

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ  
ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ  
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗ  
ΓΕΦΥΡΑ ΡΙΟΥ – ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ**



ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

**Δρ. ΔΙΟΝΥΣΙΑ - ΠΗΝΕΛΟΠΗ ΚΟΝΤΟΝΗ**  
Αναπλ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι.

**Δρ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΡΟΣ**  
Πανεπ. Υπότροφος Τ.Ε.Ι.

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ:

**ΑΡΓΥΡΩ ΜΑΡΑΓΚΟΥ**

**ΦΩΤΕΙΝΗ ΧΟΥΛΙΑΡΑ**

**ΙΩΑΝΝΑ-ΤΖΟΑΝΝΑ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ**

**ΠΑΤΡΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2014**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία έρχεται να ολοκληρώσει την φοίτησή μας στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος (Τ.Ε.Ι.) Δυτικής Ελλάδας. Το αντικείμενο της μελέτης μας είναι η «Μελέτη των σύγχρονων τεχνικών ενόργανης παρακολούθησης κατασκευών και αναλυτική παρουσίαση της εφαρμογής τους στη γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου».

Στο σημείο αυτό θεωρούμε υποχρέωσή μας να ευχαριστήσουμε όλους όσους συνετέλεσαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της Πτυχιακής Εργασίας. Τα θερμά ευχαριστήριά μας θα θέλαμε να απευθύνουμε στην Επιβλέπουσα Καθηγήτρια Δρ. Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της. Επίσης, θερμά ευχαριστήρια απευθύνουμε και προς τον Επιβλέποντα Καθηγητή Δρ. Δημήτριο Μπάρο, κυρίως για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε, την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της Πτυχιακής Εργασίας, την καλή του διάθεση και τις εύστοχες παρατηρήσεις, που υπήρξαν κύριοι παράγοντες για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμη, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαιτέρως τον κ. Άκη Παναγή, για την ξενάγησή μας στην Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου και για το πολύτιμο υλικό που μας παρείχε, όπου αποτέλεσαν βασικό κομμάτι της εργασίας μας.

Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να μην απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας για την υποστήριξη, ηθική και υλική, που απλόχερα μας προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μας.

ΠΑΤΡΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2014

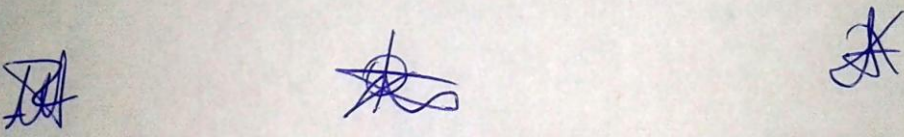
**ΑΡΓΥΡΩ ΜΑΡΑΓΚΟΥ**  
**ΦΩΤΕΙΝΗ ΧΟΥΛΙΑΡΑ**  
**ΙΩΑΝΝΑ-ΤΖΟΑΝΝΑ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εστιάζει στη μελέτη της ενόργανης παρακολούθησης τεχνικών έργων μετά την κατασκευή τους. Συγκεκριμένα, αναλύονται και παρουσιάζονται οι γενικές αρχές της ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών καθώς και τα σύγχρονα συστήματα δομικής παρακολούθησης των τεχνικών έργων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου «Χαρίλαος Τρικούπης», για την οποία αναπτύσσονται και παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες του συστήματος ενόργανης παρακολούθησης που διαθέτει, οι παράγοντες που σχετίζονται μαζί με αυτό και τον τρόπο λειτουργίας του υπό ισχυρά φαινόμενα, όπως ανέμους και σεισμούς και ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιούνται τα δεδομένα κατά το σχεδιασμό βελτιώσεων στην κατασκευή.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κείμενου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

**Οι σπουδάστριες:**



ΑΡΓΥΡΟ ΜΑΡΑΓΚΟΥ  
ΦΩΤΕΙΝΗ ΧΟΥΛΙΑΡΑ  
ΙΩΑΝΝΑ-ΤΖΩΑΝΝΑ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> :ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	7
1.2. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	8
1.3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	9
1.3.1. ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	9
1.3.2. ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	11
1.3.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	11
1.3.4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	12
1.3.5. ΔΙΑΓΝΩΣΗ.....	12
1.3.6. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	12
1.4. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΓΕΦΥΡΑ ΡΙΟΥ-ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ.....	13

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> :ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	15
2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ.....	15
2.2.1. ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ.....	16
2.2.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ.....	18
2.3 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΙ.....	20
2.3.1. ΕΙΔΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ.....	21
2.3.2. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ/ΣΤΕΡΕΩΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ.....	29
2.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	30
2.4.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	30
2.4.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	31
2.4.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	33
2.5 ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	35
2.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GPS.....	36
2.6.1. ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GPS.....	38
2.6.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GPS.....	38
2.6.3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ GPS ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ.....	39
2.6.4. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GPS ΩΣ ΣΕΙΣΜΟΓΡΑΦΟΣ.....	40

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> :ΓΕΦΥΡΑ ΡΙΟΥ ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ**

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
3.2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΤΟΥ.....	42
3.2.1. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.....	43
3.2.2. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	43
3.2.3. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ, ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	43
3.2.4. ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	44
3.2.5. ΑΡΧΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	44
3.2.6. ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (ΕΞΥΠΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ).....	45
3.2.7. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ.....	46
3.2.8. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ.....	47
3.3. ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΡΙΟΥ – ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ.....	47
3.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	47
3.3.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ.....	47
3.3.3. ΟΡΓΑΝΑ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥΣ.....	50
3.3.4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	55
3.3.5. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ.....	57
3.3.6. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	58
3.3.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΕΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	58

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΧΥΡΩΝ ΑΝΕΜΩΝ**

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	60
4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΥ.....	60
4.2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ.....	60
4.2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ.....	62
4.2.3 ΚΑΛΠΑΣΜΟΣ.....	64
4.2.4 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΒΡΟΧΗΣ.....	64
4.3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΙΣΧΥΡΟ ΓΕΓΟΝΟΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2006 .....	65
4.3.1 ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	66
4.3.2 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ.....	67
4.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΗΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ.....	68
4.4.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	68
4.4.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	70
4.5. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΙΣΧΥΡΟ ΓΕΓΟΝΟΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ 8 ΜΑΡΤΙΟΥ 2010.....	72
4.5.1 ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	73
4.5.2. ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ.....	74

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΑΧΑΪΑΣ-ΗΛΕΙΑΣ ΤΟ 2008 ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ**

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	76
5.2. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	77
5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ.....	78
5.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ.....	80
5.5. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	81
5.5.1. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ.....	81
5.5.2. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΣΤΟΝ ΠΥΛΩΝΑ.....	82
5.5.3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ .....	83
5.5.4. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑ ΚΑΛΩΔΙΑ.....	84
5.5.5. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ .....	84
5.5.6. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ CCTV.....	84
5.6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ.....	91
5.6.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΤΑΣΗΣ.....	88
5.6.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	89
5.7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ.....	90
5.7.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΠΥΛΩΝΕΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ .....	91
5.7.2. ΘΕΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	91
5.8. ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	91
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>93</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>95</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 1.1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η παρακολούθηση δομικής κατάστασης είναι ένας σχετικά νέος όρος για τις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού, και ο όρος αυτός θα πρέπει να ορισθεί σαφέστερα. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, η παρακολούθηση δομικής κατάστασης θα ορισθεί τόσο βάσει του αντικειμένου της όσο και βάσει του καταγραφικού του συστήματος και των αισθητήρων που απαιτούνται για την επίτευξη αυτού του αντικειμένου. Η εργασία αναφέρεται σε όλες τις κατασκευές αντικειμένου Πολιτικού Μηχανικού, αλλά υπάρχουν και πρόσθετες πληροφορίες που αφορούν ειδικότερα τεχνικά έργα, όπως, κυρίως, η γέφυρα Ρίου - Αντιρρίου «Χαρίλαος Τρικούπης», λόγω της ιδιαίτερης αύξησης του αριθμού και της σπουδαιότητας τους τα τελευταία χρόνια στον Ελληνικό χώρο.

Το αντικείμενο της ενόργανης παρακολούθησης δομικής κατάστασης είναι να καταγράψει την επί τόπου συμπεριφορά μιας κατασκευής συνέχεια και με ακρίβεια, να εκτιμήσει την επιτελεσματικότητά της υπό διάφορα φορτία λειτουργίας, να ανιχνεύσει βλάβες ή φθορές και να προσδιορίσει την κατάσταση ή τις παθήσεις της κατασκευής. Το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης δομικής κατάστασης θα πρέπει να παρέχει, αναλόγως με τις απαιτήσεις, αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια και την ακεραιότητα της κατασκευής. Κατόπιν οι πληροφορίες θα πρέπει να ενσωματώνονται στις στρατηγικές συντήρησης και διαχείρισης των έργων και στην έκδοση βελτιωμένων οδηγιών σχεδιασμού. Η αμεσότητα και η ευαισθησία της παρακολούθησης δομικής κατάστασης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει σε σύντομο χρόνο τη πιστοποίηση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού, την κατανομή των πόρων και μέσων, την κατά το δυνατό μικρότερη, χρονικά, διακοπή λειτουργίας και το μειωμένο κόστος συντήρησης. Το φυσικό διαγνωστικό εργαλείο της ενόργανης παρακολούθησης κατασκευών συντίθεται από ένα ολοκληρωμένο σύνολο διαφόρων διατάξεων μετρήσεων (καταγραφικών συσκευών και συστημάτων), όπως [1]:

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

Παρόλα αυτά, η χρήση οργάνων για την αποτίμηση της δομικής κατάστασης (π.χ. ακεραιότητα των κατασκευών) δεν είναι πρόσφατος όρος. Οι δοκιμές γεφυρών επί τόπου μέσω της χρήσης διαφόρων μετρητικών οργάνων είναι μία δραστηριότητα που εφαρμόζεται εδώ και πολλές δεκαετίες. Παρομοίως, τα βασικά όργανα που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα παρακολούθησης δομικής κατάστασης 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης είναι συμβατοί με τους στόχους πολλών από αυτές τις (για πολλά χρόνια) εφαρμοζόμενες τεχνικές. Με την ανάπτυξη της παρακολούθησης δομικής κατάστασης, βελτιώνονται οι συνήθειες 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης προέρχεται από την αναγνώριση των περιορισμών των συμβατικών οπτικών επιθεωρήσεων και αποτιμήσεων με τη 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης 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.

## 1.2. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Για περισσότερη ευκολία στην περιγραφή, ένα σύστημα παρακολούθησης δομικής κατάστασης υποδιαιρείται στα ακόλουθα τέσσερα υποσυστήματα [1]:

- Στατικές δοκιμές της κατασκευής
- Δυναμικές δοκιμές της κατασκευής
- Περιοδική παρακολούθηση
- Συνεχής παρακολούθηση

Όπως και κάθε μέθοδος, έτσι και η ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης των κατασκευών έχει τα πλεονεκτήματά της. Με τα συστήματα αυτά εκτός από την ανίχνευση βλαβών σε μία κατασκευή είναι δυνατός και ο καθορισμός της αντοχής της κατασκευής και η διακρίβωση πιθανής εμφάνισης βλάβης. Προκειμένου να παραμείνουμε ανταγωνιστικοί στο υπάρχον παγκόσμιο οικονομικό περιβάλλον, είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθούν οι διακοπές λειτουργίας κατασκευών αντικειμένου 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης βοηθά τους μηχανικούς να αντιμετωπίζουν επιτυχώς τέτοιου τύπου ζητήματα. Μέσω της παρακολούθησης και της αποτίμησης της ακεραιότητας μεγάλων κατασκευών, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων που διατίθενται για επισκευή, αποκατάσταση ή αντικατάσταση των κατασκευών. Με την παρακολούθηση αυτή είναι δυνατή η εκτίμηση του κόστους του κύκλου ζωής των στοιχείων της κατασκευής.

Τα δυνατά άμεσα οφέλη από την χρήση ενός συστήματος παρακολούθησης δομικής κατάστασης είναι [1]:

- Παρακολούθηση και αναφορά σε πραγματικό χρόνο
- Μείωση χρόνου διακοπής λειτουργίας
- Βελτίωση της ασφάλειας και αξιοπιστίας και μείωση του κόστους συντήρησης

Όπως αναφέρθηκε και από τον Chang [2], 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 παρακολούθηση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση του σχεδιασμού μελλοντικών κατασκευών.

### 1.3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Ένα ιδεατό σύστημα παρακολούθησης δομικής κατάστασης 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 μια 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης αποτελούνται από ένα πλήθος επιμέρους συνόλων. Οι ενέργειες που πρέπει να εξυπηρετούνται αφορούν [1]:

- Την συλλογή των δεδομένων
- Την επικοινωνία των δεδομένων
- Την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων
- Την αποθήκευση των επεξεργασμένων δεδομένων
- Την διάγνωση
- Την ανάκτηση των δεδομένων

Αυτά τα επιμέρους σύνολα θα τα δούμε πιο αναλυτικά στις παρακάτω ενότητες.

#### 1.3.1. Συλλογή των δεδομένων

Η πρώτη επιμέρους ενότητα σε ένα σύστημα παρακολούθησης δομικής κατάστασης περιλαμβάνει την συλλογή των δεδομένων. Το πρώτο μέρος σε αυτή την επιμέρους ενότητα αφορά την προετοιμασία σχεδίου για την εγκατάσταση διαφόρων αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να μετρούν απόλυτες τιμές ή μεταβολές ενός από τα παρακάτω [1]:

- Ανοιγμένες επιμηκύνσεις
- Παραμορφώσεις
- Επιταχύνσεις
- Θερμοκρασίες
- Υγρασία
- Ακουστικές εκπομπές (περιβαλλοντικές διεγέρσεις)
- Χρόνο
- Ηλεκτρικό δυναμικό
- Φορτίσεις
- Άλλα χαρακτηριστικά της κατασκευής

Οι αισθητήρες επιλέγονται ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη πληροφορία σχετικά με τη δομική κατάσταση της κατασκευής. Στο εμπόριο διατίθεται σημαντικός αριθμός αισθητήρων διαφόρων τύπων. Συγκεκριμένα διατίθενται μηχανοσκόπετρα ηλεκτρικής Οαντίστασης και άλλων τύπων, μετρητές μετατοπίσεων και αποκλίσεων, επιταχυνσιόμετρα, ανεμόμετρα, μετρητές παραμορφώσεων με οπτικές ίνες κ.α. Οι αισθητήρες αυτοί και οι ιδιότητές τους αποτελούν το θέμα του επόμενου κεφαλαίου της εργασίας. Πολλοί από αυτούς

τους αισθητήρες δεν είναι κατάλληλοι για όλους τους πιθανούς στόχους ενός συστήματος παρακολούθησης δομικής κατάστασης. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι μερικά από τα μηκυσιόμετρα που διατίθενται στο εμπόριο δεν είναι κατάλληλα για παρακολούθηση κατασκευών για μακρύ χρονικό διάστημα επειδή μετά από κάποιο χρονικό σημείο εμφανίζουν παραμόρφωση διαφορετική από αυτή του μετρούμενου στοιχείου. Ένα μηκυσιόμετρο 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 μακρύ 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. Αναπτύσσονται επίσης αισθητήρες από οπτικές ίνες μήκους από 1 έως 20m για την χρήση τους ως μηκυσιόμετρα για τον έλεγχο της αποδοτικότητας σύνθετων υφασμάτων στην επισκευή φθαρμένων υποστρωμάτων κ.α.. Τα μηκυσιόμετρα 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 λιγότερο κόστος για μια ευρεία εφαρμογή σε κατασκευές αντικειμένου πολιτικού μηχανικού.

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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης. 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 τη 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 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 των 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 καταγραφή να ζητείται όταν ξεπεραστεί κάποια μέγιστη τιμή. Η επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου καταγραφής είναι πολύ σημαντικό στοιχείο της μεθόδου παρακολούθησης δομικής κατάστασης κατασκευών καθώς με αυτό τον τρόπο επηρεάζεται σαφώς ο όγκος δεδομένων αλλά και η διαγνωστική πληροφορία που μπορεί να ζητηθεί από αυτές. Οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου, το τεχνικό έργο στο οποίο εστιάζει η εργασία, παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιό της, όπου παρέχονται στοιχεία που προέκυψαν από την επί τόπου επίσκεψη και επιθεώρηση των κυρίων μερών του συστήματος δομικής παρακολούθησης του έργου από τις συντάκτριες της παρούσης.

Το σύνηθες μέσο για τη 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 εξασφαλισθεί ότι το μήκος του καλωδίου βρίσκεται εντός των ορίων συμβατότητας με το σύστημα καταγραφής δεδομένων. Η γειτνίαση 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.

### **1.3.2. Επικοινωνία των δεδομένων**

Εδώ με τον όρο «επικοινωνία 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης.

### **1.3.3. Επεξεργασία των δεδομένων**

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται από τους αισθητήρες περιέχουν και εξωγενείς πληροφορίες, οι οποίες δεν είναι μόνο άχρηστες αλλά και η αποθήκευσή τους θεωρείται μη οικονομική. 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 καθαριστούν 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 παρακολούθησης δομικής κατάστασης. Για παράδειγμα, μια γέφυρα ενδέχεται να παρακολουθείται με την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών, ποτενσιόμετρων, 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 μια πιο προχωρημένη επεξεργασία τα δεδομένα διορθώνονται για θερμικά φαινόμενα. Μερικοί αισθητήρες ενδέχεται να είναι θερμικά ουδέτεροι ενώ η λειτουργία

άλλων αισθητήρων να βασίζεται σε μηκυσιόμετρο 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.

#### **1.3.4. 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 επιτρέψει 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 να 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 μια 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 τους κυρίους μεγάλων κατασκευών. Είναι πολύ πιθανό η έλλειψη πρόβλεψης για συνέχιση των μετρήσεων να καταστήσει τα δεδομένα άχρηστα για μελλοντικές γενιές. Από την άλλη, με την απώλεια των δεδομένων χάνεται και η ευκαιρία για μελλοντική επανερμηνεία τους.

#### **1.3.5. Διάγνωση**

Το πιο σημαντικό στάδιο σε ένα σύστημα παρακολούθησης δομικής κατάστασης σχετίζεται με τη διάγνωση ή την ερμηνεία των δεδομένων που συλλέχθηκαν και φιλτραρίστηκαν. Σε αυτό το στάδιο της παρακολούθησης δομικής κατάστασης 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 διαγράμματα φασματικής πυκνότητας συναρτήσεως 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.

#### **1.3.6. 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 ερμηνευτική 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.α. 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.

#### 1.4. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΓΕΦΥΡΑ ΡΙΟΥ - ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ

Πέραν από τη λεπτομερή παρουσίαση των συσκευών και των γενικών αρχών λειτουργίας των συστημάτων ενόργανης παρακολούθησης σημαντικών τεχνικών έργων, η παρούσα εργασία εστιάζει στο σύστημα που έχει χρησιμοποιηθεί στη Γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου και στα έως τώρα αποτελέσματα της λειτουργίας του.

Τη γεφύρωση των τριών χιλιομέτρων που χωρίζουν το Ρίο από το Αντίρριο, οραματίστηκε πριν από περίπου εκατό χρόνια ο τότε Πρωθυπουργός της Ελλάδας, Χαρίλαος Τρικούπης (Εικ. 1.1). Γεννημένος στο Μεσολόγγι, οραματίστηκε την ένωση της περιοχής του με την Αχαΐα, και μίλησε για αυτό στο Κοινοβούλιο. Ωστόσο, η κατασκευή του έργου αυτού δεν ήταν τεχνικά εφικτή μέχρι τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το 2004, το μεγαλόπνοο αυτό όραμα έγινε πραγματικότητα, παίρνοντας το όνομα του εμπνευστή της.



**Εικόνα 1.1.** Χαρίλαος Τρικούπης [3]

Η γέφυρα “Χαρίλαος Τρικούπης” αποτελεί ορόσημο της Ελλάδας του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Η μόνιμη αυτή σύνδεση με τη γέφυρα εξασφαλίζει τη μείωση του χρόνου διέλευσης στα 5 λεπτά, η οποία γίνεται με άνετες και ασφαλείς συνθήκες υψηλού επιπέδου και βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών. Είναι η μεγαλύτερη σε μήκος καλωδιωτή γέφυρα πολλαπλών ανοιγμάτων στον κόσμο, με συνεχές και πλήρως αναρτημένο κατάστρωμα 2.252 μέτρων. Τα θεμέλια της βρίσκονται σε βάθος θαλάσσης που φτάνει μέχρι και τα 65 μέτρα. Τόσο αυτό όσο και η διάμετρος των θεμελίων που ανέρχεται σε 90 μέτρα, αποτελούν παγκόσμια ρεκόρ για γέφυρα.

Επίσης, η γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου έχει τιμηθεί από τη Διεθνή Επιστημονική Κοινότητα με 9 Διεθνή Βραβεία από τα οποία ξεχωρίζουν τα εξής [3]:

- Βραβείο Εξέχουσας Δομής 2006 της Διεθνούς Ένωσης Γεφυροποιίας & Δομικών Έργων (IABSE)

- Βραβείο Εξεχόντων Δομικών Έργων 2006 της Διεθνούς Ομοσπονδίας Σκυροδέματος (fib)
- Μέγα Βραβείο Εξεχόντων Επιτευγμάτων Έργων Πολιτικού Μηχανικού της Αμερικανικής Εταιρείας Πολιτικών Μηχανικών (ASCE) 2005 [απονέμεται για πρώτη φορά σε έργο εκτός Η.Π.Α.]

Περαισότερες λεπτομέρειες για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του μεγάλης σημασίας τεχνικού έργου παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

#### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Οι ενόργανες μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών ανήκουν στην κατηγορία των μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου υφιστάμενων κατασκευών. Σε αρκετές κατασκευές, οι οποίες έχουν υποστεί ήδη σημαντικές παραμορφώσεις ή, λόγω του σχεδιασμού και της χρήσης τους, αναμένεται να υφίστανται συνεχείς παραμορφώσεις απαιτείται όχι μόνον ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων αλλά και η παρακολούθηση της εν χρόνο εξέλιξής τους. Η γνώση της εξέλιξης των παραμορφώσεων δεν καθοδηγεί μόνο στην αναζήτηση των αιτιών τους, αλλά και παρέχει πληροφορίες για την μελλοντική ασφάλεια της κατασκευής υπό φορτία λειτουργίας. Στοιχεία για τις παραμορφώσεις μιας κατασκευής απαιτούνται και όταν επίκειται αλλαγή χρήσης που θα έχει ως αποτέλεσμα σοβαρή ανακατανομή της θέσης και του μεγέθους των φορτίων.

Υπάρχει σήμερα διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία συσκευών παρακολούθησης και καταγραφής των παραμορφώσεων από απλά μηκυνσιόμετρα έως πολύπλοκες συσκευές laser, οι οποίες αναλόγως του αν χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μακροχρονίων ή παροδικών φορτίσεων παρουσιάζουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους.

Οι παραμορφώσεις οι οποίες μπορούν να καταγραφούν σε μια κατασκευή είναι :

- Μακροχρόνιες παραμορφώσεις (προκαλούμενες από φορτίσεις που θεωρούνται μόνιμες και στατικές).
- Παραμορφώσεις που προέρχονται από παροδικά φορτία, δυναμικά (σεισμός ή άνεμος) ή «κινητά» φορτία λειτουργίας (π.χ. φορτία κυκλοφορίας σε μία γέφυρα).

Τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για καταγραφή παραμορφώσεων είναι:

- Ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα
- Επιταχυνσιογράφοι
- Αισθητήρες οπτικών ινών
- Γραμμικοί Μεταβλητοί Διαφορικοί Μετασχηματιστές (LVDT) και δυναμοκυψέλες (χρησιμοποιούνται κατά κανόνα για καταγραφή δυνάμεων και τάσεων).
- Συστήματα γεωγραφικού προσδιορισμού της θέσης – GPS.7

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά, οι αρχές λειτουργίας των παραπάνω συσκευών και ο τρόπος που ολοκληρώνονται και χρησιμοποιούνται στα συστήματα ενόργανης παρακολούθησης σημαντικών τεχνικών έργων.

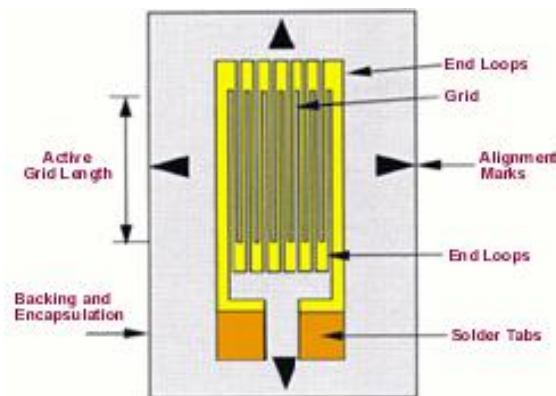
#### 2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως για την καταγραφή παροδικών μεταβολών παραμορφώσεων. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση

μακροχρόνιων παραμορφώσεων, διότι οι μετρητές καταστρέφονται μετά από μεγάλη περίοδο αδράνειας.

Με τη βοήθεια των ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η παραμόρφωση που προκαλείται από μια μηχανική καταπόνηση, με μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντιστάσεως ενός αγωγού που αποτελεί το κύριο μέρος του οργάνου, που επικολλάται κατάλληλα στον καταπονούμενο φορέα.

Από την παραπάνω σύντομη περιγραφή καθίσταται σαφές ότι το ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο αποτελείται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1, από ένα επίπεδο έλιγμα ειδικού αγωγού που στερεώνεται κατάλληλα πάνω σε ένα φύλλο χαρτιού ή πλαστικού που καλείται θήκη ή φορέας του μηκυνσιομέτρου και επικολλάται στο φορέα για τον οποίο ζητείται η μέτρηση της παραμόρφωσης.

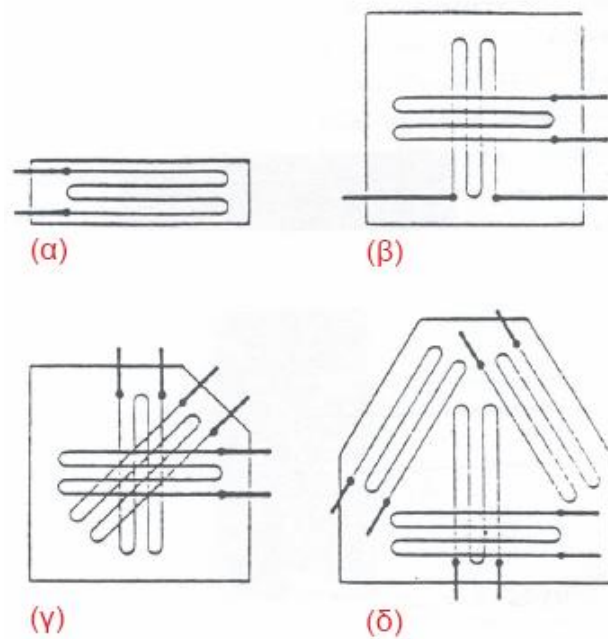


Εικόνα 2.1. Σχηματική αναπαράσταση μηκυνσιομέτρου. [4]

### 2.2.1. Μορφές και αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων.

Η απλούστερη μορφή ενός ηλεκτρικού μηκυνσιομέτρου είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 2.2(α) και αποτελείται από το έλιγμα του αγωγού που καταλήγει σε δύο ακροδέκτες για τη σύνδεση με τους αγωγούς τροφοδοσίας ρεύματος. Με τη συγκεκριμένη μορφή μηκυνσιομέτρου είναι δυνατόν να μετρηθεί η παραμόρφωση σε ένα σημείο του φορέα κατά μία ορισμένη διεύθυνση μόνο. Υπάρχουν όμως και μηκυνσιόμετρα που μας επιτρέπουν τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης κατά διάφορες διευθύνσεις του ίδιου σημείου του φορέα. Αυτό επιτυγχάνεται προφανώς με διάταξη περισσότερων αγωγών (αντιστάσεων) σε διαφορετικές διευθύνσεις, δημιουργώντας τη διάταξη που είναι γνωστή και ως ροζέτα (Εικόνα. 2.2(β), (γ) και (δ)). Από τις μετρήσεις μιας ροζέτας μηκυνσιομέτρων είναι δυνατόν με απλούς υπολογισμούς να προκύψουν οι κύριες, μέγιστες τάσεις στο φορέα στο σημείο της μέτρησης.





**Εικόνα 2.2.** Διάφορες μορφές μηκυνσιόμετρων: (α) Απλό μηκυνσιόμετρο, (β) Ροζέτα με δύο κάθετα απλά μηκυνσιόμετρα, (γ) Ροζέτα τριών μηκυνσιόμετρων με διάταξη γωνίας 45°, (δ) Ροζέτα τεσσάρων μηκυνσιόμετρων με διάταξη γωνίας 60°. [4]

Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού μηκυνσιόμετρου βασίζεται στην εξαιρετικά απλή σχέση που έχει αποδειχθεί ότι συνδέει την αντίσταση ενός αγωγού με το μήκος του:

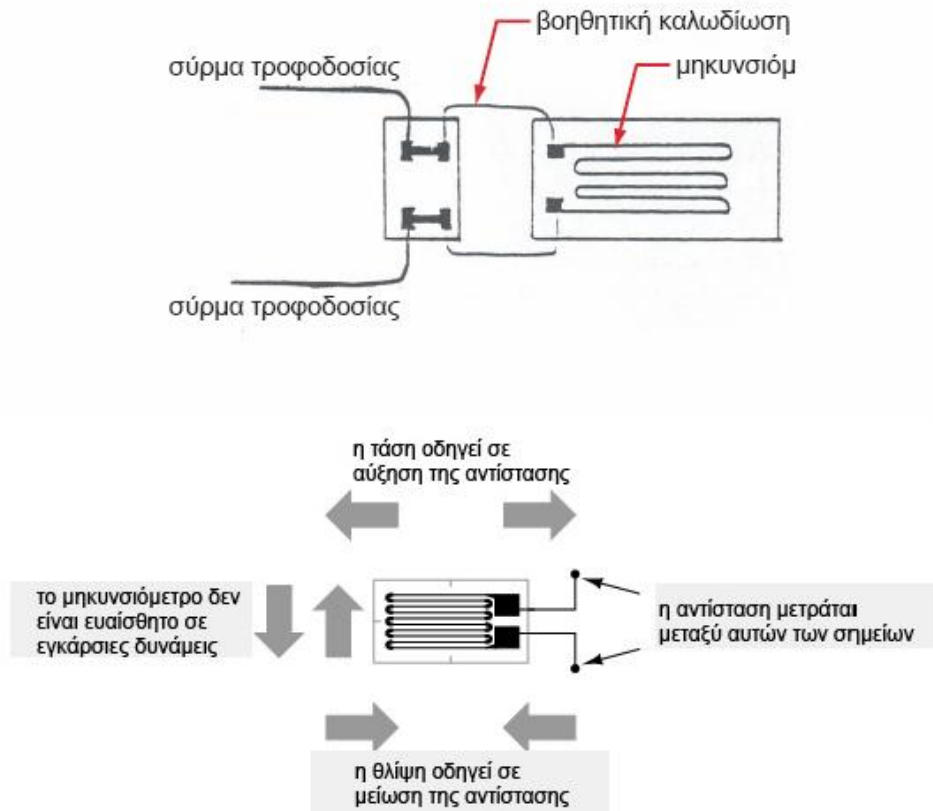
$$R = \rho \frac{l}{V} \quad (1)$$

όπου  $R$  η αντίσταση του αγωγού,  $l$  το μήκος του,  $\rho$  η ειδική αντίσταση του υλικού και  $V$  ο όγκος του αγωγού. Είναι εμφανές ότι η μεταβολή της αντίστασης του αγωγού είναι ανάλογη τις μεταβολής του μήκους του, καθώς τα υπόλοιπα μεγέθη στην Εξίσωση (1) παραμένουν σταθερά. Συνεπώς, μετρώντας τις μεταβολές της τάσης με την οποία τροφοδοτείται ένα μηκυνσιόμετρο που οφείλονται σε μεταβολές της αντίστασής του, πολύ εύκολα προκύπτουν οι διακυμάνσεις του μήκους του στις οποίες αντιστοιχούν που είναι ίσες με τις αντίστοιχες μεταβολές του μήκους, άρα και ενδεικτικές της παραμόρφωσης, του φορέα στον οποίο επικολλάται το μηκυνσιόμετρο. Η λειτουργία του μηκυνσιόμετρου που περιγράφεται παραπάνω παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.

Τελικώς για κάθε μηκυνσιόμετρο είναι γνωστή, ανάλογα με το υλικό κατασκευής της αντίστασης, μία σταθερά αναλογίας  $K$  η οποία συνδέεται με τις μεταβολές της αντίστασης με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = K \quad (2)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, γνωρίζοντας από την κατασκευή του οργάνου την τιμή του  $K$  και μετρώντας τη μεταβολή της αντίστασης προκύπτει άμεσα η ζητούμενη παραμόρφωση στο σημείο του φορέα που τοποθετείται το μηκυσιόμετρο.



**Εικόνα 2.3.** Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού μηκυσιομέτρου. [4]

### 2.2.2. Ιδιότητες των ηλεκτρικών μηκυσιομέτρων.

Τα ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα παρουσιάζουν μεταξύ τους ποσοτικές διαφορές κι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντιστάσεως που προκαλείται από την αντίστοιχη μεταβολή του μήκους είναι πολλές φορές μικρή σε σχέση με τη μεταβολή της αντιστάσεως που προκαλείται από άλλες αιτίες όπως π.χ. η μεταβολή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, η κακή τοποθέτηση κλπ.

Για την ορθή επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρικού μηκυσιομέτρου τρεις είναι οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

- Η θερμοκρασία λειτουργίας
- Η κατάσταση παραμόρφωσης, που περιλαμβάνει το αναμενόμενο μέγεθος, το εύρος και τη χρονική της μεταβολή.
- Οι απαιτήσεις τοποθέτησης του μηκυσιομέτρου.

Επίδραση επί των μετρήσεων μπορεί να έχουν επίσης και οι παρακάτω παράγοντες:

- Τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης κόλλας στερέωσης του μηκυνσιόμετρου.
- Ο αριθμός και ο τύπος των κύκλων φόρτισης
- Το μέγεθος των ασκούμενων τάσεων
- Τα χαρακτηριστικά του διερχόμενου ρεύματος
- Η συχνότητα της παραμόρφωσης
- Ο χρόνος
- Η υγρασία
- Η υδροστατική πίεση
- Τα μαγνητικά πεδία

Στη συνέχεια αναπτύσσονται ορισμένες μόνο από τις επιδράσεις που μπορεί να έχουν οι παραπάνω παράγοντες.

#### Θερμοκρασία:

Η μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει:

- Μεταβολή της ειδικής αντιστάσεως  $\rho$  του αγωγού του μηκυνσιόμετρου.
- Μεταβολή του μήκους του αγωγού
- Μεταβολή των διαστάσεων του φορέα (θήκης) του μηκυνσιόμετρου
- Μεταβολή των διαστάσεων του φορέα στον οποίο είναι εφαρμοσμένο το μηκυνσιόμετρο.

Το σφάλμα μετρήσεως που οφείλεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση ενός εντελώς ίδιου μηκυνσιόμετρου που κολλάτε με τις ίδιες συνθήκες σε ένα κομμάτι από το ίδιο υλικό που είναι και ο καταπονούμενος φορέας, τοποθετείται στον ίδιο χώρο και συνδέεται με καλώδια του αυτού τύπου και μήκους. Το μηκυνσιόμετρο αυτό λέγεται μηκυνσιόμετρο αντισταθμίσεως σε αντίθεση με το κύριο μηκυνσιόμετρο που λέγεται ενεργό. Η μεταβολή της αντιστάσεως του ενεργού μηκυνσιόμετρου οφείλεται στη φόρτιση, τη μεταβολή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, στις συνθήκες κολλησεως κλπ, ενώ η μεταβολή της αντιστάσεως του μηκυνσιόμετρου αντισταθμίσεως αφού δεν φορτίζεται οφείλεται σ' όλους τους άλλους παράγοντες εκτός από τη φόρτιση. Έτσι ο προσδιορισμός της μεταβολής που οφείλεται μόνο στη φόρτιση είναι εύκολος.

#### Υγρασία:

Η υγρασία μειώνει την πραγματική τιμή της αντιστάσεως  $R$ , μεταβάλλει τον όγκο της κολλητικής ουσίας και διαβρώνει τον αγωγό του μηκυνσιόμετρου και το φορέα. Για το λόγο αυτό, εάν είναι δυνατόν, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε χώρο ξηρό.

#### Τοποθέτηση:

Η τοποθέτηση του μηκυνσιόμετρου πάνω στο φορέα πρέπει να γίνει με μεγάλη σχολαστικότητα και να περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

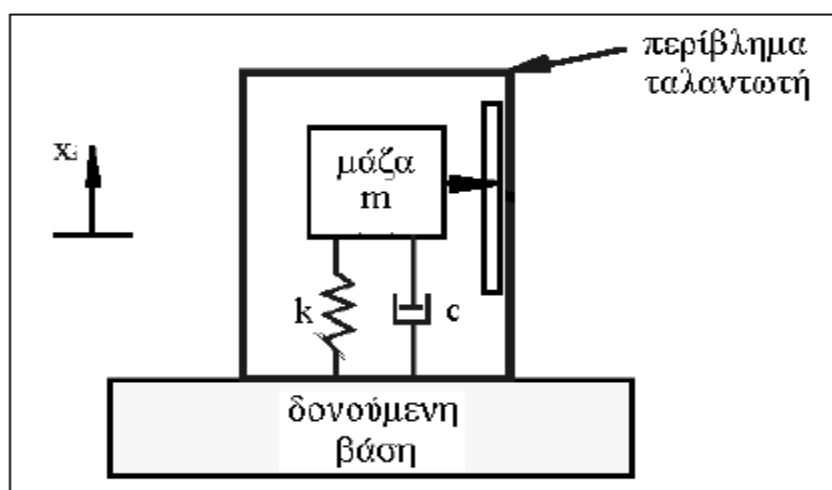
- Καθαρισμός της θέσης τοποθετήσεως. Αυτός γίνεται κατ' αρχήν με γυαλόχαρτο (μηχανικός καθαρισμός) και στη συνέχεια με χημικά μέσα όπως τολουόλιο, ακετόνη, βενζόλιο κλπ. (χημικός καθαρισμός)
- Κόλληση του μηκυνσιόμετρου. Η κόλλα έχει σαν σκοπό να μεταφέρει στο μηκυνσιόμετρο τις παραμορφώσεις του φορέα, γι' αυτό πρέπει να μη χαλαρώνει και να εφαρμόζεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Ξήρανση του μηκυνσιόμετρου (εάν είναι δυνατόν).
- Καλωδίωση. Η σύνδεση των άκρων του αγωγού του μηκυνσιόμετρου με τους αγωγούς συνδέσεως γίνεται με καθαρή κόλληση. Οι αγωγοί συνδέσεως πρέπει να

στερεώνονται μηχανικά, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος καταστροφής του μηκυσιόμετρου.

### 2.3. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΟΙ

Ο επιταχυνσιογράφος είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των επιταχύνσεων και στη συνέχεια για τον έμμεσο υπολογισμό διαφόρων χαρακτηριστικών (π.χ. συχνότητες) κατασκευών ή και του εδάφους κυρίως λόγω σεισμών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα, ή σε συνδυασμό με ένα σύστημα ανάκτησης δεδομένων. Οι επιταχυνσιογράφοι διατίθενται σε πολλές μορφές. Μπορούν να είναι στοιχεία μικρής πολυπλοκότητας, αισθητήρες προστατευόμενοι με εξωτερικό περίβλημα ή συστήματα αισθητήρων, με χαρακτηριστικά όπως δυνατότητα άθροισης καθώς και τοπικής ή απομακρυσμένης απεικόνισης και καταγραφής δεδομένων. Οι επιταχυνσιογράφοι μπορούν να έχουν από έναν μέχρι τρεις άξονες μετρήσεων (οι πολλαπλοί άξονες είναι κάθετοι μεταξύ τους).

Υπάρχουν πολλά είδη επιταχυνσιογράφων, όμως όλα τους έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας: μία μάζα διεγείρεται από αρμονική δύναμη και καταγράφεται η επιτάχυνσή της (Εικόνα 2.4). Σε αυτό που διαφέρουν είναι στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η καταγραφή των επιταχύνσεων. Το στοιχείο αυτό επηρεάζει τα όρια λειτουργίας και το πεδίο εφαρμογής τους.



Εικόνα 2.4. Αρχή λειτουργίας του επιταχυνσιογράφου. [5]

Οι συνηθέστεροι τύποι επιταχυνσιογράφων είναι: (α) πιεζοηλεκτρικοί, (β) με πυκνωτή, (γ) ελεγχόμενης δύναμης (null-balance), (δ) συντονισμού (resonance), (ε) πιεζοωμικοί (piezoresistive) και (στ) μαγνητικής επαγωγής.

Τρία κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή επιταχυνσιογράφων είναι:

- 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 οι επιταχυνσιογράφοι. 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 οι επιταχυνσιογράφοι.

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

Κατά την τοποθέτηση των επιταχυνσιογράφων, 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). Πολλοί επιταχυνσιογράφοι διαθέτουν τεμάχια με σπειρώματα βιδώματος που μπορούν να στερεωθούν στη μηχανή ή το 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 οι επιταχυνσιογράφοι να είναι τοποθετημένοι σε ηλεκτρικά μονωμένη επιφάνεια για να παρέχεται μόνωση γείωσης μεταξύ της επιφάνειας όπου τοποθετείται ο επιταχυνσιογράφος και των σημάτων από τους επιταχυνσιογράφους. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν τριαξονικοί κύβοι στερέωσης για να τοποθετηθούν τρεις επιταχυνσιογράφοι σε ορθογωνική διάταξη. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχει μια επιφάνεια στερέωσης στο υπό παρακολούθηση αντικείμενο και τους τρεις επιταχυνσιογράφους. Για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που σχετίζονται με τη συχνότητα απόκρισης, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης των καλωδίων που συνδέονται με τους επιταχυνσιογράφους. Για την επίτευξη του προηγούμενου στόχου, πρέπει τα καλώδια να στερεωθούν στο ίδιο αντικείμενο στο οποίο είναι στερεωμένος ο επιταχυνσιογράφος. 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.

Οι επιταχυνσιογράφοι βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στα επόμενα:

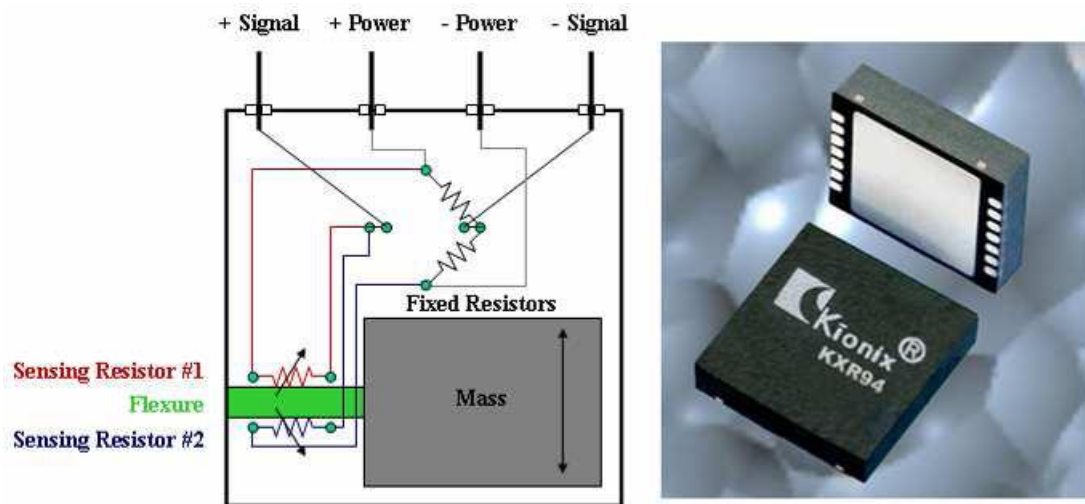
- Σεισμολογία και υπολογισμός επιταχύνσεων σχεδιασμού
- Καταγραφή της πραγματικής δυναμικής απόκρισης των κατασκευών
- Συστήματα Δομικής Παρακολούθησης Κατασκευών (Structural Health Monitoring)
- Ερευνητικές δραστηριότητες.

### **2.3.1. Είδη επιταχυνσιογράφων**

Πολλά και διαφορετικά είδη επιταχυνσιογράφων είναι διαθέσιμοι και συχνά αποτελούν μια άριστη επιλογή για την καταγραφή ταλαντώσεων. Ωστόσο, οι επιταχυνσιογράφοι δεν είναι κατάλληλοι 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. Παρακάτω, περιγράφονται μερικά είδη επιταχυνσιογράφων.

### Ωμικοί Επιταχυνσιογράφοι Αντιστάσεων (resistive accelerometers):

Διακρίνονται σε επιταχυνσιογράφους που λειτουργούν και ως παραμορφωσιόμετρα (strain gage) και σε μικρομηχανικούς επιταχυνσιογράφους (micro machined). Στους επιταχυνσιογράφους αυτούς η ταλάντωση της μάζας του οργάνου μεταβάλλει το μήκος άρα και την αντίσταση δύο αγωγών συνδεδεμένων με το σύστημα υποστήριξης της όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5. Συνεπώς, η τάση εξόδου της γέφυρας αντίστασης (resistor bridge) μεταβάλλεται ανάλογα με την επιτάχυνση που εφαρμόζεται. Μετρώντας τη μεταβολή της ηλεκτρικής τάσης στη γέφυρα προκύπτει η ζητούμενη χρονική μεταβολή της επιτάχυνσης.



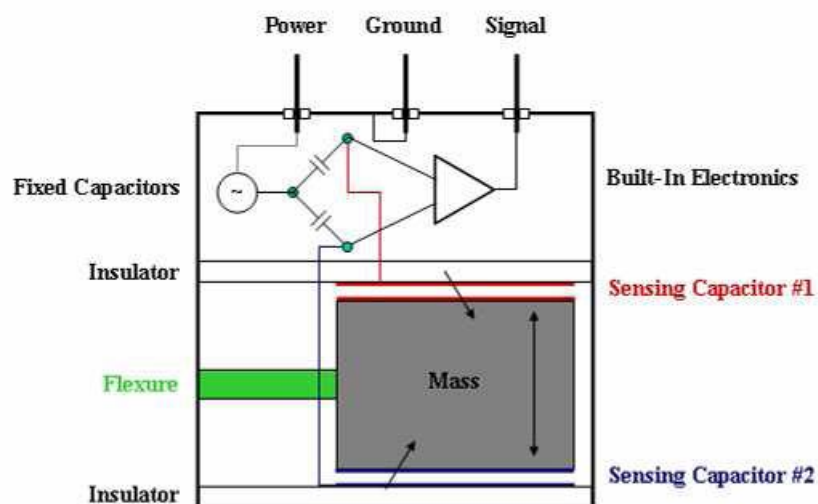
**Εικόνα 2.5.** Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιογράφου αντιστάσεων (resistive accelerometer) και ενδεικτικό όργανο της κατηγορίας αυτής. [1]

### Επιταχυνσιογράφοι πυκνωτών (capacitive accelerometers):

Ο επιταχυνσιογράφος πυκνωτών χρησιμοποιεί την τεχνική της συχνοτικής προσαρμογής μέσω διαφοροποίησης της γέφυρας πυκνωτή. Η αρχή λειτουργίας του παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6 ενώ στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται ένα τυπικό όργανο της κατηγορίας αυτής.

Τα τυπικά χαρακτηριστικά των δύο πρώτων κατηγοριών που παρουσιάστηκαν, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1] είναι τα ακόλουθα:

- 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)
- Λειτουργία με πολλαπλούς αγωγούς καλωδίου (τουλάχιστον τρία καλώδια)
- Μικρό μέγεθος και βάρος για τους μικρομηχανικούς κατασκευασμένους επιταχυνσιογράφους (micro machined)



**Εικόνα 2.6.** Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιογράφου πυκνωτών (capacitive accelerometers). [1]



**Εικόνα 2.7.** Τυπικός επιταχυνσιογράφος πυκνωτών (Capacitive accelerometer, MEMS Manufacturer/ XS 8000 family). [1]

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα όργανα αυτά έχουν τις ακόλουθες εφαρμογές:

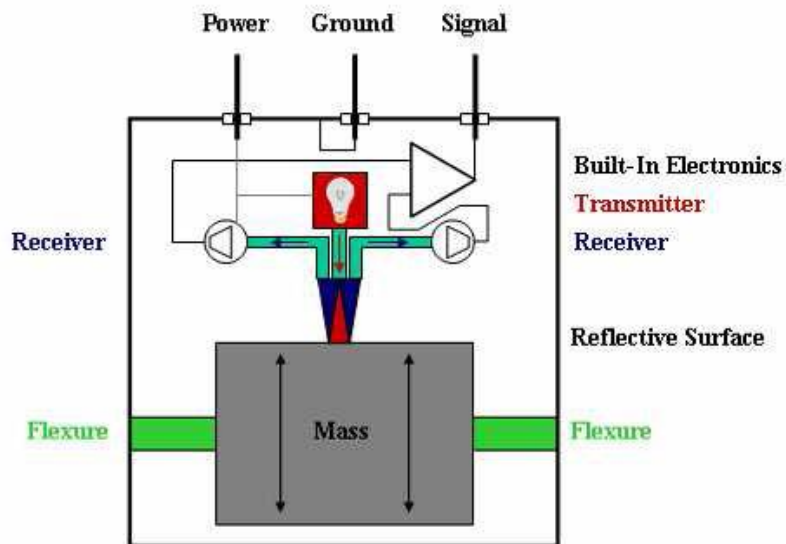
- Χαμηλής συχνότητας ή/και μακράς διάρκειας καταγραφές
- Ποιότητα κύλισης (ride quality)
- Απόκριση οχημάτων στο δρόμο (automobile road response)
- Μηχανήματα λούνα Παρκ
- Μηχανισμοί ανελκυστήρων
- Παρακολούθηση ταλαντώσεων κατασκευών και μηχανών
- Ιδιομορφική ανάλυση αεροδιαστημικών κατασκευών
- Ενοργάνωση ανθρώπινων ομοιωμάτων για συνθήκες κρούσης (crash dummy instrumentation)
- Αισθητήρες κλίσης
- Συσκευές ενεργοποίησης αερόσακου ή συναγερμού οχήματος.

### Επιταχυνσιογράφοι με οπτικές ίνες/Οπτικός επιταχυνσιογράφος (fiber optic):

Οι επιταχυνσιογράφοι οπτικών ινών (Εικόνα 2.8) έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και εφαρμογές με τους αισθητήρες αντιστάσεων και πυκνωτών. Στην περίπτωση τους, η ταλάντωση της μάζας μεταβάλλει το φως που συγκεντρώνεται στους δέκτες της συσκευής. Η μεταβολή αυτή είναι ανάλογη με αυτήν της επιτάχυνσης που εφαρμόζεται στη μάζα, η οποία με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να μετρηθεί (Εικόνα 2.9).



**Εικόνα 2.8.** Οπτικός επιταχυνσιογράφος (Clarion Optical Seismic Accelerometer) [1]



**Εικόνα 2.9.** Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιογράφου οπτικών ινών. [1]

Στα πρόσθετα χαρακτηριστικά των οργάνων αυτών συγκαταλέγονται:

- Η πρόβλεψη για τοποθέτηση ηλεκτρονικών εξ' αποστάσεως
- Η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλή θερμοκρασία ως 1000 F (537 C)



- Η μεταφορά αποκλειστικά μόνο φωτός μέσω της καλωδίωσης, οπότε ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ηλεκτρομαγνητικών και ραδιοφωνικών παρεμβολών σε “θορυβώδες” περιβάλλον
- Το ανοιχτό θέμα της απώλειας φωτός σε καλώδια μεγάλου μήκους και στις συνδέσεις
- Το γεγονός ότι απαιτούνται αισθητήρες υψηλού κόστους, καλώδια και επεξεργασία ψηφιακού σήματος (signal conditioning)

Σερβοεπιταχυνσιογράφοι (servo accelerometers) ή επιταχυνσιογράφοι δύναμης εξισορρόπησης (force balance):

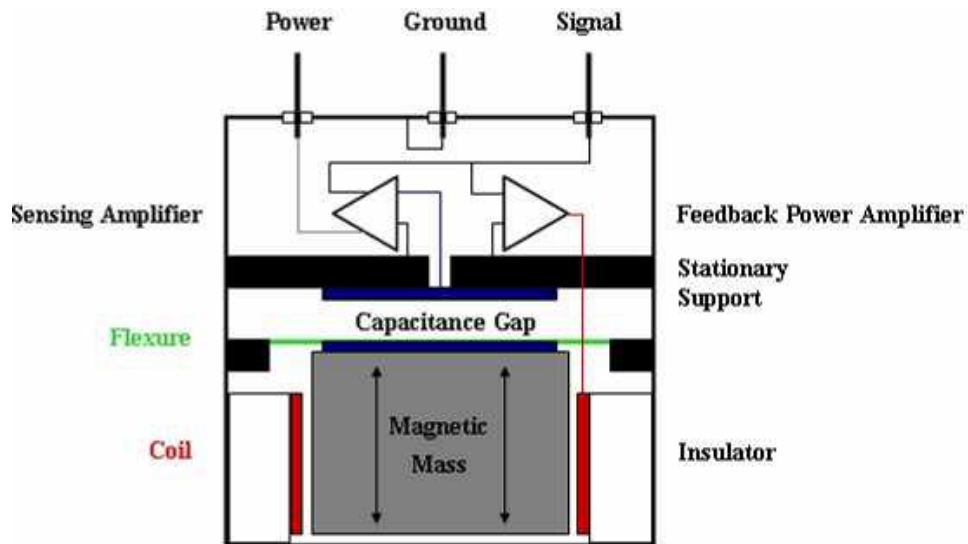
Στους σερβοεπιταχυνσιογράφους, όπως αυτόν που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10, η ταλαντωμένη μάζα είναι μαγνητική, ώστε κατά την κίνησή της μεταξύ δύο πηνίων να δημιουργείται ηλεκτρική τάση. Η συσκευή μετά την απαιτούμενη δύναμη ανάδρασης για να διατηρηθεί ενιαία χωρητικότητα του πυκνωτή, η οποία είναι ανάλογη της επιτάχυνσης (Εικόνα 2.11).



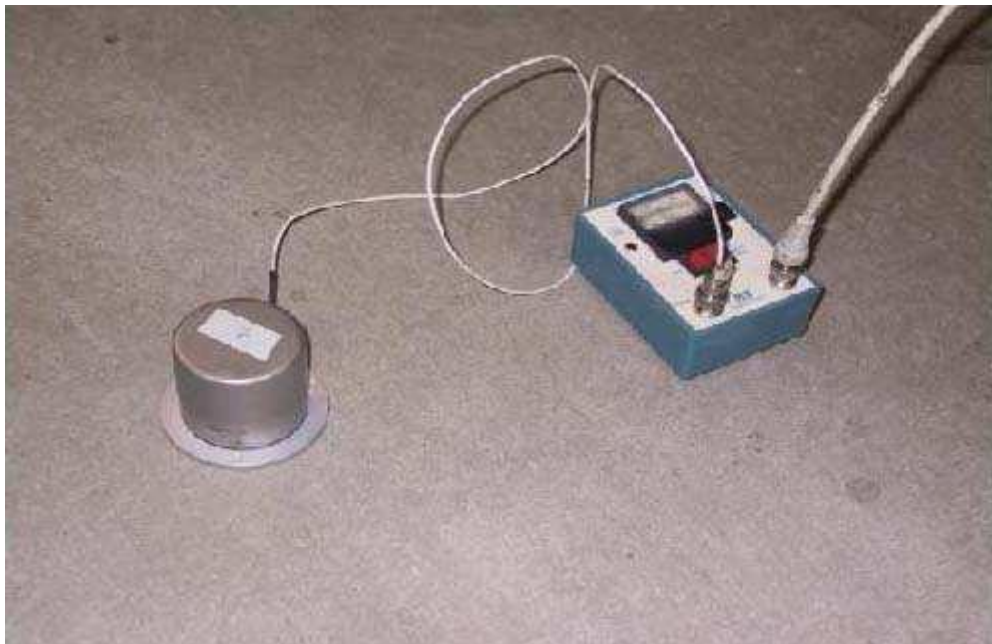
**Εικόνα 2.10.** Επιταχυνσιογράφος μεταβαλλόμενης δύναμης εξισορρόπησης. [1]

Επιταχυνσιογράφοι με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz):

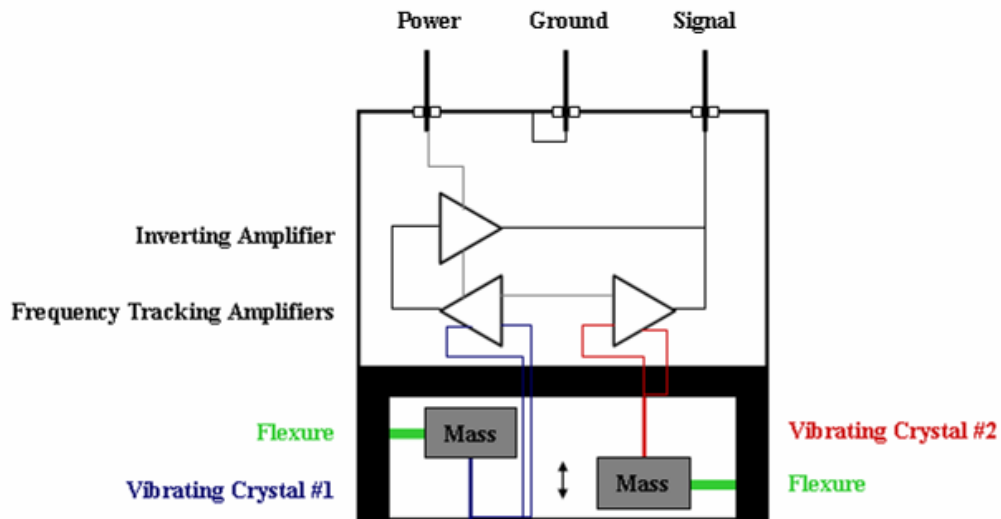
Τα όργανα αυτής της κατηγορίας, όπως το εικονιζόμενο στην Εικόνα 2.12, περιλαμβάνουν δύο κρυστάλλους χαλαζία, οι οποίοι αποτελούν και τις ταλαντούμενες μάζες του συστήματος. Η ταλάντωσή τους δημιουργεί το μετρούμενο ηλεκτρικό σήμα. Η διαφορά που παρατηρείται στη συχνότητα συντονισμού μεταξύ των στοιχείων είναι ανάλογη της επιτάχυνσης που εφαρμόζεται (Εικόνα 2.13).



**Εικόνα 2.11.** Αρχή λειτουργίας σερβοεπιταχυνσιογράφου (servo accelerometer) ή επιταχυνσιογράφου δύναμης εξισορρόπησης (Force Balance). [1]



**Εικόνα 2.12.** Επιταχυνσιογράφος με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz/ Model 393C). [1]



**Εικόνα 2.13.** Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιογράφου με ταλαντευόμενους κρυστάλλους (Vibrating Quartz). [1]

Οι σεισμικοί επιταχυνσιογράφοι των δύο προηγούμενων κατηγοριών (σερβοεπιταχυνσιογράφοι και ταλαντευόμενων κρυστάλλων) 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 στην Εικόνα 2.14. Οι σεισμικοί επιταχυνσιογράφοι που τοποθετούνται σε όρθια θέση στην άνω επιφάνεια των αλουμινένιων βάσεων καταγράφουν την κατακόρυφη απόκριση ενώ οι επιταχυνσιογράφοι που συνδέονται στις πλευρές των βάσεων καταγράφουν την οριζόντια απόκριση (Εικόνα 2.15).



**Εικόνα 2.14.** Διάνοιξη οπών στο σκυρόδεμα για την εγκατάσταση επιταχυνσιογράφων (Trinity River Relief Bridge). [1]



**Εικόνα 2.15.** Σεισμικοί επιταχυνσιογράφοι συγκρατούμενοι σε στύλους με βάσεις (Trinity River Relief Bridge). [1]

Τα τυπικά χαρακτηριστικά επιταχυνσιογράφων δύναμης εξοσορρόπησης δύναμης (Force Balance) και ταλαντευόμενων κρυστάλλων (Vibrating Quartz) είναι τα ακόλουθα [1]:

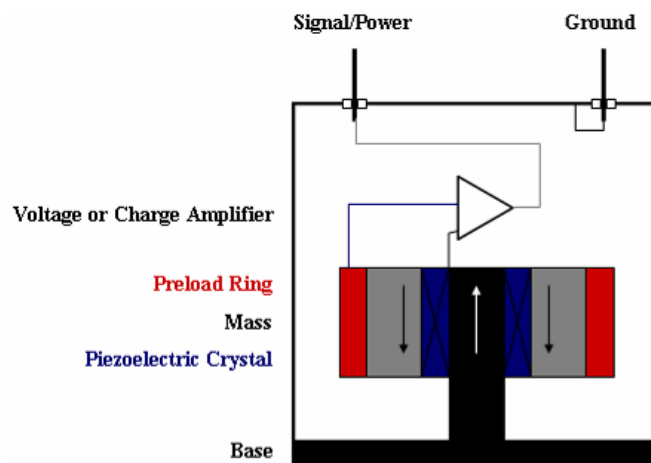
- Μετρήσεις μέχρι και 0 Hz (DC ανταπόκριση)
- Μεγάλο εύρος δυναμικής απόκρισης ( $>120$  dB=1.000.000:1)
- Εξαιρετική σταθερότητα λειτουργίας με την πάροδο του χρόνου και τη μεταβολή της θερμοκρασίας (ppm)
- Περιορισμένο εύρος υψηλών συχνοτήτων ( $<1$  kHz)
- Κίνδυνος καταστροφής της κατασκευής σε περίπτωση υπερφόρτωσης ( $<100$  g)
- Μεγάλη μαγνητική ευαισθησία για τους επιταχυνσιογράφους δύναμης εξοσορρόπησης
- Πολύ υψηλό κόστος

#### Πιεζοηλεκτρικοί (Piezoelectric) Επιταχυνσιογράφοι:

Στους πιεζοηλεκτρικούς επιταχυνσιογράφους (Εικόνα 2.16) η ταλάντωση της μάζας που βρίσκεται τοποθετημένη μέσα στο όργανο φορτίζει αυτοτροφοδοτούμενους κρυστάλλους. Η δύναμη επί των αυτοτροφοδοτούμενων κρυστάλλων παρέχει στην έξοδο φορτίο ανάλογο της επιτάχυνσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.17.



**Εικόνα 2.16.** Πιεζοηλεκτρικός (piezoelectric) επιταχυνσιογράφος. [1]



**Εικόνα 2.17.** Αρχή λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού (piezoelectric) επιταχυνσιογράφου. [1]

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οργάνων της κατηγορίας αυτής έχουν ως εξής:

- Καταγραφή καθαρά δυναμικών συμβάντων (>0.2 Hz)
- Μεγάλο δυναμικό εύρος (>100 dB=100.000:1)
- Μεγάλο συχνοτικό εύρος (<1 Hz έως >10 Hz)
- Αποτελείται από ένα στοιχείο στερεάς κατάστασης Solid-state (χωρίς κινούμενα μέρη)
- Τα αυτοτροφοδοτούμενα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία δεν απαιτούν ηλεκτρισμό
- Λειτουργία με περισσότερους από δύο αγωγούς
- Υψηλή ανθεκτικότητα (5.000 g)
- Ειδικοί τύποι για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες (έως 1000 F-537 C).

### 2.3.2. Εγκατάσταση/στερέωση επιταχυνσιογράφων

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στο θέμα της εγκατάστασης των επιταχυνσιογράφων είναι η επίδραση της μεθόδου στερέωσης στην ακρίβεια της χρησιμοποιήσιμης συχνοτικής απόκρισης.

Το συχνοτικό εύρος λειτουργίας του επιταχυνσιογράφου καθορίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις, συνδέοντας στερεά με πείρους τον υπό τον έλεγχο αισθητήρα απευθείας στον επιταχυνσιογράφο 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 οποιαδήποτε μάζας στον επιταχυνσιογράφο, 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.

Για καλύτερα αποτελέσματα, ειδικά σε υψηλές συχνότητες, είναι σημαντικό να προετοιμαστεί μία ομαλή και επίπεδη επιφάνεια για την τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου. 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 επιταχυνσιομέτρου και της επιφάνειας στερέωσης συμβάλλει στην επίτευξη υψηλού βαθμού συνάφειας, απαραίτητης για την καλύτερη μεταβίβαση των υψηλών συχνοτήτων.

Όσον αφορά τις δυνατότητες χρήσης των οργάνων, τέλος, λόγω της λειτουργίας του, ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος μπορεί να καταγράφει επιταχύνσεις σχετικά υψηλών συχνοτήτων και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των κυμάτων της διάδοσης του ήχου, στην αεροναυπηγική, στις δοκιμές μηχανών αλλά και ως σύστημα ελέγχου των κατασκευών.

Αντιθέτως, ο πιεζοωμικός μπορεί να καταγράφει και μικρότερες συχνότητες και γι' αυτό χρησιμοποιείται και σε κρουστικές δοκιμές (π.χ. crash test αυτοκινήτων).

Για την παρακολούθηση των επιταχύνσεων των εύκαμπτων κατασκευών του πολιτικού μηχανικού, χρησιμοποιούνται επιταχυνσιογράφοι οι οποίοι αποτελούνται από μάζα που εκτελεί ταλάντωση ενώ συνδέεται με ελατήριο και αποσβεστήρα.

## 2.4. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Οι αισθητήρες οπτικών ινών που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, διαθέτουν ελκυστικά χαρακτηριστικά που τους κάνουν πολύ χρήσιμους σε πολλές περιπτώσεις, ενώ σε μερικές άλλες αποτελούν τη μοναδική λύση. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (κτίρια, πλοία, γέφυρες, αεροσκάφη κ.α.) και τείνουν να υποσκελίσουν τους πιο παραδοσιακούς αισθητήρες.

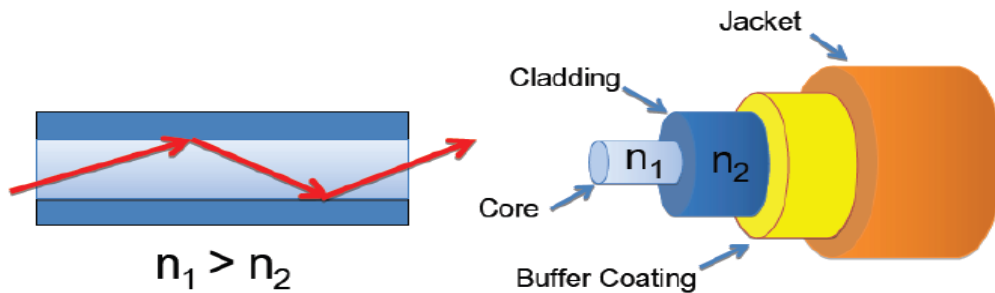
Η χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών είναι τεράστιας σημασίας αν ληφθεί υπόψη η ασφάλεια που μπορούν να προσφέρουν σε ακριβές και κρίσιμες κατασκευές. Πόσο μάλλον όταν αυτές οι κατασκευές χρησιμοποιούνται καθημερινά από τον άνθρωπο και οποιαδήποτε καταστροφή τους μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια ζωών.

### 2.4.1. Βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων οπτικών ινών

Παρόλο που χρειάζεται η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να μελετηθεί η διάδοση του φωτός μέσα στις οπτικές ίνες, στην πράξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί νόμοι της οπτικής για να γίνει αυτή κατανοητή. Το φως μπορεί να θεωρηθεί ως ακτίνες που ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές και μεταδίδονται μέσα στις οπτικές ίνες εξαιτίας του φαινομένου της εσωτερικής ανάκλασης. Οι οπτικές ίνες διαθέτουν έναν πυρήνα με μεγάλο δείκτη διάθλασης, ο οποίος περιβάλλεται από μια επικάλυψη μικρότερου δείκτη διάθλασης (Εικόνα 2.18). Το φως ανακλάται στα όρια μεταξύ του πυρήνα της ίνας και της επικάλυψής του. Όσο ο πυρήνας περιβάλλεται από την επικάλυψή του, τόσο το φως που βρίσκεται μέσα σε αυτόν ανακλάται ξανά και ξανά και έτσι καθοδηγείται μέσα στην οπτική ίνα [6].

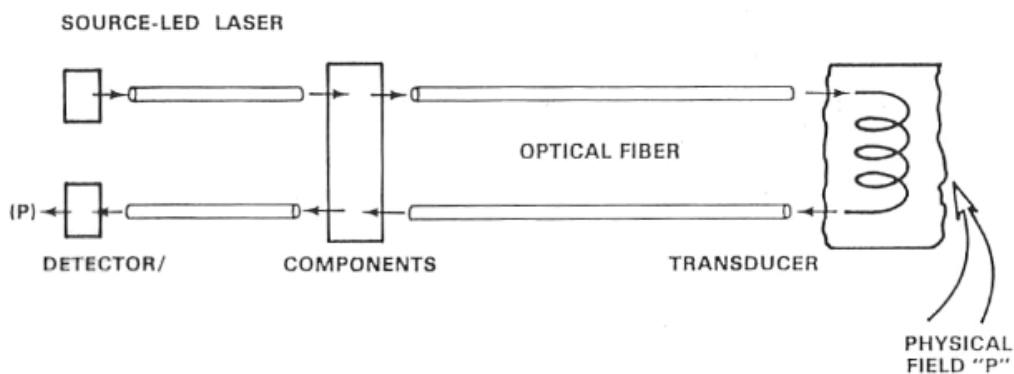
Ο πυρήνας (core) και η επικάλυψη (cladding) μιας τυπικής οπτικής ίνας κατασκευάζονται από γυαλί (πυριτία). Ο πυρήνας κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από την επικάλυψή του. Συνήθως η διαφορά του δείκτη διάθλασης είναι μικρότερη του 1%. Ο αυστηρός ποιοτικός έλεγχος κατά την διάρκεια της κατασκευής μιας οπτικής ίνας, εξασφαλίζει την σταθερότητα των ιδιοτήτων της καθ' όλο το μήκος της. Οι ίνες έχουν μεγάλη αντοχή αλλά είναι ταυτόχρονα και εύκαμπτες. Στο τέλος μια εξωτερική επένδυση (jacket), συνήθως ακρυλική ή πολυαμιδική (σε σπάνιες περιπτώσεις μεταλλική) εφαρμόζεται στις ίνες για προστασία από το περιβάλλον. Η εξωτερική επένδυση

μπορεί να αποτελείται από πολλά στρώματα ανάλογα με την προστασία που χρειάζεται (Εικόνα 2.18).



**Εικόνα 2.18.** Σχηματική αναπαράσταση οπτικής ίνας. [6]

Ένας αισθητήρας οπτικής ίνας λειτουργεί με την αζομείωση μίας ή περισσότερων ιδιοτήτων του φωτός που διαδίδεται μέσα στην ίνα. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι η ένταση, η φάση, η συχνότητα ή η πόλωση και μεταβάλλονται ανάλογα με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που μετριοούνται σε κάθε περίπτωση [7]. Στην απλούστερη μορφή του, ένας αισθητήρας οπτικών ινών αποτελείται από μια πηγή φωτός, μια οπτική ίνα, ένα αισθητήριο στοιχείο (το οποίο μετατρέπει την μέτρηση σε ένα οπτικό σήμα) και έναν οπτικό ανιχνευτή (ο οποίος μπορεί να είναι ένας παλμογράφος ή ένας οπτικός αναλυτής φάσματος) (Εικόνα 2.19).



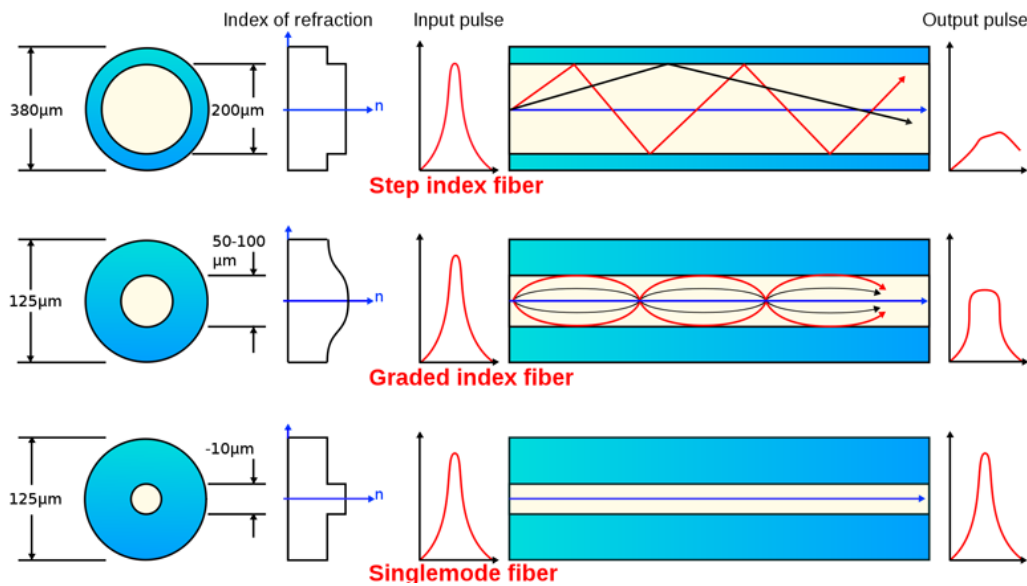
**Εικόνα 2.19.** Τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών. [7]

#### 2.4.2. Ταξινόμηση αισθητήρων οπτικών ινών

Υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση των κατασκευών που χρησιμοποιούνται τόσο στην ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και στις βιομηχανίες. Πανεπιστημιακά και βιομηχανικά ερευνητικά κέντρα αναπτύσσουν και παράγουν μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων για τους περισσότερους τύπους μετρήσεων και εφαρμογών. Στο εδάφιο αυτό θα γίνει μια ταξινόμηση των κυριότερων αισθητήρων και κυρίως αυτών που έχουν φτάσει σε ένα «ώριμο» επίπεδο και που χρησιμοποιούνται ευρέως

σε πολλές εφαρμογές. Οι αισθητήρες οπτικών ινών χωρίζονται σε πολλές υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που αυτοί λειτουργούν, με βάση την θέση τους ως προς την οπτική ίνα, ανάλογα με την χρήση τους κ.α. [8].

Ένας από τους βασικότερους διαχωρισμούς είναι ο αριθμός των καταστάσεων που μπορεί να υποστηρίξει μια οπτική ίνα. Διαχωρίζονται σε δύο ομάδες, τις μονότροπες ή μονής κατάστασης (single mode) και τις πολύτροπες ή πολλών καταστάσεων (multimode) (Εικόνα 2.20).



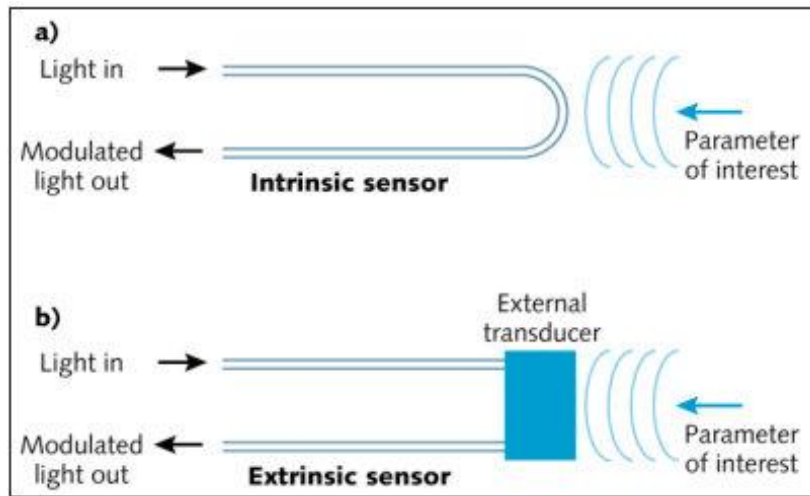
**Εικόνα 2.20.** Είδη οπτικών ινών, ανάλογα με την κατάσταση τους. [8]

Οι ίνες με πολύ μικρό πάχος πυρήνα επιτρέπουν να μεταδίδεται το φως μόνο σε μια κατάσταση (single mode). Το φως μέσα σε αυτές διαδίδεται ομοιόμορφα. Αντίθετα οι ίνες με μεγαλύτερο πάχος μπορούν να διαδίδουν το φως σε παραπάνω από μία καταστάσεις (multimode) και πιο συγκεκριμένα με δυο διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το προφίλ του δείκτη διάθλασης. Όταν ο δείκτης διάθλασης διατηρεί σταθερό προφίλ σε όλη την διατομή της ίνας τότε η ίνα ονομάζεται σταθερού βήματος (step index). Ενώ όταν το προφίλ του δείκτη διάθλασης είναι μη γραμμικό, περιστροφικό και συμμετρικό τότε η ίνα ονομάζεται κεκλιμένου βήματος (gradient index).

Γενικά οι αισθητήρες οπτικών ινών διαχωρίζονται αναλόγως με το αν είναι εσωτερικοί (intrinsic) ή εξωτερικοί (extrinsic) [9]. Οι εσωτερικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα μέρος της ίδιας της οπτικής ίνας σαν αισθητήριο στοιχείο. Οποιαδήποτε περιβαλλοντική μεταβολή μπορεί να διαφοροποιήσει τις ιδιότητες της φωτεινής δέσμης που περνάει μέσα από την ίνα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μπορεί να είναι στην ένταση, στην φάση ή στην πόλωση. Ουσιαστικά, κάθε περιβαλλοντική επίδραση μπορεί να μετατρέπεται σε ένα οπτικό σήμα που μπορεί να ερμηνευθεί. Η ερμηνεία αυτή μπορεί να γίνει από πολλά διαφορετικά είδη εσωτερικών αισθητήρων οπτικών ινών. Το κλειδί όμως είναι ο σχεδιασμός κάθε φορά του κατάλληλου αισθητήρα για την μέτρηση της επιθυμητής παραμέτρου. Αντίθετα οι εξωτερικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν την οπτική ίνα απλά σαν μέσο μεταφοράς του φωτός η οποία το διανέμει από και προς μια αισθητήριο κεφαλή στο τέλος της ίνας (Εικόνα 2.21). Η



αισθητήριος κεφαλή μπορεί να περιέχει καθρέπτες, κάποιο αέριο ή υγρό αλλά και πολλούς άλλους μηχανισμούς που μπορούν να δημιουργήσουν, να διαμορφώσουν ή να διαφοροποιήσουν μια ακτίνα φωτός.



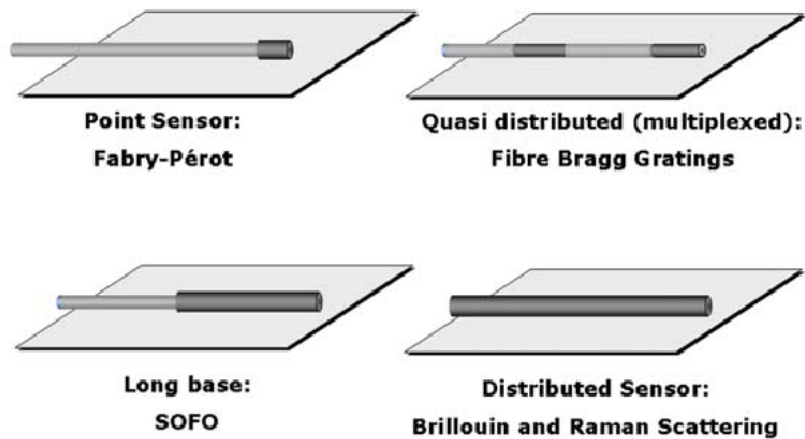
**Εικόνα 2.21.** Αναπαράσταση λειτουργίας εσωτερικού και εξωτερικού αισθητήρα. [9]

Ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος του αισθητήριου στοιχείου, οι αισθητήρες οπτικών ινών ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2.22) [10]:

- Σημειακοί αισθητήρες (point sensors): Έχουν ένα σημειακό αισθητήριο στοιχείο στο τέλος του καλωδίου της οπτικής ίνας και μοιάζουν με τους περισσότερους ηλεκτρικούς αισθητήρες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου *Fabry-Perot*.
- Αισθητήρες πολυπλεξίας (multiplexed sensors): Διαθέτουν αρκετά αισθητήρια σημεία και έτσι επιτρέπουν τις μετρήσεις σε πολλά σημεία κατά το μήκος μίας οπτικής ίνας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου *Fiber Bragg Grating (FBG)*.
- Αισθητήρες μεγάλου μήκους (long-based sensors): Εντάσσουν τις μετρήσεις σε αισθητήρες μεγαλύτερου μήκους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου *SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques)*.
- Κατανεμημένοι αισθητήρες (distributed sensors): Είναι ικανοί να «νοιώθουν» σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος μιας οπτικής ίνας. Τυπικά κάθε ένα μέτρο σε οπτικές ίνες μήκους πολλών χιλιομέτρων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου *Brillouin* και *Raman Scattering*.

### 2.4.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών

Έχοντας παρουσιάσει την φύση των υλικών που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες οπτικών ινών (γενικά διηλεκτρικά) καθώς και τις μεθόδους που χρησιμοποιούν αυτοί για την καταγραφή των φαινομένων, αναλύονται παρακάτω τα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών συγκριτικά με τους παραδοσιακούς, μη-οπτικούς αισθητήρες.



**Εικόνα 2.22-Α.** Τύποι αισθητήρων ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος του αισθητήριου στοιχείου. [10]

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία [8] είναι τα ακόλουθα:

- (α) Γενικά οι οπτικοί αισθητήρες κατασκευάζονται εξολοκλήρου από διηλεκτρικά υλικά τα οποία είναι χημικά αδρανή. Αυτό μεταφράζεται σε ηλεκτρική και χημική παθητικότητα και σε συνδυασμό με την φύση του φωτός που χρησιμοποιείται για την λειτουργία τους, οι αισθητήρες είναι τεχνικώς ιδανικοί για εφαρμογές σε εχθρικά ή διαβρωτικά περιβάλλοντα, ή όπου υπάρχει κίνδυνος έκρηξης.
- (β) Εφόσον η οπτική ίνα είναι ένα διηλεκτρικό μέσο, οι αισθητήρες οπτικών μέσων είναι τελείως απρόσβλητοι από οποιονδήποτε τύπο ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέσα με υψηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι παραδοσιακοί ηλεκτρικοί αισθητήρες (π.χ. ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα) είναι ακατάλληλοι σε τέτοια περιβάλλοντα, καθώς είναι πολύ ευαίσθητοι στις παρεμβολές.
- (γ) Η βιοσυμβατότητα, η αξιοπιστία και η μη-διδυτική φύση των οπτικών ινών, συνδυασμένα με την μικρή τους κατασκευή και την απλή διεπαφή μεταξύ του αισθητήριου στοιχείου και της περιοχής μέτρησης, κάνουν τους αισθητήρες οπτικών ινών κατάλληλους για τον εντοπισμό και την καταγραφή μεταβλητών της βιοϊατρικής.
- (δ) Μπορούν να αντέξουν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες χάριν στο υψηλό σημείο τήξης της οπτικής ίνας. Χρησιμοποιώντας ειδικά προστατευτικά περιβλήματα με ακόμα μεγαλύτερο σημείο τήξης, είναι δυνατόν να δουλέψουν σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες. Έχουν έτσι ένα μεγάλο εύρος μέτρησης θερμοκρασιών αρκετά μεγαλύτερο από πολλές ηλεκτρικές συσκευές.
- (ε) Το μικρό τους μέγεθος σημαίνει ότι μπορούν να ενσωματωθούν μέσα σε μια σύνθετη κατασκευή χωρίς να μειώσουν σημαντικά την αντοχή της. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις σε περιορισμένους χώρους. Η μικρή τους μάζα σημαίνει ότι μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα και να παίρνουν μετρήσεις σε μικρά δοκίμια.
- (στ) Η απόσταση από το σημείο μέτρησης μπορεί να είναι μεγάλη, ακόμα και χιλιόμετρα. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή και ο οπτικός αναλυτής μπορούν να βρίσκονται μακριά από το αισθητήριο στοιχείο και εν συνεχεία από ένα εχθρικό περιβάλλον.

(ζ) Η ευαισθησία, το δυναμικό εύρος και η ευκρίνεια ενδεχομένως να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα των παραδοσιακών αισθητήρων. Χρησιμοποιώντας τεχνικές συμβολομετρίας (interferometric) μπορούν να επιτευχθούν οι καλύτερες δυνατές μετρήσεις από άποψη ευαισθησίας. Αυτή η μεγάλη ευαισθησία πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε εφαρμογές αιχμής.

(η) Ένας τεράστιος αριθμός αισθητήρων μπορεί να τοποθετηθεί σε μια οπτική ίνα κάνοντας χρήση τεχνικών πολυπλεξίας (multiplexing).

(θ) Η ικανότητα της κατανομής των αισθητήρων σε ένα μόνο καλώδιο οπτικής ίνας έχει μεγάλη δυναμική σε εφαρμογές παρακολούθησης οποιασδήποτε κατασκευής, έξυπνης ή μη. Αυτό έχει τεράστια επίδραση στις αγορές της κατασκευής κτιρίων, σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας, της αεροναυτικής κ.α.

Στην ίδια πηγή [8] ως σημαντικότερα μειονεκτήματα εντοπίζονται τα εξής:

(α) Η ευαισθησία του αισθητήριου στοιχείου και κατ' επέκταση ολόκληρου του συστήματος ενός αισθητήρα επηρεάζεται και από άλλες μεταβλητές πέρα από την επιθυμητή μεταβλητή που μετρείται κάθε φορά. Για να αποκτήσουν «αναισθησία» στις άλλες μεταβλητές έχουν γίνει πολλές μελέτες με πολύ καλά αποτελέσματα. Ένα παράδειγμα αυτής της προσπάθειας είναι η έρευνα για να διαχωριστεί η ευαισθησία στην θερμοκρασία και την παραμόρφωση στους αισθητήρες FBG. Η διασταύρωση της ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα διότι είναι η αιτία σφαλμάτων στο οπτικό σήμα που φτάνει στην έξοδο. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό υπάρχει και στους συμβατικούς αισθητήρες.

(β) Το κόστος των οπτικών αισθητήρων είναι προς το παρόν, στις περισσότερες των περιπτώσεων, μεγαλύτερο από αυτών που κατασκευάζονται με την παραδοσιακή τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει ουσιαστικά λόγω του υψηλού κόστους των εξαρτημάτων και κυρίως των αισθητήριων οργάνων. Αυτό έγκειται στα χαρακτηριστικά των νέων τεχνολογιών, αλλά και μιας αγοράς που βρίσκεται στα αρχικά της στάδια.

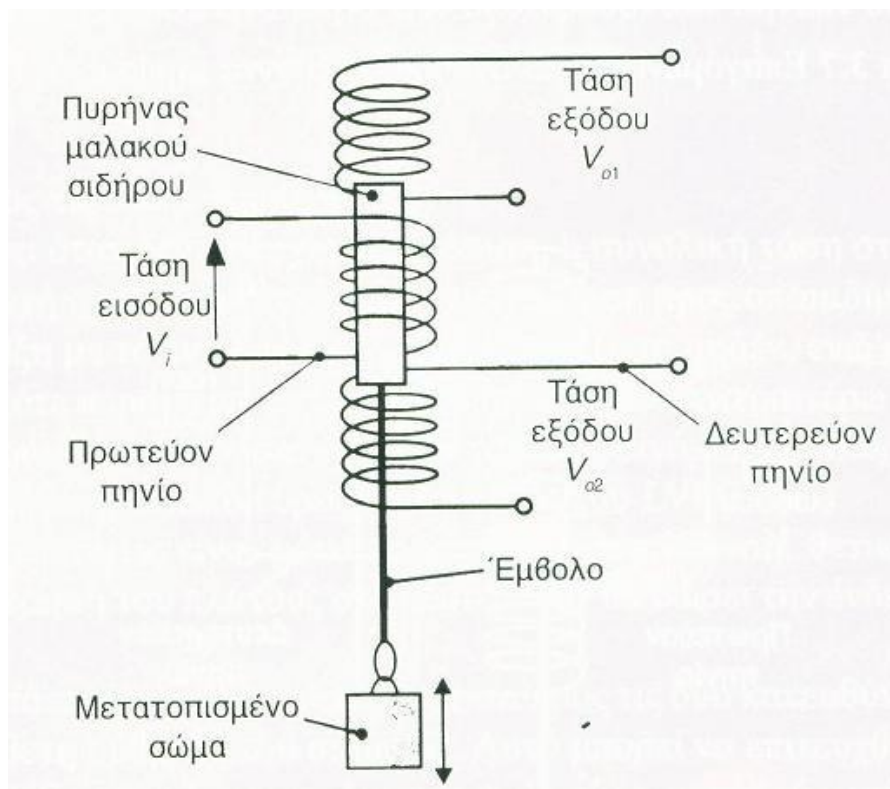
## 2.5. ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Οι γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (Linear Variable Differential Transformers - LVDT) χρησιμοποιούνται ευρέως για τον ακριβή προσδιορισμό μετατοπίσεων έως περίπου 300 mm.

Ένας συμβατικός μετασχηματιστής της κατηγορίας αυτής αποτελείται ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα πηνία που βρίσκονται σε ισχυρή σύζευξη και είναι τυλιγμένα γύρω από έναν κύλινδρο μαλακού σιδήρου. Λόγω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, όταν εφαρμοστεί μία εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον πηνίο, τότε επάγεται μία εναλλασσόμενη τάση στα δευτερεύοντα πηνία. Ωστόσο η κίνηση της ράβδου επηρεάζει μεταβάλλει τις παραμέτρους του ηλεκτρομαγνητικού φαινομένου (τη λεγόμενη σύζευξη των πηνίων) και οδηγεί σε διαφορά μεταξύ των τάσεων που μετρούνται στην έξοδο των δύο δευτερευόντων πηνίων. Η μετρούμενη διαφορά τάσης εξαρτάται από το μέτρο και τη διεύθυνση της μετατόπισης του πυρήνα. Το γεγονός αυτό το εκμεταλλευόμαστε για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε κατασκευές.

Η διάταξη των σπειρωμάτων σε ένα LVDT παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.23. Τα βρίσκονται στον ίδιο άξονα με το πρωτεύον στο μέσον. Ο πυρήνας μαλακού σιδήρου τοποθετείται στο κέντρο του συστήματος, στο εσωτερικό του πρωτεύοντος πηνίου, και είναι ελεύθερος να κινείται πάνω κάτω στο εσωτερικό των πηνίων. Το όργανο τροφοδοτείται με

ρεύμα και, στην κατάσταση αυτή, οι τάσεις στις εξόδους αλληλοεξουδετερώνονται και η μετρούμενη παραμόρφωση είναι μηδενική.



**Εικόνα 2.22-B.** Σχηματική αναπαράσταση ενός Γραμμικού Μεταβλητού Διαφορικού Μετασχηματιστή και της βασικής αρχής λειτουργίας του. [28]

Συνεπώς, όταν δεν υπάρχει μετατόπιση, η συνολική τάση στα δευτερεύοντα είναι μηδέν. Αυτή η τάση αυξάνεται με την μετατόπιση του πυρήνα προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Τελικά η σύζευξη με το ένα δευτερεύον μειώνεται στο μηδέν, ενώ με το άλλο γίνεται μέγιστη, οπότε περαιτέρω μετατόπιση δεν οδηγεί σε αύξηση της τάσης στα άκρα των δευτερευόντων. Αυτό περιορίζει το πρακτικό εύρος λειτουργίας του LVDT.

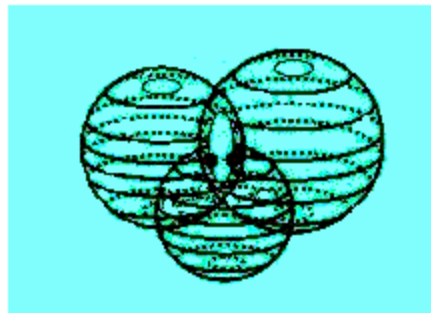
Τα LVDT είναι εξαιρετικά ευαίσθητα και παρέχουν διακριτική ικανότητα έως 0.05 mm. Διαθέτουν εύρος λειτουργίας από περίπου  $\pm 0.1$  mm έως  $\pm 300$  mm. Η ακρίβεια είναι το  $\pm 0.5\%$  της ένδειξης της κλίμακας, επειδή ο πυρήνας μαλακού σιδήρου δεν ευρίσκεται σε επαφή με τα πηνία και υπάρχει πολύ μικρή τριβή και μηχανική φθορά. Αν είναι αναγκαίο, μπορεί η κατασκευή να αντιμετωπίζει δονήσεις και κρούσεις. Από τα παραπάνω είναι επόμενο ότι τα LVDT έχουν πλατιά χρήση σε διάφορες εφαρμογές. Τα LVDT χρησιμοποιούνται συχνά και σε συστήματα μέτρησης δύναμης, πίεσης και επιτάχυνσης.

## 2.6. ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GPS

Το Σύστημα Γεωγραφικού Προσδιορισμού Θέσης (Global Positioning System, GPS) είναι ένα γεωδαιτικό δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης ενός σημείου στο χώρο που αρχικά σχεδιάστηκε για τις ανάγκες πλοήγησης του Αμερικανικού Ναυτικού αλλά κατέληξε να έχει γενικευμένη πολιτική χρήση. Η λειτουργία του GPS στηρίζεται σε 24 γεωδαιτικούς

δορυφόρους, οι οποίοι βρίσκονται σε σταθερές τροχιές γύρω από τη γη και οι συντεταγμένες τους είναι κάθε στιγμή γνωστές με μεγάλη ακρίβεια.

Η αρχή λειτουργίας του GPS είναι η εξής: ο προσδιορισμός ενός σημείου στο χώρο (συντεταγμένες  $x, y, z$ ) γίνεται με τον υπολογισμό των αποστάσεων του σημείου αυτού από τρεις δορυφόρους ως τομή τριών γεωμετρικών τόπων. Δηλαδή, το σημείο που θέλουμε να προσδιορίσουμε τις συντεταγμένες του βρίσκεται στην τομή τριών σφαιρών, με κέντρο κάθε σφαίρας ένα δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση του σημείου από τον αντίστοιχο δορυφόρο (Εικόνα 2.23). Ο προσδιορισμός αυτός είναι μία εμπροσθοτομία στο χώρο (Bomford, 1971) [12]. Το πρόβλημα επομένως ανάγεται στον υπολογισμό των αποστάσεων ενός σημείου από το δορυφόρο και αντιστοιχεί σε σύστημα τριών αγνώστων (συντεταγμένες  $x, y, z$ ) και τριών παρατηρήσεων (τρεις αποστάσεις).



**Εικόνα 2.23.** Προσδιορισμός σημείου στο χώρο με βάση το σύστημα GPS. [13]

Η μέτρηση των αποστάσεων δορυφόρου-δέκτη γίνεται με τη μέτρηση του χρόνου  $\Delta t$  που διέρρευσε από τη στιγμή που εστάλη ένα σήμα με γνωστή ταχύτητα (ταχύτητα του φωτός) από το δορυφόρο μέχρι να φτάσει στο δέκτη. Επειδή για λόγους οικονομίας, χρήματος και χώρου οι δέκτες δεν διαθέτουν ρολόι ακριβείας, ο χρόνος στο δέκτη θεωρείται ένας ακόμη (τέταρτος) άγνωστος και εισάγεται μία ακόμη παρατήρηση, η απόσταση από έναν τέταρτο δορυφόρο.

Στην πράξη, η θέση ενός δέκτη υπολογίζεται από περισσότερους από 4 δορυφόρους, και από σήμα δύο διαφορετικών συχνοτήτων (συχνότητες L1 και L2) που εκπέμπουν οι γεωδαιτικοί δορυφόροι (Fontana et al., 2001) [14]. Οι υψηλών προδιαγραφών δέκτες GPS έχουν δυνατότητα λήψης και ανάλυσης και των δύο συχνοτήτων από πολλούς δορυφόρους, ενώ αντίθετα οι φτηνοί μόνο μιας και από λίγους.

Οι 24 δορυφόροι GPS έχουν τεθεί ανά 4 σε 6 καθορισμένες τροχιές (οι οποίες συνεχώς παρακολουθούνται και διορθώνονται για τυχόν αποκλίσεις). Ο σχεδιασμός είναι τέτοιος ώστε να είναι ορατοί 4 δορυφόροι ανά πάσα στιγμή από κάθε σημείο επιφάνειας της Γης. Καθώς οι δορυφόροι κινούνται στον ουρανό, ο δέκτης λαμβάνει σήματα από τις νέες τους αλλά γνωστές θέσεις και υπολογίζει μία μέση τιμή των συντεταγμένων του. Όμως, παρουσιάζεται πρόβλημα ορατότητας δορυφόρων ιδιαίτερα στις περιοχές κοντά στους πόλους (π.χ. Αγγλία), με αποτέλεσμα να βρίσκονται άλλοι έμμεσοι τρόποι για την αντιμετώπιση τους προβλήματος, όπως για παράδειγμα οι pseudolites («ψευδοδορυφόροι»), δηλαδή πομποί εγκατεστημένοι στη γη που εκπέμπουν σήματα ίδια περίπου με των δορυφόρων (Meng et al., 2004) [15].

### 2.6.1. Τα μέρη του συστήματος GPS

Ένα σύστημα GPS αποτελείται από τα εξής μέρη:

- κεραία μικρών διαστάσεων και βάρους για να είναι δυνατές οι μετρήσεις και σε αντίξοες συνθήκες (Εικόνα 2.24). Η κεραία του GPS είναι πολυκατευθυντήρια, δηλαδή μπορεί να λάβει το σήμα από κάθε κατεύθυνση και να το οδηγήσει στο κέντρο της κεραίας, σημείο ως προς το οποίο γίνονται οι μετρήσεις. Πρέπει όμως για ακριβείς μετρήσεις να είναι κατακόρυφος ο άξονας της.
- δέκτη, ο οποίος παραλαμβάνει το σήμα από την κεραία και στην συνέχεια επεξεργάζεται τις καταγραφές (Εικόνα 2.25). Πιο συγκεκριμένα, αποκωδικοποιεί το σήμα των μετρήσεων που λαμβάνει από την κεραία. Δέκτες υπάρχουν μονής (L1) και διπλής (L1 και L2) συχνότητας, με αποτέλεσμα οι πρώτοι να μπορούν να αποκωδικοποιήσουν μόνο το L1 σήμα, ενώ οι δεύτεροι μπορούν να αποκωδικοποιήσουν και τα δύο σήματα. Λόγω της ιδιότητας αυτής οι δέκτες διπλής συχνότητας δίνουν πιο ακριβείς μετρήσεις σε μικρότερο χρονικό διάστημα και για λόγο αυτό είναι και μεγαλύτερο το κόστος τους. Να σημειωθεί ότι ο δέκτης χρησιμεύει και για την αποθήκευση των μετρήσεων.
- Ηλεκτρονικό υπολογιστή χειρός στον οποίο εισάγονται οι ρυθμίσεις για την διεξαγωγή των μετρήσεων (είδος μετρήσεων, συχνότητα καταγραφής, ύψος κεραίας κλπ). Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να γίνουν και απευθείας από ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου μπορούν να αποθηκευτούν και οι μετρήσεις.

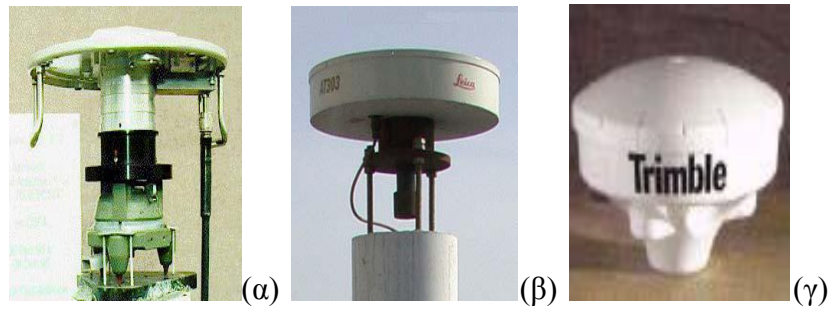
Στα σύγχρονα συστήματα GPS εμφανίζεται η τάση συγχώνευσης όλων αυτών των οργάνων GPS σε μία συσκευή. Έτσι παρατηρούμε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής χειρός να έχει ενσωματωθεί στο δέκτη (ιδιαίτερα στους δέκτες μονής συχνότητας) ενώ αρχίζουν να κάνουν την εμφάνισή τους συστήματα όπου ο δέκτης είναι ενσωματωμένος στο κάτω μέρος της κεραίας.

### 2.6.2. Μέθοδοι μετρήσεων με το σύστημα GPS

Το σύστημα GPS είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να προσδιορίζει την θέση σημείου στο χώρο είτε αυτό είναι σταθερό είτε αυτό κινείται. Ο προσδιορισμός αυτός μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους [13]:



**Εικόνα 2.24** Διάφοροι δέκτες GPS των εταιριών (α) Leica 510, (β)Leica 1200 και (γ) Topcon.  
[13]



**Εικόνα 2.25** Διάφορες κεραίες GPS. [13]

(α) Με την μέθοδο «stand-alone» όπου έχουμε τις καταγραφές μόνο ενός GPS τοποθετημένου σε συγκεκριμένο σημείο. Στην περίπτωση αυτή η ακρίβεια δε μπορεί να πέσει κάτω από τα 5 μέτρα [16]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την ναυσιπλοΐα κλπ. [17].

(β) Με την μέθοδο «differential», ευρύτερα γνωστή ως DGPS όπου έχουμε καταγραφές δύο GPS: ενός στο σημείο που μας ενδιαφέρει (κινητού ή ακίνητου) και ενός δεύτερου GPS αναφοράς (λειτουργεί ταυτόχρονα με το πρώτο) τοποθετημένου ακίνητο σε ένα παρακείμενο σημείο αναφοράς. Οι δύο δέκτες GPS θεωρείται ότι λαμβάνουν σήματα που ακολουθούν κοινή διαδρομή, αντιστοιχούν σε κοινή γεωμετρική διάταξη και πλήθος κοινών ορατών δορυφόρων και έτσι απαλείφονται σε μεγάλο βαθμό σφάλματα που εμφανίζονται επιτυγχάνοντας ακρίβεια έως μερικών χιλιοστών [16].

Μία εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι ότι επιτρέπει να υπάρχει ένας δέκτης σταθερός (δέκτης αναφοράς) και ένας δέκτης κινούμενος. Οι συνεχείς μετρήσεις του δέκτη αναφοράς εμφανίζουν μεταβολή των συντεταγμένων του που οφείλεται σε σφάλματα. Εκτιμώντας μία μέση τιμή της πραγματικής θέσης του, μπορούν να εκτιμηθούν τα σφάλματα κάθε στιγμής και με αυτά να διορθωθεί η θέση ενός κινούμενου δέκτη. Η επεξεργασία των μετρήσεων μπορεί να γίνει είτε εκ των υστέρων, εφ' όσον οι δέκτες διαθέτουν καταγραφικό, είτε με άμεσο προσδιορισμό συντεταγμένων.

Η μέθοδος DGPS επιτρέπει να προσδιορίζονται με ακρίβεια συντεταγμένες σημείων που είναι ακίνητα είτε που κινούνται. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται η μέθοδος static, εκτιμώντας ουσιαστικά μία μέση τιμή των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή και σε μελέτη πολύ αργών, ημιστατικών κινήσεων (π.χ. την παρακολούθηση σημείων ενός φράγματος, τεκτονικού ρήγματος ή και ηφαιστείου, όπου ο ρυθμός κίνησης των σημείων θεωρείται πρακτικά μηδενικός κατά την διάρκεια των μετρήσεων).

Στη δεύτερη περίπτωση, γνωστή ως μέθοδο kinematic, εντελώς απλουστευτικά, οι συντεταγμένες του σταθερού σημείου υπολογίζονται ως μέση τιμή όλων των διαθέσιμων τιμών, και οι διαφορές των συντεταγμένων κάθε στιγμής από τη μέση τιμή εισάγονται ως διορθώσεις στις αντίστοιχες τιμές των μετρήσεων του κινούμενου σημείου σε σχετικά μικρή απόσταση (<1-5km) δέκτη.

### **2.6.3. Εφαρμογές του GPS στην παρακολούθηση κατασκευών και δυναμικών κινήσεων**

Λόγω του σχεδιασμού του, το GPS βρίσκει πολλές εφαρμογές σε πολιτικές χρήσεις όπως είναι η ναυσιπλοΐα (πλοήγηση πλοίων, αεροπλάνων, αυτοκινήτων, διάφορες τοπογραφικές εφαρμογές κλπ.)

Τα τελευταία χρόνια εκτός από την οδοποιία, βρίσκει εφαρμογή και σε πολλές ειδικές εργασίες του πολιτικού μηχανικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τοποθέτηση των πυλώνων της γέφυρας Ρίου - Αντιρίου, το οποίο έγινε με την χρήση του GPS [18].

Μία άλλη από τις νέες εφαρμογές του GPS στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού είναι η παρακολούθηση ταλαντώσεων των εύκαμπτων κατασκευών όπως οι γέφυρες ([19], [20]) τα ψηλά κτίρια ([21], [22]) και οι κεραιές [23]. Πρώτες προσπάθειες εφαρμογής του στην παρακολούθηση εύκαμπτων κατασκευών άρχισαν περίπου πριν μία δεκαετία [24] παρόλο που υπήρχαν αρκετοί περιορισμοί, όπως η μία μόνο διαθέσιμη (L2 signal) από τις δύο συχνότητες εκπομπής του σήματος του γεωδαιτικών δορυφόρων λόγω δέσμευσης από τον αμερικανικό στρατό [14] ενώ η μεγαλύτερη συχνότητα καταγραφής ήταν μόλις 1 Hz. Τα τελευταία χρόνια όμως, με την αποδέσμευση της συχνότητας L2, την αύξηση της συχνότητας καταγραφής σε 20 Hz και με την γενική βελτίωση της τεχνολογίας των GPS είναι δυνατή η παρακολούθηση ταλαντώσεων κατασκευών με μεγάλη ακρίβεια.

Δύο είναι οι κύριοι λόγοι που κάνουν τόσο σημαντική την παρακολούθηση των ταλαντώσεων των κατασκευών:

- είναι δυνατή η μέτρηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μίας κατασκευής και πιο συγκεκριμένα της συχνότητας και το εύρους ταλάντωσης και
- είναι δυνατή η χρήση του ως σύστημα συναγερμού, στην περίπτωση που η μετακίνηση που θα προκύψει θα υπερβαίνει κάποιο όριο ασφαλείας.

#### **2.6.4. Χρήση του GPS ως σειсмоγράφος**

Μία ακόμα χρήση του GPS είναι για την καταγραφή σεισμών, ιδιαίτερα σεισμογενείς περιοχές (Ιαπωνία, Καλιφόρνια). Ειδικότερα στην Ιαπωνία έχει εγκατασταθεί ένα ολόκληρο δίκτυο GPS, αποτελούμενο από περισσότερα από 1000 όργανα, το οποίο λειτουργεί συνεχώς για την καταγραφή των παραμορφώσεων του στερεού φλοιού της γης λόγω των σεισμών, καθώς και άλλες λειτουργίες, πχ. πλοήγηση σκαφών, αυτοκινήτων, κλπ. [25].

Με τις καταγραφές των GPS όμως γίνεται και η προσομοίωση των ρηγμάτων και των σεισμών. Μία τέτοια προσπάθεια παρουσιάστηκε και στην εργασία των Miyazaki et.al. [25] για τον σεισμό Tokachi-Oki που συνέβη το Σεπτέμβριο του 2003 και είχε μέγεθος περίπου 8 Ρίχτερ. Η εργασία τους βασίστηκε στις καταγραφές 37 δεκτών GPS με συχνότητα καταγραφής 1 Hz.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το GPS είναι όργανο κατάλληλο για την ακριβή παρακολούθηση ταλαντώσεων και δυναμικών κινήσεων. Βέβαια, παρουσιάζονται προβλήματα κατά τη μέτρηση των ταλαντώσεων, κυρίως διακοπές των καταγραφών. Οι διακοπές αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν είτε με διαφορετική συνδεσμολογία (σύνδεση κεραία-δέκτη GPS με οπτικές ίνες, ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα επικοινωνίας μεταξύ κεραία και δέκτη) είτε με την χρήση κατάλληλου λογισμικού.

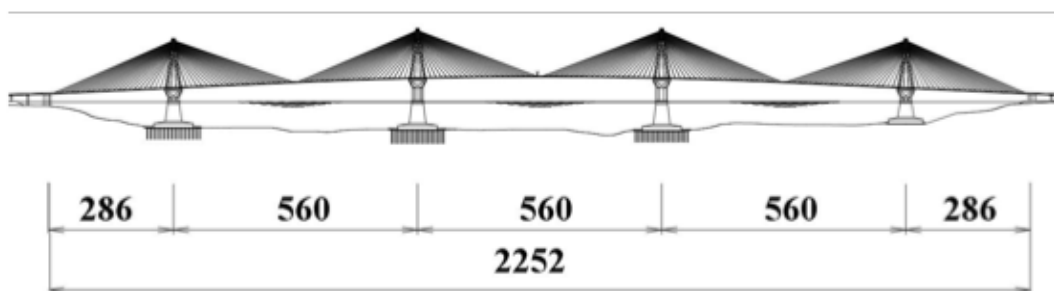


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΓΕΦΥΡΑ ΡΙΟΥ ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γέφυρα Ρίου Αντιρρίου "Χαρίλαος Τρικούπης" είναι μία καλωδιωτή γέφυρα πέντε ανοιγμάτων που ενώνει τη Στερεά Ελλάδα με την Πελοπόννησο. Το συνεχές σύνθετο κατάστρωμα έχει συνολικό μήκος 2252 m, με 3 κύρια ανοίγματα των 560 m και πλευρικά ανοίγματα των 286 m (Εικόνα 3.1). Αναρτάται από 4 πυλώνες από σκυρόδεμα, με συνολικό ύψος 189 έως 227 m, μέσω 368 καλωδίων συνολικού μήκους από 79 έως 295 m. Σε κάθε άκρο του καταστρώματος, η κατασκευή στηρίζεται σε ένα χαλύβδινο πλαίσιο με ελευθερία στροφής (RF) που εξασφαλίζει τη δυνατότητα μετατόπισης του καταστρώματος κατά τη διαμήκη διεύθυνσή του, και συνοδεύεται από ειδικά σχεδιασμένο αρμό διαστολής. Επιπλέον, στους πυλώνες και στις περιοχές του πλαισίου αυτού η εγκάρσια μετατόπιση του καταστρώματος εμποδίζεται μέσω μίας χαλύβδινης «ασφάλειας» (fuse) που απελευθερώνει το κατάστρωμα όταν το εγκάρσιο φορτίο, για κάθε στοιχείο, υπερβαίνει τα  $\pm 10500 / \pm 3400$  kN (πυλώνας / RF). Η ικανότητά τους καθορίστηκε με βάση τα μέγιστα φορτία ανέμου που ελήφθησαν κατά το σχεδιασμό. Σε περίπτωση μέτριων / ισχυρών σεισμών, το κατάστρωμα απελευθερώνεται και η επαγόμενη ενέργεια διαχέεται μέσω αποσβεστήρων που βρίσκονται κοντά στις χαλύβδινες ασφάλειες.



**Εικόνα 3.1.** Γενική όψη της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου. [26]

Το μέγεθος και η σημασία της κατασκευής, σε συνδυασμό με τις ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες στο χώρο της (μέγιστη ταχύτητα του ανέμου μέχρι και 266 km/h, αντισεισμικός σχεδιασμός με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) 0,48g και τεκτονικές κινήσεις έως 2 m μεταξύ κάθε πυλώνα) απαιτούν ένα μόνιμο σύστημα παρακολούθησης που παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την κατασκευή.

Ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η λειτουργία του συστήματος αντιμετωπίζουν επιλεγμένους στόχους, όπως το μέγιστο αναμενόμενο εύρος της απόκρισης της κατασκευής, η απαιτούμενη ακρίβεια των μετρήσεων και η αξιοπιστία του συστήματος.

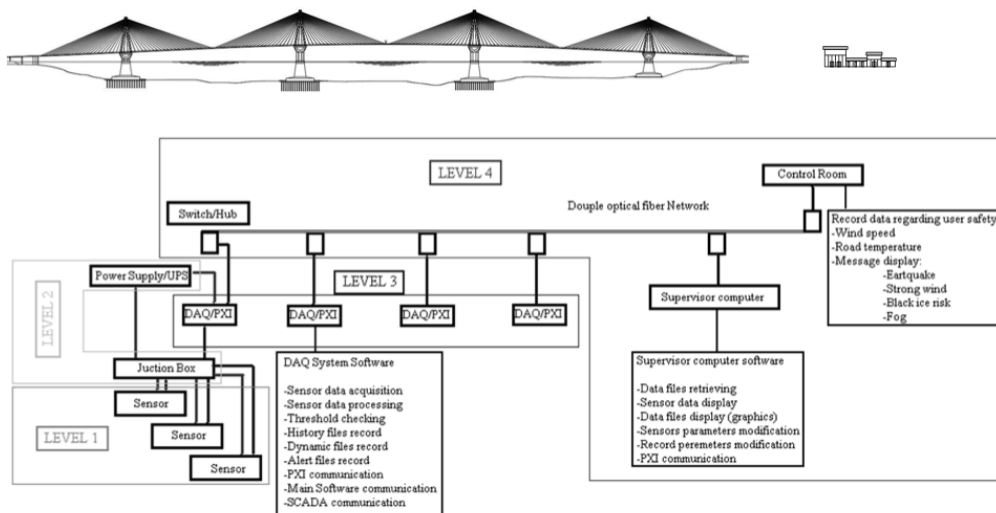
Μέσα από τα χρόνια λειτουργίας του (2004-2014), το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης παρείχε πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την πραγματική απόκριση της κατασκευής για πολλές διαφορετικές περιπτώσεις διέγερσης (δυνατός άνεμος/σεισμός/τυχαία γεγονότα), που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του έργου και την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των παρεμβάσεων (δομικού χαρακτήρα) στην κατασκευή. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί η συμβολή του συστήματος στην ασφάλεια των χρηστών του έργου μέσω πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τον καιρό και την κατάσταση του δρόμου (δηλαδή πάγος στο δρόμο/ομίχλη).

### 3.2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΤΟΥ

Το σύστημα δομικής παρακολούθησης της γέφυρας Ρίου - Αντιρρίου σχεδιάστηκε σύμφωνα με την ανάλυση δομικής επικινδυνότητας λαμβάνοντας υπόψιν τις τυχαίες, συχνές και μόνιμες συνθήκες φόρτισης. Η επιλογή των καταλληλότερων αισθητήρων και της αντίστοιχης θέσης τους έγινε με κύρια επιδίωξη να είναι σε θέση να παρέχουν όλα τα αναγκαία στοιχεία, για κάθε πιθανή φόρτιση, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τον απαιτούμενο αριθμό των αισθητήρων.

Η τρέχουσα αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης, Εικ.3.2, μπορεί να διαιρεθεί σε 4 διαφορετικά επίπεδα [26]:

- Αισθητήρες
- Τροφοδοσία και μεταφορά σήματος
- Ψηφιοποίηση, συλλογή και επεξεργασία σήματος
- Δίκτυο επικοινωνίας και διαχείριση των δεδομένων.



**Εικόνα 3.2** Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος δομικής παρακολούθησης της γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου. [26]

Κάθε επίπεδο είναι εξίσου σημαντικό για την ορθή λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης, και τα βασικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω.

### 3.2.1 Αισθητήρες

Μια μεγάλη ποικιλία από αισθητήρες ενσωματώνονται στο σύστημα παρακολούθησης προκειμένου να καταγράψουν την απόκριση των διαφόρων δομικών στοιχείων υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

### 3.2.2 Τροφοδοσία και Μεταφορά Σήματος

Η τροφοδοσία των αισθητήρων που βρίσκονται έως και 400 μέτρα μακριά από τη μονάδα συλλογής των δεδομένων, επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση κουτιών διακλάδωσης (JBs) που περιέχουν μετασχηματιστές εναλλασόμενης / συνεχούς τάσης AC / DC (~ 230 - 24 VDC) κοντά στη θέση των αισθητήρων. Εσωτερικά των JBs το σήμα που επιστρέφει από κάθε αισθητήρα ενισχύεται (όχι για όλους τους αισθητήρες) και μεταδίδεται μέσω προστατευμένων καλωδίων στη μονάδα συλλογής δεδομένων. Μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού είναι το σύστημα προστασίας από υπέρταση, που θα πρέπει να προλαμβάνει την υπερφόρτωση (π.χ. από κεραυνούς) ώστε να μην διαδοθεί στο εσωτερικό του δικτύου καλωδίωσης και να προκαλέσει ζημιές στους αισθητήρες. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ακόμη και όταν συμβεί μια μεγάλη διακοπή ρεύματος, το σύστημα θα παραμείνει ενεργό, γιατί θα είναι τροφοδοτούμενο από συσκευές UPS και τοπικές γεννήτριες.

### 3.2.3 Ψηφιοποίηση, Συλλογή και Επεξεργασία Σήματος

Λόγω του μεγέθους της παρακολουθούμενης κατασκευής (πάνω από 2500 m μεταξύ των ακραίων αισθητήρων), τοποθετούνται 4 διαφορετικές μονάδες ψηφιοποίησης και συλλογής (DAQs), μία σε κάθε πυλώνα. Οι μονάδες DAQ βρίσκονται σε δωμάτια ελεγχόμενης θερμοκρασίας ειδικά σχεδιασμένα για να λειτουργούν σε αντίξοες συνθήκες.

Οι ακόλουθες εργασίες πραγματοποιούνται σε κάθε DAQ [26]:

- Φιλτράρισμα χαμηλών συχνοτήτων στα 10 kHz
- Ψηφιοποίηση στα 500 Hz
- Μετατροπή του σήματος σε μονάδες μηχανικού
- Συνεχής έλεγχος ορίων
- Δημιουργία αρχείου δεδομένων και μετάδοση σε πραγματικό χρόνο των επιλεγμένων τιμών

Μια σημαντική πτυχή, που είναι αναγκαία για οποιαδήποτε περαιτέρω ανάλυση των καταγεγραμμένων σημάτων, είναι ο συγχρονισμός. Στην τρέχουσα αρχιτεκτονική όλα τα DAQs έχουν συγχρονιστεί με έναν διακομιστή μέσω του πρωτοκόλλου SNTP.

### 3.2.4 Δίκτυο Επικοινωνίας και Διαχείριση των Δεδομένων

Η επικοινωνία του κάθε DAQ με τον εποπτευόμενα υπολογιστή (SE) και με το Κέντρο Ελέγχου της γέφυρας γίνεται μέσω ενός δικτύου οπτικών ινών που έχει εγκατασταθεί κατά μήκος του καταστρώματος. Έτσι, τα συλλεχθέντα δεδομένα ανακτώνται, αξιολογούνται και αποθηκεύονται μόνιμα σε κατάλληλα μέσα στο κτίριο λειτουργίας. Επιπλέον, μέσω του SE, ο τελικός χρήστης μπορεί να εποπτεύει όλες τις μετρήσεις (σε πραγματικό χρόνο) και να αξιολογεί/τροποποιεί όλες τις παραμέτρους καταγραφής (κατώτατα όρια, κλιμάκωση, παράμετροι απόκτησης κλπ) που μπορούν να προσαρμοστούν σε κάθε παρακολουθούμενο γεγονός.

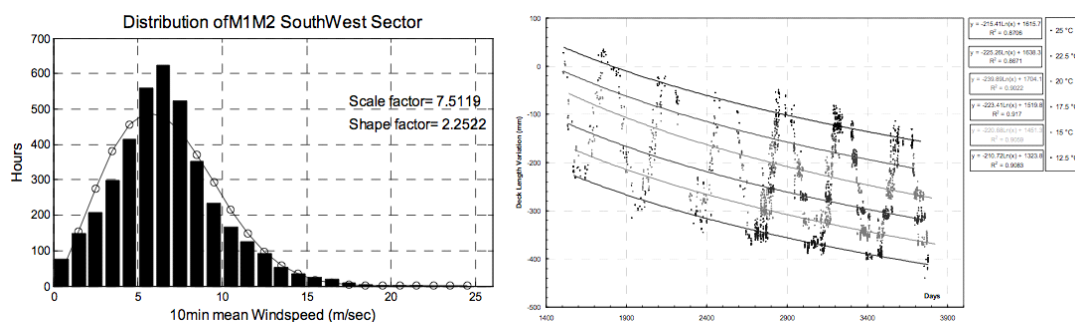
### 3.2.5 Αρχεία Δεδομένων και εφαρμογές

Δύο κύριες κατηγορίες αρχείων δεδομένων δημιουργούνται από το σύστημα παρακολούθησης:

- Αρχεία ιστορίας (μέσες τιμές των μεγεθών ανά 0,5 sec καταγράφονται κάθε 30 sec, εκτός από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου για τις οποίες υπολογίζονται μέσοι όροι ανά 10 min)
- Δυναμικά αρχεία (υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας στα 100 Hz με διάρκεια 60 sec)

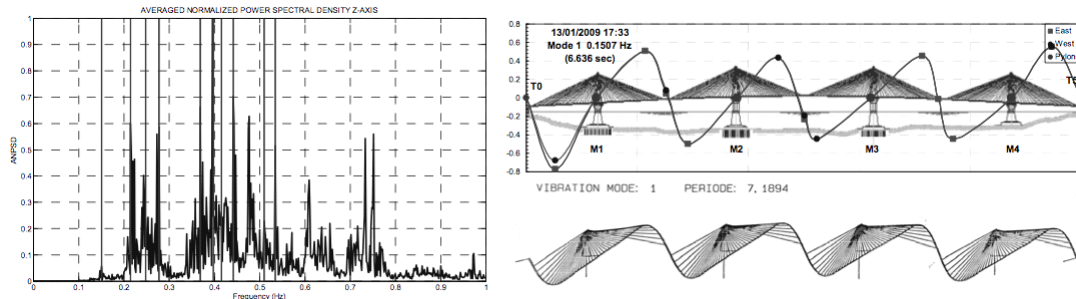
Τα αρχεία ιστορίας (Εικόνα 3.3) δημιουργούνται συνεχώς ενώ τα δυναμικά αρχεία καταγράφονται κάθε 2 ώρες (Automatic) ή όταν συγκεκριμένο κατώτατο όριο έχει ξεπεραστεί (Alert) ή ακόμη και με εντολή των χρηστών (Request). Όλοι οι τύποι αρχείων (History / Automatic / Alert / Request) είναι πολύ χρήσιμοι για να κατανοήσουμε την πραγματική ανταπόκριση της γέφυρας. Κάθε ένα από αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς ανάλυσης. Ειδικότερα τα αρχεία ιστορίας είναι πολύ χρήσιμα για [26]:

- Χαρακτηρισμό των περιβαλλοντικών συνθηκών (άνεμος, θερμοκρασία)
- Εκτίμηση του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης του καταστρώματος
- Αξιολόγηση των στατικών επιπτώσεων των φορτίων του ανέμου
- Προσδιορισμό της πιθανής απώλειας φορτίου σε κάποιο καλώδιο από τη συνολική κατανομή της δύναμης



**Εικόνα 3.3** Ενδεικτικά αποτελέσματα κατανομής της ταχύτητας του ανέμου και υπολογισμός της βράχυνσης του καταστρώματος (αρχεία Ιστορίας). [26]

Από την άλλη πλευρά, τα δυναμικά αρχεία (Εικόνα 3.4) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, καθώς και για τη μέτρηση της απόκρισης της υπό ιδιαίτερες συνθήκες φόρτισης όπως ισχυρούς ανέμους, σεισμούς και κυκλοφοριακή συμφόρηση. [26]



**Εικόνα 3.4** Ταυτοποίηση των ιδιομορφών του καταστρώματος με χρήση καταγραφών από δυναμικά αρχεία. [26]

### 3.2.6. Αυτόματη Επεξεργασία (Εξυπνη Παρακολούθηση)

Εκτός από την ανάλυση των στοιχείων που συλλέγονται, είναι σημαντικό για ένα δομικό σύστημα παρακολούθησης να αναγνωρίζει και να προσαρμόζει αυτόματα τις παραμέτρους καταγραφής των δεδομένων, προκειμένου να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Επιπλέον, μια έξυπνη διαχείριση των πιθανών συναγερμών (που δημιουργούνται από την υπέρβαση οριακών τιμών των μετρούμενων μεγεθών) μπορεί να μειώσει σημαντικά τον όγκο των δεδομένων που καταγράφονται. Αυτό μπορεί να επιταχύνει τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας τους και να επιτρέπει να εκτελούνται πιο λεπτομερείς αναλύσεις.

Το σύστημα δομικής παρακολούθησης της γέφυρας Ρίου - Αντιρρίου ενσωματώνει ειδικές υπομονάδες που μπορούν να αναγνωρίζουν και να εκτελούν αυτόματα κατάλληλες ενέργειες σε περιπτώσεις σεισμών («σεισμική» λειτουργία) και ισχυρών ανέμων (λειτουργία «ανέμου»).

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού πραγματοποιούνται αυτόματα οι παρακάτω ενέργειες:

- Δήλωση προειδοποίησης σεισμού στην περίπτωση που περισσότερα από 3 κανάλια, από διαφορετικούς αισθητήρες (που ορίστηκαν ως ελεγκτές ειδοποιήσεων), δίνουν τιμές που υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο (5% του g) μέσα σε εύλογο χρονικό περιθώριο.
- Ταξινόμηση της έντασης του σεισμού μέσω της απόκρισης συγκεκριμένων αισθητήρων (που είχαν οριστεί ως δείκτες απόκρισης) σε 3 διαφορετικές κατηγορίες.
- Μετάδοση σε πραγματικό χρόνο των σχετικών πληροφοριών στο δωμάτιο ελέγχου για την ασφαλή διαχείριση της κυκλοφορίας
- Γνωστοποίηση του περιστατικού μέσω διαφόρων μέσων (e-mail/SMS/κλήση) σε επιλεγμένα πρόσωπα.
- Επεξεργασία των καταγεγραμμένων δεδομένων και αυτόματη δημιουργία αναφοράς με τις μετρήσεις της απόκρισης της κατασκευής.

- Μετάδοση της προαναφερθείσας αναφοράς σε συγκεκριμένα πρόσωπα

Η Σεισμική λειτουργία έχει επίσης τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει αυτοδιάγνωση σε περίπτωση που οι προαναφερθείσες ενέργειες δεν πραγματοποιηθούν για οποιονδήποτε λόγο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της απώλειας εξωτερικής επικοινωνίας, ένας εξωτερικός διακομιστής που έχει ήδη ενημερωθεί για το σεισμικό γεγονός, θα ενημερώσει το απαραίτητο προσωπικό ότι η επικοινωνία με την γέφυρα είναι αδύνατη και θα παρέχει την πιο πρόσφατη ενημέρωση σχετικά με την ταξινόμηση του γεγονότος.

Η προσέγγιση των γεγονότων που σχετίζονται με τον άνεμο από το σύστημα παρακολούθησης είναι παρόμοια με την σεισμική λειτουργία. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές:

- Η δήλωση ενός γεγονότος που σχετίζεται με τον άνεμο βασίζεται όχι μόνο η ένταση του ανέμου (όριο ταχύτητας του ανέμου), αλλά και στην μετρούμενη απόκριση συγκεκριμένων στοιχείων (π.χ. καλώδια). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για διάφορα αεροδυναμικά φαινόμενα, η απόκριση μιας κατασκευής δεν είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου
- Δεδομένου ότι η διάρκεια ενός γεγονότος που σχετίζεται με τον άνεμο μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν ενός σεισμικού γεγονότος (υπάρχουν ήδη καταγεγραμμένες περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου ήταν πάνω από 20 m/sec για περισσότερο από 48 ώρες), είναι απαραίτητο να μειωθεί η συχνότητα συλλογής και να αυξηθεί το μήκος των εγγραφών (δηλαδή οι ιδιοσυχνότητες του καταστώματος που μπορούν να διεγερθούν δεν ξεπερνούν τα 2 Hz και οι ιδιομορφές των καλωδίων που αντιστοιχούν σε συχνότητες πάνω από 10 Hz έχουν αμελητέα συμβολή στο εύρος ταλάντωσης). Η μείωση αυτή του όγκου των δεδομένων είναι αναγκαία για την αυτοματοποιημένη επεξεργασία και καταγραφή τους σε πραγματικό χρόνο.

### 3.2.7 Συντήρηση

Η λειτουργία ενός συστήματος δομικής παρακολούθησης που θα πρέπει να παρέχει σημαντικά και λογικά δεδομένα ανά πάσα στιγμή, απαιτεί την έντονη και συνεχή εποπτεία του. Τα κύρια σημεία για τη διασφάλιση της ορθής και συνεχούς λειτουργίας του συστήματος παρακολούθησης της γέφυρας Ρίου Αντιρρίου είναι [26]:

- Συνεχής παρακολούθηση των συλλεγόμενων στοιχείων.
- Καταγραφή κάθε πιθανής δυσλειτουργίας και μέτρηση κάθε υποβάθμισης της ποιότητας.
- Η συνεχής διαθεσιμότητα όλων των απαιτούμενων ανταλλακτικών στην αποθήκη.
- Άμεση ενημέρωση εμπειρογνομώνων για την αντιμετώπιση και επισκευή πιθανών προβλημάτων.
- Μηχανογραφημένα ετήσια συντήρηση του συστήματος παρακολούθησης (επίπεδα 1 έως 3, δείτε ΕΟΚ. 3.2) και εξειδικευμένη συντήρηση κάθε 5 χρόνια, συμπεριλαμβανομένης και βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια του 2010, το συνολικό ποσοστό μη-διαθεσιμότητας του συστήματος ήταν μικρότερο από 0,5%.

### 3.2.8 Μελλοντικές βελτιώσεις

Επιπρόσθετα στις ήδη αναφερθέντες ενέργειες συντήρησης, είναι σημαντικό να προχωρήσουμε με τις απαραίτητες αναβαθμίσεις του συστήματος, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των δεδομένων και η αξιοπιστία του συστήματος. Μια νέα αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης είναι υπό εξέλιξη και θα εφαρμοστεί σταδιακά στο εγγύς μέλλον. Μερικά κρίσιμα σημεία είναι τα εξής [26]:

- Βελτίωση του συγχρονισμού δεδομένων (λιγότερο από 1 fuse ανοχή), μέσω της τεχνολογίας GPS.
- Ανακατανομή των υπολογιστικών εργασιών πάνω σε διαφορετικά υπολογιστικά συστήματα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος αστοχίας και να αυξηθεί η ευελιξία των συστημάτων για πρόσθετη εγκατάσταση αισθητήρων και πιο λεπτομερή αυτοματοποιημένη επεξεργασία.
- Βελτίωση της πολιτικής εξομάλυνσης του σήματος με την ενσωμάτωση καταλληλότερων συστημάτων φίλτρων χαμηλών συχνοτήτων και αύξηση της συχνότητας καταγραφής των δεδομένων.

## 3.3. ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΡΙΟΥ – ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ

### 3.3.1. Εισαγωγή

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στη Γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου ώστε να συλλεχθούν πληροφορίες για το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης του έργου και τα σημαντικότερα υποσυστήματα και μονάδες του. Η παράγραφος αυτή προέκυψε από το πλήθος των πληροφοριών που συνέλεξαν οι σπουδάστριες κατά τη λεπτομερή παρουσίαση και επεξήγηση του συστήματος από το μηχανικό της Γέφυρας Α.Ε. κύριο Χρήστο - Παναγιώτη Παναγή. Το φωτογραφικό υλικό προέρχεται επίσης από την επίσκεψη στο έργο και ελήφθη από τις συντάκτριες της πτυχιακής εργασίας.

### 3.3.2. Έλεγχος και παρακολούθηση των καλωδίων

Το κατάστρωμα της γέφυρας «συγκρατείται» από τα καλώδια, τα οποία από τη φύση τους έχουν πάρα πολύ μικρή απόσβεση, οπότε είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε ταλαντώσεις. Λόγω του γεγονότος αυτού αλλά και της εξαιρετικής σημασίας τους για την ομαλή στατική λειτουργία του φορέα είναι επιβεβλημένη η παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους.

Υπάρχουν συγκεκριμένα καλώδια που επιλέγονται και παρακολουθούνται. Από κάθε πυλώνα «ξεκινούν» 23 καλώδια ανά πλευρά του καταστρώματος, οπότε ο συνολικός αριθμός τους είναι  $23 \times 4 \times 4 = 368$  καλώδια. Η αρχική ιδέα ήταν η παρακολούθηση όλων των καλωδίων, προφανώς όμως το κόστος θα ήταν πολύ μεγάλο. Οπότε στο σχεδιασμό του συστήματος έγινε προσπάθεια να αναγνωρισθούν κάποια καλώδια, τα οποία θα έχουν παρόμοια συμπεριφορά ώστε να μην απαιτηθεί η παρακολούθηση όλων.

Σε κάθε καλώδιο που επιλέχθηκε με γνώμονα τη συμπεριφορά του, δηλαδή τις μορφές της ταλάντωσής του και τη σχέση τους με τα γειτονικά καλώδια, τοποθετήθηκε ένας

επιταχυνσιογράφος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Οι αρχές λειτουργίας των οργάνων αυτών παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο επιταχυνσιογράφος είναι ένα όργανο που μετράει την επιτάχυνση σε τρεις διευθύνσεις. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η πρώτη διεύθυνση είναι κάθετα στο καλώδιο, η δεύτερη είναι εγκάρσια και η τρίτη στη διεύθυνσή του καλωδίου. Στη διεύθυνση του καλωδίου δεν υπάρχει λόγος να μετράμε επιτάχυνση, όμως επειδή οι επιταχυνσιογράφοι είναι 3-D, αναγκαστικά μετράται και αυτή. Η διαμήκης επιτάχυνση των καλωδίων δεν έχει χρησιμοποιηθεί για κανενός είδους ανάλυση στη Γέφυρα Ρίου - Αντιρρίου.

Σημαντικές για την επιλογή της θέσεις του οργάνου είναι οι ιδιομορφές ταλάντωσης του καλωδίου στο οποίο τοποθετείται, οι οποίες λήφθηκαν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση του συστήματος δομικής παρακολούθησης. Ο αριθμός των ιδιομορφών κάθε καλωδίου είναι μεγάλος. Για παράδειγμα, η πρώτη ιδιομορφή αντιπροσωπεύει την ταλάντωσή του σα χορδή, η δεύτερη ως ένα πλήρες ημίτονο και η τρίτη ως ένα ημίτονο και μισό. Αν για να περιγράψουμε επαρκώς τις ταλαντώσεις του καλωδίου μας ενδιαφέρουν οι δέκα πρώτες ιδιομορφές, θεωρούμε δηλαδή ότι μπορούν να δώσουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα, διαλέγουμε να μετρήσουμε την επιτάχυνση σε ένα τέτοιο σημείο ώστε να μη βρίσκεται πάνω σε κοιλιά, δηλαδή σε κόμβο ιδιομορφής. Γιατί, αν π.χ. επιλέξουμε να μετρήσουμε ακριβώς στη μέση θα αντιμετωπίσουμε δύο σημαντικές δυσκολίες: (α) λόγω του μήκους του καλωδίου η θέση του οργάνου θα ήταν τόσο ψηλά που δε θα επέτρεπε την εύκολη πρόσβαση σε αυτό, με σκοπό τη συντήρηση ή αντικατάστασή του και (β) αν το καλώδιο ταλαντωνόταν στη δεύτερη ιδιομορφή του που έχει το σχήμα ενός πλήρους ημιτόνου, αυτό το σημείο θα έμενε σταθερό και θα μπορούσαμε να έχουμε μια ταλάντωση για την οποία το σύστημα δεν θα μπορούσε να μας δώσει καμία πληροφορία. Γι' αυτόν τον λόγο, το τοποθετούμε σε μια τέτοια απόσταση που θα μπορούσαμε για ένα εύρος ιδιομορφών που θέλουμε, των οποίων ο αριθμός έχει αποφασισθεί μέσω αναλύσεων, να μην πέφτουμε πάνω σε κόμβο και έτσι να μετρήσουμε με το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης την επίδρασή τους επάνω στην ταλάντωση του καλωδίου χωρίς να «χάνονται» στοιχεία.

Μια σημαντική εφαρμογή των μετρήσεων που λαμβάνονται για τις ταλαντώσεις των καλωδίων ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός πρόσθετου συστήματος για την απόσβεσή τους. Γενικά, υπάρχουν τρεις τρόποι αντιμετώπισης αυτών των ταλαντώσεων. Ο πρώτος τρόπος είναι η τοποθέτηση αποσβεστήρων εσωτερικά, δηλαδή η σύνδεσή τους σε μια πλάκα, στην οποία υπάρχει ένα υλικό το οποίο μπορεί να αποσβέσει ενέργεια και αγκυρώνεται πιο πίσω από το καλώδιο, οπότε ουσιαστικά είναι σαν να έχει τοποθετηθεί αποσβεστήρας εσωτερικά των καλωδίων. Ένας δεύτερος τρόπος είναι να βάλουμε έναν αποσβεστήρα εξωτερικά του καλωδίου και ένας τρίτος είναι να συνδεθούν τα καλώδια μεταξύ τους. Με την τελευταία διάταξη παραμένει μειωμένη η απόσβεση του κάθε καλωδίου. Όμως, δεδομένου ότι το κάθε καλώδιο είχε μια ιδιοπερίοδο και μια ιδιοσυχνότητα και αυτά το καθιστούσαν ευαίσθητο σε συγκεκριμένα φαινόμενα, με τη σύνδεσή τους μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύστημα το οποίο είναι πιο δύσκολο να διεγερθεί. Για το σκοπό αυτόν σε συγκεκριμένο ύψος έχουν τοποθετηθεί μεταλλικά δαχτυλίδια στα καλώδια. Θεωρητικά, εάν μόνο μια τέτοια λύση ήταν αποδοτική, θα είχαν πιαστεί τα καλώδια μεταξύ τους και θα είχαν αγκυρωθεί στο κατάστρωμα δημιουργώντας ένα σύστημα δύσκολο να ταλαντωθεί από συγκεκριμένα εξωτερικά φαινόμενα.





**Εικόνα 3.1.** Επιταχυνσιογράφος για την παρακολούθηση των ταλαντώσεων καλωδίου στη Γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου.

Ωστόσο οι μετρήσεις του συστήματος έδωσαν διαφορετική εικόνα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο Ιανουάριος του 2006, όπου σε συγκεκριμένες ημέρες καταγράφηκε σχετικά έντονος άνεμος με ταχύτητα περίπου 100 χλμ/ώρα, σε συνδυασμό με χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα βράδυ παρατηρήθηκαν στα καλώδια πολύ μεγάλες ταλαντώσεις, με αποτέλεσμα μάλιστα κάποια να συγκρούονται μεταξύ τους. Από αυτό λοιπόν, με τη βοήθεια του συστήματος ενόργανης παρακολούθησης, καταλαβαίνουμε ότι πρέπει να υλοποιηθεί κάποια από τις λύσεις πρόσθετης απόσβεσης που είχαν προβλεφθεί. Έτσι, ξεκινάει μια διαδικασία εύρεσης της κατάλληλης λύσης, χρησιμοποιώντας και στοιχεία από τη δομική παρακολούθηση, η οποία περιγράφεται για το συγκεκριμένο φαινόμενο αναλυτικά σε επόμενη ενότητα της πτυχιακής εργασίας.

Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι στο καταστρώμα παρατηρούνται πλήθος φαινομένων, όπου εξαιτίας αυτών αναπτύσσονται αεροδυναμικές ταλαντώσεις. Ένα από αυτά τα φαινόμενα είναι για παράδειγμα η διέγερση, δηλαδή η δόνηση του καταστρώματος σε συχνότητα ίδια με τη συχνότητα των καλωδίων, όπου οι πολύ μικρές μετακινήσεις του καταστρώματος μπορούν να δώσουν πολύ μεγάλες ταλαντώσεις στα καλώδια. Διαφορετικό φαινόμενο είναι η δόνηση του καταστρώματος στη διπλάσια συχνότητα από αυτή των καλωδίων. Χρησιμοποιώντας την ενόργανη παρακολούθηση εξετάστηκαν οι δονήσεις του καταστρώματος εκείνη την ημέρα του Ιανουαρίου και βρέθηκε ότι οι ιδιοσυχνότητες στις οποίες ταλαντωνόταν δεν ήταν ούτε ακριβώς ίδιες με του καλωδίου αλλά ούτε και διπλάσιες. Με αυτόν τον τρόπο κατέληξαν ότι η αιτία του φαινομένου ήταν σε κάποιο βαθμό και ο πάγος εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας. Μέσω των δεδομένων από τις μετρήσεις βγήκε το

συμπέρασμα δηλαδή ότι τα καλώδια πάγωναν και αυτό παραμόρφωνε το σχήμα τους από κυκλικό σε οβάλ, δημιουργώντας την ταλάντωση που δεν ήταν δυνατόν αρχικά να προβλεφθεί.

Το αποτέλεσμα ήταν η κατανόηση του σχεδιασμού και η αναγνώριση της απαιτούμενης ποσότητας της απόσβεσης στα καλώδια. Άρα, πραγματοποιώντας την ανάλυση με βάση τα αποτελέσματα της δομικής παρακολούθησης, βρέθηκε ότι απαιτείται ένας αποσβεστήρας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αφού τοποθετήθηκε, ξεκίνησε μια σειρά από ελέγχους για να παρατηρηθεί εάν αυτή ήταν τελικά η σωστή ποσότητα απόσβεσης. Δημιουργώντας ταλάντωση στο καλώδιο και ελευθερώνοντάς το, παρατηρούταν η εξασθένησή του ώστε να υπολογιστεί η απόσβεσή του.

Η διαδικασία αυτή δεν ήταν εύκολη για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί η διέγερση του καλωδίου στην πρώτη του συχνότητα, οπότε διεγείροντας το γενικά, παίρνουμε την χρονοϊστορία του και εξάγουμε την πρώτη κίνηση ώστε να εκτιμήσουμε τη ζητούμενη μορφή και δεύτερον κάθε σώμα το οποίο κινείται μέσα σε ένα ρευστό όπως είναι ο άνεμος, έχει ούτως ή άλλως απόσβεση. Η αεροδυναμική απόσβεση που έχουν τα καλώδια εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και αυτό συνεπάγεται ότι, δεδομένου ότι όταν πραγματοποιούνται οι έλεγχοι στην πραγματική κατασκευή δεν μπορεί να εξασφαλιστεί η άπνοια, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί ποια ήταν αυτή η απόσβεση για να αφαιρεθεί από αυτή που μετρήθηκε και να καταλήξουμε εάν το καλώδιο στο οποίο πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος, έχει την απόσβεση που θεωρητικά έπρεπε να έχει μαζί με τον αποσβεστήρα.

Η παραπάνω παρουσίαση μιας μόνο κατηγορίας οργάνων του συστήματος δομικής παρακολούθησης ενός πραγματικού έργου εξαιρετικής σημασίας δείχνει με τον καλύτερο τρόπο τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό για να είναι δυνατή η ομαλή λειτουργία του συστήματος, αλλά και τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ύπαρξης και χρήσης του.

### **3.3.3. Όργανα στις θέσεις των πυλώνων και λειτουργία τους**

Στα τοιχώματα των πυλώνων της Γέφυρας, κάτω από τη στάθμη του καταστρώματος έχουν εγκατασταθεί επιταχυνσιογράφοι με στόχο τη μέτρηση των σεισμικών κυρίων επιταχύνσεών τους (Εικ. 3.2).

Η τοποθέτηση των επιταχυνσιογράφων στις θέσεις αυτές και όχι πιο κοντά στο έδαφος, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής της σεισμικής εδαφικής επιτάχυνσης έγινε ώστε, μεταξύ άλλων, να εξυπηρετηθεί και μία επιμέρους απαίτηση για τους αισθητήρες ενός συστήματος δομικής παρακολούθησης. Είναι απαραίτητο οι αισθητήρες να τοποθετούνται σε προσβάσιμα σημεία ώστε να είναι εύκολη η επισκευή ή αντικατάστασή τους. Για παράδειγμα, υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα τα οποία τοποθετούνται σε τρύπες οι οποίες μπορούν να είναι αρκετά μέτρα κάτω από το έδαφος και από τη στιγμή που θα τοποθετηθούν, δεν υπάρχει δυνατότητα επισκευής τους. Γι' αυτό τον λόγο, επιλέχθηκε η μέτρηση της επιτάχυνσης επάνω στον πυλώνα και όχι στο έδαφος, διαλέγοντας έτσι ένα παρόμοιο μέγεθος σε μία όχι τόσο σχετική θέση, ώστε να μην υπάρχει αμφιβολία για την ορθότητα του αποτελέσματος λόγω πιθανής αστοχίας του οργάνου.



**Εικόνα 3.2.** Επιταχυνσιογράφος τοποθετημένος στο εσωτερικό τοίχωμα του πυλώνα M4 της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου, κάτω από ηλεκτρολογικό κουτί διακλάδωσης.

Στις θέσεις των πυλώνων ευρίσκονται και οι μεταλλικές ασφάλειες (fuses, Εικ. 3.3 και 3.4), οι οποίες αποτρέπουν την κίνηση του καταστρώματος κάθετα στον άξονα της γέφυρας υπό την επίδραση των συνήθων πλευρικών φορτίων (άνεμος, σεισμικών κ.α.). Οι ασφάλειες αυτές συμπληρώνονται από αποσβεστήρες οι οποίοι «αναλαμβάνουν» την απόσβεση της ταλάντωσης του καταστρώματος σε ακραίες περιπτώσεις όπου οι πρώτες απελευθερώνονται.

Μια ερώτηση που γεννάται σχετικά με το σχεδιασμό της ασφάλειας είναι πώς μπορούμε να την κάνουμε να απελευθερωθεί σε ίδια δύναμη, και σε εφελκυσμό και σε θλίψη αλλά χωρίς την ολική καταστροφή της. Απλοποιητικά, θεωρούμε ότι το πάνω μέρος είναι ένας σωλήνας όπως και το κάτω, όπου και τα δύο συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός συστήματος οδοντωτών δίσκων. Οπότε σε περίπτωση εφελκυσμού και θλίψης, υπάρχει μια αλληλοεμπλοκή των «δοντιών» τα οποία τα κρατούν τη διάταξη στη θέση της. Όταν η εφελκυστική ή θλιπτική δύναμη (η φόρτιση είναι δυναμική) που εφαρμόζεται ξεπεράσει κάποια όρια, τα «δόντια» θα αστοχήσουν σε διάτμηση και η δύναμη αστοχίας θα είναι ίδια λόγω της διάτμησης ανεξάρτητα με τη διεύθυνση της φόρτισης. Συνεπώς η διάταξη αυτή εξασφαλίζει εν μέρει ότι σε εφελκυσμό και θλίψη θα υπάρχει αστοχία στο ίδιο φορτίο.

Ένα ενδιαφέρον «πρόβλημα» του συστήματος δομικής παρακολούθησης προκύπτει από την «αγκύρωση» των ασφαλειών στο τοίχωμα του πυλώνα, κοντά στη θέση που βρίσκεται ο επιταχυνσιογράφος (Εικ. 3.5). Η ασφάλεια συνδέεται απελευθερώνεται όταν η δύναμη που δέχεται φτάσει τα 10000 kN. Το γεγονός αυτό είναι πιθανόν να επηρεάσει τις μετρήσεις του συστήματος. Στην περίπτωση ενός σεισμού, ο επιταχυνσιογράφος ξεκινάει την μέτρηση και ξαφνικά η ασφάλεια σπάει. Το αποτέλεσμα αυτής της απελευθέρωσης της δύναμης της είναι ότι ο τοίχος στο οποίο είναι τοποθετημένο το όργανο δέχεται στιγμιαία μια μεγάλη δόνηση. Οπότε, ενώ καταγράφονταν μετρήσεις για την επιτάχυνση λόγω σεισμού που μπορεί να ήταν 0.20 έως 0.25g, ξαφνικά προκύπτει ένας παλμός ο οποίος αντιστοιχεί σε 30g.



**Εικόνα 3.3.** Διάταξη των ασφαλειών και των αποσβεστήρων ιξώδους απόσβεσης στον πυλώνα M4 της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου – διακρίνεται η σύνδεση με το κατάστρωμα.



**Εικόνα 3.4.** Διάταξη των ασφαλειών και των αποσβεστήρων ιξώδους απόσβεσης στον πυλώνα M4 της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου – διακρίνεται η σύνδεση με τον πυλώνα.

Είναι λογικό, λοιπόν, ότι δεν δε μπορεί να δοθεί εντολή στον επιταχυνσιογράφο να λαμβάνει μόνο επιταχύνσεις πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Για παράδειγμα, εάν ασκηθεί δύναμη σε μια κατασκευή με πολύ γρήγορο ρυθμό, τότε η επιτάχυνσή της θα είναι αρκετά μεγάλη και αυτό αλλά δεν θα υποστεί κάποια ζημιά. Αυτό οφείλεται στο συχνοτικό περιεχόμενο που έχει η κάθε κίνηση. Η ταλάντωση (shock) αυτή έχει τόσο υψηλή συχνότητα που ουσιαστικά δεν αντιστοιχεί σε καμία μετατόπιση στην κατασκευή ή αν αντιστοιχεί, είναι πάρα πολύ μικρή. Οπότε δομικά δεν προβληματίζει, αλλά, στο συγκεκριμένο πρόβλημα, στη μέτρησή παρατηρείται ότι από μικρή επιτάχυνση προκύπτει ξαφνικά πολύ μεγαλύτερη. Αυτό βέβαια, μπορεί να αφαιρεθεί με διάφορους τρόπους. Σίγουρα όμως είναι πολύ δύσκολο να πούμε στο σύστημα ότι αν ξεπεραστεί αυτόματα αυτό το όριο σημαίνει ότι συμβαίνει ένας δυνατός σεισμός. Υπάρχει περίπτωση να σημαίνει και αυτό, αλλά υπάρχουν κάποιοι παράγοντες οι οποίοι το δυσκολεύουν, και αυτό βάζει τους μηχανικούς στη διαδικασία να σκεφτούν την επίπτωση που θα είχαν. Θα μπορούσε π.χ. να επιλεγεί επιτάχυνση αυτού του μέρους της κατασκευής ίση με το 40% της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ως ενδεικτική ενός πολύ ισχυρού ο σεισμού που αυτόματα θα οδηγεί το σύστημα σε εντολή να κλείσει η γέφυρα. Οπότε όταν η ασφάλεια θα εσπάζε οδηγώντας σε μετρούμενες επιταχύνσεις 30g, αμέσως το σύστημα θα έδινε την εντολή «κλείσε τη γέφυρα – ξεπεράστηκε το 40% του g». Ωστόσο από τις μετρήσεις θα προέκυπτε ότι τελικά το φαινόμενο δεν ήταν σημαντικό. Υπήρχε δηλαδή η επιτάχυνση σαν μέτρηση και φυσικό φαινόμενο, αλλά η ερμηνεία της ήταν διαφορετική.

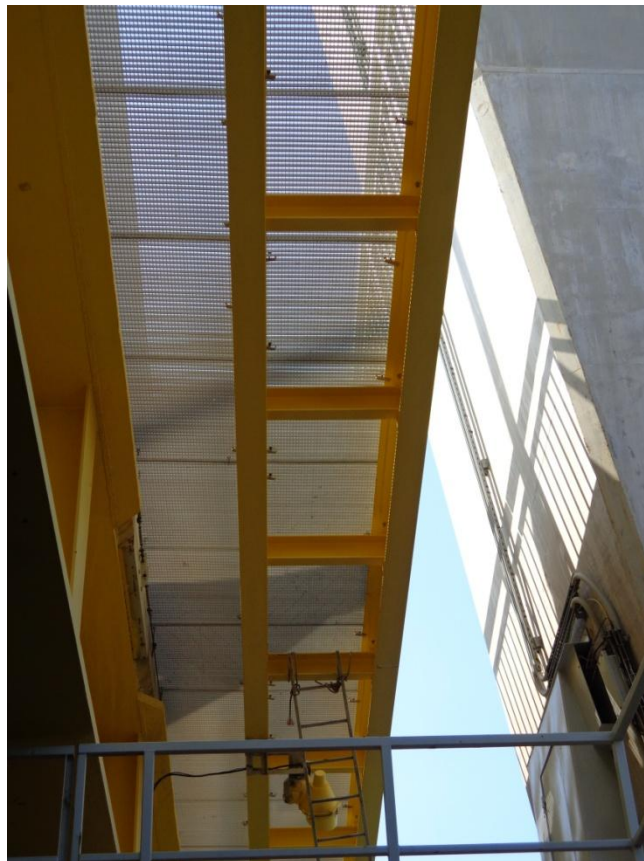
Από το παράδειγμα αυτό προκύπτει πώς απαιτείται προσοχή για τη σωστή ερμηνεία των μετρήσεων του συστήματος δομικής παρακολούθησης ώστε προκύψουν σωστά και χρήσιμα συμπεράσματα και, ακόμα περισσότερο, να εκπαιδευτεί το σύστημα ώστε δίνει σωστούς αυτοματοποιημένους «συναγερμούς» (alerts).

Η ύπαρξη των ασφαλειών επιτρέπει την «εκμετάλλευσή» τους για τη μέτρηση των πλευρικών δυνάμεων λόγω ανέμου. Είναι σημαντικό να καταγράφεται το μέγεθος της οριζόντιας δύναμης που δέχεται το κατάστρωμα λόγω του ανέμου. Το κατάστρωμα συγκρατείται κατά την κάθετη στον άξονά του διεύθυνση σε συγκεκριμένα σημεία μέσω των ασφαλειών, στις οποίες σε περίπτωση ανέμου «καταλήγει» το σύνολο της ανεμοπίεσης. Η πίεση αυτή εκτιμάται βάσει της δύναμης που παραλαμβάνουν οι ασφάλειες, επειδή υπάρχουν και στους τέσσερις πυλώνες και, συγχρόνως, είναι γνωστή η πρόβλεψη της μελέτης από πριν σε σχέση με τον άνεμο. Στις ασφάλειες υπάρχουν δύο strain gages αριστερά και δεξιά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5, για να λαμβάνουν μετρήσεις της παραμόρφωσης στη διαμήκη διεύθυνσή τους, από τις οποίες προκύπτει η ζητούμενη φόρτιση λόγω του ανέμου.

Σχετικά με το σχεδιασμό του πυλώνα αξίζει να αναφέρουμε ότι ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στους βραχίονες έχει προβλεφθεί ως τρόπος απορρόφησης της ενέργειας. Όμως, στην περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού, το κατάστρωμα θα μπορούσε να απελευθερωθεί και να μετακινηθεί εγκάρσια. Επειδή δεν είναι επιθυμητή η επιπλέον επιβάρυνση των βραχιόνων με χτυπήματα από το κατάστρωμα, σε κάθε βραχίονα υπάρχει μια μεταλλική κατασκευή (Εικόνα 3.5) που αποτελείται από δοκάρια τα οποία είναι πολύ πιο όλκιμα ώστε να μην προκαλέσουν τόση ζημιά στον πυλώνα και στο βραχίονα, όση θα προκαλούσε η πλάκα σκυροδέματος εάν συνεχιζόταν έως την άκρη του καταστρώματος στις θέσεις αυτές.



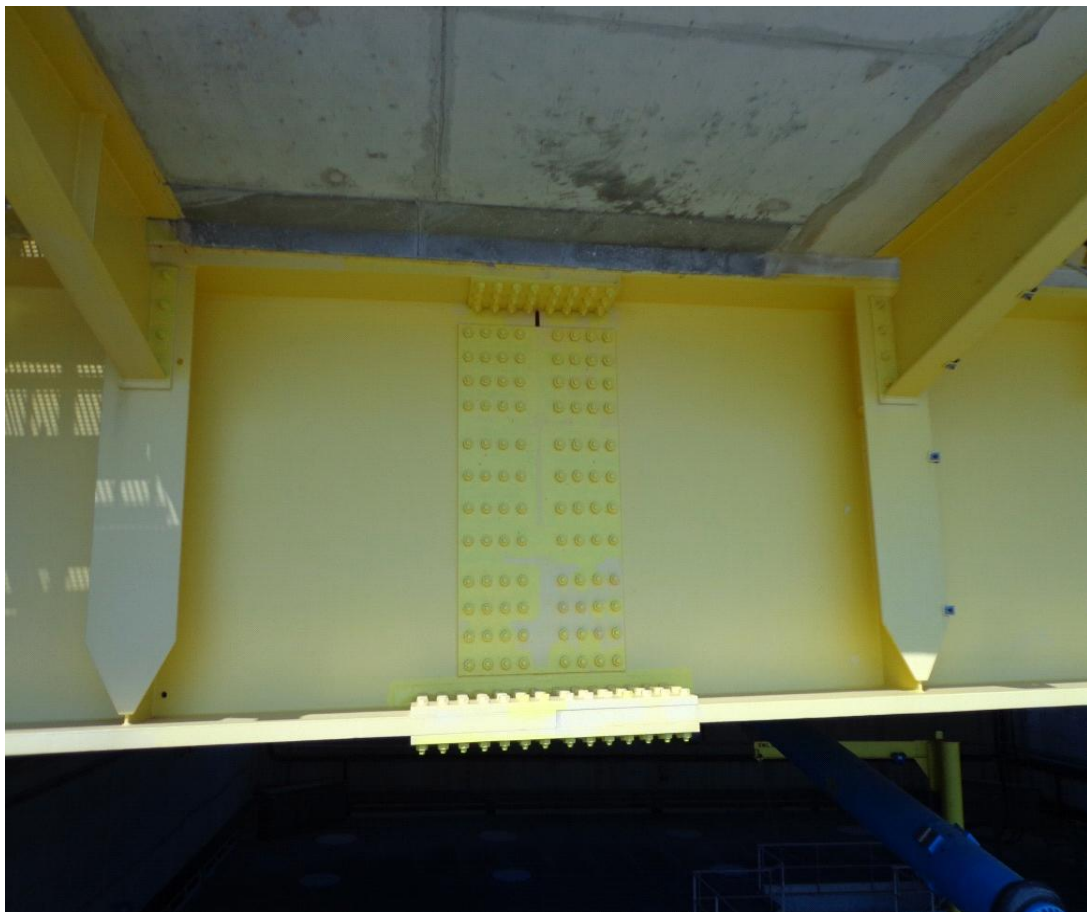
**Εικόνα 3.5.** Μηκυσιόμετρο (strain gage) τοποθετημένο σε ασφάλεια (fuse) του πυλώνα M4 της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου με στόχο τη μέτρηση της ανεμοπίεσης.



**Εικόνα 3.6.** Μεταλλική κατασκευή που στοχεύει στην προστασία του βραχίονα από την πρόσκρουση του καταστρώματος σε αυτόν μετά την απελευθέρωση των ασφαλειών.

### 3.3.4. Μέτρηση και παρακολούθηση των παραμορφώσεων του καταστρώματος

Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι μία σύμμικτη κατασκευή που αποτελείται από μεταλλικές κύριες δοκούς, πάνω στις οποίες «συγκολλάται» η πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ακριβώς κάτω από την πλάκα σκυροδέματος που αποτελεί τμήμα του οδοστρώματος (Εικ. 3.7). Τα καλώδια της γέφυρας συνδέονται μέσω μιας μεταλλικής διάταξης στην τελική (ανώτερη) επιφάνεια του καταστρώματος σε κάποια δηλαδή έστω μικρή απόσταση από τα στοιχεία του φορέα (δοκούς και πλάκες). Δηλαδή, στο συγκεκριμένο σημείο ασκείται μεγάλη δύναμη (του καλωδίου) και λόγω της μικρής γωνίας εκτροπής υπάρχει το ενδεχόμενο να αναπτυχθούν ροπές οδηγώντας σε πολύ μεγάλες τάσεις στις δύο πλευρές του καταστρώματος. Ο μοχλοβραχίονας κατά τη διεύθυνση του καταστρώματος έχει μήκος περίπου 5 cm και για το λόγο αυτόν, δεδομένου ότι ο φορέας είναι πολύ δύσκαμπτος σε αυτή τη διεύθυνση, οι επιπτώσεις της ροπής που προκύπτει δεν είναι σημαντικές. Ωστόσο το κατάστρωμα είναι σχετικά εύκολο να στραφεί δεξιά και αριστερά, δηλαδή κάθετα στον άξονα της γέφυρας στην περίπτωση διαφορεικών τάσεων που οφείλονται σε διαφορετικές ροπές στις δύο πλευρές του. Η παρακολούθηση του φαινομένου αυτού από το σύστημα είναι απαραίτητη.



**Εικόνα 3.7.** Λεπτομέρεια του σύμμικτου καταστρώματος της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου – διακρίνεται η αποκατάσταση της συνέχειας της μεταλλικής κύριας δοκού.

Για να το παρακολουθηθεί το φαινόμενο αυτό, τοποθετήθηκαν δύο ροζέτες από μηχανοσυστήματα σε απέναντι θέσεις σε κάθε πλευρά όπως φαίνεται στην Εικ. 3.8. Έτσι, γίνεται η μέτρηση των παραμορφώσεων και στις δύο πλευρές, και προκύπτει εάν και πού υπάρχει ροπή μετρώντας πως μεταβάλλεται η τάση στη μία πλευρά σε σχέση με την άλλη.

Ωστόσο στην περίπτωση αυτή προέκυψε ένα άλλο θέμα που αφορά το σχεδιασμό του συστήματος δομικής παρακολούθησης του έργου. Το μηχανοσυστήμα μετράει ουσιαστικά το συνολικό μέγεθος της παραμόρφωσης σε ένα σημείο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ενδιαφέρει αυτό, αλλά μόνο η παραμόρφωση που προκύπτει λόγω της δύναμης του καλωδίου. Συνεπώς, δεν ενδιαφέρει ούτε η παραμόρφωση λόγω της θερμοκρασίας γιατί είναι ίδια και στις δύο πλευρές, και με κάποιο λόγο πρέπει να αφαιρεθεί η επίδρασή της στη μέτρηση. Αυτό γίνεται ως εξής: τοποθετείται ένας αισθητήρας πάνω στην επιφάνεια που ζητείται να μετρηθεί η παραμόρφωση και πάνω σε μια επιφάνεια που δεν έχει τάση, π.χ. στην πλάκα του οδοστρώματος, και συνδέονται σταθερά δημιουργώντας με ηλεκτρικό τρόπο μια γέφυρα, εξισορροπώντας έτσι το φαινόμενο. Επειδή θεωρείται ότι η πλάκα έχει την ίδια θερμοκρασία με την κατασκευή που μετράμε, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει και την ίδια παραμόρφωση λόγω θερμοκρασίας. Άρα τελικά, με αυτό τον τρόπο μπορεί να αφαιρεθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στη μέτρηση.



**Εικόνα 3.8.** Ροζέτα μηχανοσυστημάτων για τη μέτρηση των παραμορφώσεων στη θέση αγκύρωσης καλωδίου στη γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου.



### 3.3.5. Τροφοδοσία και προστασία των οργάνων

Μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού ενός συστήματος δομικής παρακολούθησης είναι η εξασφάλιση της τροφοδοσία και της προστασίας των διαφόρων οργάνων και αισθητήρων από επιβλαβή φαινόμενα.

Η τροφοδοσία των οργάνων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα ή με σταθερή τάση. Τα περισσότερα όργανα λειτουργούν με σταθερή τάση, η οποία είναι και η προτιμότερη. Όμως, η σταθερή τάση παρουσιάζει ένα πρόβλημα. Όταν «διανύσει» μεγάλες αποστάσεις, υπάρχουν αναγκαστικά απώλειες. Οπότε, σε κάθε θέση της γέφυρας κοντά σε αισθητήρες τοποθετούνται συγκεκριμένα «ηλεκτρολογικά κουτιά» που τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα και περιέχουν, μεταξύ άλλων, έναν μετασχηματιστή ο οποίος δίνει συνεχή τάση στα μηκυνσιόμετρα, στον επιταχυνσιογράφο και πιθανόν σε δύο αισθητήρες θερμοκρασίας κάτω από το κατάστρωμα που βρίσκονται κοντά στη θέση τους. Ένα τέτοιο ηλεκτρολογικό κουτί του συστήματος παρακολούθησης της γέφυρας που βρίσκεται κοντά σε αισθητήρες παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.9. Με τη χρήση τους, μειώνονται κατά πολύ οι απώλειες λόγω απόστασης. Επίσης, αξιοποιείται και σαν κουτί διακλάδωσης, δηλαδή στέλνει ρεύμα και συγκεντρώνει το σήμα από μια οικογένεια αισθητήρων, το οποίο αποστέλλεται στον πυλώνα όπου εκεί γίνεται η καταγραφή.



**Εικόνα 3.9.** Ηλεκτρολογικό κουτί διακλάδωσης, μέρος του συστήματος δομικής παρακολούθησης της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου.

Το κουτί διακλάδωσης περιλαμβάνει και μια άλλη αναβάθμιση, η οποία έγινε στην πορεία και αφορά το σύστημα δομικής παρακολούθησης. Τα ηλεκτρικά όργανα είναι ευαίσθητα και όταν βρίσκονται σε ένα εργαστήριο είναι πολύ εύκολο να ελαχιστοποιήσεις

τους παράγοντες που μπορούν να τα καταστρέψουν. Όταν όμως είναι εκτεθειμένα υπάρχει ένας παράγοντας που είναι οι κεραυνοί, οι οποίοι μπορούν να τα καταστρέψουν. Ωστόσο, δεν υπάρχει περίπτωση να χτυπήσει κεραυνός απευθείας το όργανο. Όμως, μπορεί να χτυπήσει οπουδήποτε αλλού και μέσω του κυκλώματος τροφοδοσίας ρεύματος να «φτάσει» μια τάση π.χ. 5000 – 6000 volts στο όργανο και να το καταστρέψει. Είναι πιθανό τα δύο πρώτα χρόνια λειτουργίας της γέφυρας να είχαν καταστραφεί κάποιοι επιταχυνσιογράφοι λόγω αυτού του φαινομένου. Βέβαια αυτό δε μπορεί να είναι γνωστό με βεβαιότητα, γιατί δεν υπήρχε ξεκάθαρη ένδειξη ότι καταστράφηκε ένα όργανο από κεραυνό, απλά στο έλεγχο που γινόταν, διαπιστωνόταν ότι κάποια συσκευή δε μετράει. Οπότε προστέθηκε στο ηλεκτρολογικό σύστημα ένα κύκλωμα, το οποίο εάν αναγνωρίσει κάποια τάση πάνω από ένα όριο έρχεται και ουσιαστικά την εκπαιδύει προς το καλώδιο γείωσης, ούτως ώστε να προφυλάξει το όργανο από αυτή την τάση. Τέτοια συστήματα τοποθετήθηκαν σε πάρα πολλά σημεία, δηλαδή σε κάθε κόμβο του συστήματος δομικής παρακολούθησης. Με τον τρόπο αυτό προστατεύονται όλα τα συνδεδεμένα στον κόμβο όργανα από τις υψηλές τάσεις που προκαλούν οι κεραυνοί.

### **3.3.6. Συλλογή και καταγραφή των δεδομένων**

Το καταγραφικό σύστημα είναι το σημείο στο οποίο συνδέονται τα καλώδια που έρχονται από κάθε αισθητήρα ώστε να ξεκινήσει η καταγραφή και έπειτα η ψηφιοποίηση τους, η μετατροπή δηλαδή του αναλογικού σήματος που λαμβάνεται σε αριθμούς. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται πριν μεταφερθούν τα δεδομένα στο κέντρο ελέγχου. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα κέντρο συλλογής και καταγραφής των δεδομένων σε κάθε πυλώνα της γέφυρας.

Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται το καταγραφικό σύστημα που βρίσκεται στον πυλώνα M4 της Γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου. Το σύστημα αποτελείται από έναν υπολογιστή, ο οποίος συνδέεται κανονικά στο internet, έχει θύρες USB και πραγματοποιεί την επεξεργασία. Αφού γίνει η επεξεργασία, καταγράφει τα δεδομένα, συνδέεται στο εσωτερικό δίκτυο της γέφυρας, και μέσω του server που βρίσκεται στο κτίριο, μπορούν να αποθηκευθούν μετρήσεις και να δημιουργηθούν τα απαραίτητα αρχεία ιστορίας. Το συγκεκριμένο σύστημα καταγράφει και επεξεργάζεται οτιδήποτε βρίσκεται κοντά στον πυλώνα M4, δηλαδή χρησιμοποιεί δεδομένα από επιταχυνσιογράφους, μετρήσεις θερμοκρασίας κλπ. Αντίστοιχα συστήματα υπάρχουν και στους άλλους τρεις πυλώνες της γέφυρας.

### **3.3.7. Συμπερασματικές Παρατηρήσεις**

Συμπερασματικά, διαπιστώνουμε ότι ακόμα και η τοποθέτηση των καταγραφικών συσκευών που αποτελούν μέρη ενός συστήματος δομικής παρακολούθησης έχει δυσκολίες και υπάρχουν παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι θα μετρούνται όλα τα απαιτούμενα μεγέθη και το σύστημα θα «συμπεριφέρεται» σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Στην περίπτωση της γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου τέτοιες παράμετροι ήταν π.χ. τα καλώδια που θα δεχθούν επιταχυνσιογράφους και η θέση τους σε αυτά. Ωστόσο, η λειτουργία των οργάνων αυτών επέτρεψε τη μετέπειτα βελτίωση του σχεδιασμού του έργου, κάτι που δε θα ήταν τόσο εύκολο χωρίς τη δομική παρακολούθηση.



**Εικόνα 3.10.** Καταγραφικό σύστημα που επεξεργάζεται τα δεδομένα των αισθητήρων που βρίσκονται στην «περιοχή» του πυλώνα M4 της γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΧΥΡΩΝ ΑΝΕΜΩΝ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο λεπτομερής σχεδιασμός της ανωδομής έναντι των ταλαντώσεων που προκαλούνται από τους ανέμους, ήταν πολύ σημαντικός προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά αεροδυναμικά φαινόμενα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστάθεια του καταστρώματος αλλά και των καλωδίων. Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο σχεδιασμός των καλωδίων, όπου αεροδυναμικά προβλήματα μπορούν να προκύψουν λόγω της πολύ χαμηλής εγγενούς απόσβεσης της κατασκευής που προκύπτει από την υψηλή τάση και είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό των καλωδιωτών γεφυρών. Οι θεωρητικές μελέτες που απαιτούνται, πρέπει να συμπληρωθούν με πραγματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις (ειδικά στα πρώτα χρόνια λειτουργίας του έργου), που, στην περίπτωση της γέφυρας Ρίου - Αντιρρίου δόθηκαν από το σύστημα παρακολούθησης και επί τόπου παρατηρήσεις αντιστοίχως. Η ανάλυση των πραγματικών γεγονότων με ισχυρούς ανέμους, έδωσε σημαντικές ενδείξεις για τη δομική συμπεριφορά, επιτρέποντας μια καλύτερη εκτίμηση του πιθανού κινδύνου που έπρεπε να αντισταθμιστεί. Τα αποτελέσματα τέτοιων αναλύσεων δημοσιεύθηκαν από τους Papanikolas, Stathopoulos-Vlaminis, Panagis, Grillaud και Flamand [26] και παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας.

#### 4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΥ

Η Γέφυρα Ρίου - Αντιρρίου περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών καλωδίων. Οι βασικές δυναμικές ιδιότητες παρουσιάζονται για 4 χαρακτηριστικά καλώδια. Αξιολογούνται οι επιδράσεις των διάφορων αεροδυναμικών φαινομένων στην απόκριση του καλωδίου, καθώς και οι αναγκαίες δράσεις που πρέπει να ληφθούν για την άμβλυση των αναμενόμενων ταλαντώσεων.

##### 4.2.1 Στοιχεία δυναμικής των καλωδίων

Οι ιδιομορφές στο οριζόντιο επίπεδο (εγκάρσιες) είναι ημιτονοειδείς με συχνότητα σχετική με το εφελκυστικό φορτίο  $T$ , τη γραμμικά κατανομημένη μάζα  $m$  και το μήκος  $L$  σύμφωνα με την προσεγγιστική εξίσωση:

$$n_k = \frac{k}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1)$$

Λόγω του φαινομένου της «κρέμασης», η πρώτη ιδιομορφή στο κάθετο επίπεδο είναι σχεδόν ημιτονοειδής με συχνότητα που προκύπτει από την Εξ. (2):

$$n_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T \left( 1 + \frac{EA \pi^2 s^2}{T 2L^2} \right)}{m}} \quad (2)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας, A η διατομή και s η κάθετη κρέμαση του καλωδίου.

Η κρέμαση κοντά στη μέση έκταση δίνεται από την Εξ. (3):

$$s = \frac{4mgL^2 \cos a}{\pi^2 T} \quad (3)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και a η κύρια κλίση καλωδίου.

Τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων αντιπροσωπευτικών καλωδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1.** Κύρια χαρακτηριστικά των αντιπροσωπευτικών καλωδίων [26].

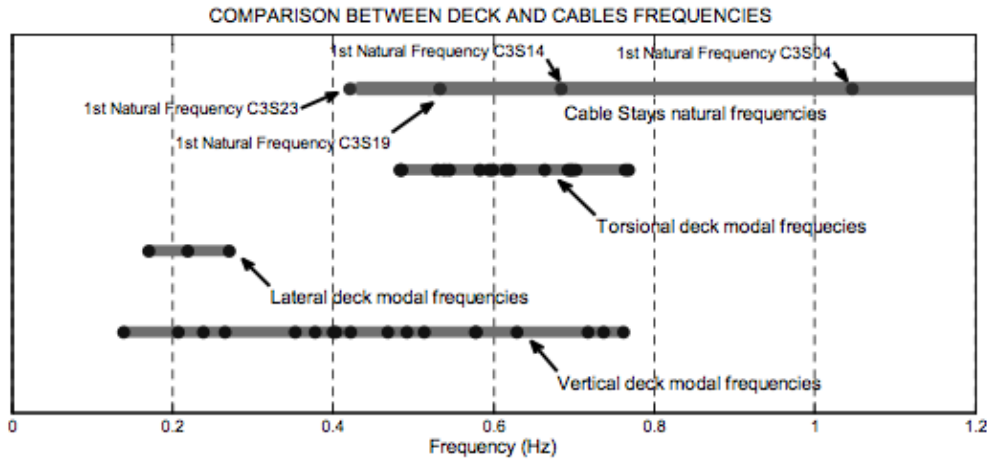
Καλώδιο	Αρ. νημάτων	Μήκος (m)	Έκταση (cm <sup>2</sup> )	Μάζα (kg/m)	Τάση (kN)	Κλίση (deg)	1 <sup>η</sup> κάθ. Συχν. (Hz)	1 <sup>η</sup> ορ. Συχν. (Hz)
C3S23	70	286.2	105.0	97.1	6023	20.5	0.532	0.435
C3S19	59	239.4	88.5	81.4	5316	23.0	0.605	0.533
C3S14	47	182.5	70.5	65.2	4063	28.5	0.741	0.684
C3S04	43	87.0	64.5	59.8	1980	70.0	1.066	1.046

Μια σύγκριση μεταξύ των αναμενόμενων συχνοτήτων στο κατάστρωμα (για διάφορες ιδιομορφές) και την αναμενόμενη 1<sup>η</sup> φυσική συχνότητα των καλωδίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1, όπου είναι ξεκάθαρο ότι τα μακρύτερα καλώδια εμφανίζουν ίδιο συχνοτικό περιεχόμενο με τις υψηλότερες ιδιομορφές του καταστρώματος.

Ένα σημαντικό γεγονός σχετικά με τα καλώδια είναι η πολύ χαμηλή δομική απόσβεση  $\xi_s$ . Για τη γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου εκτιμάται ότι το  $\xi_s$  μεταβάλλεται από μακριά σε κοντά καλώδια σύμφωνα με την Εξ. (4):

$$\xi_s = -6 \cdot 10^{-4} \cdot L + 0.24 \quad (4)$$

απ' όπου προκύπτει  $\xi_s = 0.068\%$  για μακρύτερο και  $\xi_s = 0.193\%$  για το κοντύτερο καλώδιο.



**Εικόνα 4.1.** Σύγκριση ιδιοσυχνοτήτων του καταστρώματος με την 1η φυσική ιδιοσυχνότητα των καλωδίων [26].

Ωστόσο, μαζί με τη δομική απόσβεση παρουσιάζεται και η αεροδυναμική απόσβεση λόγω υψηλών ταχυτήτων ανέμου  $\xi_a$ , που είναι ανάλογη προς την ταχύτητα του ανέμου  $U$  (όταν θεωρούνται απόντα συγκεκριμένα αεροδυναμικά φαινόμενα) και υπολογίζεται κατευθείαν από την Εξ. (5α) για ιδιομορφές παράλληλες και από την Εξ. (5β) για ιδιομορφές κάθετες στην διεύθυνση του ανέμου.

$$\xi_a = \frac{\rho U D C_d}{4\pi m n_k} \quad (5\alpha)$$

$$\xi_a = \frac{\rho U D C_d}{8\pi m n_k} \quad (5\beta)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα,  $D$  η διάμετρος των καλωδίων και  $C_d$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας.

Για την ταχύτητα ισχυρού ανέμου (πάνω από 15 m/sec) αξίζει να αναφερθεί ότι η αεροδυναμική απόσβεση είναι επικρατούσα και ιδίως για 30 m/sec το  $\xi_a$  είναι 5 με 12 φορές μεγαλύτερο από το  $\xi_s$ .

#### 4.2.2 Παραμετρική διέγερση και φαινόμενα στροβιλισμού

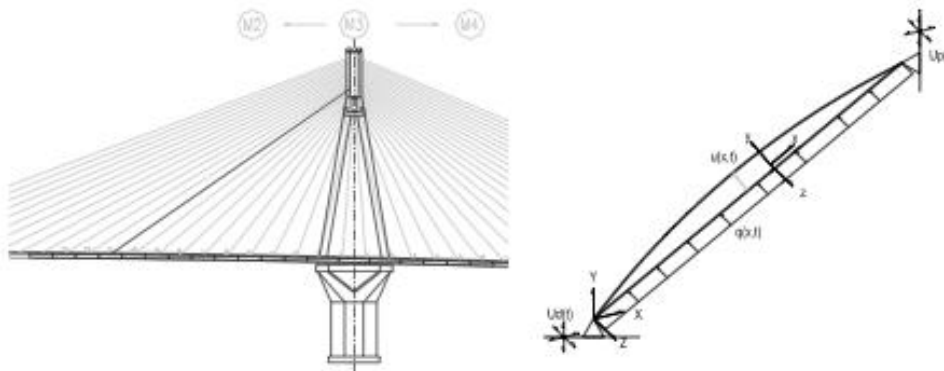
Η διαδικασία της παραμετρικής διέγερσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη των δονήσεων των καλωδίων στη γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου καθώς, για ένα ευρύ αριθμό περιπτώσεων, η 1<sup>η</sup> φυσική ιδιοσυχνότητα των καλωδίων βρίσκεται κοντά στις συχνότητες που αντιστοιχούν στις ανώτερες ιδιομορφές του καταστρώματος, όπως έχει ήδη παρουσιασθεί στην Εικόνα 4.1.

Για την εκτίμηση του πλάτους ταλάντωσης των καλωδίων, είναι σημαντικό να υπολογιστεί η απόκριση του καταστρώματος και των πυλώνων (όπου τα καλώδια αγκυρώνονται), για διαφορετικές περιπτώσεις ταχύτητας του ανέμου. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από την ανάλυση για το φαινόμενο στροβιλισμού του

καταστρώματος που περιλάμβανε 15 περιπτώσεις ανέμου. Από αυτές, μόνο οι 5 περιπτώσεις μελετήθηκαν σχετικά με τη διέγερση των καλωδίων, συν την περίπτωση της ακραίας ταχύτητας του ανέμου [26]:

- No1  $U(m/s)=5.90$  (αντιστοιχεί στη χαμηλότερη απόσβεση της ιδιομορφής 1)
- No3  $U(m/s)=10.0$  (αντιστοιχεί στη χαμηλότερη απόσβεση της ιδιομορφής 5)
- No6  $U(m/s)=15.9$  (αντιστοιχεί στη χαμηλότερη απόσβεση της ιδιομορφής 9)
- No10  $U(m/s)=19.7$  (αντιστοιχεί στη χαμηλότερη απόσβεση της ιδιομορφής 13)
- No15  $U(m/s)=21.7$  (αντιστοιχεί στη χαμηλότερη απόσβεση της ιδιομορφής 18)
- Max  $U(m/s)=50.0$  (αντιστοιχεί στην ακραία ταχύτητα του ανέμου)

Επιπλέον, το άμεσο αποτέλεσμα του φαινομένου του στροβιλισμού στα καλώδια υπολογίστηκε προκειμένου να εκτιμηθεί το τελικό πλάτος ταλάντωσής τους. Η τελική διαμόρφωση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2.



**Εικόνα 4.2** Διαμόρφωση του προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική μελέτη της απόκρισης των καλωδίων. [26]

Η ανάλυση της απόκρισης που προέκυψε από την παραμετρική διέγερση και τα φαινόμενα στροβιλισμού στο κατάστρωμα έδειξε ότι το εύρος ταλάντωσης, ακόμη και για τους μέτριους ανέμους ( $15.9m/s$ ) ήταν αρκετά υψηλό (πάνω από  $800mm$ ) ειδικά για μακρά καλώδια. (#16 και πάνω). Αυτό οφείλεται κυρίως στην παραμετρική διέγερση, ενώ η επιρροή στροβιλισμού μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η προσθήκη επιπλέον απόσβεσης (που φτάνει το  $\delta=3\%$ ) μέσω κατάλληλων διατάξεων περιορίζει σημαντικά το εύρος ταλάντωσης σε περίπου  $300mm$ . Ακόμα και αν οι διατάξεις απόσβεσης βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση των καλωδίων, πρέπει να αναφερθεί ότι μόνο η «μετατόπιση» της ιδιοσυχνότητάς τους μέσω σύνδεσής τους θα ήταν πλήρως αποδοτική.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα ενσωματώθηκαν στην κατασκευαστική διαμόρφωση των καλωδίων, όπου έγιναν οι απαραίτητες προσαρμογές προκειμένου να καταστεί εφικτή η εγκατάσταση των εξωτερικών υδραυλικών διατάξεων απόσβεσης (EHD) για τα καλώδια #11 έως #23 ή/και των εσωτερικών υδραυλικών διατάξεων απόσβεσης (IHD) για τα καλώδια #1 έως #10 και διατάξεων σύνδεσης, αν κρινόταν απαραίτητο. Η εγκατάσταση των προαναφερθέντων διατάξεων απόσβεσης θα εφαρμοζόταν εάν η πραγματική συμπεριφορά των καλωδίων στους ισχυρούς ανέμους δεν ήταν ικανοποιητική. Ωστόσο, οι κατάλληλες προβλέψεις όπως τα σημεία αγκυρώσεων στο κατάστρωμα και τα καλώδια είχαν ληφθεί υπόψη κατά την διάρκεια σχεδιασμού/κατασκευής. Ο λεπτομερής σχεδιασμός των

βελτιώσεων αναθεωρήθηκε και να οριστικοποιήθηκε με την ενσωμάτωση των στοιχείων που καταγράφηκαν από το σύστημα δομικής παρακολούθησης του έργου.

### 4.2.3. Καλπασμός

Αυτό το είδος αστάθειας, συνήθως κάθετα στον άνεμο, είναι γνωστό για «λεπτές» κατασκευές, η διατομές των οποίων παρουσιάζουν μια ισχυρή αρνητική κλίση για το συντελεστή άνωσης  $C_L$  για κάποιες διευθύνσεις  $\alpha$  του ανέμου. Ωστόσο, για τις κυκλικές διατομές που επιλέγονται για τα καλώδια της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου, το ακόλουθο κριτήριο δεν ικανοποιείται και έτσι ο καλπασμός στην Εξ. (6) δεν μπορεί να εμφανιστεί.

$$\frac{dC_L}{da} + C_D < 0 \quad (6)$$

Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην ισχύει για συγκεκριμένες καταστάσεις, για παράδειγμα όταν ο σχηματισμός πάγου τροποποιεί τη συμμετρική διατομή των καλωδίων.

### 4.2.4 Αεροδυναμικές Ταλαντώσεις Λόγω Βροχής

Οι ταλαντώσεις που προκαλούνται λόγω συνδυασμού βροχής και αέρα είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα σταθερότητας των κεκλιμένων καλωδίων. Για μέτριες καταστάσεις βροχής και ταχύτητες του ανέμου (8 μέχρι 15m/sec), μεγάλα εύρη ταλάντωσης μπορούν να εμφανιστούν για διαφορετικούς συνδυασμούς κλίσης καλωδίων και διευθύνσεων του ανέμου. Η παρουσία δυο μικρορευμάτων νερού με το ανώτερο να ταλαντεύεται περιμετρικά, συγχρόνως με την κίνηση του καλωδίου, είναι ένα από τα σημεία κλειδιά αυτής της αστάθειας. Το νερό ενεργεί ως ώθηση για μια αστάθεια αποκαλούμενη «ξηρά δόνηση καλωδίων» καθιστώντας το ισχυρότερο και σταθερότερο.

Η αποδοτικότερη και κοινή μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η ελικοειδής μορφή της επιφάνειας των προστατευτικών σωλήνων των καλωδίων. Εντούτοις, δεδομένου ότι η διάμετρος των σωλήνων που χρησιμοποιείται στη γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου είναι μεγαλύτερη από τις προηγούμενες πειραματικά μελετημένες, προτάθηκε μια σειρά δοκιμών προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά τους.

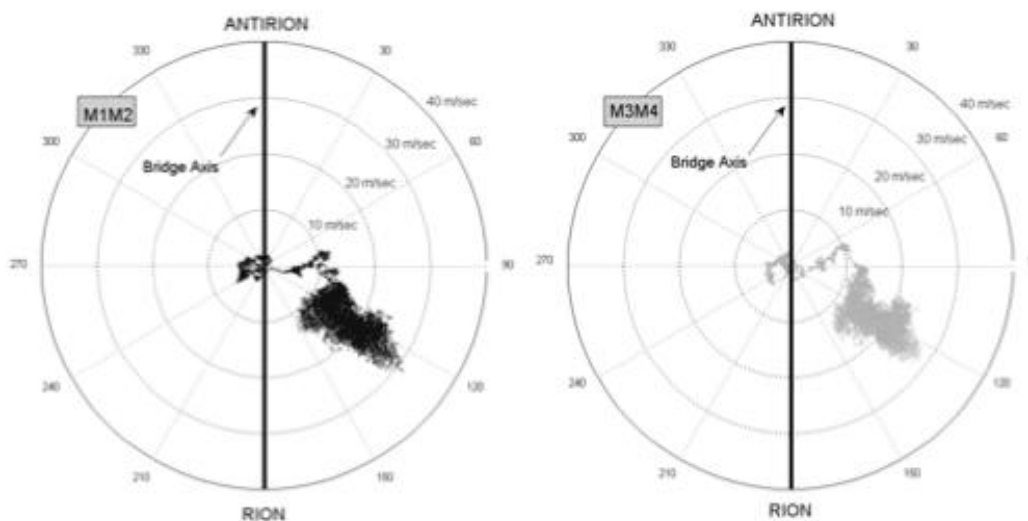
Η δοκιμή αναπαρήγαγε την αστάθεια για την περίπτωση ομαλών σωλήνων πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) σε ένα τμηματικό μοντέλο της γέφυρας εξετάζοντας διάφορους συνδυασμούς ταχύτητας ανέμου και κλίσης καλωδίων, και έπειτα αξιολογούσε την απόδοση των καλωδίων με ελικοειδή επιφάνεια για τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων.

Η καλή απόδοση των ελικοειδών καλωδίων HDPE προέκυψε για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν και έτσι ο κίνδυνος για πρόκληση δονήσεων λόγω συνδυασμού βροχής και ανέμου για τα καλώδια της γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου απορρίφθηκε.



#### 4.3 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΙΣΧΥΡΟ ΓΕΓΟΝΟΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ 23 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2006

Στις 23 Ιανουαρίου του 2006, μια ισχυρή καταιγίδα σημειώθηκε στην περιοχή της Γέφυρας Ρίου Αντιρρίου. Τα κύρια χαρακτηριστικά της καταιγίδας ήταν συγκεκριμένα οι ανατολικοί ( $120^\circ$  δεξιόστροφα από τον άξονα της Γέφυρας) ισχυροί άνεμοι (31.2 και 28.3m/sec σύμφωνα με τους μέσου όρους 2 min στους μετεωρολογικούς σταθμούς των M1M2 και M3M4 αντίστοιχα) και η χαμηλή θερμοκρασία ( $1,2^\circ\text{C}$ ). Στην Εικόνα 4.3 παρέχεται η ανά 2 min μέση ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνσή του.



**Εικόνα 4.3** Γραφική απεικόνιση ανά 2 mins της μέσης ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου. [26]

Για την αξιολόγηση της απόκρισης των καλωδίων, χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι αισθητήρων [26]:

- Δεκατρείς 3D επιταχυνσιογράφοι στα καλώδια (10 m ύψος από το κατάστρωμα)
- Δώδεκα 3D και τρεις 1D επιταχυνσιογράφοι στο κατάστρωμα (τοποθετημένοι κοντά στα μέσα των ανοιγμάτων)
- Δεκαέξι δυναμοκυψέλες στις θέσεις αγκύρωσης των καλωδίων
- Δύο ανεμόμετρα (M1-M2 και M3-M4, 6 m επάνω από το κατάστρωμα).

Κατά τη διάρκεια αυτού του γεγονότος, παρατηρήθηκαν σημαντικές ταλαντώσεις των καλωδίων, ειδικά στα ενδιάμεσα και μακριά καλώδια (#16 και άνω), το πλάτος των οποίων ήταν άνω του  $\pm 2.0$  m. Επίσης, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, παρατηρήθηκε ότι δημιουργήθηκε πάγος σε αρκετά καλώδια. Η απόκριση που καταγράφηκε υπολογίστηκε χάρη στα αρχεία συναγερμού και παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

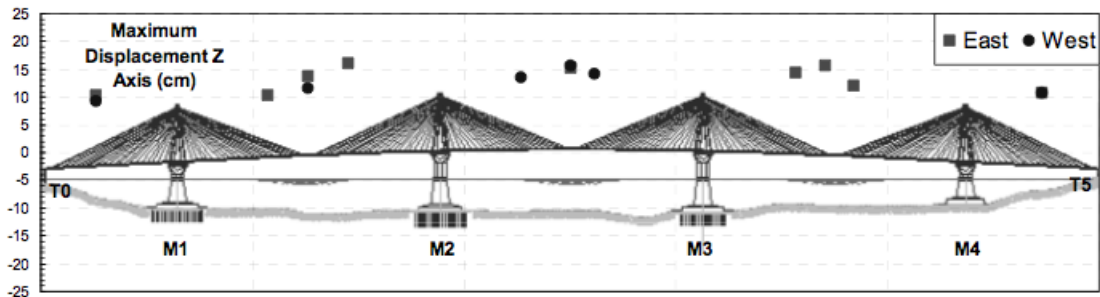
Οι μεγάλες ταλαντώσεις των καλωδίων ενεργοποίησαν περαιτέρω αναλύσεις των δεδομένων που καταγράφηκαν ώστε να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός των αποσβεστήρων για την πρόληψη παρόμοιων περιστατικών στο μέλλον.

### 4.3.1 Ταλαντώσεις Καταστώματος

Το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης υπολογίστηκε με κατάλληλη επεξεργασία των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης που περιέχονταν στα αρχεία συναγερού του συστήματος. Η μέγιστη κάθετη μετατόπιση στη θέση κάθε αισθητήρα παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4.1) και στην Εικόνα 4.4.

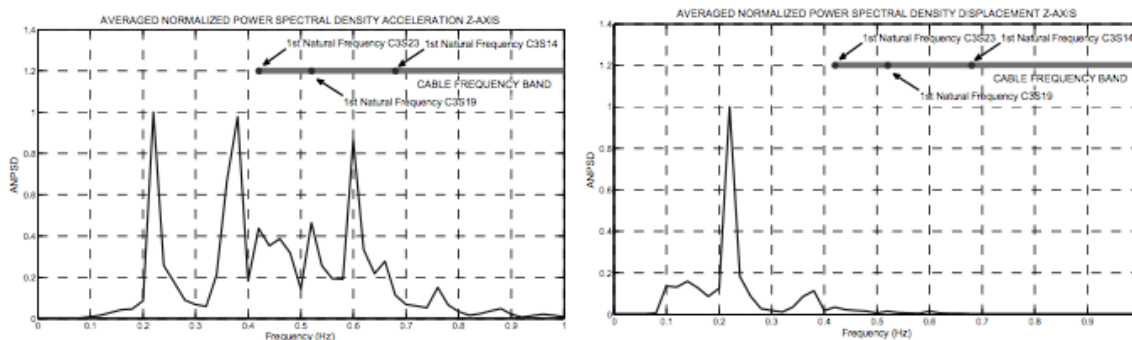
**Πίνακας 4.2.** Μέγιστο πλάτος κάθετης μετατόπισης στη θέση κάθε αισθητήρα. [26]

Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)	Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)
M1S18E	E3 Z	10.23	M2M3W	D17 Z	15.62
M1S18W	E4 Z	9.26	M3S20W	E19 Z	14.01
M1N17E	E7 Z	10.21	M3N20E	E24 Z	14.32
M1M2W	E9 Z	11.62	M3M4E	D26 Z	15.51
M1M2E	D9 Z	13.75	M4S20E	E28 Z	11.94
M2S17E	E11 Z	16.03	M4N18W	E32 Z	10.65
M2N14W	E15 Z	13.44	M4N18E	E33 Z	10.66
M2M3E	E17 Z	15.21	-	-	-



**Εικόνα 4.4** Μέγιστο πλάτος κάθετης μετατόπισης στη θέση κάθε αισθητήρα .[26]

Η συχνοτική ανάλυση των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης έδειξε ότι ένας μεγάλος αριθμός ιδιομορφών του καταστώματος συμμετείχε στις ταλαντώσεις, αλλά μόνο λίγες από αυτές είχαν σημαντικό εύρος. Στην Εικόνα 4.5 η μέση κανονικοποιημένη φασματική πυκνότητα ισχύος για τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και μετατόπισης όλων των αισθητήρων του καταστώματος παρουσιάζεται σε σύγκριση με το συχνοτικό περιεχόμενο της 1ης ιδιομορφής των καλωδίων.



**Εικόνα 4.5** Μέση κανονικοποιημένη φασματική πυκνότητα ισχύος για την επιτάχυνση και μετατόπιση βάσει των δεδομένων από τα δυναμικά αρχεία για τον ισχυρό άνεμο του Ιανουαρίου, 2006. [26]

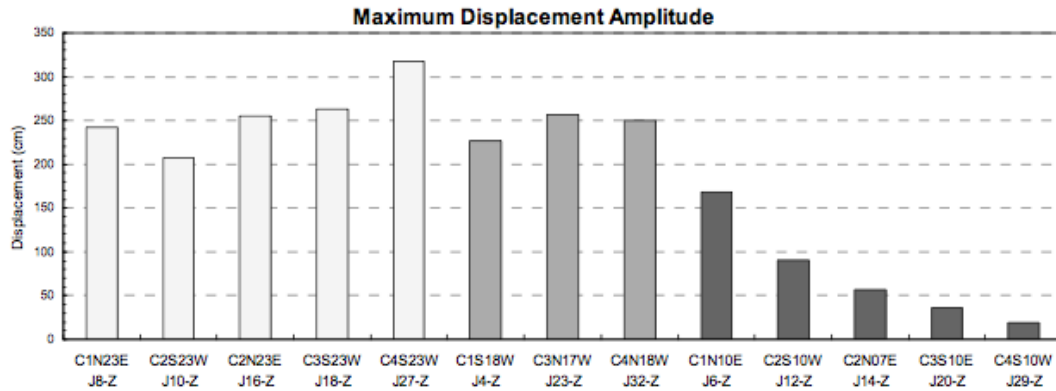
### 4.3.2 Ταλάντωση των καλωδίων

Το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης υπολογίστηκε από τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης που περιέχονται στα αρχεία συναγερωμού, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία. Τα μέγιστα πλάτη ταλάντωσης  $U_m = \max(U_M(x))$  για όλα τα καλώδια που υπολογίζονται για όλα τα αρχεία συναγερωμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 και την Εικόνα 4.6.

Παρά τα μεγάλα πλάτη ταλάντωσης τα αντίστοιχα φορτία ήταν εντός των αποδεκτών ορίων ασφαλείας (SLS, 50% του μέγιστου FGUTS = 265,5 kN), όπως παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4.4).

**Πίνακας 4.3.** Μέγιστο εύρος κατακόρυφης μετατόπισης των καλωδίων. [26]

Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)	Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)
C1S18W	J4 Y και Z	227.4	C3S23W	J18 Y και Z	263.6
C1N10E	J6 Y και Z	168.4	C3S10E	J20 Y και Z	36.9
C1N23E	J8 Y και Z	241.9	C3N17W	J23 Y και Z	257.1
C2S23W	J10 Y και Z	207.1	C4S23W	J27 Y και Z	317.1
C2S10W	J12 Y και Z	91.3	C4S10W	J29 Y και Z	19.6
C2N07E	J14 Y και Z	57.3	C4N18W	J32 Y και Z	249.96
C2N23E	J16 Y και Z	255.5	-	-	-



Εικόνα 4.6. Μέγιστο πλάτος μετατόπισης των καλωδίων ταξινομημένων ανά μήκος. [26]

Πίνακας 4.4. Μέγιστο φορτίο καλωδίων. [26]

Θέση	Αισθητήρας	Μέγιστο φορτίο (kN)	Ποσοστό FGUTS (%)	Θέση	Αισθητήρας	Μέγιστο φορτίο (kN)	Ποσοστό FGUTS (%)
C1S18W	K4	103.9	39.1	C3S10E	K20	83.6	31.5
C1N10E	K6	94.7	35.7	C2N07E	K22	69.5	26.2
C1N23E	K8	104.8	39.5	C3N17W	K23	100.6	37.9
C2S23W	K10	95.8	36.1	C3N23E	K25	90.6	34.2
C2S10W	K12	91.3	34.4	C4S23W	K27	104.0	39.2
C2N07E	K14	71.1	26.8	C4S10W	K29	91.7	34.5
C2N23E	K16	103.5	39.0	C4N05E	K30	66.7	25.1
C3S23W	K18	102.6	38.6	C4N18W	K32	112.4	42.3

#### 4.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΗΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Στα δεδομένα που καταγράφονται από το σύστημα παρακολούθησης, και ιδιαίτερα στις δυναμικές καταγραφές έγινε περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός της απαιτούμενης τεχνικής βελτίωσης για την μείωση των ταλαντώσεων στα καλώδια. Δύο πιθανές λύσεις ήταν διαθέσιμες, εξωτερικοί (EHD) ή/και εσωτερικοί (IHD) αποσβεστήρες και συνδετήρες (cross-ties) μεταξύ των καλωδίων, με την πρώτη να είναι προτιμότερη, δεδομένου ότι η εφαρμογή των «συνδέσεων» στη γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου δεν μετατοπίζει όλες τις συχνότητες των καλωδίων πέραν των υψηλότερων ιδιοσυχνοτήτων του.

##### 4.4.1. Παράμετροι Σχεδιασμού

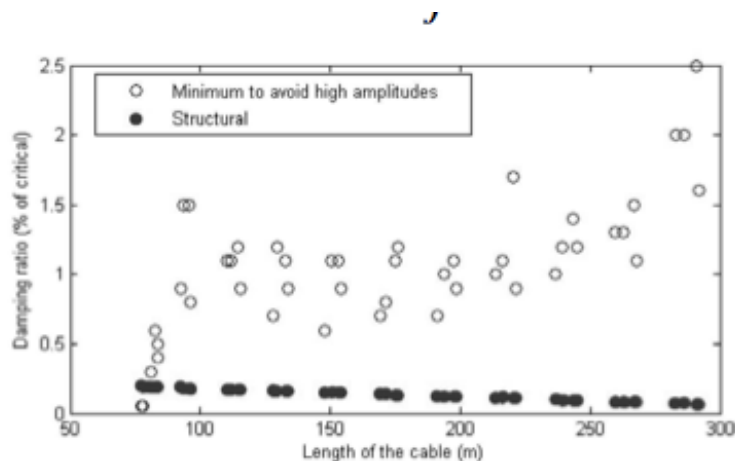
Κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού, διερευνήθηκε εάν το σύστημα EHD είναι αρκετά αποτελεσματικό ώστε να μετριάσει τις ταλαντώσεις του καλωδίου όπως παρατηρήθηκαν και καταγράφηκαν από το σύστημα παρακολούθησης της Γέφυρας Ρίου-

Αντιρρίου. Έτσι, το κύριο ερώτημα ήταν πόση απόσβεση απαιτείται να προστεθεί για την ελαχιστοποίηση της ταλάντωσης του καλωδίου. Ερευνήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια διέγερσης:

- Συντονισμός και παραμετρική διέγερση
- Καλπασμός καλωδίου υπό συνθήκες πάγου
- Καλπασμός κεκλιμένου καλωδίου υπό «ξηρές» συνθήκες

Αρχικά ερευνήθηκε το ποσοστό απόσβεσης που απαιτείται προκειμένου να αποφευχθεί ο συντονισμός και η παραμετρική διέγερση. Η απόσβεση υπολογίστηκε για διαφορετικά μήκη καλωδίων με βασικό κριτήριο τον περιορισμό του εύρους της ταλάντωσης σε μία διάμετρο, όταν η διέγερση της εισόδου περιγράφεται από μια συνάρτηση περιβάλλουσας των συχνοτήτων που έχει υπολογισθεί σύμφωνα με το γεγονός της 23ης Ιανουαρίου 2006.

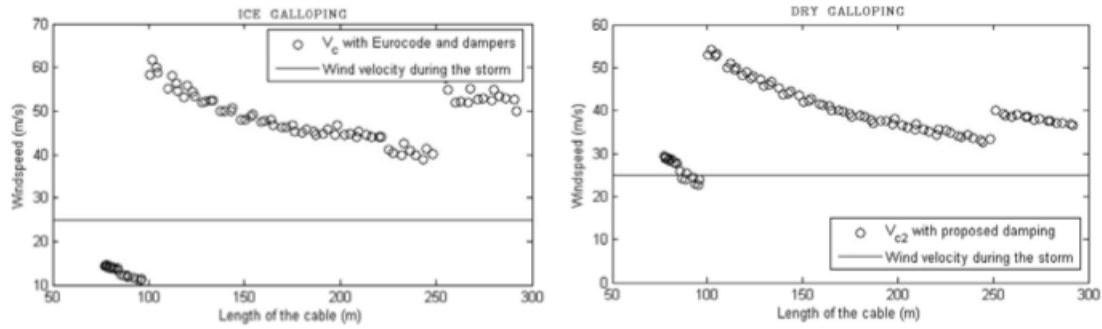
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 4.7 και δείχνουν ότι απαιτείται  $\xi = 1\%$  της συνολικής απόσβεσης της κατασκευής για τα καλώδια με μήκος μεταξύ 100 και 250 m και  $\xi = 1.5\%$  για μακρύτερα καλώδια. Δεν απαιτήθηκε καμία πρόσθετη απόσβεση για καλώδια μικρού μήκους, δηλαδή με μήκος λιγότερο από 100m.



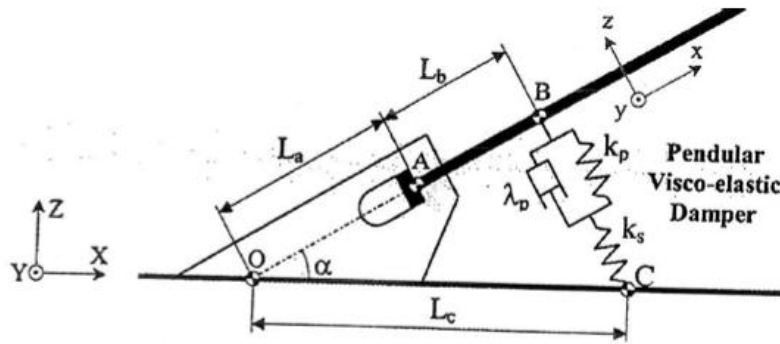
**Εικόνα 4.7.** Απαραίτητος πρόσθετος λόγος απόσβεσης για τον μετριασμό των ταλαντώσεων των καλωδίων. [26]

Για το επιλεγμένο ποσοστό απόσβεσης (1.0% / 1.5% για ενδιάμεσα / μακρά, και καμία πρόσθετη απόσβεση για καλώδια μικρού μήκους  $L < 100\text{m}$ ) η κρίσιμη ταχύτητα του ανέμου υπολογίστηκε για καλπασμό τόσο σε συνθήκες πάγου όσο και για κεκλιμένο καλώδιο υπό ξηρές συνθήκες. Η Εικόνα 4.8 συνοψίζει αυτά τα αποτελέσματα.

Το απαιτούμενο ποσοστό απόσβεσης περιλαμβάνει και την αεροδυναμική απόσβεση, οπότε τελικά το απαιτούμενο ποσοστό απόσβεσης της κατασκευής είναι σημαντικά χαμηλότερο. Το επιλεγμένο σύστημα απόσβεσης σχεδιάστηκε προκειμένου να διασφαλιστεί 4% λογαριθμική μείωση για όλα καλώδια πάνω από το #11. Η γενική διάταξη απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 4.9. Οι Εικόνες 4.10 και 4.11 παρουσιάζουν την τελική μορφή του αποσβεστήρα που τοποθετήθηκε.



**Εικόνα 4.8** Κρίσιμη ταχύτητα ανέμου που υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα καλπασμού των καλωδίων. [26]



**Εικόνα 4.9** Σχηματική αναπαράσταση των αποσβεστήρων που επιλέχθηκαν για τα καλώδια πάνω από #11. [26]

#### 4.4.2. Εγκατάσταση και έλεγχος λειτουργίας

Η εγκατάσταση των 208 αποσβεστήρων πραγματοποιήθηκε κατά το πρώτο εξάμηνο του 2007. Για την επαλήθευση της εύρυθμης λειτουργίας τους πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σε 6 διαφορετικά καλώδια. Ο στόχος ήταν να διεγερθεί η 1η ιδιομορφή κάθε καλωδίου και να υπολογισθεί η λογαριθμική μείωση της ταλάντωσης μέσω των μετρούμενων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης, πριν και μετά την εγκατάσταση του αποσβεστήρα. Τα αποτελέσματα των ελέγχων συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5.



**Εικόνα 4.10.** Εξωτερική όψη αποσβεστήρα.



**Εικόνα 4.11.** Εσωτερική όψη αποσβεστήρα.

**Πίνακας 4.5.** Αποτελέσματα ελέγχων. [26]

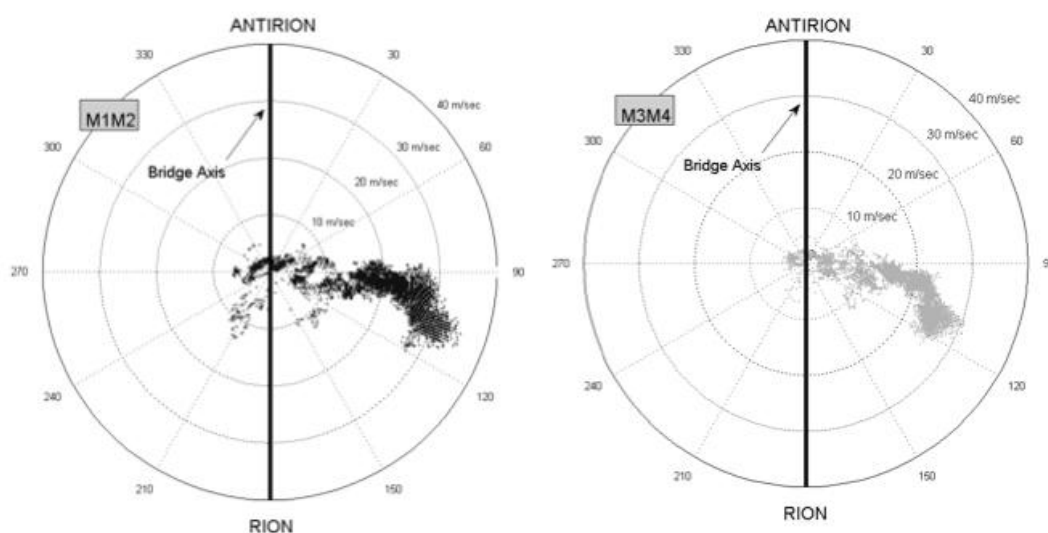
Θέση	Λογαριθμική μείωση χωρίς αποσβεστήρα	Λογαριθμική μείωση με αποσβεστήρα	Θέση	Λογαριθμική μείωση χωρίς αποσβεστήρα	Λογαριθμική μείωση με αποσβεστήρα
C2S11W	1.79%	6.42%	C2S16W	1.58%	4.99%
C2S12W	2.06%	6.15%	C2S19W	1.08%	6.01%
C2S14W	1.53%	5.31%	C2S22W	1.82%	5.35%

Οι έλεγχοι λειτουργίας οδήγησαν στην αποδοχή των εγκατεστημένων αποσβεστήρων EHD ως ένα αποτελεσματικό μέσο για τον περιορισμό των ταλαντώσεων των καλωδίων.

#### 4.5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΙΣΧΥΡΟ ΓΕΓΟΝΟΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ 8 ΜΑΡΤΙΟΥ 2010

Τρία χρόνια μετά την εγκατάσταση των εξωτερικών αποσβεστήρων συνέβη η πλέον σοβαρή καταιγίδα ισχυρών ανέμων της έως τότε περιόδου λειτουργίας της Γέφυρας. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε εξαιρετική ευκαιρία για να ελεγχθεί η συνολική συμπεριφορά των καλωδίων στα οποία τοποθετήθηκαν οι αποσβεστήρες.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της καταιγίδας ήταν ανατολικοί ( $100^\circ$  δεξιόστροφα από τον άξονα της Γέφυρας), ισχυροί άνεμοι (35.4 και 30.7 m/sec κατά μέσο όρο 10 min στους μετεωρολογικούς σταθμούς M1-M2 και M3-M4) και χαμηλή θερμοκρασία ( $6.5^\circ$  C). Στην εικόνα 4.12, παρουσιάζεται ο μέσος όρος 10 min της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου.



**Εικόνα 4.12.** Γραφική απεικόνιση μέσου όρου 10 min της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου κατά το γεγονός του 2010. [26]

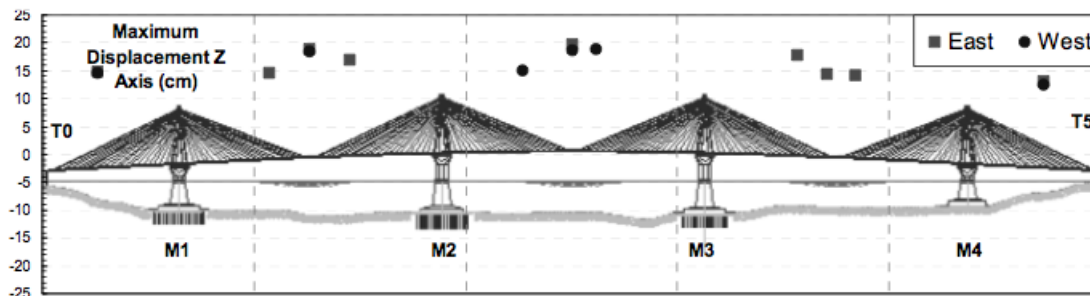


Κατά τη διάρκεια αυτού του γεγονότος δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές ταλαντώσεις των καλωδίων. Η απόκριση του καταστρώματος είχε παρόμοιο συχνοτικό περιεχόμενο, αλλά υψηλότερο εύρος ταλάντωσης σε σύγκριση με το γεγονός του 2006, όπως ήταν αναμενόμενο. Κατά το γεγονός του 2010 δεν παρατηρήθηκε σχηματισμός πάγου.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση με το γεγονός του 2006, πραγματοποιήθηκε η ίδια διαχείριση των δεδομένων (επιταχυνσιόμετρα καταστρώματος/καλωδίων και φορτία στα καλώδια) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 4.5.1. Ταλαντώσεις καταστρώματος

Το μέγιστο πλάτος της κάθετης μετατόπισης στη θέση κάθε αισθητήρα παρουσιάζεται στον πίνακα Π.6 και στην Εικόνα 4.13.

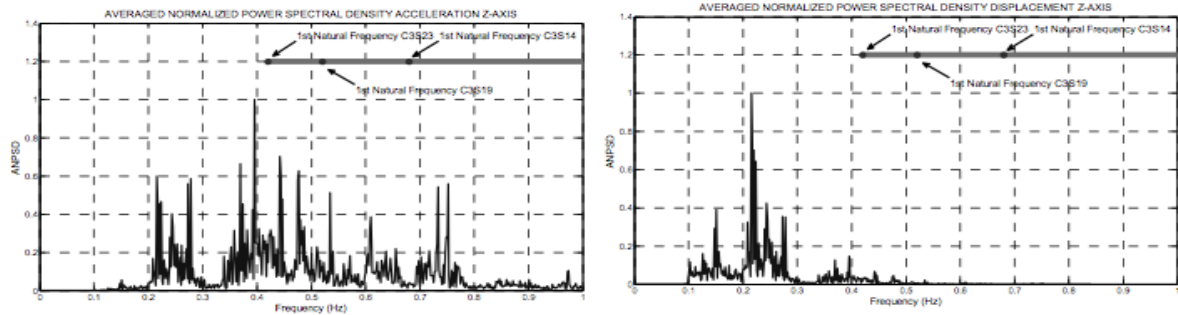


**Εικόνα 4.13.** Μέγιστο πλάτος της κάθετης μετατόπισης στη θέση κάθε αισθητήρα κατά το γεγονός του 2010. [26]

**Πίνακας 4.6.** Μέγιστο πλάτος της κάθετης μετατόπισης στη θέση κάθε αισθητήρα κατά το γεγονός του 2010. [26]

Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος(cm)	Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)
M1S18E	E3 Z	14.75	M2M3W	D17 Z	18.59
M1S18W	E4 Z	14.45	M3S20W	E19 Z	18.76
M1N17E	E7 Z	14.60	M3N20E	E24 Z	17.78
M1M2W	E9 Z	18.47	M3M4E	D26 Z	14.40
M1M2E	D9 Z	18.79	M4S20E	E28 Z	14.10
M2S17E	E11 Z	16.79	M4N18W	E32 Z	12.48
M2N14W	E15 Z	15.00	M4N18E	E33 Z	12.99
M2M3E	E17 Z	19.75	-	-	-

Στην Εικόνα 4.14 η μέση κανονικοποιημένη φασματική πυκνότητα ισχύος για τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και μετατόπισης όλων των αισθητήρων του καταστρώματος παρουσιάζονται και συγκρίνονται με το εύρος συχνοτήτων που αντιστοιχούν στην πρώτη ιδιομορφή των καλωδίων.



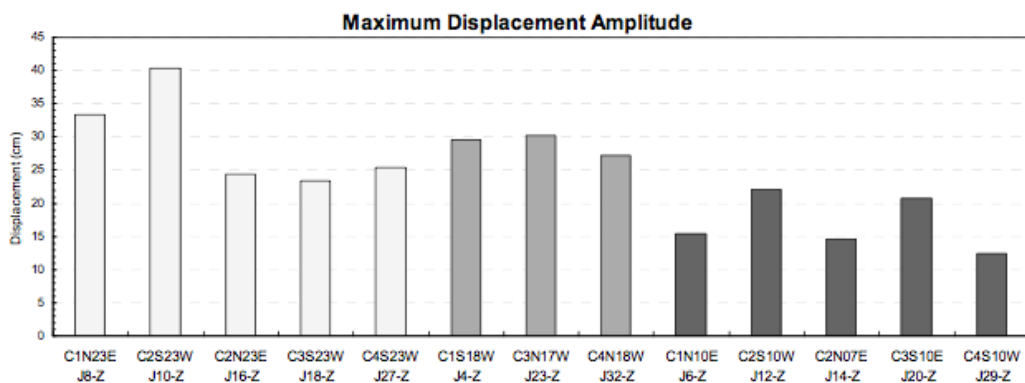
**Εικόνα 4.14.** Μέση κανονικοποιημένη φασματική πυκνότητα ισχύος για την επιτάχυνση και μετατόπιση βάσει αρχείων συναγερωμού για το γεγονός του 2010. [26]

#### 4.5.2. Ταλαντώσεις Καλωδίων

Τα μέγιστα πλάτη ταλάντωσης  $U_m = \max(u_m(t))$  για όλα τα καλώδια που προέκυψαν από όλα τα αρχεία συναγερωμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7 και στην Εικόνα 4.15.

**Πίνακας 4.7.** Μέγιστα πλάτη ταλάντωσης των καλωδίων κατά το γεγονός του 2010. [26]

Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)	Θέση	Κανάλι επιτάχυνσης	Πλάτος (cm)
C1S18W	J4 Y και Z	29.5	C3S23W	J18 Y και Z	23.5
C1N10E	J6 Y και Z	15.5	C3S10E	J20 Y και Z	20.8
C1N23E	J8 Y και Z	33.3	C3N17W	J23 Y και Z	30.2
C2S23W	J10 Y και Z	40.4	C4S23W	J27 Y και Z	25.5
C2S10W	J12 Y και Z	22.1	C4S10W	J29 Y και Z	12.5
C2N07E	J14 Y και Z	14.6	C4N18W	J32 Y και Z	27.3
C2N23E	J16 Y και Z	24.5	-	-	-



**Εικόνα 4.15** Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης των καλωδίων κατά το γεγονός του 2010. [26]

Οι μετρήσεις του συστήματος έδειξαν ότι το μέγιστο φορτίο των καλωδίων ήταν εντός του αποδεκτού ορίου λειτουργίας (SLS, 50% του FGUTS = 265,5 kN) όπως παρουσιάζεται παρακάτω (Πίν. 4.8).

**Πίνακας 4.8** Μέγιστο φορτίο καλωδίων κατά το γεγονός του 2010. [26]

Θέση	Αισθητήρας	Μέγιστο φορτίο (kN)	Ποσοστό FGUTS (%)	Θέση	Αισθητήρας	Μέγιστο φορτίο (kN)	Ποσοστό FGUTS (%)
C1S18W	K4	96.0	36.2	C3S10E	K20	77.6	29.2
C1N10E	K6	86.4	32.5	C2N07E	K22	64.6	24.2
C1N23E	K8	91.8	34.6	C3N17W	K23	87.0	32.8
C2S23W	K10	85.8	32.3	C3N23E	K25	77.8	29.3
C2S10W	K12	84.7	31.9	C4S23W	K27	87.8	33.1
C2N07E	K14	64.5	24.3	C4S10W	K29	89.2	33.6
C2N23E	K16	88.6	33.4	C4N05E	K30	60.8	22.9
C3S23W	K18	87.0	32.8	C4N18W	K32	101.2	38.1

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΑΧΑΪΑΣ – ΗΛΙΑΣ ΤΟ 2008 ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ

#### 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ισχυρός σεισμός «Αχαΐας-Ηλείας» που εκδηλώθηκε στις 08 Ιουνίου 2008 είχε ένταση σε όρους σεισμικής ροπής  $M_w = 6.5$ , το επίκεντρό του υπολογίστηκε περίπου στα 36 χιλιόμετρα ΝΔ από τη Γέφυρα και το εστιακό βάθος του εκτιμάται περίπου 30 χιλιόμετρα (Εικ. 5.1). Η εξέταση των διαθέσιμων σεισμολογικών δεδομένων που έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμού και των μετασεισμών υποδεικνύουν ότι ο σεισμός προέκυψε από μια δεξιόστροφη θραύση ρήγματος. Η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους που καταγράφηκε στην περιοχή (ακτή Ρίου) ήταν 0.127g.



**Εικόνα 5.1.** Επίκεντρο του σεισμού σε σχέση με τη θέση της γέφυρας. [27]

Πρόκειται για τον πρώτο ισχυρό σεισμό που έπληξε τη γέφυρα, και είχε ως επακόλουθο την έναρξη της επιθεώρησης πλήρους κλίμακας προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές ζημιές της κατασκευής, με χρήση και των δεδομένων που συνέλεξε το σύστημα δομικής παρακολούθησης.

Δεδομένων των πιθανών τεκτονικών κινήσεων που θα μπορούσαν να λάβουν χώρα στην περιοχή, διεξήχθη γεωμετρική έρευνα για την παρακολούθηση των μόνιμων μετακινήσεων λόγω αυτού του γεγονότος.

Επιπλέον, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης χρησιμοποιήθηκαν για να χαρακτηριστεί το γεγονός, να αξιολογηθεί η σοβαρότητά του όσον

αφορά την απόκριση της γέφυρας και να αξιολογηθεί η κατάσταση της γέφυρας, μαζί με τις οπτικές επιθεωρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

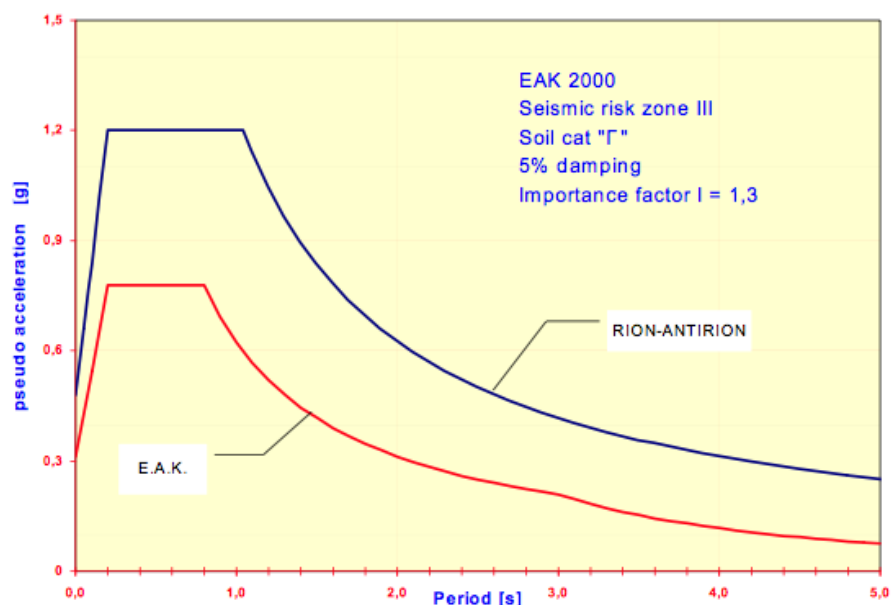
Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο της πτυχιακής και αποτελούν μια υποδειγματική παρουσίαση του τρόπου επεξεργασίας και αξιοποίησης των καταγραφών ενός συστήματος δομικής παρακολούθησης προέρχονται από τη δημοσιευμένη εργασία των Papanikolas, Stathopoulos-Vlamiis, Panagis, Pecker και Infanti [27].

## 5.2 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Οι ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής που καθόρισαν το σχεδιασμό της γέφυρας είναι οι εξής [27]:

- Μεγάλο βάθος του νερού
- Μεγάλου βάθους εδαφικές στρώσεις με ασθενείς προσχώσεις
- Υψηλή σεισμικότητα και ισχυροί άνεμοι
- Τεκτονικές κινήσεις

Η αυξημένη περίοδος επαναφοράς (2000 έτη) που καθορίστηκε για το σεισμό σχεδιασμού, οδήγησε σε ένα φάσμα απόκρισης (Εικ. 5.2) με PGA 0.48g, τιμή μεγαλύτερη από εκείνη που ορίζεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (περίοδος επαναφοράς 475 χρόνια) για τη συγκεκριμένη σεισμική ζώνη κινδύνου II.



**Εικόνα 5.2** Φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη της Γέφυρας συγκρινόμενο με το αντίστοιχο του Κανονισμού. [27]

Η Γέφυρα σχεδιάστηκε για να «διοχετεύει» τη σεισμική ενέργεια σε μια σειρά προεπιλεγμένους μηχανισμούς. Όλοι οι πιθανοί μηχανισμοί κατανάλωσης της σεισμικής ενέργειας βρίσκονται στον πυλώνα της κατασκευής (Εικ. 5.3), προκειμένου να διασφαλιστεί

ότι το κατάστρωμα / καλώδια θα είναι πάντα στην ελαστική περιοχή. Αυτοί είναι οι εξής [27]:

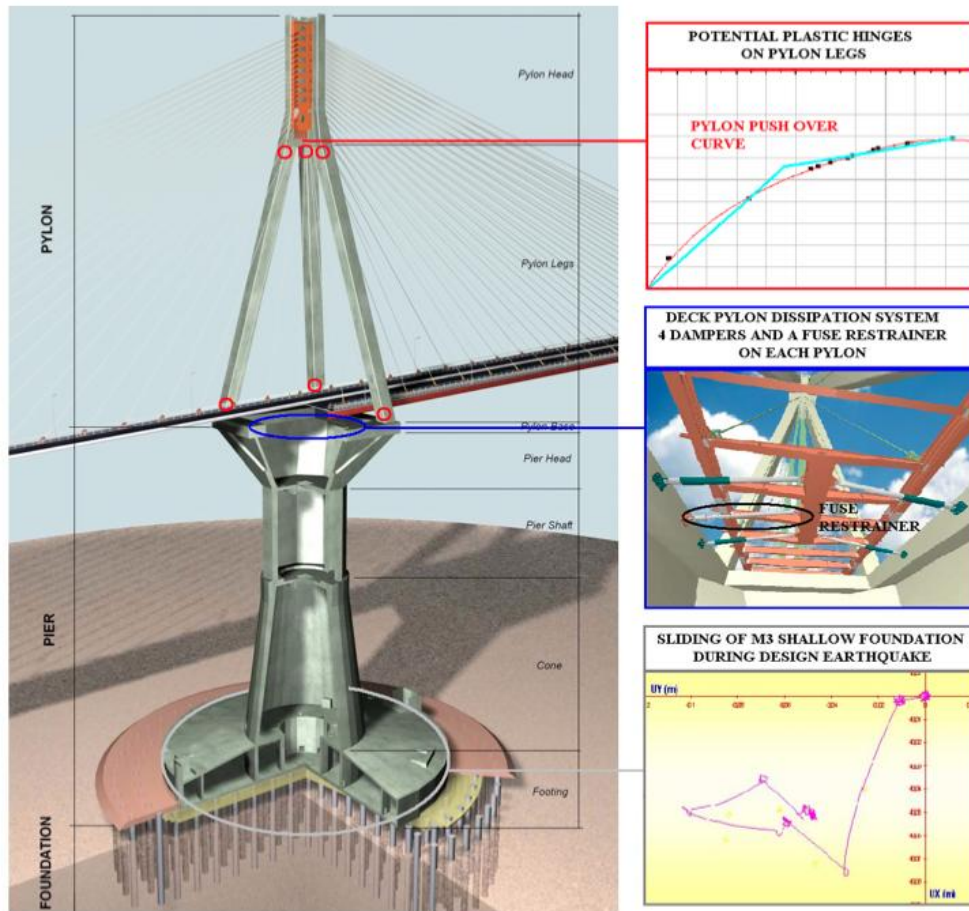
- Ολίσθηση στη διεπιφάνεια πεδύλου και εδάφους. Η μεγάλης διαμέτρου (90 m) επιφανειακή θεμελίωση κάθε πυλώνα εδράζεται σε ενισχυμένο έδαφος ικανό να αναλάβει μεγάλες σεισμικές δράσεις.
- Σύστημα απόσβεσης μεταξύ του καταστρώματος και του πυλώνα (και των ακραίων στηρίξεων) που ενεργοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών. Αποτελείται από τέσσερις υδραυλικούς αποσβεστήρες, καθένας με ικανότητα 3500kN (τέσσερις σε κάθε πυλώνα και δύο στις ακραίες στηρίξεις), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να «παραλάβουν» την ενέργεια που εισάγει ο σεισμός στην κατασκευή και να περιορίζουν την κίνηση του καταστρώματος. Επιπροσθέτως, ασφάλειες με αντοχές 10500kN και 3400kN υποστηρίζουν πλευρικά το κατάστρωμα στις θέσεις των βάθρων και στα άκρα αντιστοίχως, και χρησιμοποιούνται για την πρόληψη κινήσεων που προκαλούνται από ανέμους. Σε περίπτωση ισχυρών σεισμών οι ασφάλειες απελευθερώνονται και ενεργοποιούνται οι αποσβεστήρες.
- Δυνητικές πλαστικές αρθρώσεις στα πόδια του πυλώνα. Η προσέγγιση «ελεγχόμενης βλάβης» που υιοθετήθηκε στον σχεδιασμό της γέφυρας προϋποθέτει σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων (με περιορισμένες βλάβες στην επικάλυψη βάση του πυλώνα).

Με τους παραπάνω τρόπους η σεισμική ενέργεια μπορεί να καταναλώνεται μέσω ελεγχόμενων βλαβών προκαθορισμένες θέσεις, στις οποίες έχουν εφαρμοστεί ειδικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

### 5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ

Μετά το σεισμό πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι διαφορετικών επιπέδων (επίπεδα 1, 2, 3 και 4 επίπεδο συμπεριλαμβανομένων επιθεωρήσεων με εξειδικευμένους προμηθευτές συγκεκριμένων συστημάτων) όπως ορίζεται στο εγχειρίδιο επιθεώρησης και συντήρησης του έργου. Εν συντομία τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών επιπέδων ελέγχου είναι [27]:

- Επίπεδο 1: δεν είναι απαραίτητη η παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού. Απλός οπτικός έλεγχος από το προσωπικό της βάρδιας για να εντοπιστεί αμέσως (λίγα λεπτά μετά το συμβάν) οποιαδήποτε μεταβολή στη γέφυρα (πριν το Επίπεδο 2).



**Εικόνα 5.3** Μηχανισμοί ελέγχου σεισμικών βλαβών στη Γέφυρα. [27]

- Επίπεδο 2: έμπειροι επιθεωρητές ελέγχουν για βλάβες σε συγκεκριμένα σημεία της γέφυρας που συνδέονται με τους μηχανισμούς «ελεγχόμενης βλάβης» που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- Επίπεδο 3: έμπειροι επιθεωρητές ελέγχουν πρόσθετα σημεία της γέφυρας, μετά την αξιολόγηση αποτελεσμάτων του Επιπέδου 2.
- Επίπεδο 4: Λεπτομερείς επιθεωρήσεις, συμπεριλαμβανομένων των επιθεωρήσεων με εξειδικευμένους προμηθευτές των διαφόρων συστημάτων.

Στην περίπτωση που σχολιάζεται τα ευρήματα για κάθε επίπεδο ελέγχου συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

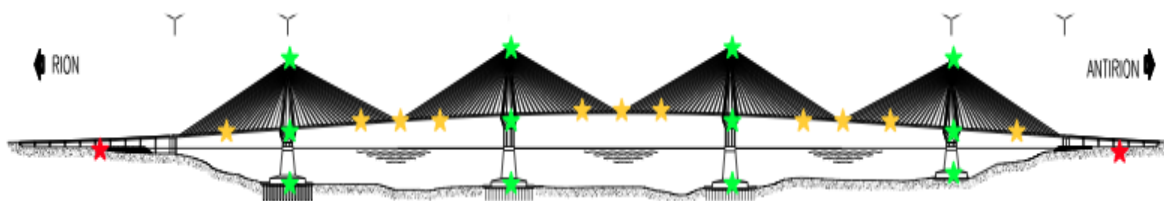
Οι μετασεισμικοί οπτικοί έλεγχοι επιβεβαίωσαν την καλή, γενικά, κατάσταση της Γέφυρας αφού δεν παρατηρήθηκαν δομικές βλάβες, αν και το σεισμικό συμβάν ήταν ισχυρό. Οι πλευρικές ασφάλειες του καταστρώματος είχαν απελευθερωθεί, δεδομένου ότι είναι θυσιαζόμενα στοιχεία, όπως προβλέπεται από το σχέδιο για ένα ισχυρό σεισμό, προκειμένου να αποφευχθούν δομικές βλάβες και να ενεργοποιηθεί το σύστημα απόσβεσης.

## 5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Το προηγμένο σύστημα δομικής παρακολούθησης της γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου, όπως ήταν αναμενόμενο, παρείχε μία σειρά από σημαντικά δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά της κατασκευής υπό το συγκεκριμένο ισχυρό σεισμικό γεγονός. Στα επόμενα σχήματα (Εικ. 5.4 και 5.5) απεικονίζονται οι θέσεις των αισθητήρων από τους οποίους προέκυψαν τα πλέον σημαντικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

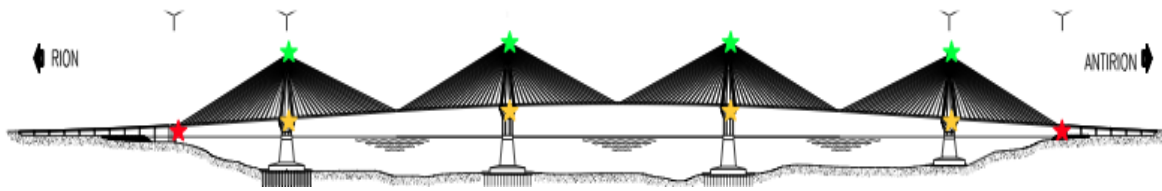
**Πίνακας 5.1.** Σύνοψη αποτελεσμάτων των ελέγχων. [27]

Επίπεδο ελέγχου	Διάρκεια	Ευρήματα	Επόμενη κίνηση
Επίπεδο 1	15 Min αμέσως μετά από γεγονός	Κανένα εύρημα καταγεγραμμένο	Επίπεδο 2 (αφού ο σεισμός ήταν ισχυρός)
Επίπεδο 2	Ολοκληρώθηκε 3-4 h μετά το γεγονός	Ενδείξεις από κίνηση σε όλες τις ασφάλειες (κατάστρωμα-πυλώνες), πιθανή διαρροή τους	Επίπεδο 3 αφού οι ασφάλειες απελευθερώθηκαν
Επίπεδο 3	Ολοκληρώθηκε 2 ημέρες μετά το γεγονός	Μικρές ζημιές μη-δομικού χαρακτήρα	Παρόλο που τα αποτελέσματα του Επιπέδου 3 δεν ήταν αρκετά ώστε να ζητηθεί έλεγχος Επιπέδου 4, ο Ανάδοχος αποφάσισε να συνεχίσει με τον λεπτομερή έλεγχο αφού ήταν η πρώτη φορά που σημειώθηκε τόσο ισχυρός σεισμός
Επίπεδο 4	11/06/08 με 14/08/08	1) Επιβεβαιώθηκε με τον προμηθευτή, η διαρροή όλων των ασφαλειών (6) 2) Μικρές ζημιές μη-δομικού χαρακτήρα.	



**Εικόνα 5.4** Θέσεις επιταχυνσιογράφων - Κόκκινο: δύο επιταχυνσιογράφοι στις ακτές, Πράσινο: δώδεκα επιταχυνσιογράφοι πυλώνων (στη βάση πεδίλου, βάση πυλώνα, κορυφή πυλώνα, Κίτρινο: δεκαπέντε επιταχυνσιογράφοι κατάστρώματος. [27]





**Εικόνα 5.5** Δυναμοκυψέλες και μετρητές μετατόπισης - Κόκκινο: δύο μετρητές μετατόπισης στους αρμούς διαστολής, Πράσινο: δεκάξι δυναμοκυψέλες στα καλώδια, Κίτρινο: τέσσερις δυναμοκυψέλες στις «ασφάλειες». [27]

Επιπλέον, με τα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα δομικής παρακολούθησης, πραγματοποιήθηκε μια συμπληρωματική ανάλυση των βίντεο CCTV που καταγράφηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η εγκάρσια κίνηση του καταστρώματος.

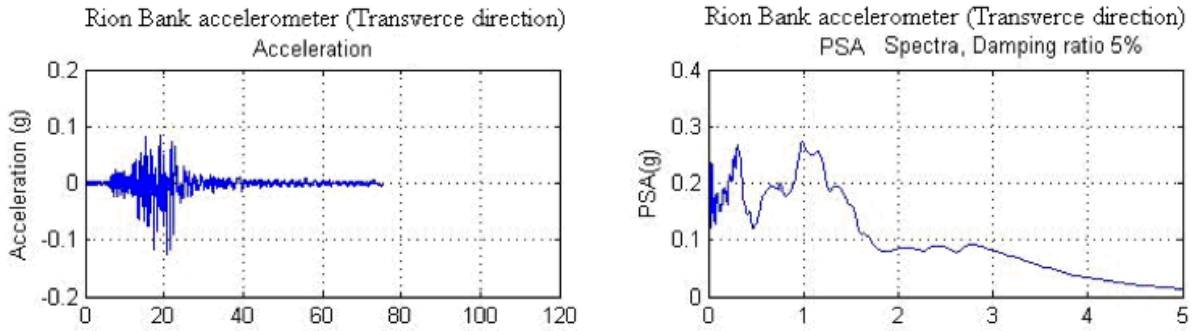
Σημειώνεται ότι πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες διορθώσεις στις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων που καταγράφηκαν πριν από τον υπολογισμό των ταχυτήτων / μετατοπίσεων. Τέλος, ο χαρακτηρισμός του γεγονότος και η εκτίμηση της εδαφικής κίνησης ελεύθερου πεδίου, στις περιοχές των ακτών, καθώς και ο προσδιορισμός της περιόδου επαναφοράς του φαινομένου ήταν δυνατός δεδομένου ότι ήταν γνωστό το λεπτομερές προφίλ του εδάφους στην περιοχή.

## 5.5 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Οι δυναμικές καταγραφές (επιταχύνσεις) του γεγονότος που παρουσιάζονται στη συνέχεια και προέρχονται από την εργασία των Paranikolas et al. [27] έχουν υποβληθεί σε επεξεργασία, προκειμένου να προκύψουν χωρίς σφάλματα τα δεδομένα για την ταχύτητα και μετατόπιση. Αντίθετα, για το φορτίο στα καλώδια και το άνοιγμα/κλείσιμο του αρμού δίνονται οι πρωτογενείς καταγραφές [27].

### 5.5.1 Καταγραφές στην ακτή

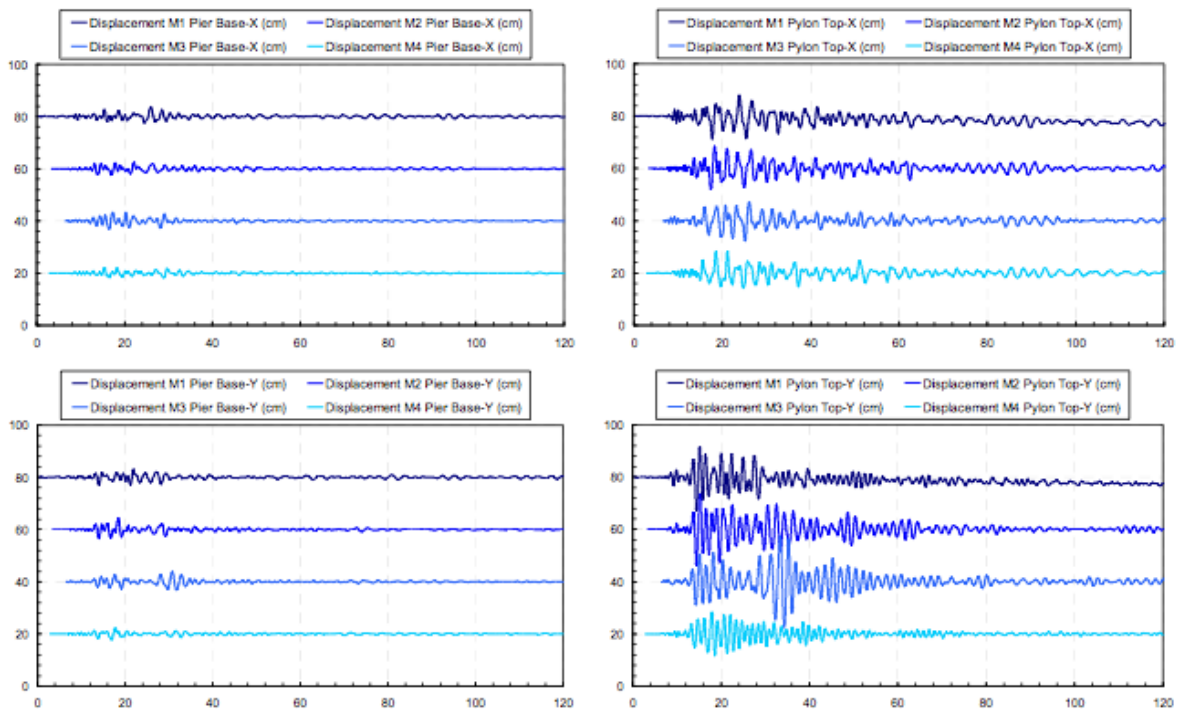
Η μέγιστη επιτάχυνση που καταγράφηκε ήταν 0.127g στην ακτή του Ρίου στην εγκάρσια διεύθυνση της γέφυρας. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υψηλές τιμές της φασματικής ψευδοεπιτάχυνσης για τιμές περιόδου κοντά στο 1 sec (Εικ 5.6).



**Εικόνα 5.6** Επιτάχυνση στην ακτή του Ρίου και αντίστοιχο φάσμα ψευδοεπιταχύνσεων. [27]

### 5.5.2 Καταγραφές στον πυλώνα

Η επιτάχυνση που καταγράφηκε στους πυλώνες επηρεάστηκε από έναν υψηλού πλάτους και συχνότητας παλμό που συνέβη όταν απελευθερώθηκαν οι πλευρικές ασφάλειες. Το «παραποιημένο» σήμα δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της ταχύτητας και της μετατόπισης από τα επιταχυνσιόμετρα στη βάση του πυλώνα. Η μέγιστη καταγραφείσα επιτάχυνση στις βάσεις του πεδίου και στην κεφαλή του πυλώνα είχαν και αυτές επηρεαστεί ελαφρώς. Η ενίσχυση της κίνησης απεικονίζεται στα επόμενα γραφήματα της Εικόνας 5.7, όπου η μετατόπιση στη βάση του πεδίου και στην κεφαλή του πυλώνα συγκρίνονται και για τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

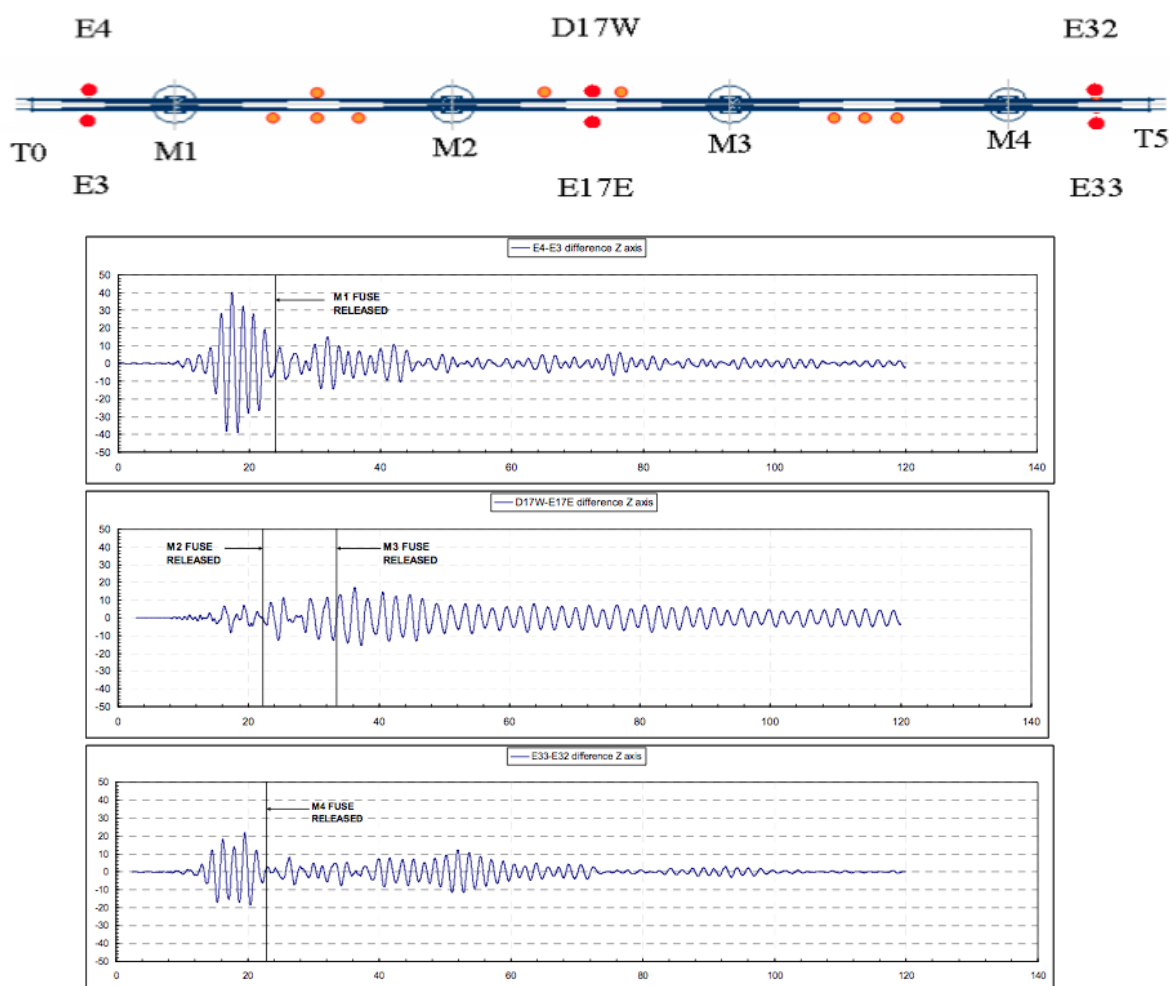


**Εικόνα 5.7** Μετατοπίσεις στη βάση του πεδίου και την κορυφή του πυλώνα. [27]

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η ενίσχυση των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερη κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα (Y) της γέφυρας (συντελεστής μεγέθυνσης 4.9 για M3-Y) από ότι κατά μήκος του διαμήκη άξονα (X) (συντελεστής μεγέθυνσης 3.4 για M2-X).

### 5.5.3 Καταγραφές για το κατάστρωμα

Στο κατάστρωμα καταγράφηκαν οι πιο ισχυρές ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού. Η επιτάχυνση ξεπέρασε τα 0.5g, ενώ το πλάτος της μετατόπισης έφτασε τα 27.7cm. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της κίνησης του καταστρώματος είναι η στρέψη που μπορεί να εξαχθεί συγκρίνοντας τη μετατόπιση που υπολογίζεται από δύο αντίθετα τοποθετημένα επιταχυνσιόμετρα στο κατάστρωμα. Υπάρχουν τρεις θέσεις στο κατάστρωμα με αντίθετα τοποθετημένα επιταχυνσιόμετρα (Εικ. 5.8).



**Εικόνα 5.8** Στρεπτική κίνηση καταστρώματος όπως προκύπτει από τις καταγραφές επιταχυνσιογράφων τοποθετημένων σε «απέναντι» θέσεις. [27]

Μείωση της στρεπτικής κίνησης του καταστρώματος παρατηρείται ιδιαίτερα στα ακραία ανοίγματα (T0-M1) και (M4-T5), όταν κατά τη διαρροή των περιοριστών της πλευρικής μετατόπισης (ασφαλειών).

#### 5.5.4 Καταγραφές φορτίων στα καλώδια

Η μεταβολή του φορτίου στο καλώδιο της γέφυρας παρέμεινε εντός του ορίου λειτουργικότητας (που έχει ορισθεί ως ίσο με το 50% του μέγιστου, δηλαδή 0.5FGUTS) και, επίσης, δεν έπεσε ποτέ κάτω από 0.15FGUTS. Στα διαγράμματα της Εικόνας 5.9 παρουσιάζεται το φορτίο στα καλώδια, όπως μετρήθηκε από το σύστημα δομικής παρακολούθησης κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος.

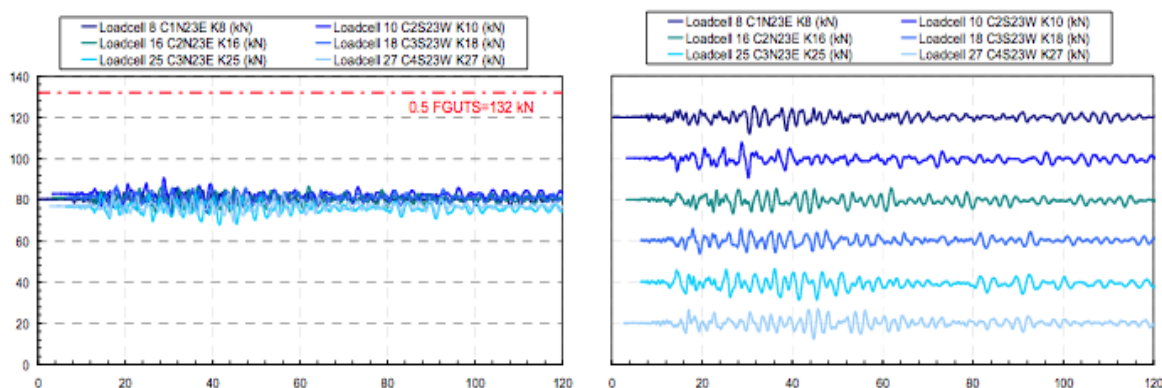
Από τις καταγραφές μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα κοντύτερα καλώδια έχουν μεγαλύτερη διακύμανση του φορτίου από τα μακρύτερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μακρύτερα καλώδια έχουν γωνία κλίσης σε σχέση με το κατάστρωμα και ως εκ τούτου είναι λιγότερο ευαίσθητα στην κατακόρυφη και εγκάρσια δόνηση του καταστρώματος.

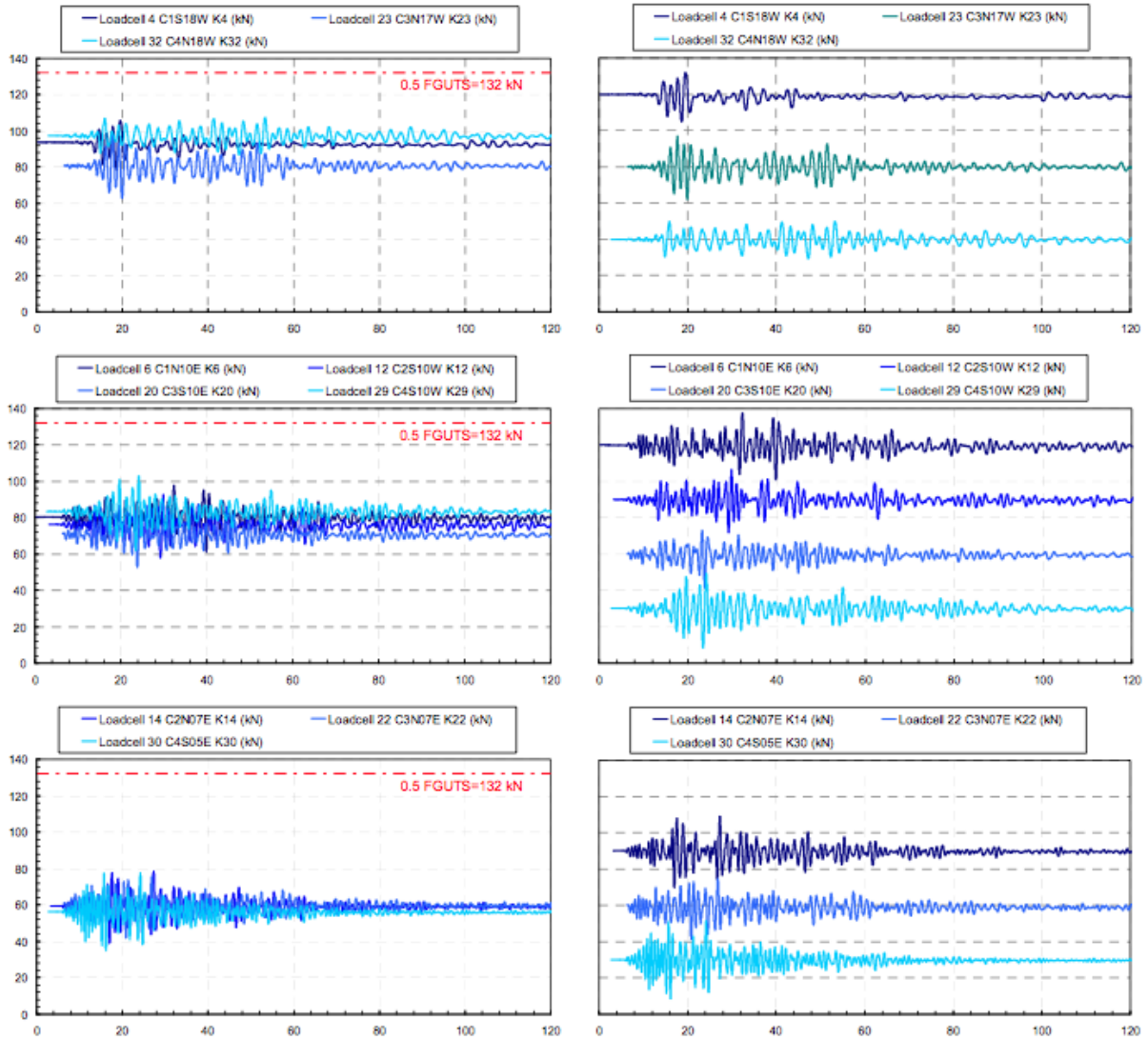
#### 5.5.5 Καταγραφές μετατοπίσεων στην άρθρωση επέκτασης στα άκρα της Γέφυρας

Η μετατόπιση που καταγράφηκε για την άρθρωση επέκτασης στα άκρα της Γέφυρας δεν υπερβαίνει τα 14 cm (Εικόνα 5.10), τιμή η οποία είναι χαμηλότερη από τη μέγιστη προβλεπόμενη ικανότητα της άρθρωσης για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS, +126 cm/-115cm).

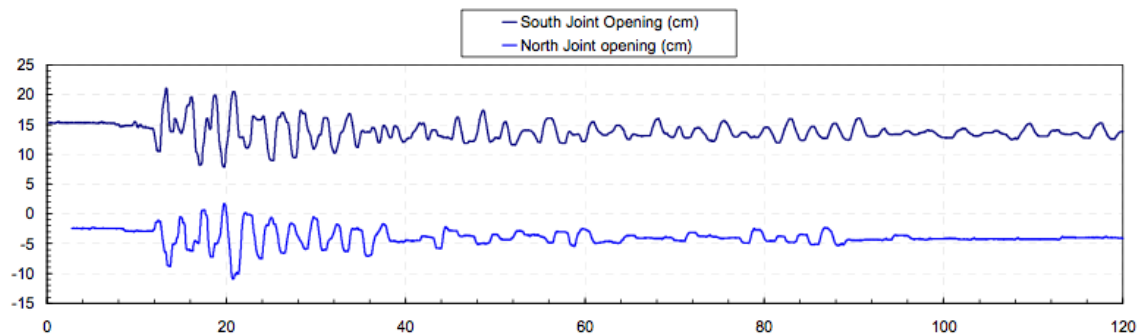
#### 5.5.6 Στοιχεία από την επεξεργασία βίντεο CCTV

Η επεξεργασία των πληροφοριών από το σύστημα δομικής παρακολούθησης περιλαμβάνει και μια βιντεοανάλυση, η οποία έχει στόχο να υπολογιστεί η πλευρική σχετική ως προς τους πυλώνες μετατόπιση του καταστρώματος καθώς και όσο το δυνατόν πιο ακριβείς πληροφορίες για τη διαδρομή και την ταχύτητα των αποσβεστήρων.





**Εικόνα 5.9** Καταγεγραμμένα φορτία στα καλώδια ομαδοποιημένα κατά μήκος (κοντύτερα προς μακρύτερα). [27]



**Εικόνα 5.10** Μετατοπίσεις στον αρμό διαστολής της Γέφυρας. [27]

Οι μέγιστες μετατοπίσεις και οι ταχύτητες της κάθε συσκευής παρακολούθησης που αφορά τους συγκεκριμένους υπολογισμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Όπως προκύπτει [27], η μέγιστη διαδρομή και ταχύτητα των αποσβεστήρων ήταν πολύ μικρή σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού (3500 mm και 1600 mm / sec για τη διαδρομή και την ταχύτητα αντίστοιχα).

**Πίνακας 5.2** Μέγιστη μετατόπιση και ταχύτητα των αποσβεστήρων που καταγράφηκε. [27]

Θέση	Μετατόπιση προς τα ανατολικά (mm)	Ταχύτητα προς τα ανατολικά (mm/sec)	Μετατόπιση προς τα δυτικά (mm)	Ταχύτητα προς τα δυτικά (mm/sec)
Ασφάλεια M1	-47.89	-	+48.55	-
Αποσβ/ρας M1 NE	-50.11	-179.8	+52.42	152.3
Αποσβ/ρας M1 SW	-51.84	-199.5	+47.99	159.0
Ασφάλεια M2	-28.55	-	<b>+123.35</b>	-
Αποσβ/ρας M2 NE	-	-	-	-
Αποσβ/ρας M2 SW	-30.09	-150.6	+114.28	<b>276.5</b>
Ασφάλεια M3	-48.19	-	+74.79	-
Αποσβ/ρας M3 SE	-43.35	-158.9	+70.69	148.4
Αποσβ/ρας M3 SW	-37.01	-203.6	+77.62	155.2
Ασφάλεια M4	-51.50	-	+60.57	-
Αποσβ/ρας M4 NE	-45.73	-157.5	+56.64	143.6
Αποσβ/ρας M4 SW	-54.78	-171.1	+66.79	213.9

## 5.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ

Για να χαρακτηριστεί ο σεισμός και να εκτιμηθεί η ένταση του σχετικού γεγονότος απαιτείται η κατάλληλη επεξεργασία των καταγεγραμμένων στοιχείων στα πλαίσια μιας ανάλυσης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση διεξήχθη από τον Alain Pecker και παρουσιάζεται στην εργασία των Papanikolas et al. [27]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής αναδεικνύουν την ιδιαίτερη σημασία της καταγραφής των δεδομένων απόκρισης μιας σημαντικής κατασκευής μέσω ενός συστήματος δομικού ελέγχου.

Η ανάλυση περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [27]:

- Υπολογισμός των εδαφικών κινήσεων του ελεύθερου πεδίου στις τέσσερις θέσεις των πυλώνων κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση της Γέφυρας
- Προσδιορισμός των παραμέτρων έντασης των υπολογιζόμενων σεισμικών κινήσεων ελευθέρου πεδίου
- Εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς του γεγονότος

Η αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας υπολογισμού των παραπάνω μεγεθών δεν αποτελεί στόχο της πτυχιακής εργασίας, οπότε ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία [27].

Ο συνολικός αριθμός των κινήσεων ελεύθερου πεδίου που υπολογίστηκαν είναι [27]:

2 διεγέρσεις (ακτή Ρίου, ακτή Αντίρριου)

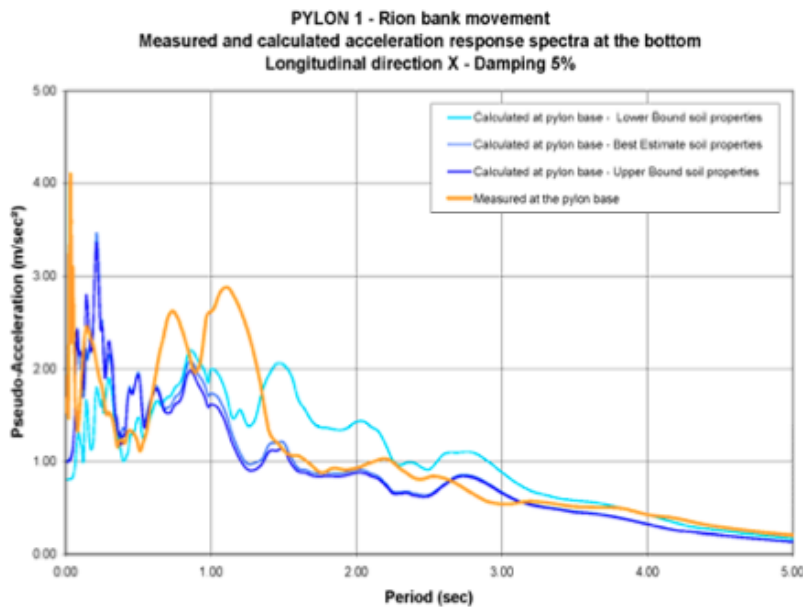
×2 κατευθύνσεις (διαμήκης; εγκάρσια)

×3 σετ των ιδιοτήτων του εδάφους (κατώτερο όριο, βέλτιστη εκτίμηση, ανώτατο όριο)

×4 θέσεις πυλώνων (M1, M2, M3, M4)

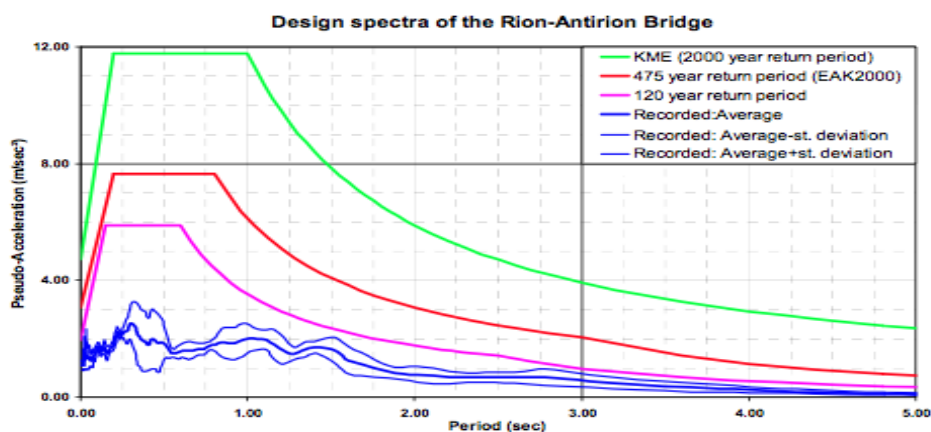
συνολικά 48 εκτιμήσεις της σεισμικής εδαφικής κίνησης (12 για κάθε πυλώνα).

Η Εικόνα 5.10 παρουσιάζει το φάσμα απόκρισης που προέκυψε από τα επιταχυνσιογραφήματα για τη θέση του πυλώνα M1, για τρία σετ εδαφικών ιδιοτήτων, χρησιμοποιώντας για τον υπολογισμό των χρονοϊστοριών ως πρώτη ύλη την καταγραφή από την ακτή του Ρίου. Επιπροσθέτως, παρέχεται το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων, όπως προέκυψε από τις πραγματικές καταγραφές στη βάση του πυλώνα. Αυτά τα φάσματα δεν ταυτίζονται, επειδή το ένα είναι ένα φάσμα που προέκυψε από καταγραφές ελεύθερου πεδίου (υπολογισμένες), ενώ το άλλο περιλαμβάνει και την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, η οποία είναι σημαντική λόγω της μάζας και των διαστάσεων του πυλώνα.

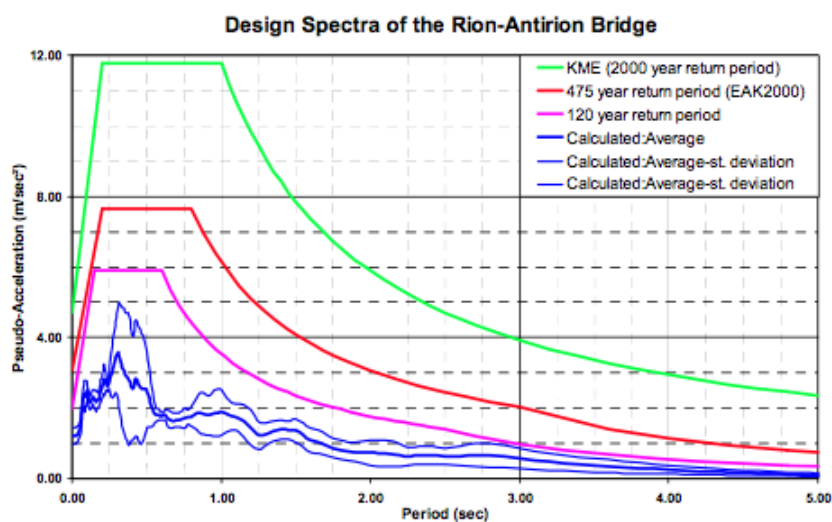


**Εικόνα 5.10** Φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων στη θέση του πυλώνα M1 με βάση τις αντίστοιχες υπολογισμένες και τις πραγματικές χρονοϊστορίες. [27]

Στις Εικόνες που ακολουθούν (Εικ. 5.11 και 5.12) παρουσιάζεται ο μέσος όρος  $\pm$  την τυπική απόκλιση των φασμάτων απόκρισης που προέκυψαν από τις πραγματικές καταγραφές του συστήματος (4 κινήσεις στις ακτές) και τους υπολογισμούς (48 κινήσεις κάτω από τους πυλώνες). Διάφορα φάσματα σχεδιασμού (2000, 475, 120 χρόνια περίοδος επαναφοράς) παρέχονται επίσης για σύγκριση. Οι πληροφορίες του συστήματος παρακολούθησης μας δείχνουν ότι το σεισμικό γεγονός που μετρήθηκε δεν ξεπερνά σε ένταση τα σχεδιαστικά όρια που χρησιμοποιήθηκαν.



**Εικόνα 5.11** Μέσο φάσμα επιταχύνσεων ± τυπική απόκλιση από τις καταγραφές στην ακτή και σύγκριση με διάφορα φάσματα σχεδιασμού. [27]



**Εικόνα 5.12** Μέσο φάσμα επιταχύνσεων ± τυπική απόκλιση από τις καταγραφές που υπολογίστηκαν για τους πυλώνες και σύγκριση με διάφορα φάσματα σχεδιασμού. [27]

### 5.6.1 Προσδιορισμός των παραμέτρων έντασης

Για κάθε μία από τις 48 υπολογισμένες και για τις 4 πραγματικές (στις ακτές του Ρίου και του Αντιρρίου) καταγραφές εδαφικών επιταχύνσεων ελεύθερου πεδίου υπολογίστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι έντασης [27]:

- Μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (PGA)
- Ένταση κατά Arias (Arias intensity  $I_a$ )
- Συσσωρευτική Απόλυτη Ταχύτητα (Σ.Α.Τ.)



Ο μέσος όρος και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 5.3). Είναι χαρακτηριστικό ότι οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις μετρήθηκαν αρκετά χαμηλότερες από τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό.

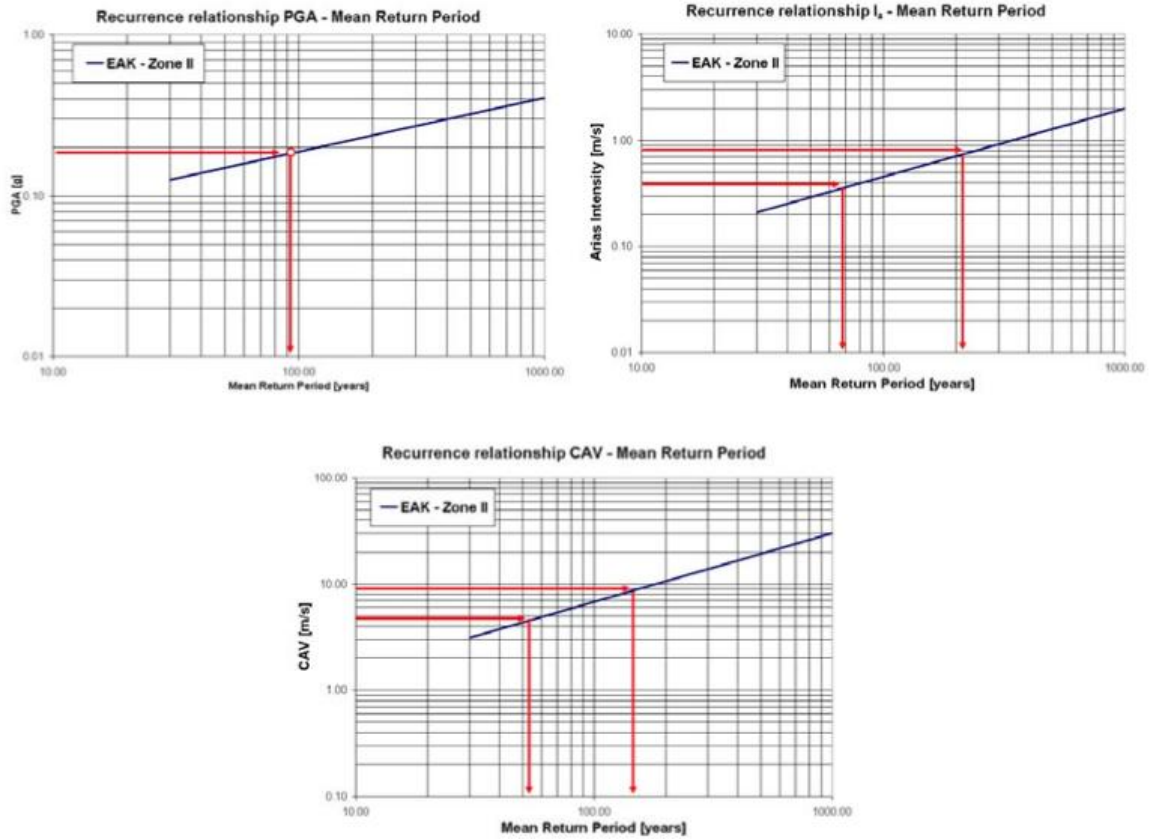
**Πίνακας 5.3.** Υπολογισμένοι παράμετροι έντασης (μέσες, ακραίες τιμές). [27]

<b>Παράμετροι έντασης για:</b>	<b>PGA</b>	<b>Ένταση κατά Arias</b>	<b>Σ.Α.Τ.</b>
4 καταγεγραμμένες Ρίο/Αντίρριο	0.11g (0.093g-0.127g)	0.39 (m/sec) (0.38-0.40)	5.31 (m/sec) (5.10-5.76)
48 υπολογισμένες κάτω από πυλώνες	0.123g (0.071g-0.189g)	0.55 (m/sec) (0.34-0.84)	5.92 (m/sec) (4.50-8.39)

### 5.6.2 Εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς

Χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες παραμέτρους έντασης, έγινε μια εκτίμηση (ανώτερο και κατώτερο όριο) της περιόδου επαναφοράς του σεισμού χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στη βιβλιογραφία [27]. Τα αποτελέσματα αποδίδονται σχηματικά στην Εικόνα 5.13.

Η εξέταση των στοιχείων και η μελέτη των μετρούμενων τιμών των παραμέτρων εδαφικής κίνησης οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η περίοδος επιστροφής του εξεταζόμενου σεισμού είναι μεταξύ 30-56 ετών, 80-194 ετών και 65-98 ετών για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, την ένταση κατά Arias και τη συσσωρευτική απόλυτη ταχύτητα αντίστοιχα, με μια καλύτερη εκτίμηση να είναι τα περίπου 80-135 χρόνια. Η παρατήρηση αυτή είναι σύμφωνη με φάσμα επιταχύνσεων που υπολογίσθηκε για τις καταγραφές στις όχθες και στις βάσεις των πυλώνων της Γέφυρας, που προέκυψε στην περιοχή τιμών του αντίστοιχου φάσματος σχεδιασμού για περίοδο 120 χρόνων (λίγο μικρότερες τιμές).



**Εικόνα 5.13** Εκτίμηση των περιόδων επαναφοράς με βάση το ανώτερο και κατώτερο όριο της κάθε παραμέτρου έντασης. [27]

## 5.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Μετά το σεισμό, διεξήχθη μία πλήρης γεωμετρική παρακολούθηση προκειμένου να ελεγχθεί αν είχαν σημειωθεί τεκτονικές κινήσεις ή καθιζήσεις κατά τη διάρκεια του φαινομένου.

Λίγο πριν από το σεισμό, στα πλαίσια του προγράμματος γεωμετρικής επιθεώρησης της Γέφυρας, είχαν πραγματοποιηθεί μετρήσεις σε δύο στάδια, το GN1 (τοπογραφικές μετρήσεις επίπεδων αποστάσεων σε Ρίο και Αντίρριο) και GN2 (υψόμετρα στην ακτής του Ρίου και Αντίρριου, και απόσταση Ρίου-Αντίρριου).

Η σύγκριση των μετρήσεων της ομάδας GN1 πριν και μετά τον σεισμό δεν έδειξε σημαντικές μετατοπίσεις ούτε κύριο προσανατολισμό τους. Παρατηρήθηκε μία μέγιστη μετατόπιση 10mm στην κορυφή ενός κτιρίου που ενδεχομένως επιβαρύνθηκε κατά το σεισμό, ενώ οι μετατοπίσεις σε άλλα σημεία παρέμειναν κάτω από 3mm, δηλαδή δεν είναι σημαντικές λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια της μέτρησης.

Η σύγκριση των μετρήσεων της ομάδας GN2 πριν και μετά το σεισμό δεν έδειξαν σημαντικές μετακινήσεις. Τα σχετικά υψόμετρα και στις δύο ακτές παραμένουν πολύ συμβατά με τις προ-σεισμού τιμές τους. Η καθίζηση της ακτής του Ρίου που παρατηρήθηκε,

φαίνεται να έχει μειωθεί (5mm κατά τη διάρκεια του σεισμού), αλλά αυτές οι τιμές είναι μέσα στα όρια ακρίβειας της μέτρησης.

### **5.7.1 Αποτελέσματα γεωμετρικών ελέγχων για τους πυλώνες της γέφυρας**

Η μέγιστη καθίζηση που μετρήθηκε στη βάση του πυλώνα M1 λόγω του σεισμού ήταν 21mm.

Οι θέσεις των M3 και M4 στο επίπεδο της βάσης του πυλώνα παραμένουν πολύ κοντά με αυτές που παρατηρήθηκαν κατά τις μετρήσεις του 2006 (μετατοπίσεις <10mm). Οι μετακινήσεις στις βάσεις των πυλώνων M1 και M2 είναι ελαφρώς μεγαλύτερες αλλά παραμένουν <15mm. Οι μετατοπίσεις από το 2006 φθάνουν μόνο τα 16mm στις κορυφές των πυλώνων. Εν ολίγοι, δεν έχουν παρατηρηθεί σημαντικές μετατοπίσεις από το 2006 που μπορούν να οφείλονται στον σεισμό.

### **5.7.2 Θέση ισοροπίας του καταστρώματος**

Δεδομένου ότι οι περιοριστές των πλευρικών μετατοπίσεων (ασφάλειες) του καταστρώματος διέρρευσαν, η θέση του καταστρώματος εξαρτόταν από την ταχύτητα/κατεύθυνση του ανέμου. Για την αντικατάσταση «ασφαλειών» ήταν επιτακτική ανάγκη να εκτιμηθεί η νέα θέση ισοροπίας του καταστρώματος.

Τα αποτελέσματα της τοπογραφικής έρευνας έδειξαν ότι δεν υπήρχε κάποια σημαντική μετατόπιση των πυλώνων, σε σχέση με τις μετρήσεις του 2006. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να επανέλθει το κατάστρωμα στη θέση του 2006.

## **5.8 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

Τα αποτελέσματα από τις επιθεωρήσεις της κατασκευής και τη γεωμετρικής παρακολούθηση αποκάλυψαν ότι ήταν απαραίτητες ορισμένες εργασίες αποκατάστασης προκειμένου να επανέλθει πλήρως η γέφυρα στην κατάσταση που ήταν πριν από το σεισμό. Αυτές ήταν η επανευθυγράμμιση του καταστρώματος και η αντικατάσταση των «ασφαλειών» έναντι πλευρικών μετατοπίσεων με νέες.

Τα έργα επανευθυγράμμισης του καταστρώματος πραγματοποιήθηκαν πριν από την αντικατάσταση των «ασφαλειών» στις στηρίξεις, προκειμένου να επανέλθει το κατάστρωμα στη στοχευόμενη θέση του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας γρύλος 100 τόνων. Στους τέσσερις πυλώνες η επανευθυγράμμιση του καταστρώματος διεξήχθη ταυτόχρονα με την αντικατάσταση των «ασφαλειών». Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις υδραυλικοί γρύλοι (Εικόνα 5.14).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εργασίες αντικατάστασης των «ασφαλειών» (6 συνολικά) είχαν διάρκεια δύο εβδομάδες, όπως είχε αρχικά προβλεφθεί.



**Εικόνα 5.14** Εργασίες επανευθυγράμμισης του καταστρώματος και αντικατάστασης των ασφαλειών έναντι πλευρικών μετατοπίσεων στους πυλώνες. [27]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε σημαντικές κατασκευές, όπως η Γέφυρα Ρίου - Αντιρρίου ενσωματώνεται ένα σύστημα δομικής παρακολούθησης που μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες απόκρισης για μια ευρεία ποικιλία περιπτώσεων φόρτισης. Το σύστημα αυτό είναι επίσης αναγκαίο για την ασφάλεια των χρηστών σε περίπτωση ειδικών γεγονότων, όπως ο σεισμός και ο άνεμος. Οι αναβαθμίσεις και η συνεχής συντήρηση του συστήματος είναι τα βασικά σημεία για την υψηλή διαθεσιμότητά του και την συλλογή αξιόπιστων δεδομένων.

Ένα Σύστημα Ενόργανης Παρακολούθησης με τα υποστηρικτικά λογισμικά του είναι γενικά χρήσιμο για την:

- επιβεβαίωση καλής ποιότητας της κατασκευής μετά την αποπεράτωση των εργασιών:
  - επιβεβαίωση δυναμικής συμπεριφοράς
  - διάγνωση πιθανών κατασκευαστικών σφαλμάτων
  - βαθμονόμηση του μοντέλου που περιγράφει την συμπεριφορά της κατασκευής
- παρακολούθηση σε τακτά χρονικά διαστήματα για χρόνιες περιβαλλοντικές επιδράσεις (κόπωση, γήρανση) που οφείλονται σε ταλαντώσεις λειτουργίας (φορτία ανέμου και κυκλοφορίας οχημάτων)
- παρακολούθηση και διαπίστωση της κατάστασης (λειτουργικότητα, ασφάλεια) της κατασκευής μετά από μια σημαντική καταπόνηση (π.χ. δυνατό σεισμό, ανεμοθύελλα)
  - επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας της κατασκευής
  - εντοπισμός πιθανής βλάβης
  - δυνατότητα εντοπισμού της περιοχής και του μεγέθους της βλάβης, καθώς και των επιπτώσεών της στη λειτουργικότητα και ασφάλεια της κατασκευής
  - διαπίστωση της ανάγκης για παρέμβαση
  - προγραμματισμός στρατηγικής συντήρησης

Συγκεκριμένα στην περίπτωση της γέφυρας Ρίου – Αντιρρίου που εξετάστηκε, η ανάλυση της πραγματικής απόκρισης της κατασκευής που καταγράφηκε μέσω του συστήματος παρακολούθησης της γέφυρας κατά το γεγονός ισχυρού ανέμου το 2006, έδωσε την ευκαιρία να βελτιστοποιηθεί η απαιτούμενη τεχνική επέμβαση για την αύξηση της απόσβεσης των καλωδίων, σε αυτή την περίπτωση οι εξωτερικοί αποσβεστήρες στα μεσαία και μακριά καλώδια. Η αποτελεσματικότητα της βελτίωσης που κατασκευάστηκε επαληθεύτηκε επίσης μέσω δοκιμών με τη βοήθεια του συστήματος παρακολούθησης. Επίσης, η απόκριση των καλωδίων που μετρήθηκε κατά την έντονη καταιγίδα που έπληξε τη γέφυρα τρία χρόνια μετά την εφαρμογή της παρέμβασης έδειξε ότι η ταλάντωσή τους ήταν περιορισμένη αν και η δόνηση του καταστρώματος ήταν πιο έντονη από ότι το 2006, όπως αναμενόταν.

Επιπλέον, τα δεδομένα που καταγράφηκαν από το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά της γέφυρας, τον χαρακτηρισμό και τον υπολογισμό της έντασης του ισχυρού σεισμού που έπληξε την περιοχή το 2008. Η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους που καταγράφηκε στην ξηρά ήταν 0.127g (στην

ακτή του Ρίου), ενώ η μέγιστη εκτιμώμενη στις βάσεις των πυλώνων ήταν 0.184g (στον M3). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης επιτάχυνσεων παραμένουν κάτω από αυτά που αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς 475 σύμφωνα με τον ΕΑΚ, και βρίσκονται στην περιοχή περιόδων επαναφοράς της τάξης των 120 χρόνων. Όσον αφορά τις μετατοπίσεις των θεμελίων που προκλήθηκαν από το σεισμό, οι μετρήσεις έδειξαν ότι δεν υπήρξε κάποια σημαντική οριζόντια ολίσθηση λόγω του σεισμού και ότι οι καθιζήσεις ήταν μικρές. Τέλος η απόκριση της κύριας γέφυρας όπως φαίνεται από τις καταγραφές του συστήματος ήταν εντός των ορίων λειτουργικότητας, ενώ τα μέλη που περιορίζουν τις πλευρικές μετατοπίσεις (θυσιαζόμενα στοιχεία), απελευθερώθηκαν για την πρόληψη ζημιών της κατασκευής. Η κατασκευή αποκαταστάθηκε πλήρως μετά από την αντικατάσταση των «ασφαλειών».

Συνοψίζοντας τα παραπάνω στοιχεία, προκύπτει με σαφήνεια ότι οι πληροφορίες που παρέχει (το πλήθος και ή ακρίβειά τους) καθιστούν την ενόργανη παρακολούθηση ένα σημαντικό εργαλείο δομικής αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων για την συντήρηση μεγάλων τεχνικών έργων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Λεκίδης Βασίλης ΠΜ, Καρακώστας Χρήστος ΠΜ, Πανέτσος Παναγιώτης ΠΜ, Διαμαντουλάκη Ιωάννα ΠΜ, «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' αριθμών απόφαση Α191/Σ11/08 της Διοικούσας Επιτροπής, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Ιούνιος 2009, Θεσσαλονίκη
- [2]. Chang, F-K (1991) (Editor), Structural Health Monitoring 2000 Workshop, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop, Stanford University, CA, USA
- [3]. Επίσημη Σελίδα της Γέφυρας Ρίου - Αντιρρίου 'Χαρίλαος Τρικούπης'. [http://www.gefyra.gr/?page\\_id=46](http://www.gefyra.gr/?page_id=46)
- [4]. Θ.Π. Παπαλιάγκας, «Πειραματική Αντοχή Υλικών», Σημειώσεις παραδόσεων εργαστηρίου, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομή, ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- [5]. Δ.Ν. Μούζουλα, «Διερεύνηση Χαρακτηριστικών Μετρήσεων Επιτάχυνσης από Σύγκριση Καταγραφών Πολλαπλών Επιταχυνσιογράφων», Διατριβή για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- [6]. Health Monitoring of airspace structures, W. Stoszew, C. Boller, G. Tomlinson, John Wiley & Sons Inc., 2004
- [7]. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Udd, E.(Editor), Wiley – Interscience, New York, NY, 2<sup>nd</sup> Edition, 2006
- [8]. Handbook of optical fibre sensing technology, Jose Miguel Lopez – Higuera, John Wiley & Sons, 2002
- [9]. Fiber Optic Sensors, Bahared Gholamzadeh and Hiiman Nabovatti, World Academy of Science, Engineering and Technology 42008
- [10]. Fiber Optic Sensors for Structural Control, Daniele Inaudi and Andrea del Grosso 2008
- [11]. Θεοδώρου, «Δυναμικός Έλεγχος Βάρους – Βασικές Αρχές», Άρθρα και White Papers
- [12]. Bomford, B. (1971), «Geodesy», Oxford University Press, 3<sup>rd</sup> Edition
- [13]. Ψιμούλη Α. Παναγιώτη, «Συμβολή στη διερεύνηση της δυνατότητας καταγραφής ταλαντώσεων με τα γεωδαιτικά όργανα GPS-RTS», Διατριβή για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωδαιτικών Εφαρμογών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σεπτέμβριος 2005, Πάτρα
- [14]. Fontana D.R., Cheug W., Stansell t. (2001), «The modernized L2 civil signal – Leaping forward to the 21<sup>st</sup> century», GPS World, September 2001, 28-34
- [15]. Meng X., Roberts G.W., Dodson A.H., Cosser E., Barnes I. and Rizos C.(2004), «Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural deformation monitoring: analytical and empirical studies», Journal of Geodesy, Vol77(12), pp.809-822
- [16]. Smith J. (1997), «Introduction to Geodesy – The history and the concepts of modern Geodesy», Wiley – Interscience New York, USA, 1997
- [17]. Moore T., Roberts G.W. (1991), «Carrier phase GPS Navigation to the north pole», Journal of Navigation, Vol52(1), pp.80-89
- [18]. Marchetti M., Bouton B., Monniere J., Bouve P., Dupuis D., Dadoum F., Baechler J. and Olsfors J., «Adjustment of the Rion–Antirion cable stayed bridge: an innovoective

- multidisciplinary response of a construction challenge», Prof. Of 1<sup>st</sup> FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, 28 June – 1 July 2004, <http://www.fig.net/nottingham>
- [19]. Roberts G., Meng X. and Dodson A. (2004), «Integrating o Gobar Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges», Journal of surveying Engineering, May 2004, pp. 65-72
- [20]. Wong K.-Y., Man K.-L. and Chan W.-Y. (2001), «Monitoring Hang Kony's Bridges Real-Time Kinemati Spans Gap», GPS World, July 2001, p.10-18
- [21]. Brownjohn J., Rizos C., Tan G.-H., Pan T.-C. (2004), «Rean-Time Long-Term monitoring of Static and Dynamic displacements of an office tower, combining RTK-GPS and Accelerometer data», Nottingham, UK, June 2004
- [22]. Ogaja C., Wang J. and Rizos C. (2003), «Detection of Wind – Induced Response by Wavelet Transformed GPS Solutions», Journal of Surveying Engineering, August 2003, pp.99-104
- [23]. Wasilewski A., Rzepecka Z. and Kapcia I. (1994), «Appications of GPS – RTK technique to study deformation of Aerial Radio – TV masts», Proc. Of the 9<sup>th</sup> FIG, International Symposium on Deformation Measurements, pp.168-180, Olsztyn, Poland, September 1999
- [24]. Lovse J., Teskey W., Lachapelle G. and Cannon M. (1995), «Dynamic Deformation Monitoring of Tall Strusture Using GPS Technology», Journal of Surveying Engineering, 121.(1), pp.35-40
- [25]. Miyazaki S., Larson K., Choi K., Hikima K., Kokestu K., Bodin P., Haase J., Emore G. and Yamagiwa A. (2004), «Modeling the rupture process og the 2003 September 25 Tokachi – Oki (Hokkaido) earthquake using 1-H2 GPS data», Geophysical Research Letters, Vol31, L21603
- [26]. Structural Health Monitoring System of Rion - Antirion Bridge “Charilaos Trikoupis”, Π. Παπανικόλας, Α. Σταθόπουλος-Βλάμης, Α. Παναγής, Gefyra S.A., Αθήνα, 2011
- [27]. Wind Induced Cable Vibration of Rion – Antirion Bridge “Charilaos Trikoupis”, Π. Παπανικόλας, Α. Σταθόπουλος-Βλάμης, Α. Παναγής, G. Grillaud, O. Flamand, Gefyra S.A., Αθήνα, 2011
- [28]. Χρήστος Τσωνος , Αισθητήρες – Interfaces’’,Εργαστηριακές Σημειώσεις , Τμήμα ηλεκτρονικών μηχανικών , Σχολή Τεχνολογικών εφαρμογών , Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Στερεάς Ελλάδας , Λαμία 2011.