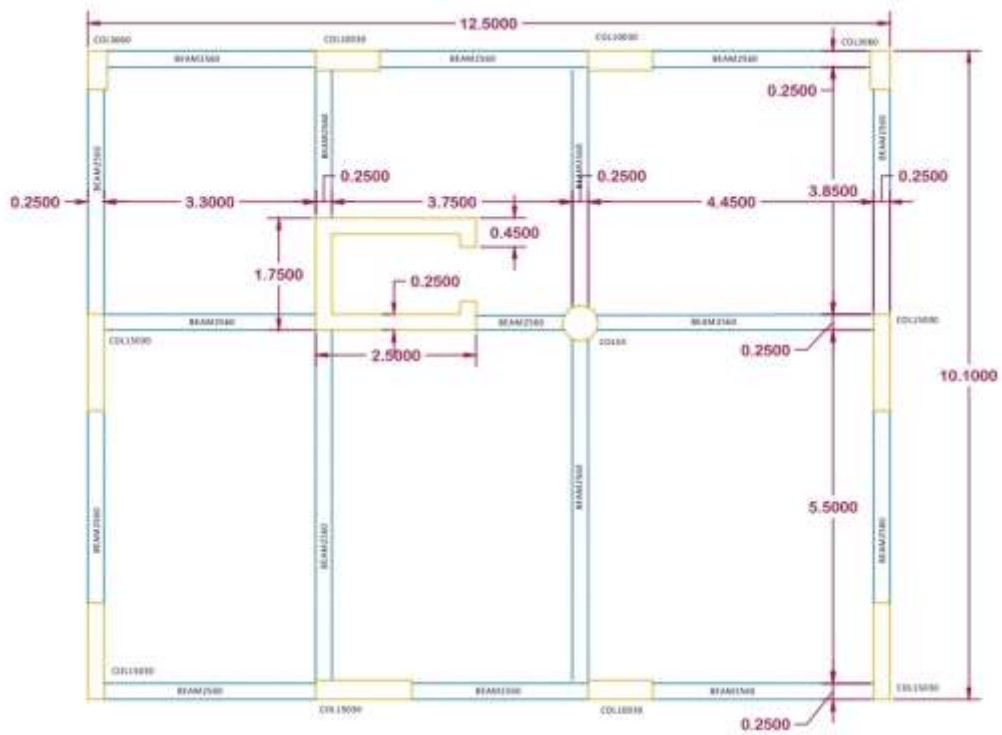
Frame3

No. of Available Accelerometers: 10

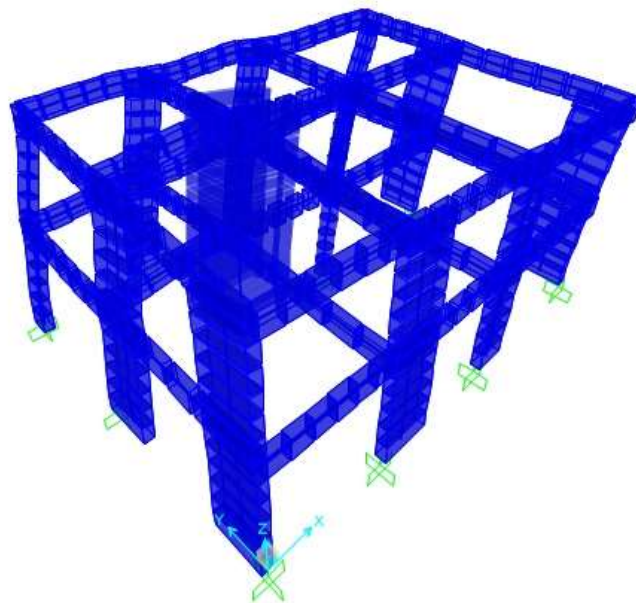
Sorted List of Optimal Positions: 84, 88, 76, 64, 68, 60, 87, 83, 44, 56,

Σχήμα 6-32 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του έκτου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη

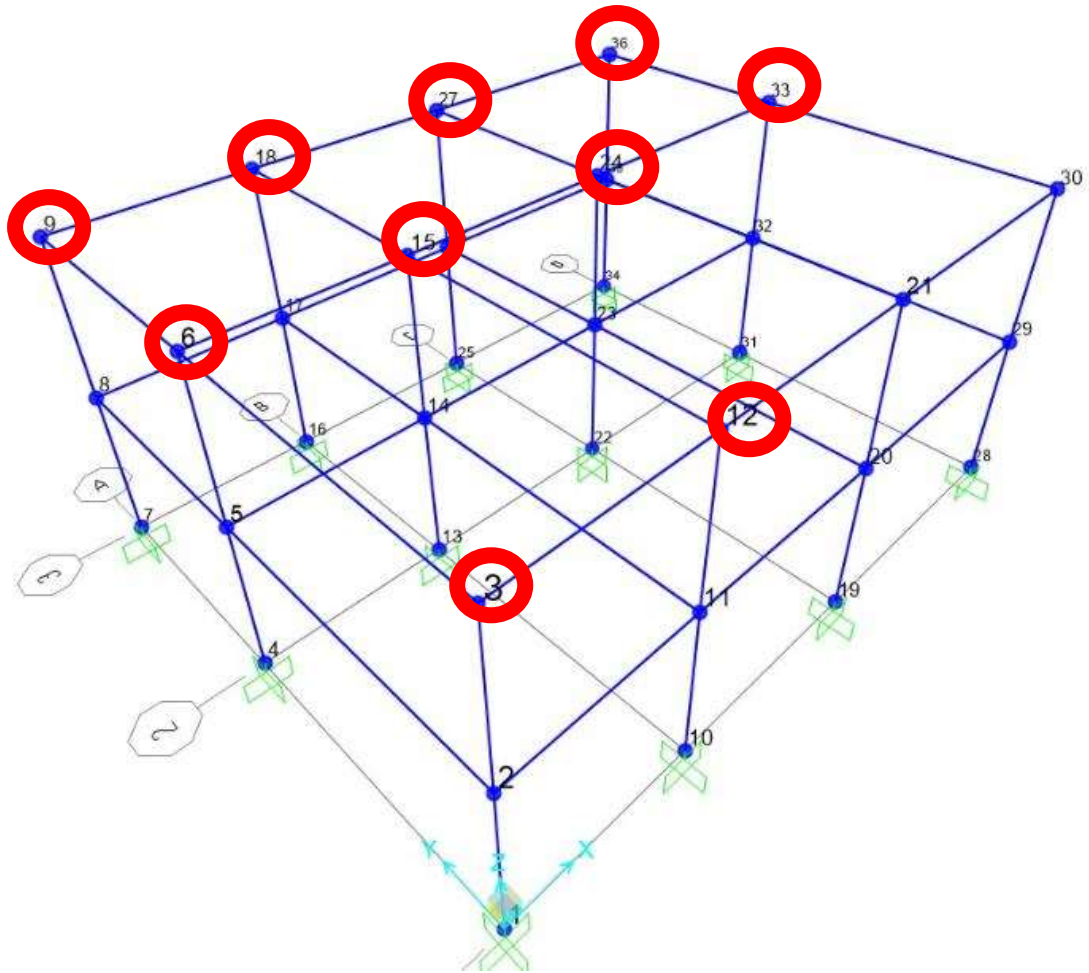
6.5.7 Παράδειγμα 7



Σχήμα 6-33 Κάτοψη παραδείγματος 7



Σχήμα 6-34 Παραμορφωμένη κατάσταση κατά την ιδιομορφική ανάλυση του παραδείγματος 7



Σχήμα 6-35 3D απεικόνιση παραδείγματος 7

Optimal Sensor Placement Tool (RETROFIT - MSc.)

Building Case Name: Παράδειγμα 7

INPUT FILES FROM SAP2000

Displacement File: Joint Displacements.xlsx

Mass Partitip. File: Modal Partitipating Mass Ratios.xlsx

Building Case SUMMARY: Nodes Found: 36 Modes Found: 12

NODE INDEX CALCULATION

Select Mode Partitipation Coverage %: 90%

No. of Significant Modes to process:

Select the type(s) of Displacement: X displacement
 Y displacement
 R displacement

Frame3

No. of Available Accelerometers: 10

Sorted List of Optimal Positions: 9, 18, 6, 27, 36, 15, 24, 3, 33, 12,

Σχήμα 6-36 Παράθεση σημαντικότερων κόμβων του έβδομου παραδείγματος μέσω του προγράμματος διεπαφής χρήστη

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη μελέτη αναπτύσσεται ο τρόπος εγκατάστασης και λειτουργίας συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας με χρήση συστήματος αισθητήρων με αποτέλεσμα την εύρεση των καταλληλότερων θέσεων για την ανάπτυξη του δικτύου. Μέσω του συστήματος των αισθητήρων καθίσταται εφικτή και πληρέστερα κατανοητή η συμπεριφορά της δομής ως προς την επιβαλλόμενη φόρτιση.

Με την προσομοίωση και την ανάλυση των κατασκευών μέσω του προγράμματος SAP2000 αποκτήθηκαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία μας παρείχαν πληροφορίες για τις ιδιομορφές ταλάντωσης, όπως τις μέγιστες μετατοπίσεις των κόμβων και τη συμμετοχή της μάζας σε κάθε ιδιομορφή. Με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων αυτών μέσω ενός προγράμματος που αναπτύχθηκε κατέστη δυνατή η διακριτοποίηση των κόμβων και η ταξινόμηση αυτών ως προς την μετακίνηση τους και με βάση τις παρεχόμενες πληροφορίες που μπορούν να προκύψουν από την παρακολούθησή τους για την κατάσταση της κατασκευής.

Οι κόμβοι ταξινομήθηκαν με αύξουσα σειρά και ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα κριτήρια που τίθενται έγινε επιλογή του απαιτούμενου αριθμού αισθητήρων καθώς και των θέσεων όπου αναπτύσσεται το δίκτυο παρακολούθησης.

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. *Accelerometers*. (2012). Αναρτήθηκε από <http://www.engineersgarage.com/articles/accelerometer>
4. *SEISMIC DESIGN PRINCIPLES*. (2006, 10/Νοεμβρίου). Αναρτήθηκε από <https://www.wbdg.org/resources/seismic-design-principles>
5. *ΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ*. (2012). Αναρτήθηκε από <http://www.telestatic.gr/content/articles/2/5/texnika-8emata/>
6. *STRUCTURAL VITAL SIGNS*. (2014, 13/Μαρτίου). Αναρτήθηκε από <http://csengineermag.com/article/structural-vital-signs/>
7. ΤΟΥΛΙΑΤΟΣ, Π. *ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανακτήθηκε από http://www.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/3456/vivlion_seismoy-p.touliatos_m.pdf
8. *Ηλεκτρονικοί Αισθητήρες*. Ανακτήθηκε από <http://www.metal.ntua.gr/uploads/4701/1180/chap7.pdf>
9. *Επιταχυνσιόμετρο*. (2015). Αναρτήθηκε από http://www.k-makris.gr/AircraftComponents/Accelmeter/accel_gr.htm
10. *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/>
11. ΨΥΧΑΡΗΣ, Γ. Ν. (2014). *ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανακτήθηκε από http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/antiseismiki_texnologia_1/simeioseis/kefalaio_1.pdf
12. *Δυναμική φασματική ανάλυση πολυώροφου χωρικού φορέα*. Αναρτήθηκε από https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/1613/1/02_chapter_9.pdf
13. *ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ*. Αναρτήθηκε από http://www.halyvourgiki.com/App Upload/Files/06EAK_69-112_CHAPTER_3.pdf
14. ΤΕΕ, *Σχεδιασμός Κτηρίων Σκυροδέματος με βάση τους Ευρωκώδικες 2 & 8*. Ανακτήθηκε από https://eclass.teicrete.gr/modules/document/file.php/TD177/EC8_fasma%20.pdf
15. ΚΑΜΑΤΕΡΗ, Δ. (2012). *ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΟΥΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ.

16. Παπαδρακάκης, Μ. (2003). *ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ V. ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΦΟΡΕΩΝ, ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ, Μέρος II*. ΑΘΗΝΑ: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
17. Παπαλοΐζου, Λ. , Πολυκάρπου, Π. & Κωμοδρόμος, Π. (2006). *Σημειώσεις για το πρόγραμμα SAP2000 Version 10*, Παράδειγμα Εφαρμογής, Στατική και Δυναμική ανάλυση δώροφου πλαισίου. ΛΕΥΚΩΣΙΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ.
18. ΜΑΝΑΦΗΣ, Γ. & ΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΥ, Α. Μ. (2011). *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ*. ΚΑΒΑΛΑ: ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΒΑΛΑΣ.
19. Τσαμπρας, Γ. & Μπαζαΐος, Ν. (2010). *SAP2000, Ανάλυση & Σχεδιασμός Κατασκευών με Πεπερασμένα Στοιχεία*. Αναρτήθηκε από [https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1542/SAP2000%20Manual\(07.05.2011\).pdf](https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1542/SAP2000%20Manual(07.05.2011).pdf)
20. 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. Ανακτήθηκε 13/01/2017 από <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1241/of2012-1241.pdf>
21. Abdelrazaq, A. (2010). *Design and Construction Planning of the Burj Khalifa, Dubai, UAE*. United States: American Society of Civil Engineers. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/41130\(369\)270](http://dx.doi.org/10.1061/41130(369)270)
22. Abdelrazaq, A. *Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa: Synopsis of the Full Scale Structural Health Monitoring Programs*. Ανακτήθηκε από <http://www.ctbuh.org/LinkClick.aspx?fileticket=DUN2DTspi%2Fs%3D&tabid=468&language=en-US>
23. ΨΥΧΑΡΗΣ, Γ. Ν. (2016). *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, ΤΕΥΧΟΣ 1*. Αθήνα: ΕΜΠ. Ανακτήθηκε από http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/antiseismiki_tehnologia_1/simeioseis/notes_psy_xarh_teuxos_1.pdf
24. ΚΩΤΣΙΔΗ, Η.Α. (2012). *ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΜΕ ΚΟΛΛΗΤΙΚΑ ΜΕΣΑ*. ΕΜΠ: ΑΘΗΝΑ.
25. ΧΑΤΖΗΕΥΦΡΑΙΜΙΔΗΣ, Α. (2005). *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ*. ΤΕΙ ΧΑΛΚΙΔΑΣ: ΧΑΛΚΙΔΑ. Ανακτήθηκε από **Σφάλμα! Η αναφορά της υπερ-σύνδεσης δεν είναι έγκυρη.**
26. Καλόμοιρος, Ι. (2006). *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ, Αισθητήρες Μετρήσεων*. Ανακτήθηκε από http://meleththrio.teicm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/26/Kef2_Sensors_Petal_Kalom.pdf;jsessionid=BE1D2BF04E69C6DD6D6D8AB2CA5AC6DC?sequence=2
27. Τριτσώνης, Α. & Τέρτης, Γ. (2012). *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ*. ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ: ΧΑΝΙΑ.
28. Κίρτας, Ε., Παναγόπουλος, Γ. (2015). *Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα Η/Υ*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Ανακτήθηκε από https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/1617/1/02_chapter_13.pdf

29. Sun, H. & Büyüköztürk, O. (2015). *Optimal sensor placement in structural health monitoring using discrete optimization*, Smart Materials and Structures (Vol 24, Num 12), σελ.16. IOP Publishing Ltd: USA.
30. ΒΟΥΤΕΤΑΚΗ, Μ.Σ. (2009). *ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ “ΕΥΦΥΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”*. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ: ΧΑΝΙΑ.
31. ΤΡΑΧΑΛΑΚΗ, Σ. (2012). *ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ*. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ: ΧΑΝΙΑ.
32. Κουτσιανίτης, Π. (2014). *Ιδιομορφική ανάλυση και έλεγχος κατασκευών με χρήση ασαφούς λογικής και βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων*. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ: ΧΑΝΙΑ.
33. Doebling, S.W. , Farrar, C.R. & Prime M.B. *A SUMMARY REVIEW OF VIBRATION-BASED DAMAGE IDENTIFICATION METHODS*. Ανακτήθηκε από ftp://ftp.ecn.purdue.edu/ayhan/Fabian/Papers_20110413/Doebling%20Farrar%2001.pdf
34. Μούζουλα Δ.Ν. (2013). *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΑΠΟ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ: ΠΑΤΡΑ.
35. ΒΕΡΓΙΝΗ, Δ. & ΤΣΙΟΥΜΠΡΗΣ, Κ. (2013). *ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ-ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ*. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ: ΑΘΗΝΑ.
36. ΒΕΡΥΚΟΚΙΔΗΣ, Μ. (2010). *ΕΞΥΠΝΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ «SMART SENSORS»*. ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ: ΗΡΑΚΛΕΙΟ.
37. ΤΟΥΛΙΑΤΟΣ, Π. (2013). *ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΣ*. ΕΜΠ: ΑΘΗΝΑ. Αναρτήθηκε από <http://docplayer.gr/29932243-Arhitektoniki-kai-seismos-simeioseis-gia-to-kat-epilogin-mathima-6oy-ex-panagiotis-toyliatos-om-kathigitis-e-m-p.html>
38. Σέξτος, Α. ,Καρακώστας, Χ. ,Λεκίδης, Β. & Κάππος, Α. *Δυναμική συμπεριφορά της 2ης Χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας υπό ασύγχρονη σεισμική κίνηση*. Αναρτήθηκε από http://library.tee.gr/digital/m2173/m2173_sextos.pdf
39. Kalkan, E. ,Savage, W. ,Reza, S. ,Knight, E. & Tian, Y. (2013). *UNLV’s Environmentally Friendly Science and Engineering Building is Monitored for Earthquake Shaking*. Αναρτήθηκε από <https://earthquake.usgs.gov/monitoring/buildings/unlv.php>
40. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΣ, Π. ,ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ-ΒΛΑΜΗΣ, Α. ,ΠΑΝΑΓΗΣ, Α. (2009). *ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ “ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΤΡΙΚΟΥΠΗΣ” (πρώην ΡΙΟΥ-ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ)*. Αναρτήθηκε από http://www.gefyra.gr/images/user/Publications/Article_12102009_revC.pdf
41. Kalkan, E. ,Ulusoy, H.S. & Banga, K. (2013). *Real-time seismic monitoring of Veterans Affairs hospital buildings*. SPIE Smart Structures: San Diego. Αναρτήθηκε από https://earthquake.usgs.gov/monitoring/buildings/img/2013-Ulusoy_et_al-Real-time-seismic-monitoring.pdf

42. 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*. Αναρτήθηκε από <http://erolkalkan.com/Pubs/85.pdf>
43. 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 Αχαΐας-Ηλείας*. Αναρτήθηκε από http://library.tee.gr/digital/m2456/m2456_makarios1.pdf
44. ΑΣΤΡΕΙΝΙΔΗΣ, Ε. ,ΕΓΓΛΕΖΟΣ, Δ. (2008). *Ενόργανη Παρακολούθηση Παραμορφώσεων του Τείχους της Ακρόπολης με Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Σύγκριση Μετρήσεων και Αναλυτικών Προβλέψεων*. Αναρτήθηκε από http://library.tee.gr/digital/m2368/m2368_astreididis.pdf
45. Ψύλλος, Γ. *Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών, θεωρία και εφαρμογές*. ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ: ΑΘΗΝΑ.
46. ΖΑΡΑΒΕΛΛΑ, Ε. (2010). *ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ*. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ:ΠΑΤΡΑ.
47. Καλκάνης, Κ. & Καντεράκης, Γ. (2015) *ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ*. Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. : ΑΘΗΝΑ
48. Λεκίδης, Β. ,Καρακώστας, Χ. , Πανέτσος, Π. & Διαμαντουλάκη, Ι. (2009). *Ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης σημαντικών έργων με σκοπό την πληρέστερη συντήρησή τους*. ΤΕΕ: ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ.
49. ΠΑΝΕΤΣΟΣ, Π. ,ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΗΣ, Μ. & ΑΣΤΡΕΙΝΙΔΗΣ, Ε. *Ενόργανη παρακολούθηση παραμορφώσεων γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών*. Αναρτήθηκε από http://library.tee.gr/digital/m2456/m2456_panetsos.pdf
50. YONG, G. (2005). *STRUCTURAL HEALTH MONITORING STRATEGIES FOR SMART SENSOR NETWORKS*. University of Illinois:Urbana.
51. Γιαννούλα, Δ. (2015). *Ενόργανη παρακολούθηση και αποτίμηση σεισμικής τρωτότητας του κτιρίου της νέας φιλοσοφικής σχολής Α.Π.Θ. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: Θεσσαλονίκη*.
52. Κίρτας, Ε. *Ανάλυση κατασκευών σε Η/Υ*. ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
53. Παρασκευά, Θ. (2013). *Ανελαστική ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς γεφυρών από σκυρόδεμα*. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: Θεσσαλονίκη.
54. Πανταζής, Ε. (2011). *Στατική και δυναμική επίλυση πρικών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. ΕΜΠ: ΑΘΗΝΑ.
55. SAP2000. (2016). Αναρτήθηκε από: <https://www.ace-hellas.gr/logismiko/cad-solutions/csi-prionta/sap-2000-el/>
56. Kinematic products. (2015). Αναρτήθηκε από: <http://www.kinematics.com/p-37-Products.aspx>

57. Mouser electronics. (2017). Αναρτήθηκε από: <http://gr.mouser.com/Sensors/Motion-Position-Sensors/Accelerometers/ /N-axgd7?RI=axgd7ZgjdH41Z1yzfg5dZ1z0jI3aSGT>
58. MCube. (2017). Αναρτήθηκε από: <http://www.mcubemems.com/product/mc3635-3-axis-accelerometer/>
59. PCB Piezotronics. (2017). Αναρτήθηκε από: <https://www.pcb.com/products/productfinder.aspx?tx=14>
60. GeoSIG. (2017). Αναρτήθηκε από: <https://www.geosig.com/>
61. Global Sensor Technology. (2015). Αναρτήθηκε από: <http://www.globalsensortech.com/product-guides/>
62. 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
63. T. G. Carne and C. R. Dohmann, "A modal test design strategy for modal correlation," in Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, pp. 927–933, Schenectady, NY, USA, February 1995.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

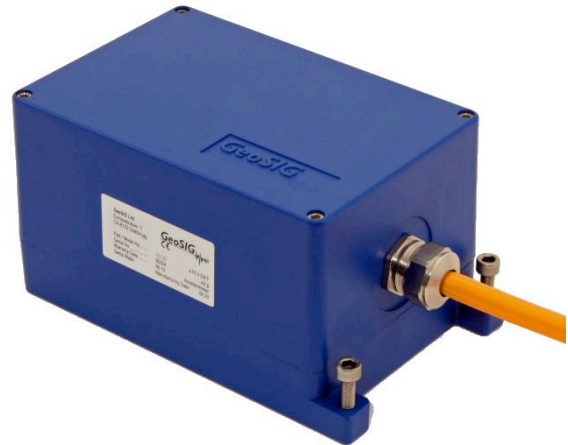
Περιεχόμενα:

- Κατάλογος Αισθητήρων εταιρίας GeoSIG
- Κατάλογος Αισθητήρων εταιρίας KINEMATRICS
- Κατάλογος Αισθητήρων εταιρίας GST
- Κατάλογος Αισθητήρων εταιρίας PCB

AC-43 / AC-42 / AC-41 Force Balance Accelerometer

Features

- Full Scale: ± 2 g (± 0.625 , 1, 4, 5 g optional)
- Bandwidth DC to 100 Hz
- MEMS Force Balance Accelerometer
- High accelerations measurement
- High shock survivability
- Large temperature range
- High lifetime stability
- Cost effective sensor
- Low power consumption
- Simple test and calibration
- Single Bolt Mounted Enclosure provides up to $\pm 10^\circ$ of Leveling Adjustment



Outline

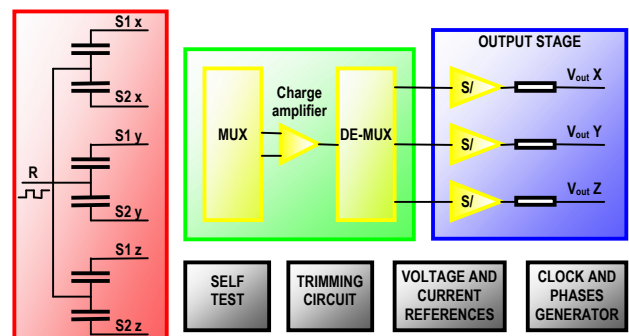
The AC-43 sensor package is a triaxial accelerometer designed for urban and industrial applications regarding strong motion earthquake survey and vibration monitoring as well as alarm and switch systems.

All these applications require rugged sensors with minimum maintenance and a simple method for periodic testing.

The AC-43 accelerometer is based on the modern MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) technology, consisting of sensing cells assembled in a way that optimizes their performances. This combined with the state of the art proprietary circuit design yields this cost effective and reliable accelerometer.

MEMS cells include linear accelerometer sensing elements which measure the capacitance variation in response to any movement or inclination and a factory trimmed interface chip that converts the capacitance variations into analog or digital signal proportional to the motion.

The DC response allows the sensor to be easily repaired, tilt tested or recalibrated in the field. With the help of the TEST LINE the AC-43 accelerometer can be completely tested assuring proper operation.



The AC-43 is typically housed in the standard GeoSIG sealed cast aluminium housing with dimensions of 195 x 112 x 96 mm. The housing also incorporates a single bolt mount with three levelling screws. Stainless steel packaging options are available.

The AC-4x accelerometer is directly compatible with the GeoSIG recorders. It is also designed to be mounted internally in standard GeoSIG recorders.

Specifications AC-43 / AC-42 / AC-41 Force Balance Accelerometer

General Characteristics

Application: - Strong-Motion earthquake recording
 - Vibration monitoring
 - Alarm / Switch systems

Configurations:

AC-43 or AC-43i*:

AC-42-H or AC-42-Hi*:

AC-42-V or AC-42-Vi*:

AC-41-H or AC-41-Hi*:

AC-41-V or AC-41-Vi*:

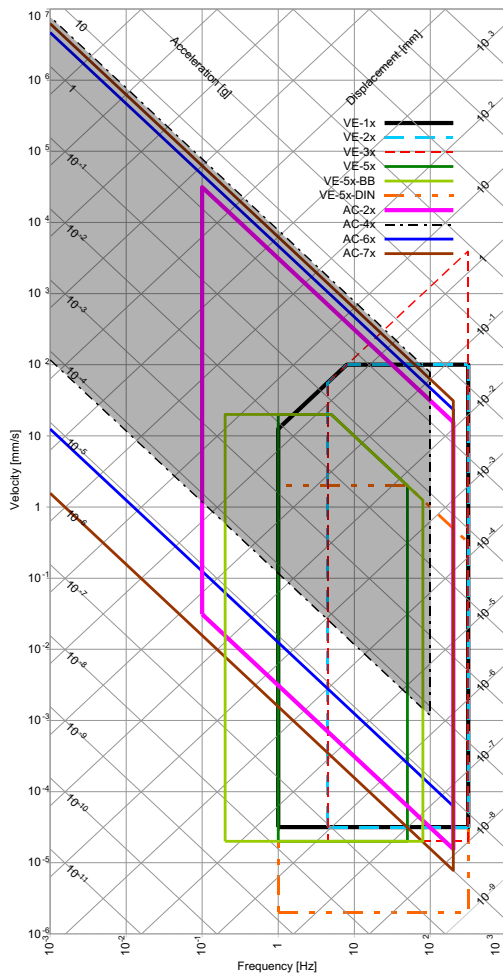
	Triaxial	Biaxial	Uniaxial	Axes	Alignment**
■	■			X - Y - Z	H - H - V
		■		X - Y	H - H
			■	X (or Y) - Z	H - V
			■	X (or Y)	H
			■	Z	V

* i : Internal sensor ** H: Horizontal, V: Vertical

Full Scale Range: ± 2 g Std
 Optional $\pm 0.625, \pm 1, \pm 4$ or ± 5 g

Sensor Element

Type: MEMS Force Balance Accelerometer
 Dynamic Range: >95 dB
 Noise: < 60 μg_{RMS}
 Nonlinearity: < 0.3 % typ., < 0.6 % for vertical
 Cross Axis Sensitivity: < 2 % typ.
 Bandwidth: DC to 100 Hz
 Span drift: 100 ppm/°C
 Offset Drift: ± 0.8 mg / °C
 Full Scale Output: 0 ± 10 V differential (20 Vpp)
 optional 2.5 ± 2.5 V single-end (5 Vpp)
 0 to 20 mA current loop
 Measuring Range: See plot



Power

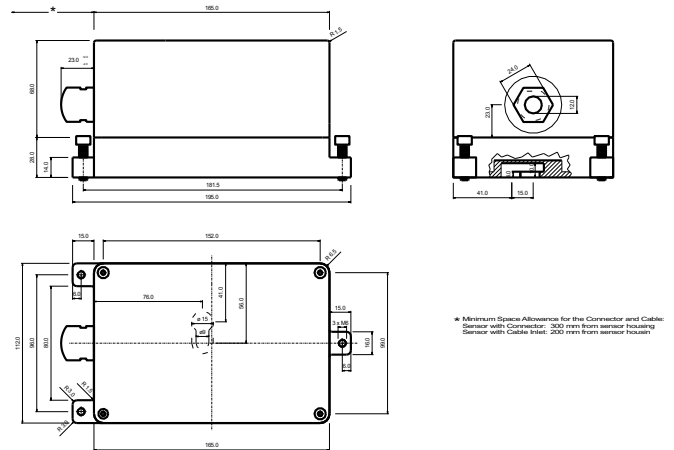
Supply Voltage: 7 to 15 VDC, single supply
 optional, 7 to 30 VDC
 Consumption: 75 mA max. @15 VDC
 Connector: Metallic, Shielded, IP67, 12 pins, male
 optional MIL, Bendix PT07A 14-19P
 Mating: Binder / Coninvers type RC
 Overvoltage Protection: All pins are protected

Connector Pin Configuration

Pin 1-6: Signal output for axis X, Y, Z
 Pin 7,8: Test Input
 Pin 9-10: + 12 VDC power supply
 Pin 11-12: Not used
 Case: Shielded Ground

Environment/Housing

Housing Type: Cast aluminium
 Sealed access cover
 Housing Size: 195 x 112 x 96 mm
 Weight: 2.0 kg
 Index of Protection: IP 65
 optional IP68
 Temperature Range: - 40 to 85 °C (operating)
 - 40 to 85 °C (non-operating)
 Humidity: 0 to 100 % (non-condensing)
 Orientation: Can be configured for mounting in any position.
 Mounting: Single bolt, surface mount, adjustable within $\pm 10^\circ$



Standard AC-4x

Floor mounted, Full scale ± 2 g,
 2 m cable with cable inlet and recorder
 mating connector, concrete anchor bolt
 and user manual on CD

Options

Cable & connector: Cable connector
 Metallic, Shielded, IP67, 12 pins, male
 optional MIL, Bendix PT07A 14-19P
 Cable with shielded twisted pairs for any
 length (including mating sensor
 connector) with open end
 Cables for connection to GeoSIG
 recorder
 Connector on user specification mounted
 at cable end
 Housing: Watertight IP 68 housing
 Downhole housing (AC-4x-DH)
 Stainless steel protective housing
 As internal sensor
 Mounting: Wall mounted

AC-73 / AC-72 / AC-71 Force Balance Accelerometer

Features

- True Electro-mechanical Force Balance Accelerometer
- Digital AC-73D version available
- Dynamic Range 165 dB
- User selectable Full Scale range $\pm 0.5, 1, 2, 3$ or $4 g$
- Bandwidth from DC to 200 Hz
- Exemplary Offset stability
- Temperature and drift compensation
- Robust suspension system
- Single Bolt Mounted Enclosure with up to $\pm 10^\circ$ of Leveling Adjustment
- Integrated Bubble Level

Applications

- Broadband Seismic, Earthquake and Structural measuring and monitoring



Outline

The AC-73 sensor package is a true electro-mechanical triaxial downhole accelerometer designed for broadband earthquake monitoring and applications requiring highly sensitive and rugged sensors with minimum maintenance and a simple method for periodic testing.

The rugged mass suspension moving coil system improves the signal to noise ratio. The magnetic system and capacitive position sensors offer symmetrical controls for the accurate electronic centring of the mass. At rest the accelerometer mechanism is in balance and no electrical output is generated.

In case of a ground motion, AC-73 yields an electrical output proportional to the current used to keep the mass centred. This output signal is precisely calibrated to provide a signal at the utmost accuracy and with a lowest possible noise level. The symmetrical positioning system incorporated with the force balance accelerometer principle, the accelerometer faithfully keeps its scaling and calibration even under extreme conditions.

The DC response allows the sensor to be easily repaired, tilt tested or recalibrated in the field. With the help of the test line the AC-73 accelerometer can be completely tested assuring proper operation and accurate acceleration measurement. This test line is internally connected to the external world only when a given command is sent to the sensor to avoid any noise pick-up through the test input.

The AC-73 is equipped with electronic offset adjustment features that make its installation very user friendly. This powerful feature allows the users to install the AC-73 without mechanical offset adjustment and fine levelling.

The sensor can be powered from 9.5 to 18 VDC source with the advantage that its power input is insulated from the sensor's electronic ground. This avoids ground loops and reduces noise induced through the power supply.

All the best features of the analog AC-73 accelerometers are now offered with the new AC-73D version, having a digital interface that is directly compatible to operate with the GMSplusD series recorders with upto 1000 meter distances using standard Cat5e cables, providing an extremely compact and versatile measuring solution.



AC-73D version
shown with the GMSplusD

Specifications AC-7x

General Characteristics

Versions: AC-7x: analog
AC-7xD: digital

Configurations***:

AC-73 or AC-73i*:

AC-72-H or AC-72i-H*:

AC-72-V or AC-72i-V*:

AC-71-H or AC-71i-H*:

AC-71-V or AC-71i-V*:

	Triaxial	Biaxial	Uniaxial	Axes	Alignment**
■	■			X – Y – Z	H – H – V
	■			X – Y	H – H
		■		X – Z	H – V
			■	X	H
			■	Z	V

* i : Internal sensor ** H: Horizontal, V: Vertical

***: add "D" after number of channels for digital version

Full Scale Range: ± 2 std., ± 0.5 , 1, 3 or 4 g
user selectable at field

Sensor Element

Type: True Electro-mechanical
Force Balance Accelerometer

Dynamic Range: 165 dB (per bin rel. full range)
156 dB (per bin rel. full scale rms)
134 dB (0.02 – 50 Hz, integrated PSD)

Nonlinearity: < 0.1 %

Cross Axis Sensitivity: < 0.5 %

Bandwidth: DC to 200 Hz

Damping: 0.7 ± 0.1 critical

Offset Drift: 0.0005 g / °C

Span Drift: 200 ppm / °C

Full Scale Output^{NAD}: 0 ± 10 V differential (20 Vpp)

Hysteresis: < 0.001 % of full scale

Sensitivity: 2.5 to 20 V/g

Output impedance: 100 ohms

Power

Supply Voltage: AC-7x: 9.5 to 18 VDC

AC-7xD: 48 VDC

Consumption: AC-73: 41mA typical, 260 mA max.
@15 VDC

AC-73D: 200 mA typical

Overvoltage Protection: All external interfaces are protected

Connector Pin Configuration

AC-73:

Pin 1-2, 3-4, 5-6

Pin 7-8

Pin 9-10

Pin 11-12

Case

AC-73D:

Signal output for axis X, Y, Z

Test input, Digital 0/12 V / GND

12 VDC insulated power supply input

Reserved

Shield connection

see user manual

Environment/Housing

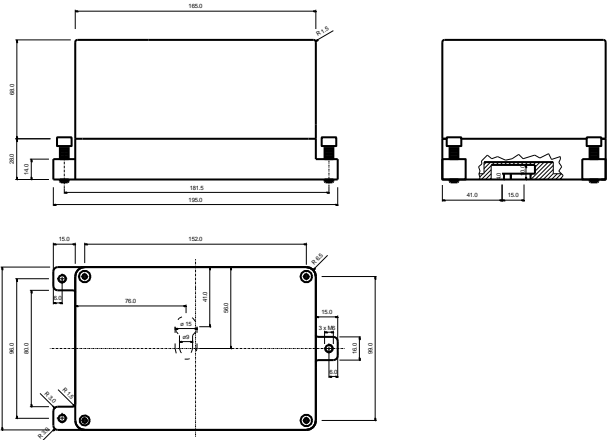
Housing Type:

Cast aluminium

Sealed access cover

Housing Size:

195 x 112 x 96 mm



Weight: 3.0 kg

Index of Protection:

IP 65

optional IP 68^{NAD}

Temperature Range:

-20 to 70 °C (operating)

-40 to 75 °C (non-operating)

Humidity:

0 to 100 % (non-condensing)

Orientation:

Can be configured for mounting in any position (please specify at order).

Mounting:

Single bolt, surface mount, adjustable within $\pm 10^\circ$

Standard sensor

Floor mounted, Full scale ± 2 g,
for external sensors: concrete anchor,

GeoSIG recorder mating connector and

AC-7x: 2 m cable with cable inlet

AC-7xD: cable inlet

Options

Full Scale Output^{NAD}:

- 4 to 20 mA current loop

Cable & connector^{NAD}:

- Frame connector (no cable inlet)

- Mating connector (for frame connector)

- Cable with shielded twisted pairs for any length with open end

- Connector on user specification mounted at cable end

- See separate cable & connector options sheet

Housing:

- Watertight IP68 housing^{NAD}

- Stainless steel protective housing

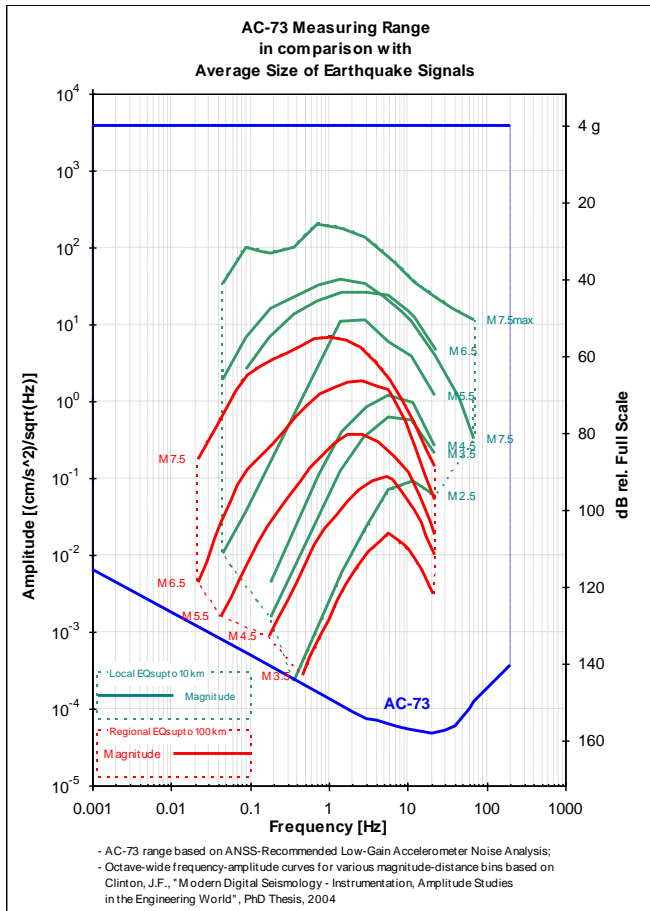
Mounting:

- See separate sensor orientation options sheet

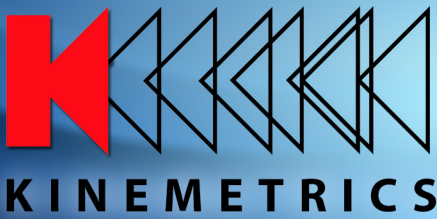
Ordering Information

Specify:

Version and configuration of AC-7x, full scale range, and other applicable options



NAD: Not applicable for AC-7xD digital version.



EpiSensor ES-T

Force Balance Accelerometer

The EpiSensor ES-T: A Flexible, Versatile Value

Kinematics announces its latest line of earthquake sensors – EpiSensor force balance accelerometers. Model FBA ES-T is a triaxial surface package useful for many types of earthquake recording applications. The unit consists of three EpiSensor force balance accelerometer modules mounted orthogonally in one small convenient package. With fullscale recording ranges of ± 0.25 to $\pm 4g$ (user selectable) the EpiSensor provides on-scale recording of earthquake motions even at nearfault locations and in a wide variety of structure types.

The significantly improved bandwidth of DC to 200 Hz allows engineers and scientists to study motions at higher frequencies while maintaining the very important DC response that allows simple field calibration and reduces post-processing confusion.

Output circuitry is also significantly enhanced. Several types of outputs can be field-selected by the user: $\pm 2.5V$ single-ended output for use with traditional Kinematics earthquake recording instruments; $\pm 10V$ single-ended or $\pm 20V$ differential output for use with Kinematics digital recorders and other 24-bit digital recorders currently on the market.

EpiSensor force balance accelerometers are also available in uniaxial (the FBA ES-U) and borehole (the FBA ES-SB shallow and FBA ES-DH deep) packages.

FEATURES

- Low noise
- Extended bandwidth - DC to 200Hz
- User-selectable full-scale range
- Calibration coil (standard)
- Single-end or differential output (user selectable)
- Double-stage transient protection

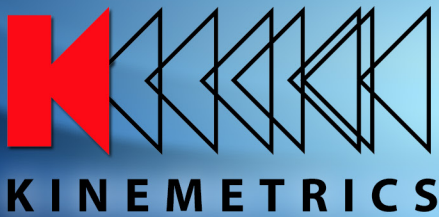
SPECIFICATIONS

Dynamic range:	155 dB+
Bandwidth:	DC to 200Hz
Calibration coil:	Standard
Full-scale range:	User selectable at $\pm 0.25g$, $\pm 0.5g$, $\pm 1g$, $\pm 2g$ or $\pm 4g$
Outputs:	User selectable at: $\pm 2.5V$ single-ended $\pm 10V$ single-ended $\pm 5V$ differential $\pm 20V$ differential
Zero adjust:	Three user-friendly access holes for simple, safe, efficient adjustment

Linearity:	< 1000 $\mu g/g^2$
Hysteresis:	< 0.1% of full scale
Cross-axis sensitivity:	< 1% (including misalignment)
Zero point thermal drift:	< 500 $\mu g/^\circ C$ (1g sensor)
ESD, RF, EMI protection:	Double stage transient protection with gas arrester elements
Power consumption:	12mA from +/- 12V (Standard Amp) 35mA from +/- 12V (Low Noise Amp) Single supply option available
Physical size:	13.3 cm diameter (cylinder), 6.2 cm high
Mounting:	Single bolt mounting, three adjustable leveling feet and bubble level
Connection:	Single military-style metal connector
Operating Temperature:	-20° to $70^\circ C$ (0° to $160^\circ F$)
Housing:	Watertight enclosure



The Kinematics facility in Pasadena, CA has a certified ISO9001 Quality Management System.



EpiSensor 2

Force Balance Accelerometer

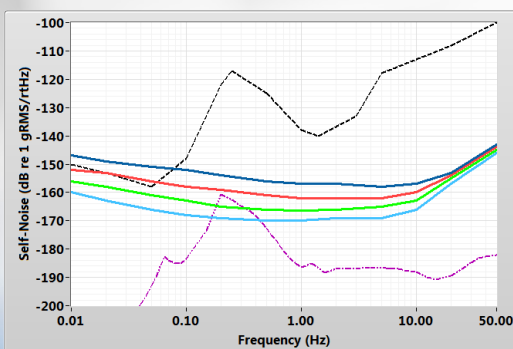
EpiSensor 2: The Ultra-High Performance at Low Power! Seismic Strong Motion Accelerometer

The EpiSensor 2 is an advanced force-balance, triaxial broadband seismic sensor that builds upon the outstanding record of its predecessor, the EpiSensor; the world's first seismological-grade strong motion accelerometer. The high dynamic range of the EpiSensor 2 allows both weak and strong motion high-fidelity recording from a single sensor.

The seismic industry-leading self-noise of the EpiSensor 2 is accomplished with quiescent power consumption (typical 325 mW for a triaxial sensor), well below that of any 4g sensors on the seismic monitoring market today. *The EpiSensor 2 has quiescent power consumption that is 60% to 70% less than competing designs!*

When combined with the world's only 26-bit seismic data acquisition system, the Quanterra Q330HRS, it establishes a new performance standard for digital strong motion recording applications. When paired to the seismic community leading ultra-low power digitizer, the Quanterra Q330, it allows high-fidelity triaxial strong motion recording with combined power consumption of well under 1W.

A new standard in power and performance is an enabling feature: it will deliver the highest quality data to advanced research projects, within an infrastructure that is simpler and less expensive than that required for typical broadband instruments.



FEATURES

EpiSensor 2 Performance Attributes:

- Industry leading 166 dB dynamic range
- Very low self-noise: comparable to some broadband seismometers
- Wide passband: DC to >320 Hz
- Highest thermal stability, and enhanced dynamic accuracy, allow for higher data quality
- Selectable full-scale ranges from $\pm 0.25 g$ to $\pm 4 g$
- Powerful "AUTOZERO" capability for offset removal on any full-scale range
- Full calibration capability
- Remote signaling of full-scale range via multiple interfaces
- Galvanic isolation of critical power and control interfaces

EpiSensor 2 Ease-of-Use:

- Allows full functional control through the digitizer, via an isolated Epi™ serial interface, and with a (local) button switch for:
 - Digital selection of full-scale range
 - Control of AUTOZERO mode
 - CAL ENABLE function
- Remote control modes (digitizer and serial interface) enable efficient operation in locations that are difficult to access.
- Serial interface provides access to sensor-specific information
- Installation accessories include an integrated bubble level, adjustable fine-leveling screws, and a central, non-interfering bolthole
- Very small, space-efficient footprint with connection of right-angle cable.
- Rugged enclosure rated IP67+.

SPECIFICATIONS

Architecture:	Triaxial, force-balance accelerometer with capacitive displacement transducer; X/Y/Z (non-Galperin) configuration
Centering:	Optional AUTOZERO mode to allow removal of static sensor offsets (zeroed to within ± 0.005 g)
Full-scale Range:	Electronically (and remotely) selectable range: ± 4 g, ± 2 g, ± 1 g, ± 0.5 g, and ± 0.25 g (peak)
Bandwidth:	DC to >320 Hz (-3 dB point)
Dynamic Range (Integrated RMS):	166 dB @ 1 Hz over 1 Hz bandwidth 155 dB, 3 to 30 Hz
Non-linearity:	$< 0.015\%$ (of full scale) total non-linearity
Hysteresis:	$< 0.005\%$ (of full scale)
Cross-axis	$< 0.5\%$ total
Sensitivity:	5V/g (differential) for ± 4 g full scale range
Offset Temperature	
Coefficient:	Horizontal sensor: $60 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$, typical Vertical sensor: $320 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$, typical
Power Supply:	Voltage: 9 to 36 V DC isolated input
Power Consumption:	< 325 mW typical quiescent
Power Protection:	Reverse-voltage and over-/under-voltage protected Over-current protection with self-resetting feature
Isolation:	Input power, serial interface, and digital control lines galvanically isolated from sensor ground
Grounding:	Case ground connected to dedicated cable line for automatic connection to digitizer case
Control Interfaces	
Digital ENABLE Lines:	Dedicated, isolated lines for control of full-scale range, CAL ENABLE and AUTOZERO ON/OFF
RS-232 Interface:	TIA/EIA-232-F compliant, isolated RS-232 with full command-line control of all sensor parameters and functions
Pushbutton Switch and Status LEDs:	Local selection and display of full-scale range, AUTOZERO, and CAL functions

Full-Scale Range Remote Signaling Mass

Position Interface: Range-dependent voltage output on traditional broadband sensor mass position lines

Signal Line

Interface: Time/Amplitude-coded pulse train superimposed on differential signal lines: signaled upon full-scale range change, or upon power-ON reset

Electrical Interface

Connector: Souriau 851-07C16-26P50-A7-44 Receptacle

Acceleration Output: 40 Vpp differential

Output Impedance: 2×100 Ohms

Calibration Input: Protected, differential input for exciting all three axes simultaneously

Cable:

Right-angle molded plug connects to sensor; Inbound end connects directly to Q330-class digitizers; Y-plug for RS-232 interface

Physical and Environmental

Housing: Epoxie-painted, Ni-plated Aluminum; scratch and crack resistant

Leveling: Integrated bubble level and fine-pitch, adjustable leveling screws

Mounting: Single, central bolthole passing through sensor; non-interfering with leveling

Size: 5.0"L x 5.25"W X 3.25"H (12.7 cm x 13.3 cm x 8.3 cm)

Weight: 3lbs

Operating Temperature: -40°C to 60°C

Storage Temperature: -65°C to 75°C

Humidity: 0 to 100%

Weather Resistance: O-ring sealed to IP67+

Remote Commands (password-protected access):

Full-scale range setting

Calibration ENABLE

AUTOZERO ON/OFF

System Response Values

Piezoelectric Accelerometers (sample of range)



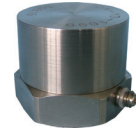
CA-YD-103
General purpose



CA-YD-104TNC
Ground isolated
Condition monitoring



CA-YD-1107
General purpose



CA-YD-109
Low frequency
High sensitivity



CA-YD-112G
Ground Isolated
Condition monitoring



CA-YD-116A
Triaxial
General purpose



CA-YD-117
Low frequency
High sensitivity



CA-YD-122
General purpose
High stability



CA-YD-125
1.5 gramme
Miniature



CA-YD-129
360° mounting
Lightweight



CA-YD-136
High temperature
High shock



CA-YD-141
Triaxial
High shock



CA-YD-160
High shock
Miniature



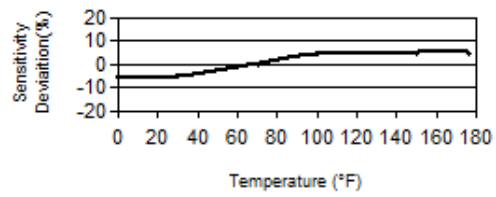
CA-YD-169
High Sensitivity
TO-8 Package

MODEL: CA-YD-	Measurement Direction	Sensitivity (pC/ms ⁻²)	Max. Oper. Accel. (ms ⁻²)	Linear Freq. Range ±10% (Hz)	Temp. Range (°C)	Weight (g)	Mounting Methods
103	Single-axis	2	20000	0.5 - 10000	-20 - +120	14	Screw(M5)
104TNC	Single-axis	3.5	8000	0.5 - 5000	-20 - +120	33	Screw(M5)
1107	Single-axis	5	50000	0.5 - 8000	-40 - +150	28	Screw(M5)
109	Single-axis	250	100	0.2 - 1500	-40 - +150	210	Screw(M5)
112G	Single-axis	5	1000	1 - 3000	-40 - +250	100	3-hole(M4)
116A	Triaxial	2	5000	1 - 5000	-40 - +150	60	Screw(M5)
117	Single-axis	50	1500	0.2 - 3000	-40 - +150	50	Screw(M5)
122	Single-axis	0.2	50000	1 - 8000	-40 - +150	25	Screw(M5)
125	Single-axis	0.1	200000	2 - 20000	-40 - +150	1.5	Screw(M5)
129	Single-axis	15	20000	0.3 - 8000	-40 - +150	9	Screw(M5)
136	Single-axis	0.3	10000	1 - 10000	-40 - +250	26	Screw(M5)
141	Triaxial	1	50000	1 - 5000	-40 - +250	17	Hole or Screw(M5)
160	Single-axis	0.3	20000	1 - 5000	-40 - +250	2.8	Adhesive
169	Single-axis	12	50000	0.3 - 5000	-40 - +120	24	TO-8

Sinocera also manufactures numerous variations of the standard stock items listed above. 'Ruggedised', lightweight, miniature and special mounting derivatives exist for many stock accelerometers. Indeed, Sinocera is happy to manufacture bespoke accelerometers to meet your precise measurement needs – whatever they may be.

	ENGLISH	SI	
Performance			
Sensitivity(± 10 %)	1000 mV/g	102 mV/(m/s ²)	
Measurement Range	± 5 g pk	± 49 m/s ² pk	
Frequency Range(± 5 %)	0.06 to 450 Hz	0.06 to 450 Hz	
Frequency Range(± 10 %)	0.05 to 750 Hz	0.05 to 750 Hz	
Frequency Range(± 3 dB)	0.02 to 1700 Hz	0.02 to 1700 Hz	
Resonant Frequency	≥ 2500 Hz	≥ 2500 Hz	
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.000003 g rms	0.00003 m/s ² rms	[1]
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	[2]
Transverse Sensitivity	≤ 5 %	≤ 5 %	[3]
Environmental			
Overload Limit(Shock)	± 300 g pk	± 2950 m/s ² pk	
Temperature Range	0 to +176 °F	-18 to +80 °C	
Temperature Response	See Graph	See Graph	
Base Strain Sensitivity	≤ 0.0005 g/με	≤ 0.005 (m/s ²)/με	[1]
Electrical			
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 10 mA	2 to 10 mA	
Output Impedance	<500 Ohm	<500 Ohm	
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	5 to 15 sec	5 to 15 sec	
Settling Time	<100 sec	<100 sec	
Spectral Noise(1 Hz)	0.30 μg/√Hz	2.9 (μm/sec ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise(10 Hz)	0.10 μg/√Hz	1.0 (μm/sec ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise(100 Hz)	0.04 μg/√Hz	0.4 (μm/sec ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise(1 kHz)	0.04 μg/√Hz	0.4 (μm/sec ²)/√Hz	[1]
Physical			
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Flexural	Flexural	
Housing Material	Titanium	Titanium	
Sealing	Hermetic	Hermetic	
Size (Diameter x Height)	0.99 in x 1.22 in	25 mm x 31 mm	
Weight	1.8 oz	50 gm	[1]
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Electrical Connection Position	Top	Top	
Mounting Thread	10-32 Female	10-32 Female	

Typical Sensitivity Deviation vs Temperature



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

OPTIONAL VERSIONS

Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.

T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4
TLA - TEDS LMS International - Free Format
TLB - TEDS LMS International - Automotive Format
TLC - TEDS LMS International - Aeronautical Format
TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4

Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Output Bias Voltage	7.5 to 13 VDC	7.5 to 13 VDC

W - Water Resistant Cable

Electrical Connection Position	Top	Top
Electrical Connector	Sealed Integral Cable	Sealed Integral Cable

NOTES:
 [1] Typical.
 [2] Zero-based, least-squares, straight line method.
 [3] Transverse sensitivity is typically ≤ 3%.
 [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.

SUPPLIED ACCESSORIES:
 Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (1)
 Model 085A41 Thermal Boot (1)
 Model ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point). (1)
 Model ACS-4 Single axis, low frequency phase and amplitude response cal from 0.5 to 10 Hz (1)
 Model M081B05 Mounting Stud 10-32 to M6 X 0.75 (1)

Entered: LK	Engineer: SDS	Sales: WDC	Approved: BAM	Spec Number:
Date: 9/16/2016	Date: 9/16/2016	Date: 9/16/2016	Date: 9/16/2016	17026

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Περιεχόμενα:

- Κατάλογος Συσκευών Καταγραφής εταιρίας GeoSIG
- Κατάλογος Συσκευών Καταγραφής εταιρίας KINEMATRICS
- Κατάλογος Συσκευών Καταγραφής εταιρίας GST

GMS^{plus} Measuring System

Features

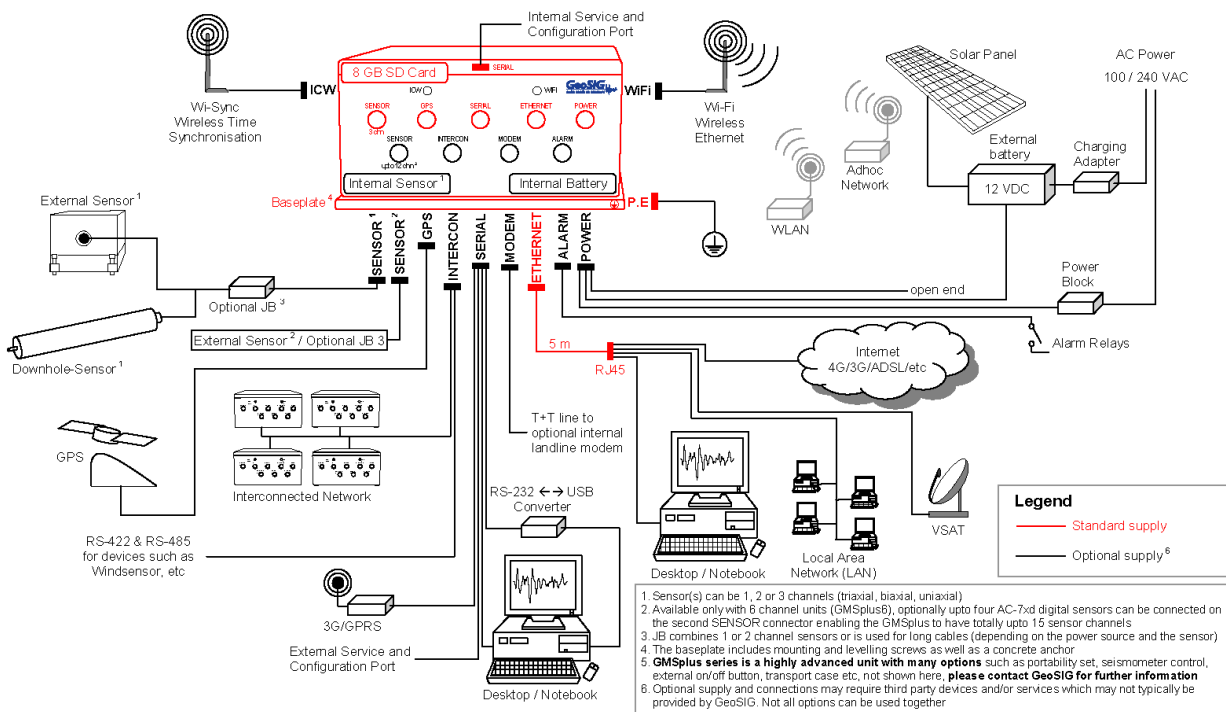
- ❑ Second generation of [NetQuakes](#) Recorder
- ❑ 3 or 6 channels, up to 1000 sps sampling rate up to 15 channels using digital sensors
- ❑ Low noise individual 24-bit $\Delta-\Sigma$ ADC per channel
- ❑ Internal built-in and/or external sensors
- ❑ Wired Ethernet, Wi-Fi and Serial links
- ❑ Smart NTP timing, GPS time base, or time synchronisation via radio channel or cable
- ❑ Enhanced connectivity via landline modems, 3G cellular devices and satellite links
- ❑ Recording to SD or CF cards, up to 128 GByte
- ❑ USB interface for external storage and communication devices
- ❑ Continuous data recording to ringbuffers
- ❑ Flexible configuration of multiple triggers
- ❑ Simultaneous data streaming to several clients
- ❑ On board data processing and evaluation
- ❑ Rugged aluminium housing with levelling base plate for easy installation
- ❑ Configuration and status monitoring via Web Interface compatible with Smartphones
- ❑ Simple and secure communication over Internet with full remote management
- ❑ Internal battery, low power consumption
- ❑ Alarm output with up to 4 relays flexibly configurable for different types of events
- ❑ Easily configurable interconnected networks with common timing and triggering

Applications

- ❑ Broadband Seismic, Earthquake and Structural measuring and monitoring
- ❑ Real-time Seismology for Freefield and Urban Areas
- ❑ High Density Earthquake Monitoring Networks
- ❑ Shake / Hazard Mapping based on Instrumental Data
- ❑ Earthquake Early Warning[®] and Rapid Response
- ❑ Damage Estimation, Disaster Management
- ❑ Seismic Alarm and Safe Shutdown
- ❑ Ambient Vibration Testing (optionally fully wireless)
- ❑ Induced Vibration Monitoring and Notification
- ❑ Building Code Compliant Instrumentation



Supply and Connectivity



Set-up and Configuration

An intuitive web interface is available for easy configuration with any web browser. Alternatively the configuration file in XML format can be edited on site through the instrument console, exchanged by replacing the memory card, remotely from a server or through SSH. Even if the configuration file can be manually edited at any time, a tool is provided to edit it securely.

Data Analysis

The GeoDAS software provides basic data evaluation in the field meeting the requirements of most scientific and engineering applications. Optionally GMSplus can perform certain analyses onboard.

Sensor

Various GeoSIG sensors as well as a number of other third party sensors can be housed internally or connected externally to the unit. In case of internal sensor, the levelling is done on the base plate of the GMSplus via its three levelling screws. The base plate is mounted using a single bolt during installation.

Digitizer

Channels:	3 or 6 optionally up to 15 using AC-7xd digital sensors
A/D conversion:	24 bit $\Delta-\Sigma$ converters individual for each channel
DSP:	32 bit output word length
Dynamic range:	146 dB (per bin @ 1 Hz rel. full scale rms) 137 dB @ 50 sps
Sampling rate:	1000, 500, 250, 200, 100, 50 sps per channel
Max. bandwidth:	DC to 250 Hz, optionally DC to 500 Hz
Anti Aliasing Filter:	Analog and digital FIR (finite impulse response)

CPU

Processor:	ARM 400 MHz
RAM:	64 MByte
Operating System:	GNU/Linux

Triggering

Several Trigger Sets can be defined in the instrument. Each set can be flexibly configured regarding the source of trigger, main and advanced trigger parameters, trigger processing and selected channels for storage. A voting logic based on the monitored channels can be defined.

Trigger Filter

Fully independent high-, low- or bandpass trigger filters can be configured.

Level Triggering

User adjustable threshold.

STA/LTA Triggering

User adjustable STA / LTA values and STA/LTA trigger and dettrigger ratio.

Event Recording

Pre-event memory:	1 to 720 seconds, typical
Post-event duration:	1 to 7200 seconds, typical

Event Summary and Parameters

Content:	PGA, PGV, PGD, SA (at 0.3, 1, 3 Hz)
Transmission delay:	User defined from trigger time

Ring Buffer

Usage:	User can request an event from any period of the ring buffer by specifying the start time/date and the duration from the console or remotely from a server.
Method:	Ringbuffer files with configurable duration which can be uploaded automatically to data server.

Data Stream

Protocol/Compatibility:	GSBU, SeedLink, compatible to Earthworm
-------------------------	---

Storage Memory

Size and Type:	8 GByte Removable SD Card, Optionally Compact Flash Card higher capacity up to 128 GByte on request FAT32 or EXT4 formatted
Management:	Intelligent management of memory card capacity using policies as per file type and ring buffer capacity specification.
Recording format:	miniSEED with extended information encapsulated into blockette 2000
Estimated Capacity:	Sampling rate [sps] x 0.4 [MB / day / 3 channel] (example: 40 MByte / day / 3 channel @ 100 sps) typical, since the data is compressed, capacity depends on the context of the data.

Self Test

- Permanent self monitoring of hardware and software components without affecting their normal operation.
- User-configurable periodical state of health (SOH) report based on comprehensive test of instrument, which can be requested at any time.
- User-configurable periodical sensor test.

Time Base

Internal:	Intelligent Adaptive Real Time Clock (IARTC)
External:	NTP, optionally GPS, Wired or Wireless Interconnection
Standard TCXO accuracy:	± 0.5 ppm (15 s/year) @ +25 °C ± 2.5 ppm (75 s/year) @ -10 to +50 °C Optionally higher accuracy TCXO's available.
Accuracy after learn:	< ± 0.5 ppm (15 s/year or 2 ms/h)
Accuracy with NTP:	< ± 4 ms typical, assuming reasonable access to NTP servers

Power Supply

Input voltage:	15 VDC (12.5 - 18 VDC) optional 9 - 36 or 18 - 75 VDC optional 90 - 260 VAC / 50 - 60 Hz to 15 VDC switched UL approved external power block 130 mA @ 12 VDC for 3 channels 200 mA @ 12 VDC for 6 channels
Power consumption:	
Internal battery:	optional 7.2 Ah for > 24 h autonomy with intelligent charger, higher autonomy is optionally available with external batteries

Indicators

● Green:	Active Charge LED
● Green:	Run/Stop LED
● Yellow:	Event/Memory LED
● Blue:	Network link/Traffic LED
● Red:	Warning/Error LED

Communication

Configuration, Data Retrieval:	Via Ethernet, Wi-Fi, Serial line, Console, or directly via removable memory card.
Network requirements:	Fixed or Dynamic IP on Ethernet LAN and/or Internet connection with Ethernet interface optional OpenVPN Wi-Fi (b/g/n) network with WEP, WPA, WPA2 security and Enterprise Mode
Security:	GeoDAS proprietary protocol over SSL Checksum and software handshaking
Serial ports:	2 ports standard, + 3 ports optional
Baud rates:	Console: 115200 baud Serial Stream: 38400, 57600, 115200 baud

Alarm / Seismic Switch / Warning / Notification Option

Alarms:	3 independent or 4 common relay contacts for trigger alarm and/or error SMS notification is optionally available
Alarm levels:	Configurable based on event triggers (NO or NC selectable during order)
Relay Hold-On:	1 to 60 seconds (User programmable)
Capacity:	The contacts are suitable for a low voltage control. In case large load must be switched then external relays should be implemented.
Max voltage:	125 V / 250 mA

Interconnected Network Option

Wired or Wireless common time and trigger interconnection network, distributing GPS-grade time precision among several units is optionally available.

Modem Option

Internal or external modems of different types, including cellular 3G/4G modems, are optionally available.

Environment / Reliability

Operational temperature:	-20 to +70 °C*
Storage temperature:	-40 to +85 °C*
Humidity:	0 to 100 % RH (non condensing)
MTBF:	> 500'000 hours

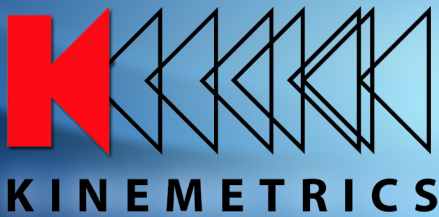
Housing

Type:	Cast aluminium housing
Size:	296 x 175 x 140 mm (W x D x H)
Size with base plate:	296 x 225 x 156 mm (W x D x H)
Weight:	4.7 kg (optional < 4 kg) 0.3 kg internal sensor, 2.6 kg battery, 1.3 kg base plate, ask for other options
Protection:	IP65 (NEMA 4), optionally IP67 (NEMA 6)
Mounting:	Base plate with single bolt, surface mount. When base plate levelled and fixed, GMSplus can be replaced without re-levelling.
Easy Transport:	Optional portability accessories are available to facilitate short term measurements.

GMSplus series are produced in different types to suit particular specifications or regulations. Specifications mentioned in this datasheet may be different among different types.

*: use of an internal battery may degrade this specification.

◦: contact GeoSIG for the optional Earthquake Early Warning functionality.



ETNA 2

Next Generation of Web Based, Cost Effective, Strong Motion Accelerographs

Kinemetrics' **ETNA** accelerograph established the world's standard for strong motion recording for almost two decades with more than 6000 installations worldwide. The **ETNA 2** represents the next generation of ETNA-class accelerographs offering NEW and cost effective, web based monitoring capabilities paired with another Kinemetrics' established world standard, the exemplary EpiSensor accelerometer.

The ETNA 2 is easy to use since it was designed around the Rockhound application software first implemented on the Basalt instruments and continued now on the new Obsidian instruments.

ETNA 2 offers the most essential accelerograph features supporting a wide range of earthquake monitoring applications in a small, lightweight, and simple to use package. If you are interested in Earthquake Early Warning, in structural monitoring, in aftershocks surveys or even in induced earthquake monitoring related to oil and gas, and geothermal fluid injection activities, the ETNA 2 is the right product for you.

And for those whose job it is to maintain large number of stations, we implemented Streamlined Station Maintenance (SSM) that allows you to use your browser to log maintenance activities such as software updates, site inspections, or battery replacements right on the unit. These logs can be automatically uploaded to your data center for archiving, reducing paper work in the field, and eliminating human error.

FEATURES

- 3 sensor channels with an internal EpiSensor triaxial deck
- 24-bit Delta Sigma converter, one per channel
- Matched to Kinemetrics outstanding EpiSensor accelerometer performance
- Built-in GPS
- Record and communicate multiple sample rates
- Earthquake Early Warning low latency 0.1s packets ready
- Multiple telemetry protocols: ORB natively or public domain Earthworm and SeedLink
- Streamlined Station Maintenance (SSM)
- Data offloaded automatically to removable thumb drive connected to the USB host port. Parallel recording (mirroring) data on an external USB thumb drive.
- Wireless communications via USB based Wi-Fi or cellular modem
- State-of-health monitoring, including input and system voltages, internal temperature, communication link diagnostics, available storage
- IP Security through SSH and SSL
- Reverse voltage protection and self resettable fuses
- System Status LEDs
- Surviving temporary immersion at 1 m depth (rated IP67)
- Designed for RoHS Compliance and easy re-cycling
- Designed for the lowest Total Cost of Ownership (TCO)

SPECIFICATIONS

Sensor

Type: Triaxial EpiSensor force balance accelerometers, orthogonally oriented, internal
 User selectable at $\pm 1g$, $\pm 2g$ or $\pm 4g$
 Full scale range:
 Bandwidth: DC to 200 Hz
 Dynamic range: 155 dB+
 Offset: Factory set, software re-zeroing

Digitizer

Channels: 3 sensor channels for the internal sensors
 Dynamic range: ~ 130 dB at 100sps (defined as RMS clip to RMS shorted-input noise) or ~ 139 dB at 100 sps (defined as full scale peak to peak to RMS shorted-input noise)
 Primary sample rates: 1, 10, 20, 50, 100, 200, 250, 500 sps
 Secondary sample rates: A second lower sample rate can be selected from the primary sample rates above
 Acquisition modes: Continuous (ring buffer) and triggered
 Calibration & test: Pulse and Sensor Response Test

Trigger

Trigger selection: Independently selected for each channel Internal
 Trigger: Threshold, selectable from 0.01% to 100% of full scale or STA/LTA algorithm
 Trigger voting: Internal and network trigger votes with arithmetic combination

Timing

Type: Oscillator digitally locked to GPS
 Timing: accuracy: < 1 microseconds of UTC with GPS locked

Storage

Data storage: Internal SDHC Card, 16 GB
 Program storage: Internal SDHC Card, 2 GB
 Data: Offloaded automatically to removable thumb drive connected to the USB host port. Parallel recording (mirroring) data on an external USB thumb drive.
 File formats: MiniSEED, EVT, and ASCII
 USB drive file system: FAT32

Interfaces and Digital Control

Interfaces: 1 x Ethernet 10/100BaseT
 (M12 connectors) 1 x USB 2.0 Device Port for data access
 1 x USB 2.0 Host Port for peripherals
 1 x RS-232 for factory use only
 Relays: 2 x SPDT relays, software configurable
 LEDs: System, power and event status, Ethernet Link

Communications

Ethernet interface: Real Time Telemetry (Multiple destinations TCP/IP Protocol), web server for parameter setup, event retrieval via FTP/SFTP; supports Point of Contact (POC) name service
 Modem: External, cellular or POTS, connected via the USB 2.0 Host interface; consult factory for details
 Protocols: Real-time data streaming via Antelope compatible ORB server or via public domain SEEDLink and Earthworm protocols
 State-Of-Health: Input voltage, Super Capacitor voltage, Time synchronization, internal temperature, available storage
 Low latency: 0.1s data packets supported
 Data visualization: Waveform Viewer for continuous waveform display and File Viewer for triggered event display; consult factory for other support software

Power Requirements

Consumption: $< 3W$ operational
 Voltage range: 9-28 VDC
 Protections: Reverse voltage, over/under voltage, self resettable fuses

Physical

Mounting: Central bolt, 3 adjustable feet with bubble level
 Dimensions: 6" x 6" x 3" (15cm x 15 cm x 7.5cm)
 Volume: 1.6 liters
 Weight: 3.3 lbs. (1.5 kg)

Environmental

Temperature range: -20° to $70^{\circ}C$ operational
 Humidity: 0-100% RH (non-condensing)
 Enclosure rating: IP67

* Specifications subject to change without notice



The Kinematics facility in Pasadena, CA has a certified ISO9001 Quality Management System.

Dynamic Data Acquisition – Data Sheet

Portable Dynamic Data Acquisition YE6230B



- 16 channels, selectable voltage/ICPE input
- 100kHz per channel parallel sampling
- Interface: USB2.0

Quasi Dynamic Strain Test System YE6265



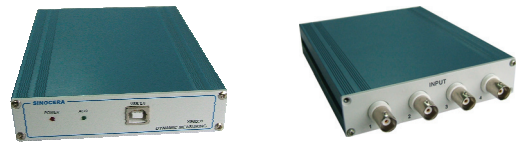
- 16 channel combination with 4 channels per card
- 200Hz per channel parallel sampling
- Interface: USB2.0
- High accuracy, high gain, low noise
- Selectable wireless transfer modes

High-speed Dynamic Data Acquisition YE6268



- 8-32 channels, random combinations
- Expandable to 128 channels via IEEE1394 interface
- 2 channel signal sources
- 200kHz per channel parallel sampling
- Various optional pre-amplifiers

Miniature Dynamic Data Acquisition YE6231



- 4 channels and 24-bit resolution
- synchronised acquisition
- 100kHz per channel parallel sampling
- Interface: USB2.0, bus supply
- Selectable signal input, e.g. voltage, ICPE
- Small in size and lightweight

Dynamic Data Acquisition YE6267



- 8-32 channels, random combinations
- 100kHz per channel parallel sampling
- Interface: USB2.0
- Various optional pre-amplifiers

Basic Test & Control Software YE7600

YE7600 is general purpose data acquisition, conditioning & analysis software. It supports all instruments manufactured by Sinocera and allows users to set up parameters for sampling, conditioning, data format and signal sources

