

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

**«Ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης  
σημαντικών έργων με σκοπό την πληρέστερη  
συντήρησή τους»**

Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως διαμορφώθηκε και εγκρίθηκε με την υπ' αριθ. απόφαση Α191/Σ11/08 της Διοικούσας Επιτροπής.

Μέλη Ομάδας Εργασίας:

Λεκίδης Βασίλης, ΠΜ  
Καρακώστας Χρήστος, ΠΜ  
Πανέτσος Παναγιώτης, ΠΜ  
Διαμαντουλάκη Ιωάννα, ΠΜ

**Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2009**



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
<b>2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	<b>9</b>
<b>3. ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ</b>	<b>15</b>
<b>4. ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>35</b>
<b>5. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ</b>	<b>42</b>
<b>6. ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ - ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ</b>	<b>47</b>

**7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ  
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ 55**

**8. ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ 86**

**9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ 97**

**10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 124**

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν εγχειρίδιο / οδηγός περιλαμβάνει προδιαγραφές και οδηγίες για την εντοπισμό και παρακολούθηση σημαντικών τεχνικών έργων, όπως και για την ανάλυση και αξιολόγηση των μετρήσεων. Η σύνταξη του κατέστη δυνατή με βάση τη μέχρι σήμερα αποκτηθείσα εμπειρία των συγγραφέων από την εντοπισμό διαφόρων τύπων κατασκευών στα πλαίσια των ερευνητικών και επαγγελματικών δραστηριοτήτων τους στο Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και στην Εγνατία Οδό Α.Ε.

Στόχος του εγχειριδίου είναι να αποτελέσει ένα βοήθημα για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και υλοποίηση εργασιών εντοπισμού γεφυρών με διάφορα μετρητικά συστήματα και την παρακολούθηση της απόκρισης τους στα λειτουργικά και περιβαλλοντικά φορτία για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και δομικής τους ασφάλειας

Η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς σημαντικών τεχνικών έργων με τη βοήθεια ειδικών δικτύων εντοπισμού συμβάλλει αποτελεσματικά στην κατανόηση της πραγματικής δυναμικής τους συμπεριφοράς και στον ρόλο των διαφόρων παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι πειραματικές διερευνήσεις του είδους αυτού σε υπάρχουσες πραγματικές κατασκευές που έχουν οργανωθεί κατάλληλα, είναι απαλλαγμένες από τις απλοποιητικές παραδοχές, περιορισμούς και λάθη που αναπόφευκτα υπεισέρχονται στα εργαστηριακά πειράματα σε μοντέλα υπό κλίμακα. Από την καταγραμμένη απόκριση της δυναμικής απόκρισης των έργων – π.χ. με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων - είναι δυνατός ο προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοτιμών, ιδιομορφών, συντελεστών απόσβεσης) με τη χρήση κατάλληλων μεθοδολογιών. Οι διεγέρσεις σε μία κατασκευή μπορεί να έχουν είτε ντετερμινιστικό χαρακτήρα (π.χ. τεχνητά επιβαλλόμενες διεγέρσεις, σεισμός) είτε τυχαίο (περιβαλλοντικές διεγέρσεις όπως άνεμος και κυκλοφορία οχημάτων). Ο πειραματικός προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μιας οργανωμένης κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την σε τακτά χρονικά διαστήματα αποτίμηση της δομικής της κατάστασης (στο πλαίσιο ενός προγράμματος συντήρησης), είτε μπορεί να εφαρμοσθεί και μετά από ένα έκτακτο γεγονός (π.χ. ισχυρός σεισμός) με στόχο τον εντοπισμό σημαντικών αλλαγών των δυναμικών χαρακτηριστικών που μπορεί να αποτελούν ένδειξη εμφάνισης βλάβης. Σε δεύτερο επίπεδο, τα πειραματικά προσδιορισμένα πραγματικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά της κατασκευής μπορούν να χρησιμεύσουν ως βάση για την κατάλληλη προσαρμογή αναλυτικών προσομοιωμάτων της (π.χ. μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων), με στόχο την πιο αξιόπιστη πρόβλεψη της πραγματικής της συμπεριφοράς σε μελλοντικές διεγέρσεις.

Οι προδιαγραφές αυτές προφανώς σχετίζονται με το μέγεθος που είναι επιθυμητό να καταγραφεί, τις θέσεις στις οποίες αναπτύσσονται τα μεγέθη αυτά και την διακύμανση της τιμής τους σε σχέση με τον χρόνο. Σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό της μεθοδολογίας εντοπισμού μιας κατασκευής είναι το αίτιο στο οποίο οφείλεται η ανάπτυξη του μετρούμενου μεγέθους. Τα περισσότερα από τα μετρούμενα μεγέθη σχετίζονται με την παραμόρφωση και την ανθεκτικότητα των υλικών από τα οποία συντίθεται ο υπό διερεύνηση φορέας. Οι φορτίσεις που θεωρούνται για τον έλεγχο των έργων είναι τα ίδια βάρη των φερόντων στοιχείων και επικαλύψεων, τα φορτία προέντασης και αυτοέντασης, τα φορτία λειτουργίας, οι τυχαϊκές δράσεις και οι δράσεις που προσβάλλουν τη χημική σύσταση των υλικών δόμησης και των υλικών λειτουργίας του εξεταζόμενου φορέα. Λόγω των δράσεων των παραπάνω φορτίσεων οι φορείς των κατασκευών παραμορφώνονται, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη έντασης. Έχει αναγνωρισθεί η επιρροή των παραπάνω δράσεων στη φέρουσα ικανότητα των έργων και για το λόγο αυτό διατίθενται μια σειρά από συσκευές, αισθητήρες και λογισμικά μέσω των οποίων παρακολουθείται η απόκριση τέτοιων φορέων στις παραπάνω φορτίσεις. Εκτός από την ανάγκη παρακολούθησης των μεγεθών που σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητα των φορέων, τα έργα παρακολουθούνται επίσης προκειμένου να ελεγχθούν χαρακτηριστικές αποκρίσεις που σχετίζονται με παραμέτρους λειτουργίας οι οποίες προκαθορίστηκαν κατά τον σχεδιασμό του φορέα. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι τα βέλη κάμψης συγκεκριμένων δομικών στοιχείων, οι παραμορφώσεις και άρα οι τάσεις των διατομών

κατά τα διάφορα στάδια κατασκευής και λειτουργίας, τα δυναμικά χαρακτηριστικά ολόκληρου του φορέα και επομένως η απόκριση στα σεισμικά φορτία σχεδιασμού. Επίσης, άλλες σημαντικές παράμετροι οι οποίες διερευνώνται είναι αυτές που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα στον χρόνο των υλικών δόμησης καθώς παράγοντες όπως η μεγάλη μεταβολή της θερμοκρασίας, η ύπαρξη υψηλού ποσοστού υγρασίας και τυχόν χημικές προσμίξεις είναι πιθανό να επηρεάζουν την χημική σύσταση των υλικών αυτών. Για την παρακολούθηση μιας από τις παραπάνω παραμέτρους απαιτείται κάποιο σύστημα αισθητήρων, μία συσκευή παροχής ρεύματος και συλλογής των μεταβολών του σήματος των αισθητήρων και κάποια συσκευή αποθήκευσης των μετρήσεων. Για την επεξεργασία των μετρήσεων απαιτείται κατάλληλο λογισμικό και ηλεκτρονικός υπολογιστής. Σε κάθε βήμα είναι απαραίτητη προϋπόθεση να ισχύουν και να εφαρμόζονται οι βασικές αρχές της μηχανικής προκειμένου να προκύπτουν αξιολογήσιμα και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Σημαντική παράμετρος, για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων, αποτελεί η σχετική εμπειρία και κρίση του ανθρώπινου παράγοντα σε όλα τα στάδια εκπόνησης των μετρήσεων και αξιολόγησής τους. Ο καθορισμός των παραμέτρων που θα διερευνηθούν, η μεθοδολογία που θα εφαρμοσθεί, η επιλογή των οργάνων και οι δοκιμαστικοί υπολογισμοί ή αναλύσεις που θα γίνουν αποτελούν τα βασικά στοιχεία του σχεδιασμού ενός προγράμματος μετρήσεων.

Το παρόν εγχειρίδιο έχει στόχο να βοηθήσει στο ορθό σχεδιασμό και εκτέλεση ενός προγράμματος μετρήσεων της απόκρισης ενοργανωμένων τεχνικών έργων παρέχοντας πληροφορίες και οδηγίες για τις παρακάτω δράσεις που συνιστούν ένα τέτοιο πρόγραμμα :

- *Οδηγίες παρακολούθησης απόκρισης των έργων*
- *Οδηγίες εγκατάστασης συστήματος ενοργάνωσης*
- *Οδηγίες επεξεργασίας και αξιολόγησης μετρήσεων*
- *Διάγνωση βλαβών*
- *Τεχνικές προδιαγραφές αισθητήρων και συστημάτων μέτρησης*
- *Παραδείγματα ενοργάνωσης κατασκευών.*

Ένας από τους βασικούς στόχους της ενοργάνωσης μιας κατασκευής, είναι η διαχρονική αποτίμηση της δομικής της κατάστασης μέσα από μετρήσεις της στατικής και δυναμικής απόκρισης της σε διάφορα αίτια. Οι δραστηριότητες αυτές εντάσσονται στο πλαίσιο της αποκαλούμενης διαδικασίας παρακολούθησης δομικής κατάστασης (ΠΔΚ) (διεθνώς γνωστή ως Structural Health Monitoring), η οποία αποτελεί πλέον αναπόσπαστο τμήμα των ενεργειών συντήρησης και ελέγχου της δομικής και λειτουργικής ασφάλειας σημαντικών έργων σε όλες τις τεχνολογικά προηγμένες χώρες. Με την αύξηση του αριθμού τέτοιων σημαντικών έργων – κυρίως γεφυρών - και στην Ελλάδα τα τελευταία περίπου δεκαπέντε χρόνια, κρίθηκε σκόπιμο να δοθούν στο παρόν εγχειρίδιο μερικές βασικές περιγραφές και αρχές των συστημάτων ΠΔΚ σημαντικών έργων Πολιτικού Μηχανικού.

## **1.1 ΕΝΟΡΓΑΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

### **1.1.1 Βασικές αρχές**

Η παρακολούθηση δομικής κατάστασης (ΠΔΚ) είναι ένας σχετικά νέος όρος για τις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού, και ο όρος αυτός θα πρέπει να ορισθεί σαφέστερα. Για τους σκοπούς αυτού του εγχειριδίου, η ΠΔΚ θα ορισθεί τόσο βάσει του αντικειμένου της όσο και βάσει του καταγραφικού συστήματος και των αισθητήρων που απαιτούνται για την επίτευξη αυτού του αντικειμένου. Το εγχειρίδιο αναφέρεται σε όλες τις κατασκευές αντικειμένου Πολιτικού Μηχανικού, αλλά υπάρχουν και πρόσθετες πληροφορίες που αφορούν ειδικότερα τεχνικά έργα, όπως – κυρίως - οι γέφυρες, λόγω της ιδιαίτερης αύξησης του αριθμού και της σπουδαιότητας τους τα τελευταία χρόνια στον Ελληνικό χώρο.

Το αντικείμενο της ΠΔΚ είναι η καταγράψει επί τόπου την συμπεριφορά μιας κατασκευής επαρκώς και με ακρίβεια, να εκτιμήσει την επιτελεστικότητα της υπό διάφορα φορτία λειτουργίας, να

ανιχνεύσει βλάβες ή φθορές και να προσδιορίσει την κατάσταση ή τις παθήσεις της κατασκευής. Το σύστημα ΠΔΚ θα πρέπει να παρέχει, αναλόγως των απαιτήσεων, αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια και την ακεραιότητα της κατασκευής. Κατόπιν οι πληροφορίες θα πρέπει ενσωματώνεται στις στρατηγικές συντήρησης και διαχείρισης των έργων και στην έκδοση βελτιωμένων οδηγιών σχεδιασμού. Η αμεσότητα και η ευαισθησία της ΠΔΚ θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την σε σύντομο χρόνο πιστοποίηση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού, την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, την αποφυγή καταστρεπτικών αστοχιών, την αποτελεσματική κατανομή των πόρων και μέσων, την κατά το δυνατό μικρότερη, χρονικά, διακοπή λειτουργίας και το μειωμένο κόστος συντήρησης. Το φυσικό διαγνωστικό εργαλείο της ΠΔΚ συντίθεται από ένα ολοκληρωμένο σύνολο διαφόρων διατάξεων μετρήσεων (καταγραφικών συσκευών και βοηθητικών συστημάτων), όπως:

- σύστημα αισθητήρων
- σύστημα καταγραφής δεδομένων
- σύστημα επεξεργασίας δεδομένων
- σύστημα επικοινωνίας
- σύστημα ανίχνευσης και προσομοίωσης βλαβών

Αν και η ΠΔΚ είναι ένας σχετικά νέος όρος στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού, η χρήση οργάνων για την αποτίμηση της δομικής κατάστασης (π.χ. ακεραιότητα των κατασκευών) δεν είναι πρόσφατη. Οι δοκιμές γεφυρών επί τόπου μέσω της χρήσης διαφόρων μετρητικών οργάνων είναι μια δραστηριότητα που εφαρμόζεται εδώ και πολλές δεκαετίες. Παρομοίως, τα βασικά όργανα που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα ΠΔΚ χρησιμοποιούνταν εδώ και πολλά χρόνια στα εργαστήρια μηχανικής των κατασκευών σε όλο τον κόσμο. Επιπλέον, οι κανονισμοί γεφυρών και οι αρμόδιοι φορείς διαχείρισης γεφυρών έχουν θεσπίσει οδηγίες αποτίμησης και επιθεώρησης οι οποίες εφαρμόζονται εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Πράγματι, οι στόχοι της ΠΔΚ είναι συμβατοί με τους στόχους πολλών από αυτές τις για πολλά χρόνια εφαρμοζόμενες τεχνικές. Με την ανάπτυξη της ΠΔΚ, βελτιώνονται οι συνθήκες τεχνικές της πράξης, όχι μόνο μέσω της χρήσης τεχνολογίας αιχμής για τις διατάξεις αισθητήρων – καταγραφικών μονάδων, ενοργάνωσης, επικοινωνίας και προσομοίωσης αλλά επίσης και μέσω της αποτελεσματικής ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών σε ένα έξυπνο σύστημα.

Το βασικό κριτήριο για την εφαρμογή της ΠΔΚ προέρχεται από την αναγνώριση των περιορισμών των συμβατικών οπτικών επιθεωρήσεων και αποτιμήσεων με την χρήση συντηρητικών κανονισμών της πράξης. Τα συμβατικά μέσα δεν επαρκούν για τον καθορισμό της δομικής επάρκειας πολλών παλαιότερων σημαντικών τεχνικών έργων, όπως για παράδειγμα αυτών που κατασκευάστηκαν σε σεισμογενείς περιοχές. Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος ΠΔΚ αιτιολογείται επίσης από το γεγονός ότι στα έργα του Ελληνικού χώρου περιλαμβάνεται ένας ικανός αριθμός σημαντικών έργων, όπως π.χ. γεφυρών μεγάλης ηλικίας, των οποίων η ικανότητα να αποκρίνονται ικανοποιητικά στα σύγχρονα φορτία κυκλοφορίας πρέπει να επαληθευθεί.

Όπως οι καταναλωτές απαιτούν την εφαρμογή υψηλής τεχνολογίας στα προϊόντα και τις υπηρεσίες, έτσι και οι αρμόδιοι φορείς και οι χρήστες σημαντικών τεχνικών έργων απαιτούν προηγμένη τεχνολογία, όπως η ΠΔΚ, στην διαχείριση των έργων υποδομής αντικειμένου πολιτικού μηχανικού. Για αυτό το λόγο, η πρόθεση του παρόντος εγχειριδίου είναι να παρέχει ένα πλαίσιο οδηγιών για την συνένωση διαφόρων βασικών οργάνων και τεχνολογιών σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιείται προς όφελος της συντήρησης σημαντικών κατασκευών.

### **1.1.2 Υποσυστήματα και ταξινόμηση των μεθόδων ΠΔΚ**

Για ευκολία στην περιγραφή, ένα σύστημα ΠΔΚ υποδιαιρείται στα ακόλουθα τέσσερα υποσυστήματα, τα οποία αναλύονται περαιτέρω στον Πίνακα 1.1.

- στατικές δοκιμές της κατασκευής
- δυναμικές δοκιμές της κατασκευής

- περιοδική παρακολούθηση
- συνεχής παρακολούθηση

Πίνακας 1.1 Υποσυστήματα ενός συστήματος ΠΔΚ κατασκευών.

Στατικές επιτόπου δοκιμές	Δυναμικές επιτόπου δοκιμές	Περιοδική παρακολούθηση	Συνεχής παρακολούθηση
* Δοκιμές απόκρισης	* Δοκιμές ιστορικού των τάσεων	* Δοκιμές πεδίου	* Ενεργός παρακολούθηση
* Διαγνωστικές δοκιμές	* Δοκιμές μεταβολής της δυναμικής φόρτισης	* Δοκιμές για διακρίβωση αλλαγών στην κατασκευή	* Παθητική παρακολούθηση
* Δοκιμές επαλήθευσης	* Δοκιμές σε περιβαλλοντικές διεγέρσεις		
	* Δοκιμές ελεύθερης ταλάντωσης (pullout)		

Η κύρια διαφορά μεταξύ των θεωρούμενων συστημάτων ΠΔΚ με άλλα συστήματα δομικής παρακολούθησης, έγκειται στο γεγονός ότι με τα συστήματα ΠΔΚ εκτός από την ανίχνευση βλαβών σε μια κατασκευή είναι δυνατός και ο καθορισμός της αντοχής της κατασκευής και η διακρίβωση πιθανής εμφάνισης βλάβης. Η ικανότητα ανίχνευσης βλαβών μέσω των τεσσάρων παραπάνω υποσυστημάτων ΠΔΚ κατατάσσεται όπως παρακάτω, σε αύξουσα σειρά αναλόγως της πολυπλοκότητας του συστήματος. Στο Επίπεδο 1, το σύστημα ΠΔΚ ανιχνεύει μόνο την ύπαρξη βλαβών. Στο Επίπεδο 2, το σύστημα παρακολούθησης έχει την ικανότητα να καθορίζει και την θέση της βλάβης. Στο Επίπεδο 3, γίνεται ποσοτική εκτίμηση του βαθμού της βλάβης. Στο Επίπεδο 4, το σύστημα ΠΔΚ δίνει και εκτίμηση του επιπέδου ασφαλείας της κατασκευής.

Σημειώνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται και εναλλακτικές προσεγγίσεις ανάλυσης της δομής ενός συστήματος ΠΔΚ, χωρίς όμως να υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση του συνολικού αντικειμένου.

#### **Πλεονεκτήματα της μεθόδου Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης κατασκευών**

Προκειμένου να παραμείνουμε ανταγωνιστικοί στο υπάρχον παγκόσμιο οικονομικό περιβάλλον, είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθούν οι διακοπές λειτουργίας κατασκευών αντικείμενου Πολιτικού Μηχανικού, λόγω συντηρήσεων και επισκευών τόσο ρουτίνας όσο και μετά από ακραία συμβάντα όπως είναι οι σεισμοί και οι πλημμύρες.

Μέσω της παροχής άμεσης πληροφορίας σχετικά με θέματα όπως η λειτουργική κατάσταση, η ασφάλεια και η ανθεκτικότητα, ένα σύστημα ΠΔΚ βοηθά τους μηχανικούς να αντιμετωπίζουν επιτυχώς τέτοιου τύπου ζητήματα. Μέσω της παρακολούθησης και της αποτίμησης της ακεραιότητας μεγάλων κατασκευών, κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων που διατίθενται για επισκευή, αποκατάσταση ή αντικατάσταση των κατασκευών. Με την ΠΔΚ είναι δυνατή η εκτίμηση του κόστους του κύκλου ζωής των στοιχείων της κατασκευής.

Τα δυνατά άμεσα οφέλη από την χρήση ενός συστήματος ΠΔΚ είναι:

- παρακολούθηση και αναφορά σε πραγματικό χρόνο
- μείωση χρόνου διακοπής λειτουργίας
- βελτίωση της ασφάλειας και αξιοπιστίας και μείωση του κόστους συντήρησης

Όπως αναφέρθηκε από τον Chang (1999), με την μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας της κατασκευής και την βελτίωση της αξιοπιστίας επαυξάνεται η παραγωγικότητα της κατασκευής. Τελικώς, οι καταγραφές και τα αποτελέσματα από την επεξεργασία τους παρέχουν πληροφορίες



σχετικά με την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής, και για αυτό τον λόγο η ΠΔΚ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση του σχεδιασμού μελλοντικών κατασκευών.

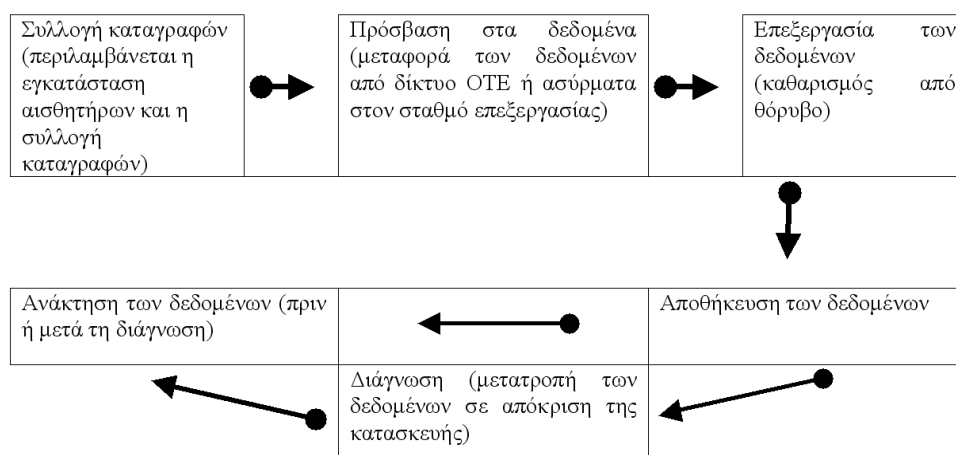
## 1.2 Σύνθεση του Συστήματος Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης

Ένα ιδεατό σύστημα ΠΔΚ θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει πληροφορίες για τις απαιτούμενες ενέργειες σε σχέση με τις ζημιές που συνέβησαν στην κατασκευή. Πληροφορίες σχετικά με την δομική κατάσταση της κατασκευής είναι δυνατό να λαμβάνονται απευθείας μέσω ενός τοπικού δικτύου ή να διαβιβάζονται αυτόματα σε απομακρυσμένη θέση. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος περιλαμβάνει την χρήση ειδικών γνώσεων σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους σχετικών με τις κατασκευές, τα υλικά, την ανίχνευση βλαβών, τους αισθητήρες, τη συλλογή δεδομένων και την κατάλληλη επεξεργασία τους, τους υπολογιστές και τις επικοινωνίες.

Τα συστήματα ΠΔΚ αποτελούνται από ένα πλήθος επιμέρους συνόλων, όπως:

- της συλλογής των δεδομένων
- της επικοινωνίας των δεδομένων
- κατάλληλης επεξεργασίας των δεδομένων
- αποθήκευσης των επεξεργασμένων δεδομένων
- διάγνωσης
- ανάκτησης των δεδομένων

Αυτά τα επιμέρους σύνολα αναλύονται στις παρακάτω ενότητες. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1, και όπως θα αναλυθεί παρακάτω, η ροή της διαδικασίας μεταξύ των πληροφοριών των επιμέρους εννοιών μπορεί να γίνει με περισσότερες από μία διαδρομές.



Σχήμα 1.1. Υποσύνολα του συστήματος ΠΔΚ

## 1.3 Συλλογή των δεδομένων

Η πρώτη επιμέρους ενότητα σε ένα σύστημα ΠΔΚ περιλαμβάνει την συλλογή των δεδομένων. Το πρώτο μέρος σε αυτή την επιμέρους ενότητα αφορά την προετοιμασία σχεδίου για την εγκατάσταση διαφόρων αισθητήρων οι οποίοι να μπορούν να μετρούν απόλυτες τιμές ή μεταβολές ενός από τα παρακάτω:

- ανηγμένες επιμηκύνσεις
- παραμορφώσεις
- επιταχύνσεις

- θερμοκρασίες
- υγρασία
- ακουστικές εκπομπές (περιβαλλοντικές διεγέρσεις)
- χρόνο
- ηλεκτρικό δυναμικό
- φορτίσεις
- άλλα χαρακτηριστικά της κατασκευής

Οι αισθητήρες θα επιλέγονται έτσι ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη πληροφορία σχετικά με την δομική κατάσταση της κατασκευής. Στο εμπόριο διατίθεται σημαντικός αριθμός αισθητήρων διαφόρων τύπων. Συγκεκριμένα διατίθενται μηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης και άλλων τύπων, μετρητές μετατοπίσεων και αποκλίσεων, επιταχυνσιόμετρα, ανεμόμετρα, μετρητές παραμορφώσεων με οπτικές ίνες κ.ά. Πολλοί από αυτούς τους αισθητήρες όμως δεν είναι κατάλληλοι για όλους τους πιθανούς στόχους ενός συστήματος ΠΔΚ. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι μερικά από τα μηκυνσιόμετρα που διατίθενται στο εμπόριο δεν είναι κατάλληλα για παρακολούθηση κατασκευών για μακρό χρονικό διάστημα επειδή μετά από κάποιο χρονικό σημείο εμφανίζουν παραμόρφωση διαφορετική από αυτή του μετρούμενου στοιχείου. Ένα μηκυνσιόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης, για παράδειγμα, το οποίο συγκολλείται σε επιφάνεια η οποία παραμορφώνεται μπορεί να είναι κατάλληλο για την μέτρηση επιμηκύνσεων λόγω φορτίων για ένα μικρό χρονικό διάστημα αλλά εντελώς ακατάλληλο για μετρήσεις για μακρό χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό απαιτείται συνεχής έρευνα προκειμένου να προσδιορίζονται οι κατάλληλοι από άποψη αξιοπιστίας και οικονομίας αισθητήρες για την εκάστοτε παρακολούθηση της απόκρισης μιας κατασκευής.

Εκτός από τους αισθητήρες που διατίθενται εδώ και πολλά χρόνια στο εμπόριο, υπάρχουν αρκετοί νέοι αισθητήρες σύγχρονης τεχνολογίας, οι οποίοι βρίσκονται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης. Τέτοιοι είναι οι αισθητήρες με οπτικές ίνες, οι διηλεκτρικοί αισθητήρες και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες. Πολλοί από αυτούς τους νέους αισθητήρες προορίζονται για εφαρμογή στην αεροδιαστημική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Την τελευταία περίοδο γίνονται προσπάθειες για την επέκταση της εφαρμογής των αισθητήρων αυτών σε έργα πολιτικού μηχανικού. Ως παράδειγμα αναφέρεται η ανάπτυξη αισθητήρων από οπτικές ίνες μήκους από 1 έως 20m για την χρήση τους ως μηκυνσιόμετρα για τον έλεγχο της επιτελεστικότητας – αποδοτικότητας σύνθετων υφασμάτων στην επισκευή φθαρμένων υποστρωμάτων. Τα μηκυνσιόμετρα από οπτικές ίνες μεγάλου μήκους είναι ιδανικά για την ανίχνευση των αστοχιών μεταλλικών στοιχείων μεγάλου μήκους που υπόκεινται σε εφελκυσμό και επίσης για την παρακολούθηση της ανάπτυξης ρηγμάτων σε καταστρώματα γεφυρών. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν σήμερα λογικό κόστος για μια ευρεία εφαρμογή σε κατασκευές αντικειμένου πολιτικού μηχανικού. Παρομοίως, αισθητήρες κατανεμημένοι κατά μήκος χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση σημαντικών και μεγάλων κατασκευών. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός από διαφορετικούς αισθητήρες σε μία μετρητική διάταξη.

Η συλλογή δεδομένων από διάφορους αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί σε μια κατασκευή έχει συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα, αν και είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο του συστήματος ΠΔΚ. Ευτυχώς υπάρχουν εξειδικευμένοι επιστήμονες που ασχολούνται με αυτόν τον τομέα. Σύμφωνα με γενικό εμπειρικό κανόνα σχετικά με τον όγκο των δεδομένων η ποσότητα των δεδομένων δεν πρέπει να είναι μικρή έτσι ώστε να αμφισβητείται η χρησιμότητά τους, ούτε μεγάλη έτσι ώστε να είναι δύσκολη η επεξεργασία τους και η ερμηνεία τους.

Πολλά από τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια παρακολούθησης μιας κατασκευής είναι δυνατόν να περιορισθούν σημαντικά μέσω της καταγραφής μόνο σημαντικών αλλαγών στο μετρούμενο μέγεθος. Για παράδειγμα, η παραμόρφωση σε ένα δομικό στοιχείο μιας γέφυρας διατηρείται σταθερή όταν δεν διέρχονται οχήματα ή όταν διέρχονται από την γέφυρα μικρά οχήματα. Για την αποφυγή δημιουργίας μεγάλου αριθμού φακέλων με πολλά δεδομένα είναι δυνατή η αποθήκευση των φακέλων των συμβάντων με τιμές μετρούμενου μεγέθους πάνω από μια προκαθορισμένη τιμή (specified threshold). Όλοι οι άλλοι φάκελοι με καταγραφές μικρότερων τιμών από το προκαθορισμένο μέγεθος δεν αποθηκεύονται. Σε άλλη περίπτωση είναι δυνατό να

αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με τις μέγιστες τιμές (peak values) των μετρούμενων μεγεθών για κάθε συμβάν, π.χ. διέλευση βαρέως οχήματος σε μία γέφυρα. Αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη για εκτιμήσεις της κόπωσης του φορέα αλλά δεν είναι κατάλληλη για εκτίμηση και ανάλυση ιδιομορφών. Επίσης είναι δυνατή η χρήση συνδυαζόμενων αλγορίθμων καταγραφής δεδομένων, όπως η καταγραφή μέγιστων τιμών ως την κύρια μορφή λειτουργίας του συστήματος καταγραφής και η περιοδική συνεχής καταγραφή να ζητείται όταν ξεπεραστεί κάποια μέγιστη τιμή. Η επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου καταγραφής είναι πολύ σημαντικό στοιχείο της μεθόδου ΠΔΚ κατασκευών καθώς με αυτό τον τρόπο επηρεάζεται σαφώς ο όγκος των δεδομένων αλλά και η διαγνωστική πληροφορία που μπορεί να αποκτηθεί από αυτές.

Το σύνηθες μέσο για την μεταφορά δεδομένων από τον αισθητήρα στην καταγραφική μονάδα είναι το καλώδιο, το μήκος του οποίου ενδέχεται να επηρεάζει δυσμενώς το επίπεδο του θορύβου (level of noise) που θα συλλεχθεί μέσα στις ακριβείς καταγραφές. Θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα για να εξασφαλιστεί ότι το μήκος του καλωδίου βρίσκεται εντός των ορίων συμβατότητας με το σύστημα καταγραφής δεδομένων. Η γεινίαση με συσκευές εκπομπής, όπως αυτές που βρίσκονται σε ραδιοφωνικό σταθμό, έχει βρεθεί ότι προκαλεί αλλοίωση στα καταγεγραμμένα δεδομένα. Πηγές ξένων ή παρασιτικών πληροφοριών θα πρέπει να ανιχνεύονται στα πρώτα στάδια της παρακολούθησης και θα πρέπει να αποφεύγονται όποτε είναι δυνατό.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός αισθητήρων, ο χειρισμός των καλωδίων είναι δύσκολος και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σφαλμάτων στην συσχέτιση μεταξύ της απόκρισης των αισθητήρων και στα συλλεγόμενα δεδομένα. Αυτές οι δυσκολίες ξεπερνιούνται με την χρήση αισθητήρων και καταγραφικής μονάδας οι οποίες επικοινωνούν ασύρματα.

## 2.2 Επικοινωνία – μεταφορά των δεδομένων

Εδώ με τον όρο «επικοινωνία – μεταφορά των δεδομένων» εννοείται η μεταφορά των δεδομένων από τη μονάδα καταγραφής δεδομένων στον τόπο που θα γίνει η επεξεργασία τους. Σε δοκιμές πεδίου, στατικού τύπου, αυτή η επικοινωνία γίνεται με τον απλούστερο τρόπο, όπως την εκτύπωση των καταγραφών και την αποστολή τους στον μηχανικό δοκιμών. Στις πιο σύγχρονες διατάξεις η μεταφορά των καταγεγραμμένων μεγεθών γίνεται είτε μέσω τηλεφωνικών γραμμών είτε ασύρματα (π.χ. χρήση κινητής τηλεφωνίας). Η επιλογή ενός κατάλληλου τρόπου μεταφοράς των δεδομένων είναι σημαντικό στοιχείο για ένα σύστημα ΠΔΚ.

### 1.4 Επεξεργασία των δεδομένων

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται από τους αισθητήρες περιέχουν και εξωγενείς πληροφορίες οι οποίες δεν είναι μόνο άχρηστες αλλά και μη οικονομικό να αποθηκευθούν. Τα αίτια δημιουργίας αυτών των εξωγενών πληροφοριών είναι συσκευές εκπομπής, ηλεκτρικά καλώδια υψηλής τάσης ή τηλεφωνικές γραμμές. Είναι σημαντικό, για την σωστή ερμηνεία των καταγραφών που συλλέχθηκαν, αυτές να καθαρισθούν και να επεξεργαστούν με κατάλληλο τρόπο. Με την εφαρμογή αποτελεσματικής και ορθής επεξεργασίας των καταγραφών επιτυγχάνεται εύκολη, γρήγορη και ακριβής ερμηνεία τους.

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

Σε μία πιο προχωρημένη επεξεργασία τα δεδομένα διορθώνονται για θερμικά φαινόμενα. Μερικοί αισθητήρες ενδέχεται να είναι θερμικά ουδέτεροι ενώ η λειτουργία άλλων αισθητήρων να βασίζεται σε μηκυνσιόμετρο αναφοράς προκειμένου να απομονωθούν οι επιρροές της θερμοκρασίας στις

μετρήσεις από την απόκριση των αισθητήρων σε πραγματικές φορτίσεις. Τα δεδομένα πρέπει να επεξεργάζονται καταλλήλως είτε επηρεάζονται από θερμικά φαινόμενα είτε όχι. Η δεύτερη περίπτωση είναι συνηθέστερη.

### **1.5 Αποθήκευση των επεξεργασμένων δεδομένων**

Ο όρος «αποθήκευση δεδομένων» χρησιμοποιείται εδώ για να περιγράψει την αποθήκευση δεδομένων τα οποία φιλτραρίστηκαν κατάλληλα και είναι διαθέσιμα για διάγνωση. Το μέσο που θα χρησιμοποιηθεί για αυτή την αποθήκευση θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει την ανάκτηση δεδομένων ακόμη και μετά από πολλά χρόνια. Επιπροσθέτως, ο φάκελος των δεδομένων θα πρέπει να περιέχει αρκετές πληροφορίες σχετικά με τις λεπτομέρειες τυποποίησής τους, για την κατανόηση της σημασίας των χιλιάδων αριθμών.

Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, ενδεχομένως είναι καταλληλότερο να αποθηκεύονται τα δεδομένα μετά την μετατροπή τους σε ποσότητες που σχετίζονται άμεσα με την απόκριση της γέφυρας. Για παράδειγμα, αρχεία που περιέχουν διαγράμματα της φασματικής πυκνότητας ως προς τις συχνότητες διέγερσης είναι προτιμότερα από τον όγκο των δεδομένων που προέκυψαν από μία καταγραφή. Η απομάκρυνση του μεγάλου πλήθους δεδομένων σε σχέση με την παροχή επεξεργασμένης πληροφορίας έχει θετικά και αρνητικά στοιχεία. Λόγω της ταχείας εξέλιξης που συμβαίνει στις μέρες μας είναι ουσιαστικά αδύνατο να προβλεφθεί η σύνθεση των συστημάτων διαχείρισης που θα χρησιμοποιηθούν από του κυρίου μεγάλων κατασκευών. Είναι πολύ πιθανό η έλλειψη πρόβλεψης για συνέχιση των μετρήσεων να καταστήσει τα δεδομένα άχρηστα για τις μελλοντικές γενιές. Από την άλλη, με την απώλεια των δεδομένων χάνεται και η ευκαιρία για μελλοντική επανερμηνεία τους.

### **1.6 Διάγνωση**

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

### **1.7 Ανάκτηση δεδομένων**

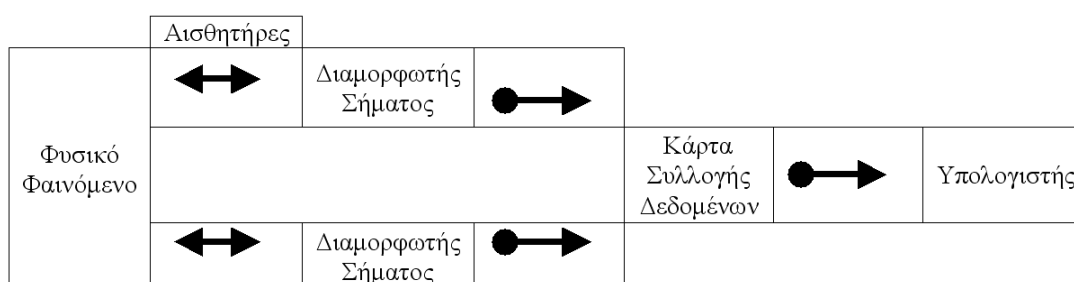
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες πρέπει να επεξεργάζονται με κατάλληλο τρόπο και να παρέχονται οι μετατροπές τους σε ποσότητες που σχετίζονται άμεσα με την απόκριση της κατασκευής. Πρέπει να ληφθεί απόφαση σχετικά με το είδος των δεδομένων που κρίνεται ότι θα είναι κατάλληλα για ανάκτηση. Στην περίπτωση στατικών δοκιμών στην κατασκευή τα δεδομένα που καταγράφονται δεν έχουν μεγάλο όγκο και μπορούν να αποθηκεύονται μαζί με την ερμηνευμένη απόκριση της κατασκευής. Υπάρχει συνήθως μεγάλος όγκος δεδομένων από καταγραφές της δυναμικής απόκρισης, για να αποθηκευθεί στην ολότητα του. Πολύ συχνά θεωρείται αρκετό να αποθηκεύονται τα επεξεργασμένα δεδομένα όπως διαγράμματα κ. ά. Η απόφαση σχετικά με τον τρόπο αποθήκευσης των δεδομένων τα οποία θα μπορεί αργότερα να ανακτηθούν εξαρτάται όχι μόνο από την σπουδαιότητα των δεδομένων αλλά και από το βαθμό εμπιστοσύνης για την ερμηνεία τους.

## 2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

### 2.1 Συστήματα συλλογής δεδομένων

Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων συλλέγει δεδομένα από διάφορους αισθητήρες. Μία γενική κατανόηση αυτού του συστήματος είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό ενός αποδοτικού και χρήσιμου προγράμματος παρακολούθησης μιας κατασκευής. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται δύο διαδεδομένα συστήματα καταγραφής δεδομένων. Αυτό στο οποίο οι ενδείξεις καταγράφονται με το χέρι και αυτό στο οποίο οι καταγραφές συλλέγονται σε υπολογιστή.

Κατά την καταγραφή με το χέρι, ο χειριστής διαβάζει τις ενδείξεις και σημειώνει τις τιμές τους. Επειδή αυτό το σύστημα δεν απαιτεί ογκώδη εξοπλισμό, αποτελεί μια οικονομική και εύκολη μέθοδο για την συλλογή δεδομένων από έναν μικρό αριθμό αισθητήρων και για μικρό χρονικό διάστημα. Όμως, για μεγάλες εφαρμογές απαιτείται η χρήση συστήματος καταγραφής μέσω υπολογιστή. Τα μέλη ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 και είναι οι διαμορφωτές σήματος, η κάρτα συλλογής δεδομένων και ο υπολογιστής.



Σχήμα 2.1. Επιμέρους στοιχεία ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων.

Οι αισθητήρες είναι τα στοιχεία τα οποία βρίσκονται πάνω στην κατασκευή και καταγράφουν τις μεταβολές του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους. Οι δύο πιο κοινοί τύποι αισθητήρων είναι οι ηλεκτρονικοί και οι οπτικοί. Ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας μεταβιβάζει ηλεκτρικά σήματα σε όρους ηλεκτρικού φορτίου ή μεταβολής τάσης. Ο οπτικός αισθητήρας μεταβιβάζει σήματα φωτός.

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

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

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

## 2.2 Μονάδες ένδειξης μετρήσεων αισθητήρων και διαμορφωτές σήματος

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

Οι ηλεκτρικοί αισθητήρες συνήθως χρειάζονται την εισαγωγή τάσης και ρεύματος και οι οπτικοί αισθητήρες χρειάζονται την εισαγωγή σημάτων φωτός. Αυτά τα σήματα αναπαράγονται επίσης στις συσκευές ένδειξεων και στους διαμορφωτές σήματος. Γενικώς αυτές οι συσκευές επιτελούν τις παρακάτω λειτουργίες:

Παραγωγή σήματος εισόδου για τον αισθητήρα: Οι αισθητήρες, όπως τα μηκυνσιόμετρα και οι αισθητήρες θερμικής αντίστασης απαιτούν την παροχή συνεχούς ρεύματος ή την παροχή ρεύματος διέγερσης. Οι μετρητές μετατοπίσεων (LVDT) απαιτούν την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος για την λειτουργία τους και οι οπτικοί αισθητήρες απαιτούν υψηλής έντασης πολωμένου φωτός. Αυτά τα απαιτούμενα σήματα παράγονται στις συσκευές επίδειξης ένδειξεων και στους διαμορφωτές σήματος.

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

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

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

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

## 2.3 Κάρτες συλλογής δεδομένων

Τα σήματα που παράγονται από τους διαμορφωτές σήματος είναι αναλογικά και για αυτό τον λόγο δεν μπορούν να εισαχθούν απευθείας σε έναν υπολογιστή. Η κάρτα συλλογής δεδομένων μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό, το οποίο είναι αναγνωρίσιμο από τον υπολογιστή. Η κάρτα

συλλογής δεδομένων καλείται συνδεδεμένη κάρτα στην περίπτωση κατά την οποία είναι εγκατεστημένη εντός του υπολογιστή και χρησιμοποιεί το τροφοδοτικό του υπολογιστή. Αλλιώς καλείται περιφερειακή μονάδα και έχει δική της τροφοδοσία ρεύματος. Το ψηφιακό σήμα από την περιφερειακή μονάδα μεταφέρεται στον υπολογιστή μέσω ειδικού καλωδίου. Μερικοί κατασκευαστές παράγουν μονάδες οι οποίες είναι ταυτοχρόνως κάρτες συλλογής δεδομένων και διαμορφωτές σήματος. Αυτές οι μονάδες ενδέχεται να είναι είτε περιφερειακές είτε εγκατεστημένες εντός του υπολογιστή.

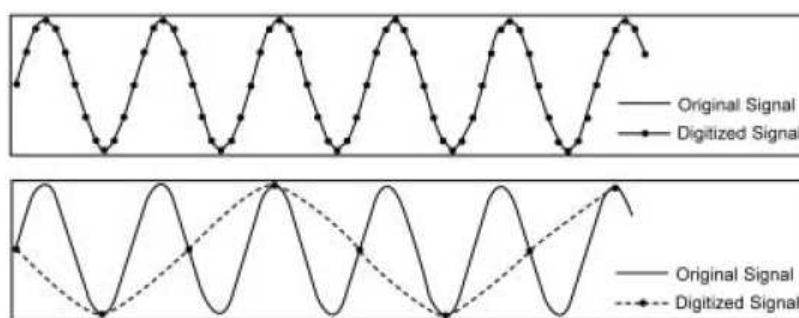
Οι βασικές προδιαγραφές που διατίθενται για τα περισσότερα προϊόντα συλλογής δεδομένων είναι: το πλήθος των καναλιών, ο ρυθμός δειγματοληψίας, η διακριτότητα, το όριο διακύμανσης και η μεγέθυνση. Αυτές οι προδιαγραφές αναλύονται περιληπτικά παρακάτω.

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

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

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

Ρυθμός δειγματοληψίας (Sampling rate): Αυτή η παράμετρος καθορίζει με ποια συχνότητα θα γίνονται οι μετατροπές του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Μία κάρτα συλλογής δεδομένων πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη για να διακριτοποιήσει ένα ικανοποιητικό αριθμό από σημεία σε κάποιο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να παραχθεί μία κατά το δυνατόν ακριβέστερη απεικόνιση του αρχικού σήματος. Προφανώς όταν το σήμα αλλάζει γρηγορότερα από την ικανότητα ψηφιοποίησης της κάρτας συλλογής δεδομένων, τότε εισάγονται σφάλματα στα μετρημένα δεδομένα. Δεδομένα που διακριτοποιούνται πολύ αργά ενδεχομένως να παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική συχνότητα. Η διαστρέβλωση του σήματος αναφέρεται ως πλαστό σήμα (aliasing) (δες Σχ. 2.2).



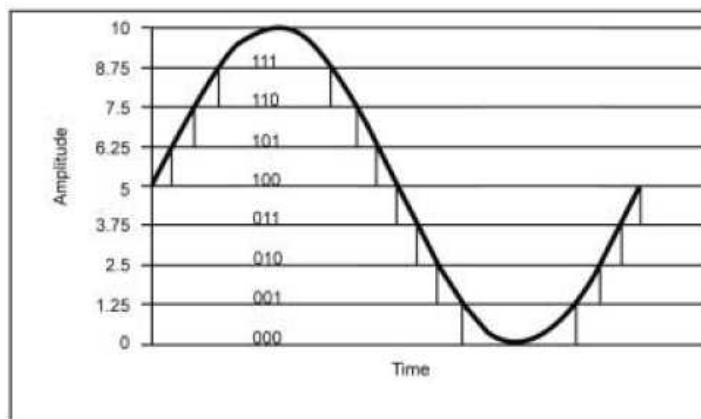
Σχ. 2.2 Επίδραση ρυθμού δειγματοληψίας στο ψηφιοποιημένο σήμα : Επαρκής δειγματοληψία (επάνω) και υποδειγματοληψία (aliasing) (κάτω)

Γενικώς, σε πολυκαναλικές κάρτες συλλογής δεδομένων, η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό γίνεται μέσω από έναν ψηφιοποιητή (analog to digital converter, ADC) με εναλλαγή μεταξύ των καναλιών. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται πολυσύνθεση (multiplexing) και είναι σαφώς φθηνότερη από την περίπτωση χρήσης ξεχωριστού ψηφιοποιητή για κάθε κανάλι. Όμως, επειδή ο

πολυσυνθέτης αλλάζει θέση από κανάλι σε κανάλι, δημιουργείται μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των σημάτων των καναλιών. Τα συστήματα συλλογής δεδομένων για πού πραγματοποιούν ταυτόχρονη καταγραφή πολλών καναλιών χρησιμοποιούν ειδική διάταξη κυκλώματος (sample-and-hold circuitry) για τη συλλογή δεδομένων για κάθε κανάλι. Παρόλα αυτά, για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η χρήση της (ακριβής) ειδικής διάταξης κυκλώματος (sample-and hold-circuitry) δεν είναι απαραίτητη για την ταυτόχρονη καταγραφή.

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

Διακριτότητα (Resolution): Η διακριτότητα μιας κάρτας συλλογής δεδομένων περιγράφεται ως με τον όρο “bit”. Σε μία κάρτα με “n bit” διακριτότητα το σήμα της τάσης διαιρείται σε  $2^n$  ίσες υποδιαίρεσεις. Θεωρητικά, η μισή τιμή της προκύπτουσας υποδιαίρεσης είναι η ελάχιστη μεταβολή τάσης που μπορεί να ανιχνεύσει μια κάρτα συλλογής δεδομένων. Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας μιας κάρτας συλλογής δεδομένων θεωρείστε έναν μετατροπέα με διακριτότητα 3 bit. Ο μετατροπέας αυτός διαιρεί το εύρος του αναλογικού σήματος σε 8 ίσες υποδιαίρεσεις. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα ημιτονοειδές σήμα και η αντίστοιχη ψηφιακή του μορφή όπως διακριτοποιείται από έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με την παραπάνω διακριτότητα.



Σχ. 2.3 Ψηφιοποιημένο ημιτονοειδές σήμα με διακριτότητα 3 bit

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



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

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

## 2.4 Πρόγραμμα συλλογής δεδομένων

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

Μερικοί προμηθευτές καρτών συλλογής δεδομένων παρέχουν προγράμματα οδηγών (driver) μαζί με αυτές τις κάρτες. Αυτά τα προγράμματα-οδηγοί διαχειρίζονται τη συνεργασία της κάρτας συλλογής δεδομένων με τους πόρους του υπολογιστή, όπως είναι οι επεξεργαστές, η μνήμη άμεσης πρόσβασης και η εγγράψιμη μνήμη. Μέσω των προγραμμάτων-οδηγών παρακάμπτονται προβλήματα προγραμματισμού για την ενσωμάτωση των καρτών και παρέχεται στον χρήστη ένα εύχρηστο διαδραστικό περιβάλλον επικοινωνίας. Εν συντομία, τα προγράμματα-οδηγοί είναι προγράμματα διασύνδεσης μεταξύ του προγράμματος συλλογής δεδομένων και της κάρτας συλλογής δεδομένων και πρέπει να εγκαθίστανται στον υπολογιστή πριν την λειτουργία του προγράμματος συλλογής δεδομένων.

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

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

Οι ικανότητες που πρέπει να διαθέτει ένα λογισμικό συλλογής δεδομένων εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του κάθε ειδικού έργου καταγραφής της απόκρισης μιας κατασκευής. Για παράδειγμα με ένα τέτοιο λογισμικό ενδέχεται να σαρώνονται απλώς τα δεδομένα με σταθερό ρυθμό και να αποθηκεύονται αυτά στον σκληρό δίσκο. Ένα πιο ανεπτυγμένο λογισμικό ενδέχεται να σαρώνει τα

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

## 2.5 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Οι αισθητήρες είναι γενικώς ο πιο αδύναμος κρίκος στα μετρητικά συστήματα επειδή πρέπει να μετατρέψουν τα χαρακτηριστικά της μηχανικής κίνησης σε ηλεκτρικό σήμα. Ο υπόλοιπος εξοπλισμός σχετίζεται με τον μετασχηματισμό του ηλεκτρικού ή φωτεινού σήματος σε αριθμό και την αποθήκευσή του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, τα οποία επηρεάζουν την αποδοτικότητά τους είναι τα παρακάτω:

- Ευαισθησία (sensitivity) ενός οργάνου είναι το πηλίκο της ηλεκτρικής τάσης εξόδου προς το μηχανικό μέγεθος που μετράται (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση). Αυτό ισχύει για αισθητήρες (transducers) μετατροπής ενέργειας (π.χ. αυτούς που δεν απαιτούν τροφοδοσία). Για τους παθητικούς αισθητήρες (π.χ. αυτούς που απαιτούν τροφοδοσία, μηχανοσκόμμετρα, επιταχυνσιόμετρα piezoresistive), η ευαισθησία ορίζεται σε όρους «ηλεκτρικής τάσης εξόδου ανά μονάδα της μέτρησης» ανά μονάδα της τάσης του ρεύματος εισαγωγής (mV/mm/V).
- Ως εγκάρσια ευαισθησία (cross-axis or transverse sensitivity) ορίζεται η ευαισθησία σε κίνηση παράλληλα προς επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στον άξονα κύριας ευαισθησίας. Δηλώνεται ως ποσοστό της ευαισθησίας του κύριου άξονα. Προφανώς η εγκάρσια ευαισθησία πρέπει να είναι κατά το δυνατό μικρότερη.
- Η διακριτότητα (resolution) είναι η μικρότερη μεταβολή στο μετρούμενο μέγεθος η οποία μπορεί να παράγει την μικρότερη μεταβολή στο ηλεκτρικό σήμα εξόδου η οποία είναι δυνατό να καταγραφεί.
- Απόκριση συχνοτήτων (frequency response) είναι το εύρος συχνοτήτων (frequency range) πάνω από το οποίο το ηλεκτρικό σήμα εξόδου είναι σταθερό για σταθερή μηχανική κίνηση. Αυτή η σταθερότητα συνήθως εκφράζεται σε όρους dB. Για παράδειγμα, 3 dB μεταξύ 5 και 200 Hz σημαίνει ότι ο αισθητήρας παράγει μια εξαγόμενη τάση με διακύμανση 30% μεταξύ 5 και 200 Hz.
- Μετάθεση φάσης (phase shift) είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της δημιουργίας της κίνησης και της παραγωγής του ηλεκτρικού σήματος του συστήματος. Η φάση μετάθεσης κάθετα προσανατολισμένων αισθητήρων πρέπει να είναι μικρή, ώστε η προκύπτουσα κίνηση η οποία υπολογίζεται από την διανυσματική πρόσθεση υποθετικά ταυτόχρονα μετρούμενων συνιστωσών να μην διαστρεβλώνεται.
- Απαιτήσεις βαθμονόμησης (calibration requirements) είναι η επιτρεπόμενη διακύμανση στο ηλεκτρικά παραγόμενο σήμα από σταθερού εύρους μηχανική κίνηση, όταν υπάρχουν αλλαγές στο εύρος συχνοτήτων των δεδομένων, αλλαγές στο περιβάλλον, αλλαγές στο εύρος του μεγέθους των δεδομένων ή στην ώρα.

- Περιβαλλοντική ευαισθησία (environmental sensitivity), όπως η απόκριση του αισθητήρα σε υγρασία, θερμοκρασία ή ακουστικό θόρυβο πρέπει να είναι γνωστή, καθώς οι αισθητήρες πρέπει να λειτουργούν πολλές φορές σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Η περιβαλλοντική ευαισθησία είναι μια παράμετρος των απαιτήσεων ρύθμισης.
- Το μέγεθος και η μάζα είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό του αισθητήρα. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα ταχύτητας, σε χαμηλές συχνότητες, αυξάνει αναλογικά με την μάζα του αισθητήρα. Ένας μεγάλος αισθητήρας είναι πιο ευαίσθητος στις μικρές συχνότητες αλλά ενδέχεται να είναι δύσκολη η εγκατάστασή του και είναι πιθανό να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του συστήματος που εννοργανώνεται.

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

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

Στην παραπάνω σχέση η τιμή P είναι το μετρημένο μέγεθος και η τιμή P<sub>0</sub> είναι το μέγεθος αναφοράς. Σε έναν αισθητήρα με τιμή V<sub>0</sub>=4.4V/in/sec μείωση -3dB συμβαίνει όταν:

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

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

### 3. ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 3.1 Γενικά

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

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

σχετίζονται με τον έλεγχο των πασσάλων θεμελίωσης μέσω δοκιμαστικών φορτίσεων, τον έλεγχο των βάθρων (παραμόρφωση υπό αξονική φόρτιση, ποιότητα υλικών δόμησης) και τον έλεγχο των εφεδράνων που πιθανά χρησιμοποιούνται. Οι μετρήσεις στην φάση κατασκευής έχουν μεγάλη σημασία στην κατασκευή του καταστρώματος. Για παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση κατασκευής καταστρώματος το οποίο είναι προεντεταμένο. Είναι γνωστό ότι κατά τον σχεδιασμό τέτοιων γεφυρών το στατικό σύστημα φθάνει σε οριακή κατάσταση αντοχής αρκετές φορές. Η κατάσταση αυτή είναι κρισιμότερη στην περίπτωση τμηματικής προέντασης. Τα αντιφορτία της προέντασης σε αυτή την περίπτωση πρέπει να είναι τόσα ώστε για τα μόνιμα φορτία η άνω ίνα του καταστρώματος να βρίσκεται οριακά υπό σύνθλιψη (ή ελαφρύ εφελκυσμό). Στην περίπτωση αυτή η φορτιστική κατάσταση είναι απολύτως ελεγχόμενη όταν μετράται η παραμόρφωση της άνω και κάτω ίνας των ανοιγμάτων του φέροντος οργανισμού στις αμφιέριστες γέφυρες. Στην περίπτωση μονολιθικών γεφυρών οι παραπάνω μετρήσεις πρέπει να γίνουν στην άνω και κάτω ίνα του ανοίγματος και της στήριξης. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται ακριβώς οι παραμορφώσεις και άρα οι αντίστοιχες τάσεις, λόγω των μόνιμων φορτίων, λόγω της συστολής ξήρανσης, λόγω των αντιφορτίων και της αξονικής φόρτισης της προέντασης, λόγω της μακροχρόνιας δράσης του ερπυσμού και λόγω της επιβολής των φορτίων καταστρώματος και λειτουργίας. Η επαλληλία των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά την επιβολή των παραπάνω φορτιστικών καταστάσεων γίνεται κατά την μελέτη του φορέα αλλά καλό είναι να μετρούνται και να ελέγχονται κατά τη φάση της κατασκευής. Αυτές οι μετρήσεις γίνονται για τον έλεγχο της συμφωνίας των υπολογισμών με τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τις διάφορες φάσεις κατασκευής. Για την μέτρηση των παραμορφώσεων είναι δυνατή η χρήση μηκυνσιομέτρων (strain gauges), LVDT ή οπτικών ινών. Για την επαλήθευση των παραμορφώσεων πρέπει να γίνει υπολογισμός των βυθίσεων του φορέα, οι οποίες είναι δυνατό να μετρούνται επίσης για επαλήθευση των υπολογισμών. Οι βυθίσεις του φορέα της γέφυρας είναι δυνατό να μετρούνται με LVDT, η μετρητή Laser. Η εγκατάσταση των παραπάνω οργάνων κατά την φάση κατασκευής του φορέα και η λειτουργία τους μετά την ολοκλήρωση του έργου είναι σημαντική. Μέσω αυτών των συσκευών είναι δυνατή η μέτρηση των παραμορφώσεων από τα φορτία λειτουργίας, από μακροχρόνιες δράσεις όπως είναι ο ερπυσμός στο σκυρόδεμα και από δοκιμαστικές φορτίσεις. Με την μέτρηση των παραμορφώσεων στην άνω και κάτω ίνα του καταστρώματος της γέφυρας είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την εξέλιξη του φαινομένου της κόπωσης στα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκε η γέφυρα. Πράγματι, υπό τα φορτία λειτουργίας, σε μια γέφυρα (μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων για πολλά χρόνια) παρατηρείται σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων ακόμη και στην περίπτωση που τα φορτία είναι εντός των τιμών σχεδιασμού. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντική η δυνατότητα εξαγωγής μετρήσεων για την παραμόρφωση των ακραίων ινών του καταστρώματος και μετά την φάση κατασκευής. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μετρήσεις των παραμορφώσεων και ο υπολογισμός από αυτές των βυθίσεων σε γέφυρες που κατασκευάζονται με προβολοδόμηση. Ο ορθός υπολογισμός των βυθίσεων στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητος για την ορθή κατασκευή της γέφυρας. Παρομοίως με τις γέφυρες προεντεταμένου καταστρώματος, μετρήσεις παραμορφώσεων είναι δυνατό να γίνουν και στους ελκυστήρες ή τα καλώδια κρεμαστών γεφυρών τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσο και στη φάση λειτουργίας.

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

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

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

### **3.2 Μετρούμενα μεγέθη απόκρισης γεφυρών**

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

μετρούμενων μεγεθών παραμόρφωσης είναι πιθανό να απαιτηθεί ισοβαρής διόρθωση των μεγεθών παραμόρφωσης και άρα των μεγεθών έντασης. Η μεθοδολογία που παρατέθηκε μπορεί να εφαρμοσθεί σε φορείς γεφυρών κατασκευασμένους από χάλυβα ή σε φορείς γεφυρών κατασκευασμένους από προεντεταμένο σκυρόδεμα (εφόσον υπάρχει λειτουργία των διατομών σε στάδιο 1). Στην περίπτωση φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου είναι πιθανό αρκετές διατομές να λειτουργούν σε στάδιο 2, απαιτείται ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας (π.χ. με υπερήχους) κατά το μήκος του φορέα και η εκτέλεση των παραπάνω υπολογισμών θεωρώντας σταθερό μέτρο ελαστικότητας σε τμήματα κατά μήκος του φορέα, με διαφορετική τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε κάθε τμήμα.

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

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

- *Παραμόρφωση (strain)*: Στην περίπτωση αυτή μετράται η κατανομή της παραμόρφωσης κατά το μήκος μιας διατομής. Μετρήσεις είναι δυνατό να γίνουν στο σκυρόδεμα, στους οπλισμούς και στα καλώδια προέντασης. Με γνωστό τον νόμο τάσης – παραμόρφωσης των υλικών, είναι δυνατό να προσδιορισθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην θέση που γίνονται οι μετρήσεις.
- *Μετακίνηση (deflection)*: Μετράται η κατανομή της κατά το μήκος μιας κατασκευής και η μεταβολή της συναρτήσει των επιβαλλόμενων φορτίσεων. Οι μετρήσεις γίνονται σε ολόκληρη την κατασκευή ή σε ένα δομικό στοιχείο. Με τις μετρήσεις μετακίνησης

καθορίζονται τα χαρακτηριστικά φορτίου – παραμόρφωσης και καθορίζονται τα όρια της ελαστικής απόκρισης, η καμπυλότητα και η μεταβολές σε αυτή.

- *Εντοπισμός και μέτρηση ρωγμών*: Η θέση, ο τύπος και το εύρος των ρηγμάτων σχετίζονται με τη φόρτιση. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του επιτρεπτού επιπέδου φόρτισης και για να προκύψουν οι τάσεις αστοχίας ή των οριακών καταστάσεων αντοχής.
- *Δυνάμεις (forces)*: Μετράται το μέγεθός τους και το είδος τους. Γίνονται μετρήσεις στο σκυρόδεμα, στους οπλισμούς, στις στηρίξεις και μερικές φορές στα σημεία φόρτισης. Η γνώση των εσωτερικών δυνάμεων οι οποίες σχετίζονται με τις εφαρμοζόμενες εξωτερικές φορτίσεις είναι χρήσιμη στην διερεύνηση υφισταμένων κατασκευών.
- *Θερμοκρασία*: Μετράται η κατανομή της θερμοκρασίας στη μάζα του σκυροδέματος, στις περιπτώσεις που αναπτύσσονται διαφορετικές τιμές μεταξύ άνω και κάτω ίνας.
- *Ερπυσμός και συστολή ξήρανσης*: Η μέτρηση αυτών των μεγεθών γίνεται σε κατασκευές που υπόκεινται σε διαρκή φόρτιση. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με παρόμοιο τρόπο με την μέτρηση της παραμόρφωσης (1), αλλά πρέπει να λαμβάνεται φροντίδα ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα και η συντήρηση του συστήματος μέτρησης καθόλη την μακρά περίοδο των μετρήσεων.
- *Ιδιότητες υλικών*: Αυτές πρέπει να μετρούνται προκειμένου να αξιοποιηθούν άλλες μετρήσεις για τον προσδιορισμό της απόκρισης ολόκληρης της κατασκευής και προκειμένου να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων με τους αναλυτικούς υπολογισμούς. Η μέτρηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι σημαντική καθώς αυτές αλλάζουν με τη μεταβολή των συνθηκών περιβάλλοντος όπως είναι η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία.
- *Δυναμική απόκριση*: Μετράται η απόκριση μιας κατασκευής όταν υπόκειται σε δυναμικές φορτίσεις. Αυτές οι φορτίσεις ενδέχεται να είναι σεισμικές, κόπωσης και επαναλαμβανόμενες. Μετρούνται επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις.

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

### 3.3 Παρακολούθηση απόκρισης γεφυρών

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

- Το κωδικό όνομα του σταθμού (καθοριζόμενο από τον χρήστη).

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

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

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

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

- Το εύρος (χρόνος) της χρονοϊστορίας της διέγερσης που θα καταγραφεί πριν την ανάπτυξη του μεγέθους διέγερσης για το οποίο έχει οριστεί να αρχίσει η καταγραφή
- Το εύρος (χρόνος) της χρονοϊστορίας της διέγερσης που θα καταγραφεί μετά την ανάπτυξη του μεγέθους διέγερσης για το οποίο έχει οριστεί να σταματήσει η καταγραφή
- Η ελάχιστη διάρκεια μιας καταγραφής
- Χώρος κύριας αποθήκευσης της καταγραφής
- Χώρος δευτερεύουσας αποθήκευσης της καταγραφής
- Πλήθος σημείων καταγραφής ανά δευτερόλεπτο
- Το φίλτρο έναντι ψευδών καταγραφών
- Ομαδικές πηγές έναρξης καταγραφής. Στην περίπτωση που το αναπτυσσόμενο μετρούμενο μέγεθος υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή στα κανάλια τα οποία έχουν προεπιλεγεί, τότε αρχίζει η καταγραφή. Ομοίως η καταγραφή σταματάει, όταν σε κάποιο από τα προεπιλεγμένα κανάλια η απόκριση πέσει κάτω από μια προεπιλεγμένη τιμή. Υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού έναρξης ή λήξης της καταγραφής από το πληκτρολόγιο με κατάλληλη προεπισημανση.
- Η καταγραφή σταματάει ή ξεκινά όταν η βαρύτητα ενεργοποίησης (detrigger or trigger weight) πέσει κάτω ή ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή.

Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι στην περίπτωση κατά την οποία τρία κανάλια έχουν επισημανθεί με μονάδα τότε σε οποιοδήποτε από αυτά τα κανάλια ξεπεραστεί το μέγεθος μέτρησης, για το οποίο υπάρχει εντολή να αρχίσει η καταγραφή, θα συλλεχθούν δεδομένα. Τονίζεται ότι αυτό θα συμβεί όταν στην βαρύτητα ενεργοποίησης τεθεί μονάδα. Τα υπόλοιπα κανάλια δεν έχουν δυνατότητα να



ενεργοποιήσουν την συλλογή δεδομένων. Στην περίπτωση κατά την οποία τρία κανάλια έχουν επισημανθεί με μονάδα και το πληκτρολόγιο έχει επισημανθεί με δύο τότε απαιτείται η ενεργοποίηση δύο καναλιών ή μόνο του πληκτρολογίου όταν η βαρύτητα ενεργοποίησης τεθεί ίση με δύο.

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

- Ο αριθμός του καναλιού για το οποίο καθορίζονται οι παράμετροι
- Το κωδικό όνομα του καναλιού
- Η σχετική θέση του αισθητήρα ως προς τον καταγραφέα. Ειδικότερα εισάγονται η απόσταση προς τον Βορά, την Ανατολή και το υψόμετρο του αισθητήρα σε σχέση με τον καταγραφέα. Επίσης εισάγονται ο προσανατολισμός του άξονα του αισθητήρα ως προς τον ορίζοντα (δείχνει τον προσανατολισμό του άξονα ευαισθησίας ως προς κατακόρυφο επίπεδο +-90) και το αζιμούθιο (0 – 359) σε ωρολογιακή φορά από τον Νότο.
- Το ποσοστό του μετρούμενου μεγέθους (% του μέγιστου μεγέθους απόκρισης που μπορεί να καταγράψει το σύστημα) κατά την υπέρβαση του οποίου αρχίζει η καταγραφή
- Το ποσοστό του μετρούμενου μεγέθους (% του μέγιστου μεγέθους απόκρισης που μπορεί να καταγράψει το σύστημα) κάτω από το οποίο σταματάει η καταγραφή
- Το ποσοστό του μετρούμενου μεγέθους (% του μέγιστου μεγέθους απόκρισης που μπορεί να καταγράψει το σύστημα) κατά την υπέρβαση του οποίου ενεργοποιείται ειδοποίηση (alarm)
- Ο τύπος του φίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί από τον καταγραφέα για τον καθορισμό της έναρξης της καταγραφής. Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της έναρξης ή λήξης της εγγραφής μέσω προκαθορισμένου ποσοστού της πλήρους κλίμακας μέτρησης και μέσω καθορισμού του ορίου του λόγου STA/LTA (της μέσης τιμής του μετρούμενου μεγέθους για προκαθορισμένο μικρό χρονικό διάστημα προς την μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους για προκαθορισμένο μεγάλο χρονικό διάστημα). Στην δεύτερη περίπτωση ο υπολογισμός γίνεται για πολλά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα κατά το μήκος της διέγερσης.

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

Στην περίπτωση καταγραφής και απεικόνισης των καταγραφών σε πραγματικό χρόνο πρέπει να γίνονται οι ρυθμίσεις οι οποίες σχετίζονται τον τρόπο μετάδοσης και το μέγεθος των καταγραφών.

Μετά τον καθορισμό όλων των παραπάνω παραμέτρων γίνεται δοκιμή του συστήματος με εντολή ελέγχου για την οποία είναι προγραμματισμένο το σύστημα από την κατασκευάστρια εταιρεία και ελέγχονται οι καταγραφές αυτής της περίπτωσης μέσω σχετικού λογισμικού. Σχεδόν όλες οι εταιρείες, κατασκευής συστημάτων εντοργάνωσης – καταγραφών, διαθέτουν λογισμικό απεικόνισης των καταγραφών, το οποίο πρέπει να παρέχεται σε κάθε περίπτωση.

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

### 3.4 Στατικές δοκιμές γεφυρών

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

Η στατική δοκιμή γεφυρών δεν είναι μια νέα δραστηριότητα και εφαρμόζεται για αιώνες. Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα οι γέφυρες δοκιμάζονταν υπό ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία που προσομοίωσαν την ακριβή κυκλοφορία. Αν δεν σημειώνονταν κατάρρευση ή δεν εμφανίζονταν υπερβολικές

παραμορφώσεις υπό τα φορτία δοκιμής η γέφυρα θεωρούνταν «γερή». Σε μερικές Ευρωπαϊκές χώρες συνηθίζονταν η απόδειξη της ικανότητας ανάληψης φορτίων της γέφυρας μέσω δοκιμών πριν την δώσουν σε κυκλοφορία. Σε αυτές τις δοκιμές η γέφυρα φορτιζονταν με φορτία ισοδύναμα των φορτίων λειτουργίας και η απόκρισή της και η παραμόρφωσή της παρακολουθούνταν κυρίως μέσω χειροκίνητων μετρητικών διατάξεων. Συνεπώς, αυτές οι πρώτες δοκιμές συσχέτιζαν την δομική κατάσταση της γέφυρας μόνο με την καμπτική της δυσκαμψία.

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

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

### **3.4.1 Μέθοδοι στατικών δοκιμών γεφυρών**

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

### **3.4.2 Δοκιμές απόκρισης**

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

Πρόσφατα παραδείγματα τέτοιων δοκιμών στον Καναδά, αναφέρονται από τους Bakht et al. (1999) και Bakht and Mufti (1999). Η πρώτη εκπονήθηκε σε έξι ξύλινες γέφυρες στην περιοχή της Νέας Σκωτίας. Το κύριο αντικείμενο ήταν να καθορισθούν τα χαρακτηριστικά της κατανομής της φόρτισης των γεφυρών. Μια δεύτερη σειρά τέτοιων δοκιμών έγινε στην Βρετανική Κολούμπια σε δύο πλακοσκεπείς γέφυρες με κλειδιά διάτμησης. Στόχος αυτών των δοκιμών ήταν να βαθμονομηθεί μια αναλυτική μέθοδος και κατόπιν να εκτιμηθεί το μέγεθος των διατμητικών τάσεων στα κλειδιά διάτμησης για όλες τις πλακοσκεπείς γέφυρες στους δασικούς δρόμους της πολιτείας αυτής. Σε αντίθεση με προηγούμενες αντιλήψεις, βρέθηκε ότι οι τάσεις στις συγκολλήσεις των κλειδιών διάτμησης ήταν πολύ χαμηλές και για αυτό τον λόγο δεν υπήρχε περίπτωση για αστοχία έναντι κοπώσεως σε αυτή τη θέση.

### **3.4.3 Δοκιμές Διάγνωσης**

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

Δεν υπάρχει σαφής διαφορά μεταξύ των δοκιμών απόκρισης και διάγνωσης αλλά η πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται για την εκπόνηση δοκιμής αποτίμησης μιας μεθόδου ανάλυσης. Η δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται για την διάγνωση της επιρροής της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων της γέφυρας. Για παράδειγμα, μια δοκιμή απόκρισης μπορεί να διεξάγεται για την αποτίμηση μιας καθορισμένης μεθόδου προσδιορισμού της κατανομής της εγκάρσιας φόρτισης σε μία γέφυρα με πλάκα επί δοκών. Μια δοκιμή διάγνωσης μπορεί να διεξάγεται για τον καθορισμό των συνθηκών στροφικής πάκτωσης (rotational restrain conditions) στα άκρα ενός βάρθρου γέφυρας.

Μέσω ενός μεγάλου αριθμού δοκιμών, επιβεβαιώθηκε ότι οι δοκιμές διάγνωσης μπορούν να εφαρμοστούν καλύτερα για τον προσδιορισμό των αιτιών της καταπόνησης που ενδεχομένως να υπάρχει σε μια γέφυρα λόγω της αθέλητης αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων ή για τον εντοπισμό της ευμενούς αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων. Το αίτιο της καταπόνησης σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να εξαλειφθεί μέσω απλών διορθωτικών μέτρων. Η ευεργετική αλληλεπίδραση, από την άλλη, μπορεί να αξιοποιηθεί στον καθορισμό μιας αυξημένης ικανότητας της γέφυρας για ανάληψη φορτίων.

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

### **3.4.4 Δοκιμές Επαλήθευσης**

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

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

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

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

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

### **3.4.5 Εξοπλισμός για εκτέλεση δοκιμών**

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

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

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

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

### **3.4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις**

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

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

## **3.5 Δυναμικές δοκιμές γεφυρών**

Αν και όχι τόσο παλιές όσο οι στατικές δοκιμές, οι δυναμικές δοκιμές γεφυρών δεν είναι νέες. Από το 1920 όλες οι γέφυρες των αυτοκινητοδρόμων στην Ελβετία, με άνοιγμα μεγαλύτερο από 20m, δοκιμάζονταν σε δυναμική φόρτιση. Αυτές οι δοκιμές διεξάγονταν και διεξάγονται μέσω ενός

οχήματος με σταθερό τύπο αξόνων, το οποίο διέτρεχε την γέφυρα με διαφορετικές ταχύτητες και περνούσε πάνω από προεξοχή προκαθορισμένου μεγέθους πάνω στη γέφυρα.

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

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

Οι παραπάνω κατηγορίες δοκιμών παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

### **3.5.1 Δοκιμές ιστορικού των τάσεων**

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

### **3.5.2 Δοκιμές Ανοχής Δυναμικών φορτίσεων (ΑΔΦ)**

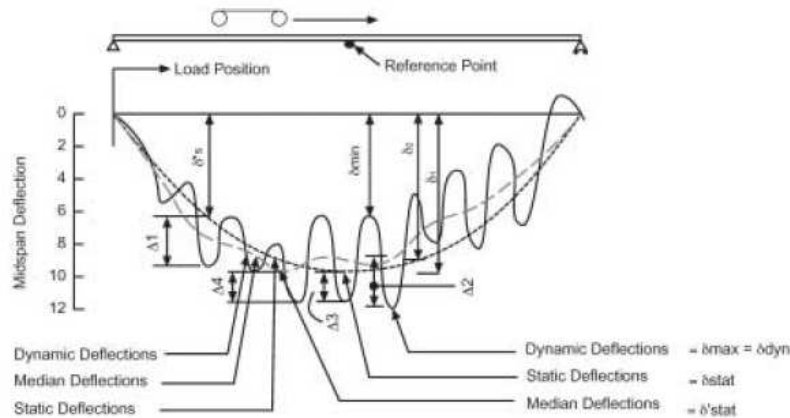
Ο συντελεστής κρούσης (impact factor) ή συντελεστής Ανοχής Δυναμικής Φόρτισης είναι μία αφηρημένη έννοια, η οποία δύσκολα ποσοτικοποιείται. Ο δυναμικός έλεγχος γεφυρών συχνά εκτελείται για ερευνητικούς σκοπούς προκειμένου να αποκτηθεί πληροφορία σχετικά με τις αντιπροσωπευτικές τιμές της ΑΔΦ οι οποίες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

### **3.5.3 Καθορισμός Δυναμικής Επαύξεσης**

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

Οι ερευνητές που ερμήνευαν τις καταγραφές από δυναμικές δοκιμές συχνά χρησιμοποιούσαν τον όρο δυναμική επαύξηση για το ίδιο μέγεθος που οι Fuller et al. (1931) όριζαν ως αύξηση από την επιβολή των δυνάμεων λόγω της φύσης τους ως δυναμικές. Επίσης με τον ίδιο όρο περιέγραφαν αυτό που ορίζονταν ως αύξηση της παραμόρφωσης λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων. Όμως δεν υπάρχει ενιαίος τρόπος με τον οποίο αυτή η αύξηση να υπολογίζεται από τις καταγραφές. Οι διαφορετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της δυναμικής επαύξεσης μπορούν να ερμηνευθούν καλύτερα με τη βοήθεια του σχήματος 3.1 που ακολουθεί. Το σχήμα αυτό προέκυψε από καταγραφές πραγματικής δυναμικής δοκιμής σε γέφυρα με απλά εδραζόμενη πλάκα με δοκούς κατά τη διέλευση οχήματος με δύο άξονες (Biggs & Suer, 1956). Το σχήμα δείχνει την μεταβολή των δυναμικών και στατικών παραμορφώσεων στο μεσαίο άνοιγμα μιας δοκού συναρτήσει του χρόνου. Οι δυναμικές παραμορφώσεις λήφθηκαν όταν το όχημα της δοκιμής διέρχονταν από τη γέφυρα με κανονική ταχύτητα. Οι στατικές παραμορφώσεις λήφθηκαν όταν το όχημα διέρχονταν από τη γέφυρα με πολύ μικρή ταχύτητα, έτσι ώστε να μην εισάγονται φαινόμενα δυναμικής ενίσχυσης των παραμορφώσεων. Το σχήμα αυτό επίσης δείχνει την μέση παραμόρφωση που προέκυψε θεωρώντας το μέσο όρο διαδοχικών ακραίων τιμών της δυναμικής παραμόρφωσης. Οι μέσες αυτές δυναμικές

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



Σχ. 3.1 Βυθίσεις μεσαίου ανοίγματος δοκού λόγω κινητού φορτίου (από Biggs and Suer, 1956)

Τονίζεται ότι στο σχήμα έχει εισαχθεί μία τεχνητή κλίμακα παραμορφώσεων αυτό προκειμένου να διευκολυνθεί η ερμηνεία των καταγραφών της δοκιμής. Στο σχήμα που δίνεται χρησιμοποιείται η κλίμακα των παραμορφώσεων για τις οποίες η  $\delta_{stat}$  είναι 10 μονάδες. Με αυτό τον καθορισμό οι διάφορες ποσότητες παραμόρφωσης έχουν τις ακόλουθες τιμές.

$$\delta_{stat}=10, \delta_{max}=12.3, \delta'_{stat}=9.9, \delta_{min}=6.2, \delta_1=9.1, \delta_2=9.8, \delta_s^*=6.4,$$

$$\Delta_1=3.2, \Delta_2=3.1, \Delta_3=2.0, \Delta_4=2.0.$$

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

$$I = \frac{\Delta_1}{\delta_s^*} (= 0.500) \tag{3.1}$$

$$I = \frac{\Delta_3}{\delta_{stat}} (= 0.200) \tag{3.2}$$

$$I = \frac{\Delta_4}{\delta_{stat}} (= 0.202) \tag{3.3}$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_{min}}{\delta_{max} + \delta_{min}} (= 0.330) \tag{3.4}$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_2}{\delta_2} (= 0.255) \tag{3.5}$$

$$I = \frac{\delta_{max} - \delta_1}{\delta_1} (= 0.352) \tag{3.6}$$

$$I = \frac{\delta_{\max} - \delta'_{\text{stat}}}{\delta'_{\text{stat}}} (= 0.242) \quad (3.7)$$

$$I = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\text{stat}}}{\delta_{\text{stat}}} (= 0.230) \quad (3.8)$$

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

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

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

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

Ιδεατά ο συντελεστής ενίσχυσης, που προκύπτει από τη σχέση (3.9), πρέπει να δίνει την ίδια τιμή του  $\delta_{\max}$  όπως μετρήθηκε κατά την δοκιμή, π.χ. 12.30. Σε καμία από τις σχέσεις (3.1) – (3.7) για τον καθορισμό του  $\delta_{\max}$  δεν προκύπτει η σωστή τιμή εκτός από τη σχέση (3.8) η οποία είναι ουσιαστικά η ίδια με τη σχέση (3.9).

### **3.5.4 Παράγοντες που οδηγούν σε παραπλανητικά συμπεράσματα**

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

#### Τύπος του οχήματος

Είναι γνωστό ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης για μια γέφυρα επηρεάζεται σημαντικά από τη σχέση των δυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος με αυτά της γέφυρας. Παρά το γεγονός αυτό, οι περισσότερες δυναμικές δοκιμές σε γέφυρες διεξάγονται με συγκεκριμένου τύπου ειδικά οχήματα δοκιμών. Οι καταγραφές από τέτοιες δοκιμές, για προφανείς λόγους δεν μπορούν να θεωρηθούν ως

αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών κυκλοφορίας. Οι συντελεστές ενίσχυσης που προκύπτουν από τέτοιες δοκιμές με την χρήση συγκεκριμένου τύπου ειδικών οχημάτων δοκιμής δίνουν μόνο μια ποιοτική εικόνα του προβλήματος της δυναμικής των γεφυρών. Αυτοί οι συντελεστές δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της τελικής τιμής του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης (impact factor) που θα χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό ή την αποτίμηση μιας γέφυρας. Μία αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης μπορεί να υπολογισθεί ρεαλιστικά μόνο όταν τα δεδομένα συλλέγονται υπό συνθήκες συνήθους κυκλοφορίας και για σχετικά μακρές χρονικές περιόδους.

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

#### Βάρος του οχήματος

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

#### Θέση του οχήματος ως προς το σημείο αναφοράς

Ας θεωρήσουμε μία γέφυρα επί πέντε δοκών με τρεις λωρίδες κυκλοφορίας, η οποία είναι ενοργανωμένη για μέτρηση της δυναμικής της απόκρισης. Η γέφυρα αυτή φέρει ένα φορτηγό στην δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας έτσι ώστε οι δύο δοκοί κάτω από αυτή τη λωρίδα να φέρουν όλο το φορτίο του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο αριστερές δοκοί οι οποίες βρίσκονται μακριά από το σημείο επιβολής του φορτίου φέρουν ένα μικρό μερίδιο της φόρτισης. Όμως, η δυναμική ενίσχυση του μικρού μέρους του στατικού φορτίου που φέρουν αυτές οι δύο αριστερές δοκοί είναι πιθανό να είναι αρκετά υψηλή. Έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές ότι ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης σε σημεία μακριά από το σημείο της φόρτισης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή σε σημείο κάτω από την θέση φόρτισης. Προφανώς, ο πρώτος συντελεστής ενίσχυσης δεν είναι κατάλληλος για την εκτίμηση της επιρροής της στατικής φόρτισης σε ολόκληρη τη διατομή της γέφυρας.

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

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

#### **3.5.5 Συστάσεις**

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι δεν συνιστάται ο καθορισμός μιας αντιπροσωπευτικής τιμής της ΑΔΦ για κάποια γέφυρα μέσω δυναμικών δοκιμών. Οι τιμές της ΑΔΦ όπως προτείνονται από τους κανονισμούς ΟΗΒDC (1992), CHBDC (2000) πιθανώς αντανάκλουν το σημερινό επίπεδο γνώσης. Οι δυναμικές δοκιμές γεφυρών είναι παρόλα αυτά ένα χρήσιμο ερευνητικό εργαλείο για την θέσπιση πιο αξιόπιστων διατάξεων για την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων προδιαγραφών της ΑΔΦ για διαφορετικά είδη γεφυρών.



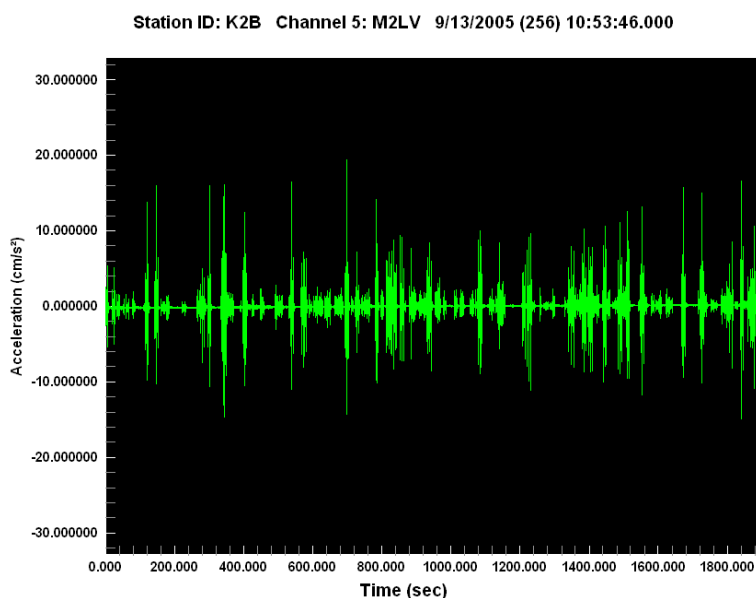
### 3.6 Δοκιμές περιβαλλοντικής διέγερσης

Οι δοκιμές από περιβαλλοντική διέγερση εκπονούνται για τον καθορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής η οποία διεγείρεται από άνεμο, ανθρώπινη δραστηριότητα ή κυκλοφορία οχημάτων. Τυπικά η απόκριση της κατασκευής μετράται από στρατηγικά τοποθετημένα επιταχυνσιόμετρα. Παράδειγμα μιας καταγραφής επιταχυνσιομέτρου δίνεται στο σχήμα 3.2, στο οποίο οι επιταχύνσεις σχεδιάζονται συναρτήσει του χρόνου. Η επιλογή των θέσεων και του πλήθους των αισθητήρων απαιτεί όχι μόνο ειδικευση στις δυναμικές δοκιμές αλλά και λεπτομερή γνώση της συμπεριφοράς της κατασκευής. Για τον καθορισμό της διάταξης των αισθητήρων σε μια δοκιμή περιβαλλοντικής διέγερσης, είναι χρήσιμη μια εκ των προτέρων λεπτομερής ανάλυση της κατασκευής π.χ. με πεπερασμένα στοιχεία.

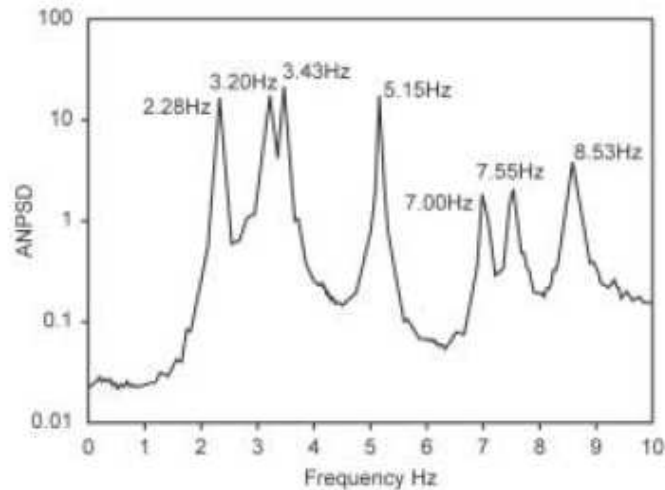
Το διάγραμμα των επιταχύνσεων συναρτήσει του χρόνου, όπως αυτό του σχήματος, μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση  $f(t)$  η οποία περιγράφεται παρακάτω.

$$f(t) = A_1 \sin 2\pi f_1 t + A_2 \sin 2\pi f_2 t + A_3 \sin 2\pi f_3 t + A_4 \sin 2\pi f_4 t + \dots \quad (3.10)$$

όπου  $f_1, f_2, f_3, f_4$ , κλπ, είναι οι διάφορες φυσικές συχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής και  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , κλπ, είναι τα ιδιομορφικά εύρη ή ιδιομορφικοί λόγοι. Το ιδιομορφικό εύρος για κάθε συχνότητα είναι στενά συσχετισμένο με τη φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density-PSD). Οι καταγραφές από περιβαλλοντική διέγερση αναλύονται σε συχνότητες και PSD με ειδικά λογισμικά. Οι καταγραφές των PSD κατόπιν κανονικοποιούνται για να γίνουν ισοβαρείς. Κατόπιν, από τα κανονικοποιημένα PSD που αντιστοιχούν σε καταγραφές για συγκεκριμένη διεύθυνση διέγερσης, υπολογίζεται η μέση κανονικοποιημένη PSD, (ANPSD). Ένα παράδειγμα διαγράμματος ANPSD δίνεται το σχήμα 3.3. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα επιταχύνσεων αντιπροσωπεύει μόνο ένα μέρος των δεδομένων που οδηγούν στη φασματική πυκνότητα ισχύος, όπως αυτή του Σχήματος 3.3. Μια δοκιμή περιβαλλοντικής διέγερσης από την οποία προκύπτει διάγραμμα ANPSD, ονομάζεται και ιδιομορφική δοκιμή.



Σχ. 3.2 Καταγραφή κατακόρυφης ταλάντωσης γέφυρας λόγω κυκλοφοριακού φόρτου



Σχ. 3.3 Μέσο κανονικοποιημένο διάγραμμα φασματικής πυκνότητας ισχύος καταγραφών που αντιστοιχούν σε κατακόρυφη ταλάντωση (από Ventura et al., 1996)

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.3, σε ένα διάγραμμα ANPSD αναγνωρίζονται διάφορες εξάρσεις συχνοτήτων, οι περισσότερες από τις οποίες είναι πιθανόν να είναι οι φυσικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Το διάγραμμα όμως ενδεχομένως περιλαμβάνει και τις συχνότητες της κυρίαρχης δύναμης διέγερσης, όπως είναι ένα βαρύ φορτηγό. Προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι το διάγραμμα ANPSD περιέχει μόνο φυσικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, οι απεικονιζόμενες ιδιοσυχνότητες θα πρέπει να συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αναλυτικά υπολογιζόμενες ιδιοσυχνότητες. Εάν το διάγραμμα περιέχει ιδιοσυχνότητες που δεν ερμηνεύονται, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί και να επανασχεδιασθεί το διάγραμμα ANPSD μέχρι να απομακρυνθούν οι συχνότητες των δυνάμεων διέγερσης και να προκύπτει σε κάθε δοκιμή το ίδιο διάγραμμα.

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

Διάφορες μεθοδολογίες για ανίχνευση βλαβών μέσω τέτοιων δοκιμών περιγράφονται στο κεφάλαιο 5

Στην πράξη υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί σχετικά με την εκτίμηση βλαβών με δοκιμές περιβαλλοντικών διεγέρσεων, όπως περιγράφονται παρακάτω.

### 3.6.1 Βλάβη χαμηλής ευαισθησίας

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά αποτελούν γενικές ιδιότητες της κατασκευής και ενώ επηρεάζονται από τοπικές ζημιές, ενδεχομένως να μην είναι τόσο ευαίσθητα σε αυτές. Ως εκ τούτου κάποια αλλαγή στις γενικές ιδιότητες της κατασκευής ενδέχεται να είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί, εκτός και αν οι βλάβες είναι πολύ σημαντικές ή οι μετρήσεις πολύ ακριβείς.

### 3.6.2 Πολυπλοκότητα των αλγορίθμων αναγνώρισης βλαβών

Η αναγνώριση μιας θέσης πιθανής βλάβης και ο βαθμός της βλάβης, με χρήση της μεταβολής των γενικών ιδιοτήτων της κατασκευής όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις σε ένα περιορισμένο αριθμό θέσεων αισθητήρων, είναι ένα πρόβλημα το οποίο μπορεί να επιλυθεί. Πρέπει όμως να χρησιμοποιούνται εξελιγμένες και σύνθετες μαθηματικές τεχνικές, μαζί με μη γραμμικές αναλύσεις για να προκύψει η πιο πιθανή λύση. Στην πραγματικότητα αυτό είναι ένα πεδίο στο οποίο η έρευνα εξελίσσεται. Οι μέθοδοι που είναι σήμερα διαθέσιμες δεν αντιμετωπίζουν καταστάσεις κατά τις

οποίες η βλάβη εισάγει μη γραμμικότητες στην κατασκευή. Αυτή η μη γραμμικότητα, για παράδειγμα, ενδέχεται να προκύπτει από την εμφάνιση ενεργών ρωγμών στην κατασκευή.

### **3.6.3 Επιρροή άλλων παραγόντων (εκτός των βλαβών)**

Τα συνολικά δυναμικά χαρακτηριστικά συχνά επηρεάζονται από φαινόμενα διαφορετικά από αυτά της εμφάνισης βλάβης, όπως π.χ. η αλλαγή της μάζας λόγω κυματισμών ή συγκέντρωσης χιονιού και τα θερμικά φαινόμενα που προκαλούνται από διακύμανση της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση που ένα δομικό σύστημα είναι υπερστατικό ή στατικά αόριστο, λόγω των θερμικών φαινομένων εισάγονται αξονικές τάσεις στα δομικά στοιχεία. Η ύπαρξη αυτών των αξονικών τάσεων μεταβάλλει τη δυσκαμψία της κατασκευής και μπορεί να μεταβάλει τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Οι οριακές συνθήκες (συνθήκες στήριξης) σε μια κατασκευή ενδέχεται επίσης να επηρεάζουν σημαντικά τη δυσκαμψία της. Στην περίπτωση κατά την οποία αυτές οι οριακές συνθήκες μεταβάλλονται με την ηλικία της κατασκευής, μπορεί να οδηγήσουν σε αλλαγή των δυναμικών χαρακτηριστικών της ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία δεν έχει εμφανισθεί βλάβη στην κατασκευή.

### **3.7 Δοκιμές ελεύθερης ταλάντωσης**

Καθώς οι κυκλοφοριακές φορτίσεις δεν διεγείρουν έντονα την γέφυρα στην οριζόντια διεύθυνση, είναι συνήθως δύσκολο να καθορισθούν τα χαρακτηριστικά οριζόντιας ταλάντωσής της με δοκιμές περιβαλλοντικής διέγερσης. Τα χαρακτηριστικά οριζόντιας διέγερσης μιας γέφυρας εκτιμώνται ακριβώς από δοκιμές ελεύθερης ταλάντωσης (pull back tests). Αυτού του τύπου οι δοκιμές εκτελούνται μέσω της έλξης της κατασκευής οριζόντια με καλώδια αγκυρωμένα στο έδαφος ή σε πακτωμένες στηρίξεις τα οποία απελευθερώνονται απότομα. Η απόκριση της κατασκευής καταγράφεται από επιταχυνσιόμετρα και η διαδικασία ανάλυσης των καταγραφών είναι παρόμοια με αυτή που εφαρμόζεται σε δοκιμές περιβαλλοντικών διεγέρσεων. Σε αυτές τις δοκιμές η κατασκευή ταλαντώνεται ελεύθερα, οπότε προκύπτουν επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά απόσβεσής της γέφυρας σε οριζόντιες ταλαντώσεις.

Σε δοκιμή γέφυρας που περιγράφεται από τους Ventura et al., (1996) χρησιμοποιήθηκαν τα βάθρα γειτονικής εγκαταλειμμένης γέφυρας για την αγκύρωση των καλωδίων δοκιμής. Η απελευθέρωση των καλωδίων έγινε με ειδικό μηχανισμό απότομης απελευθέρωσης.

Σε άλλη δοκιμή (γέφυρα Confederation Bridge) ελέγχθηκε πλαίσιο γέφυρας με την ίδια μέθοδο σε συνδυασμό με μέτρηση της προκύπτουσας κλίσης λόγω της επιβολής γνωστής φόρτισης,, (Azarnejad et al., 1999).

### **3.8 Περιοδική παρακολούθηση**

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

Επειδή οι λεπτομέρειες και οι τεχνικές όλων των εναλλακτικών μεθόδων περιοδικής παρακολούθησης είναι πολύ εκτεταμένες για να καλυφθούν στο σύνολο τους, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρησιμότητα αυτού του υποσυστήματος ΠΔΚ, κυρίως μέσω ενός αριθμού εφαρμογών.

### **3.8.1 Παρακολούθηση μέσω περιβαλλοντικών διεγέρσεων**

Όπως συζητήθηκε στο κεφάλαιο 3.6, οι καταγραφές περιβαλλοντικών διεγέρσεων παρέχουν την χρήσιμη "υπογραφή" της συμπεριφοράς της γέφυρας με την προϋπόθεση ότι οι καταγραφές είναι απαλλαγμένες από τα δυναμικά χαρακτηριστικά εξωτερικών αιτίων διέγερσης. Για παράδειγμα, οι Abe et al., (1999) σχεδίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης της δομικής κατάστασης της κρεμαστής γέφυρας Haukachu από περιβαλλοντικές διεγέρσεις στην βόρεια Ιαπωνία σε περιοχή ενεργούς σεισμικότητας όπου επικρατούσαν ισχυροί άνεμοι. Χρησιμοποίησαν μια στατιστική τεχνική για την αναγνώριση των ιδιομορφών ταλάντωσης από τις καταγραφές. Τονίζεται ότι για την περιοδική παρακολούθηση, τα όργανα θα πρέπει να εγκαθίστανται μόνιμως στην κατασκευή μετά τον προσδιορισμό των κρίσιμων θέσεων.

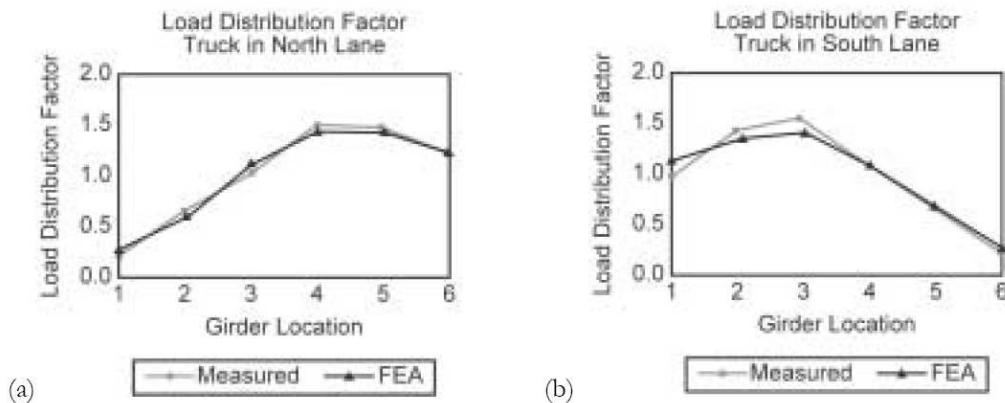
Αν και έχουν ληφθεί καταγραφές από περιβαλλοντικές διεγέρσεις για πολλές γέφυρες διεθνώς, αυτή η τεχνική δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη για την περιοδική παρακολούθηση γεφυρών. Προσπάθεια για την ακριβή αναγνώριση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών δύο σιδηροδρομικών γεφυρών στην Αυστρία αναφέρεται επίσης από τους Weznel & Pichler (1997).

### **3.8.2 Παρακολούθηση μέσω δοκιμών με κυκλοφορία οχημάτων**

Η περιοδική καταγραφή της απόκρισης μιας γέφυρας, όπως οι παραμορφώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αλλαγών στην συμπεριφορά της γέφυρας. Η αναφορά των Mufti et al., (1999) για την παρακολούθηση μιας μεταλλικής δοκού της γέφυρας Salmon River στον Καναδά αποτελεί ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου ΠΔΚ. Όπως αναφέρεται από τους Newhook & Mufti (1996), σε ένα απλά εδραζόμενο άνοιγμα αυτής της γέφυρας ενσωματώνεται μια πλάκα καταστρώματος χωρίς εφελκόμενο οπλισμό (steel – free deck slab). Αυτή η καινοτόμος πλάκα αναπτύσσει την αντοχή της κυρίως μέσω εγκάρσιων μεταλλικών συνδέσμων οι οποίοι εκτείνονται εκτός της πλάκας και είναι συγκολλημένοι στο άνω πέλμα των μεταλλικών δοκών.

Η δομική κατάσταση της γέφυρας στον ποταμό Salmon River παρακολουθούνταν περιοδικά για πέντε χρόνια, υπό την αιγίδα του οργανισμού ISIS του Καναδά. Καθώς στην πλάκα του καταστρώματος αυτής της γέφυρας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η νέα ιδέα της μη χρήσης οπλισμού, ήταν επιθυμητό να παρακολουθηθεί η συμπεριφορά της γέφυρας, καθώς θα μπορούσε να επηρεασθεί από αναπάντεχη φθορά της χωρίς εφελκόμενο οπλισμό πλάκας.

Ενός μέτρο της αποδοτικότητας του συστήματος του καταστρώματος μιας γέφυρας αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται τα φορτία οχημάτων στις δοκούς. Κατά την διάρκεια μικρών διαστημάτων περιοδικής παρακολούθησης της παραπάνω γέφυρας, καταγράφονταν οι παραμορφώσεις των κάτω πελμάτων των μεταλλικών δοκών με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας. Οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων των δοκών, που αντιστοιχούσαν στην διέλευση ενός οχήματος σε κάθε μία από τις δύο λωρίδες κυκλοφορίας καταγράφετο ξεχωριστά. Οι αδιάστατοι συντελεστής κατανομής για τις παραμορφώσεις του κάτω πέλματος προκύπτουν από τη διαίρεση των επιλεγόμενων παραμορφώσεων με αντίστοιχες μέσες παραμορφώσεις των δοκών. Τα διαγράμματα των συντελεστών κατανομής για τις παραμορφώσεις του κάτω πέλματος των δοκών δίνονται στο Σχήμα 3.4 και αντιστοιχούν στη διέλευση οχημάτων στην βόρεια και νότια λωρίδα κυκλοφορίας αντίστοιχα.



Σχ. 3.4 (α) Συντελεστές κατανομής για παραμορφώσεις κάτω πέλματος δοκών λόγω φορτηγού (α) στη βόρεια και (β) στη νότια λωρίδα κυκλοφορίας (από *Newhook & Mufti, 1996*)

Σε αυτά τα διαγράμματα περιλαμβάνονται επίσης οι ίδιοι συντελεστές κατανομής οι οποίοι προέκυψαν από την ανάλυση του φορέα με πεπερασμένα στοιχεία. Κατά την ανάλυση αυτή δεν θεωρήθηκε μείωση της δυσκαμψίας της πλάκας σκυροδέματος λόγω της απουσίας εφελκόμενου οπλισμού. Η πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και υπολογιζόμενων διαγραμμάτων για τους συντελεστές κατανομής επιβεβαιώνει ότι το άοπλο κατάστρωμα συμμετέχει πλήρως στην εγκάρσια κατανομή της φόρτισης μεταξύ των δοκών.

Τα διαγράμματα των συντελεστών κατανομής, παρέχουν μια ακριβή μέτρηση των χαρακτηριστικών κατανομής φόρτισης μιας γέφυρας με δοκούς η οποία επηρεάζεται ταυτοχρόνως από την διαμήκη και εγκάρσια καμπτική δυσκαμψία της γέφυρας. Η πλάκα καταστρώματος συμβάλλει στη διαμήκη δυσκαμψία μέσω της συνδυασμένης λειτουργίας της με τις δοκούς. Η πλάκα καταστρώματος, οι μεταλλικοί σύνδεσμοι και τα εγκάρσια πλαίσια συμβάλλουν ομαδικά στην εγκάρσια καμπτική δυσκαμψία του συστήματος του καταστρώματος. Αν η μορφή του διαγράμματος των παραπάνω εγκάρσιων συντελεστών κατανομής παραμένει αμετάβλητη, τότε μπορεί να συναχθεί με βεβαιότητα ότι στην πλάκα καταστρώματος δεν εμφανίστηκε μείωση της δυσκαμψίας της. Μέσω ενός αριθμού περιοδικών παρατηρήσεων βρέθηκε ότι τα διαγράμματα των συντελεστών κατανομής παρέμειναν τα ίδια για την συγκεκριμένη γέφυρα. Έτσι μέσω της περιοδικής παρακολούθησης επιβεβαιώθηκε η εγκυρότητα της τεχνικής κατασκευής πλακών γεφυρών με τη μέθοδο που επιλέχθηκε.

### 3.8.3 Παρακολούθηση μέσω στατικών δοκιμών

Η στατική δοκιμή είναι ένα σχετικά δαπανηρό εγχείρημα, και για αυτό εφαρμόζεται σπανίως για την περιοδική παρακολούθηση μιας κατασκευής. Μία από τις σπάνιες εφαρμογές αυτής της μεθόδου αποτελεί η περιοδική δοκιμή της γέφυρας Chatham στο Οντάριο. Σε αυτή τη γέφυρα, το κατάστρωμα οπλισμένου σκυροδέματος παρουσίασε φθορές και αντικαταστάθηκε από κατάστρωμα σκυροδέματος χωρίς οπλισμούς (steel – free deck slab) (Ali et al., 1997). Η γέφυρα αυτή ελέγχθηκε δύο φορές από μηχανικούς του τμήματος του Υπουργείου Μεταφορών του Οντάριο. Η πρώτη δοκιμή έγινε πριν την αντικατάσταση του καταστρώματος και η δεύτερη λίγο μετά την αντικατάσταση. Από τις δύο δοκιμές επιβεβαιώθηκε ότι τα χαρακτηριστικά κατανομής της φόρτισης της γέφυρας βελτιώθηκαν μέσω του καταστρώματος χωρίς οπλισμούς.

### 5.4 Παρακολούθηση της διεύρυνσης των ρηγματώσεων

Σε όλα τα στοιχεία σκυροδέματος, με εξαίρεση των πλήρως προεντεταμένων, αναπτύσσονται ρηγματώσεις κατά τα πρώτα στάδια επιβολής υψηλών φορτίσεων. Έως τη σταθεροποίηση της ρηγματώσεως, η συμπεριφορά του στοιχείου σκυροδέματος παραμένει ανελαστική. Μόλις τα ρήγματα παύσουν να διευρύνονται, για ένα συγκεκριμένο σύστημα εφαρμοζόμενων φορτίων, η κατασκευή μεταπίπτει στην ελαστική κατάσταση. Από την άλλη, αν τα ρήγματα συνεχίσουν να διευρύνονται επ' αόριστον, τότε υπάρχουν λόγοι ανησυχίας για τη δομική κατάσταση της

κατασκευής. Για ορισμένα δομικά στοιχεία, η παρακολούθηση της διεύρυνσης των ρηγματών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία μέθοδος ΠΔΚ. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η πλάκα καταστρώματος χωρίς οπλισμούς της παραγράφου 3.8.2.

Όπως αναφέρθηκε από τον Agarwal (1990), σε όλες τις πλάκες καταστρώματος γεφυρών αναπτύσσονται ρηγματώσεις. Ομοίως σε πλάκες καταστρώματων χωρίς οπλισμούς αναπτύσσονται ρηγματώσεις, οι οποίες εκτός από την περίπτωση εφαρμογής ειδικών μέτρων για τον έλεγχο του εύρους τους, τείνουν να είναι λιγότερες και ευρύτερες. Σημειώνεται, ότι σε πέντε από τις πρώτες πλάκες καταστρώματος χωρίς οπλισμούς (Bakht & Mufti, 1998), οι οποίες κατασκευάστηκαν χωρίς τη λήψη μέτρων για τον περιορισμό της ρηγματώσεως, οι ρηγματώσεις είναι σχετικά μεγάλα και εύκολα παρατηρήσιμες. Σε άλλη πλάκα καταστρώματος, όπου εφαρμόστηκαν ειδικές διατάξεις για τον περιορισμό της ρηγματώσεως, δεν διαπιστώθηκαν ρηγματώσεις δια γυμνού οφθαλμού. (Newhook et al., 2000).

Η διεύρυνση των ρηγματώσεων στο κατάστρωμα της γέφυρας Salmon River παρακολουθούνταν περιοδικά. Αυτό γινόταν προκειμένου να επιβεβαιωθεί το γεγονός ότι οι ρηγματώσεις σε πλάκες γεφυρών χωρίς οπλισμούς σταματούν να διευρύνονται μετά τα πρώτα στάδια λειτουργίας της γέφυρας. Οι Mufti et al., (1999) διαπίστωσαν ότι οι ρηγματώσεις σε αυτή τη γέφυρα έχουν παραμείνει αμετάβλητες με την πάροδο του χρόνου.

Αν και η διεύρυνση των ρηγματώσεων σε καταστρώματα γεφυρών χωρίς οπλισμούς γίνεται προς το παρόν χωρίς αυτόματο σύστημα, υπάρχουν σχέδια ανάπτυξης ακουστικών / ηχητικών συστημάτων (με υπερήχους) μέσω των οποίων θα είναι δυνατή η ανίχνευση του πέρατος της διεύρυνσης των ρηγματώσεων.

Πάνω από ένα εγκάρσια ρηγματώση στο κάτω μέρος του καταστρώματος μιας πλάκας χωρίς οπλισμούς, στην γέφυρα Chatham, εκπονήθηκε μία δυναμική δοκιμή. Σε αυτή τη δοκιμή τοποθετήθηκε μία προεξοχή ύψους 30mm κοντά στην θέση του ρήγματος και ένα πλήρως φορτωμένο πενταξονικό όχημα πέρασε πάνω από την προεξοχή. Το άνοιγμα της ρηγματώσεως μετρούνταν μέσω ενός αισθητήρα επιμήκυνσης. Όπως προέκυψε η ρηγματώση άνοιγε κατά την διέλευση πάνω από αυτό του κάθε άξονα του οχήματος φόρτισης. Όμως, βρέθηκε ότι το μεγαλύτερο άνοιγμα της ρηγματώσεως ήταν μικρότερο από 0.002mm. Αναμένεται ότι από παρόμοιες μελλοντικές δοκιμές θα προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα.

#### **3.8.4 Περιοδική παρακολούθηση των επεμβάσεων**

Οι στατικές δοκιμές οι οποίες γίνονται πριν και μετά από επεμβάσεις βοηθούν στην ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων για την αύξηση της δυσκαμψίας μιας κατασκευής. Επί παραδείγματι, ότι οι Stallings et al. (2000) ανέφεραν τέτοιες δοκιμές σε γέφυρα σκυροδέματος με δοκούς μικρού ανοίγματος. Η γέφυρα αυτή ενισχύθηκε μέσω της κόλλησης πλακών πολυμερούς από ανθρακονήματα (CFRP) στο κάτω μέρος και στις πλευρές των δοκών. Από τις δοκιμές φορτίσεων στη γέφυρα αυτή, πριν και μετά τις επεμβάσεις επιβεβαιώθηκε ότι η μείωση των παραμορφώσεων λόγω κινητών φορτίων ήταν οριακή. Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι οι δοκιμές αυτές δεν μπορούν να παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας της γέφυρας λόγω των επεμβάσεων.

Για την επισκευή ενός φθαρμένου κυλινδρικού υποστυλώματος γέφυρας στο Οντάριο, επιλέχθηκε η τεχνική του περιμετρικού εγκιβωτισμού του με καλούπι από υαλοπλισμένο πολυμερές (GFRP), με ίνες κατά τη διεύθυνση της περιφέρειας. Το κενό μεταξύ του σύνθετου υλικού και του υποστυλώματος πληρώθηκε με ρευστό διογκούμενο κονίαμα. Αυτή η τεχνική περιγράφηκε από τους Erki & Agarwal (1995). Αναμενόταν ότι μετά την διόγκωση του κονιάματος θα αναπτύσσονταν ακτινική πίεση στο αλλοιωμένο σκυρόδεμα και θα αυξάνονταν η θλιπτική αντοχή του. Καθώς η ακτινική δύναμη εφαρμόζεται στο παλαιό σκυρόδεμα, αναπτύσσεται περιμετρικός εφελκυσμός στο σύνθετο υλικό. Μέσω της μέτρησης των περιμετρικών παραμορφώσεων στο συνθετικό καλούπι, μπορεί να αποτιμηθεί ποιοτικά η αποτελεσματικότητα της επέμβασης. Για τον σκοπό αυτό, μετά το πέρας των εργασιών, τοποθετήθηκαν δύο μηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης στο σύνθετικό καλούπι σε τρεις διατομές, στη βάση, στο μέσον του ύψους του και στην κορυφή του υποστυλώματος. Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις παρέμειναν σταθερές μετά την ανάπτυξη της

μέγιστης τιμής τους και μειώθηκαν ελαφρώς κατά τις επόμενες δέκα μέρες. Τέτοιες καταγραφές, ενώ είναι πολύ χρήσιμες, σε μερικές περιπτώσεις, χάνουν την αξιοπιστία τους σε περιπτώσεις μακροχρόνιας εφαρμογής επειδή τα μηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης που συγκολλούνται με συνήθεις μεθόδους τείνουν να αποκλίνουν με την πάροδο του χρόνου. Ένα πιο χρήσιμο εργαλείο για τέτοιου τύπου παρακολούθηση αποτελούν τα μηκυνσιόμετρα με οπτικές ίνες μεγάλου μήκους, τα οποία περιγράφονται από τους Tennyson & Mufti (2000).

#### 4. ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

##### 4.1 Θεωρία επεξεργασίας μετρήσεων από ταλαντώσεις κατασκευών

Η ταλάντωση μιας κατασκευής είναι το αποτέλεσμα της διέγερσης της βάσης της ή της ανωδομής της από εξωτερικά αίτια. Τα αναπτυσσόμενα μεγέθη που προκύπτουν από αυτή την ταλάντωση είναι η μετατόπιση, ή ταχύτητα και η επιτάχυνση. Στην περίπτωση απλής ημιτονοειδούς ταλάντωσης αυτά τα μεγέθη προκύπτουν από την απλή εξίσωση της κίνησης:

$$u = U \sin(Kx + \omega t) \quad (4.1)$$

Με την παραγωγή της παραπάνω σχέσης ως προς τον χρόνο προκύπτει η ταχύτητα:

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(Kx + \omega t) \quad (4.2)$$

Με την διαφόριση της παραπάνω σχέσης ως προς τον χρόνο προκύπτει η επιτάχυνση:

$$\ddot{u} = \frac{d\dot{u}}{dt} = -U\omega^2 \sin(Kx + \omega t) \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση που η ημιτονοειδής συνάρτηση γίνει μονάδα οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται σημαντικά και προκύπτουν τα μέγιστα μεγέθη των μεγεθών απόκρισης.

Σε πραγματικές δυναμικές ταλαντώσεις, στις οποίες υπόκειται μια κατασκευή η πραγματική σημειακή χρονοϊστορία της μετατόπισης προκύπτει ως το εμβαδό κάτω από την καμπύλη της χρονοϊστορίας της ταχύτητας. Επίσης η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης προκύπτει από την κλίση της καμπύλης της χρονοϊστορίας της ταχύτητας.

Από την μετατόπιση η οποία προκύπτει από την χρονοϊστορία καταγραφών ενδιαφέρον για τους μηχανικούς παρουσιάζει η καθαρή μετατόπιση της κατασκευής ( $\delta$ ), συνάρτηση της οποίας είναι η αναπτυσσόμενη ένταση στην κατασκευή. Για τον λόγο αυτό η συνολικά καταγραφείσα μετατόπιση ( $x$ ) μειώνεται κατά την μετατόπιση του εδάφους ( $u$ ).

$$\delta = x - u \quad (4.4)$$

Για τον μονοβάθμιο ταλαντωτή η εξίσωση της κίνησης λόγω της ταλάντωσης της βάσης του είναι:

$$m \ddot{x} + c_1 \dot{\delta} + k\delta = 0 \quad (4.5)$$

Στην σχέση (4.5)  $\ddot{x}$  είναι η απόλυτη επιτάχυνση της μάζας  $m$ ,  $c_1$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης,  $\dot{\delta}$  είναι η σχετική ταχύτητα της κατασκευής σε σχέση με το έδαφος,  $k$  είναι η γραμμική δυσκαμψία του μονοβάθμιου ταλαντωτή και  $\delta$  είναι η σχετική μετατόπιση μεταξύ εδάφους και ταλαντούμενης μάζας.

Αντικαθιστώντας την σχέση (4.4) στην (4.5) προκύπτει:

$$m \ddot{\delta} + c_1 \dot{\delta} + k\delta = -m \ddot{u} \quad (4.6)$$

Η φυσική κυκλική συχνότητα για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή χωρίς απόσβεση είναι  $p=(k/m)^{1/2}$ , το κλάσμα της κρίσιμης απόσβεσης  $\beta$  είναι:  $\frac{c_1}{2\sqrt{mk}}$ . Αν η μάζα του μονοβάθμιου ταλαντωτή απομακρυνθεί από την θέση ισορροπίας τότε αυτή δεν θα ταλαντωθεί αλλά θα επιστρέψει σε αυτή, στην περίπτωση κατά την οποία:

$$c_1 = 2\sqrt{mk} \quad (4.7)$$

Υπό αυτή την συνθήκη το σύστημα είναι κρίσιμα αποσβεσμένο. Η φυσική κυκλική συχνότητα για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή με απόσβεση είναι:

$$p_d = p\sqrt{1-\beta^2} \quad (4.8)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω η σχέση (4.6) μετασχηματίζεται σε:

$$\ddot{\delta} + 2\beta p \dot{\delta} + p^2 d = \ddot{u} \quad (4.9)$$

συναρτήσει του ποσοστού της κρίσιμης απόσβεσης  $\beta$ , και της κυκλικής φυσικής συχνότητας,  $p$ . Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων του εδάφους, αναπαριστάται ως  $\ddot{u}(t)$ .

Σύμφωνα με την σχέση (4.9) εάν η αναπόσβεστη φυσική συχνότητα,  $p$ , και το ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης,  $\beta$ , είναι γνωστά, δεν είναι απαραίτητο να ορισθούν οι τιμές της μάζας  $m$ , της δυσκαμψίας  $k$ , και της απόσβεσης της κατασκευής  $c_1$ . Επιπλέον, τα δυναμικά χαρακτηριστικά  $p$  και  $\beta$ , είναι δυνατό να μετρηθούν ακριβώς από μια χρονοϊστορία ελεύθερης ταλάντωσης του κτιρίου παρά να εκτιμηθούν από τις τιμές της μάζας, της δυσκαμψίας και της απόσβεσης τα οποία είναι δύσκολο να προσδιορισθούν ακριβώς.

#### 4.2 Ιδιότητες της κατασκευής από την μετρούμενη απόκριση

Η ιδιοπερίοδος του μονοβάθμιου ταλαντωτή προκύπτει από αποσβεσμένη ιδιοσυχνότητα μέσω της σχέσης:

$$\frac{1}{f_s} = T = \frac{2\pi}{p_d} = \frac{2\pi}{p\sqrt{1-\beta^2}} \quad (4.10)$$

Για μικρές τιμές της απόσβεσης ισχύει η ισότητα:

$$p_d = p\sqrt{1-\beta^2} = 2\pi f_s \sqrt{1-\beta^2} = 2\pi f_s \approx p \quad (4.11)$$

Το κλάσμα της κρίσιμης απόσβεσης μπορεί να προσδιορισθεί από την χρονοϊστορία της ταχύτητας. Αξιοποιείται το τμήμα ταλάντωσης της κατασκευής μετά την παύση της εξωτερικής διέγερσης. Σε αυτό το τμήμα της ελεύθερης ταλάντωσης χρησιμοποιούνται δύο διαδοχικές μέγιστες τιμές της ταχύτητας (η οποία φθίνει) για τον προσδιορισμό της απόσβεσης  $\beta$ , μέσω της σχέσης:

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \left( -\ln \frac{\dot{u}_{n+1}}{\dot{u}_n} \right) \quad (4.12)$$

Κατά την ενοργάνωση μιας κατασκευής πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής θέση και το είδος του δομικού στοιχείου στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας και από τον οποίο προέρχεται η καταγραφή. Αυτό είναι σημαντικό για την κατάστρωση του αναλυτικού προσομοιώματος της κατασκευής, τον προσδιορισμό της ελευθερίας κίνησης για την οποία υπολογίζεται η ιδιοσυχνότητα και για την εκτίμηση της αναπτυσσόμενης έντασης. Οι μετατοπίσεις της ανωδομής της κατασκευής σε σχέση με το έδαφος παράγονται από το ολοκλήρωμα του Duhamel από τις συνολικές καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες επιταχύνσεων της ανωδομής σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:



$$\delta(t) = -\frac{1}{p\sqrt{1-\beta^2}} \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\beta p(t-\tau)} \sin[p_d(t-\tau)] d\tau \quad (4.13)$$

Από την παραπάνω σχέση δίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις του μονοβάθμιου ταλαντωτή, ο οποίος αναπαριστά την κατασκευή. Η σχέση ισχύει για την περίπτωση κατά την οποία η σχετική μετατόπιση ( $\delta$ ) και ταχύτητα της κατασκευής  $\dot{\delta}$  είναι μηδενικές την χρονική στιγμή  $t_0$ . Για τον προσδιορισμό των παραπάνω μετατοπίσεων από αντίστοιχη χρονοϊστορία ταχυτήτων η σχέση μεταξύ  $\delta$  και  $\dot{u}$  είναι:

$$\delta(t) = -\int_0^t \dot{u}(\tau) e^{-\beta p(t-\tau)} \left[ \cos[p_d(t-\tau)] - \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin[p_d(t-\tau)] \right] d\tau \quad (4.14)$$

Απαραίτητη προϋπόθεση για να ισχύει η σχέση αυτή είναι η σχετική μετακίνηση της κατασκευής ( $\delta$ ), η ταχύτητα της κατασκευής ( $\dot{\delta}$ ) και η εδαφική μετατόπιση ( $u$ ), ταχύτητα ( $\dot{u}$ ) και επιτάχυνση ( $\ddot{u}$ ) να είναι μηδενικές την χρονική στιγμή  $t_0$ .

Η χρονοϊστορία των μετατοπίσεων, η οποία προκύπτει από τις σχέσεις (4.14) και (4.15) για μια χρονοϊστορία καταγεγραμμένων επιταχύνσεων και ταχυτήτων, έχει μία μέγιστη τιμή μετατόπισης την  $\delta_{\max}$ . Αν αυτή η μέγιστη μετατόπιση πολλαπλασιαστεί με την φυσική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ( $p$ ) το παραγόμενο είναι ταχύτητα.

$$PV = 2\pi f_s \delta_{\max} = p \delta_{\max} \quad (4.15)$$

Η ταχύτητα αυτή καλείται ψευδοταχύτητα ή ψευδοφασματική απόκριση ταχύτητας. Αυτή η ψευδοταχύτητα είναι η σχετική ταχύτητα της κατασκευής ( $\dot{\delta}$ ), η οποία προσομοιώνεται με μονοβάθμιο ταλαντωτή, στην περίπτωση που η διέγερση για την οποία παράγεται η  $\delta_{\max}$  είναι ημιτονοειδής.

Σε κάθε εδαφική διέγερση αντιστοιχεί ένα φάσμα ψευδοταχυτήτων και αντίστοιχα ένα φάσμα ψευδοεπιταχύνσεων:

$$PA = p^2 \delta_{\max} \quad (4.16)$$

Τα φάσματα αυτά υπολογίζονται για μια ομάδα μονοβάθμιων ταλαντωτών. Η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης κάθε μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι τέτοια ώστε από το σύνολο των θεωρούμενων ταλαντωτών να καλύπτεται ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων ( $p=2\pi f_s$ ) 0.1 – 1000Hz με ικανοποιητικό βήμα. Για κάθε ταλαντωτή προσδιορίζεται η μέγιστη μετατόπιση ( $\delta_{\max}$ ) για την θεωρούμενη εδαφική διέγερση και από αυτή ένα σημείο της φασματικής ψευδοταχύτητας και ένα σημείο της φασματικής ψευδοεπιτάχυνσης από τις σχέσεις (4.15) και (4.16) αντίστοιχα για το  $\delta_{\max}$  κάθε θεωρούμενου ταλαντωτή. Ο υπολογισμός όλων των σημείων της ψευδοταχύτητας και ψευδοεπιτάχυνσης για ολόκληρο το εύρος των ιδιοσυχνοτήτων των θεωρούμενων ταλαντωτών δίνει της αντίστοιχες καμπύλες των ψευδομεγεθών (φασματικές αποκρίσεις). Τα παραπάνω θεωρούμενα ψευδομεγέθη απόκρισης υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.13) – (4.16) και οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται (υπολογίζονται άλλες καμπύλες) για διάφορα ποσοστά της κρίσιμης απόσβεσης  $\beta=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ .

Από τις φασματικές αποκρίσεις των μονοβάθμιων ταλαντωτών από καταγεγραμμένη σεισμική διέγερση προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης, το είδος των εδαφικών χαρακτηριστικών του κοντινού πεδίου και του ευρύτερου πεδίου στην περίπτωση καταγραφής μιας σεισμικής διέγερσης σε πολλές θέσεις. Επίσης μέσω αυτών των φασμάτων είναι

δυνατό να εκτιμηθεί, κτίρια ποιας ιδιοσυχνότητας και ποιών εδαφικών συνθηκών καταπονήθηκαν περισσότερο από την συγκεκριμένη σεισμική διέγερση.

Τα φάσματα απόκρισης των σεισμικών καταγραφών σχεδιάζονται σε τρισσορθογώνια λογαριθμικά διαγράμματα. Οι καμπύλες που προκύπτουν, αρχικά είναι παράλληλες με τον άξονα των μετακινήσεων και στο διάστημα αυτό η απόκριση (του ταλαντωτή για διάφορες αποσβέσεις) παράγεται από την εδαφική μετατόπιση πολλαπλασιασμένη με έναν σταθερό συντελεστή  $A_\delta$ . Στο πέρας του διαγράμματος του φάσματος οι καμπύλες είναι παράλληλες με τον άξονα των επιταχύνσεων και ομοίως καθορίζεται ένας συντελεστής  $A_\alpha$ . Στο ενδιάμεσο διάστημα οι καμπύλες είναι παράλληλες με τον άξονα των ταχυτήτων και με όμοιο τρόπο καθορίζεται ένας συντελεστής  $A_v$ . Επίσης ο σχεδιασμός των φασμάτων απόκρισης γίνεται και σε απλό σύστημα συντεταγμένων. Για το υπολογιζόμενο φάσμα μιας σεισμικής διέγερσης είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ένταση μιας κατασκευής. Ενώ η μεθοδολογία υπολογισμού της έντασης αυτής είναι αρκετά πολύπλοκη για να γίνει αναλυτικά, λόγω της σημαντικής βοήθειας από τα αντίστοιχα διατιθέμενα λογισμικά αυτή εκτελείται με σημαντική ευκολία. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να προηγηθεί ο υπολογισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής: ιδιοσυχνότητες, ιδιοπερίοδοι και ιδιομορφές. Στην περίπτωση πραγματικής κατασκευής η οποία διεγείρεται σε πραγματική σεισμική κίνηση είναι πολύ σημαντική η εκτίμηση των ρεαλιστικών τιμών των παραπάνω μεγεθών. Πράγματι υπάρχουν μια σειρά από παράμετροι, όπως είναι η μάζα, και οι πραγματικές δυσκαμψίες η επιρροή των οποίων πρέπει να συνεκτιμάται με ρεαλιστικές τιμές. Σημαντική βοήθεια στην κατεύθυνση αυτή δίνει η καταγραφή της σεισμικής διέγερσης (ταυτόχρονα με την βάση) στην ανωδομή της κατασκευής. Μέσω της καταγραφής στην βάση και στην ανωδομή της κατασκευής είναι δυνατή η εκτέλεση διαδοχικών αναλύσεων προκειμένου να καθοριστούν μεγέθη οι τιμές των οποίων δεν είναι δυνατό να προσδιορισθούν μονοσήμαντα. Στην περίπτωση καταγεγραμμένης ασθενούς σεισμικής διέγερσης είναι δυνατό να ρυθμιστεί (calibration) το αναλυτικό προσομοίωμα της κατασκευής (δυσκαμψίες δομικών στοιχείων) προκειμένου για την ίδια διέγερση να προκύπτει αναλυτική απόκριση του φορέα κοντά στην καταγεγραμμένη απόκριση της κατασκευής. Το τελικό προϊόν μιας τέτοιας διαδικασίας είναι ένα αναλυτικό προσομοίωμα με ρεαλιστικά χαρακτηριστικά στο οποίο είναι δυνατό να γίνουν περαιτέρω αναλύσεις για ισχυρή σεισμική κίνηση. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά τα οποία υπολογίζονται με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να επαληθευτούν με περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων. Πράγματι από τις καταγραφές της βάσης και της ανωδομής είναι δυνατός ο υπολογισμός των κύριων ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών των κατασκευών. Η απόσβεση υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.12) από την ελεύθερη ταλάντωση της κατασκευής μετά το πέρας της ταλάντωσης του εδάφους. Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μέσω των οποίων αξιοποιούνται τα τμήματα των καταγραφών της βάσης και της ανωδομής των κατασκευών κατά την ισχυρή εδαφική κίνηση. Στις μεθόδους αυτές περιλαμβάνονται συναρτήσεις μεταφοράς (transfer functions) οι οποίες υπολογίζονται από αναλύσεις Fourier των συχνοτήτων. Ουσιαστικά προσδιορίζονται οι απλές αρμονικές ταλαντώσεις από την σύνθεση των οποίων προκύπτει η πραγματική ταλάντωση (η σύνθεση μπορεί να γίνει σε μετατοπίσεις, ταχύτητες ή επιταχύνσεις). Η συνάρτηση συχνότητας Fourier ορίζεται ως:

$$F(p) = \int_0^t \dot{u}(\tau)(\cos p\tau + i \sin p\tau)d\tau \quad (4.17)$$

Το φάσμα πλατών Fourier (FFS) γίνεται:

$$FFS = \left\{ \left[ \int_0^t \dot{u}(\tau) \cos p\tau d\tau \right]^2 + \left[ \int_0^t \dot{u}(\tau) \sin p\tau d\tau \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4.18)$$

Έχει αποδειχθεί ότι το φάσμα συχνοτήτων Fourier ισούται με την φασματική ψευδοταχύτητα στην περίπτωση που θεωρηθεί μηδενική απόσβεση και η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων εισαχθεί ως η

εδαφική κίνηση. Για την περίπτωση που θεωρείται μηδενική απόσβεση,  $\beta=0$ , η σχετική μετατόπιση του μονοβάθμιου ταλαντωτή,  $\delta$ , δίνεται από παρόμοια σχέση με αυτή της σχετικής μετατόπισης, εξίσωση (4.14):

$$\delta(t) = \int_0^t \dot{u}(\tau) \cos p(t-\tau) d\tau \quad (4.19)$$

και μετά από επέκταση η παραπάνω σχέση τροποποιείται σε:

$$\delta(t) = \left[ \int_0^t \dot{u}(\tau) \cos p\tau d\tau \right] \cos pt - \left[ \int_0^t \dot{u}(\tau) \sin p\tau d\tau \right] \sin pt \quad (4.20)$$

Η μέγιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης  $\delta$ , (η οποία συμβαίνει την χρονική στιγμή  $t_{\max} < t$ ), και είναι αυτή η οποία σχεδιάζεται στο φάσμα απόκρισης, δίνεται:

$$|\delta(t)|_{\max} = \left\{ \left[ \int_0^{t_{\max}} \dot{u}(\tau) \cos p\tau d\tau \right]^2 + \left[ \int_0^{t_{\max}} \dot{u}(\tau) \sin p\tau d\tau \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4.21)$$

η οποία είναι η όμοια με τη σχέση (4.18). Στην περίπτωση αυτή η ψευδοταχύτητα προκύπτει από την σχετική μετατόπιση πολλαπλασιασμένη με τον όρο  $K \cdot 2\pi f$ . Ο όρος αναλογικότητας  $K$  χρησιμοποιείται για την συνεκτίμηση της απόσβεσης και προκύπτει ίσος με τη μονάδα για μηδενική απόσβεση και ίσος με  $1/3$  για απόσβεση 5%. Οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής προκύπτουν από τις εξάρσεις στα διαγράμματα των FFS και  $PVRS/2\pi f$  ( $\beta=0\%$ ). Για την εκπόνηση των αναλύσεων τύπου Fourier πρέπει οι καταγραφές να είναι ψηφιοποιημένες σε συχνότητες τουλάχιστον 10 φορές από την αναμενόμενη υψηλότερη συχνότητα της κίνησης για να προκύψουν οι κορυφές των ιδιοσυχνοτήτων με ακρίβεια.

Για την ανάλυση των συχνοτήτων τύπου Fourier εφαρμόζονται οι μετασχηματισμοί αυτού του τύπου σε χρονοϊστορίες διεγέρσεων. Η καταγραφή μετατρέπεται από συνάρτηση του χρόνου σε συνάρτηση συχνοτήτων. Κατόπιν υπολογίζονται τα τετράγωνα των συναρτήσεων συχνότητας για την εδαφική κίνηση,  $|F(\omega)|^2$  και για την απόκριση της κατασκευής  $|G(\omega)|^2$ . Η επιρροή των απευθείας εισαγόμενων ταλαντώσεων του εδάφους στην κατασκευή μειώνονται διαιρώντας τον όρο  $|G(\omega)|^2$  με τον όρο  $|F(\omega)|^2$ , για κάθε συχνότητα και προκύπτει ο λόγος  $|H(\omega)|^2$ . Από την παρατήρηση του διαγράμματος της συνάρτησης  $|H(\omega)|^2$  συναρτήσει της συχνότητας προκύπτουν επίσης οι κύριες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Το σφάλμα που ενδέχεται να εισέρχεται στην περίπτωση αυτή προκύπτει από την πιθανότητα διαίρεσης χαμηλών τιμών της συνάρτησης  $|G(\omega)|^2$  με πολύ χαμηλότερες τιμές της συνάρτησης  $|F(\omega)|^2$  και να προκύψουν υψηλές τιμές της συνάρτησης  $|H(\omega)|^2$  οι οποίες να μην αντιστοιχούν σε πραγματικές ιδιοσυχνότητες. Οι εσφαλμένες αυτές εξάρσεις της συνάρτησης  $|H(\omega)|^2$

εξαλείφονται με την πρόσθεση μιας σταθερής τιμής (low-amplitude noise) ταυτόχρονα στην εδαφική συνάρτηση  $|F(\omega)|^2$  και στην συνάρτηση απόκρισης της κατασκευής  $|G(\omega)|^2$ .

π.χ.  $\frac{0.5}{0.1} = 5$  και  $\frac{5}{1} = 5$  με την πρόσθεση της σταθερής τιμής οι δύο παραπάνω σχέσεις γίνονται:  $\frac{0.5+1}{0.1+1} = 1.4$  και  $\frac{5+1}{1+1} = 3$  περίπτωση κατά την οποία υποβιβάζεται σαφώς η εσφαλμένη τιμή και ελαφρώς η ορθή τιμή.

Από τον σχεδιασμό του διαγράμματος  $|H(\omega)|^2$  συναρτήσει της συχνότητας  $\omega$ , προκύπτει η απόσβεση μέσω της σχέσης:

$$\beta \approx \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_p} \approx \frac{f_2 - f_1}{2f_p} \quad (4.22)$$

Στην παραπάνω σχέση  $\omega_p$  είναι η θεμελιώδης συχνότητα της κατασκευής και  $\omega_1$  και  $\omega_2$  είναι οι συχνότητες του διαγράμματος που προκύπτουν για μείωση της τιμής της συνάρτησης  $|H(\omega)|^2$  στο  $1/\sqrt{2}$  της τιμής της. Εναλλακτικά οι  $\omega_1$  και  $\omega_2$  ορίζονται ως οι συχνότητες που αντιστοιχούν σε μείωση της συνάρτησης  $|H(\omega)|^2$  στο  $1/2$  της τιμής της. Επίσης προτείνεται για την απόσβεση η σχέση:

$$\beta \approx \frac{A}{2} \left( 1 - \frac{3}{8} A^2 \right) \quad (4.23)$$

όπου στην παραπάνω σχέση ισχύει:

$$A = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 + \omega_1^2} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (4.24)$$

Για μικρές τιμές της απόσβεσης οι εξισώσεις (4.22) και (4.23) συμπίπτουν, όταν η δεσπόζουσα συχνότητα  $\omega_p$ , βρίσκεται συμμετρικά μεταξύ των  $\omega_1$  και  $\omega_2$ .

Από τους μετασχηματισμούς Fourier προκύπτει το φάσμα πυκνότητας ισχύος (PSD) για κάθε καταγραφή. Διαιρώντας το PSD των καταγραφών της ανωδομής με το PSD της καταγραφής του εδάφους (χωριστά για κάθε κατεύθυνση) εξαλείφεται η επιρροή της εδαφικής κίνησης. Στις καμπύλες PSD της ανωδομής διαιρείται η κάθε τιμή με την μέγιστη απόκριση και προσδιορίζεται η τετραγωνική ρίζα. Οι τιμές οι οποίες προκύπτουν είναι οι ιδιοτιμές των ιδιομορφών που παριστάνονται.

Ενώ είναι αρκετά σπάνιο να καταγραφεί πραγματική σεισμική διέγερση σε ενοργανωμένη κατασκευή, καθώς απαιτούνται αρκετές ενοργανώσεις ανωδομών σε διάφορες θέσεις (γεωγραφικά), είναι δυνατό να εφαρμοσθεί η παραπάνω μεθοδολογία, τοπικά σε περιοχές μικρής έκτασης, μετά από ισχυρό σεισμό. Στην περίπτωση αυτή αξιοποιούνται οι μετασεισμοί που ακολουθούν τα επόμενα 24ωρα οι οποίοι ενδέχεται να είναι αρκετοί. Για τον λόγο αυτό καλό είναι να διατίθενται δύο με τρία φορητά συστήματα ενοργάνωσης τα οποία θα αξιοποιούνται για ενοργανώσεις κατασκευών κατά τους μετασεισμούς μιας ισχυρής σεισμικής κίνησης.

### 4.3 Περιγραφή της επεξεργασίας καταγραφής

Σε μια καταγεγραμμένη χρονοϊστορία της απόκρισης μιας κατασκευής σε διέγερσή της, από εξωτερικά αίτια, είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών με τα σύγχρονα διατιθέμενα

λογισμικά. Γίνεται εισαγωγή της καταγεγραμμένης χρονοϊστορίας στο λογισμικό και με κατάλληλη εντολή είναι δυνατός ο καθαρισμός της καταγραφής από τυχόν εισερχόμενο θόρυβο. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα FFT και PSD.

Με τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT) για μια σεισμική καταγραφή  $X_n$  η οποία συντίθεται από  $N$  (δύναμη του 2) σημεία, το πλάτος Fourier ορίζεται:

$$|F(f_k)| = \Delta |X_k|, k=0,1,2,\dots,N/2 \quad (4.25)$$

όπου,

$f_k = k/(N\Delta) = \text{συχνότητα}$

$\Delta = \text{διάστημα μεταξύ ψηφιακών καταγραφών}$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} = \text{διακριτός μετασχηματισμός Fourier} \quad (4.26)$$

Το φάσμα πυκνότητας ισχύος, Power Spectral Density (PSD) υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$G_{xx}(f_k) = \frac{2}{n_d N \Delta t} \sum_{i=1}^{n_d} |X_i(f_k)|^2, k=1,2,3,\dots,N/2 \quad (4.27)$$

όπου,

$N = \text{πλήθος των σημείων τα οποία συνθέτουν την καταγραφή}$

$\Delta t = \text{Διάστημα των σημείων (1/βήμα δείγματος)}$

$n_d = \text{Πλήθος καταγραφών}$

$$X_i(f_k) = \Delta t X_{ik} = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_{in} \exp\left[-\frac{j2\pi kn}{N}\right] = \text{FFT} \quad (4.28)$$

$f_k = k/(N\Delta t) = \text{Συχνότητα}$

Στη συνέχεια μετά από ειδική επεξεργασία υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης (υπολογισμός αδιόρθωτων τιμών χρονοϊστορίας V1 και διορθωμένων τιμών V2 για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης). Κατόπιν ειδικής επεξεργασίας (υπολογισμός V3 για τον καθορισμό των παραμέτρων οι οποίες θα επηρεάσουν τον προσδιορισμό των φασμάτων απόκρισης) υπολογίζονται οι φασματικές επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετακινήσεις τόσο σε χωριστά διαγράμματα όσο και σε τριστοθωγάνιο σύστημα συντεταγμένων. Από τα υπολογιζόμενα μεγέθη είναι δυνατός ο υπολογισμός (βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.2) ιδιοσυχνοτήτων και ιδιοτιμών των ιδιομορφών (οι οποίες ενεργοποιήθηκαν από την εξωτερική διέγερση) της κατασκευής.

## 5. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ

Τα τελευταία χρόνια εκπονείται διεθνώς σημαντικού βαθμού έρευνα στον τομέα της ανάπτυξης αναλυτικών τεχνικών για την ανίχνευση βλαβών κατασκευών μέσω της καταγραφής της απόκρισής τους σε ταλαντώσεις. Αρχικά η ΠΔΚ μέσω ταλαντώσεων εφαρμόζονταν στην αεροδιαστημική και στην μηχανολογία. Οι ερευνητικές μελέτες για την εφαρμογή των μεθόδων ΠΔΚ μέσω ταλαντώσεων σε κατασκευές αντικειμένου Πολιτικού Μηχανικού είναι πιο πρόσφατες. Οι Doebling et al., (1996) παρέχουν μία εκτενή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας πάνω σε αυτό το θέμα. Ειδικότερα οι Farrar et al. (1994) έχουν ανασκοπήσει τη βιβλιογραφία σχετικά με τις δοκιμές ταλάντωσης και την ανίχνευση βλαβών σε γέφυρες.

Έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος από διαφορετικές αναλυτικές τεχνικές για την αναγνώριση βλαβών από ανιχνεύσιμες αλλαγές των δυναμικών χαρακτηριστικών κατασκευών. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι:

- μεθοδολογίες που βασίζονται στην μεταβολή των ιδιοσυχνοτήτων
- μεθοδολογίες που βασίζονται στο παραμένον ιδιομορφικό διάλυμα
- μεθοδολογίες που βασίζονται στην μεταβολή της καμπυλότητας των ιδιομορφών
- μεθοδολογίες που βασίζονται στην αναθεώρηση του μητρώου δυσκαμψίας της κατασκευής

Οι παραπάνω μέθοδοι δεν είναι οι μοναδικές που εφαρμόζονται. Για παράδειγμα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που βασίζονται στον καθορισμό κάποιου δείκτη βλάβης, στη μεταβολή της μετρούμενης ευκαμψίας και στην μεταβολή της προκύπτουσας δυσκαμψίας. Μία συνοπτική παρουσίαση των γενικών αρχών των σχετικών μεθοδολογιών παρουσιάζεται παρακάτω.

### 5.1 Ανίχνευση βλαβών βασισμένη στη μεταβολή των ιδιοσυχνοτήτων

Η μείωση των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων συντονισμού δείχνει ότι έχει αναπτυχθεί βλάβη στην κατασκευή. Πρακτικά, το παραπάνω αποτελεί ανίχνευση βλάβης σε πρώτο επίπεδο (για τα διάφορα επίπεδα διάγνωσης βλάβης δεξ παρ. 1.1.2). Οι Cawley & Adams (1979) απέδειξαν ότι μέσω του καθορισμού του λόγου μεταβολής σε δύο ιδιοσυχνότητες, είναι δυνατή η αναγνώριση της θέσης και της σφοδρότητας της βλάβης. Για παράδειγμα θεωρήστε την ιδιομορφική εξίσωση:

$$K\varphi_i = \lambda_i M\varphi_i \quad (5.1.1)$$

Στην εξίσωση αυτή  $K$  είναι το μητρώο δυσκαμψίας,  $\varphi_i$  είναι η  $i$  ιδιομορφή,  $\lambda_i$  είναι η αντίστοιχη ιδιοτιμή ( $\omega^2$ ) και  $M$  είναι το μητρώο μάζας. Οποιαδήποτε βλάβη της κατασκευής μπορεί να μεταβάλει είτε το μητρώο δυσκαμψίας είτε/και μάζας, με αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών. Η ιδιομορφική εξίσωση για την κατασκευή με βλάβες γράφεται:

$$(K + \delta K)(\varphi_i + \delta\varphi_i) = (\lambda_i + \delta\lambda_i)(M + \delta M)(\varphi_i + \delta\varphi_i) \quad (5.1.2)$$

Υποθέτοντας ότι λόγω της βλάβης δεν μεταβάλλεται το μητρώο μάζας, ότι τα  $\delta K$  και  $\delta M$  είναι μικρά και αγνοώντας τα φαινόμενα δεύτερης τάξης προκύπτει:

$$(K\varphi_i - \lambda_i M\varphi_i) + (K - \lambda_i M)\delta\varphi_i + \delta K\varphi_i - \delta\lambda_i M\varphi_i = 0 \quad (5.1.3)$$

Η έκφραση στην πρώτη παρένθεση είναι μηδενική λόγω της σχέσης (5.1.1). Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της σχέσης (5.3) με  $\Phi_i^T$  και επειδή  $\varphi_i^T (K - \lambda_i M)$  είναι η αντίστροφη της σχέσης (5.1.1) και άρα μηδενική, προκύπτει:

$$\delta \lambda_i = \frac{\phi_i^T \delta K \phi_i}{\phi_i^T M \phi_i} \quad (5.1.4)$$

Ας υποθεθεί ότι οι πρώτες (κύριες) ιδιοτιμές και ιδιομορφές της κατασκευής χωρίς βλάβες έχουν καθορισθεί είτε μέσω ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία της κατάστασης χωρίς βλάβες είτε μέσω ιδιομορφικών δοκιμών. Στην κατασκευή με τις βλάβες πρέπει να γίνει ιδιομορφική δοκιμή για τον προσδιορισμό της μεταβολής των ιδιοτιμών των πρώτων ιδιομορφών. Έστω  $\delta\lambda_i$  είναι η μεταβολή μεταξύ της  $i$  ιδιοτιμής της κατασκευής με βλάβες, η οποία προέκυψε από ιδιομορφική δοκιμή, και της ιδιοτιμής της κατασκευής χωρίς βλάβες όπως προέκυψε από ανάλυση ή δοκιμή. Έστω  $\delta\lambda_j$  η αντίστοιχη τιμή για την  $j$  ιδιοτιμή. Επιλέξτε μια πιθανή περιοχή βλάβης στην κατασκευή και υποθέστε ότι το πεπερασμένο στοιχείο  $r$  αντιπροσωπεύει αυτή την περιοχή. Λόγω της βλάβης στην κατασκευή η δυσκαμψία αυτού του στοιχείου μειώθηκε από  $k^r$  σε  $\alpha k^r$  έτσι ώστε:

$$\delta K = (\alpha - 1)k^r \quad (5.1.5)$$

Εισάγοντας την τιμή  $\delta K$  από τη σχέση (5.1.5) στη σχέση (5.1.4) προσδιορίζεται ο όρος  $\delta\lambda_i$  και παρόμοια ο όρος  $\delta\lambda_j$  και στις δύο περιπτώσεις συναρτηθεί της άγνωστης παραμέτρου ( $\alpha$ ). Ο λόγος  $\delta\lambda_i/\delta\lambda_j$  είναι πλήρως καθορισμένος και ανεξάρτητος από το ( $\alpha$ ). Στην περίπτωση που η περιοχή βλάβης που επιλέχθηκε είναι σωστή τότε ο λόγος  $\delta\lambda_i/\delta\lambda_j$  πρέπει να είναι ίσος ή κοντά στον λόγο  $\delta\lambda_i/\delta\lambda_j$ .

Στη διεθνή βιβλιογραφία επισημαίνονται μερικοί περιορισμοί στις μεθόδους ανίχνευσης βλαβών οι οποίες βασίζονται στην μεταβολή των ιδιοσυχνοτήτων. Όπως προέκυψε από διάφορες εφαρμογές, ακόμη και για μεγάλη μείωση στην δυσκαμψία ενός δομικού στοιχείου προκύπτουν μικρές αλλαγές στις ιδιοσυχνότητες. Επί παραδείγματι, η μείωση κατά 50% της δυσκαμψίας σε τμήμα μήκους δύο μέτρων μιας δοκού, προξένησε μείωση κατά 7% στην θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα. Αντίστοιχα η μείωση της δυσκαμψίας κατά 15% οδήγησε σε μείωση της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας κατά 1.36%. Αλλαγές αυτού του μεγέθους ενδέχεται να αποκρύπτονται από τον θόρυβο των μετρήσεων και από περιβαλλοντικές επιδράσεις. Οι Farar et al., (1996a, b) κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα κατά την εκπόνηση δοκιμών σε γέφυρα με πλάκα επί δοκών σε αυτοκινητόδρομο των ΗΠΑ.

Με την μέθοδο αλλαγής της συχνότητας που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι δυνατή η σωστή ανίχνευση βλαβών, μόνο στην περίπτωση κατά την οποία αυτή είναι συγκεντρωμένη σε μία θέση. Βλάβες κατανεμημένες σε μεγάλο μήκος της κατασκευής δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Επιπροσθέτως, όταν η κατασκευή είναι συμμετρική, υπάρχει αμφιβολία στην αναγνώριση της θέσης της βλάβης. Επίσης, η εκτίμηση του βαθμού της βλάβης δεν είναι ακριβής στις περιπτώσεις μεγάλης βλάβης.

## 5.2 Ανίχνευση βλαβών βάσει του παραμένουτος ιδιομορφικού διανύσματος

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών της κατασκευής με βλάβες. Η ιδιομορφική εξίσωση για την κατασκευή με βλάβες είναι:

$$(K + \delta K)\phi_{di} - \lambda_{di}M\phi_{di} = 0 \quad (5.2.1)$$

Στη σχέση αυτή  $\phi_{di}$  είναι η  $i$  ιδιομορφή της κατασκευής με βλάβες,  $\lambda_{di}$  είναι η σχετική ιδιοτιμή και θεωρείται ότι λόγω της βλάβης δεν μεταβάλλεται το μητρώο μάζας.

Στη σχέση αυτή όλες οι ποσότητες εκτός της  $\delta K$ , είναι γνωστές ή έχουν καθορισθεί από ιδιομορφική δοκιμή. Η σχέση αυτή εναλλακτικά γράφεται στην παρακάτω μορφή:

$$K\phi_{di} - \lambda_{di}M\phi_{di} = R_i = -\delta K\phi_{di} \quad (5.2.2)$$

Από την εκτίμηση του αριστερού μέλους αυτής της σχέσης προκύπτει το παραμένον ιδιομορφικό διάνυσμα (modal residual vector) της  $i$  ιδιομορφής. Το μητρώο  $\delta K$  θα έχει μη μηδενικούς όρους οι οποίοι θα αντιστοιχούν μόνο στους βαθμούς ελευθερίας που συνδέονται στο στοιχείο με βλάβες. Αντίστοιχα, οι μη μηδενικοί όροι στο  $R_i$  θα αντιστοιχούν στους ίδιους βαθμούς ελευθερίας. Η γνώση αυτών των βαθμών ελευθερίας και της σχέσης συνδεσμολογίας μεταξύ των στοιχείων και των βαθμών ελευθερίας, επιτρέπει τον καθορισμό της θέσης της βλάβης. Όταν καθορίζονται πάνω από μία ιδιομορφές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απόλυτη τιμή του αθροίσματος των παραμενόντων ιδιομορφικών διανυσμάτων για τον καθορισμό της θέσης της βλάβης. Όταν χρησιμοποιείται η απόλυτη τιμή του αθροίσματος, οι ιδιομορφές πρέπει να κανονικοποιούνται καταλλήλως, ώστε έτσι ώστε τα διακριτά στοιχεία των διαφόρων ιδιομορφών να έχουν την ίδια τάξη μεγέθους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ορθογωνοποίησης των ιδιομορφών ως προς τη μάζα.

Έχοντας εντοπίσει τα στοιχεία με βλάβες, είναι δυνατό να εκφρασθεί το  $\delta K$  ως το σταθμισμένο άθροισμα των μητρώων δυσκαμψίας των στοιχείων με βλάβες. Οι συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι οι άγνωστοι του προβλήματος, καθορίζουν το βαθμό της βλάβης στα βλαμμένα στοιχεία. Για παράδειγμα, αν η μεταβληθείσα δυσκαμψία σε ένα στοιχείο  $j$  είναι  $a_j k_j$  τότε προκύπτει:

$$\delta K = \sum_j k_j (\alpha_j - 1) \quad (5.2.3)$$

Στη σχέση αυτή η άθροιση γίνεται για όλα τα στοιχεία με βλάβη. Ορίζοντας ως  $\beta_j = 1 - \alpha_j$  η σχέση (5.2.2) γίνεται:

$$\left( \sum_j \beta_j k_j \right) \phi_{di} = -R_i \quad (5.2.4)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία προσδιορίζονται πάνω από μία ιδιομορφές, αντί της σχέσης (5.2.4) χρησιμοποιείται η:

$$\sum_i \left| \left( \sum_j \beta_j k_j \right) \phi_{di} \right| = \sum_i |R_i| \quad (5.2.5)$$

Οι σχέσεις (5.2.4) και (5.2.5) μπορεί να επιλυθούν για τον προσδιορισμό των τιμών των συντελεστών  $\beta_j$ . Γενικώς, θα προκύψει πάνω από μία τιμή για κάθε έναν από τους συντελεστές  $\beta_j$ . Από τις διαφορετικές τιμές υπολογίζεται η μέση τιμή για να προκύψει η βέλτιστη εκτίμηση.

Στη μέθοδο αυτή απαιτείται ένα προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία της κατασκευής χωρίς βλάβες και η μέτρηση των ιδιομορφών της κατασκευής με βλάβες. Στην πραγματικότητα πρέπει να μετρούνται οι ιδιομορφικές μετατοπίσεις σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας του αναλυτικού προσομοιώματος και συμπεριλαμβανομένων και αυτών που βρίσκονται κοντά στην περιοχή της βλάβης. Οι τυχόν στροφικοί βαθμοί ελευθερίας, είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν στην πράξη. Οι στροφές μπορούν να προκύψουν από τις μετρούμενες μετατοπίσεις με της μεθόδου κεντρικών διαφορών (central difference) ή των συναρτήσεων παρεμβολής τρίτου βαθμού (cubic splines).



### 5.3 Ανίχνευση βλαβών βασισμένη στην καμπυλότητα των ιδιομορφών

Μέσω της αλλαγής της καμπυλότητας των ιδιομορφών μπορεί να ανιχνευθεί η θέση μιας βλάβης σε μια κατασκευή που παραμορφώνεται κυρίως καμπτικά. Η καμπυλότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της καμπτικής δυσκαμψίας όπως προκύπτει από την παρακάτω γνωστή σχέση:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (5.3.1)$$

στη σχέση αυτή ο όρος  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$  είναι η καμπυλότητα στη θέση  $x$ . Λόγω της εμφάνισης βλάβης η καμπτική δυσκαμψία μειώνεται και η καμπυλότητα αυξάνει σε αυτή τη θέση. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η ανίχνευση της θέσης της βλάβης μέσω της σύγκρισης των καμπυλοτήτων πριν και μετά τη βλάβη.

Η καμπυλότητα των ιδιομορφών προκύπτει από τις μετρηθείσες συνιστώσες μετατόπισης της ιδιομορφής μέσω της χρήσης της παρακάτω σχέσης κεντρικών διαφορών (central difference):

$$\frac{\phi_i^{k+1} - 2\phi_i^k + \phi_i^{k-1}}{h^2} \quad (5.3.2)$$

όπου όροι  $k-1$ ,  $k$  και  $k+1$  δηλώνουν τις θέσεις μέτρησης των μετατοπίσεων και οι όροι  $X_{k+1} - X_k = X_k - X_{k-1} = h$  και  $\phi_i^k$  είναι η ιδιομορφική μετατόπιση στη θέση  $k$  για την  $i$  ιδιομορφή. Αυτή η σχέση πρέπει να τροποποιηθεί στην αρχή του ανοίγματος της γέφυρας, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία εξίσωση προωθημένων διαφορών (forward difference) και στο τέλος του ανοίγματος όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία εξίσωση προς τα πίσω διαφορών (backward difference). Εναλλακτικά της μεθόδου των διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθούν καμπύλες παρεμβολής τρίτου βαθμού που ταιριάζουν στις μετρημένες μετατοπίσεις. Η καμπυλότητα προκύπτει κατόπιν ως η δεύτερη παράγωγος της χρησιμοποιηθείσας καμπύλης.

Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό της θέσης της βλάβης αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του βαθμού της βλάβης. Επίσης η εφαρμογή αυτής της μεθόδου περιορίζεται σε γέφυρες οι οποίες μπορούν να προσομοιωθούν ως σύνολο γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων.

### 5.4 Ανίχνευση βλαβών βάσει μεθοδολογιών αναθεώρησης μητρώων

Οι μεθοδολογίες αυτές αποτελούν την μεγαλύτερη κατηγορία μεθόδων αναγνώρισης βλαβών μέσω των μετρούμενων δυναμικών χαρακτηριστικών. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στον καθορισμό των μεταβολών στα μητρώα ιδιοτήτων μιας κατασκευής (matrix update), όπως το  $\delta K$ , οι οποίες ικανοποιούν την ιδιομορφική εξίσωση (5.2.1). Οι μεταβολές που αναγνωρίζονται παρέχουν εκτίμηση τόσο της θέσης όσο και του βαθμού της βλάβης. Γενικώς το πλήθος των αγνώστων παραμέτρων στο μητρώο  $\delta K$  είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πλήθος των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών. Για το λόγο αυτό το πρόβλημα είναι αόριστο και έχει άπειρο αριθμό λύσεων. Για να προκύψει μία μόνο λύση απαιτείται η ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης-στόχου η οποία πρέπει να υπόκειται σε καθορισμένους περιορισμούς. Για τον λόγο αυτό οι μέθοδοι αυτές κατατάσσονται βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης που επιλέγεται και των περιορισμών που χρησιμοποιούνται.

Πολλές διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Αυτές περιλαμβάνουν το μέτρο (norm) της εκτιμώμενης λύσης, την τάξη του μητρώου διακύμανσης (perturbation matrix)  $\delta K$ , το μέτρο του παραμένοντος ιδιομορφικού διανύσματος  $R_i$ , κλπ. Οι περιορισμοί μπορεί να περιλαμβάνουν την ικανοποίηση της ιδιομορφικής εξίσωσης και τη διατήρηση της δομής (sparsity / connectivity) των μητρώων ιδιοτήτων. Επιπροσθέτως, ο όρος  $\beta_j$  πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος με το μηδέν και μικρότερος από τη μονάδα. Λόγω των πολλών διαφορετικών δυνατοτήτων ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης-στόχου και των αντίστοιχων περιορισμών καθώς επίσης και λόγω των διαφορετικών αριθμητικών τεχνικών που μπορούν να

εφαρμοσθούν για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι ανίχνευσης βλαβών βάσει της μεθόδου ενημέρωσης των μητρώων.

Εναλλακτικά, παρουσιάζεται ενδεικτικά παρακάτω μία άλλη μεθοδολογία που βασίζεται στην αναθεώρηση μητρώων.

Υποθέστε ότι οι ιδιομορφές μιας κατασκευής χωρίς βλάβες ορθοκανονικοποιούνται ως προς τη μάζα. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (5.1.4) γίνεται:

$$\delta \lambda_i = \phi_i^T \delta K \phi_i \quad (5.4.1)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την ευαισθησία της ιδιοτιμής σε αλλαγή του μητρώου δυσκαμψίας. Ο όρος  $\delta K$  μπορεί να γραφεί ως:

$$\delta K = - \sum_{j=1}^n \beta_j k_j \quad (5.4.2)$$

Στη σχέση αυτή  $n$  είναι το πλήθος των στοιχείων και  $k_j$  είναι η δυσκαμψία του  $j$  στοιχείου. Αντικαθιστώντας τη σχέση (5.4.2) στη (5.4.1) προκύπτει:

$$\delta \lambda_i = - \sum_{j=1}^n \phi_i^T k_j \phi_i \beta_j \quad (5.4.3\alpha)$$

ή

$$D\beta = -\delta\lambda \quad (5.4.3\beta)$$

Στη σχέση αυτή το  $D$  το είναι ένα μητρώο διαστάσεων  $m \times n$  με στοιχεία  $d_{ij} = \phi_i^T k_j \phi_i$ , το  $\beta$  είναι το  $n$ -άνυσμα των αγνώστων μεταβολών στο μητρώο δυσκαμψίας των στοιχείων και  $\delta\lambda$  είναι το  $m$ -άνυσμα των μεταβολών των ιδιοτιμών που μετρήθηκαν. Στην περίπτωση κατά την οποία  $m=n$  η εξίσωση (5.4.3β) μπορεί να λυθεί απευθείας ως προς το  $\beta$  και δίνει:

$$\beta = -D^{-1}\delta\lambda \quad (5.4.4)$$

Γενικά όμως, το  $m$  είναι μικρότερο από το  $n$  οπότε το πρόβλημα που ορίζεται από την εξίσωση (5.4.3β) είναι αόριστο και έχει άπειρο αριθμό λύσεων. Προκειμένου να προκύψει μια μοναδική λύση ελαχιστοποιείται το δευτεροβάθμιο μέτρο (quadratic norm) των μεταβολών δυσκαμψίας που δίνονται από τη σχέση:

$$J = \beta^T \beta \quad (5.4.5)$$

με τον περιορισμό ότι η εξίσωση (5.4.3β) πρέπει να ικανοποιείται. Στην περίπτωση που αυτοί είναι οι μόνοι περιορισμοί, το πρόβλημα έχει κλειστή λύση η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\beta = -D^T(DD^T)^{-1}\delta\lambda \quad (5.4.6)$$

Η μεθοδολογία αυτή είναι επίσης χρήσιμη για τον επανακαθορισμό του αναλυτικού προσομοιώματος, της χωρίς βλάβες κατασκευής, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι αναλυτικά

εκτιμώμενες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ταυτίζονται με αυτές που προσδιορίστηκαν πειραματικά. Το επανακαθορισμένο αναλυτικό προσομοίωμα χρησιμοποιείται κατόπιν ως βάση για τον καθορισμό της βλάβης.

Για μία κατασκευή με βλάβες, πρέπει να θεωρηθεί ο παρακάτω επιπρόσθετος περιορισμός για τις μεταβολές της δυσκαμψίας:

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (5.4.7)$$

Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση γίνεται πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης με την συνάρτηση αντικειμενικότητας που ορίζεται από την εξίσωση (5.4.4), τους ισοτικούς περιορισμούς που δίνονται από την εξίσωση (5.4.3β) και τους ανισοτικούς περιορισμούς που δίνονται από την εξίσωση (5.4.7).

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας πρέπει να προκύπτει για το  $\beta$  τιμή μικρότερη από τη μονάδα (δες εξ. (5.4.7)). Αν κατά την επίλυση αγνοηθούν (για λόγους ευκολίας) οι περιορισμοί ανισότητας (5.4.7), το  $\beta$  μπορεί να προκύψει αρνητικό δηλώνοντας μια μικρή αύξηση δυσκαμψίας σε κάποια στοιχεία. Αυτό φυσικά δεν είναι ρεαλιστικό, αλλά αν η αρνητική τιμή του  $\beta$  προκύπτει πολύ μικρή, τότε μπορεί να αγνοηθεί. Σε αντίθετη περίπτωση, μπορούν να προκύψουν καλύτερες εκτιμήσεις μέσω της επιβολής όλων των καταναγκασμών ανισότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ενός από τους πολλούς αλγόριθμους που διατίθενται για την επίλυση προβλημάτων δευτεροβάθμιας μη γραμμικής βελτιστοποίησης με καταναγκασμούς. Το λογισμικό Matlab διαθέτει πολλά προγράμματα για αυτό τον σκοπό.

## **6. ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ - ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ**

### **6.1 Εγκατάσταση αισθητήρων**

Ο τρόπος εγκατάστασης των αισθητήρων είναι πολύ σημαντικός για την ορθή καταγραφή των μεγεθών μέτρησης. Ανάλογα με την χρήση τους οι αισθητήρες αγκυρώνονται πάνω στις κατασκευές και τα υλικά με διάφορες μεθόδους. Λόγω της υψηλής σημασίας της εγκατάστασης των αισθητήρων, οι εταιρείες παραγωγής τους, παράγουν κατάλληλα υλικά και προτείνουν την καταλληλότερη μέθοδο αγκύρωσης. Για τον λόγο αυτό οι μετρητές δύναμης (load shells) παρέχονται ενσωματωμένοι σε ειδικές διατάξεις οι οποίες προσαρμόζονται εύκολα στα σημεία που είναι επιθυμητό να μετρηθεί η δύναμη. Ομοίως οι εταιρείες παραγωγής ταινιών μέτρησης παραμορφώσεων, παράγουν ρητίνες κόλλησης των ταινιών αυτών, η καταλληλότητα των οποίων για εφαρμογή στα προϊόντα που παράγουν έχει ελεγχθεί και πιστοποιηθεί εργαστηριακά. Τονίζεται σε αυτή την περίπτωση ότι ειδικά για τις ταινίες μέτρησης επιμηκύνσεων η ποιότητα των μετρήσεων είναι συνάρτηση της κατάλληλης προεργασίας και προετοιμασίας της επιφάνειας στην οποία θα τοποθετηθεί η ταινία. Εξίσου σημαντική, για την επιτυχία των μετρήσεων, είναι η πιστή εφαρμογή των οδηγιών (εξωτερική πίεση και χρόνος πήξης κόλας) που δίνει η εταιρεία παραγωγής. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις αισθητήρων (LVDT, ταχυτητόμετρα, επιταχυνσιόμετρα) η ενδεικνυόμενη μέθοδος εγκατάστασης είναι αυτή με μηχανικά μέσα. Πράγματι οι παραπάνω μετρητές εφαρμόζονται πολλές φορές σε διάφορες κατασκευές (ο ίδιος αισθητήρας) και για τον λόγο αυτό η μέθοδος εγκατάστασης πρέπει να επιτρέπει την εύκολη πολλαπλή εφαρμογή. Στην περίπτωση αυτή ως καταλληλότερη μέθοδος εγκατάστασης ενδείκνυται η μέθοδος με μηχανικά μέσα. Μέσω αυτής της μεθόδου διανοίγονται οπές στην κατασκευή και η αγκύρωση του αισθητήρα γίνεται μέσω κοχλιών και πλαστικών ή μεταλλικών οδηγιών. Είναι σημαντικό στην περίπτωση αυτή, κατά την αγκύρωση του αισθητήρα να βιδώνονται οι κοχλίες με τέτοιο τρόπο ώστε ο αισθητήρας να έχει σημαντική πρόσφυση με το υλικό της κατασκευής έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται ταλαντώσεις στον αισθητήρα διαφορετικές από τις ταλαντώσεις της κατασκευής. Απαιτείται προσοχή στην

σύσφιξη των κοχλιών αγκύρωσης του αισθητήρα, καθώς στην περίπτωση ύπαρξης ανωμαλιών στην επιφάνεια εγκατάστασης ενδέχεται να αναπτυχθούν βλάβες στο όργανο. Δεν ενδείκνυται η χρήση σιλικόνης για την εγκατάσταση των αισθητήρων καθώς αυτή δρα ως αποσβεστήρας μεταξύ κατασκευής και οργάνου. Επίσης η σιλικόνη χάνει τις συγκολλητικές της ιδιότητες στην περίπτωση ενοργανώσεων κατασκευών για μεγάλο χρονικό διάστημα σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος.

Προκειμένου να υπάρχει ευελιξία στην εγκατάσταση των αισθητήρων σε κατασκευές διάφορων υλικών (π.χ. σκυρόδεμα, μεταλλική κατασκευή) και στην εγκατάσταση των αισθητήρων σε διάφορες διευθύνσεις παρέχονται ειδικές βάσεις αγκύρωσης. Είναι δυνατή η κόλληση των βάσεων αυτών σε μεταλλικές κατασκευές με ειδικές ρητίνες. Μετά την αποκόλληση των βάσεων αυτών είναι δυνατός ο καθαρισμός τους ακόμη και με μηχανουργική επεξεργασία. Στην περίπτωση απευθείας τοποθέτησης του αισθητήρα στην κατασκευή θα υπήρχαν σημαντικά περιορισμένες δυνατότητες ως προς την μέθοδο αγκύρωσης και την διεύθυνση τοποθέτησης. Κατά την προμήθεια των αισθητήρων πρέπει να ελέγχεται η δυνατότητα μέτρησης και τοποθέτησης των οργάνων και στις τρεις διευθύνσεις στην περίπτωση που αυτό είναι επιθυμητό.

## 6.2 Προενίσχυση και ενίσχυση σήματος

Τα όργανα που περιγράφηκαν παραπάνω, μετατρέπουν τα χαρακτηριστικά του μετρούμενου μεγέθους (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, παραμόρφωση, θερμοκρασία) σε ηλεκτρικό σήμα. Πολύ συχνά αυτό το σήμα έχει πολύ χαμηλή τάση ή ισχύ και για αυτόν τον λόγο πριν την μετατροπή του στο επιθυμούμενο μέγεθος και την αποθήκευσή του ενδέχεται να πρέπει να ενισχυθεί προκειμένου να αυξηθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Ο ενισχυτής πρέπει να έχει αντίσταση εισαγωγής σαφώς μεγαλύτερη από την αντίσταση εξόδου του οργάνου, προκειμένου να μην τραβάει πολύ ρεύμα από τον αισθητήρα (διάταξη μετατροπής μετρούμενου μεγέθους σε μεταβολή τάσης, transducer), έτσι ώστε να μην προκαλείται απώλεια της ευαισθησίας ή της γραμμικότητας. Ο ενισχυτής πρέπει να έχει εύρος συχνοτήτων υψηλότερο από τον αισθητήρα.

Ένας προενισχυτής εισάγεται στο κύκλωμα μέτρησης καταγραφής για δύο κυρίως λόγους: (1) για την ενίσχυση ασθενούς εξαγόμενου σήματος και (2) για να μετατρέπει την υψηλή σύνθετη αντίσταση του αισθητήρα σε χαμηλότερη. Οι προενισχυτές χρησιμοποιούνται πριν την μεταβίβαση του σήματος στον ενισχυτή προκειμένου να ξεπεραστούν απώλειες ή να αυξηθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο στον καταγραφέα.

Υπάρχουν δύο τύποι ενισχυτών: (1) οι ενισχυτές με ευαισθησία στην φόρτιση και (2) οι ενισχυτές με ευαισθησία στην τάση. Στην πρώτη περίπτωση οι ενισχυτές είναι ευαίσθητοι στην μεταβολή του φορτίου στην έξοδο των αισθητήρων (π.χ. πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιόμετρων). Επίσης οι ενισχυτές αυτοί δεν επηρεάζονται από μικρές αλλαγές στο μήκος των καλωδίων μεταξύ του καταγραφέα και του ενισχυτή. Δεν απαιτείται ρύθμιση (calibration) του ενισχυτή βάσει του ακριβούς μήκους καλωδίου που χρησιμοποιείται στην εργασία πεδίου. Για τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ενισχυτές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται στην περίπτωση πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιόμετρων.

Οι ενισχυτές τάσης χρησιμοποιούνται στην περίπτωση piezoresistive επιταχυνσιόμετρων και ταινιών μέτρησης παραμόρφωσης (strain gauges). Στην δεύτερη περίπτωση ο ενισχυτής είναι μέρος μιας συσκευής ρύθμισης σήματος (signal conditioner). Το εξαγόμενο ρεύμα ενός ενισχυτή τάσης είναι συνάρτηση της μεταβολής τάσης που εισάγεται. Τέτοιου τύπου ενισχυτές είναι απλούστεροι στην κατασκευή, περιέχουν λιγότερα εξαρτήματα και είναι φθηνότεροι από τους ενισχυτές φορτίου. Τα δύο κύρια μειονεκτήματα των ενισχυτών αυτού του τύπου είναι: (1) Όταν χρησιμοποιούνται, ολόκληρο το σύστημα είναι ευαίσθητο στις αλλαγές της χωρητικότητας των καλωδίων (π.χ. μήκος). Για τον λόγο αυτό, τα χαρακτηριστικά του συστήματος δίνονται για συγκεκριμένο μήκος καλωδίων. (2) Η αντίσταση εισαγωγής ενός ενισχυτή τάσης δεν είναι πάντα αμελητέα και επηρεάζει την απόκριση του συστήματος καταγραφής σε πολύ μικρές συχνότητες. Οι ενισχυτές τάσης χωρίζονται σε ενισχυτές συνεχούς ρεύματος (dc) και ενισχυτές εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στις σύγχρονες διατάξεις ενοργάνωσης οι διατάξεις προενίσχυσης και ενίσχυσης του σήματος παρέχονται μαζί με το υπό προμήθεια σύστημα ή είναι προσαρμοσμένο στην συσκευή καταγραφής – τροφοδοσίας. Συνιστάται να προτιμώνται αυτές οι περιπτώσεις καθώς ολοκληρωμένα συστήματα

είναι ρυθμισμένα και βαθμονομημένα προκειμένου να έχουν την βέλτιστη απόδοση. Σε αυτή την περίπτωση ενσωματώνονται τεχνικές σύμφωνα με τις οποίες πολλά μειονεκτήματα αντιμετωπίζονται με κατάλληλες διατάξεις.

### 6.3 Καλώδια

Τα ιδανικά καλώδια και βύσματα πρέπει να είναι ηλεκτρικά «αόρατα». Δεν πρέπει δηλαδή να επηρεάζουν το σήμα. Δυστυχώς, αν δεν ληφθούν μέτρα, το επηρεάζουν. Τα καλώδια έχουν δύο χαρακτηριστικά, την αντίσταση ανά μονάδα μήκους και την χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους. Συχνά, μόνο η χωρητικότητα επισημαίνεται στον αγωγό, καθώς η αντίσταση είναι συνάρτηση της διαμέτρου του αγωγού. Τρεις τύποι ηλεκτρικών καλωδίων χρησιμοποιούνται συνήθως: (1) κοινό καλώδιο ηλεκτρικής διάταξης, (2) ομοαξονικό καλώδιο, (3) μονωμένα καλώδια πολλών αγωγών.

Στην περίπτωση (1) τα καλώδια έχουν πλαστική ή ελαστική μόνωση. Αυτά τα καλώδια χρησιμοποιούνται σε μικρά μήκη (π.χ. μηκυνσίόμετρα) και είναι φθηνά. Χρησιμοποιούνται επίσης ως γραμμές ρεύματος. Τα καλώδια αυτά, δεν είναι καλό να συνδέουν εξοπλισμό σε μεγάλες αποστάσεις, στην περίπτωση κατά την οποία η συχνότητα του ρεύματος είναι σημαντική παράμετρος, καθώς στην περίπτωση αυτή συλλέγονται ποικίλοι ηλεκτρικοί θόρυβοι.

Το ομοαξονικό καλώδιο περιέχει έναν ή περισσότερους αγωγούς ρεύματος, οι οποίοι περιβάλλονται από μονωτή αγωγιμότητας. Ο μονωτής αγωγιμότητας γειώνεται προκειμένου να μειωθεί ο ηλεκτροστατικός θόρυβος. Ο μονωτής αγωγιμότητας παρέχει μια συνεχή γείωση για ολόκληρη την μετρητική διάταξη.

Μόνο μονωμένα καλώδια πολλών αγωγών πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συστήματα μέτρησης διεγέρσεων προκειμένου να αποφευχθούν παρεμβολές στο σήμα από παρασιτικό ηλεκτρικό σήμα (θόρυβος). Ο θόρυβος αυτό ενδέχεται να εισάγεται από σύζευξη χωρητικότητας, μαγνητική σύζευξη ή σύζευξη ρεύματος. Ο θόρυβος από σύζευξη χωρητικότητας προκύπτει από την παρουσία ποικίλων ηλεκτροστατικών πεδίων μεταξύ των αγωγών που είναι συζευγμένοι ηλεκτρικά. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η σύζευξη, ο αγωγός του σήματος πρέπει να είναι προστατευμένος συνεχώς και το υλικό προστασίας πρέπει να συνδέεται στην θύρα “input common” του ενισχυτή. Ο μαγνητικά συζευγμένος θόρυβος προκαλείται από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στην γεινιάζουσα περιοχή του αγωγού σήματος. Για να αποφευχθεί τέτοιο πρόβλημα, τα καλώδια πρέπει να έχουν κατά το δυνατό μικρότερο μήκος και τα καλώδια τροφοδοσίας ρεύματος πρέπει να διατηρούνται μακριά από τα καλώδια μεταφοράς σήματος. Επιπλέον, οι αγωγοί μεταφοράς ρεύματος πρέπει να είναι περιτυλιγμένοι με τους αγωγούς επιστροφής ρεύματος. Μέσω αυτής της μεθόδου τα μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από τους δύο αγωγούς σχεδόν αλληλοεξουδετερώνονται. Ο θόρυβος που προκαλείται από σύζευξη ρεύματος παράγεται από κυκλώματα γείωσης «ground loops», όταν ο αισθητήρας και ο ενισχυτής γειώνονται χωριστά. Για να αποφευχθούν τα κυκλώματα γείωσης, πρέπει να υπάρχει μόνο ένα σημείο γείωσης, κατά προτίμηση πάνω στον ενισχυτή σήματος.

### 6.4 Καταγραφείς

Ως καταγραφείς, παλαιότερα χρησιμοποιούνταν συσκευές οι οποίες με κατάλληλη διάταξη κατέγραφαν το μετρούμενο μέγεθος συνεχώς. Αυτά τα όργανα λόγω της συνεχούς καταγραφής ονομάζονταν αναλογικά. Ως παράδειγμα αναφέρεται η χρήση ειδικής ταινίας (film) πάνω στην οποία αποτυπώνονταν το ίχνος από δέσμη φωτός. Η δέσμη φωτός ταλαντώνονταν ανάλογα με το μετρούμενο μέγεθος (π.χ. ταχύτητα ή επιτάχυνση) και η χρονοϊστορία της ταλάντωσης αποτυπώνονταν στην ειδική για τον σκοπό αυτό ταινία. Η καταγραφή στην ειδική αυτή ταινία (film) εμφανίζονταν με ειδική διαδικασία, παρόμοια με την διαδικασία εμφάνισης φωτογραφιών. Με την χρήση ψηφιοποιητή (digitizer) γινόταν η αριθμοποίηση της καταγραφής για περαιτέρω αξιοποίηση (π.χ. εισαγωγή ως δεδομένο σε διάφορα λογισμικά). Η ψηφιοποίηση γινόταν σε ειδική τράπεζα όπου αφού οριζόνταν το σύστημα αξόνων λαμβάνονταν κατάλληλες τιμές του φωτογραφημένου σήματος. Η επίπονη αυτή διαδικασία έχει αλλάξει και απλοποιηθεί σημαντικά στην σύγχρονη εποχή. Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια λόγω των υψηλών δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών εξοπλισμών (hardware) και των αντίστοιχων λογισμικών (software) καταγράφονται μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται ψηφιακά καθώς παρέχουν αυτόματα τις καταγραφές σε

ψηφιακή μορφή και έτοιμες για προεπεξεργασία, εφαρμογή – χρήση και μετεπεξεργασία. Το σημαντικό αρχικό μειονέκτημα απώλειας αιχμών στους ψηφιακούς καταγραφείς λόγω προκαθορισμένου βήματος καταγραφής, σε σχέση με τα αντίστοιχα αναλογικά όργανα, έχει μειωθεί σημαντικά σήμερα λόγω της δυνατότητας που υπάρχει για τον καθορισμό πυκνού βήματος καταγραφής (πάνω από 200 καταγραφές το δευτερόλεπτο στα συνήθη όργανα). Δηλαδή η καμπύλη μεταβολής ενός μετρούμενου μεγέθους στο χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου αναπαριστάται από 200 σημεία.

Οι καταγραφείς ουσιαστικά δέχονται την μεταβολή της τάσης του ρεύματος που έρχεται από τον αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή του ρεύματος μετατρέπεται σε μονάδες μετρούμενου μεγέθους ανάλογα με τον συντελεστή ρύθμισης (calibration factor) που έχει προκαθοριστεί στον καταγραφέα μέσω του λογισμικού ρύθμισης της καταγραφής. Η τιμή αυτή αποθηκεύεται στο μέσο αποθήκευσης που διαθέτει ο καταγραφέας. Το μέσο αποθήκευσης είναι δυνατό να αποτελείται από μόνιμο δίσκο (hard disc) ή αφαιρούμενο δίσκο (floppy disk ή flash card). Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένας καταγραφέας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή οποιουδήποτε μεγέθους, καθώς σε κάθε περίπτωση αυτός δέχεται μια μεταβολή τάσης από τον αισθητήρα και είναι δυνατός ο προκαθορισμός της αντιστοιχίας μεταβολής τάσης – μεταβολής μετρούμενου μεγέθους (μέσω του λογισμικού). Η διαδικασία όμως δεν είναι τόσο απλή. Πράγματι η εξειδίκευση των καταγραφών είναι τόσο μεγάλη, όπου πλέον οι καταγραφείς παράγονται για την συλλογή συγκεκριμένων μετρήσεων (π.χ. μόνο παραμόρφωση, μόνο ταχύτητα, μόνο επιτάχυνση). Αυτό συμβαίνει επειδή οι καταγραφείς είναι μία σύνθεση από διάφορα άλλα όργανα τα οποία απαιτούνται για την συλλογή μετρήσεων. Στους σύγχρονους καταγραφείς είναι ενσωματωμένη η συσκευή τροφοδοσίας ρεύματος, η συσκευή μετασχηματισμού και μείωσης της τάσης (π.χ. από 220V εναλλασσόμενο σε 12V συνεχές), ο τυχόν απαιτούμενος ενισχυτής του σήματος που επιστρέφει από τον αισθητήρα, συσκευή αποστολής των δεδομένων μέσω γραμμών δικτύου (modem), συσκευή δορυφορικού χρόνου, βύσματα και διακόπτες λειτουργίας. Επίσης τα βύσματα εξόδου της τάσης και εισαγωγής του σήματος του αισθητήρα είναι διαμορφωμένα βάσει των απαιτήσεων των αισθητήρων και έχουν τάση εξόδου και τάση σήματος εξαγωγής προσαρμοσμένη στο αντίστοιχο όργανο το οποίο παράγει η εταιρεία. Αναφέρεται ότι αισθητήρες μέτρησης του ίδιου μεγέθους συχνά απαιτούν διαφορετικά βύσματα σύνδεσης στον καταγραφέα και τάση λειτουργίας. Αυτό κρίνεται ως λογικό, αν αναλογιστεί κανείς τους διαφορετικούς τύπους αισθητήρων που υπάρχουν για το ίδιο μέγεθος (π.χ. πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, επιταχυνσιόμετρα τύπου «piezoresistive» ή επιταχυνσιόμετρα μεταβλητής χωριτικότητας). Επίσης οι καλωδιώσεις είναι διαφορετικές σε κάθε περίπτωση αισθητήρα και καταγραφέα.

Στους τελευταίου τύπου καταγραφείς είναι δυνατή η σύνδεση αρκετών μονοαξονικών αισθητήρων (συνήθως 12 με 16 όργανα) ή ακόμη και η σύνδεση αρκετών τριαξονικών οργάνων (σε διαφορετικό καταγραφέα ανά περίπτωση). Για την βέλτιστη αξιοποίηση των καταγραφών υπάρχουν μια σειρά από λειτουργίες οι οποίες επιτυγχάνονται μέσω του λογισμικού ή μέσω συνδεσμολογίας και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αναφέρεται ότι ένα δωδεκάκαναλο καταγραφικό μπορεί να διασυνδεθεί με άλλα παρόμοια καταγραφικά και να παρέχουν καταγραφές «ταυτόχρονα» από περισσότερα όργανα (π.χ. 48 μονοαξονικά αισθητήρια). Ο όρος «ταυτόχρονα» τονίζεται, καθώς είναι πολύ σημαντικό για την ορθή αξιοποίηση των καταγραφών για τον προσδιορισμό των π.χ. δυναμικών χαρακτηριστικών της εντοπιζόμενης κατασκευής, οι μετρήσεις να γίνονται σε πραγματικά κοινό χρόνο. Μέσω του λογισμικού δίνονται πληροφορίες στον καταγραφέα για την θύρα σύνδεσης του αποθηκευτικού μέσου ή του υπολογιστή ρύθμισης, το πλήθος των καταγραφών που θα συλλέγονται στην μονάδα του χρόνου, τον τύπο και το πλήθος των αισθητήρων που είναι συνδεδεμένοι σε κάθε είσοδο, τον συντελεστή αναγωγής της μεταβολής τάσης του αισθητήρα σε μετρούμενο μέγεθος, τις αντίστοιχες μονάδες μετατροπής, το μέγεθος απόκρισης πάνω από το οποίο θα αρχίσει η καταγραφή, τα κανάλια για τα οποία θα ενεργοποιείται η καταγραφή του συστήματος, το χρονικό εύρος το οποίο θα καταγράφεται πριν και μετά από την «καταγραφή έναρξης» της αποθήκευσης. Επίσης μέσω του λογισμικού είναι δυνατός ο έλεγχος της καλής λειτουργίας του συστήματος με την διενέργεια δοκιμαστικών παλμών και τον έλεγχο της καταγραφής του από κάθε κανάλι.

Για τον έλεγχο των δυνατοτήτων του καταγραφέα εκτός από τα παραπάνω εκτιμώνται επίσης μια σειρά από δυνατότητες όπως το δυναμικό εύρος (dynamic range, π.χ. 114dB, 200 καταγραφές το δευτερόλεπτο 0-50Hz RMS noise/RMS clip). Σημαντική παράμετρος ακόμη, για τον έλεγχο της ποιότητας του καταγραφέα αποτελεί η ανάλυση των καταγραφών. Συνήθης ανάλυση αποτελούν τα 16 – 19 bit, ενώ στους υψηλής τεχνολογίας καταγραφείς επιτυγχάνονται αναλύσεις καταγραφής μέχρι 24bit. Σε αυτές τις περιπτώσεις το όφελος που προκύπτει στην ανάλυση των καταγραφών δεν είναι της τάξης του 150 – 130% αλλά σημαντικά μεγαλύτερο καθώς η βελτίωση που επέρχεται στις δύο περιπτώσεις είναι εκθετική.

Το κυρίως ζητούμενο από ένα σύστημα ενοργάνωσης – καταγραφής είναι οι μετρήσεις. Πρέπει να είναι δυνατή η μορφοποίηση αυτών των μετρήσεων σύμφωνα με διάφορους τύπους (format). Αυτό έχει εξέχουσα σημασία προκειμένου να είναι δυνατή η επεξεργασία των μετρήσεων με διάφορα άλλα λογισμικά. Ως απλούστερη μορφοποίηση των καταγραφών και ευρέως διαδεδομένη είναι αυτή του αρχείου τύπου ASCII.

### **6.5 Ενοργάνωση κατασκευών – Διάταξη αισθητήρων**

Η διάταξη των αισθητήρων σε ένα πρόβλημα ενοργάνωσης μιας κατασκευής είναι πολύ σημαντική εργασία. Σε απλές και μικρού εύρους σχετικά κατασκευές η διάταξη των αισθητήρων κατά τέτοιο τρόπο ώστε, από τις μετρήσεις, να προκύπτουν με απλή επεξεργασία τα ζητούμενα δυναμικά χαρακτηριστικά είναι εύκολη υπόθεση και προκύπτει από απλές γνώσεις δυναμικής. Σε σύνθετες και μεγάλου εύρους κατασκευές, για την ορθή διάταξη των αισθητήρων, απαιτούνται προκαταρκτικές αναλύσεις. Στη φάση σχεδιασμού της ενοργάνωσης ελαστικές δυναμικές αναλύσεις με ιδιομορφές αρκούν για την λήψη των αποφάσεων σχετικά με την θέση και την διεύθυνση λειτουργίας του κάθε αισθητήρα. Στις αναλύσεις αυτές πρέπει να προσομοιώνεται η κατασκευή με σημαντική ακρίβεια. Με τον όρο ακρίβεια περιλαμβάνονται προσομοιώσεις της γεωμετρίας και των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής (σκυρόδεμα, δομικός χάλυβας), των διαθέσιμων βαθμών ελευθερίας και της διαφραγματικής λειτουργίας. Στην διαφραγματική λειτουργία εισάγονται ως ελευθερίες κίνησης οι δύο μεταφορικές συνιστώσες στην οριζόντια διεύθυνση και η στρέψη του διαφράγματος γύρω από κατακόρυφο άξονα. Επίσης πρέπει να προσομοιώνονται κατάλληλα οι άκαμπτες ζώνες στα άκρα των δομικών στοιχείων (υποστυλωμάτων, δοκών κλπ). Από προσομοιώσεις της ελαστικής απόκρισης κατασκευών προκύπτουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι ιδιομορφές ταλάντωσης των φορέων. Παρόμοιες προσομοιώσεις και αναλύσεις γίνονται και για φορείς γεφυρών για τους οποίους υπάρχουν καταγραφές της απόκρισής τους σε δυναμικές φορτίσεις.

Η πρώτη ταξινόμηση, που γίνεται από τις αναλύσεις, αφορά στον τύπο των ιδιομορφών ταλάντωσης και στον καθορισμό ποιες από αυτές είναι μεταφορικές και ποιες στρεπτικές. Η δεύτερη ταξινόμηση αφορά στον καθορισμό των ιδιομορφών που είναι σημαντικές. Στην περίπτωση αυτή ελέγχεται η μάζα η οποία ενεργοποιείται σε κάθε ιδιομορφή και γίνεται κατάταξη κατά φθίνουσα σειρά. Προφανώς δεν είναι δυνατό να επιδιωχθεί η εύρεση όλων των διαθέσιμων ιδιομορφών από τις καταγραφές. Είναι ρεαλιστικότερο να γίνει ανίχνευση των κυριότερων ιδιομορφών (πρώτων τριών ή τεσσάρων) βάσει της μάζας που ενεργοποιείται από την ανάλυση. Από τις επιλεγμένες, από την ανάλυση, ιδιομορφές οι οποίες εκτιμάται ότι θα προσεγγιστούν από την επεξεργασία των καταγραφών καθορίζονται οι θέσεις των αισθητήρων. Μια πρώτη διάταξη προκύπτει από την θεώρηση ότι πρέπει να τοποθετηθεί ένας αισθητήρας ανά διεύθυνση στο κέντρο μάζας της κατασκευής. Αν ο φορέας είναι κτίριο τοποθετείται ένα ζευγάρι αισθητήρων ανά όροφο. Οι υπόλοιποι αισθητήρες τοποθετούνται (σύμφωνα με τις κύριες θεωρούμενες ιδιομορφές και το πλήθος των διαθέσιμων αισθητήρων) στην περίμετρο επιλεγμένων ορόφων.

Για τις περιπτώσεις γεφυρών πολλαπλών ανοιγμάτων τοποθετείται ένας αισθητήρας κατά την διεύθυνση του κάθε ανοίγματος, και τριάδες αισθητήρων στις στηρίξεις και στα ανοίγματα. Στις περιπτώσεις περιορισμένου αριθμού αισθητήρων επιλέγεται μία τριάδα αισθητήρων σε κάθε στήριγμα και μία τριάδα αισθητήρων στο άνοιγμα. Στην περίπτωση ύπαρξης διαθέσιμων οργάνων ενδέχεται να τοποθετηθούν τριάδες αισθητήρων και σε θέσεις μεταξύ ανοίγματος και στήριξης. Κάθε τριάδα αισθητήρων διατάσσεται έτσι ώστε να μετρούνται οι κατακόρυφες ταλαντώσεις από δύο αισθητήρες στα άκρα του καταστρώματος και οι οριζόντιες ταλαντώσεις του καταστρώματος

από έναν αισθητήρα. Στην περίπτωση ύπαρξης εφεδράνων τοποθετούνται αισθητήρες πριν και μετά το εφέδρανο. Επίσης είναι πολύ σημαντική η τοποθέτηση αισθητήρων στη βάση των βάθρων και στην περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα εντός του εδάφους.

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη για μεγάλο αριθμό αισθητήρων στην περίπτωση μέτρησης μιας γέφυρας με πολλά ανοίγματα. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο επιστημονικά αποδεκτές λύσεις. Η κάθε λύση είναι συνάρτηση του αιτίου για το οποίο μετράται η απόκριση της γέφυρας. Στην περίπτωση μέτρησης μιας γέφυρας σε σεισμική φόρτιση είναι ορθό να μετράται από πολλούς αισθητήρες η απόκριση του φορέα. Για τον λόγο αυτό είναι σκόπιμο να εννοργανώνεται η γέφυρα με μερικούς πολυκαναλικούς καταγραφείς, διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Αυτό γίνεται επειδή ενδέχεται στην περιοχή να εκδηλωθεί ένας με δύο σεισμούς καθ' όλη τη διάρκεια της εννοργάνωσης. Στην περίπτωση μέτρησης της απόκρισης μιας γέφυρας από περιβαλλοντολογικές διεγέρσεις (π.χ. άνεμος) ή δυναμικά φορτία οχημάτων η ταλάντωση του φορέα της γέφυρας είναι συνεχής. Σημαντική οικονομία στους αισθητήρες επιτυγχάνεται με την προοδευτική εννοργάνωση διατομών της γέφυρας. Στην περίπτωση αυτή διατηρείται μία τριάδα οργάνων σταθερή σε μία διατομή (διατομή αναφοράς) και οι υπόλοιπες τριάδες αισθητήρων εφαρμόζονται σε διάφορες θέσεις. Είναι σημαντικό να καθορισθεί κατά πόσο υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ανοιγμάτων ή όχι (φορέας με συνεχείς δοκούς ή αμφιέριστα ανοίγματα). Στην περίπτωση γεφυρών με αμφιέριστα ανοίγματα η τριάδα των αισθητήρων αναφοράς πρέπει να μετακινείται σε κάθε άνοιγμα και να επαναλαμβάνονται οι εγκαταστάσεις των κινούμενων οργάνων. Στα σύγχρονα λογισμικά επεξεργασίας των καταγραφών υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού των καταγραφών των αισθητήρων αναφοράς και των καταγραφών των αισθητήρων, η θέση των οποίων μεταβάλλεται.

Ο καθορισμός του μέγιστου και του ελάχιστου μεγέθους το οποίο είναι δυνατό να μετρηθεί από τον αισθητήρα είναι συνάρτηση του μεγέθους της εξωτερικής διέγερσης που ενδέχεται να αναπτυχθεί. Για τον λόγο αυτό πρέπει να προκαθορισθεί η δράση που αναμένεται να ταλαντώσει την κατασκευή (περιβαλλοντική διέγερση, άνεμος, κυκλοφορούντα οχήματα ή σεισμική διέγερση) και αναλόγως να επιλεγούν οι αισθητήρες. Με τα ίδια κριτήρια γίνεται η επιλογή του μεγέθους από την υπέρβαση του οποίου θα γίνει έναρξη της καταγραφής (threshold trigger). Στην περίπτωση που είναι επιθυμητό είναι δυνατό να αρχίσει καταγραφή ανά πάσα στιγμή με εξωτερική εντολή του χρήστη του συστήματος για το επιθυμητό χρονικό διάστημα.

Με παρόμοια λογική με αυτή των αισθητήρων επιταχύνσεων και ταχυτήτων γίνονται οι εννοργάνσεις κατασκευών με άλλους αισθητήρες. Σε κάθε περίπτωση συνιστάται να γίνονται προκαταρκτικές αναλύσεις και ο εκ των προτέρων σχεδιασμός του προγράμματος εννοργάνωσης για την αποδοτικότερη και ορθολογικότερη αξιοποίηση των καταγραφών.

## **6.6 Παρελκόμενες εγκαταστάσεις – Μέτρα προστασίας**

Για την εννοργάνωση κατασκευών ενδέχεται να απαιτηθούν μέτρα για την ορθή εγκατάσταση του συστήματος αισθητήρια – καλώδια – καταγραφέας. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η παροχή συνήθους ηλεκτρικού ρεύματος (220V, 50Hz). Δεν απαιτείται υψηλής ισχύς του ρεύματος για τα καταγραφικά συστήματα. Ενώ είναι εύκολο να επιλεγούν αισθητήρες ικανοί να λειτουργούν σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος, ο καταγραφέας συνήθως χρειάζεται προστασία. Στην περίπτωση αυτή ενδείκνυται η κατασκευή μεταλλικού κιβωτίου, με θυρίδες καλωδίων και εξαερισμού και κλειδαριά ασφαλείας. Στις θυρίδες αυτές δεν πρέπει να εισέρχονται νερά της βροχής. Στο κιβώτιο συνιστάται να κατασκευάζεται υπερυψωμένο μεταλλικό δάπεδο με οπές. Οι καλωδιώσεις των αισθητήρων δεν πρέπει να διέρχονται από το κατάστρωμα της γέφυρας. Λόγω της ανάγκης τοποθέτησης αισθητήρων στα άκρα του καταστρώματος ενδέχεται να απαιτηθεί η τοποθέτηση καλωδίου κάτω από τον φορέα της γέφυρας μέχρι το απέναντι άκρο. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι αισθητήρες τοποθετούνται στα άκρα των ειδικά διαμορφωμένων πεζοδρομίων σύμφωνα με τον σχεδιασμό που έγινε στην προκαταρκτική φάση.

Οι καλωδιώσεις, λόγω του μεγάλου μήκους τους έχουν σημαντικό βάρος. Για τον λόγο αυτό δεν είναι σωστό να αναρτώνται αυτές από τα βύσματα σύνδεσης στους αισθητήρες και στον καταγραφέα καθώς υπάρχει περίπτωση να γίνει βλάβη ή αποσύνδεση. Στην περίπτωση αυτή κατά



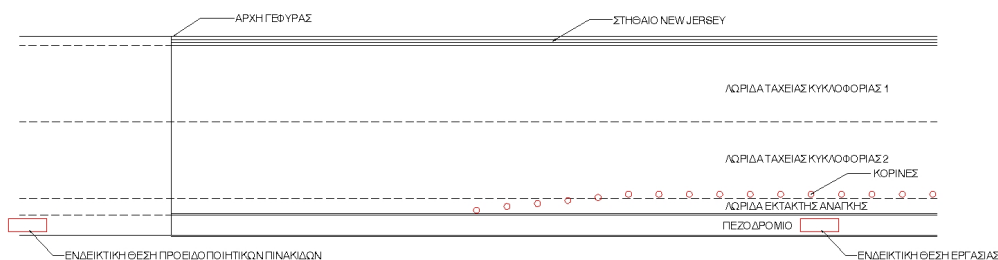
μήκος των καλωδίων σύνδεσης των αισθητήρων τοποθετούνται πλαστικοί σύνδεσμοι αναρτημένοι από την κατασκευή. Εκτός των άλλων συνδέσμων απαιτείται πλαστικός σύνδεσμος στην αρχή και στο πέρας του καλωδίου.

Στις περιπτώσεις που πρέπει να τοποθετηθούν αισθητήρες στις κεφαλές των βάθρων γεφυρών και στο κάτω μέρος των δοκών του καταστρώματος πρέπει να κατασκευάζεται ασφαλής προστατευόμενη διάβαση (συνήθως μεταλλική κατασκευή), μετά από μελέτη μηχανικού. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό προτείνεται η χρήση οχήματος επιθεώρησης γεφυρών για την εγκατάσταση των αισθητήρων και των απαιτούμενων καλωδίων.

Στην περίπτωση που πρέπει να διέλθει καλώδιο από το κατάστρωμα της γέφυρας (περίπτωση διασύνδεσης καταγραφών) απαιτείται η κατασκευή ειδικού καναλιού στην άνω στρώση ασφάλτου του καταστρώματος. Αυτό πρέπει να γίνει σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου και μετά από έγκριση από την αρμόδια υπηρεσία.

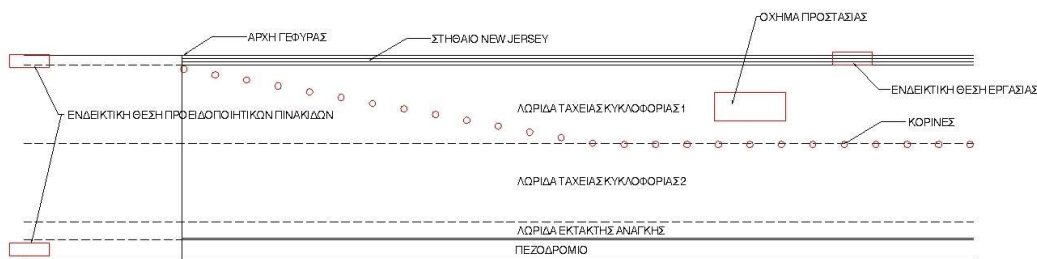
Για οποιαδήποτε επίσκεψη στην γέφυρα για την οποία απαιτείται στάθμευση σε αυτήν πρέπει να ενημερώνεται η υπηρεσία ασφάλειας και συντήρησης της γέφυρας, η αρμόδια επιβλέπουσα υπηρεσία και η τροχαία. Επίσης πρέπει να λαμβάνονται οι προφυλάξεις (κορίνες και τρόπος στάθμευσης) οι οποίες προβλέπονται από τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας.

Τόσο κατά την εγκατάσταση των συστημάτων παρακολούθησης, όσο και κατά τις τακτικές επιτόπου επισκέψεις για τη συντήρηση των οργάνων και τη επιτόπου λήψη καταγραφών από κυκλοφοριακές διεγέρσεις, πρέπει να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας τόσο για τα κινούμενα οχήματα όσο και για το επιτόπου ευρισκόμενο προσωπικό. Μεταξύ αυτών αναφέρεται η τοποθέτηση σημάτων μείωσης ταχύτητας, κορίνων και σημάτων εκτροπής της κυκλοφορίας, η προληπτική τοποθέτηση οχήματος με alarm εντός του αποκλεισμένου από κορίνες διαδρόμου και πριν από το σημείο όπου διεξάγοντο οι εργασίες, η χρήση φωσφορίζουσών τζάκετ από το προσωπικό κλπ. (Σχ. 6.1 και Φωτ. 6.1).



ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΟ

(α)



ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟ ΣΤΗΘΑΙΟ (NEW JERSEY)

(β)

Σχ. 6.1 Ενδεικτικά μέτρα προστασίας/ διαρρύθμισης κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια εργασιών ενοργάνωσης σε γέφυρα



Φωτ. 6.1 Μέτρα ασφαλείας κατά τη διάρκεια διεξαγωγής μετρήσεων σε γέφυρα.

## **7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

### **7.1. Περιγραφή για τα Επιταχυνσιόμετρα**

#### **7.1.1. Εισαγωγή**

Τα επιταχυνσιόμετρα (accelerometers) είναι αισθητήρες και όργανα (instruments) για τη μέτρηση, την απεικόνιση και την ανάλυση της επιτάχυνσης και των κραδασμών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα, ή σε συνδυασμό με ένα σύστημα ανάκτησης δεδομένων. Τα επιταχυνσιόμετρα διατίθενται σε πολλές μορφές. Μπορεί να είναι στοιχεία μικρής πολυπλοκότητας, αισθητήρες προστατευμένοι με εξωτερικό περίβλημα ή συστήματα αισθητήρων, με χαρακτηριστικά όπως δυνατότητα άθροισης καθώς και τοπικής ή απομακρυσμένης απεικόνισης και καταγραφής δεδομένων. Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να έχουν από έναν μέχρι τρεις άξονες μετρήσεων (οι πολλαπλοί άξονες είναι κάθετοι μεταξύ τους). Υπάρχουν πολλές αρχές λειτουργίας για αυτές τις συσκευές. Οι συνηθέστεροι τύποι επιταχυνσιομέτρων είναι πιεζοηλεκτρικά, με πυκνωτή, ελεγχόμενης δύναμης (null-balance), συντονισμού (resonance), πιεζοωμικά (piezoresistive) και μαγνητικής επαγωγής.

Τρία κύρια χαρακτηριστικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή επιταχυνσιομέτρων: το εύρος πλάτους επιτάχυνσης, το εύρος συχνοτήτων, και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Το εύρος του πλάτους επιτάχυνσης μετράται σε ποσοστά του  $g$ , ενώ το εύρος συχνοτήτων μετριέται σε  $Hz$ . Αναφορικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμοκρασία, καθώς και η μέγιστη κρούση και ο μέγιστος κραδασμός τον οποίο μπορούν να χειρισθούν τα επιταχυνσιόμετρα. Αυτά είναι τα όρια της πόσης καταπόνησης μπορεί να αντέξει η συσκευή πριν σταματήσει να δουλεύει και διαφέρουν από το πόση ταλάντωση ή επιτάχυνση μπορούν να μετρήσουν τα επιταχυνσιόμετρα.

Ο τύπος της ηλεκτρικής εξόδου εξαρτάται από το σύστημα που χρησιμοποιείται μαζί με τα επιταχυνσιόμετρα. Συνήθεις αναλογικοί τύποι αποτελούν η τάση, το ηλεκτρικό ρεύμα ή η συχνότητα. Οι ψηφιακές έξοδοι συνίστανται από τυπικά παράλληλα και σειριακά σήματα. Μια ακόμη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν επιταχυνσιόμετρα με έξοδο που οδηγεί στην αλλαγή της κατάστασης πιθανών διακοπών ή συστημάτων προειδοποίησης.

Κατά την τοποθέτηση των επιταχυνσιομέτρων, πρέπει να σταθμιστούν πολλές επιλογές με βάση την εφαρμοσιμότητα και τη διαθέσιμη προς τούτο δυνατότητα. Η πιο ασφαλής λύση τοποθέτησης είναι πιθανότατα η στήριξη με πείρους (stud mounting). Πολλά επιταχυνσιόμετρα διαθέτουν τεμάχια με σπειρώματα βιδώματος που μπορούν να στερεωθούν στη μηχανή ή στο αντικείμενο που πρόκειται να ενοργανωθεί. Για εφαρμογές όπου αυτό δεν είναι εφικτό ή επιθυμητό, πολλές άλλες επιλογές είναι διαθέσιμες όπως σύνδεση με κερί, μαγνήτες ή κολλώδεις ουσίες. Κάποιες εφαρμογές προϋποθέτουν τα επιταχυνσιόμετρα να είναι τοποθετημένα σε ηλεκτρικά μονωμένη επιφάνεια για να παρέχεται μόνωση γείωσης μεταξύ της επιφάνειας όπου τοποθετείται το επιταχυνσιόμετρο και των σημάτων από τα επιταχυνσιόμετρα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν τριαξονικοί κύβοι στερέωσης για να τοποθετηθούν τρία επιταχυνσιόμετρα σε ορθογωνική διάταξη. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχει μία επιφάνεια στερέωσης στο υπό παρακολούθηση αντικείμενο και για τα τρία επιταχυνσιόμετρα.

Για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που σχετίζονται με τη συχνότητας απόκρισης, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης των καλωδίων που συνδέονται με τα επιταχυνσιόμετρα. Για την επίτευξη του προηγούμενου στόχου, πρέπει τα

καλώδια να στερεωθούν στο ίδιο αντικείμενο στο οποίο είναι στερεωμένο το επιταχυνσιόμετρο. Αυτό θα εμποδίσει την κάμψη των καλωδίων μεταξύ του σημείου σύνδεσης και της επιφάνειας που υπόκειται σε κραδασμούς, εξασφαλίζοντας όσο το δυνατό υψηλότερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

### 7.1.2 Εφαρμογές

Τα επιταχυνσιόμετρα βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στα επόμενα:

- Σεισμολογία και επιταχύνσεις σχεδιασμού.
- Καταγραφή της πραγματικής δυναμικής απόκρισης των κατασκευών.
- Συστήματα Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης (Health Monitoring)
- Ερευνητικές δραστηριότητες.

### 7.1.3. Είδη Επιταχυνσιόμετρων

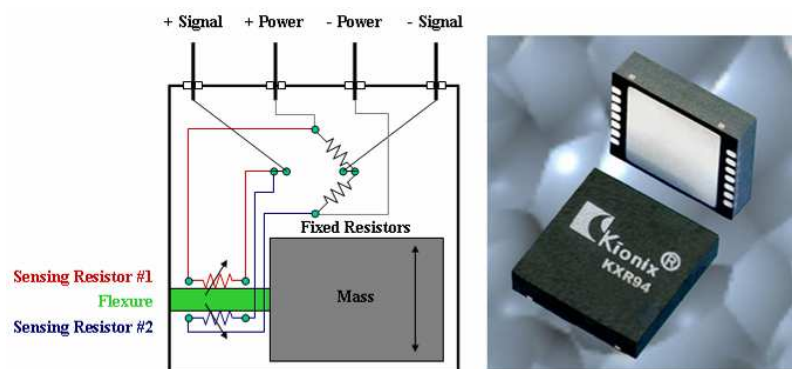
Πολλά και διαφορετικά είδη επιταχυνσιομέτρων είναι διαθέσιμα και συχνά αποτελούν μια άριστη επιλογή για την καταγραφή ταλαντώσεων. Ωστόσο, τα επιταχυνσιόμετρα δεν είναι κατάλληλα για όλες τις εφαρμογές, καθώς κανένας αισθητήρας δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε κάθε απαίτηση καταγραφής ταλαντώσεων. Η διαδικασία επιλογής αισθητήρα δεν θα πρέπει να υποτιμάται καθώς είναι εύκολο να προκύψουν λανθασμένα αποτελέσματα αν δεν χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος αισθητήρας .

Στα επόμενα περιγράφονται μερικά είδη επιταχυνσιομέτρων.

#### 7.1.3.1 Ωμικά Επιταχυνσιόμετρα Αντιστάσεων (Resistive accelerometers)

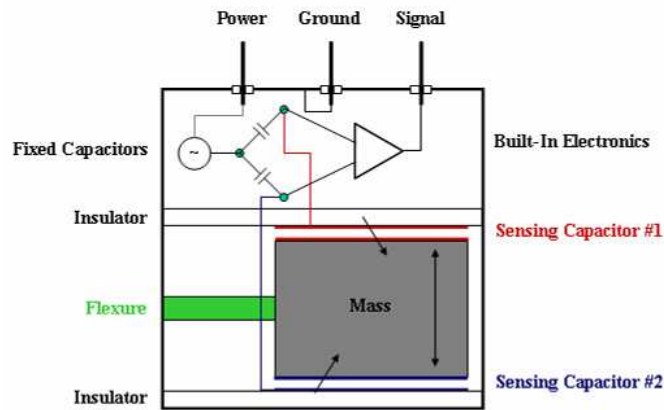
- Επιταχυνσιόμετρα που λειτουργούν και ως παραμορφωσιόμετρα (*Strain Gage*).
- Μικρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα (Micromachined).

Στα ωμικά επιταχυνσιόμετρα (resistive accelerometers) η τάση εξόδου της γέφυρας αντίστασης (resistor bridge) μεταβάλλεται ανάλογα με την επιτάχυνση που εφαρμόζεται.



Σχήμα. 7.1. Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιομέτρου αντιστάσεων (resistive accelerometers).

### 7.1.3.2 Επιταχυνσιόμετρα πυκνωτών (Capacitive accelerometers)



Σχήμα 7.2. Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιομέτρου πυκνωτών (Capacitive accelerometer).



Σχήμα 7.3. Επιταχυνσιόμετρο πυκνωτών (Capacitive accelerometer, MEMS Manufacturer/XS 8000family).

Το επιταχυνσιόμετρο πυκνωτών χρησιμοποιεί την τεχνική της συχνотικής προσαρμογής μέσω διαφοροποίησης της γέφυρας πυκνωτή.

#### **Τυπικά Χαρακτηριστικά**

Μέτρηση μέχρι και τα 0 Hz (DC απόκριση)

Περιορισμένο δυναμικό εύρος (<80 dB = 10.000:1)

Περιορισμένο εύρος υψηλών συχνοτήτων (<10 kHz)

Αποσβενυμένη απόκριση συχνοτήτων (0,7% της κρίσιμης)

Ευαισθησία που μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη διέγερση (mV / g / V)

Συνήθως εύθραυστα (περιορισμένη προστασία σε κρούση)

Λειτουργία με πολλαπλούς αγωγούς καλωδίου (τουλάχιστον 3 καλώδια)

Μικρό μέγεθος και βάρος για τα μικρομηχανικά κατασκευασμένα επιταχυνσιόμετρα (Micro-machined)

**Εφαρμογές επιταχυνσιομέτρων αντιστάσεων/πυκνωτών (resistive/capacitive accelerometers)**

Χαμηλής συχνότητας ή / και μακράς διάρκειας καταγραφές.  
Ποιότητα κύλισης(Ride quality),  
Απόκριση οχημάτων στο δρόμο (Automobile road response).  
Μηχανήματα λούνα παρκ.  
Μηχανισμοί ανελκυστήρων.  
Προσομοιωτές κίνησης.  
Παρακολούθηση ταλαντώσεων κατασκευών και μηχανών.  
Ιδιομορφική ανάλυση αεροδιαστημικών κατασκευών.  
Ενοργάνωση ανθρώπινων ομοιωμάτων για συνθήκες κρούσης (Crash dummy instrumentation).  
Αισθητήρες κλίσης.  
Συσκευές ενεργοποίησης αερόσακου ή συναγερμού οχήματος.

### 7.1.3.3 Επιταχυνσιόμετρα με οπτικές ίνες / Οπτικό επιταχυνσιόμετρο (Fiber Optic)

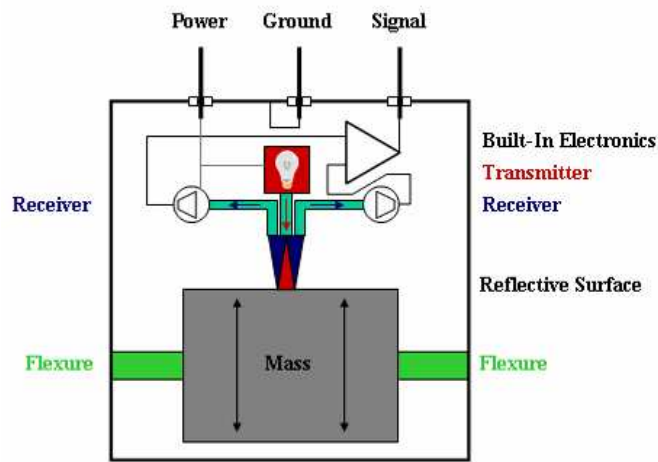
Τα επιταχυνσιόμετρα οπτικών ινών έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και εφαρμογές με τους αισθητήρες αντιστάσεων και πυκνωτών. Στην περίπτωση τους, το φως που συγκεντρώνεται στους δέκτες είναι ανάλογο με την επιτάχυνση που εφαρμόζεται.



Σχήμα 7.4. Οπτικό επιταχυνσιόμετρο (Clarion Optical Seismic accelerometer).

#### Πρόσθετα χαρακτηριστικά

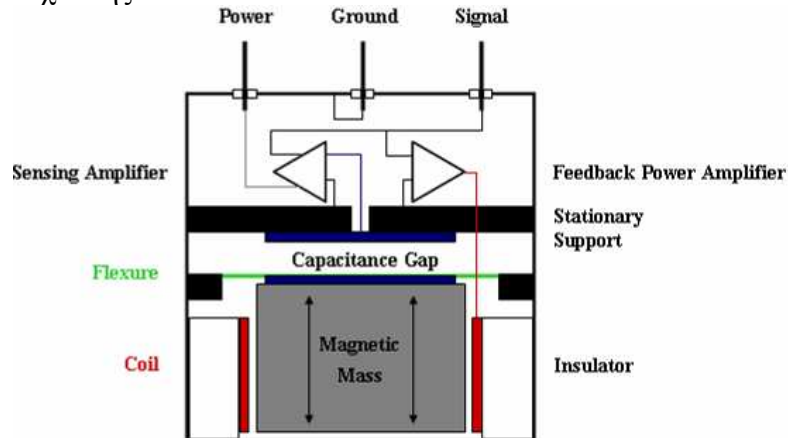
Πρόβλεψη για τοποθέτηση ηλεκτρονικών εξ αποστάσεως.  
Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλή θερμοκρασία ως 1000 F (537 C).  
Μεταφορά αποκλειστικά μόνο φωτός μέσω της καλωδίωσης, οπότε ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ηλεκτρομαγνητικών και ραδιοφωνικών παρεμβολών σε "θορυβώδες" περιβάλλον.  
Ανοιχτό το θέμα της απώλειας φωτός σε καλώδια μεγάλου μήκους και στις συνδέσεις.  
Αισθητήρες υψηλού κόστους, καλώδια και επεξεργασία σήματος (ψηφιακή) (signal conditioning).



Σχήμα 7.5. Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρων οπτικών ινών.

#### 7.1.3.4 Σερβοεπιταχυνσιόμετρα (servoaccelerometers) ή επιταχυνσιόμετρα δύναμης εξισορρόπησης (Force Balance)

Η απαιτούμενη δύναμη ανάδρασης για να διατηρηθεί ενιαία χωρητικότητα πυκνωτή είναι ανάλογη της επιτάχυνσης.



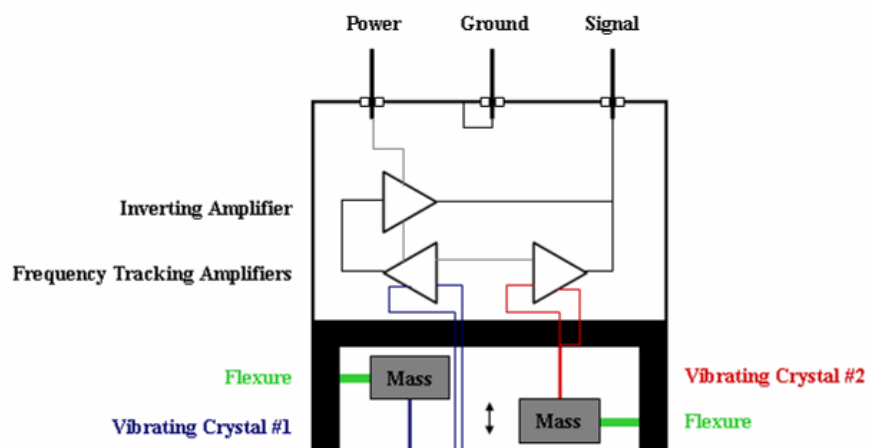
Σχήμα 7.6. Αρχή λειτουργίας σερβοεπιταχυνσιόμετρου (servoaccelerometers) ή επιταχυνσιόμετρου δύναμης εξισορρόπησης (Force Balance).



**Σχήμα 7.7.** Επιταχυνσιόμετρο μεταβαλλόμενης δύναμης εξισορρόπησης (Force Balance / EpiSensor ES-T).

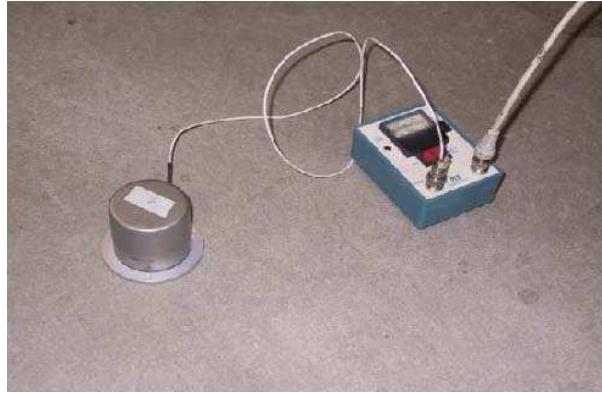
### 7.1.3.5 Επιταχυνσιόμετρα με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz)

Η διαφορά που παρατηρείται στη συχνότητα συντονισμού μεταξύ των στοιχείων είναι ανάλογη της επιτάχυνσης που εφαρμόζεται.



**Σχήμα. 7.8.** Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιομέτρου με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz).





**Σχήμα. 7.9.** Επιταχυνσιόμετρο με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz/Model 393C).

***Εγκατάσταση επιταχυνσιομέτρων δύναμης εξισορρόπησης (Force Balance) / με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz)***

Τα σεισμικά επιταχυνσιόμετρα μπορούν να προσαρτηθούν σε τριαξονικές βάσεις αλουμινίου που συγκρατούνται μέσω αγκυρώσεων από τους στύλους και τις δοκούς της παρακολουθούμενης κατασκευής (π.χ. γέφυρας). Η υλοποίηση των αγκυρώσεων επιτυγχάνεται με τη διάνοιξη μικρών οπών σε επιλεγμένες θέσεις και την τοποθέτηση αγκυρώσεων εντός των οπών αυτών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.10. Τα σεισμικά επιταχυνσιόμετρα που τοποθετούνται σε όρθια θέση στην άνω επιφάνεια των αλουμινένιων βάσεων καταγράφουν την κατακόρυφη απόκριση ενώ τα επιταχυνσιόμετρα που συνδέονται στις πλευρές των βάσεων καταγράφουν την οριζόντια απόκριση (βλέπε σχήμα. 7.11).



**Σχήμα 7.10.** Διάνοιξη οπών στο σκυρόδεμα για την εγκατάσταση σεισμικών επιταχυνσιομέτρων (Trinity River Relief Bridge).



**Σχήμα 7.11.** Σεισμικά επιταχυνσιόμετρα συγκρατούμενα σε στύλους μέσω βάσεων (Trinity River Relief Bridge).

**Τυπικά χαρακτηριστικά επιταχυνσιομέτρων δύναμης εξισορρόπησης (Force Balance) και ταλαντευόμενων κρυστάλλων (Vibrating Quartz)**

Μετρήσεις μέχρι και τα 0 Hz (DC ανταπόκριση).

Μεγάλο εύρος δυναμικής απόκρισης (> 120 dB = 1,000,000:1).

Εξαιρετική σταθερότητα λειτουργίας με την πάροδο του χρόνου και τη μεταβολή της θερμοκρασίας (ppm).

Περιορισμένο εύρος υψηλών συχνοτήτων (<1 kHz).

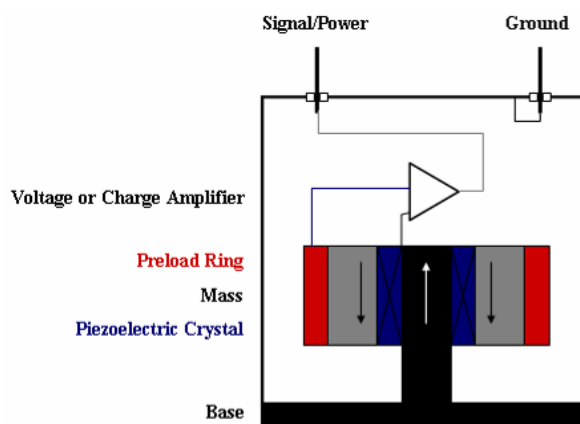
Κίνδυνος καταστροφής της κατασκευής σε περίπτωση υπερφόρτωσης (<100 g's).

Μεγάλη μαγνητική ευαισθησία για τα επιταχυνσιόμετρα δύναμης εξισορρόπησης.

Πολύ υψηλό κόστος (~ \$ 1000 δολάρια).

**7.1.3.6 Πιεζοηλεκτρικά (Piezoelectric) Επιταχυνσιόμετρα**

Η δύναμη επί των αυτοτροφοδοτούμενων κρυστάλλων παρέχει στην έξοδο φορτίου ανάλογη της επιτάχυνσης.

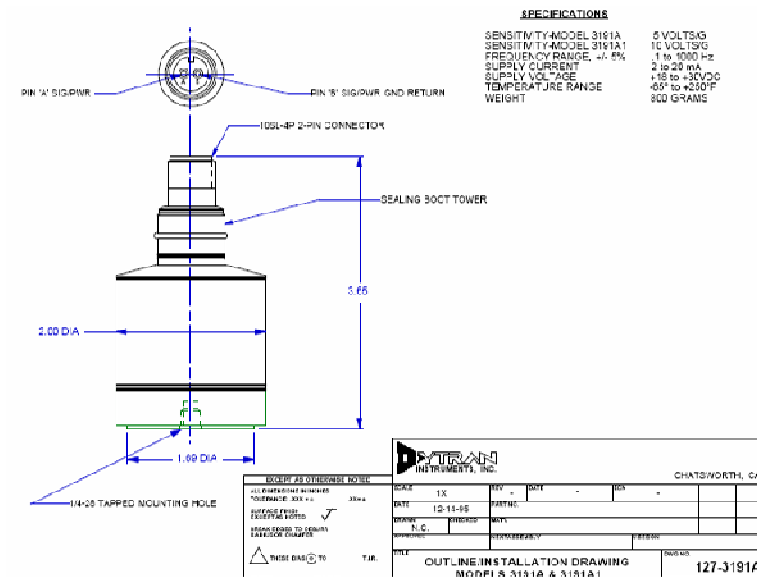


**Σχήμα 7.12.** Αρχή λειτουργίας πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου.



Σχήμα 7.13. Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο (Dytran/Model 3191A).

### Εγκατάσταση



Σχήμα 7.14. Σχέδιο εγκατάστασης (Dytran/Model 3191A&3191A).

### Τυπικά Χαρακτηριστικά

- Καταγραφή καθαρά δυναμικών συμβάντων (> 0.2 Hz).
- Μεγάλο δυναμικό εύρος (> 100dB = 100,000:1).
- Μεγάλο συχνοτικό εύρος (<1 Hz έως> 10 kHz).
- Αποτελείται από ένα στοιχείο στερεάς κατάστασης Solid-state (χωρίς κινούμενα μέρη).
- Τα αυτοτροφοδοτούμενα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία δεν απαιτούν ηλεκτρισμό.
- Λειτουργία με περισσότερους από δυο αγωγούς.
- Υψηλή ανθεκτικότητα (5.000 g).
- Ειδικοί τύποι για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 1000 F - 537 C).

## ***Εγκατάσταση / στερέωση***

### ***Συχνότητες απόκρισης***

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στο θέμα της εγκατάστασης των επιταχυνσιόμετρων είναι η επίδραση της μεθόδου στερέωσης στην ακρίβεια της χρησιμοποιήσιμης συχνοτικής απόκρισης. Το συχνοτικό εύρος λειτουργίας του επιταχυνσιόμετρου καθορίζεται, στις περισσότερες περιπτώσεις, συνδέοντας στερεά με πείρους τον υπό έλεγχο αισθητήρα απευθείας στο επιταχυνσιόμετρο αναφοράς. Η απευθείας σύνδεση μέσω πείρων σε πολύ λεία επιφάνεια, γενικά οδηγεί σε υψηλότερη μηχανική συχνότητα συντονισμού, και συνεπώς, σε μεγαλύτερο χρησιμοποιήσιμο συχνοτικό εύρος. Η προσθήκη οποιασδήποτε μάζας στο επιταχυνσιόμετρο, όπως μια συγκολλητική ουσία (adhesive) ή μαγνητική βάση στερέωσης μειώνει τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος παρακολούθησης και ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια και τα όρια του χρησιμοποιήσιμου συχνοτικού εύρους. Επίσης, η τοποθέτηση ενδοτικών υλικών, όπως ελαστικών τεμαχίων,, ενδέχεται να δημιουργήσει φαινόμενα μηχανικού φιλτραρίσματος μέσω της μόνωσης και της απόσβεσης της διάδοσης των υψηλών συχνοτήτων.

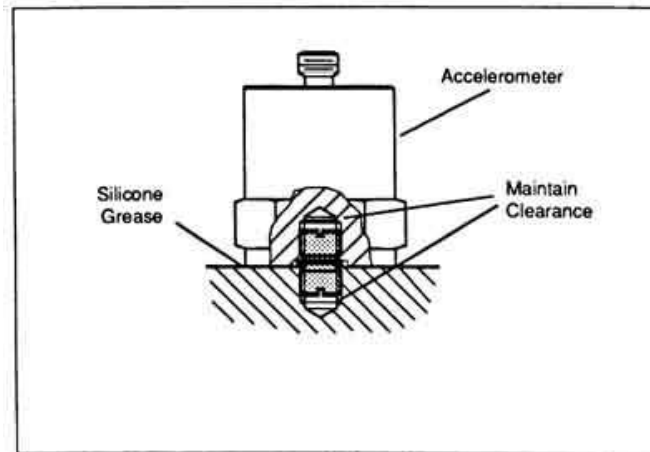
### ***Προετοιμασία Επιφανείας***

Για καλύτερα αποτελέσματα, ειδικά σε υψηλές συχνότητες, είναι σημαντικό προετοιμασθεί μία ομαλή και επίπεδη επιφάνεια για την τοποθέτηση του επιταχυνσιόμετρου . Η περιοχή πρέπει να ελεγχθεί για τυχόν ύπαρξη μεταλλικών καταλοίπων ή ξένων σωμάτων στις επιφάνειες επαφής.

Η εφαρμογή λεπτής στρώσης λιπαντικού σιλικόνης στη διεπιφάνεια μεταξύ της βάσης του επιταχυνσιόμετρου και της επιφανείας στερέωσης συμβάλλει στην επίτευξη υψηλού βαθμού συνάφειας, απαραίτητης για την καλύτερη μεταβίβαση των υψηλών συχνοτήτων.

### ***Στερέωση με πείρους (Stud Mounting)***

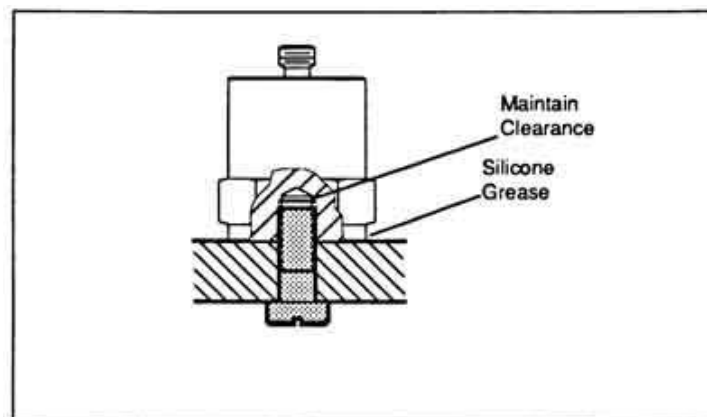
Για την περίπτωση εγκατάστασης μόνιμου χαρακτήρα, όπου επιδιώκεται μια πολύ ασφαλής στερέωση του επιταχυνσιόμετρου στην παρακολουθούμενη κατασκευή, συνίσταται η στερέωση με πείρους (Stud Mounting). Αρχικά, το τμήμα της επιφάνεια της υπό παρακολούθηση κατασκευής όπου θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας (τουλάχιστον ίσο με τη βάση του αισθητήρα) καθαρίζεται και λειαίνεται μηχανικά ώστε να είναι επίπεδο, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Στη συνέχεια, ανοίγονται οπές στις θέσεις που υποδεικνύονται στο σχέδιο εγκατάστασης, οι οποίες πρέπει να είναι κάθετες στην επιφάνεια στερέωσης. Τα επιταχυνσιόμετρα στερεώνονται με πείρους (stud), με την προϋπόθεση ότι οι τελευταίοι δεν ακουμπούν ('τερματίζουν') στο άκρο της οπής στερέωσης ή στο σώμα του επιταχυνσιόμετρου. Πολλοί πείροι έχουν ειδικές διατάξεις ώστε να διασφαλίζεται το απαιτούμενο σχετικό κενό. Η επιτάχυνση μεταβιβάζεται από την επιφάνεια της κατασκευής στη βάση του επιταχυνσιόμετρου. Οποιοσ πείρος παρεμβάλλεται μεταξύ της βάσης του επιταχυνσιόμετρου και της κατασκευής εμποδίζει τη μεταβίβαση της επιτάχυνσης και επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Κατά την εγκατάσταση του επιταχυνσιόμετρου δεν πρέπει να εφαρμοστεί στους πείρους ροπή μεγαλύτερη της συνιστώμενης. Ειδικό τεμάχιο μπορεί να τοποθετηθεί στα σπειρώματα βιδώματος των πείρων στερέωσης για να αποφευχθεί τυχόν χαλάρωση της σύνδεσης ('ξεβίδωμα').



Σχήμα 7.15. Τυπική στερέωση με πείρους.

### Σύνδεση με βίδες

Κατά την εγκατάσταση επιταχυνσιομέτρων σε κατασκευές με λεπτά τοιχώματα, μία βίδα που διέρχεται από οπή επαρκούς διαμέτρου είναι ένας αποδεκτός τρόπος σύνδεσης του επιταχυνσιομέτρου με την κατασκευή. Το μήκος της βίδας θα πρέπει πάντα να ελέγχεται για να διασφαλιστεί ότι η βίδα ακουμπά ('τερματίζει') στη βάση του επιταχυνσιομέτρου. Μια λεπτή στρώση λιπαντικού σιλικόνης στη διεπιφάνεια στερέωσης διασφαλίζει τη μεταβίβαση των υψηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 7.16. Τυπική στερέωση με βίδες.

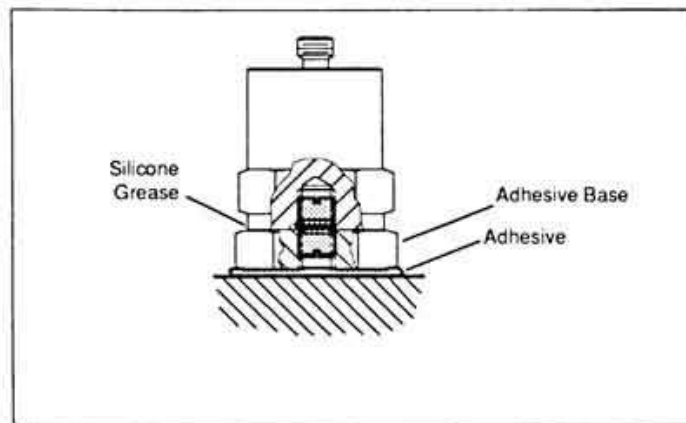
### Στερέωση με συγκολλητικό υλικό (Adhesive Mounting)

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η στερέωση επιταχυνσιομέτρων χρησιμοποιώντας βίδες ή πείρους δεν είναι πρακτική. Για τις περιπτώσεις αυτές, η στερέωση με *συγκολλητικό υλικό* (adhesive) αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο σύνδεσης. Η χρήση ξεχωριστών επικολλητών βάσεων στερέωσης (adhesive mounting bases) συνιστάται για την αποφυγή εμφάνισης βλαβών στη βάση του επιταχυνσιομέτρου ή τη συσσώρευση υλικού επικόλλησης στα σπειρώματα των βιδών. Πολλές βάσεις επικόλλησης παρέχουν επίσης ηλεκτρική μόνωση, η

οποία ελαχιστοποιεί την επίδραση θορύβου και την εμφάνιση προβλημάτων που συνδέονται με την γείωση. Το προτεινόμενο είδος συνδετικού υλικού εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Η κόλληση με ειδικό κερί αποτελεί μια πολύ βολική λύση καθώς το εύκολα αφαιρούμενο υλικό καθιστά επίσης εύκολη τη δυνατότητα επανατοποθέτησης. Η προηγούμενη τεχνική είναι κατάλληλη για χρήση σε θερμοκρασία δωματίου. Εποξικές κόλλες δύο συστατικών προσφέρουν δυσκαμψία, και συνεπώς εξασφαλίζουν απόκριση στις υψηλές συχνότητες και μόνιμη στερέωση. Άλλα επικολητικά υλικά, όπως οδοντικό τσιμέντο (dental), υψηλής θερμοκρασίας κόλλες, στιγμιαίες κόλλες και ειδικοί στόκοι (duct putty) συνιστούν επιλογές που έχουν κατά καιρούς δοκιμαστεί με επιτυχία. Στο Σχήμα 7.18 παρατίθενται ενδεικτικά διάφορα υλικά κόλλησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, η εμπορική ονομασία τους καθώς και προτάσεις για στερέωση επιταχυνσιομέτρων με κόλληση υπό διαφορετικές συνθήκες. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι δεν υπάρχει υλικό που να υπερτερεί σε κάθε εφαρμογή δεδομένου ότι η καλύτερη επιλογή για κάθε περίπτωση καθορίζεται από πλήθος κατασκευαστικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως το είδος της στερέωσης (προσωρινή ή μόνιμη), η θερμοκρασία, το είδος της επιφάνειας στερέωσης και ούτω καθεξής. Οι περισσότεροι κατασκευαστές υλικών επικόλλησης παρέχουν συνήθως και λεπτομερείς πληροφορίες για τις δυνατότητες και καταλληλότητα των υλικών τους και αντίστοιχες προδιαγραφές εφαρμογής.

Adhesives	Mounting Surface Condition		Temperature		Availability	
	Flat & Smooth Surfaces	Rough Surfaces (Casting, etc.)	Room Temp. Only	Elevated Temp. (see Mfg. Spec.)	Commercial	PCB Piezotronics (request sample)
<b>TEMPORARY/EASILY REMOVED</b>						
Petro Wax	●	●	●			●
Bee's Wax	●	●	●		●	
Duct Putty	●	●	●		●	
Two-sided Sticky Tape	●	●	●		●	
<b>SEMI-PERMANENT/PERMANENT</b>						
<b>Super Glue</b> (Thin one part quick dry)						
Loctite® 430 Super Bonder	●			-65°F to +175°F	●	●
Eastman 910	●			-65°F to +180°F	●	
<b>Super Glue-Gap Filling</b> (thick liquid & gel)						
Pacer RX-50 "Gel"		●		-114°F to +180°F	●	●
Loctite® 498 Super Bonder		●		-40°F to +223°F	●	
Loctite® 422 "Gap Filling"		●		-65°F to +175°F	●	
<b>Hot Glue</b> (apply with hot glue gun)	●	●		Various Grades from +150°F	●	
<b>PERMANENT</b>						
Two Part Std Commercial Epoxies	●	●		to +250°F	●	
Loctite® 325 Speed Bonder	●	●		-65°F to +350°F	●	

Σχήμα 7.17. Ενδεικτικός κατάλογος υλικών κόλλησης, εμπορική ονομασία και προτάσεις για στερέωση επιταχυνσιομέτρων με κόλληση για διάφορες συνθήκες.



Σχήμα 7.18. Τυπική σύνδεση με κόλληση.

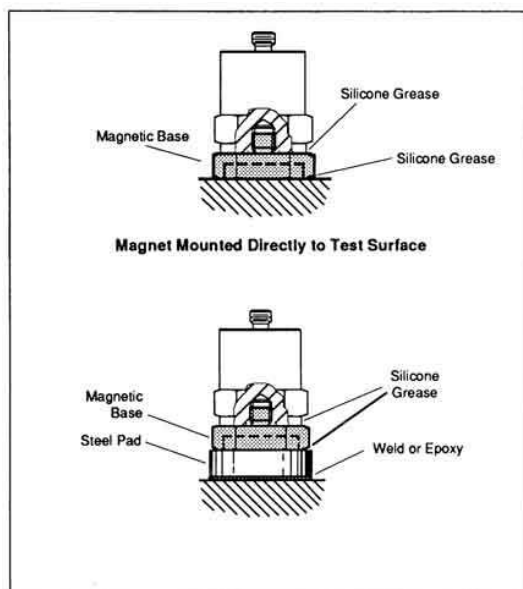
Η επιπεδότητα της επιφάνειας, η δυσκαμψία του υλικού κόλλησης και η αντοχή της κόλλησης επηρεάζουν το χρησιμοποιήσιμο συχνοτικό εύρος ενός επιταχυνσιομέτρου. Σχεδόν κάθε μέθοδος εγκατάστασης επιτρέπει λειτουργία στο πλήρες συχνοτικό φάσμα για χαμηλά επίπεδα επιτάχυνσης εφόσον η επιφάνεια εγκατάστασης είναι πολύ επίπεδη και ο αισθητήρας έχει πιεστεί επαρκώς στην επιφάνεια ώστε το επιπλέον επικολλητικό υλικό να απομακρυνθεί. Γενικά, όσο πιο ανώμαλη είναι η επιφάνεια και όσο μεγαλύτερου πάχους είναι η στρώση του υλικού κόλλησης, τόσο το χρησιμοποιήσιμο συχνοτικό εύρος μειώνεται. Τα λιγότερο δύσκαμπτα υλικά προσωρινής κόλλησης μειώνουν το χρησιμοποιήσιμο συχνοτικό εύρος πολύ περισσότερο σε σχέση με τα πιο δύσκαμπτα και σκληρά υλικά. Συνήθως, τα υλικά προσωρινής κόλλησης προτείνονται κυρίως για παρακολούθηση κατασκευών σε χαμηλές συχνότητες (<500 Hz) και για θερμοκρασίες δωματίου. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι για να υπάρχει υψηλή ακρίβεια για τις μετρήσεις που αφορούν σε υψηλές συχνότητες είναι σημαντικό η επιφάνεια στερέωσης να είναι όσο το δυνατό πιο επίπεδη.

Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί κατά την επιλογή και τον έλεγχο του υλικού κόλλησης όταν υπάρχει πρόβλημα σε ενδεχόμενο αποχρωματισμό ή βλάβη της επιφάνειας της κατασκευής όπου θα γίνει η στερέωση του αισθητήρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις ελέγχεται το υλικό κόλλησης πρώτα σε ένα μη εμφανές σημείο ή σε ένα δείγμα της επιφάνειας της κατασκευής. Όταν αναμένονται υψηλότερες θερμοκρασίες, πρέπει να τοποθετηθεί τμήμα επαλουμινωμένης λωρίδας στην παρακολουθούμενη κατασκευή και στη συνέχεια ακολουθεί η εγκατάσταση του επιταχυνσιομέτρου με τη βοήθεια ειδικής βάσης στερέωσης χρησιμοποιώντας κάποια από τα υπόλοιπα υλικά κόλλησης. Μετά το πέρας της παρακολούθησης της κατασκευής, η λωρίδα μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα χωρίς καμία βλάβη στο επιφανειακό υλικό της κατασκευής.

### **Μαγνητική στερέωση**

Οι μαγνητικές βάσεις στερέωσης προσφέρουν μια πολύ βολική, προσωρινή σύνδεση σε μαγνητικές επιφάνειες. Οι μαγνήτες που εμφανίζουν υψηλή αντίσταση σε αποκόλληση παρέχουν τη βέλτιστη απόκριση σε υψηλές συχνότητες. Οι σφηνοειδείς, με δυο βέργες μαγνητικές βάσεις (Wedged dual-rail magnetic bases) χρησιμοποιούνται γενικά για εγκατάσταση σε καμπύλες επιφάνειες, όπως σε σωλήνες ή στο περίβλημα κινητήρα και συμπιεστή. Εντούτοις, οι μαγνήτες βάσεις με δυο βέργες συνήθως μειώνουν σημαντικά το συχνοτικό εύρος λειτουργίας του επιταχυνσιομέτρου. Για καλύτερα αποτελέσματα, η

μαγνητική βάση θα πρέπει να εγκατασταθεί σε ομαλή, επίπεδη επιφάνεια. Μια λεπτή παχύρρευστη στρώση λιπαντικού σιλικόνης θα πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ του αισθητήρα και της μαγνητικής βάσης, όπως και μεταξύ της μαγνητικής βάσης και της κατασκευής. Όταν οι επιφάνειες είναι ανώμαλες ή αντιμαγνητικές, μπορεί να τοποθετούνται επί τόπου χαλύβδινα φύλλα με συγκόλληση ή χρήση εποξειδικής κόλλας ώστε να τοποθετηθεί στη συνέχεια η μαγνητική βάση. Η χρήση τέτοιων φύλλων εξασφαλίζει ότι οι περιοδικές μετρήσεις λαμβάνονται από το ίδιο ακριβώς σημείο. Αυτό είναι ένα σημαντικό στοιχείο για να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των μετρήσεων.



Σχήμα 7.19. Μαγνητική στερέωση σε χάλυβα.

### **Προσθήκη μάζας (Mass Loading)**

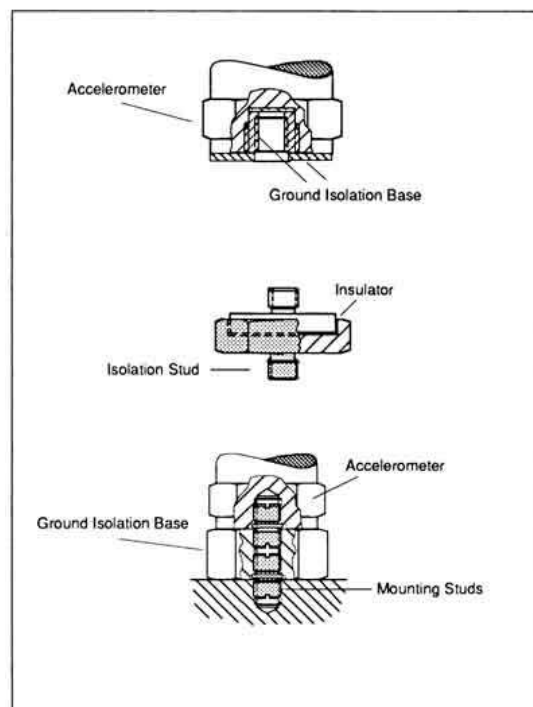
Τα χαρακτηριστικά ταλάντωσης μιας κατασκευής μπορούν να διαφοροποιηθούν από την προσθήκη μάζας σε αυτή την κατασκευή. Δεδομένου ότι οι περισσότερες μετρήσεις διεξάγονται με στόχο να καθορισθεί ποσοτικά η ταλάντωση της κατασκευής, οποιαδήποτε διαφοροποίηση της ταλάντωσης οδηγεί σε μη ακριβή εκτίμηση της. Ένα επιταχυνσιόμετρο που είναι πολύ βαρύ σε σχέση με την παρακολουθούμενη κατασκευή ενδέχεται να παραγάγει δεδομένα τα οποία δεν αποδίδουν σωστά την ταλάντωση που μας ενδιαφέρει. Είναι απαραίτητο να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά την επιλογή επιταχυνσιομέτρων και εξοπλισμού στερέωσης ώστε να αποφευχθεί η επιρροή από προσθήκη μάζας.

### **Εδαφική μόνωση (Ground Isolation), εδαφικός θόρυβος (Ground Noise) και εκδήλωση φαινομένων γείωσης (Ground Loops)**

Κατά την εγκατάσταση επιταχυνσιομέτρων σε ηλεκτρικά αγώγιμες επιφάνειες, υπάρχει πιθανότητα εισαγωγής στο σήμα του εδαφικού θορύβου (ground noise pick-up). Επίσης θόρυβος που προέρχεται από άλλες ηλεκτρικές συσκευές και μηχανές οι οποίες είναι γειωμένες στην κατασκευή ενδέχεται να επηρεάσουν το σήμα των μετρήσεων αφού μεταβιβαστούν διαμέσου της βάσης του επιταχυνσιόμετρου. Όταν ο αισθητήρας γειώνεται



σε διαφορετικό ηλεκτρικό δυναμικό από αυτό του συστήματος διαμόρφωσης του σήματος (signal conditioning) και του εξοπλισμού ανάγνωσης των ενδείξεων, είναι πιθανό να εκδηλωθούν φαινόμενα βρόχων γείωσης (ground loops). Αυτό το φαινόμενο έχει συνήθως ως αποτέλεσμα την εισαγωγή ηλεκτρικού θορύβου στη συχνότητα (και σε αρμονικές) του δικτύου ηλεκτρικής παροχής (line power frequency), σε πιθανά λανθασμένα αποτελέσματα και μετατόπιση του σήματος. Υπό αυτές τις συνθήκες, είναι σκόπιμο να μονώσουμε ηλεκτρικά το επιταχυνσιόμετρο από την παρακολουθούμενη κατασκευή. Τούτο μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Τα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα διατίθενται με ειδική βάση που παρέχει μόνωση έναντι ηλεκτρικής γείωσης. Ορισμένα μοντέλα έχουν αυτό το χαρακτηριστικό εξαρχής, ενώ άλλα ως πρόσθετο. Η χρήση μονωτικών επικολλητών βάσεων στερέωσης, μονωμένων πείρων, μονωτικών βάσεων και άλλων μονωτικών υλικών, όπως φύλλο χαρτιού κάτω από μία μαγνητική βάση, είναι αποτελεσματικές τεχνικές εδαφικής ηλεκτρικής μόνωσης. (ground isolation techniques). Πρέπει να έχουμε όμως υπόψη ότι η χρήση πρόσθετων μέσων για εξασφάλιση εδαφικής ηλεκτρικής μόνωσης μπορεί να μειώσει τα άνω συχνοτικά όρια του επιταχυνσιομέτρου.

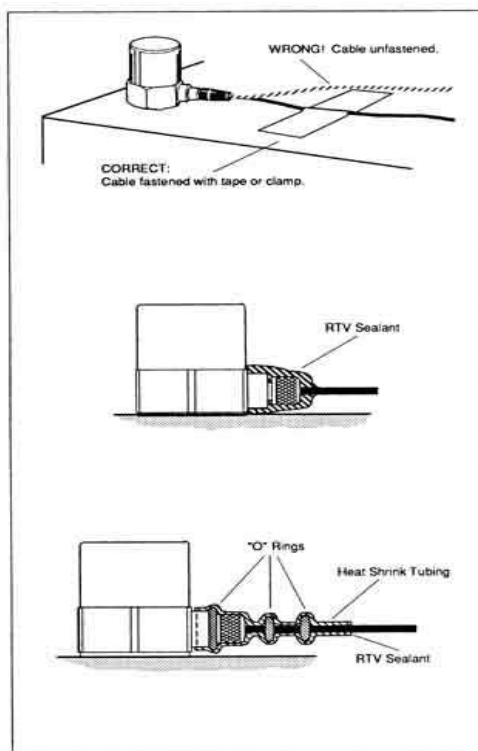


Σχήμα 7.20. Διάφορες τεχνικές ηλεκτρικής μόνωσης επιταχυνσιομέτρων.

### **Καλώδια και Συνδέσεις**

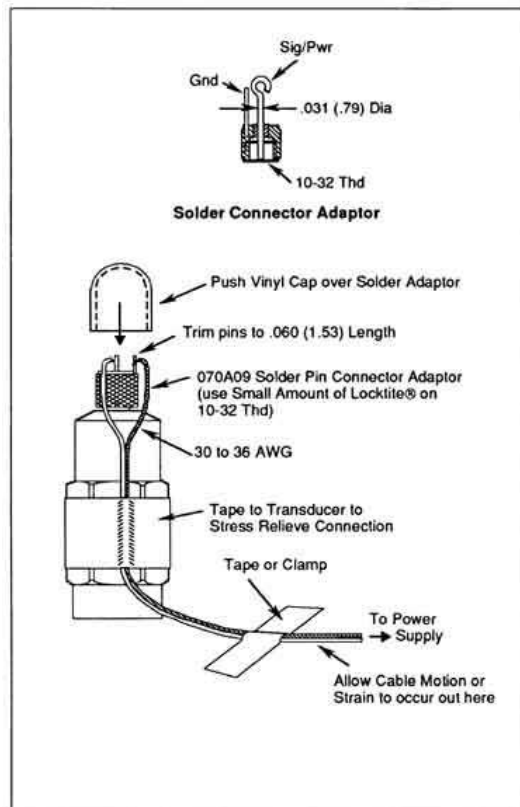
Τα καλώδια θα πρέπει να συνδέονται στέρεα στην κατασκευή με σφιχτήρες, ταινίες ή άλλα υλικά κόλλησης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ταλάντωσης των καλωδίων (whip) και καταπόνησης στις συνδέσεις. Η ταλάντωση (whip) των καλωδίων μπορεί να εισάγει θόρυβο, ειδικά στην περίπτωση διαδρομών σημάτων υψηλής αντίστασης (high-impedance signal paths). Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως τριβοηλεκτρικό (triboelectric). Επίσης, η παραμόρφωση του καλωδίου κοντά στην ηλεκτρική σύνδεση μπορεί να οδηγήσει σε παροδικές ή μόνιμες διακοπές σύνδεσης και σε απώλεια δεδομένων.

Για την προστασία από πιθανή υγρασία ή βρωμιά μπορεί να χρησιμοποιηθεί στεγανωτικό υλικό που στερεοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου (RTV-room temperature vulcanizing) ή υλικό σωλήνωσης που συρρικνώνεται μέσω θέρμανσης στις συνδέσεις των καλωδίων. Κυκλικόι δακτύλιοι με υλικό σωλήνωσης που επίσης συρρικνώνεται με θέρμανση έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί ως στεγανωτικό μέσο για την προστασία των ηλεκτρικών συνδέσεων υπό βραχυπρόθεσμη λειτουργία σε υδάτινο περιβάλλον. Η χρήση μόνο στεγανωτικού υλικού RTV γίνεται εν γένει μόνο για την προστασία από χυμένα χημικά ή από υψηλή υγρασία.



**Σχήμα 7.21.** «Αδιάβροχη» σύνδεση.

Υπό συνθήκες δυνατών κρούσεων ή όταν τα καλώδια πρέπει να υποβληθούν σε μεγάλες μετακινήσεις (π.χ. για την παρακολούθηση αντικειμένων σε πτώση) συστήνεται η χρήση ειδικών συνενωτικών προσαρμογών στις συνδέσεις (solder connector adaptor) καθώς και ελαφριών καλωδίων (lightweight ribbon cables). Αυτοί οι συνενωτικοί προσαρμογείς στις συνδέσεις παρέχουν σύνδεση μεγαλύτερης αντοχής και μπορούν να συνδεθούν στο επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιώντας ειδικό τεμάχιο σπειρώματος ώστε να αποφευχθεί η χαλάρωση της σύνδεσης. Η χρήση ελαφριών καλωδίων συμβάλλει στη μείωση της προκαλούμενης παραμόρφωσης στις συνδέσεις, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα σήματα εξόδου. Επίσης, η κόπωση στις ηλεκτρικές συνδέσεις ελαχιστοποιείται, μειώνοντας την πιθανότητα διακοπτόμενων ή κομμένων συνδέσεων και απώλεια δεδομένων. Οι συνενωτικοί προσαρμογείς στις συνδέσεις συνδέονται με το καλώδιο με ηλεκτρική κόλληση. Αυτή η απλή σύνδεση καθιστά αυτό το είδος σύνδεσης εύκολα επισκευάσιμο όταν χρειασθεί. Συνήθως, ένα εύκαμπτο πλαστικό κάλυμα τοποθετείται πάνω από τις ηλεκτρικές συνδέσεις για προστασία, καθώς και την ανακούφιση των καλωδίων από την παραμόρφωση.



Σχήμα 7.22. Καλώδιο προστατευόμενο έναντι υψηλών κρούσεων.

Ο συνενωτικός προσαρμογέας στις συνδέσεις παρέχει μια οικονομικά προσιτή και απλοποιημένη μέθοδο για την σύνδεση των καλωδίων. Χρειάζεται μόνο η ύπαρξη υλικών και εξοπλισμού ηλεκτρικής κόλλησης. Δεν απαιτούνται πρόσθετα εργαλεία και εξοπλισμός για την υλοποίηση της σύνδεσης στο άκρο του καλωδίου. Λόγω της αξιοπιστίας και της αντοχής αυτής της σύνδεσης αυτές οι συνδέσεις συστήνονται για μετρήσεις σε συνθήκες υψηλών κρούσεων.

## 7.2 Περιγραφή για τα ταχυτητόμετρα (Velocimeter)

### 7.2.1. Εισαγωγή

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

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

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

Οι συνήθεις ηλεκτρικοί έξοδοι των αισθητήρων γραμμικής ταχύτητας περιλαμβάνουν τάση, ρεύμα, ραδιοσυχνότητα (RF), διακόπτη κυκλώματος ή σύστημα συναγερμού (switch or alarm), σειριακή ή παράλληλη έξοδο, Ethernet, SERCOS, SSI, and συμβατού με TTL. Οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας μπορεί να είναι συσκευές διαφόρων ειδών, όπως στοιχείο αισθητήρα ή chip, αισθητήρας ή διάταξη μετατροπής (transducer), όργανο ή μετρητής), gauge ή δείκτης (indicator), καταγραφέας και αθροιστές.

Ένα στοιχείο αισθητήρα ή chip, είναι μια μη πολύπλοκη συσκευή, όπως ένα παραμορφωσιόμετρο, ή μια συσκευή ενσωματωμένη δυνατότητα επεξεργασίας/διαχείρισης σήματος. Ένας αισθητήρας ή μια διάταξη μετατροπής είναι μια πιο πολύπλοκη συσκευή με δυνατότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης σήματος, η οποία τροφοδοτείται με ρεύμα και παρέχει στην έξοδο π.χ. τάση DC, βρόχο ηλεκτρικού φορτίου 4-20mA κλπ. Ένα όργανο ή μετρητής συνιστούν μια αυτοδύναμη μονάδα η οποία παρέχει ως έξοδο π.χ. απεικόνιση, τοπικά ή κοντά στην συσκευή. Αυτοί οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν επεξεργασία και διαχείριση του σήματος. Ένας μετρητής (gauge) ή δείκτης (indicator) είναι μια συσκευή που παρέχει (συνήθως αναλογική) απεικόνιση και όχι ηλεκτρονικές εξόδους όπως π.χ. ένας μετρητής τάσης (tension gage). Ένας καταγραφέας (recorder) ή αθροιστής (totalizer) είναι ένα όργανο που καταγράφει, αθροίζει ή παρακολουθεί μετρήσεις στο χρόνο.

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

## 7.2.2 Διατάξεις μετατροπής (Transducers) γραμμικής ταχύτητας

### 7.2.2.1 Περιγραφή και Εφαρμογές

Οι διατάξεις μετατροπής γραμμικής ταχύτητας παρέχουν ένα απλό αλλά ακριβές μέσο μέτρησης της γραμμικής ταχύτητας. Αποτελούνται από υψηλής ισχύος μαγνητικούς πυρήνες που προκαλούν μετρήσιμη τάση DC καθώς μετακινούνται ομοκεντρικά (concentrically) μέσα σε θωρακισμένα πηνία (coils). Ο βασικός αυτός σχεδιασμός επιτρέπει τη λειτουργία χωρίς εξωτερική διέγερση, ενώ παράλληλα δημιουργείται στην έξοδο τάση η οποία μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα του πυρήνα (μαγνήτη). Τέτοιου είδους διατάξεις μετατροπής (transducers) είναι ιδανικές για τη σεισμολογία, την παρακολούθηση της ταχύτητας υδραυλικού πλήγματος, του ρυθμού ανόρυξης γεωτρήσεων καθώς και για άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας.



Σχήμα 7.23. Διατάξεις μετατροπής (Transducers) γραμμικής ταχύτητας (Trans-Tec/Series 100).

### 7.2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των διάταξεων μετατροπής (transducer) γραμμικής ταχύτητας .

Πίνακας 7.1 : Μηχανικές ιδιότητες διατάξεων μετατροπής γραμμικής ταχύτητας

#### MECHANICAL SPECIFICATIONS

MODEL NUMBER	COIL HOUSING DIMENSIONS, Inches (mm)					MAGNET DIMENSIONS, Inches (mm)			
	C <sub>A</sub>	L <sub>A</sub>	(OD) <sub>A</sub>	(ID) <sub>A</sub>	WEIGHT W <sub>A</sub> Grams	L <sub>C</sub>	(OD) <sub>C</sub>	THREAD	WEIGHT W <sub>C</sub> Grams
0100-0000	1.34 ( 34)	3.17 ( 81)	0.374 (9.5)	0.13 (3.3)	20	2.38 ( 60)	0.125 (3.2)	1-72 NF	3.5
0100-0001	1.34 ( 34)	3.17 ( 81)	0.374 (9.5)	0.13 (3.3)	20	1.63 ( 41)	0.125 (3.2)	1-72 NF	2.5
0101-0000	1.88 ( 48)	4.24 (108)	0.374 (9.5)	0.13 (3.3)	25	3.00 ( 76)	0.125 (3.2)	1-72 NF	4.5
0101-0001	1.88 ( 48)	4.24 (108)	0.374 (9.5)	0.13 (3.3)	25	2.25 ( 57)	0.125 (3.2)	1-72 NF	3.8
0111-0000	2.25 ( 57)	5.06 (129)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	110	3.50 ( 89)	0.187 (4.8)	4-40 NC	11
0111-0001	2.25 ( 57)	5.06 (129)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	110	2.75 ( 70)	0.187 (4.8)	4-40 NC	10
0112-0000	3.25 ( 83)	7.06 (179)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	150	4.50 (114)	0.187 (4.8)	4-40 NC	15
0112-0001	3.25 ( 83)	7.06 (179)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	150	3.75 ( 96)	0.187 (4.8)	4-40 NC	14
0113-0000	4.25 (108)	9.06 (230)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	200	5.25 (133)	0.187 (4.8)	4-40 NC	17
0113-0001	4.25 (108)	9.06 (230)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	200	4.50 (114)	0.187 (4.8)	4-40 NC	16
0114-0000	5.38 (137)	11.31 (287)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	240	6.75 (171)	0.187 (4.8)	4-40 NC	22
0114-0001	5.38 (137)	11.31 (287)	0.624 (15.9)	0.19 (4.8)	240	6.00 (152)	0.187 (4.8)	4-40 NC	21
0122-0000	7.63 (194)	15.81 (402)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	420	9.25 (235)	0.25 (6.3)	4-40 NC	54
0122-0001	7.63 (194)	15.81 (402)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	420	8.50 (216)	0.23 (5.8)	4-40 NC	51
0123-0000	11.1 (282)	22.81 (579)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	610	11.75 (298)	0.25 (6.3)	4-40 NC	69
0123-0001	11.1 (282)	22.81 (579)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	610	11.00 (279)	0.23 (5.8)	4-40 NC	66
0124-0001	14.1 (358)	29.00 (737)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	810	14.25 (362)	0.23 (5.8)	4-40 NC	88
0125-0001	18.6 (472)	38.00 (965)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	1120	18.75 (476)	0.23 (5.8)	4-40 NC	121
0126-0001	22.1 (561)	45.00 (1143)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	1360	22.25 (565)	0.23 (5.8)	4-40 NC	147
0127-0001	26.1 (663)	53.00 (1346)	0.749 (19)	0.30 (7.6)	1520	26.25 (667)	0.23 (5.8)	4-40 NC	156

**Πίνακας 7.2 :** Ηλεκτρικές ιδιότητες διατάξεων μετατροπής γραμμικής ταχύτητας

**ELECTRICAL SPECIFICATIONS**

MODEL NUMBER	MAGNET DIMENSIONS Inches (mm)		NOM. OUTPUT SENSITIVITY mV/in/sec (mV/mm/sec)	ELECTRICAL IMPEDANCE Coils Connected in Series		REPLACEMENT MAGNETS	FREQUENCY RESPONSE* Hz	
	WORKING RANGE	USABLE RANGE	Open Circuit	R Ohms	L Henries	Magnet Number	Load = 10R	Load = 100R
0100-0000	0.5 (12)	1.3 (33)	120 (5)	2000	0.085	M000-0000	350	1500
0100-0001	0.5 (12)	1.3 (33)	54 (2)	2000	0.085	M000-0008	350	1500
0101-0000	1.0 (25)	1.9 (48)	90 (4)	2500	0.065	M000-0001	600	1500
0101-0001	1.0 (25)	1.9 (48)	40 (2)	2500	0.065	M000-0009	600	1500
0111-0000	1.0 (25)	2.3 (58)	550 (22)	13000	1.6	M000-0002	120	600
0111-0001	1.0 (25)	2.3 (58)	250 (10)	13000	1.6	M000-0010	120	600
0112-0000	2.0 (50)	3.4 (86)	550 (22)	19000	2.9	M000-0003	100	500
0112-0001	2.0 (50)	3.4 (86)	250 (10)	19000	2.9	M000-0011	100	500
0113-0000	3.0 (75)	4.2 (107)	550 (22)	25000	3.2	M000-0004	120	500
0113-0001	3.0 (75)	4.2 (107)	250 (10)	25000	3.2	M000-0012	120	500
0114-0000	4.0 (100)	5.5 (140)	550 (22)	32000	4.0	M000-0005	120	400
0114-0001	4.0 (100)	5.5 (140)	250 (10)	32000	4.0	M000-0013	120	400
0122-0000	6.0 (150)	8.0 (203)	425 (17)	11500	1.9	M000-0006	95	450
0122-0001	6.0 (150)	8.0 (203)	160 (6)	11500	1.9	M000-0014	95	450
0123-0000	9.0 (225)	11.0 (279)	425 (17)	17000	2.8	M000-0007	95	450
0123-0001	9.0 (225)	11.0 (279)	160 (6)	17000	2.8	M000-0015	95	450
0124-0001	12.0 (300)	15.0 (381)	175 (7)	22000	3.7	M000-0023	95	450
0125-0001	16.5 (412)	18.5 (470)	175 (7)	29000	5.1	M000-0024	90	430
0126-0001	20.0 (500)	22.0 (559)	175 (7)	34000	6.2	M000-0025	90	430
0127-0001	24.0 (600)	26.0 (660)	175 (7)	42000	7.3	M000-0028	90	430

Operating Temperature Range: -50°F to +200°F (-46°C to +93°C)  
Max. Non-Linearity: < ±2.5% of Reading

\* Output voltage is attenuated < 1% of the constant velocity value.

Polarity of Output: Voltage at Red lead is positive with respect to that at Black when north pole of magnet is closest to, and traveling towards, lead end of LVT.

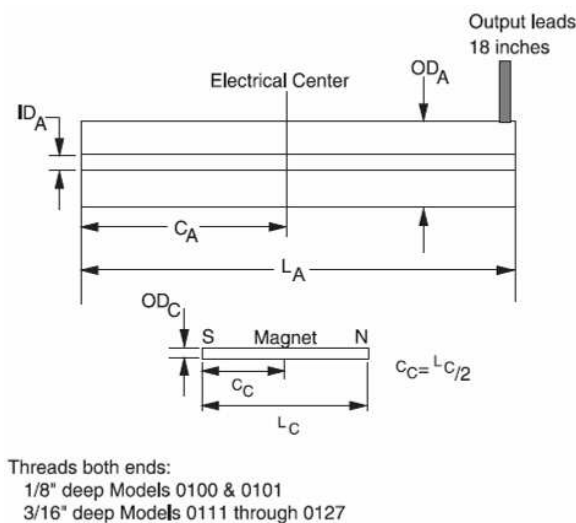
**Πλεονεκτήματα**

- Αυτοτροφοδοτούμενη (Self-Generating) τάση εξόδου DC
- Υψηλή ευαισθησία
- Μαγνητική θωράκιση
- Απόκριση σε υψηλές συχνότητες

**Εγκατάσταση**

Οι εξεταζόμενοι transducers παράγουν τάση στην έξοδο μόνο όταν κινείται ο μαγνήτης. Αυτό καθιστά αδύνατο την ηλεκτρικό προσδιορισμό της σωστής θέσης του μαγνήτη για γραμμική λειτουργία. Οι χρήστες πρέπει να τοποθετούν μηχανικά το μαγνήτη σε ένα προκαθορισμένο σημείο αναφοράς. Όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα (Σχήμα 7.24), η θέση του ηλεκτρικού κέντρου των πηνίων είναι γνωστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς. Το μέσο της γραμμικής διαδρομής (stroke) προκύπτει ευθυγραμμίζοντας το κέντρο του μαγνήτη, C<sub>C</sub>, με το ηλεκτρικό κέντρο C<sub>A</sub>, των πηνίων. Από αυτή τη θέση ο μαγνήτης μπορεί να μετακινηθεί ½ του γραμμικού εύρους σε κάθε διεύθυνση. Το περίβλημα της διάταξης μετατροπής ασφαρίζεται με κατάλληλη διάταξη περίσφιξης

(clamping). Η χρήση βιδών θα πρέπει να αποφεύγεται καθώς ενδέχεται να προκαλέσει εσωτερική βλάβη σε περίπτωση υπερβολικού σφιζίματος.



Σχήμα 7.24. Σχηματικό διάγραμμα διάταξης μετατροπέα (transducer) γραμμικής ταχύτητας.

### 7.3 Περιγραφή για τα παραμορφωσιόμετρα (strain gauges) τύπου VW

#### 7.3.1. Εισαγωγή

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

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

Στην περίπτωση των φωτοηλεκτρικών παραμορφωσιόμετρων μια δέσμη φωτός διέρχεται από μια μεταβαλλόμενη σχισμή, η οποία ενεργοποιείται από ένα μηκυσιόμετρο (extensometer), και κατευθύνεται σε ένα φωτοηλεκτρικό στοιχείο. Καθώς το άνοιγμα της σχισμής μεταβάλλεται, η ποσότητα του φωτός που φθάνει στο φωτοηλεκτρικό στοιχείο cell μεταβάλλεται επίσης, προκαλώντας μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από το προαναφερθέν στοιχείο. Τα ημιαγώγιμα ή τα πιεζοηλεκτρικά παραμορφωσιόμετρα κατασκευάζονται από φεροηλεκτρικά υλικά. Αναφορικά με τα φεροηλεκτρικά υλικά, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, μεταβάλλεται το ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνεια τους κατά τη μηχανική ένταση των κρυστάλλων. Η ωμική επίδραση ορίζεται ως η μεταβολή της αντίστασης ενός υλικού λόγω εφαρμοσμένης έντασης και αυτός ο όρος χρησιμοποιείται ευρέως για τα ημιαγώγιμα υλικά. Τα οπτικά παραμορφωσιόμετρα είναι τα φωτοελαστικά, ιντερφερόμετρα και τα ολογραφικά ιντερφερόμετρα. Σχετικά με τα παραμορφωσιόμετρα οπτικών ινών ο αισθητήρας μετρά την παραμόρφωση μεταβάλλοντας τη συχνότητα του φωτός που ανακλάται ελαφρώς στη σχάρα ίνας Bragg, η οποία είναι ενσωματωμένη στο εσωτερικό της ίδιας της ίνας.

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

Οι τρεις βασικές προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή παραμορφωσιόμετρων είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης (συμπεριλαμβανομένων του ρυθμού μεταβολής, του μεγέθους και της χρονικής εξάρτησης) και τέλος η σταθερότητα που απαιτείται κατά την εφαρμογή. Το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας είναι το εύρος της θερμοκρασίας περιβάλλοντος όπου το παραμορφωσιόμετρο λειτουργεί χωρίς μόνιμες διαφοροποιήσεις των μετρητικών ιδιοτήτων του. Άλλες επίσης σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι το ενεργό μήκος μέτρησης, ο συντελεστής μέτρησης, η ονομαστική αντίσταση και το ευαίσθητο σε παραμόρφωση υλικό. Το μήκος μέτρησης του παραμορφωσιόμετρου είναι το ενεργό ή το ευαίσθητο σε παραμορφώσεις μήκος της μεταλλικής πλάκας (grid).

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



Κοινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των παραμορφωσιόμετρων περιλαμβάνουν την επένδυση των μεταλλικών ελασμάτων (ribbon leads), την επένδυση των συρμάτων (lead wires), την επικόλληση τεμαχίων (solder tabs), τη κρυογενική χρήση (cryogenic use), την δυνατότητα εγκατάστασης με ενσωμάτωση embeddable, την προστασία με κάλυμα (encapsulated), την υδατοστεγανότητα, και τη συγκολλησιμότητα.

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

### 7.3.2 Εφαρμογές

**Παραμορφωσιόμετρα ράβδων χάλυβα σκυροδέματος:** Συγκολλησίμα ή συνδεόμενα σταθερά επί ράβδων χάλυβα σκυροδέματος παραμορφωσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση παραμόρφωσης των ράβδων χάλυβα διατομής σκυροδέματος ή προεντεταμένου σκυροδέματος. Οι συνήθεις εφαρμογές τους περιλαμβάνουν:

- Παρακολούθηση παραμόρφωσης διατομών δομικών στοιχείων κτιρίων, γεφυρών, τελικής επένδυσης σιδηράγων και θεμελιώσεων κατά τη διάρκεια ή μετά την κατασκευή.
- Παρακολούθηση της παραμόρφωσης αγκυρίων τοίχων αντιστήριξης, οπλισμένων επιχωμάτων, οπλισμένης γης και άλλων προεντεταμένων συστημάτων αγκύρωσης.
- Παρακολούθηση συμπεριφοράς συστημάτων αντιστήριξης βαθειών εκσκαφών.
- Μέτρηση παραμόρφωσης σε σήραγγες (τούνελ) και θεμελιώσεις.
- Παρακολούθηση περιοχών σωληνώσεων όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων.
- Παρακολούθηση κατανομής φορτίου σε ομάδα πασσάλων θεμελίωσης

**Παραμορφωσιόμετρα σκυροδέματος:** Παραμορφωσιόμετρα που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα είτε μέσω μεταλλικής στερέωσής τους σε γεινιάζουσες ράβδους οπλισμού πριν την σκυροδέτηση είτε μέσω αρχικής ενσωμάτωσής τους εκτός δομικού στοιχείου σε κύβο σκυροδέματος και εν συνεχεία στερέωσης του κύβου σκυροδέματος στον ξυλότυπο πριν την σκυροδέτηση του δομικού στοιχείου. Μετρούν την θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα. Οι συνήθεις εφαρμογές τους περιλαμβάνουν:

- Μέτρηση παραμορφώσεων στη θλιβόμενη ζώνη δομικών στοιχείων οπλισμένου ή άοπλου σκυροδέματος (δοκοί – πλάκες)
- Μέτρηση παραμορφώσεων σε θλιβόμενη και εφελκυστική ζώνη προεντεταμένου σκυροδέματος (πριν την απόθλιψη).
- Μέτρηση παραμορφώσεων σε όλες τις ακραίες ίνες υποστυλωμάτων, βάθρων, τοιχίων.
- Μέτρηση παραμορφώσεων στην τελική επένδυση σιδηράγων

### 7.3.3 Είδη παραμορφωσιόμετρων

#### 7.3.3.1 Παραμορφωσιόμετρα τύπου VW Spot-Weldable

Δεδομένου ότι τα παραμορφωσιόμετρα τύπου VW Spot-Weldable είναι σχεδιασμένα για μέτρηση χάλυβα, το ταλαντούμενο καλώδιο μέτρησης παραμόρφωσης συγκολλάται σημειακά στην επιφάνεια του χάλυβα. Στη συνέχεια τοποθετείται ένας αισθητήρας στο πάνω μέρος του μετρητή. Απεικόνιση των ενδείξεων οργάνου επιτυγχάνεται μέσω μια VW συσκευής ένδειξης πληροφοριών ή μέσω ενός καταγραφικού καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων (data logger).

#### 7.3.3.2 Εφαρμογές

Τα παραμορφωσιόμετρα σημειακής συγκόλλησης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αισθητήρες μέτρησης παραμόρφωσης και ένα ταλαντούμενο καλώδιο ένδειξης ή ένα σύστημα συλλογής δεδομένων για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης σε χαλύβδινα στοιχεία. Οι συνήθειες εφαρμογές είναι ίδιες με αυτές των παραμορφωσιόμετρων χάλυβα. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι χρειάζεται σημειακός συγκολλητής (spot-welder). Επίσης αυτός ο τύπος παραμορφωσιόμετρων δεν είναι κατάλληλος για υψηλής ταχύτητας δυναμικές μετρήσεις.



Σχήμα 7.25 Σημειακής συγκόλλησης παραμορφωσιόμετρο.

#### 7.3.3.3 Λειτουργία

Το παραμορφωσιόμετρο, με το ενσωματωμένο προεντεταμένο καλώδιο στο εσωτερικό του, συγκολλάται στο δομικό στοιχείο, έτσι ώστε αύξηση της παραμόρφωσης να οδηγεί σε αύξηση της έντασης του καλωδίου και ομοίως μείωση της παραμόρφωσης να οδηγεί σε μείωση της έντασης του καλωδίου. Ο αισθητήρας μέτρησης παραμόρφωσης τοποθετείται στο πάνω μέρος του παραμορφωσιόμετρου.

Για την περίπτωση επίπεδων επιφανειών, ο αισθητήρας συνήθως συγκρατείται με συγκολλημένους ιμάντες (weld-down straps) ενώ για την περίπτωση ράβδων ενίσχυσης ή tieback ράβδων ο αισθητήρας συγκρατείται μέσω καλωδίων και ταινιών.

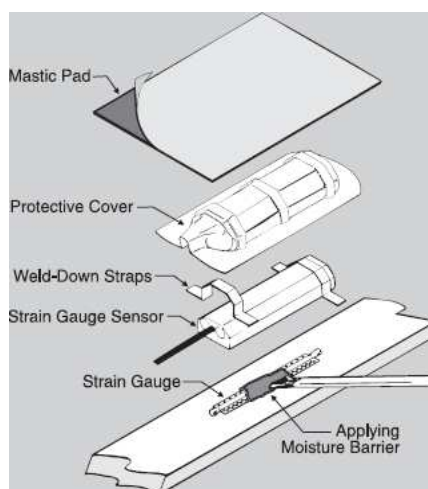
Ο αισθητήρας παραμόρφωσης χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομαγνήτη για τη διέγερση του παραμορφωσιόμετρου (uses an electromagnet to pluck the strain gauge) και στη συνέχεια επιστρέφει ένα συχνοτικό σήμα στη συσκευή ένδειξης πληροφοριών ή συλλογής δεδομένων (data logger), όπου παρέχονται αποτελέσματα σε μονάδες microstrain ή περιόδου. Ο VW αισθητήρας μέτρησης παραμόρφωσης επίσης έχει ενσωματωμένο ένα αισθητήρα θερμοκρασίας, ο οποίος παρέχει δεδομένα σχετικά με την θερμοκρασιακή αντιστάθμιση compensation.

### 7.3.3.4 Εγκατάσταση

Η σκουριά αφαιρείται με αμμοβολή sander και έπειτα η επιφάνεια επιπεδώνεται με σβουράκι grinder. Αφού η επιφάνεια έχει καθαριστεί και επιπεδωθεί, η συσκευή μέτρησης συγκολλάται με σημειακό συγκολλητή. Ακολουθεί αντιδιαβρωτική προστασία της συσκευής και στη συνέχεια το παραμορφωσιόμετρο τοποθετείται στο πάνω μέρος του αισθητήρα. Αφού ληφθούν κάποιες δοκιμαστικές ενδείξεις, ο αισθητήρας συνδέεται στέρεα με τη συσκευή μέτρησης είτε με συγκολλησίμους χαλύβδινους ιμάντες είτε με ειδικά περιβλήματα (tie-wraps). Έπειτα η συσκευή μέτρησης και ο συνδετήρας επικαλύπτονται με μαστίχη (mastic) και ταινία.



**Σχήμα 7.26** Σημειακής συγκόλλησης παραμορφωσιόμετρο τοποθετημένο σε ράβδο οπλισμού. Η συσκευή μέτρησης είναι αδιαβροχοποιημένη με χρήση μαστίχης και ταινίας.



**Σχήμα.7.27.** Εγκατάσταση παραμορφωσιόμετρου σε επίπεδη επιφάνεια. Προαιρετικά μπορούν να εφαρμοστούν προστατευτικό κάλυμμα και φύλλο μαστίχης.

### 7.3.3.5 Πλεονεκτήματα

**Πολύ Χαμηλό προφίλ:** Το ταλαντούμενο τεμάχιο από σύρμα τοποθετείται μόλις 0,96 χιλιοστά (0,038 ίντσες) πάνω από το στοιχείο που μετράται. Αυτός ο χαμηλού προφίλ σχεδιασμός (κατοχυρωμένος με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας) μειώνει τα σφάλματα που προκαλούνται από την κάμψη του δομικού στοιχείου.

**Προεντεταμένο καλώδιο:** Οι προεντεταμένες συσκευές μέτρησης ελαχιστοποιούν τη χρονοβόρα διαδικασία φόρτισης του ταλαντούμενου τεμαχίου από σύρμα στο πεδίο.

**Πλήρους μήκους φλάντζα συγκόλλησης (Full-Length Welding Flange):** Η πλήρους μήκους φλάντζα συγκόλλησης επιτρέπει αξιόπιστη σύνδεση της συσκευής μέτρησης με το δομικό στοιχείο και αποτρέπει την κακή ή λανθασμένη ευθυγράμμιση των άκρων της συσκευής, συνηθισμένο πρόβλημα και σε άλλους τύπους παραμορφωσιόμετρων.

**Κατασκευή από ανοξείδωτο χάλυβα:** Η φλάντζα συγκόλλησης και το κυλινδρικό κάλυμμα που στεγανοποιεί το ταλαντούμενο καλώδιο κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα με διαβρωτική αντοχή. Το καλώδιο είναι επίσης από χάλυβα, επιλεγμένο έτσι ώστε τα θερμικά χαρακτηριστικά να είναι εφάμιλλα με αυτά του δομικού χάλυβα.

### 7.3.3.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά παραμορφωσιόμετρων σημειακής συγκόλλησης

#### • Παραμορφωσιόμετρα σημειακής συγκόλλησης

Gauge Set Midrange (Durham Geo-Model 52602100)

Gauge for Compressive Strain (Durham Geo-Model 52602101)

Gauge for Tensile Strain (Durham Geo-Model 52602102)

Το παραμορφωσιόμετρο αποτελούμενο από ταλαντούμενο καλώδιο ενδείκνυται για σημειακή συγκόλληση με χάλυβα. Απαιτείται η τοποθέτηση αισθητήρα μέτρησης παραμόρφωσης στο κάτω μέρος.

**Εύρος:** Περίπου 2.500 microstrain.

**Μήκος συσκευής μέτρησης:** 62 χιλιοστά (2,45 ").

**Ύψος Καλωδίου:** 0,96 χιλιοστά (0,038 ") πάνω από το μετρούμενο στοιχείο.

**Θερμικός συντελεστής:** 10,8 x 10<sup>-6</sup> ανά ° C, 6 x 10<sup>-6</sup> ανά ° F.

**Υλικά:** Ανοξείδωτη χαλύβδινη φλάντζα και κυλινδρικό περίβλημα, χαλύβδινο σύρμα.

**Διαστάσεις:** 66,7 x 7,6 x 1,8 mm, (2,65 x 0,3 ιντσών x.07).

#### • Παραμορφωσιόμετρο τύπου VW

**Αισθητήρας μέτρησης παραμόρφωσης (Durham Geo-Model 52623000)**

Ο VW αισθητήρας μέτρησης παραμόρφωσης είναι ταλαντούμενο καλώδιο, τύπου pluck, το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με σημειακής συγκόλλησης παραμορφωσιόμετρο. Περιλαμβάνει ένα θερμίστορ (thermistor) ή RTD για θερμοκρασιακές μετρήσεις και δυο ανοξείδωτους χαλύβδινους συγκολλησίμους ιμάντες που σταθεροποιούν τον αισθητήρα στην κατασκευή.

**Συχνотικό εύρος:** 0,8 έως 2,4 kHz.

**Χαρακτηριστικά θερμοκρασιακά όρια:** -29 έως 105 ° C, -20 έως 220 ° F.

**Χαρακτηριστικά όρια υδατοστεγανότητας:** 10,4 bar, 150psi.

**Υλικά:** ABS πλαστική θήκη ο κενός χώρος της οποίας γεμίζεται με ρητίνη.  
**Διαστάσεις:** 80 x 26 x 16 mm, 1 x 3,17 x 0,64".  
**Βάρος:** 28 g.

- **Καλώδιο σήματος (Durham Geo-Model 50613524)**

Καλώδιο προστατευόμενο με ειδικό κάλυμμα με 22 μετρητικούς tinned-copper αγωγούς και περίβλημα πολυουρεθάνης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τους 80 ° C (176 ° F). Το καλώδιο αυτό συνδέεται με τον αισθητήρα εργοστασιακά.

- **Καθολικό Connector (Durham Geo-Model 57705001) και καθολικό τερματικό κιβώτιο (Durham Geo-Model 57711600)**

Συμπεριλαμβάνονται 12 αισθητήρες και ένας δείκτης. Οι αισθητήρες επιλέγονται από περιστροφικό διακόπτη. Το αδιαπέρατο από νερό και αέρα κιβώτιο έχει πλάτος, ύψος και βάθος ίσα με 290, 345 και 135 χιλιοστά αντίστοιχα.

### **7.3.3.7. Παραμορφωσιόμετρα τύπου VW, συγκόλλησης τόξου (Arc-Weldable)**

Τα παραμορφωσιόμετρα τύπου VW, συγκόλλησης τόξου (Arc-Weldable) είναι σχεδιασμένα για να μετρούν παραμόρφωση χαλύβδινων στοιχείων. Το ταλαντούμενο καλώδιο του παραμορφωσιόμετρου συγκρατείται στην κατασκευή μέσω βάσεων ανάρτησης, οι οποίες συνδέονται στην κατασκευή με συγκόλληση τόξου. Βάσεις ανάρτησης των οποίων ο κενός χώρος γεμίζεται με μείγμα τσιμέντου είναι διαθέσιμες για κατασκευές σκυροδέματος. Οι ενδείξεις οργάνου λαμβάνονται μέσω μιας συσκευής ένδειξης πληροφοριών ή σύστημα αποθήκευσης δεδομένων.

### **7.3.3.8 Εφαρμογές**

Παραμορφωσιόμετρα τύπου VW, συγκόλλησης τόξου με ταλαντούμενο καλώδιο χρησιμοποιούνται για την μέτρηση παραμόρφωσης σε χάλυβα ή σε σκυρόδεμα και σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές τους είναι αυτές που έχουν αναφερθεί για την περίπτωση των παραμορφωσιόμετρων για σκυρόδεμα.



Σχήμα 7.28 Παραμορφωσιόμετρα τύπου VW, συγκόλλησης τόξου (Arc-Weldable).

### 7.3.3.9 Λειτουργία

Η λειτουργία του παραμορφωσιόμετρου τύπου VW, συγκόλλησης τόξου βασίζεται στην αρχή ότι το καλώδιο που βρίσκεται υπό ένταση, όταν διεγερθεί, ταλαντώνεται με την αρμονική ιδιοσυχνότητά του, οπότε μετρώντας αυτή την συχνότητα, μπορούμε να υπολογίσουμε την παραμόρφωση του καλωδίου. Η συσκευή μέτρησης κατασκευάζεται έτσι ώστε το καλώδιο να παραμένει τεταμένο μεταξύ των δυο βάσεων ανάρτησης, οι οποίες συγκολλούνται στο δομικό στοιχείο. Η φόρτιση του δομικού στοιχείου μεταβάλλει την απόσταση των δυο βάσεων ανάρτησης και έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της έντασης του καλωδίου. Ένας ηλεκτρομαγνήτης χρησιμοποιείται για τη διέγερση του καλωδίου και τη μέτρηση της συχνότητας ταλάντωσης. Στη συνέχεια υπολογίζεται η παραμόρφωση εφαρμόζοντας συντελεστές βαθμονόμησης στη μετρούμενη συχνότητα.

### 7.3.3.10 Εγκατάσταση

Τα παραμορφωσιόμετρα τύπου VW, συγκόλλησης τόξου διαθέτουν δυο βάσεις ανάρτησης, οι οποίες συνδέονται σε μια ράβδο που δημιουργεί κατάλληλο διάστημα και συγκολλούνται στο δομικό στοιχείο. Αφού η συγκόλληση κρυώσει, η ράβδος που δημιουργεί διάστημα αφαιρείται και το παραμορφωσιόμετρο τοποθετείται στη θέση του. Το όργανο μέτρησης στη συνέχεια συνδέεται με μια συσκευή ένδειξης πληροφοριών και ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να μετρά εφελκυσμό, θλίψη ή και τα δυο. Το παραμορφωσιόμετρο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και με βάσεις ανάρτησης των οποίων ο κενός χώρος γεμίζεται με τσιμέντο. Οι βάσεις αυτές αγκυρώνονται στην κατασκευή μέσω οπών που ανοίγονται σε αυτή.

### 7.3.3.11 Πλεονεκτήματα

**Δυνατότητα ρύθμισης στις συνθήκες πεδίου:** Το παραμορφωσιόμετρο μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε το μεγαλύτερο μέρος του εύρους του να είναι διαθέσιμο να μετρά εφελκυσμό ή θλίψη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

**Μόνιμα προσαρτημένα πηνία:** Τα πηνία χρησιμοποιούνται για τη διέγερση και την εμφάνιση πληροφοριών σχετικών με το ταλαντούμενο καλώδιο. Δεν μπορούν να αποσυνδεθούν τυχαία από το όργανο μέτρησης κατά την εγκατάσταση και τις εργασίες ηλεκτρικής σύνδεσης (wiring operations).

**Ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας:** Ο αισθητήρας θερμοκρασίας είναι χρήσιμος για διορθώσεις θερμοκρασίας όταν το όργανο μέτρησης είναι εγκαταστημένο σε όργανα που έχουν διαφορετικό θερμοκρασιακό συντελεστή.

**Εύκολη εγκατάσταση:** Το σύστημα ανάρτησης εξασφαλίζει ότι το όργανο μέτρησης δεν έχει υποστεί βλάβη κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης των πλακών ανάρτησης. Επίσης, αυτό το σύστημα ανάρτησης επιτρέπει την επανατοποθέτηση και επαναχρησιμοποίηση του οργάνου μέτρησης.

**Αξιόπιστη μετάδοση σημάτων:** Το όργανο μέτρησης παρέχει ισχυρό σήμα το οποίο μπορεί να μεταδοθεί αξιόπιστα σε μεγάλες αποστάσεις εφόσον χρησιμοποιηθεί σωστά επενδεδυμένο καλώδιο.

### 7.3.3.12 Τεχνικά χαρακτηριστικά

- **Παραμορφωσιόμετρο τύπου VW, συγκόλλησης τόξου (Durham Geo-Model 52640306)**

Το παραμορφωσιόμετρο με ταλαντούμενο καλώδιο χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση παραμορφώσεων χάλυβα σε χαλύβδινα δομικά στοιχεία. Στα εξαρτήματά του συμπεριλαμβάνονται όργανο μέτρησης παραμορφώσεων με θερμίστορ και δυο συγκολλησιμες βάσεις ανάρτησης.

**Εύρος:** 3.000 microstrain. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει την ένταση για να μεγιστοποιήσει το εύρος της εφαρμογής.

**Ανάλυση:** 1 microstrain με VW Δείκτη.

**Ακρίβεια:**  $\pm 0,1\%$  FS.

**Θερμοκρασιακός συντελεστής:** 11ppm / ° C.

**Μήκος:** 150 mm (5,875 "). Όργανα μέτρησης με βάση μεγαλύτερου μήκους είναι διαθέσιμα κατόπιν ειδικής παραγγελίας.

**Βάση ανάρτησης:** 38 x 10 x 19 mm (1,5 x 0,75 x 0,375 ").

### 7.3.3.13 Παραμορφωσιόμετρο ενσωματούμενο στο σκυρόδεμα τύπου VW (Embedment)

Το παραμορφωσιόμετρο ενσωματούμενο στο σκυρόδεμα τύπου VW (Embedment) είναι σχεδιασμένο για τη μέτρηση της παραμόρφωσης σε οπλισμένο ή άοπλο σκυρόδεμα. Το ταλαντούμενο καλώδιο του οργάνου μέτρησης συνήθως προσαρτάται σε μια από τις σχάρες οπλισμού. Οι ενδείξεις οργάνου λαμβάνονται μέσω μιας συσκευής ένδειξης πληροφοριών ή σύστημα αποθήκευσης δεδομένων.



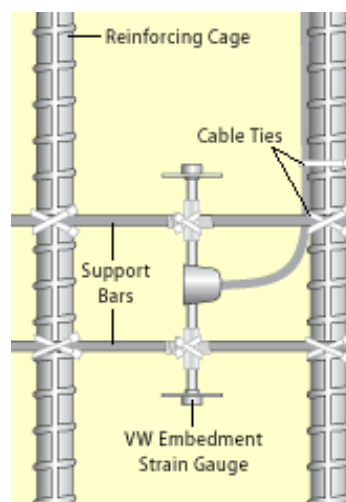
**Σχήμα 7.29** Παραμορφωσιόμενο ενσωματούμενο στο σκυρόδεμα τύπου VW (Embedment).

#### 7.3.3.14 Λειτουργία

Η βασική αρχή λειτουργίας του παραμορφωσιόμενο ενσωματούμενου στο σκυρόδεμα τύπου VW (Embedment) είναι ίδια με αυτή που έχει περιγραφεί στην παράγραφο 7.3.3.9.

#### 7.3.3.15 Εγκατάσταση

Σε περιπτώσεις εφαρμογών οπλισμένου ή προεντεταμένου σκυροδέματος το παραμορφωσιόμενο ενσωματούμενο στο σκυρόδεμα τύπου VW μπορεί να εγκατασταθεί είτε πριν είτε αμέσως μετά την σκυροδέτηση. Τα όργανα μέτρησης συνίστανται από μια ροζέττα, η οποία είτε τοποθετείται απευθείας στο μαλακό σκυρόδεμα ή μέσω μιας διάταξης προσαρμογής ροζέττας.



**Σχήμα 7.30** Εγκατάσταση παραμορφωσιόμενου ενσωματούμενου στο σκυρόδεμα τύπου VW (Embedment).



### 7.3.3.16 Πλεονεκτήματα

**Μόνιμα προσαρτημένα πηνία:** Τα πηνία χρησιμοποιούνται για τη διέγερση και την εμφάνιση πληροφοριών σχετικών με το ταλαντούμενο καλώδιο. Δεν μπορούν να αποσυνδεθούν τυχαία από το όργανο μέτρησης κατά την εγκατάσταση και τις εργασίες ηλεκτρικής σύνδεσης (wiring operations).

**Ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας:** Ο αισθητήρας θερμοκρασίας είναι χρήσιμος για διορθώσεις θερμοκρασίας όταν το όργανο μέτρησης είναι εγκαταστημένο σε όργανα που έχουν διαφορετικό θερμοκρασιακό συντελεστή.

**Αξιόπιστη μετάδοση σημάτων:** Το όργανο μέτρησης παρέχει ισχυρό σήμα το οποίο μπορεί να μεταδοθεί αξιόπιστα σε μεγάλες αποστάσεις εφόσον χρησιμοποιηθεί σωστά επενδεδυμένο καλώδιο.

### 7.3.3.17 Τεχνικά χαρακτηριστικά παραμορφωσιόμετρου πάκτωσης τύπου VW

- **Παραμορφωσιόμετρο πάκτωσης τύπου VW (Durham Geo-Model 52640126)**

Παραμορφωσιόμετρο με ταλαντούμενο χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης οπλισμένου ή άοπλου σκυροδέματος. Το παραμορφωσιόμετρο συμπεριλαμβάνει ενσωματωμένο θερμίστορ και RTD.

**Εύρος:** 3.000 microstrain (για ρύθμιση στο μέσο του φάσματος set mid-range).

**Ανάλυση:** 1 microstrain με VW Δείκτη.

**Ακρίβεια:**  $\pm 0,1\%$  FS.

**Θερμοκρασιακός συντελεστής:** 12 ppm / ° C.

**Μήκος:** 150 mm (5,875 ").

- **Καλώδιο σήματος (Durham Geo-Model 50613524)**  
Επενδεδυμένο καλώδιο προστατευόμενο με ειδικό κάλυμμα με 22 μετρητικούς tinned-copper αγωγούς και εύκαμπτο περίβλημα πολυουρεθάνης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τους 80 ° C (176 ° F).
- **Καθολικό τερματικό κιβώτιο για 6 αισθητήρες (Durham Geo-Model 57711606)**  
**Καθολικό τερματικό κιβώτιο για 12 αισθητήρες (Durham Geo-Model 57711600)**  
**Καθολικό τερματικό κιβώτιο για 24 αισθητήρες (Durham Geo-Model 57711624)**  
Συμπεριλαμβάνονται τερματικά για καλώδιο μετάδοσης σήματος από 6, 12 ή 24 αισθητήρες. Οι αισθητήρες επιλέγονται από περιστροφικό διακόπτη. Οι διαστάσεις του κιβωτίου 6 αισθητήρων και του κιβωτίου 12 ή 24 αισθητήρων είναι 240 x 190 x 120 mm και 290 x 345 x 135 mm αντίστοιχα.

## 8. ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 8.1. Τυποποίηση προδιαγραφών κατάλληλων για διαγωνισμούς.

Παρουσιάζονται παρακάτω ενδεικτικά σχέδια σύνταξης τεχνικών προδιαγραφών για δύο συστήματα καταγραφής της δυναμικής απόκρισης κατασκευών (ειδικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων και ειδικό δίκτυο ταχυτητομέτρων). Οι αναφερόμενες περιγραφές και τιμές των τεχνικών προδιαγραφών είναι απολύτως ενδεικτικές, και θα πρέπει να προσαρμόζονται από τον κάθε ενδιαφερόμενο ανάλογα με τις ανάγκες του, την τρέχουσα διαθέσιμη τεχνολογία της αγοράς, και το ύψος του προϋπολογισμού που έχει στη διάθεση του.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον ισχύοντα νόμο δημοσίων προμηθειών (3316/ 2005) όλοι οι όροι της προκήρυξης αποτελούν απαράβατους όρους, οπότε χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην τελική διαμόρφωσή τους (πχ. ένας ιδιαίτερα περιοριστικός όρος ακόμη και για ένα δευτερεύον εξάρτημα μπορεί να οδηγήσει στον αποκλεισμό όλων των προσφορών αν δεν είναι σε θέση να τον εκπληρώσουν). Στα παρακάτω, με τη λέξη ΦΟΡΕΑΣ εννοείται οργανισμός ή ιδιώτης που προκηρύσσει το έργο.

	<b>Καταγραφικό σύστημα 12 καναλιών υψηλής ανάλυσης</b>
<b>Τεμάχια</b>	<b>1</b>
<b>Συνολικός Προϋπολογισμός (€)</b>	<b>«Π/Υ» (μη συμπεριλαμβανομένου του ΦΠΑ 19%)</b>
	<p>Ψηφιακός καταγραφέας 12 καναλιών, υψηλής ανάλυσης (διακριτότητας τουλάχιστον 22bits, dynamic range τουλάχιστον 113dB), με έλεγχο από κατάλληλη ηλεκτρονική μονάδα, με όλες τις συνδέσεις, δώδεκα (12) μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα (dynamic range τουλάχιστον 150dB, full scale range 2g), τα απαιτούμενα καλώδια σύνδεσης και βύσματα με τα παρελκόμενα εξαρτήματα.</p> <p>Το σύστημα θα αποτελείται από:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ψηφιακό καταγραφέα</li> <li>2. Δώδεκα (12) μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα</li> <li>3. Λογισμικό</li> <li>4. Καλώδια σύνδεσης ψηφιακού καταγραφέα επιταχύνσεων με τα 12 μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα</li> <li>5. Συνοδευτικός εξοπλισμός καταγραφέα επιταχύνσεων, μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων και λοιπά εξαρτήματα</li> </ol> <p style="text-align: center;"><u>ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑΣ</u> Ο ψηφιακός καταγραφέας θα πρέπει να διαθέτει: <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. Εσωτερικά εγκατεστημένο modem (τουλάχιστον 9,6 kbaud, κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS)</li> </ol> </li> </ol>

**Περιγραφή /  
Χαρακτηριστικά**

- 1.2. Δέκτη δορυφορικού χρόνου/τόπου (GPS) με κατάλληλη κεραία και καλώδιο τουλάχιστον 5μ. μήκους.
- 1.3. Εσωτερική αφαιρούμενη μνήμη (PCMCIA) τουλάχιστον 64 Mb.
- 1.4. Δώδεκα (12) κανάλια σύνδεσης για ισάριθμα (12) εξωτερικά μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα.
- 1.5. Διακριτότητα τουλάχιστον 22bits.
- 1.6. Δυνατότητα χρησιμοποίησης μεταβλητού, ελεγχόμενου από το χρήστη, βήματος δειγματοληψίας με δυνατότητα λήψης έως τουλάχιστον 200 sps.
- 1.7. Λειτουργία με τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος 220V.
- 1.8. Δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή (σε λειτουργικό σύστημα WINDOWS2000 ή μεταγενέστερο) για τη μεταφορά των καταγραφών, τον εποπτικό έλεγχο της λειτουργικής κατάστασης και τη ρύθμιση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων του καταγραφέα επιταχύνσεων.
- 1.9. Δυνατότητα εύκολης μεταφοράς με έμφαση στο όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος μονάδας.
- 1.10. Dynamic range τουλάχιστον 113dB στα 0–50Hz.
- 1.11. Δυνατότητα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, του συστήματος καταγραφής επιταχύνσεων, με εξωτερική εντολή, από τον χρήστη (δυνατότητα καταγραφής για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ανεξάρτητα του ύψους της διέγερσης).
- 1.12. Ικανοποιητική προστασία από περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα βροχόπτωση / υγρασία και υψηλές/ χαμηλές θερμοκρασίες, ανεξάρτητα του χρόνου παραμονής του συστήματος σε εξωτερικό περιβάλλον (να περιγράφεται και να τεκμηριώνεται). Δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς την πρόκληση ανωμαλιών στη λειτουργία του από υπερθερμάνσεις ή άλλες παρενέργειες και κατάλληλη γείωση του συστήματος.
- 1.13. Δυνατότητα καθορισμού από τον χρήστη χρόνου προ- και μετά-εγγραφής (Pre and Post event time)

**2. ΔΩΔΕΚΑ (12) ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ**

Τα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα θα πρέπει να διαθέτουν:

- 2.1. Δυνατότητα μέτρησης επιταχύνσεων τόσο σε οριζόντια όσο και κατακόρυφη διεύθυνση.
- 2.2. Εύρος λειτουργίας (bandwidth) τουλάχιστον 0-100 Hz
- 2.3. Εύρος ζώνης αξιοπιστίας 100% (Bandwidth) από 0 – 50 Hz.
- 2.4. Εύρος κλίμακας μέτρησης (full scale range), με μέγιστο όριο μέχρι  $\pm 2g$ .
- 2.5. Dynamic range τουλάχιστον 135 db στα 0–50Hz.

**3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ**

- 3.1. Το σύστημα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό (σε περιβάλλον WINDOWS2000 ή μεταγενέστερο) για τη λήψη των καταγραφών, τον εποπτικό έλεγχο της λειτουργικής κατάστασης και τη ρύθμιση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων του

	<p>καταγραφέα επιταχύνσεων.</p> <p>3.2. Επιπλέον πρέπει, μέσω ειδικού λογισμικού, να είναι δυνατή η επεξεργασία και ανάλυση των ψηφιακών καταγραφών (κατ' ελάχιστον πρέπει να παρέχονται οι παρακάτω δυνατότητες: εφαρμογή φίλτρων για την απομάκρυνση του θορύβου, υπολογισμός Fast Fourier Transforms, Response Spectra, Power Density Spectra κ.τ.λ.), καθώς επίσης και η δυνατότητα παροχής (output) των αποτελεσμάτων σε αλφαριθμητική μορφή (ASCII) ώστε να είναι δυνατή η εύκολη ανάγνωση και επεξεργασία τους και από άλλα προγράμματα σε περιβάλλον WINDOWS.</p> <p>3.3. Θα πρέπει να παρέχονται τουλάχιστον 3 άδειες χρήσης του παραπάνω λογισμικού.</p> <p>4. <u>ΚΑΛΩΔΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΜΕ ΤΑ ΔΩΔΕΚΑ (12) ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ</u></p> <p>Απαιτούνται τα παρακάτω:</p> <p>4.1. Τρία (3) καλώδια σύνδεσης μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων μήκους 100m το καθένα.</p> <p>4.2. Πέντε (5) καλώδια σύνδεσης μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων μήκους 80m το καθένα.</p> <p>4.3. Τέσσερα (4) καλώδια σύνδεσης μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων μήκους 50m το καθένα.</p> <p>4.4. Πέντε (5) καλώδια «μπαλαντέζες» μήκους 30m το καθένα.</p> <p>4.5. Η ποιότητα των καλωδίων θα είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία του συστήματος. Ορίζονται τα 30m ως ελάχιστο μήκος καλωδίου σύνδεσης των μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων με τον ψηφιακό καταγραφέα επιταχύνσεων χωρίς να προκαλείται αλλοίωση σήματος και χωρίς τη μεσολάβηση ενδιάμεσου ενισχυτή.</p> <p>4.6. Ο ανάδοχος έχει την υποχρέωση να παραδώσει τα παραπάνω καλώδια με διαμορφωμένα τα άκρα τους με βύσματα και πλήρως λειτουργικά, σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΦΟΡΕΑ.</p> <p>5. <u>ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΜΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΛΟΙΠΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ</u></p> <p>5.1. Στην προσφορά θα συμπεριλαμβάνονται όλα τα απαιτούμενα επιπρόσθετα εξαρτήματα / όργανα ώστε να είναι δυνατή η άμεση λειτουργία του συστήματος καταγραφής επιταχύνσεων σε πλήρη σύνθεση (12 μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα), για δημιουργία δικτύου κοινής εκκίνησης/χρόνου.</p> <p>5.2. Τα καλώδια και ο λοιπός εξοπλισμός σύνδεσης των επιταχυνσιομέτρων με τον ψηφιακό καταγραφέα επιταχύνσεων θα διαθέτουν βύσματα και στις δύο άκρες τους. Εναλλακτικές λύσεις σύνδεσης δεν θα γίνουν δεκτές.</p> <p>5.3. Θα εκτιμηθεί ιδιαίτερα η παροχή θηκών μεταφοράς ολόκληρου του συστήματος (καταγραφικής μονάδας και αισθητήρων).</p>
--	---

<b>Χρόνος Παράδοσης</b>	Τρεις (3) μήνες από την υπογραφή στις σύμβασης.
<b>Χρόνος Παραλαβής</b>	Ένας (1) μήνας από την παράδοση (συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος δοκιμαστικής λειτουργίας, απόδοσης και αξιοπιστίας στις θέσεις που θα υποδειχθούν από τον ΦΟΡΕΑ, καθώς επίσης και η απαιτούμενη εκπαίδευση του προσωπικού που θα ορισθεί από τον ΦΟΡΕΑ).
<b>Εγγύηση</b>	Ένα (1) έτος τουλάχιστον
<b>Εκπαίδευση</b>	Ο Ανάδοχος αναλαμβάνει την υποχρέωση να παρέχει εκπαίδευση για τη λειτουργία, την επικοινωνία και τη χρήση του παραπάνω συστήματος καθώς επίσης και τη χρήση του λογισμικού, διάρκειας τουλάχιστον 16 ωρών (2 ημέρες) στα γραφεία του ΦΟΡΕΑ, σε προσωπικό που θα ορίσει ο ΦΟΡΕΑΣ

#### ΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΤΟΥ ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΥ

- ✓ Θα ληφθούν υπόψη ο χρόνος παράδοσης, η χρονική περίοδος της εγγύησης καλής λειτουργίας και συντήρησης του κατασκευαστή, η οποία θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα (1) έτος και η τεκμηριωμένη δυνατότητα του κατασκευαστή να παρέχει τεχνική υποστήριξη πέραν του ορίου της εγγύησης. Θα συνεκτιμηθεί ιδιαίτερα η παροχή εγγυήσεως μεγαλύτερης του ενός (1) έτους.
- ✓ Η τεκμηρίωση της χρήσης του προτεινόμενου εξοπλισμού σε πραγματικές, ανάλογες με τις αιτούμενες συνθήκες από άλλους χρήστες θα συνεκτιμηθεί ιδιαίτερα.

	<b>Καταγραφικό σύστημα (vibraphones) μέτρησης διέγερσης κατασκευών από περιβαλλοντικές διεγέρσεις 16 καναλιών, υψηλής διακριτότητας και χαμηλού θορύβου</b>
<b>Τεμάχια</b>	<b>1</b>
<b>Συνολικός Προϋπολογισμός (€)</b>	<b>« Π/Υ » (μη συμπεριλαμβανομένου του ΦΠΑ 19%)</b>
<b>Περιγραφή / Χαρακτηριστικά</b>	<p>Ψηφιακός καταγραφέας 16 καναλιών, υψηλής ανάλυσης, με όλες τις συνδέσεις, 10 μονοαξονικά ταχυτητόμετρα, 10 βάσεις αγκύρωσης, καλωδίωση και βύσματα συνδέσεων καταγραφικού και αισθητήρων.</p> <p>Το σύστημα θα αποτελείται από:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ψηφιακό καταγραφέα</li> <li>2. Δέκα (10) μονοαξονικά ταχυτητόμετρα</li> <li>3. Λογισμικό</li> <li>4. Καλώδια σύνδεσης ψηφιακού καταγραφέα ταχυτήτων με τα 10 μονοαξονικά ταχυτητόμετρα</li> <li>5. Συνοδευτικό εξοπλισμό καταγραφέα ταχυτήτων και μονοαξονικών ταχυτητόμετρων</li> </ol>

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

### 1. ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑΣ

Ο ψηφιακός καταγραφέας πρέπει να διαθέτει:

- 1.1 Δεκαέξι (16) κανάλια σύνδεσης για υποστήριξη δεκαέξι (16) εξωτερικών μονοαξονικών ταχυτητόμετρων.
- 1.2 Διακριτότητα μετατροπέα (AD Converter) τουλάχιστον 16 bits.
- 1.3 Επίπεδο θορύβου εισόδου (input noise level) λιγότερο από 50 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ .
- 1.4 Ευαισθησία εισαγωγής σήματος (input sensitivity), επιλεγόμενη από πλήρη κλίμακα (full range) μεταξύ  $\pm 0.04\text{V}$  έως  $\pm 2.5\text{V}$  τουλάχιστον.
- 1.5 Ρυθμός δειγματοληψίας επιλεγόμενος από τον χρήστη τουλάχιστον 50 – 500 Hz
- 1.6 Η καταγραφική μονάδα πρέπει είτε να δουλεύει αυτόνομα, είτε να παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με PC για τον έλεγχο της διαδικασίας καταγραφής. Η αποθήκευση των δεδομένων πρέπει να γίνεται κατάλληλο μέσο αποθήκευσης χωρητικότητας τουλάχιστον 512Mb.
- 1.7 Η τροφοδοσία του συστήματος θα γίνεται από εναλλασσόμενο ρεύμα 220V. Το σύστημα πρέπει να συνοδεύεται και από αυτόνομη πηγή ενέργειας (επαναφορτιζόμενη μπαταρία) που θα παρέχει τη δυνατότητα χρήσης του σε πλήρη σύνθεση (16 αισθητήρων) τουλάχιστον μέχρι 8 ώρες. Ο φορτιστής της μπαταρίας πρέπει να παρέχεται.
- 1.8 Η καταγραφική μονάδα πρέπει να έχει τη δυνατότητα επεκτασιμότητας / συνεργασίας με αντίστοιχες μονάδες για δημιουργία δικτύου ταυτόχρονης καταγραφής περισσότερων αισθητήρων.
- 1.9 Δυνατότητα μελλοντικής επεκτασιμότητας της καταγραφικής μονάδας αφ' εαυτής για υποστήριξη περισσότερων αισθητήρων θα συνεκτιμηθεί ιδιαίτερα.
- 1.10 Δυνατότητα εύκολης μεταφοράς με έμφαση στο όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος μονάδας.
- 1.11 Ικανοποιητική προστασία από περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα βροχόπτωση/ υγρασία και υψηλές/ χαμηλές θερμοκρασίες, ανεξάρτητα του χρόνου παραμονής του συστήματος σε εξωτερικό περιβάλλον (να περιγράφεται και να τεκμηριώνεται). Δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς την πρόκληση ανωμαλιών στη λειτουργία του από υπερθερμάνσεις ή άλλες παρενέργειες και κατάλληλη γείωση του συστήματος. Τα ταχυτητόμετρα πρέπει να παρέχουν προστασία της ακρίβειας μέτρησης από διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης (απαιτείται σχετική τεκμηρίωση).

### 2. ΔΕΚΑ (10) ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΑ ΤΑΧΥΤΗΤΟΜΕΤΡΑ

- 2.1 Οι αισθητήρες θα είναι μονοαξονικά ταχυτητόμετρα ηλεκτροδυναμικού τύπου.
- 2.2 Θα γίνει προμήθεια 4 μονοαξονικών αισθητήρων, με δυνατότητα καταγραφής σε οριζόντια διεύθυνση και 6 μονοαξονικών αισθητήρων

με δυνατότητα καταγραφής σε κατακόρυφη διεύθυνση. Η δυνατότητα χρήσης του ίδιου αισθητήρα είτε σε οριζόντια είτε σε κατακόρυφη διεύθυνση θα συνεκτιμηθεί ιδιαίτερα.

Τα ταχυτητόμετρα πρέπει να έχουν τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά :

- 2.3 Εύρος καταγραφής συχνοτήτων (frequency range) μεταξύ 0.1 και 500 Hz τουλάχιστον.
- 2.4 Δυναμικό εύρος (dynamic range) > 110 dB στα 0.1 Hz, > 145 dB στα 4.5 Hz και >170 dB στα 100 Hz.
- 2.5 Επίπεδο θορύβου εξόδου λιγότερο από 50nV/√Hz.
- 2.6 Επίπεδο θορύβου επιτάχυνσης λιγότερο από 15ng/√Hz για συχνότητες μεταξύ 1-30 Hz τουλάχιστον
- 2.7 Ευαισθησία ταχύτητας (velocity sensitivity) τουλάχιστον 27 Vs/m.
- 2.8 Μέγιστη αντίστοιχη επιτάχυνση τουλάχιστον 0.30 g

### 3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

- 3.1. Το σύστημα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό (σε περιβάλλον WINDOWS2000 ή μεταγενέστερο) για την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση της διαδικασίας καταγραφής (μέσω προκαθορισμού του επιπέδου ενεργοποίησης / απενεργοποίησης καθώς και με σχετική εντολή από τον χρήστη τουλάχιστον).
- 3.2. Επιπλέον πρέπει, μέσω ειδικού λογισμικού, να είναι δυνατή η διαχείριση της διαδικασίας καταγραφής, ο οπτικός έλεγχος των καταγραφών (κατά προτίμηση σε real-time), η απάλειψη των λαθών εύρους και φάσης των καταγραφών για συχνότητες μικρότερες της φυσικής συχνότητας των αισθητήρων, η επιβολή ψηφιακού φιλτραρίσματος στις καταγραφές, η αριθμητική τους ολοκλήρωση και διαφόριση για τον υπολογισμό των αντίστοιχων μετατοπίσεων και επιταχύνσεων, η μετατροπή τους σε αλφαριθμητική μορφή (ASCII) κλπ.
- 3.3. Πρέπει να παρέχονται τουλάχιστον 3 άδειες χρήσης του παραπάνω λογισμικού.

#### 3.1. 4. ΚΑΛΩΔΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΑ ΔΕΚΑ (10) ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΑ ΤΑΧΥΤΗΤΟΜΕΤΡΑ

Απαιτούνται τα παρακάτω:

- 4.1. Τρία (3) καλώδια σύνδεσης μονοαξονικών ταχυτητόμετρων μήκους 100m το καθένα.
- 4.2. Τρία (3) καλώδια σύνδεσης μονοαξονικών ταχυτητόμετρων μήκους 75m το καθένα.
- 4.3. Τέσσερα (4) καλώδια σύνδεσης μονοαξονικών ταχυτητόμετρων μήκους 50m το καθένα.

	<p>4.4. Η ποιότητα των καλωδίων θα είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία του συστήματος ακόμη και σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Ορίζονται τα 100m ως ελάχιστο μήκος καλωδίου σύνδεσης των μονοαξονικών ταχυτητόμετρων με τον ψηφιακό καταγραφέα ταχυτήτων χωρίς να προκαλείται αλλοίωση σήματος και χωρίς τη μεσολάβηση ενδιάμεσου ενισχυτή.</p> <p>4.5. Ο ανάδοχος έχει την υποχρέωση να παραδώσει τα παραπάνω καλώδια με διαμορφωμένα τα άκρα τους με βύσματα και πλήρως λειτουργικά, σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΦΟΡΕΑ.</p> <p>5. <u>ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΜΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΑ ΤΑΧΥΤΗΤΟΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΛΟΙΠΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ</u></p> <p>5.1. Στην προσφορά θα συμπεριλαμβάνονται όλα τα απαιτούμενα επιπρόσθετα εξαρτήματα / όργανα ώστε να είναι δυνατή η άμεση λειτουργία του συστήματος καταγραφής ταχυτήτων σε πλήρη σύνθεση (10 μονοαξονικά ταχυτητόμετρα), καθώς και σε συνεργασία με τον παρόμοιο εξοπλισμό που θα προμηθευτεί ο ΦΟΡΕΑΣ μελλοντικά, για δημιουργία δικτύου κοινής εκκίνησης/χρόνου.</p> <p>5.2. Τα καλώδια και ο λοιπός εξοπλισμός σύνδεσης των αισθητήρων με τον ψηφιακό καταγραφέα επιταχύνσεων θα διαθέτουν βύσματα και στις δύο άκρες τους. Εναλλακτικές λύσεις σύνδεσης δεν θα γίνουν δεκτές.</p> <p>5.3. Το σύστημα θα συνοδεύεται από όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό (10 πλάκες αγκύρωσης) για τη στερέωση των αισθητήρων στην υπό μέτρηση κατασκευή.</p> <p>5.4. Θα εκτιμηθεί ιδιαίτερα η παροχή θηκών μεταφοράς ολόκληρου του συστήματος (καταγραφικής μονάδας και ταχυτητόμετρων).</p>
<b>Χρόνος Παράδοσης</b>	Τρεις (3) μήνες από την υπογραφή της σύμβασης.
<b>Χρόνος Παραλαβής</b>	Ένας (1) μήνας από την παράδοση (συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος δοκιμαστικής λειτουργίας, απόδοσης και αξιοπιστίας στις θέσεις που θα υποδειχθούν από τον ΦΟΡΕΑ, καθώς επίσης και η απαιτούμενη εκπαίδευση του προσωπικού που θα ορισθεί από τον ΦΟΡΕΑ).
<b>Εγγύηση</b>	Ένα (1) έτος τουλάχιστον
<b>Εκπαίδευση</b>	Ο Ανάδοχος αναλαμβάνει την υποχρέωση να παρέχει εκπαίδευση για τη λειτουργία και τη χρήση του παραπάνω συστήματος καθώς επίσης και τη χρήση του λογισμικού διάρκειας τουλάχιστον 16 ωρών (2 ημέρες) στα γραφεία του ΦΟΡΕΑ, σε προσωπικό που θα ορίσει ο ΦΟΡΕΑΣ

#### ΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΤΟΥ ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΥ

- ✓ Θα ληφθούν υπόψη ο χρόνος παράδοσης, η χρονική περίοδος της εγγύησης καλής λειτουργίας και συντήρησης του κατασκευαστή, η οποία πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα (1) έτος και η τεκμηριωμένη δυνατότητα του κατασκευαστή να παρέχει τεχνική υποστήριξη πέραν του ορίου της εγγύησης. Θα συνεκτιμηθεί ιδιαίτερα η παροχή εγγυήσεως μεγαλύτερης του ενός (1) έτους.



- ✓ Η τεκμηρίωση της χρήσης του προτεινόμενου εξοπλισμού σε πραγματικές, ανάλογες με τις αιτούμενες συνθήκες από άλλους χρήστες θα συνεκτιμηθεί ιδιαίτερα.

## 8.2 Συμπληρωματικές Προδιαγραφές οργάνων παρακολούθησης επιτάχυνσης

### 8.2.1 Σύστημα παρακολούθησης επιταχύνσεων θεμελίωσης – φορέα γεφυρών

#### A. Οι καταγραφείς επιταχύνσεων θα πρέπει να διαθέτουν:

1. Προγραμματιζόμενους ψηφιακά αλγορίθμους διέγερσης, με προκαθοριζόμενο κατώφλι διέγερσης χωριστά για κάθε κανάλι (επιταχυνσιόμετρο), επιλογή λογικών συνδυασμών διέγερσης καναλιών και χρόνο καταγραφής πριν και μετά τη δόνηση (pre- & post-event memory).
2. Ο Μετατροπέας των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (A/D converter) θα έχει ανάλυση (resolution) τουλάχιστον 16bits, με δειγματοληψία τουλάχιστον 200 σημείων ανά δευτερόλεπτο ανά κανάλι και με τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο. Δυνατότητα ανάλυσης μεγαλύτερης των 16bits θα προσμετρηθεί κατά την αξιολόγηση των συστημάτων.
3. Για τα καταγραφικά θα υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής δεδομένων σε εσωτερική επεκτάσιμη μνήμη τουλάχιστον 64Mb και ικανότητα επικοινωνίας μέσω σειριακής θύρας RS232 με H/Y, με ευρύ φάσμα Baud Rates.
4. Εσωτερικά εγκατεστημένο modem (τουλάχιστον 28,8 kbaud) κινητής ή σταθερής τηλεφωνίας (η σταθερή τηλεφωνία είναι προτιμητέα εφ'όσον είναι δυνατή για επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων μετρήσεων).
5. Δέκτη δορυφορικού χρόνου με κατάλληλη κεραία και καλώδιο τουλάχιστον 5μ μήκους. Εφ'όσον κοινή καταγραφική μονάδα καταγράφει όλα τα αισθητήρια της γέφυρας, δεν είναι απαραίτητος.
6. Δυνατότητα επικοινωνίας (σύνδεσης) μεταξύ των καταγραφικών μονάδων (εφ'όσον είναι περισσότερα του ενός), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κοινή εκκίνηση (common start) και κοινός χρόνος (common time) σε όλα τα υποστηριζόμενα αισθητήρια.
7. Δυνατότητα χρησιμοποίησης ελεγχόμενου βήματος δειγματοληψίας με δυνατότητα λήψης τουλάχιστον μέχρι 200 sps. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις η λήψη με 100 sps είναι επαρκής και μειώνει τον μεγάλο όγκο των μετρήσεων.
8. Λειτουργία με τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος 220V.
9. Δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή (με λειτουργικό σύστημα WINDOWS) για την μεταφορά των καταγραφών προς αυτόν. Επίσης πρέπει να είναι δυνατός ο εποπτικός έλεγχος της λειτουργικής κατάστασης και η ρύθμιση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων της καταγραφικής μονάδας.
  - 1) Δυνατότητα εύκολης μεταφοράς με έμφαση στο όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος μονάδας.
  - 2) Ικανοποιητική προστασία από περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα βροχόπτωση/ υγρασία και υψηλές/ χαμηλές θερμοκρασίες (να περιγράφεται και να τεκμηριώνεται).
  - 3) Δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς την πρόκληση ανωμαλιών στη λειτουργία της από υπερθερμάνσεις ή άλλες παρενέργειες και κατάλληλης γείωσης του συστήματος.
  - 4) Δυνατότητα καθορισμού από τον χρήστη προ- και μετά – εγγραφής χρόνου (Pre and Post event time).
  - 5) Dynamic range τουλάχιστον 113 db (στα 0 –50HZ)

B. Τα αισθητήρια επιτάχυνσης θα πρέπει να πληρούν τα ακόλουθα

- 1) Μονοαξονικά ή τριαξονικά αισθητήρια
- 2) Εύρος ζώνης αξιοπιστίας στο πεδίο συχνοτήτων (Bandwidth) από 0 – 50 HZ, με δυνατότητα αξιοπιστίας 100%.
- 3) Μέγιστο εύρος κλίμακας μέτρησης (Full scale range) μέχρι  $\pm 2g$ , επιλεγόμενο από τον χρήστη.
- 4) Ευαισθησία τουλάχιστον 0,1 mg.

Γ. Συνοδεύον Λογισμικό συστήματος καταγράφης επιταχύνσεων

Το σύστημα θα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό (σε περιβάλλον WINDOWS) για την λήψη των καταγραφών καθώς και τον εποπτικό έλεγχο της λειτουργικής κατάστασης και την ρύθμιση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων της καταγραφικής μονάδας. Επιπλέον πρέπει μέσω ειδικού λογισμικού να είναι δυνατή η επεξεργασία και ανάλυση των ψηφιακών καταγραφών (π.χ. εφαρμογή φίλτρων για την απομάκρυνση του θορύβου, υπολογισμός Fast Fourier Transform, Response Spectra κ.τ.λ.). Η περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων για την ανάλυση των ιδιομορφών της γέφυρας, την ανάλυση του μοντέλου της και τη διαγνώση ζημιών, θα γίνεται με χρήση των ειδικών λογισμικών που έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο του ερ. προγράμματος «ΑΣΠΡΟΓΕ».

Δ. Καλώδιο Σύνδεσης ψηφιακών καταγραφικών μονάδων με αισθητήρια. Κυτία διασύνδεσης καλωδίου αισθητηρίων με καταγραφικές μονάδες, εξαρτήματα σύνδεσης άκρης καλωδίου με αισθητήρια (εφ'όσον επιλεγούν καλωδιωμένα δίκτυα αισθητηρίων)

*α. Καλώδιο σύνδεσης των πολυ-κάναλων καταγραφικών με τα μονοαξονικά αισθητήρια*

Απαιτείται καλώδιο σύνδεσης των μονοαξονικών αισθητηρίων με τις καταγραφικές μονάδες, και καλωδίων «επεκτάσεων» κατάλληλου μήκους.

Σε κάθε περίπτωση στα πλαίσια της προμήθειας του συστήματος, ο τελικός προμηθευτής θα έχει την υποχρέωση να κόψει σε κατάλληλο αριθμό και μήκη, να διαμορφώσει τις άκρες τους, και να παραδώσει στον ανάδοχο τα απαιτούμενα καλώδια σύνδεσης.

*β. Κυτία διασύνδεσης Καταγραφικών μονάδων με καλώδια σύνδεσης αισθητηρίων και εξαρτήματα σύνδεσης καλωδίου (με αισθητήρια & κυτία διασύνδεσης)*

Συμπεριλαμβάνονται όλα τα απαιτούμενα επιπρόσθετα εξαρτήματα/ όργανα ώστε να είναι δυνατή η άμεση λειτουργία του συστήματος καταγραφής επιταχύνσεων σε πλήρη σύνθεση. Ενδεικτικά αναφέρεται η ακόλουθη διαμόρφωση:

- Για 1 ψηφιακή καταγραφική μονάδα 12κάναλη και 12 μονοαξονικά αισθητήρια, σε σύνδεση μεταξύ τους, απαιτούνται 4 κυτία διασύνδεσης (με τις καλωδιώσεις τους) και τα αντίστοιχα καλώδια επικοινωνίας των καταγραφικών μονάδων μεταξύ τους.
- Για τη σύνδεση των 12 αισθητηρίων με την ψηφιακή μονάδα καταγραφής, απαιτούνται 12 ζεύγη εξαρτημάτων (βυσμάτων), για τη σύνδεση των άκρων των καλωδίων με τα αισθητήρια και τα κυτία διασύνδεσής τους.

**8.2.2 Σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων - μετακινήσεων γεφυρών**

A. Οι καταγραφείς παραμορφώσεων θα πρέπει να έχουν:

1. Μεγάλη εσωτερική αφαιρούμενη μνήμη (PCMCIA) ή αντίστοιχη τουλάχιστον 2 GB
2. Δυνατότητα επικοινωνίας (σύνδεσης) μεταξύ των καταγραφικών μονάδων (εφόσον είναι περισσότερα του ενός), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κοινή εκκίνηση (common start) και κοινός χρόνος (common time) σε όλα τα υποστηριζόμενα αισθητήρια. Τα

- προηγούμενα ισχύουν για περισσότερες της μίας καταγραφικές μονάδες δυναμικής παραμόρφωσης- μετακίνησης.
3. Επαρκή μεγέθυνση σήματος και ευαισθησία, ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή με ακρίβεια τουλάχιστον 1μstrain.
  4. Δυνατότητα κάλυψης εύρους παραμόρφωσης  $\pm 5000$  μstrain.
  5. Ο Μετατροπέας των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (A/D converter) θα έχει ανάλυση (resolution) τουλάχιστον 16bits, με δειγματοληψία τουλάχιστον 200 σημείων ανά δευτερόλεπτο ανά κανάλι και με τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο. Δυνατότητα ανάλυσης μεγαλύτερης των 16bits θα προσμετρηθεί κατά την αξιολόγηση των συστημάτων.
  6. Δυνατότητα χρησιμοποίησης ελεγχόμενου βήματος δειγματοληψίας με δυνατότητα λήψης τουλάχιστον μέχρι 200 sps.
  7. Η δυνατότητα κοινής καταγραφής όλων των προτεινόμενων όργανων από κοινή καταγραφική μονάδα θα προσμετρηθεί θετικά για την τελική επιλογή.
  8. Λειτουργία με τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος 220V.
  9. Δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή (με λειτουργικό σύστημα WINDOWS) για την μεταφορά των καταγραφών προς αυτόν. Επίσης πρέπει να είναι δυνατός ο εποπτικός έλεγχος της λειτουργικής κατάστασης και η ρύθμιση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων της καταγραφικής μονάδας.
    - i. Δυνατότητα εύκολης μεταφοράς με έμφαση στο όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος μονάδας.
    - ii. Ικανοποιητική προστασία από περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα βροχόπτωση/ υγρασία και υψηλές/ χαμηλές θερμοκρασίες (να περιγράφεται και να τεκμηριώνεται).
    - iii. Δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς την πρόκληση ανωμαλιών στη λειτουργία της από υπερθερμάνσεις ή άλλες παρενέργειες και κατάλληλης γείωσης του συστήματος.
    - iv. Δυνατότητα καθορισμού από τον χρήστη προ- και μετά – εγγραφής χρόνου (Pre and Post event time) για δυναμική καταγραφή.

#### B. Τα αισθητήρια παραμόρφωσης θα πρέπει να πληρούν τα ακόλουθα

1. Μονοαξονικά αισθητήρια μήκους τουλάχιστον 200mm, ταυτόχρονης ή συγχρονισμένης καταγραφής θερμοκρασίας.
2. Εύρος ζώνης αξιοπιστίας στο πεδίο συχνοτήτων (Bandwidth) από 0 – 50 HZ, με δυνατότητα αξιοπιστίας 100% (για δυναμική παραμόρφωση)
3. Μέγιστο εύρος κλίμακας μέτρησης (Full scale range) τουλάχιστον μέχρι  $\pm 5000$ μstrain, επιλεγόμενο από τον χρήστη.
4. Ευαισθησία τουλάχιστον 1 μstrain.

#### Γ. Συνοδεύον Λογισμικό συστήματος καταγράφης παραμορφώσεων

Το σύστημα θα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό (σε περιβάλλον WINDOWS) για την λήψη των καταγραφών καθώς και τον εποπτικό έλεγχο της λειτουργικής κατάστασης και την ρύθμιση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων της καταγραφικής μονάδας. Επιπλέον πρέπει μέσω ειδικού λογισμικού να είναι δυνατή η επεξεργασία και ανάλυση των ψηφιακών καταγραφών (π.χ. εφαρμογή φίλτρων για την απομάκρυνση του θορύβου, υπολογισμός Fast Fourier Transform, Response Spectra κ.τ.λ.) στην περίπτωση δυναμικής καταγραφής. Η περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων, με χρήση ειδικών λογισμικών που έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «ΑΣΠΡΟΓΕ».

### **8.2.3. Παροχή Ηλεκτρικής Ισχύος**

Η ηλεκτρική ισχύς για την Παρακολούθηση κατά την Κατασκευή και τις Αρχικές Μετρήσεις θα παρασχεθεί από τον Ανάδοχο.

Οι γραμμές σύνδεσης ηλεκτρικής ισχύος προς επιλεγμένα σημεία των γεφυρών, για τα Συστήματα Ενόργανης Παρακολούθησης, θα εγκατασταθούν από τον Ανάδοχο με ευθύνη του. Θεωρείται ότι στο στάδιο της λειτουργίας η ΕΟΑΕ θα είναι σε θέση να τροφοδοτεί τα Συστήματα Μόνιμης Παρακολούθησης.

Ο ανάδοχος με πρόταση του προμηθευτή των οργάνων ενόργανης παρακολούθησης θα προμηθευθεί και θα εγκαταστήσει τις απαιτούμενες διατάξεις Αδιάλειπτης Παροχής Ισχύος (UPS) που απαιτούνται για αδιάλειπτη παροχή διάρκειας τουλάχιστον πέντε (5) ωρών.

### **8.2.4 Γείωση – Αντικεραυνική προστασία**

Λόγω της επιλογής ενσωμάτωσης ή τοποθέτησης σχεδόν του συνόλου των οργάνων μέσα στους κιβωτιοειδείς φορείς, δεν υπάρχει ιδιαίτερο θέμα προστασίας αντικεραυνικής. Στην περίπτωση της γέφυρας Μετσόβου στην οποία και μόνον προτείνεται τοποθέτηση ανεμομέτρου στην κεφαλή των πυλώνων, θα ζητηθεί από τον προμηθευτή του οργάνου/διάταξης πρόταση αντικεραυνικής προστασίας.

### **8.2.5 Άνεμος**

Θα εγκατασταθεί ένα σύστημα παρακολούθησης ανέμου στη γέφυρα του Μετσόβου, λόγω ιδιαίτερης κρισιμότητας της ανεμοπίεσης κατά τις φάσεις κατασκευής. Θα γίνει χρήση πρότυπου, διαθέσιμου στο εμπόριο μετεωρολογικού ανεμόμετρου κυπέλλων ή υπερηχητικού ανεμόμετρου, με δυνατότητα ένδειξης της διεύθυνσης του αέρα. Το ανεμόμετρο θα θερμαίνεται αυτόματα όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή. Η ταχύτητα των ριπών και η μέση ταχύτητα του ανέμου θα παρακολουθούνται συνεχώς, ενώ το σύστημα θα μπορεί να σημάνει συναγερμό. Η απαιτούμενη συχνότητα δειγματοληψίας είναι περίπου 4 Hz.

Τα δεδομένα που ακολουθούν θα αποθηκεύονται συνεχώς:

- μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου 10 λεπτών
- μέγιστη ταχύτητα ριπών ανέμου 3 δευτερολέπτων κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε από τις δεκάλεπτες περιόδους.

Το ανεμόμετρο θα εγκατασταθεί σε ιστό, 6 έως 10 m πάνω από το κατάστρωμα της γέφυρας και μετά την ολοκλήρωση της γέφυρας σε έναν στύλο ηλεκτροφωτισμού. Ο προμηθευτής θα παράσχει τα καλώδια ηλεκτροδότησης και το μετασχηματιστή για την τροφοδότηση του αισθητήρα από το επίπεδο του καταστρώματος.

Το λογισμικό καταγραφής – επεξεργασίας του συστήματος θα πρέπει να καταδεικνύει σαφώς την επέλευση:

- ριπών ανέμου 3 δευτερολέπτων ταχύτητας άνω των 35 m/sec
- μέσης ταχύτητα ανέμου άνω των 25 m/sec.

## 9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

### 9.1 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

Το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), ήδη από το 1994 έχει ενοργανώσει με κατάλληλο μόνιμο δίκτυο επιταχυνσιογράφων την Υψηλή Καλωδιωτή Γέφυρα της Χαλκίδας για την παρακολούθηση της δυναμικής της συμπεριφοράς (Lekidis et al. 2005, Καρακώστας κ.α. 2006). Επίσης, τα τελευταία χρόνια το ΙΤΣΑΚ, σε συνεργασία με το τμήμα Τακτικής Συντήρησης Μεγάλων Τεχνικών Έργων της Εγνατίας Οδού ΑΕ και το Εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας έχει προχωρήσει στην ενοργάνωση με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων και τη συστηματική παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς δύο γεφυρών της Εγνατίας Οδού (2<sup>η</sup> Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας και η γέφυρα Γ9, θέση 5.1 – Πολύμυλος) (Lekidis et al. 2004, Karakostas et al. 2006, Panetsos et al. 2006, Papadimitriou et al., 2007). Η χρηματοδότηση για την ενοργάνωση των γεφυρών της Εγνατίας οδού που παρουσιάζεται εδώ έγινε στα πλαίσια του γενικότερου ερευνητικού προγράμματος «Αντισεισμική Προστασία Γεφυρών» (2003-2007, χρηματοδότηση από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, <http://nisida.civil.auth.gr/asproge/index.htm>).

Έγινε καταρχάς η επιλογή δύο αντιπροσωπευτικών από δομικής πλευράς οδογεφυρών της Εγνατίας οδού οι οποίες και ενοργανώθηκαν με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων. Η τελική επιλογή των δύο γεφυρών από το σύνολο της Εγνατίας Οδού έγινε με βάση τα παρακάτω κύρια κριτήρια επιλογής :

- Είδος του δομικού συστήματος (φορέας στηριζόμενος μέσω εφεδράνων στα βάθρα/ μονολιθικά συνδεδεμένος στα βάθρα φορέας )
- Αντιπροσωπευτικότητα του δομικού συστήματος και της μεθόδου κατασκευής του (ύπαρξη περισσότερων γεφυρών με το ίδιο σύστημα και κατασκευασμένες με προκατασκευή ή με προβολοδόμηση.
- Συμμετρία στην κατανομή μάζας – ακαμψίας και περιορισμένο μήκος γέφυρας, παράγοντες που διασφαλίζουν την προβλέψιμη συμπεριφορά των φορέων και δεν απαιτούν μεγάλο αριθμό αισθητήρων.
- Δυνατότητα πρόσβασης στην ανωδομή και στις βάσεις των πυλώνων / ακροβάθρων.
- Δυνατότητα υλοποίησης απαιτούμενων έργων υποδομής για την ενοργάνωση (δυνατότητα παροχής ρεύματος, επικοινωνίας κλπ).
- Σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής του έργου.

Μετά από διάφορες επισκέψεις της ερευνητικής ομάδας σε διάφορες υποψήφιες γέφυρες, τελικά επιλέχθηκαν να ενοργανωθούν, ως πλέον κατάλληλες, η 2<sup>η</sup> Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας και η γέφυρα Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος) (οι θέσεις τους σημειώνονται με πορτοκαλί κύκλους στο Σχήμα 1).



Σχήμα 9.1. Θέση των ενοργανωθείσων γεφυρών της Εγνατίας Οδού

## 9.2 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ 2<sup>ΗΣ</sup> ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑΣ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ (Γ2)

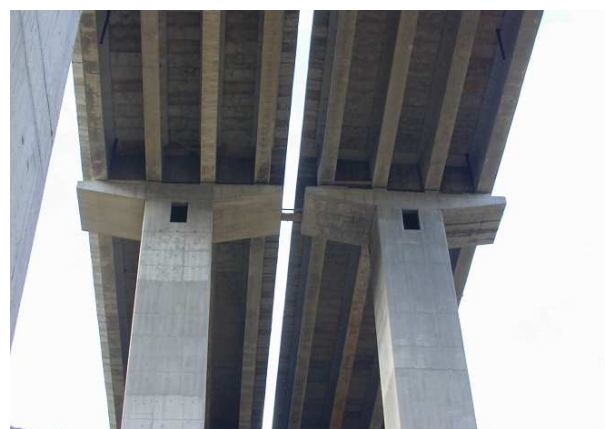
Η γέφυρα Γ2 ευρίσκεται στην Εγνατία οδό, στο τμήμα παράκαμψης της Καβάλας. Ένας από τους κύριους παράγοντες που οδήγησε την ερευνητική ομάδα στην επιλογή της συγκεκριμένης γέφυρας είναι ότι το δομικό της σύστημα είναι το πλέον αντιπροσωπευτικό μεταξύ των δομικών τύπων των γεφυρών της Εγνατίας Οδού αλλά και γενικότερα των ελληνικών αυτοκινητοδρόμων, και επομένως η διερεύνηση της δυναμικής του συμπεριφοράς αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την ΕΟΑΕ.

### Δομικό σύστημα 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Γ2)

Η 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας έχει δύο όμοιους, αλλά στατικά ανεξάρτητους κλάδους (έναν ανά κατεύθυνση), εκ των οποίων ενοργανώθηκε ο δεξιός κλάδος κίνησης των οχημάτων από δυτικά προς ανατολικά (κλάδος Ηγουμενίτσας προς Κήπους).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 9.2.** 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας (α) Όψη (β) Άνοψη των δύο κλάδων (γ) στήριξη κυρίων δοκών στις δοκούς έδρασης των μεσοβάθρων μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων (δ) κατάστρωμα γέφυρας και αρμός διαστολής στη θέση του ακροβάθρου.

Ο ενοργανωμένος κλάδος αποτελείται από τέσσερα ανοίγματα, στηριζόμενα σε τρία μεσόβαθρα και δύο ακρόβαθρα (Σχήμα 2α). Η γέφυρα είναι ευθεία σε κάτοψη, ενώ παρουσιάζει κλίση στη διαμήκη διεύθυνση. Το κάθε άνοιγμα διαμορφώνεται από 4 προκατασκευασμένες, προεντεταμένες δοκούς διατομής I, ανοίγματος 45 m (Σχήμα. 2β), κάθε μία εκ των οποίων στηρίζεται στα δύο της άκρα με ελαστομεταλλικά εφεδράνα στις δοκούς έδρασης - κεφαλές των βάθρων (Σχήμα 2γ) και στα ακρόβαθρα. Τα τέσσερα ανοίγματα συνδέονται με επί τόπου σκυροδετούμενη πλάκα καταστρώματος η οποία συνεχίζει χωρίς αρμό άνωθεν των μεσοβάθρων, διαμορφώνοντας συνεχές κατάστρωμα μήκους 170 περίπου μέτρων, ενώ υπάρχουν αγκυρούμενοι ελαστομεταλλικοί αρμοί διαστολής στα δύο άκρα, στις περιοχές στήριξης στα ακρόβαθρα (Σχήμα 2δ). Στις δοκούς έδρασης - κεφαλές των μεσοβάθρων έχουν επίσης διαμορφωθεί ειδικοί σεισμικοί σύνδεσμοι (stoppers) οι οποίοι έχουν σχεδιασθεί να ενεργοποιούνται μετά την υπέρβαση τμήματος της συνολικής σεισμικής δράσης σχεδιασμού, τόσο κατά τη διαμήκη, όσο και κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Τα μεσόβαθρα είναι κοίλα, τετραγωνικής κιβωτιοειδούς διατομής, και έχουν κατασκευασθεί με επιτόπου έγχυση (τεχνική ολισθαίνοντος ξυλοτύπου), ενώ θεμελιώνονται με φρέατα στο βραχώδες υπόβαθρο. Σημειώνεται ότι οι προκατασκευασμένες δοκοί της 2ης χαραδρογέφυρας Παράκαμψης Καβάλας έχουν το μεγαλύτερο κατασκευασμένο μήκος ανοίγματος για το δεδομένο τύπο γέφυρας και για τη δεδομένη ποιότητα αντοχής σκυροδέματος (B35).

### **Ενοργάνωση 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Γ2)**

Για την ενοργάνωση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης (σύστημα επιταχυνσιογράφων) που απέκτησε η ΕΟΑΕ και το οποίο τοποθετήθηκε και λειτουργεί επί μονίμου βάσεως από τον Φεβρουάριο του 2005 έως και σήμερα. Οι προδιαγραφές του συστήματος καθορίστηκαν από την ΕΟΑΕ σε στενή συνεργασία με το ΙΤΣΑΚ. Το αποκτηθέν σύστημα ενοργάνωσης είναι της εταιρείας Kinemetrics Inc. Αποτελείται από 4 καταγραφικές μονάδες υψηλής ανάλυσης τύπου Kinemetrics K2 (19 bits), η κάθε μία από τις οποίες υποστηρίζει μέχρι 12 αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα) τύπου Episensor. Υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης των καταγραφικών μονάδων, έτσι ώστε σε πλήρη σύνθεση υποστηρίζονται μέχρι 48 αισθητήρες.



Η δομή του συστήματος επιτρέπει τη διάσπαση του σε επιμέρους συστήματα (π.χ. δύο συστήματα των 24 αισθητήρων) για την ταυτόχρονη χρήση τους σε διαφορετικές γέφυρες, ενώ παράλληλα είναι ιδιαίτερα εύκολη η περαιτέρω επέκταση του με την απόκτηση πρόσθετων καταγραφικών μονάδων. Το σύστημα στηρίζεται στην ηλεκτρονική αποθήκευση και άντληση της πληροφορίας, με σύγχρονο λογισμικό που παρέχει δυνατότητες γραφικών απεικονίσεων των κυματομορφών. Άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος συμπεριλαμβάνουν τον κοινό χρόνο εκκίνησης, την κοινή διέγερση για όλα τα αισθητήρια, και τη δυνατότητα καθορισμού της έναρξης καταγραφής (trigger) με πολλαπλούς τρόπους (π.χ. με εξωτερική εντολή, ή αυτόματα, όταν σε κάποια προκαθορισμένα από το χρήστη αισθητήρια, η διέγερση υπερβεί κάποια επίσης προκαθορισμένη τιμή). Η κάθε καταγραφική μονάδα είναι επίσης εφοδιασμένη με μονάδα χρόνου GPS, καθώς και modem κινητής τηλεφωνίας (GSM/GPRS), το οποίο επιτρέπει την τηλεματική παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος και τη ρύθμιση των σχετικών παραμέτρων.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 9.3.** 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας - εκτελεσθέντα έργα υποδομής : (α) Μεταλλικός κλωβός προστασίας καταγραφικής μονάδας και κυτίο ρευματοληψίας. Διακρίνεται επίσης η κεραία GPS (β) Κυτίο ρευματοληψίας και αισθητήρας μέτρησης (γ), (δ) πλατφόρμα πρόσβασης στην κορυφή του πυλώνα

Παράλληλα με τις διαδικασίες απόκτησης του συστήματος ενοργάνωσης από την ΕΟΑΕ, υλοποιήθηκαν στη 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας τα απαιτούμενα έργα υποδομής για την ενοργάνωση. Η υλοποίηση τους έγινε από τη Θεμελιοδομή ΑΕ, κατόπιν σχετικών οδηγιών από



το ΙΤΣΑΚ και την ΕΟΑΕ, και περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, τη δημιουργία προστατευτικών μεταλλικών κλωβών για τα καταγραφικά συστήματα (Σχήμα 3α), και τη δημιουργία θέσεων ρευματοληψίας σε κατάλληλες θέσεις (Σχήμα 3α,β). Για την επιτυχή παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση αισθητήρων και στις δοκούς έδρασης των μεσοβάθρων, στις θέσεις στήριξης των κυρίων δοκών του καταστρώματος μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων, η πρόσβαση στις οποίες αρχικά δεν ήταν άμεσα εφικτή. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν επίσης, έπειτα από σχετική μελέτη από το ΙΤΣΑΚ, τρεις ειδικές μεταλλικές πλατφόρμες που επιτρέπουν την ασφαλή πρόσβαση από το επίπεδο του καταστρώματος στην κορυφή του κάθε πυλώνα (θέσεις εφεδράνων) (Σχήμα 3γ,δ).



(α)



(β)



(γ)



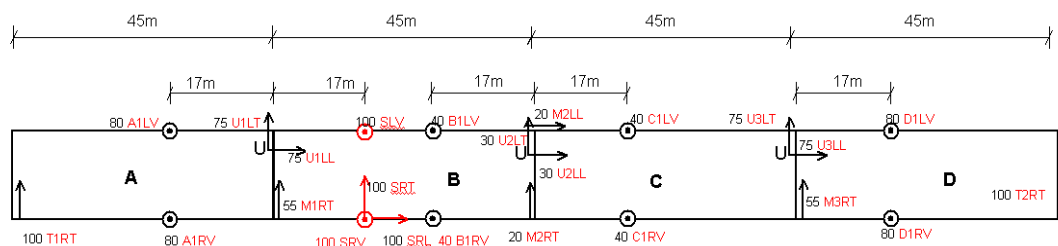
(δ)

**Σχήμα 9.4.** 2<sup>η</sup> Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας – σύστημα ενοργάνωσης (α) Καταγραφική μονάδα (‘δεξιά’ πλευρά) (β) αισθητήριο επί του διαχωριστικού New Jersey (‘αριστερή’ πλευρά) (γ) αισθητήριο επί του πεζοδρομίου (‘δεξιά’ πλευρά) (δ) τοποθέτηση αισθητήρων στην κεφαλή των μεσοβάθρων. Διακρίνεται επίσης ο υφιστάμενος σεισμικός σύνδεσμος (stopper)

Από την ερευνητική ομάδα, και με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις της γέφυρας, κρίθηκε ότι επαρκούσε για την πλήρη παρακολούθηση της η ενοργάνωση της με χρήση 24 αισθητήρων που θα υποστηρίζονται από 2 καταγραφικές μονάδες Kinematics K2. Στο μέσο του

συνολικού ανοίγματος και σε κάθε πλευρά της γέφυρας εγκαταστάθηκε μία καταγραφική μονάδα (Σχήμα 4α), και υλοποιήθηκε μεταξύ τους σύνδεση με ειδικό καλώδιο για την επίτευξη κοινής εκκίνησης εγγραφής (common start) όλων των αισθητήρων. Στη μία ('δεξιά', σύμφωνα με την κίνηση των οχημάτων) πλευρά της γέφυρας, όπου υπήρχε πεζοδρόμιο, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε αυτό (Σχήμα 4γ), ενώ στην άλλη ('αριστερή') πλευρά, η τοποθέτηση τους έγινε στο κάτω μέρος (στο ύψος του καταστρώματος) της εξωτερικής πλευράς του υφιστάμενου διαχωριστικού New Jersey (Σχήμα 4β). Όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή των μεταλλικών πλατφορμών πρόσβασης, επέτρεψε την τοποθέτηση αισθητήρων και στην κεφαλή των μεσοβάθρων με στόχο την αποσαφήνιση της λειτουργίας των ελαστομεταλλικών εφεδράνων (Σχήμα 4δ). Λόγω των αντίξοων καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του χειμερινών μηνών (χαμηλές θερμοκρασίες, παγετός, χιονοπτώσεις και χρήση άλατος για αντιπαγετικούς λόγους στο κατάστρωμα της γέφυρας) επιδιώχθηκε πρόσθετη προστασία των αισθητηρίων με την κάλυψη τους με πρόσθετα κυτία από πλαστικό υλικό.

Η διάταξη που προκρίθηκε τελικά φαίνεται στο Σχήμα 5, στοχεύει δε στην παρακολούθηση της απόκρισης της γέφυρας με βάση την καταγραφή της διέγερσης της από περιβαλλοντικά αίτια (ambient excitations - κυρίως κυκλοφορία οχημάτων).



**Σχήμα 9.5.** Διάταξη ενοργάνωσης 2ης Χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας . Η κίνηση των οχημάτων γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά (κατεύθυνση από Καβάλα προς Ξάνθη).

Τόσο κατά την εγκατάσταση των συστημάτων παρακολούθησης, όσο και κατά τις τακτικές επιτόπου επισκέψεις για τη συντήρηση των οργάνων και τη επιτόπου λήψη καταγραφών από κυκλοφοριακές διεγέρσεις, ελαμβάνοντο όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας τόσο για τα κινούμενα οχήματα όσο και για το επιτόπου ευρισκόμενο προσωπικό. Μεταξύ αυτών αναφέρεται η τοποθέτηση σημάτων μείωσης ταχύτητας, κορίνων και σημάτων εκτροπής της κυκλοφορίας, η προληπτική τοποθέτηση οχήματος με alarm εντός του αποκλεισμένου από κορίνες διαδρόμου και πριν από το σημείο όπου διεξάγοντο οι εργασίες, η χρήση φωσφορίζουσών τζάκετ από το προσωπικό κλπ. (Σχήμα 6).



**Σχήμα 9. 6.** Μέτρα ασφαλείας κατά τη διάρκεια των εργασιών στη γέφυρα.

Στη θέση της γέφυρας, δίπλα στο πύλο ρύθμισης της τροφοδοσίας του ηλεκτροφωτισμού υπάρχει μονάδα μέτρησης θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα, σε θέση λίγα μέτρα ψηλότερα από την στάθμη του καταστρώματος της γέφυρας, που κάθε ώρα καταγράφει την θερμοκρασία.

### **9.3 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ Γ9 (ΘΕΣΗ 5.1 – ΠΟΛΥΜΥΛΟΣ)**

Η γέφυρα ευρίσκεται στην Εγνατία οδό, στο τμήμα Πολύμυλος - Λευκόπετρα. Ένας από τους κύριους παράγοντες που οδήγησε την ερευνητική ομάδα στην επιλογή της συγκεκριμένης γέφυρας είναι το ότι ανήκει στο δεύτερο πιο αντιπροσωπευτικό τύπο γεφυρών της ΕΟΑΕ, κατασκευασμένη με τη μέθοδο της προβολοδόμησης. Το μήκος της εν προβόλω δόμησης των 85 περίπου μέτρων, θεωρείται από τα πιο μεγάλα αυτού του δομικού τύπου στην ΕΟ (μέγιστος πρόβολος που έχει κατασκευασθεί μέχρι σήμερα στην ΕΟΑΕ είναι περίπου 110 μέτρα, ενώ στην πλειονότητα των γεφυρών αυτού του τύπου είναι μήκους 55 – 60 μέτρα). Η απλότητα του φορέα που είναι στην ουσία ένα T πακτωμένο στο βραχώδες έδαφος θεμελίωσης έχοντας συμμετρικώς κατανεμημένη μάζα και δυσκαμψία, το μικρό για τον συγκεκριμένο δομικό τύπο συνολικό μήκος της γέφυρας, καθώς και ο ιδιαίτερα ενδιαφέρων δομικός τύπος του πυλώνα (με λεπίδες), που είναι από τους σχετικά νέους που απαντώνται σε γέφυρες της Εγνατίας Οδού και του Ελληνικού χώρου γενικότερα, ήταν επίσης λόγοι επιλογής.

#### **Δομικό σύστημα γέφυρας Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος)**

Ο φορέας της γέφυρας, μορφής T, αποτελείται από φορέα κιβωτιοειδούς διατομής παραβολικώς μεταβαλλόμενου ύψους, συνολικού μήκους 170 m (δύο πρόβολοι των 85 m), ο οποίος συνδέεται μονολιθικά με τον κεντρικό πυλώνα. Ο φορέας είναι κυκλικός σε κάτοψη, ενώ παρουσιάζει σημαντική κλίση (περίπου 5%) κατά μήκος του άξονα του, και κατά την εγκάρσια έννοια λόγω καμπύλης (Σχήμα 7).

Ο κεντρικός πυλώνας εδράζεται στη βάση του σε συμπαγές ορθογωνικό κιβωτιοειδές φρέαρ, και κατόπιν συνεχίζει καθ' ύψος με τη μορφή δύο ολόσωμων εγκάρσιων λεπίδων, οι οποίες συνδέονται μονολιθικά με το κατάστρωμα. Η στήριξη του φορέα της ανωδομής στα ακρόβαθρα γίνεται μέσω ειδικού τύπου εφεδράνων, τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση (ολίσθηση) κατά μήκος του



διαμήκη άξονα της γέφυρας (για παραλαβή των θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών), ενώ λειτουργούν ως ελαστομεταλλικά κατά την εγκάρσια έννοια. Σημειώνεται ότι τα εφεδράνα αυτά λειτουργούν ως ελαστομεταλλικά και στη διαμήκη έννοια έως την υπέρβαση της στατικής ή της δυναμικής, αναλόγως της φόρτισης, τριβής μεταξύ φορέα και επιφάνειας TEFLON του εφεδράνου. Και αυτή η γέφυρα είναι διπλού κλάδου (ένας ανά κατεύθυνση), εκ των οποίων ενοργανώθηκε ο κλάδος, κίνησης των οχημάτων από ανατολικά προς δυτικά (κλάδος από Βέροια προς Κοζάνη).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 9.7.** Γέφυρα Πολυμούλου (Γ9) (α), (β) Όψεις (γ) άνοψη των δύο κλάδων (δ) ακρόβαθρο ενός κλάδου

### **Ενοργάνωση γέφυρας Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος)**

Για την ενοργάνωση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε το κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης (σύστημα επιταχυνσιογράφων) της ΕΟΑΕ που περιγράφηκε προηγουμένως. Παράλληλα με τις διαδικασίες απόκτησης του συστήματος ενοργάνωσης από την ΕΟΑΕ, υλοποιήθηκαν στη γέφυρα Γ9

τα απαιτούμενα έργα υποδομής για την ενοργάνωση. Η υλοποίηση τους έγινε από την Θεμελιοδομή ΑΕ, κατόπιν σχετικών οδηγιών από το ΙΤΣΑΚ και την ΕΟΑΕ, και περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, τη δημιουργία θέσεων ρευματοληψίας σε κατάλληλες θέσεις, τη δημιουργία προστατευτικών μεταλλικών κλωβών για τα καταγραφικά συστήματα (Σχήμα 8α) καθώς επίσης και την κατασκευή ειδικής μεταλλικής πλατφόρμας, η οποία τοποθετήθηκε στο διάκενο μεταξύ των δύο στατικών ανεξάρτητων κλάδων, για την εγκατάσταση σε αυτή της μίας καταγραφικής μονάδας (Σχήμα 8β).

Με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις της γέφυρας, κρίθηκε ότι επαρκούσε για την πλήρη παρακολούθηση της η χρήση 24 αισθητήρων που θα υποστηρίζονται από 2 καταγραφικές μονάδες Kinematics K2. Στο μέσο του συνολικού ανοίγματος (στη θέση του κεντρικού πυλώνα) και σε κάθε πλευρά της γέφυρας εγκαταστάθηκε από μία καταγραφική μονάδα (Σχήμα 8α,β), και υλοποιήθηκε μεταξύ τους σύνδεση με ειδικό καλώδιο για την επίτευξη κοινής εκκίνησης εγγραφής (common start) όλων των αισθητήρων.



(α)



(β)



(γ)

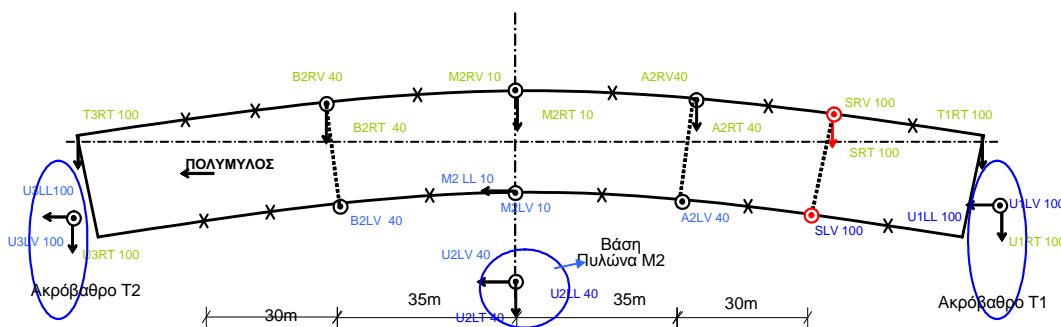


(δ)

**Σχήμα 9.8.** Γέφυρα Πολυμύλου (Γ9) – σύστημα ενοργάνωσης (α) Καταγραφική μονάδες στη ‘δεξιά’ πλευρά της γέφυρας (β) Μεταλλική πλατφόρμα στην ‘αριστερή’ πλευρά της γέφυρας και καταγραφική μονάδα (γ) αισθητήρες στη θέση έδρασης σε ακρόβαθρο (δ) αισθητήρες στη βάση του κεντρικού πυλώνα

Η διάταξη ενοργάνωσης που προκρίθηκε τελικά φαίνεται στο Σχήμα 9, στοχεύει δε στην παρακολούθηση της απόκρισης της γέφυρας τόσο σε διεγέρσεις από περιβαλλοντικά αίτια (ambient excitations - κυρίως κυκλοφορία οχημάτων), όσο και από τυχόν σεισμική διέγερση (με την τοποθέτηση αισθητήρων και στη βάση του κεντρικού πυλώνα). Κατά τη διάρκεια της

παρακολούθησης της γέφυρας δεν υπήρξε ισχυρή σεισμική διέγερση στην ευρύτερη περιοχή. Από το σύστημα, καταγράφηκε στις 21/2/2007 μία σχετικά ασθενής σεισμική δόνηση μεγέθους  $M=4.6$  σε απόσταση περί τα 30 km ΒΑ του έργου. Όμως λόγω του μικρού μεγέθους του σεισμού, η διέγερση της γέφυρας ήταν μικρότερη και από αυτή λόγω του συνήθους κυκλοφοριακού φόρτου, και δεν προέκυψαν διαφορετικές πληροφορίες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας από αυτές που είχαν ήδη εξαχθεί από τις διεγέρσεις λόγω κυκλοφορίας, και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.



**Σχήμα 9.9** Διάταξη ενοργάνωσης γέφυρας Πολυμύλου (Γ9) . Η κίνηση των οχημάτων γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά (κατεύθυνση από Βέροια προς Πολύμυλο).

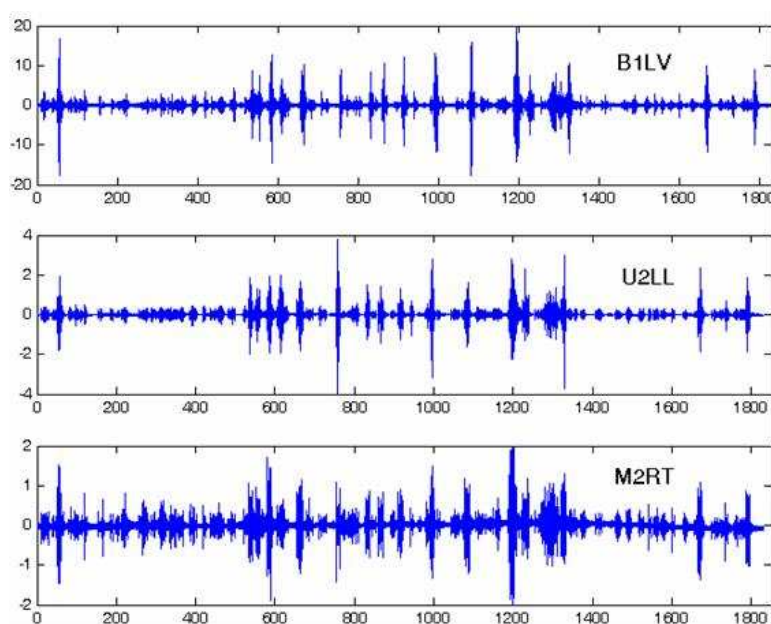
#### 9.4 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΝΟΡΓΑΝΩΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας Εργαστηρίου Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και αντίστοιχο λογισμικό αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών γεφυρών βάσει μετρήσεων της δυναμικής τους απόκρισης σε διάφορες διεγέρσεις. Στις ιδιομορφικές παραμέτρους περιλαμβάνονται οι ιδιοσυχνότητες, οι συντελεστές απόσβεσης και οι συνιστώσες των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης της κατασκευής. Αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες αναγνώρισης για : (α) ταλαντώσεις σε λειτουργικά φορτία (κυκλοφορία οχημάτων και φορτία ανέμου) και (β) ταλαντώσεις σε σεισμικά φορτία. Η αναγνώριση των βέλτιστων τιμών των ιδιομορφικών παραμέτρων επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας τη διαφορά μεταξύ επιλεγμένων χαρακτηριστικών της μετρούμενης απόκρισης (π.χ. χρονοϊστοριών, συνιστωσών Fourier ή φασμάτων απόκρισης) και των αντίστοιχων χαρακτηριστικών απόκρισης που προβλέπονται από ένα ιδιομορφικό μοντέλο (modal model) των γεφυρών.

#### Προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Γ2) από τις μετρήσεις

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 9.10 παρουσιάζονται οι επιταχύνσεις που καταγράφηκαν από τρεις αισθητήρες, εκ των οποίων ο πρώτος μετράει στην κατακόρυφη διεύθυνση, ο δεύτερος στην διαμήκη διεύθυνση και ο τρίτος στην εγκάρσια διεύθυνση.





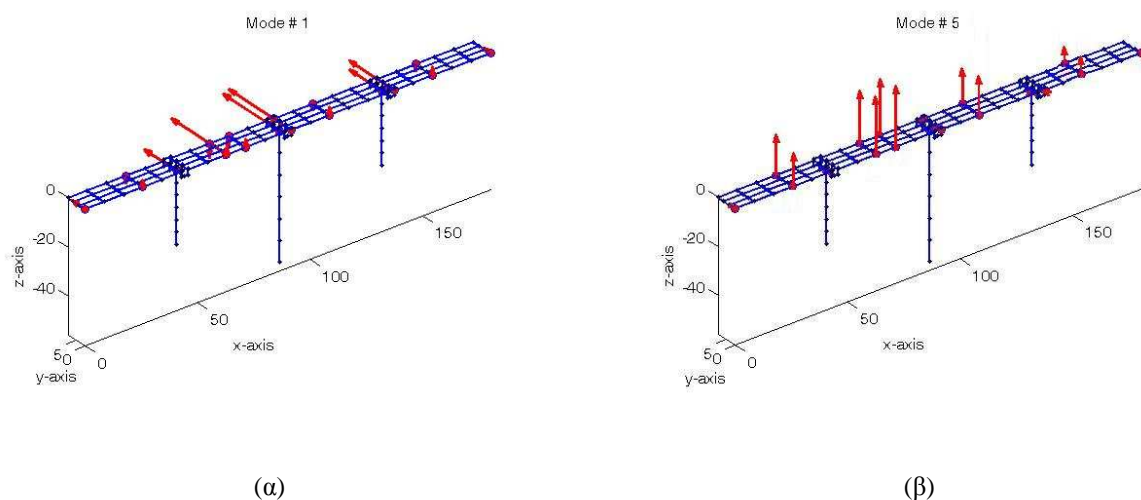
**Σχήμα 9.10.** Χρονοϊστορίες απόκρισης (επιτάχυνσης) στα κανάλια B1LV, U2LL, M2RT του δικτύου αισθητήρων της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας

Οι χρονοϊστορίες απόκρισης σε λειτουργικά φορτία - που οφείλονται κυρίως στη διέλευση των οχημάτων - επεξεργάστηκαν με το αναπτυχθέν λογισμικό για τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών. Η εφαρμογή του λογισμικού έδωσε τη δυνατότητα αναγνώρισης αρκετών βασικών ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και συντελεστών απόσβεσης.

Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν με αξιοπιστία, οι βέλτιστες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης φαίνονται στον Πίνακα 1, ενώ δύο ενδεικτικές ιδιομορφές φαίνονται στο Σχήμα 11. Τα κόκκινα βέλη στο Σχήμα 11 βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας. Συγκεκριμένα, από τη διέλευση των οχημάτων διεγέρθηκαν και αναγνωρίστηκαν καθαρά επτά ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας: τρεις ιδιομορφές στην εγκάρσια κατεύθυνση, μία ιδιομορφή στη διαμήκη κατεύθυνση και τρεις πολύ κοντινές καμπτικές ιδιομορφές. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η γέφυρα της Καβάλας παρουσιάζει πολλαπλές πολύ κοντινές καμπτικές ιδιομορφές που οφείλονται στο γεγονός ότι τα τέσσερα σχεδόν όμοια σε διαστάσεις και υλικά ανοίγματα (spans) της γέφυρας συμπεριφέρονται σχεδόν ανεξάρτητα σε καμπτική ταλάντωση. Οι κοντινές αυτές ιδιομορφές δυσχεραίνουν σημαντικά το πρόβλημα αναγνώρισής τους. Από τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων στον Πίνακα 1 παρατηρείται ότι πράγματι οι τρεις καμπτικές ιδιομορφές είναι πολύ κοντινές.

**Πίνακας 9.1:** Αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης και αναλυτικές ιδιοσυχνότητες της γέφυρας Γ2

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



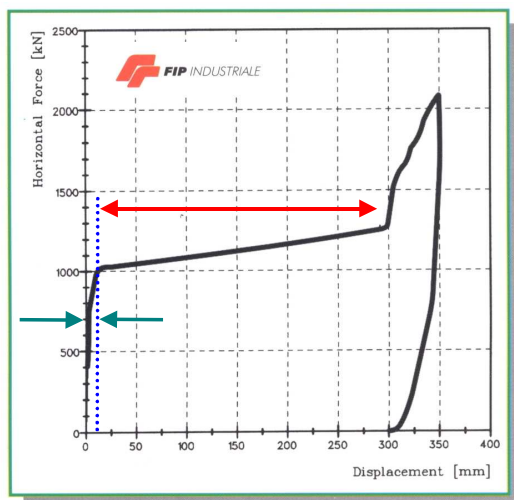
**Σχήμα 9.11:** Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (α) 1<sup>η</sup> εγκάρσια ( $\omega = 0,81\text{Hz}$ ) (β) 1<sup>η</sup> καμπτική (deck) ( $\omega = 3,41\text{Hz}$ )

Τέλος πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των τιμών των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών από πολλαπλές καταγραφές και παρατηρήθηκε ότι η διασπορά των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων που αναγνωρίζονται είναι μικρότερη του 1%, ενώ η διασπορά των τιμών των συντελεστών απόσβεσης είναι της τάξης του 10 με 20% και σε κάποιες περιπτώσεις φθάνει και τα 50%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συμβατά με αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία από άλλους ερευνητές (Arici and Mosalam 2005 και Siringoringo and Fujino 2006).

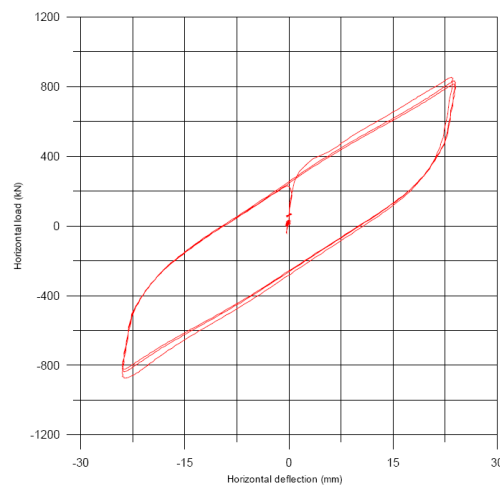
Τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας που προσδιορίστηκαν από τις μετρήσεις, συγκρίθηκαν με αναλυτικά αποτελέσματα προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων που ανταποκρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό της γέφυρας. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1, υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αναλυτικών προβλέψεων και αυτών που προέκυψαν



από τις μετρήσεις σε συνθήκες συνήθους κυκλοφοριακού φόρτου. Οι σημαντικές διαφορές που παρατηρήθηκαν, αποδίδονται κυρίως στη διαφορετική συμπεριφορά των ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Στο Σχήμα 12α δίδεται ένα διάγραμμα δύναμης-οριζόντιας μετατόπισης ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου, του οποίου οι δύο πρώτοι κλάδοι (πολύ δύσκαμπτος για μικρές μετατοπίσεις –  $d < 12$  mm - ακολουθούμενος από έναν λιγότερο δύσκαμπτο για μεγαλύτερες -  $12$  mm  $< d < 300$  mm) είναι αντιπροσωπευτικοί της συμπεριφοράς των ελαστομεταλλικών εφεδράνων (αυτό δεν ισχύει για τους κλάδους για  $d > 300$  mm, αλλά αυτό δεν ενδιαφέρει την παρούσα ανάλυση, όπως και το ότι σε άλλα εφέδρανα τα όρια μπορεί να είναι διάφορα των 12 και 300 mm). Η ίδια συμπεριφορά (μεγάλη δυσκαμψία για πολύ μικρές παραμορφώσεις ακολουθούμενη από μικρότερη για μεγαλύτερες, φαίνεται και στο αντίστοιχο Σχήμα 12β δοκιμής άλλου εφεδράνου για 75% παραμόρφωση).



(α)



(β)

**Σχήμα 9.12:** Διαγράμματα δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης ελαστομεταλλικών εφεδράνων

Όπως γίνεται κατανοητό από το Σχήμα 12, στο αναλυτικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό της γέφυρας, γίνεται η παραδοχή ότι τα εφέδρανα θα λειτουργήσουν σε περίπτωση σεισμού σχεδιασμού σε μεγάλες μετατοπίσεις (περιοχή κόκκινου διπλού βέλους στο Σχ. 12α), παρουσιάζοντας δυσκαμψία πολύ μικρότερη από αυτή που εμφανίζουν για πολύ μικρές μετατοπίσεις (περιοχή πράσινων βελών), όπως είναι αυτή του συνήθους κυκλοφοριακού φόρτου, για τον οποίο και ελήφθησαν οι μετρήσεις. Φυσικά, υπάρχουν και διάφοροι άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν – σε μικρότερο, στη συγκεκριμένη περίπτωση βαθμό – στη διαφορά πειραματικών και αναλυτικών προσομοιωμάτων π.χ. η μη ακριβής αντιστοιχία των διαφόρων παραδοχών που έγιναν για το σχεδιασμό με αυτές που εμφανίζονται πραγματικά (όπως ιδιότητες εδάφους, ποιότητα σκυροδέματος, συνοριακές συνθήκες, δυσκαμψία μη δομικών στοιχείων που δεν ελήφθησαν υπόψη στο σχεδιασμό κλπ.).

Για την κατάλληλη προσαρμογή των ιδιοτήτων του αναλυτικού προσομοιώματος ώστε να είναι σε θέση να περιγράφει με ακρίβεια την μετρηθείσα απόκριση, έχει αναπτυχθεί ειδική μεθοδολογία και λογισμικό, (Papadimitriou et al 2008), η εφαρμογή του οποίου για τη συγκεκριμένη γέφυρα παρουσιάζεται στις εργασίες Ntotsios et al. (2008α και 2008β).

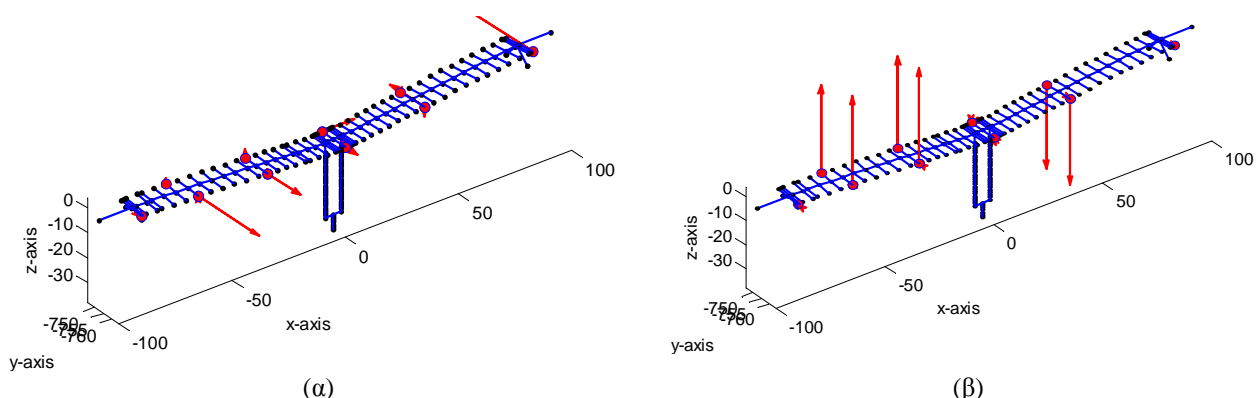
Τέλος σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια παρακολούθησης της γέφυρας, κατεγράφετο παράλληλα και η θερμοκρασία. Από την επεξεργασία μετρήσεων που ελήφθησαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (από  $-3^{\circ}$  έως  $+38^{\circ}$  C) παρατηρήθηκαν μικροδιαφορές, οι οποίες όμως ευρίσκοντο εντός των στατιστικών ορίων ακρίβειας της μεθοδολογίας προσδιορισμού των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, και έτσι δεν μπορούσαν να αποδοθούν αποκλειστικά στις θερμοκρασιακές διαφορές.

### Προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών γέφυρας Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος) από τις μετρήσεις

Από τη διέγερση των οχημάτων διεγέρθηκαν και αναγνωρίστηκαν καθαρά μέχρι οκτώ ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας: μία διαμήκης, τέσσερις εγκάρσια κατεύθυνση και τρεις καμπτικές. Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν, οι βέλτιστες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για ένα σετ μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 2. Μερικές ενδεικτικές ιδιομορφές φαίνονται στο Σχήμα 13. Τα κόκκινα βέλη βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας.

**Πίνακας 9.2 :** Αναγνωρισμένες ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης από ένα σετ μετρήσεων (26/7/2005) της γέφυρας Γ9 του Πολύμυλου.

No	Αναγνωρισμένες Ιδιοσυχνότητες	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)
1	1 <sup>η</sup> διαμήκης	-	-
2	1 <sup>η</sup> εγκάρσια	1.19	5.56
3	2 <sup>η</sup> εγκάρσια	1.12	1.97
4	1 <sup>η</sup> καμπτική (deck)	2.13	0.60
5	3 <sup>η</sup> εγκάρσια	-	-
6	2 <sup>η</sup> καμπτική (deck)	3.07	0.43
7	4 <sup>η</sup> εγκάρσια	4.07	0.76
8	3 <sup>η</sup> καμπτική (deck)	6.65	0.45



**Σχήμα 9. 13:** Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της γέφυρας Γ9 - Πολύμυλος (α) 1<sup>η</sup> εγκάρσια ( $\omega = 1.19$  Hz) (β) 1<sup>η</sup> καμπτική ( $\omega = 2.13$  Hz)

Σημειώνεται ότι και στη γέφυρα Γ9 παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των πειραματικά προσδιορισμένων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών και αυτών αναλυτικών προσομοιωμάτων που αντιστοιχούσαν με αυτά του σχεδιασμού της γέφυρας. Όπως και στην περίπτωση της 2<sup>ης</sup> Χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία προσαρμογής του αναλυτικού προσομοιώματος ώστε να είναι σε θέση να περιγράψει με ακρίβεια την μετρηθείσα απόκριση (Ntotsios et al. 2008).

Τέλος, όπως και στην περίπτωση της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας, έτσι και στη γέφυρα Γ9 δεν κατέστη δυνατόν να εντοπισθεί σαφής επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών. Σημειώνεται ότι και στις δύο γέφυρες οι μετρήσεις ελήφθησαν για θερμοκρασίες όχι χαμηλότερες των -5°C, άρα εκτός της χαμηλής ζώνης θερμοκρασιών όπου έχει παρατηρηθεί σύμφωνα και με τη διεθνή βιβλιογραφία, σημαντική επιρροή στα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών (σε συνάρτηση πάντα με τα εκάστοτε δομικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και τις συνθήκες στήριξης).

## 9.5. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικά οδηγίες που συντάχθηκαν από το Τμήμα Τακτικής Συντήρησης Μεγάλων Έργων της Εγνατίας Οδού για την ενόργανη παρακολούθηση επιταχύνσεων, παραμορφώσεων, μετακινήσεων, θερμοκρασίας και ανεμοπίεσης των κάτωθι γεφυρών της Εγνατίας Οδού :

- Μετσόβου (Τμήμα 3.2)
- Γ1 (Δεξιού κλάδου / Τμήμα 3.5.1)
- Γ7, Γ8 (Τμήμα 3.5.2)

### 9.5.1 Γενικά

Κατά τον σχεδιασμό των προεντεταμένων φορέων των γεφυρών Μετσόβου, Γ1, Γ7, Γ8, που κατασκευάζονται ή θα κατασκευασθούν με την μέθοδο της προβολοδόμησης, στο πλαίσιο της ίδιας εργολαβίας, εκτιμήθηκαν με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια οι τάσεις, εντάσεις, μετακινήσεις, παραμορφώσεις και επιταχύνσεις που θα αναπτυχθούν στις κρίσιμες διατομές τους, λόγω της συνδυασμένης δράσης της προέντασης, των εξωτερικών φορτίσεων, μόνιμων ή κινητών, της ανακατανομής λόγω ερπυσμού, αλλά και δυναμικών φορτίσεων, όπως η ισχυρή ανεμοπίεση, ο σεισμός, η πτώση φορείου, η κυκλοφορία βαρέων οχημάτων κ.λ.π.

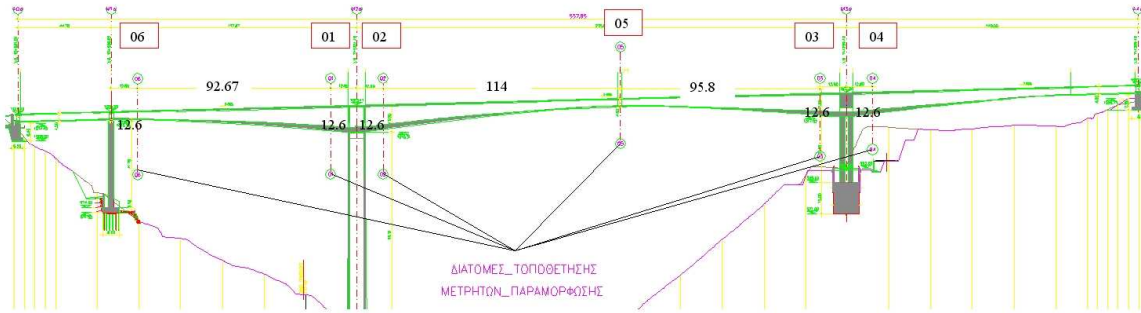
Σε γέφυρες με μεγάλα ανοίγματα και ιδιαίτερα σε αυτές που κατασκευάζονται σε πολλές φάσεις, όπως στην περίπτωση της προβολοδόμησης των υπόψη τεσσάρων γεφυρών, είναι χρήσιμο και σκόπιμο να παρακολουθούνται κατά την κατασκευή και κατά τη λειτουργία του έργου ορισμένες *παράμετροι απόκρισης* τους, τόσο *τοπικές* όσο και *καθολικές*:

### 9.5.2 Τοπικές παράμετροι απόκρισης (παραμορφώσεις)

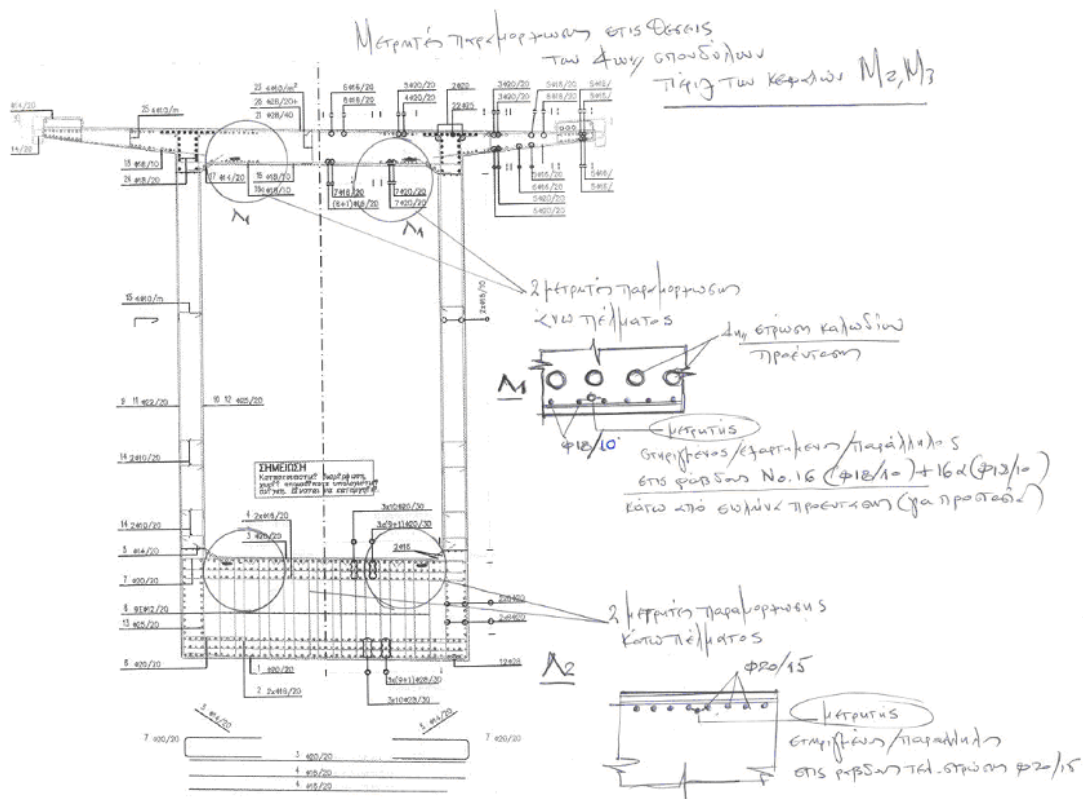
Η μέτρηση τοπικών παραμέτρων απόκρισης όπως οι ορθές παραμορφώσεις σε επιλεγμένες κρίσιμες διατομές του φορέα των γεφυρών είναι σκόπιμο να παρακολουθηθούν με στόχο:

1. Να επιβεβαιωθούν πειραματικά οι εκτιμήσεις του σχεδιασμού στις *φάσεις κατασκευής*, μέσω της μέτρησης των συνολικών για κάθε φάση κατασκευής, από την αρχική σκυροδέτηση, παραμορφώσεων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί η πραγματική αντοχή και ελαστικότητα του έργου και ο ρυθμός εξέλιξής τους κατά τις φάσεις κατασκευής, μέχρι την παραλαβή του.
2. Να επιβεβαιωθούν οι εκτιμήσεις του σχεδιασμού με την *ολοκλήρωση του έργου* και να διαγνωσθούν τυχόν υπερβάσεις τάσεων στο σκυρόδεμα, που προϋποθέτουν την γνώση της συνολικής παραμόρφωσης από την αρχή του έργου, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της αρχικής με την τελική συνολική παραμόρφωση.
3. Να διαγνωσθούν και αξιολογηθούν σημαντικές μεταβολές στις αναπτυσσόμενες τάσεις, κατά τη *λειτουργία του έργου*, συγκρίνοντας μεταγενέστερες μετρήσεις, με τις αρχικές που έχουν καταγραφεί με την ολοκλήρωση του έργου.

Σημειώνεται ότι η παρακολούθηση τοπικών παραμέτρων ενέχει τον κίνδυνο, σε ορισμένες θέσεις να συμπέσει με τοπικές αστοχίες, ασυνέχειες, ρωγμές, που δεν είναι αντιπροσωπευτικές της γενικής δομικής ακεραιότητας της γέφυρας. Ωστόσο η συμμετρικότητα των προτεινόμενων θέσεων τοποθέτησης, ως προς τις κεφαλές των βάρων, η χρήση ενός ελάχιστου μήκους αισθητήρων ( $\geq 200\text{mm}$ ), η τοποθέτηση 4 αισθητήρων ανά διατομή, η τοποθέτηση 2 αισθητήρων στην ίδια ίνα καθ' ύψος της διατομής, η επαλήθευση με τη γεωμετρική παρακολούθηση, η επιμελής προστασία κατά την ενσωμάτωση των αισθητήρων κατά τη σκυροδέτηση - δόνηση, αλλά και η αναμενόμενη ελαστική συμπεριφορά σε στάδιο I των προεντεταμένων φορέων, άρει σε μεγάλο βαθμό επιφυλάξεις και διασφαλίζει την ακρίβεια και την χρησιμότητα αυτού του είδους της παρακολούθησης.



Σχήμα 9.14. Διάταξη αισθητήρων μέτρησης παραμόρφωσης στον φορέα της γέφυρας Μετσόβου (καλύπτει και την λογική της διάταξης των ίδιων οργάνων στις υπόλοιπες γέφυρες)



Σχήμα 9.15. Λεπτομέρειες θέσης τοποθέτησης μετρητών παραμόρφωσης στις διατομές σπονδύλων των προβολοδομούμενων γεφυρών

Σημειώνεται ότι τα προηγούμενα 1, 2, 3 μπορεί να εξυπηρετηθούν με την χρήση στατικών ή δυναμικών μετρητών παραμόρφωσης, τοποθετημένων σε κρίσιμες διατομές των φορέων της γέφυρας και συγκεκριμένα στους κρίσιμους περίχ των κεφαλών των δύο βασικών βάθρων σπονδύλους του φορέα (4<sup>ος</sup> σπόνδυλος περίχ των κεφαλών M2, M3 στην γέφυρα Μετσόβου) και στην κλείδα του μεσαίου μεγάλου ανοίγματος όπως φαίνεται στα σχήματα 9.14, 9.15.

Παραμόρφωση : Η παραμόρφωση που θα μετράται σύμφωνα με ενδεικτικό πρόγραμμα που δίνεται ακολούθως, είναι η μεταβολή στο μήκος του στοιχείου διαιρούμενη με το αρχικό του μήκος. Μπορεί να είναι αποτέλεσμα εξωτερικής φόρτισης – προέντασης, όπως μπορεί και να είναι αποτέλεσμα συρρίκνωσης, ερπυσμού και θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών. Σε μορφή συμβόλων η παραμόρφωση  $\varepsilon$  ισούται με την μεταβολή στο μήκος  $\Delta l$  διαιρούμενη με το αρχικό του μήκος  $L$  :

$$\varepsilon = \Delta l / L$$

#### Διακρίβωση – επαλήθευση:

Ας σημειωθεί ότι ένας μετρητής παραμορφώσεων παλλόμενης χορδής (vibrating wire) ή ένα δυναμικό ηλεκτρομηκυσιόμετρο, ή ένας αισθητήρας οπτικών ινών, διακριβώνεται για να προκύψει μια τιμή παραμόρφωσης βασισμένη στο αρχικό μήκος του μετρητή. Επίσης πρέπει να τοποθετηθεί συμπληρωματικά ένας μετρητής παραμόρφωσης εντός αφόρτιστου δοκιμίου στη θέση του έργου (π.χ. εντός του κιβωτίου), ώστε να διευκολυνθεί η διάκριση των παραμορφώσεων εκ φόρτισης από τις παραμορφώσεις εκ συρρίκνωσης. Η δυνατότητα παράλληλης καταγραφής της θερμοκρασίας του φορέα βοηθά στην καταγραφή και απομόνωση των λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών παραμορφώσεων. Τέλος η συχνή μεταξύ διαδοχικών φορτίσεων μέτρηση και παρακολούθηση τυχόν μεταβολών της αρχικώς μετρηθείσας παραμόρφωσης βοηθά στην εκτίμηση των ερπυστικών παραμορφώσεων. Η δυνατότητα ρύθμισης κάτω φράγματος έναρξης καταγραφής, βοηθάει στην αυτόματη ενεργοποίηση της καταγραφής στις περιπτώσεις υπέρβασης προκαθορισμένου μεγέθους παραμόρφωσης.

#### Χαρακτήρας παραμορφώσεων- προϋποθέσεις δυναμικής παρακολούθησης παραμορφώσεων:

Οι παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια κατασκευής της γέφυρας είναι **κυρίως στατικού** χαρακτήρα, γιατί προκαλούνται από στατικά φορτία όπως το ίδιο βάρος, τα πρόσθετα μόνιμα καταστρώματος, τον εξοπλισμό, τα αντίβαρα, το βάρος του φορείου κ.λ.π.

Σε χαραδρογέφυρες με ψηλά βάθρα και μεγάλα μήκη προβόλων, όπως στην γέφυρα Μετσόβου, αναμένονται και **δυναμικού** χαρακτήρα παραμορφώσεις κατά την φάση κατασκευής, λόγω ταλάντωσης του φορέα από ανεμοπίεση, πιθανό ασθενή σεισμό, κίνηση φορείων κ.λ.π. Στην λειτουργία της γέφυρας αναμένονται ταλαντώσεις εκ κίνησης οχημάτων, ανεμοπίεσης και σεισμού. Στην περίπτωση αυτή είναι χρήσιμη η **δυναμική** παρακολούθηση των παραμορφώσεων, με στόχο την πειραματική αναγνώριση του **δυναμικού τμήματος** της παραμόρφωσης, που θα οφείλεται στα προηγούμενα αίτια και στην καταγραφή των γρήγορα επιβαλλόμενων και χρονικά μεταβαλλόμενων παραμορφώσεων. Έτσι είναι πιο ακριβής η καταγραφή της συνολικής ακραίας παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη χρονική στιγμή της ταλάντωσης του φορέα, ενώ εξασφαλίζεται η γνώση της ταυτόχρονης παραμόρφωσης σε θέσεις της ίδιας διατομής καθ' ύψος του φορέα, αλλά και όλων των διατομών του φορέα που έχουν μετρητές παραμόρφωσης.

Είναι πάντως γεγονός ότι η δυναμική καταγραφή δεν είναι απαραίτητη για την μέτρηση των παραμορφώσεων λόγω ερπυσμού, συρρίκνωσης, ίδιου βάρους και προέντασης, ενώ ακόμη και στην περίπτωση που λάβει χώρα μη αναμενόμενη ανεμοπίεση ή σεισμός ή πτώση φορείου, η συγκριτική αξιολόγηση στατικών μετρήσεων παραμόρφωσης πριν και μετά το συμβάν θα μπορούσε εξίσου να διαφωτίσει για τυχόν φθορές λόγω στιγμιαίας υπέρβασης τάσεων.

*Συνεπώς η δυναμική παρακολούθηση των παραμορφώσεων έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά εφ' όσον μας ενδιαφέρει αποκλειστικά η αναγνώριση και αξιολόγηση της παραμένουσας μεταβολής της παραμόρφωσης μετά από ένα σημαντικό συμβάν, η τελευταία μπορεί να διαγνωσθεί και με στατική μέτρηση παραμορφώσεων.*

Προτείνεται η εγκατάσταση συστήματος **δυναμικής καταγραφής** παραμόρφωσης στην γέφυρα Μετσόβου και μόνον υπό προϋποθέσεις μη υπέρβασης κόστους για τις άλλες τρεις γέφυρες της

Εφαρμογή των μετρητών παραμόρφωσης / ενσωμάτωση στο σκυρόδεμα:

1. Οι μετρητές παραμορφώσεων είναι ευαίσθητα όργανα. Δεν πρέπει να πέσουν από ύψος στο δάπεδο εργασίας ή να καμφθούν.
2. Οι μετρητές παραμορφώσεων, ενσωματούμενοι μέσα στην μάζα του σκυροδέματος, με τον μεγάλο τους άξονα παράλληλο στις διαμήκειες ράβδους άνω και κάτω πέλματος (βλ. Σχέδιο 2) στη διατομή τοποθέτησής τους, μετρούν την παραμόρφωση της ίνας του σκυροδέματος που αντιστοιχεί στο ύψος τοποθέτησής τους, σε αυτή τη διατομή. Δεν πρέπει να τοποθετούνται στην επικάλυψη του φορέα. (Στην περίπτωση της γέφυρας του Μετσόβου είναι δυνατόν να προβλεφθεί τοποθέτηση ενός πρόσθετου αισθητήρα/ διατομή παρακολούθησης, κατάλληλου για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης του θλιβόμενου οπλισμού του κάτω πέλματος, συνολικά 4 αισθητήρες)
3. Οι μετρητές παραμόρφωσης θα τοποθετούνται από τον προμηθευτή, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των αισθητήρων.
4. Οι μετρητές παραμόρφωσης θα τοποθετούνται στην αρχή των σχετικών σπονδύλων, κοντά στις εσωτερικές παρειές πελμάτων του κιβωτιοειδούς φορέα, πριν την σκυροδέτηση, στηριγμένοι με σύρμα σε 4 σημεία από δύο παράλληλες διαμήκειες ράβδους, όπως φαίνεται στα σχήματα 2 και 3. Στην αρχή των σπονδύλων οι ράβδοι στήριξης θα είναι οι αναμονές από τον προηγούμενο σπόνδυλο.
5. Θα τοποθετούνται δύο αισθητήρες στο άνω και δύο στο κάτω πέλμα του φορέα, δηλαδή 4 αισθητήρες ανά διατομή, όπως στο άρθρο 3, στην ίδια ίνα σκυροδέματος ανά πέλμα.
6. Από τους τέσσερις αισθητήρες ο ένας θα έχει ενσωματωμένο θερμομέτρο, ή θα υπάρχει πέμπτος αισθητήρας, κοινής καταγραφής με τους άλλους 4 (στην ίδια διατομή), που θα καταγράφει θερμοκρασία. Ένας αισθητήρας θερμομέτρησης ανά διατομή, θεωρείται επαρκής.
7. Η προστασία κατά τη σκυροδέτηση, ιδιαίτερα των αισθητήρων που θα τοποθετηθούν στο άνω πέλμα και αναμένεται να δεχθούν στήλη σκυροδέματος μεγάλου ύψους, είναι απαραίτητη. Προτείνεται η τοποθέτηση αυτών των αισθητήρων κάτω από σωλήνα προέντασης της πλησιέστερης στρώσης καλωδίων του άνω πέλματος. Προσοχή χρειάζεται και για να μην εισέλθει ο δονητής στην θέση των αισθητήρων, γι' αυτό χρειάζεται κατάλληλη σήμανση.
8. Τα καλώδια σύνδεσης αισθητήρων – καταγραφικού θα οδηγούνται στο εσωτερικό του κιβωτίου, γι' αυτό το λόγο και ορίστηκαν οι συγκεκριμένες θέσεις καθ' ύψος των διατομών.
9. Αποθήκευση του καλωδίου σε μέρος που είναι ξηρό και ασφαλές από τρωκτικά και άλλες πιθανές αιτίες καταστροφής.
10. Προστασία του καλωδίου από εγκοπές και κοψίματα. Αποφυγή έλξης του καλωδίου για να ελευθερωθεί από εμπόδια.
11. Το ελεύθερο άκρο του καλωδίου να συνδέεται με αδιάβροχο συνδετήρα. Αν το τελείωμα του καλωδίου με γυμνό σύρμα είναι επαρκές, να προστατεύεται η άκρη του από την υγρασία.
12. Σήμανση των καλωδίων για γρήγορη αναγνώριση αργότερα. Τοποθέτηση αναγνωριστικών αριθμών με μία ανθεκτική, αδιάβροχη ταινία ή χρησιμοποίηση ταινίας για χρωματική κωδικοποίηση. Επισήμανση της άκρης του καλωδίου τρεις φορές σε διαστήματα του ενός ποδιού τουλάχιστον, κατόπιν επισήμανση του υπόλοιπου του καλωδίου ανά διαστήματα των 6 ή 10 ποδιών, ή όπως ορίζεται.
13. Αν το σύστημα αναγνώρισης που επιλέξατε διαφέρει από το σύστημα αναγνώρισης του οργάνου που χρησιμοποιείται στα μηχανολογικά σχέδια, σημειώστε τις διαφορές στα σημειωματάρια του εργοταξίου και στα σχετικά σχέδια. Για παράδειγμα : "Μετρητής παραμορφώσεων παλλόμενης χορδής 4-IA = Κόκκινο και Καφέ".

14. Δημιουργείτε ένα αρχείο της θέσης του κάθε μετρητή παραμορφώσεων παλλόμενης χορδής και του καλωδίου με το οποίο συνδέεται.
15. Οι μετρήσεις που πρέπει να λαμβάνονται κατ' ελάχιστον είναι οι ακόλουθες:
  - a. Αρχική μέτρηση με την τοποθέτηση και παραλαβή από τον έμπειρο προμηθευτή των οργάνων .
  - b. Μέτρηση αμέσως μετά την σκυροδέτηση, των παραμορφώσεων (βραχύνσεων) λόγω συρρίκνωσης και πήξης του σκυροδέματος. Εκδηλώνονται μετά τη σκυροδέτηση του σπονδύλου του φορέα και πριν την επιβολή φορτίου (προέντασης + ιδ. βάρους).
  - c. Μέτρηση των παραμορφώσεων αμέσως πριν και αμέσως μετά την επιβολή της προέντασης και του ίδιου βάρους του σπονδύλου. Για να είναι οι παραμορφώσεις αναγνωρίσιμες, πρέπει οι αισθητήρες να τοποθετούνται μακριά από τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής (π.χ. στα πέλματα του κιβωτιοειδούς φορέα) και στην αρχή του σπονδύλου. Συγκεκριμένα μπορούν να συνδέονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ακόλουθης παραγράφου, στις αναμονές των ράβδων διαμήκους οπλισμού, της πλησιέστερης στρώσης στην κάτω παρειά του άνω πέλματος και στην άνω παρειά του κάτω πέλματος.
  - d. Μέτρηση των παραμορφώσεων λόγω ερπυσμού. Εκδηλώνονται μετά την επιβολή θλιπτικού φορτίου (προέντασης + ίδιου βάρους). Εκτιμώνται μέσω λήψης ικανού αριθμού μετρήσεων μεταξύ όλων των διαδοχικών φορτίσεων, ώστε να υπολογιστεί ο ρυθμός και το μέτρο της αύξησης των θλιπτικών παραμορφώσεων.
  - e. Μέτρηση πριν και μετά την μετακίνηση των φορέων της προβολοδόμησης.
  - f. Μέτρηση των παραμορφώσεων αμέσως πριν και αμέσως μετά την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης επόμενων σπονδύλων.
  - g. Μέτρηση των παραμορφώσεων αμέσως πριν και αμέσως μετά την επιβολή της προέντασης και του ίδιου βάρους των επόμενων σπονδύλων (προβολοδόμηση).
  - h. Μέτρηση των παραμορφώσεων λόγω κατασκευής κλειδας, προέντασης κάτω καλωδίων.
  - i. Μέτρηση παραμορφώσεων λόγω θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών με τη βοήθεια ενσωματωμένου αισθητήρα θερμομέτρησης μάζας σκυροδέματος.
  - j. Μέτρηση παραμορφώσεων πριν και μετά το jacking στα βάθρα M1, MR.
  - k. Μέτρηση παραμορφώσεων πριν και μετά το jacking ακροβάθρων.
  - l. Μέτρηση παραμορφώσεων με την ολοκλήρωση του φορέα
  - m. Μέτρηση παραμορφώσεων πριν κατά τη διάρκεια και μετά την στατικός επιβαλλόμενη φόρτιση οχήματος (ζυγισμένου οχήματος ελέγχου σε στάση σε συγκεκριμένες θέσεις πάνω στο κατάστρωμα της γέφυρας).

### **9.5.3 Όργανα/ αισθητήρες παραμόρφωσης**

#### Ενσωματούμενοι μετρητές παραμορφώσεων παλλόμενης χορδής (vwire) σκυροδέματος.

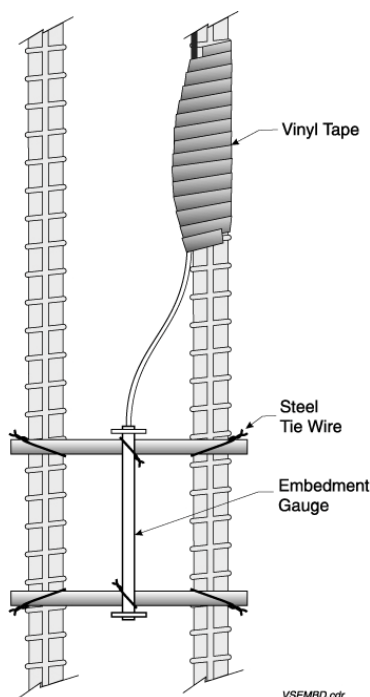
Το σώμα των ενσωματούμενων στο σκυρόδεμα μετρητών παραμορφώσεων παλλόμενης χορδής, είναι ένας χαλύβδινος σωλήνας που φέρει πτερύγια στα δύο άκρα του. Στο εσωτερικό του σώματος βρίσκεται μια μεταλλική χορδή και ένα μαγνητικό πηνίο. Η χορδή διατηρείται σε εφελκυσμό μεταξύ των δύο πτερυγίων και το πηνίο λειτουργώντας μαγνητικά διεγείρει τη χορδή, η οποία τότε δονείται στην φυσική της συχνότητα.

Η παραμόρφωση στο σκυρόδεμα μεταφέρεται μέσω των πτερυγίων στο σώμα και στη μεταλλική χορδή, προκαλώντας μια μεταβολή στην εφελκυστική κατάσταση της χορδής. Όταν η χορδή έχει διεγερθεί και δονείται στην περιοχή του μαγνητικού πηνίου, παράγει ένα σήμα συχνότητας που μεταφέρεται στην μονάδα μέτρησης. Η μονάδα μέτρησης επεξεργάζεται το σήμα και παρουσιάζει μία μέτρηση.



Η σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα και του σήματος συχνότητας που μεταφέρεται στην μονάδα μέτρησης καθορίζεται από ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

Η τοποθέτηση θα πρέπει να γίνεται από τον προμηθευτή, ο οποίος να έχει πολύχρονη αντίστοιχη εμπειρία σε γέφυρες και τηρώντας το ακόλουθο σχήμα 9.16 του κατασκευαστή των αισθητήρων:



Σχήμα 9.16 : Λεπτομέρεια τοποθέτησης – στήριξης του μετρητή παραμόρφωσης

#### 9.5.4 Ανάλυση δεδομένων μετρήσεων παραμόρφωσης.

##### Υπολογισμός Δμε

Το νούμερο που φαίνεται στην οθόνη της μονάδας μέτρησης αντιπροσωπεύει την μικροπαραμόρφωση, όχι όμως απαραίτητα και την καθαρή παραμόρφωση στο δομικό στοιχείο. Δύο λόγοι συμβάλλουν σ' αυτό. Πρώτον, υπάρχει ήδη παραμόρφωση στη χορδή διότι πρέπει να βρίσκεται υπό εφελκυστική κατάσταση ώστε να μπορεί να λειτουργήσει. Αυτή η παραμόρφωση αντιμετωπίζεται ως μια αντιστάθμιση και εξαλείφεται από τον υπολογισμό του Δμε. Δεύτερον, μπορεί να υπάρχει παραμόρφωση στο στοιχείο προτού ακόμα γίνει η τοποθέτηση του μετρητή παραμορφώσεων. Η δεύτερη αυτή παραμόρφωση δεν αναμένεται στην περίπτωση των ενσωματούμενων πριν την σκυροδέτηση μετρητών.

Για την καταγραφή μέτρησης συνολικής παραμόρφωσης, θα πρέπει να καταγραφεί οπωσδήποτε η αρχική μέτρηση πριν την σκυροδέτηση. Η αρχική αυτή μέτρηση κατόπιν αφαιρείται από οποιαδήποτε επακόλουθη μέτρηση παραμόρφωσης για να βρεθεί η καθαρή παραμόρφωση στο στοιχείο.

$$\Delta\mu\epsilon = \mu\epsilon_{\text{τρέχουσα}} - \mu\epsilon_{\text{αρχική}}$$

Για την μέτρηση μιας μεταβολής στην παραμόρφωση λόγω ενός νέου φορτίου, όπως η επιβολή προέντασης, απαιτείται η καταγραφή μέτρησης πριν την εφαρμογή του νέου φορτίου (προένταση). Η Δμε θα αντιπροσωπεύει την μεταβολή στην παραμόρφωση λόγω προέντασης και ίδιου βάρους (που λόγω άντωσης ενεργοποιείται).

### Θετική ή αρνητική τιμή Δμε:

Λόγω του σχεδιασμού του, ο μετρητής παραμορφώσεων εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές καθώς η σχετική ίνα επιμηκύνεται και μικρότερες τιμές καθώς η σχετική ίνα βραχύνεται.

Αν ο μετρητής παραμορφώσεων ηλεκτρικής αντίστασης έχει ρυθμιστεί για να μετράει επιμήκυνση και το φορτίο εφελκυσμού αυξάνεται, οι διαδοχικές τιμές των παραμορφώσεων θα είναι μεγαλύτερες και η τιμή της Δμε θα είναι θετική.

Αν ο μετρητής παραμορφώσεων ηλεκτρικής αντίστασης έχει ρυθμιστεί για να μετράει θλίψη και το θλιπτικό φορτίο αυξάνεται, οι διαδοχικές μετρήσεις των παραμορφώσεων θα είναι μικρότερες και η τιμή της Δμε θα είναι αρνητική. Αν επιθυμείτε να δουλέψετε με θετικές τιμές για παραμόρφωση θλίψης, απλώς αντιστρέψτε το σήμα.

### Διόρθωση για παραμορφώσεις κάμψεως

Για να διορθώσετε τις μετρήσεις της παραμόρφωσης για παραμορφώσεις κάμψεως, θα πρέπει να έχετε τοποθετήσει μετρητές παραμορφώσεων ηλεκτρικής αντίστασης σε αντίθετες πλευρές του ουδέτερου άξονα. Υπολογίστε την διορθωμένη τιμή της παραμόρφωσης ως εξής :

$$\Delta\mu_{\text{διορθωμένη}} = \Delta\mu_{\text{μετρητής1}} + \Delta\mu_{\text{μετρητής2}} + \dots + \Delta\mu_{\text{μετρητήςn}} / n$$

### Διόρθωση για μεταβολές της θερμοκρασίας

- Καταγράψτε μία αρχική μέτρηση για τη θερμοκρασία, την ίδια στιγμή που καταγράφετε την μέτρηση της αρχικής παραμόρφωσης.
- Καταγράψτε τον θερμικό συντελεστή διαστολής του δομικού στοιχείου. Συμβουλευτείτε το εγχειρίδιο οδηγιών για να καταγράψετε τον θερμικό συντελεστή διαστολής για το μετρητή παραμορφώσεων ηλεκτρικής αντίστασης.

$$\Delta\mu_{\text{διορθωμένη}} = \Delta\mu - [ (TC_{\text{στοιχείου}} - TC_{\text{μετρητή}}) \times (T_{\text{τρέχουσα}} - T_{\text{αρχική}}) ]$$

Όπου :

Δμε = η μεταβολή στην παραμόρφωση από την αρχική τιμή.

TC<sub>στοιχείου</sub> = ο θερμικός συντελεστής για το δομικό στοιχείο.

TC<sub>μετρητή</sub> = ο θερμικός συντελεστής για το μετρητή παραμορφώσεων ηλεκτρικής αντίστασης.

T<sub>τρέχουσα</sub> = η τρέχουσα μέτρηση της θερμοκρασίας σε °C.

T<sub>αρχική</sub> = η αρχική μέτρηση της θερμοκρασίας σε °C.

### **9.5.5 Ενσωματούμενοι μετρητές δυναμικών παραμορφώσεων σκυροδέματος**

Είναι ηλεκτρομηκυσιόμετρα στα οποία παρέχεται ηλ. ρεύμα και μετράται το ρεύμα εξόδου. Η διάταξη των μηκυσιομέτρων είναι τέτοια ώστε να δημιουργείται γέφυρα Wheatstone σε ισορροπία (ρεύμα σταθερής τάσης στην έξοδο). Κατά την μήκυνση ή βράχυνση μεταβάλλεται το μήκος και η ειδική αντίσταση του σύρματος του οργάνου. Λόγω αυτής της μεταβολής μεταβάλλεται η τάση του ρεύματος στην έξοδο της γέφυρας Wheatstone. Η μεταβολή αυτή αντιστοιχίζεται σε μία τιμή παραμόρφωσης συναρτήσει της σταθεράς της διάταξης. Η σταθερά αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή και πρέπει να επαληθευθεί πριν την εγκατάσταση με μία δόκιμη απλού εφελκυσμού.

Οι γενικές αρχές τοποθέτησης και ανάλυσης των μετρήσεων καλύπτονται από τα προηγούμενα. Με την χρήση των μετρητών αυτών είναι δυνατή η λήψη χρονοϊστοριών παραμόρφωσης που έχει σημαντικά πλεονεκτήματα κυρίως για την ενοργάνωση της γέφυρας Μετσόβου και λιγότερο για τις άλλες τρεις γέφυρες που μπορεί να καλυφθούν και με μετρητές παλλόμενης χορδής.

### 9.5.6 Πρόγραμμα εργαστηριακών ελέγχων δοκιμών σκυροδέματος

Για την καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων των αισθητήρων παραμόρφωσης, είναι προφανώς απαραίτητη η θεώρηση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών ελέγχων των δοκιμών σκυροδέματος που λαμβάνονται από την επίβλεψη του έργου. Προτείνεται και η λήψη και ο έλεγχος δοκιμών με ράβδους οπλισμού.

## 9.6 ΚΑΘΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ( ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ – ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ )

Η μέτρηση καθολικών παραμέτρων απόκρισης όπως οι μετακινήσεις του καταστρώματος σε δύο ή τρεις διευθύνσεις, μέσω της παρακολούθησης του κλεισίματος – ανοίγματος των διακένων των αρμών διαστολής των γεφυρών, ή πολύ περισσότερο οι επιταχύνσεις επιλεγμένων θέσεων του φορέα και της θεμελίωσης τους είναι σκόπιμο να παρακολουθηθούν κυρίως κατά την λειτουργία του έργου, με στόχους:

1. Μέσω της παρακολούθησης των μετακινήσεων στους αρμούς με χρήση αρμομέτρων, μπορεί να εξακριβωθεί η εξέλιξη και ολοκλήρωση του ερπυσμού, να διακριβωθεί η οριζόντια δυσκαμψία του φορέα (σεισμική μέτρηση) και η δυστένεια του καταστρώματος (εφ' όσον μετρώνται και τα δύο άκρα), να διαγνωσθεί η σκλήρυνση των εφεδράνων, τυχούσα παραμένουσα παραμόρφωση από δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα βάθρα κ.λ.π. Επιπλέον, είναι δυνατόν να ελεγχθεί η συχνότητα και το μέγεθος καταπόνησης των αρμών διαστολής, που είναι τρωτά στοιχεία του καταστρώματος της γέφυρας. Τέλος είναι δυνατόν για μέτριους και σημαντικούς σεισμούς να επαληθευθούν οι παραδοχές σχεδιασμού για την σχετική μετακίνηση κεφαλής των βάθρων, που είναι η σημαντικότερη παράμετρος όπλισης και διαστασιολόγησης τους. Τέλος μέσω της δυναμικής καταγραφής χρονοϊστοριών μετακίνησης, ακόμη και για περιβαλλοντικές διεγέρσεις (ambient) είναι δυνατόν με χρήση των λογισμικών που έχει αναπτύξει με το Παν. Θεσσαλίας, να αναγνωρισθούν βασικές ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης της γέφυρας και κυρίως να επαληθευθεί και να βαθμονομηθεί η αναγνώριση ιδιοσυχνοτήτων που γίνεται από τα ίδια λογισμικά με την επεξεργασία των μετρούμενων επιταχύνσεων.

*Η μέτρηση με χρήση αρμομέτρων – μετακινησιομέτρων είναι δυνατή και απαραίτητη μετά την εγκατάσταση των αρμών διαστολής και πρέπει να η καταγραφή να είναι συγχρονισμένη με κοινή εκκίνηση και κοινή στάθμη διέγερσης με τα επιταχυνσιόμετρα κα με τους μετρητές δυναμικής παραμόρφωσης (εφ' όσον τοποθετηθούν οι τελευταίοι)*

2. Μέσω της παρακολούθησης των επιταχύνσεων ορισμένων κατάλληλων θέσεων στο φορέα και της θεμελίωσης των γεφυρών, είναι δυνατή τόσο για ασθενείς περιβαλλοντικές όσο και για μέτριες ή ισχυρές ταλαντώσεις, με γνωστή ή άγνωστη ιστορία διέγερσης, να αναγνωρισθούν οι ιδιοσυχνότητες και με κατάλληλη περιοδική πύκνωση αισθητήρων (επιταχυνσιομέτρων) οι ιδιομορφές των γεφυρών.

Με καταγραφές λίγων λεπτών για περιβαλλοντικές διεγέρσεις ή δευτερολέπτων για σεισμικές διεγέρσεις, είναι δυνατόν να αναγνωρισθούν τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας, τόσο για τους υποφορείς και τον τελικό φορέα κατά την κατασκευή, όσο και για τη λειτουργία της γέφυρας. Μέσω χρήσης λογισμικών αναθεώρησης δυναμικού μοντέλου και διάγνωσης ζημιάς/φθοράς, με χρήση των λογισμικών που έχει αναπτύξει το Παν. Θεσσαλίας, μπορούν να επαληθευθούν οι εκτιμήσεις του σχεδιασμού για τις παραμέτρους μάζας και ακαμψίας του έργου σε κάθε φάση κατασκευής ή λειτουργίας, χωρίς τον κίνδυνο λάθους από επιρροή τοπικών συνθηκών. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις η συνδυασμένη παρακολούθηση παραμορφώσεων, επιταχύνσεων και μετακινήσεων στην κατασκευή μπορεί να δώσει ακριβέστατη εκτίμηση της πραγματικής ελαστικότητας και αντοχής του.

Προτείνεται η τοποθέτηση από την κατασκευή δύο τριαξονικών επιταχυνσιόμετρων σε θέσεις του φορέα της γέφυρας που δίνονται στα σχήματα 4 και 5, με στόχο την αναγνώριση των ιδιοσυχνοτήτων του φορέα στις φάσεις κατασκευής και την δυναμική παρακολούθηση της γέφυρας σε λειτουργία. Μετά την εγκατάσταση των αρμών και την ολοκλήρωση του έργου, θα τοποθετηθούν στις βάσεις των βάθρων M1, M2 δύο ακόμη τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα και τέσσερα μονοαξονικά αρμόμετρα σε κλίση ως προς τον διαμήκη άξονα της γέφυρας, στα δύο άκρα κάθε κλάδου.

Επιδίωξη είναι η κοινή καταγραφή όλων των παραμέτρων και αισθητηρίων από μία ή περισσότερες ενός και μοναδικού τύπου ευαίσθητες καταγραφικές μονάδες (τύπου K2 της Kinometrics ή TMR-200 της Tokyo – Sokki ή της Pacific Instruments ή αναλόγου με τις ίδιες ελάχιστες ικανότητες διακριτότητας ανάλυσης σήματος ( $\geq 16$  bit) και συχνότητες δειγματοληψίας ( $\geq 200$  Hz).

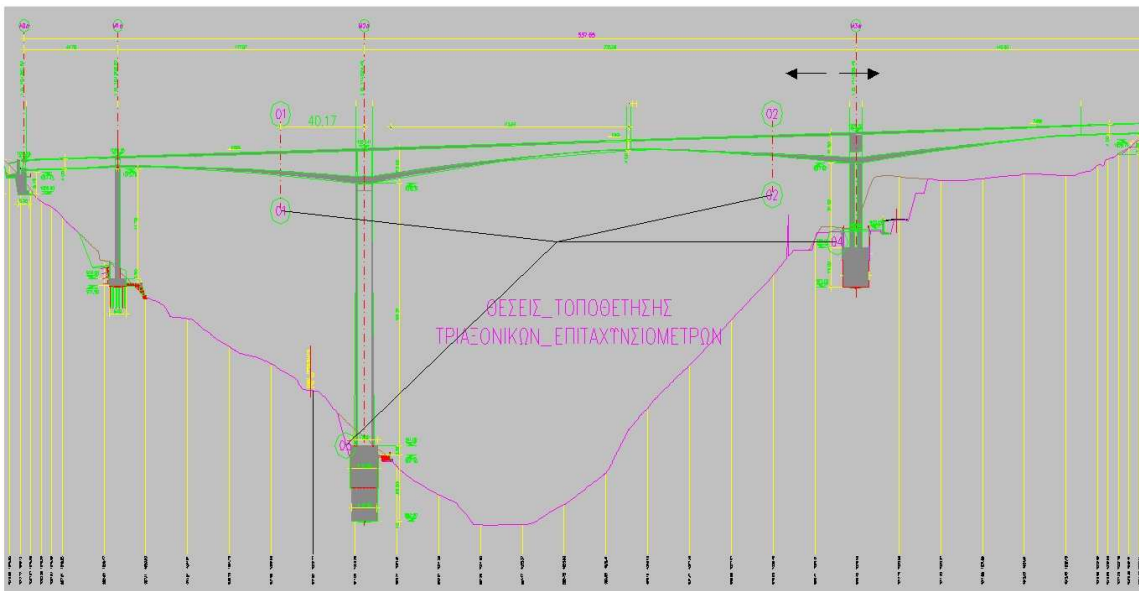
Σε ό,τι αφορά στους αισθητήρες καταγραφής δυναμικής μετακίνησης, παραμόρφωσης και επιτάχυνσης, προτείνεται να είναι:

Επιταχυνσιόμετρα Episensor FBA ES-T της KINEMATRICS ή GURALP ή Tokyo Sokki ή αναλόγου με τις ίδιες ευαισθησίες ( $< 1\text{mg}$ ), μέγιστου εύρους  $\pm 2\text{g}$ .

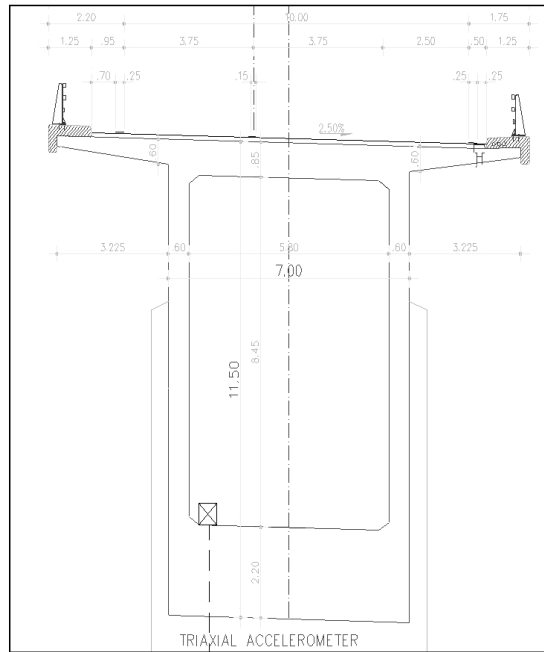
Μετακινήσιόμετρα- Αρμόμετρα ENCARDIO ή Tokyo Sokki ή SOIL ή αναλόγου με τις ίδιες ευαισθησίες

Παραμορφωσιόμετρα KM Strain Transducer τύπου KM -200A, KM -200AT δυναμικής καταγραφής παραμορφώσεων, μέγιστου εύρους τουλάχιστον 5000  $\mu\text{strain}$  ή αναλόγου με το ίδιο μέγιστο εύρος και ευαισθησία  $\leq 1 \mu\text{strain}$ .

Οι θέσεις τοποθέτησης στη γέφυρα Μετσόβου των επιταχυνσιόμετρων δίνονται στα Σχήματα 9.17 και 9.18. Ισχύουν και για τις γέφυρες Γ7, Γ8, ενώ στη γέφυρα Γ1 θα τοποθετηθεί ένα τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στον ένα από τους δύο προβόλους. Εκτός της γέφυρας Μετσόβου, στις υπόλοιπες γέφυρες θα τοποθετηθεί λόγω μικρότερου μήκους μόνον ένας τριαξονικός επιταχυνσιογράφος στη θεμελίωση του ενός εκ των μεσοβάθρων.



Σχήμα 9.17. Διάταξη αισθητήρων/καταγραφικών επιτάχυνσης στον φορέα της γέφυρας Μετσόβου



Σχήμα 9.18. Θέση στη διατομή της γέφυρας (τοποθέτηση εναλλάξ, δεξιό αριστερό άκρο του κάτω πέλματος)

#### 9.6.1. Εφαρμογή ενοργάνωσης με επιταχυνσιόμετρα - επιταχυνσιογράφους.

1. Τα τριαξονικά ή μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα θα τοποθετηθούν βιδωτά σε θέσεις που δεν αναμένεται να υποβάλλονται σε τοπικές ταλαντώσεις (π.χ. εγκάρσια ταλάντωση άνω πέλματος, πτερυγισμός προβόλου άνω πέλματος κ.τ.λ.).
2. Προτείνεται η τοποθέτησή των επιταχυνσιομέτρων στο κάτω πέλμα των κιβωτιοειδών φορέων σε θέσεις όπου δεν αναμένεται κόμβος κάποιας ιδιομορφής, σύμφωνα και με τα σχέδια 5, 6. Συγκεκριμένα προτείνεται να τοποθετηθεί ένα τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στον αριστερό πρόβολο M3, σε απόσταση  $0,3 L_{M2M3} = \sim 60m$  από τον άξονα του βάθρου M3, και ένα τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στον αριστερό πρόβολο M2, σε απόσταση  $0,3 L_{M1M2} = \sim 40m$  από άξονα του βάθρου M2.
3. Οι άξονες X, Y θα είναι παράλληλοι στο διαμήκη και στον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας, αντίστοιχα.
4. Τα επιταχυνσιόμετρα θα τοποθετούνται από τον προμηθευτή, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των αισθητήρων και θα ρυθμίζονται κατάλληλα για να λειτουργούν στη διεύθυνση που πρέπει (για τα κατακόρυφα μονοαξονικά)
5. Η τοποθέτηση των δύο τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων θα γίνει αμέσως μετά την ολοκλήρωση των σχετικών σπονδύλων, στο κάτω πέλμα τους.
6. Τα καλώδια σύνδεσης αισθητήρων – καταγραφικού θα «τρέχουν» στο εσωτερικό του κιβωτίου, σε μία πολυκαναλική καταγραφική μονάδα σε θέση στο άνοιγμα M2M3 κατάλληλη για την μείωση του μήκους των καλωδίων. Ανάλογα με τον τύπο των οργάνων που θα προμηθευτούν, θα εξετασθεί και η δυνατότητα ηλεκτροεπιταχυνσιομέτρων τα οποία θα καταγράφονται από κοινού με τα υπόλοιπα αισθητήρια.
7. Αποθήκευση των καλωδίων σε μέρος που είναι ξηρό και ασφαλές από τρωκτικά και άλλες πιθανές αιτίες καταστροφής.
8. Προστασία του καλωδίου από εγκοπές και κοψίματα. Αποφυγή έλξης του καλωδίου για να ελευθερωθεί από εμπόδια.
9. Το ελεύθερο άκρο του καλωδίου να συνδέεται με αδιάβροχο συνδετήρα. Αν το τελείωμα του καλωδίου με γυμνό σύρμα είναι επαρκές, να προστατεύεται η άκρη του από την υγρασία.

10. Σήμανση των καλωδίων για γρήγορη αναγνώριση αργότερα. Τοποθετήστε αναγνωριστικά νούμερα με μία ανθεκτική, αδιάβροχη ταινία ή χρησιμοποιήστε ταινία για χρωματική κωδικοποίηση. Σημαδέψτε την άκρη του καλωδίου τρεις φορές σε διαστήματα του ενός ποδιού τουλάχιστον, κατόπιν σημαδέψτε το υπόλοιπο του καλωδίου ανά διαστήματα των 6 ή 10 ποδιών, ή όπως ορίζεται. Αν το καλώδιο κοπεί ή είναι ματισμένο, σημαδέψτε το άκρο τρεις φορές όπως παραπάνω.
11. Αν το σύστημα αναγνώρισης που επιλέξατε διαφέρει από το σύστημα αναγνώρισης του οργάνου που χρησιμοποιείται στα μηχανολογικά σχέδια, σημειώστε τις διαφορές στα σημειωματάρια του εργοταξίου και στα σχετικά σχέδια.
12. Δημιουργείστε ένα αρχείο της θέσης του κάθε επιταχυνσιόμετρου και του καλωδίου με το οποίο συνδέεται.
13. Οι μετρήσεις που πρέπει να λαμβάνονται κατ' ελάχιστον είναι οι ακόλουθες:
  - a. Αρχική μέτρηση με την τοποθέτηση από τον έμπειρο προμηθευτή των οργάνων.
  - b. Μέτρηση των παραμορφώσεων αμέσως πριν και μετά την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης επόμενων σπονδύλων.
  - c. Μέτρηση των επιταχύνσεων του προβόλου πριν και μετά την επιβολή της προέντασης και του ίδιου βάρους των επόμενων σπονδύλων.
  - d. Μετρήσεις μεταξύ όλων των διαδοχικών φορτίσεων.
  - e. Μέτρηση κατά την μετακίνηση των φορέων της προβολοδόμησης.
  - f. Μέτρηση των επιταχύνσεων μετά την κατασκευή της κλειδας, συγχρονισμένα από τα δύο τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα.
  - g. Μέτρηση επιταχύνσεων σε κυκλοφορία.
  - h. Μέτρηση επιταχύνσεων με την ολοκλήρωση του φορέα

### 9.6.2. Μεθοδολογία, συχνότητα και διάρκεια μετρήσεων επιτάχυνσης γεφυρών

Βάσει της εμπειρίας που απέκτησε η ΕΟΑΕ την τελευταία πενταετία, μέσω της ενοργάνωσης και συστηματικής παρακολούθησης ταλαντώσεων δύο αντιπροσωπευτικών γεφυρών, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα, όπως αποτυπώνονται στους ακόλουθους πίνακες:

Πίνακας 9.3. Δυνατότητες αναγνώρισης ιδιομορφών αναλόγως της φόρτισης

Φόρτιση	Μόνιμη παρακολούθηση εγκατεστημένου δικτύου επιταχυνσιόμετρων	Περιοδική/έκτακτη παρακολούθηση κινητού δικτύου επιταχυνσιόμετρων	Διάρκεια μετρήσεως	Συχνότητα λήψης μέτρησης	Όγκος δεδομένων
Κυκλοφορία οχημάτων	√	√	5-30 λεπτά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 φορά/2χρόνια</li> <li>• κάθε φορά που ξεπερνιέται ένα όριο (της τάξης των 2 – 10mg)</li> <li>• μετά από σεισμό</li> </ul>	5 – 30Mb
Ανεμοπίεση	√	-	-	Κάθε φορά που ξεπερνιέται ένα όριο	0,2 – 1Mb
Σεισμός	√	-	σε δεκάδες sec	Κάθε φορά που ξεπερνιέται ένα όριο (σε mg ή δεκάδες mg)	0,2 – ,5Mb
Μετασεισμός	√	√	σε δεκάδες sec	-	0,2 – ,5Mb

Πίνακας 9.4. Δυνατότητες αναγνώρισης αναλόγως της διάταξης και της μεθόδου μέτρησης

Αναγνώριση	Μόνιμη παρακολούθηση ενός εγκατεστημένου τριαξονικού επιταχυνσιόμετρο υ	Μόνιμη παρακολούθηση πυκνού δικτύου εγκατεστημένων επιταχυνσιόμετρο ν	Περιοδική Παρακολούθηση ενός φορητού τριαξονικού επιταχυνσιόμετρο υ	Περιοδική Παρακολούθηση Δύο τουλάχιστον φορητών τριαξονικών επιταχυνσιόμετρο ν
Ιδιοσυχνότητες	√ *	√**	√*	√**
Ποσοστά απόσβεσης	√*	√**	√*	√**
Ιδιομορφές	-	√**	-	√**

\* Πολλές από τις αναγνωρίσιμες ιδιομορφικές τιμές

\*\* Όλες τις αναγνωρίσιμες ιδιομορφικές τιμές

Πίνακας 9.5. Φθορές / ζημιές που είναι δυνατόν να διαγνωσθούν με τη δυναμική παρακολούθηση (αναγνώριση ιδιομορφών/ αναθεώρηση δυναμικού μοντέλου)

Φθορά/ Ζημιά/ Αλλαγή	Έντονη ρηγμάτωση σκυροδέματος	Σοβαρή απώλεια προέντασης	Πλαστικές Αρθρώσεις Άκρων βάρων	Σκλήρυνση αστοχία εφεδράνων	Μεταβολή Μάζας Μέτρου ελαστικότητας	Μεταβολή Συνθηκών πάκτωσης
Παρακολούθηση ταλαντώσεων κυκλοφορίας (AMBIENT)	√ *	√*	√*	√**	√**	√**
Παρακολούθηση σεισμικών ταλαντώσεων	-	-	√	√	-	-
Διεγέρτης	√**	√**	√**	√**	√**	√**

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abe, M., Fujino, Y., Kajikura, T., Yanagihara, M., and Sato, M., (1999). *Monitoring of a Long Span Suspension Bridge by Ambient Vibration Method*,. Structural Health Monitoring, Technomic Publication, Lancaster, PA., USA, pp.400-407.
- Agarwal, A.C., (1990). *Load Testing of New Concrete Bridge Deck Slabs*,. Developments in Short and Medium Span Bridges .90, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Québec, Canada, pp. 277-289.
- Aktan, A.E., Tsikos, C.J., Catbas, F.N., Grimmelsman, K., and Barrish, R. (1999). *Challenges and Opportunities in Bridge Health Monitoring*,. Proceeding of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, pp.461-473.
- Ali, A., Bakht, B., and Schaefer, J., (1997). *Design and Construction of a Steel-free Deck Slab in Ontario*,. Proceedings, CSCE Annual Conference, Vol. 6, pp. 81-90.
- Azarnejad, A., Mayne, D., and Brown, T.G., (1999). *Ice Dynamics and Load Measurements*,.Proceedings of OMAE99, 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, St. John.s, Newfoundland, Canada.
- Bakht, B., (1981). *Testing of the Manitou Bridge to Determine its Load Carrying Capacity*,.Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 8(2).
- Bakht, B., (1988). *Testing of an Old Short Span Slab-on-girder Bridge*,. Structures Research Report SRR-88-01, Ministry of Transportation of Ontario, Canada.
- Bakht, B., Billing, J.R., and Agarwal, A.C., (1992). Discussion of "Wheel Loads from Highway Bridge Strains: Field Studies." ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 116 (9).
- Bakht, B., and Csagoly, P.F.,( 1979). Bridge Testing. *Structures Research Report 79-SRR-10*,. Ministry of Transportation of Ontario, Canada.
- Bakht, B., and Csagoly, P.F., (1980). *Diagnostic Testing of a Bridge*,. ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 106 (7).
- Bakht, B., and Jaeger, L.G., (1987). *Behaviour and Evaluation of Pin-connected Steel Truss Bridges*,. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 14(3).
- Bakht, B., and Jaeger, L.G., (1990). *Observed Behaviour of a New Medium Span Slab-on-girder Bridge*,. Journal of the Institution of Engineers (India).
- Bakht, B., and Mufti, A.A., (1998). *Five Steel-free Deck Slabs in Canada*,. Structural Engineering International, Vol. 8(3), pp. 196-200.
- Bakht, B., and Mufti, A.A., (1999). *Testing of Two Shear-connected Concrete Plank Bridges*,. Technical Report of JMB Structures Research Inc., submitted to BC Ministry of Forests.
- Bakht, B., and Mufti, A.A., (1992a). *Behaviour of a Steel Girder Bridge with Timber Decking*,. Structures Research Report SRR-92-02. Ministry of Transportation of Ontario, Canada.
- Bakht, B., and Mufti, A.A., (1992b). *Evaluation of a Deteriorated Concrete Bridge by Testing*,. Proceedings, 4th International Colloquium on Concrete in Developing Countries, held in Kingston, Jamaica, Canadian Society for Civil Engineering.
- Bakht, B., Mufti, A.A., and Francis, J., (1999). *Transverse Load Distribution in Sawn Timber Bridges*,. CSCE Annual Conference, Vol. I, pp. 61-71.
- Bakht, B., and Pinjarkar, S.J., (1990). *Review of Dynamic Testing of Bridges*,. Transportation Research Record 1223, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Biggs, J.M., and Suer, H.S., (1956). *Vibration Measurements on Simple-span Bridges*,.Highway Research Board Bulletin 124, Highway Research Board, Washington, D.C., USA.
- Cawley, P., and Adams, R.D. (1979). *The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies*,. Journal of Strain Analysis, Vol. 14, 49-57.



- Chang, F.-K., (1999) (Editor). *Structural Health Monitoring 2000 Workshop*,. Proceedings of the 2nd International Workshop, Stanford University, CA, USA.
- CHBDC, (2000). *Canadian Highway Bridge Design Code*, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., and Shevitz, D.W. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*,. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, Report No. LA 13070-MS.
- Erki, M.A., and Agarwal, A.C., (1995). *Strengthening of Reinforced Concrete Axial Members Using Fibre Composite Materials - a Survey*,. Proceedings, CSCE Annual Conference, Vol. II, pp. 565-574.
- Farrar, C.R, Baker, W.E., Bell, T.M., Cone, K.M., Darling, T.W., Duffey, T.A., Eklund, A., and Migliori, A. (1994). *Dynamic Characterization and Damage Detection in the I- 40 Bridge Over the Rio Grande*,. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, Report No. LA 12767-MS.
- Farrar, C.R., Duffey, T.A., Goldman, P.A., Jauregui, D.V., and Vigil, J.S. (1996a). *Finite Element Analysis of the I-40 Bridge Over the Rio Grande*,. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, Report No. LA 12979-MS.
- Farrar, C.R., and Jauregui, D. (1996b). *Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data from the I-40 Bridge*,. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, Report No. LA 13074-MS
- Fuller, A.H., Eitzen, A.R., and Kelly, E.F., (1931). *Impact on Highway Bridges*, Transactions ASCE, Vol. 95, Paper 1786.
- Mufti, A.A., Newhook, J.P., and Mahoney, M.A., (1999). *Salmon River Bridge Field Monitoring*,. Proceedings, CSCE Annual Conference, Vol. I, pp. 51-60.
- Newhook, J.P, Bakht, B., Tadros, G., and Mufti, A.A., (2000). *Design and Construction of a Concrete Marine Structure Using Innovative Technologies*,. ACMBS-III Conference Proceedings, Ottawa, pp. 777-784.
- Newhook, J.P., and Mufti, A.A., (1996). *A Reinforcing Steel-free Concrete Bridge Deck for the Salmon River Bridge*,. Concrete International, Vol. 18(6), pp. 30-34.
- OHBDC, (1992). *Ontario Highway Bridge Design Code*, Ministry of Transportation of Ontario, Downsview, Ontario, Canada.
- Stallings, J.M., Tedesco, J.W., El-Mihilmy, M., and McCauley, M., (2000). *Field Performance of FRP Bridge Repairs*,. ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 5(2), pp. 99-106
- Tennyson, R.C., and Mufti, A.A., (2000). *Monitoring Bridge Structures Using Fibre Optic Sensors*,. Proceedings of European COST F3 Conference on System Identification of Structural Health Monitoring, June 6-9, 2000, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain.
- Ventura, C.E., Felbar, A.J., and Stiemer, S.F., (1996). *Determination of the Dynamic Characteristics of the Colquitz River Bridge by Full-scale Testing*,. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23(2), pp. 536-548.
- Weznel, H., and Pichler, D., (1997). *Structural Assessment of Railway Bridges by Ambient Vibration Testing*,. Recent Advances in Bridge Engineering, Proceedings of US-Canada- Europe Workshop on Bridge Engineering, held in EMPA, Zurich, Switzerland, pp. 275-282.
- Καρακώστας Χ., Μάκρας Κ., Λεκίδης Β., και Κλήμης Ν. (2006), “Η Επίδραση των Τοπικών Εδαφικών Συνθηκών στη Σεισμική Διέγερση και η Δυναμική Απόκριση της Καλωδιωτής Γέφυρας του Ευρίπου”, *Πρακτικά 5ου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής*, Ξάνθη, Μάιος-Ιούνιος (CD-Rom)
- Ντότσιος Ε., Πέρρος Κ., Παπαδημητρίου Κ, Πανέτσος Π., Λεκίδης Β., Καρακώστας Χ., Σαλονικιός Θ., Μακάριος Τ., Σους Ι. (2008), “Αναθεώρηση Προσομοιωμάτων Γεφυρών της Εγνατίας Οδού με

Βάση την Απόκριση τους σε Δυναμικές Διεγέρσεις“, *Πρακτικά 3<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, 5–7 Νοεμβρίου, αρ. εργασίας 2018

Παπαδημητρίου Κ., Ντότσιος Ε., Νικολάου Ι. (2008), “Αναγνώριση Μοντέλων Κατασκευών βάσει Μετρήσεων των Ταλαντώσεων σε Περιβαλλοντικές και Σεισμικές Διεγέρσεις“, *Πρακτικά 3<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, 5–7 Νοεμβρίου, αρ. εργασίας 2017

Arici, Y. ,and Mosalam, K.M. (2005). "Modal Identification of Bridge Systems Using State Space Methods", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 12, pp. 381-404.

Karakostas Ch., Lekidis V., Salonikios T., Makarios T., Sous I., Papadimitriou C., Karamanos S., Christodoulou K. and Panetsos P. (2006), “Structural Identification of Bridges Based on Ambient Vibration Measurements”, *Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, September 3-8, (CD-Rom, paper no.1263).

Lekidis V.A., Karakostas C.Z., Christodoulou K., Karamanos S., Papadimitriou K. and Panetsos P. (2004), “Investigation of Dynamic Response and Model Updating of Instrumented R/C Bridges”, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, August 1-6, (in CD-ROM).

Lekidis V., Tsakiri M., Makra,K., Karakostas C., Klimis N., and Sous I. (2005), “Evaluation of Dynamic Response and Local Soil Effects of the Evripos Cable-Stayed Bridge using Multi-sensor Monitoring Systems”, *Engineering Geology*, Vol. 79, pp.43-59

Ntotsios E., (2008), “Experimental modal analysis using ambient and earthquake vibrations: Theory, Software and Applications”, MS Thesis Report No. SDL-08-1, *Department of Mechanical and Industrial Engineering*, University of Thessaly.

Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P., Karaiskos G., Perros K., Perdikaris F., (2008), “Bridge Health Monitoring system based on vibration measurements”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, submitted for publication.

Panetsos P., Lambropoulos S., Papadimitriou C., Karamanos S., Lekidis V., and Karakostas Ch. (2006), “Bridge Health Monitoring for Egnatia Odos Bridge Management System”., *Proceedings of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, Granada, Spain, July 5-7, (CD-Rom).

Papadimitriou C., Ntotsios E., Christodoulou K., Karamanos S., Panetsos P., Karakostas Ch., and Lekidis V. (2007), “Bridge monitoring system based on vibration measurements”, *Proceedings of Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2007)*, Rethymno, Greece, June 13-16, paper No. 1224.

Siringoringo, D.M., and Fujino, Y. (2006). "Observed Dynamic Performance of the Yokohama-Bay Bridge from System Identification using Seismic Records", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, pp. 226-244.

ΑΣΠΡΟΓΕ «Αντισεισμική Προστασία Γεφυρών» Ερευνητικό Πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από την ΓΓΕΤ 2004-2007.

Χ. Καρακώστας, Β. Λεκίδης, Κ. Παπαδημητρίου, Π. Πανέτσος, Ε. Ντόστιος, Θ. Σαλονικιός, Τ. Μακάριος, Ι. Νικολάου, Ι. Σους (2008), “Αποτίμηση Δυναμικών Χαρακτηριστικών Γεφυρών της Εγνατίας Οδού με Βάση την Απόκρισή τους σε Δυναμικές Διεγέρσεις”, Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου, 2008, εργασία Αρ. 2016 (CD-ROM) .