

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ**

Έλενα Ψύλλου

Λεμεσός 2011

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ

ΧΡΗΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Έλενα Ψύλλου

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Καθ. Τούλα Ονουφρίου

Λεμεσός 2011

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Έλενα Ψύλλου, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Πληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια της εργασίας μου καθ. Τούλα Ονουφρίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία και για την καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκειά της. Ευχαριστώ, επίσης, τους καθηγητές Δρ. Διόφαντο Χατζμιστή, Δρ. Έλια Ταντελέ και Δρ. Κρίστη Χρυσοστόμου για τη στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Διαχείριση Γεφυρών αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι στη συνέχιση της λειτουργίας της γέφυρας. Η γέφυρα ως ένα σύστημα εκτεθειμένο στο περιβάλλον δέχεται επιδράσεις από αυτό περιβάλλον, τα φορτία κυκλοφορίας και άλλες εξωτερικές δράσεις που επηρεάζουν αρνητικά την κατάστασή της, μειώνοντας την απόδοση. Μέσα από το Σύστημα Παρακολούθησης Υγείας της κατασκευής, παρακολουθείται η απόδοσή σε διάφορες χρονικές περιόδους μέσα από επιθεωρήσεις σε διακριτά και συνεχή χρονικά διαστήματα με αντίστοιχα τις μη-καταστροφικές μεθόδους και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι μετρήσεις αποτελούν τα δεδομένα των μοντέλων εκτίμησης απόδοσης κατασκευής και μαζί με τα κριτήρια του ελάχιστου κόστους και της βέλτιστης απόδοσης εκτιμάται η βέλτιστη στρατηγική συντήρησης μέσα από αντίστοιχα μοντέλα. Η μοντέρνα προσέγγιση της διαχείρισης των γεφυρών γίνεται μέσω των πιθανοτήτων ως ένας τρόπος εισαγωγής και μείωσης της αβεβαιότητας. Τα οφέλη από τα Συστήματα Παρακολούθησης Υγείας της υποδομής φαίνονται στο συνολικό κόστος ζωής της γέφυρας και στην αύξηση της απόδοσης της στο κύκλο ζωής της.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια ανασκόπηση στην αξιοποίηση των Συστημάτων Παρακολούθησης Υγείας υποδομής σε καλωδιωτές γέφυρες μεγάλου μήκους από σκυρόδεμα και σύμμεικτα υλικά στο σύστημα διαχείρισης γεφυρών μέσα από τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού. Αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι δράσεις που δέχεται η κατασκευή από το περιβάλλον και τον άνθρωπο και οι επιπτώσεις στην απόδοσή της, στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται οι ευφυείς τρόποι λήψης μετρήσεων από την κατασκευή εν ώρα λειτουργίας, στο Κεφάλαιο 4 θέτονται τα μέσα επεξεργασίας των δεδομένων για τη διαχείριση της γέφυρας στο κύκλο ζωής της μέσα από τις στρατηγικές βέλτιστου σχεδιασμού, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται μελέτες από εφαρμογές των Συστημάτων Παρακολούθησης Υγείας υποδομής και ειδών συντήρησης για αύξηση του δείκτη αξιοπιστίας των γεφυρών και τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται συζήτηση ως προς το θέμα της διαχείρισης γεφυρών και βελτιστοποίησης σχεδιασμού με τη χρήση Συστημάτων Παρακολούθησης Υγείας υποδομής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	ix
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xxi
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ	xiii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xiii
1 Βελτιστοποίηση διαχείρισης γεφυρών.....	1
2 Δράσεις στη γέφυρα.....	3
2.1 Επιδείνωση της κατάστασης τα γέφυρας.....	3
2.2 Φορτία που ασκούνται στη γέφυρα.....	6
2.3 Συζήτηση.....	7
3 Ευφυής Σχεδιασμός Υποδομής.....	9
3.1 Επιθεώρηση υποδομών.....	9
3.2 Μη – καταστροφικές μέθοδοι.....	11
3.2.1 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις/Περιορισμοί.....	12
3.2.2 Είδη μη-καταστροφικών μεθόδων.....	13
3.2.3 Εφαρμογές μη-καταστροφικών μεθόδων	18
3.3. Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων.....	20
3.3.1 Πλεονεκτήματα.....	20
3.3.2 Προκλήσεις/Περιορισμοί.....	21
3.3.3 Είδη Συνεχής Παρακολούθησης.....	22
3.3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΕΔΥ.....	23
3.3.5 Εφαρμογές.....	26
3.4 Αβεβαιότητα των μεθόδων.....	29

3.5 Συζήτηση	32
4. Λήψη απόφασης.....	34
4.1 Κύκλος ζωής και συνολικό κόστος ζωής.....	34
4.2 Τρόποι λήψης απόφασης.....	38
4.3 Αβεβαιότητα στην λήψη απόφασης.....	41
4.4 Κριτήρια λήψης απόφασης.....	42
4.5 Απαιτήσεις απόφασης.....	43
4.6 Συντήρηση και Αντικατάσταση.....	43
4.6.1 Προληπτική συντήρηση.....	44
4.6.2 Τακτική συντήρηση.....	46
4.6.3 Μοντέλα βελτιστοποίησης στρατηγικής συντήρησης.....	47
4.7 Ενέργειες συντήρησης, επισκευής και ανακατασκευής.....	51
4.8 Συζήτηση.....	56
5. Μελέτες	58
5.1 Γενικά χαρακτηριστικά και κίνδυνοι γέφυρας.....	58
5.2 Μέθοδοι επιθεώρησης.....	58
5.3 Παρακολούθηση δυναμικών χαρακτηριστικών γέφυρας.....	59
5.4 Παρακολούθηση συμπεριφοράς γέφυρας λόγω καιρικών συνθηκών.....	63
5.5 Παρακολούθηση επιδείνωσης γέφυρας.....	64
5.6 Συντήρηση αδύναμων μελών.....	67
5.7 Συζήτηση.....	67
Συμπεράσματα.....	68
Αναφορές.....	73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.4.1: Ακρίβεια οργάνου μέτρησης σε γέφυρα 30% πιθανότητα διάβρωσης.....	31
Πίνακας 3.4.2: Ακρίβεια οργάνου μέτρησης σε γέφυρα 10% πιθανότητα διάβρωσης.....	31
Πίνακας 4.1.1: Κόστος επιδιόρθωσης και συντήρησης για μέλη της γέφυρας λαμβάνοντας τιμές το έτος 1999.....	38
Πίνακας 5.2.1: Μη-καταστροφικές μέθοδοι στα μέλη.....	59
Πίνακας 5.6.1: Προτεινόμενες λύσεις για επισκευή ή αντικατάσταση αποδυναμωμένου μέλους.....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Σύστημα Διαχείρισης Γεφυρών.....	2
Σχήμα 3.2.2.1 Ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης.....	14
Σχήμα 3.6.1 Τοποθέτηση αισθητήρων στα εφέντρανα.....	27
Σχήμα 3.6.2 Διάταξη συστήματος Anode Ladder System.....	29
Σχήμα 4.1.1 Απόδοση της κατασκευής.....	35
Σχήμα 4.1.2 Μεταβολή δείκτη αξιοπιστίας στο χρόνο χωρίς συντήρηση, με στοιχειώδη συντήρηση, με προληπτική συντήρηση και με συνδυασμό.....	36
Σχήμα 4.2.1 Μοντέλο Βελτιστοποίησης στρατηγικής συντήρησης επιδεινωμένης κατασκευής.....	40
Σχήμα 4.2.2 Αναβάθμιση μοντέλου βελτιστοποίησης στρατηγικής συντήρησης επιδεινωμένης κατασκευής.....	41
Σχήμα 4.2.3 Υπολογισμός δυναμικής απόκρισης κατασκευής.....	41
Σχήμα 4.3.1 Επιρροή συνδυασμών δράσεων σε μεικτό σύστημα μελών.....	42
Σχήμα 4.6.1 Προληπτική συντήρηση με ικανοποιητικό κόστος συντήρησης στα αριστερά και μη-ικανοποιητικό κόστος συντήρησης στα δεξιά.....	44
Σχήμα 4.6.3.1 Μεταβολή δείκτη αξιοπιστίας χωρίς και με παρακολούθηση.....	51
Σχήμα 4.7.1 Ενίσχυση δοκού για αντοχή σε τέμνουσα με μεταλλική πλάκα α)τέσσερις πηροί, β)μόνο, γ)τρεις πηροί, δ)με εξωτερικούς συνδετήρες, ε)συνεχής πλάκα	55
Σχήμα 4.7.2 Ενίσχυση δοκού για αντοχή σε κάμψη με μεταλλική πλάκα	56
Σχήμα 5.3.1 Θέση αισθητήρων στη Jindo Bridge.....	60
Σχήμα 5.3.2 Επιταχυνσιογραφήματα σε τρεις άξονες των αισθητήρων στο κατάστρωμα D-JE3, D-JE8 και D-JE11, στο πυλώνα P-JE1 και στα καλώδια JC13 και JC15	61
Σχήμα 5.3.3. Η FRP-OFBG ράβδος που έχει τους OFBG αισθητήρες επιμήκυνσης και θερμοκρασίας,	63
Σχήμα 5.4.1 Μεταβολή θερμοκρασίας σε ένα 24ώρο στα καλώδια L18 και R18 που είναι στη μέση της αριστερής και δεξιάς ομάδας των καλωδίων.....	64
Σχήμα 5.5.1 Μεταβολή του σήματος με τον εντοπισμό ρωγμής στην επιφάνεια του σκυροδέματος.	66

Σχήμα 5.5.2 Κύματα για σπασμένο τένοντα, drilling και chipping.....66

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΑΔΑ:	Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων
ΕΔΥ:	Έξυπνη Διαχείριση Υποδομών
ΣΓΔ:	Σύστημα διαχείρισης Γέφυρας
ΣΚΖ:	Συνολικό κόστος ζωής
ΣΠΥ:	Σύστημα παρακολούθησης υγείας υποδομής
AC:	Acoustic emission
EC:	Eddy current
IE:	Impact-echo inspection
GPR:	Ground penetrating radar
MT:	Magnetic particle inspection
PoD:	Πιθανότητα εντοπισμού
PT:	Penetrant inspection
RT:	Radiographic inspection
UT:	Ultrasonic inspection
VT:	Οπτική επιθεώρηση

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Αδυναμία:	Defect
Ακραίες τιμές παρακολούθησης:	Extreme monitored data
Δοκιμή δόνησης λόγω εξωτερικής δύναμης:	Forced-based vibration method
Δοκιμή ελεύθερης δόνησης:	Free vibrated method
Δοκιμή περιβάλλουσας δόνησης:	Ambient vibration method
Μαύρος χάλυβας:	Black steel
Μηκυνσιόμετρο:	Strain gauge sensor
Μοντέλο με ένα κριτήριο:	Single-objective based models
Μοντέλα με πολλά κριτήρια:	Multi-objective based models
Πιθανότητα εντοπισμού:	Probability of detection

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γέφυρα αποτελεί το μέσο μεταβίβασης από ένα σημείο σε ένα άλλο. Το τελευταίο αιώνα ο αριθμός των γεφυρών έχει αυξηθεί δραματικά στις αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες. Υπάρχει μια ποικιλία υλικών και μορφών γεφυρών ανάλογα της εποχής που έχουν κατασκευαστεί. Η σχεδιαστική ζωή των γεφυρών είναι σήμερα 120 χρόνια και στο παρελθόν 80 και 100. Η ανάγκη για τη διαχείρισή τους ώστε να συνεχίσουν να λειτουργούν με ασφάλεια είναι μεγάλη. Το κόστος για διατήρηση ή αύξηση της απόδοσής τους είναι πολύ μεγάλο ως προς το συνολικό κόστος ζωής. Ταυτόχρονα, η αντοχή της μειώνεται λόγω επιδείνωσης με το χρόνο καθώς και άλλων δράσεων που ασκούνται σε αυτή. Είναι επομένως απαραίτητο η αποτελεσματική δράση με συνδυασμό την αποτελεσματικότητα και την οικονομικότητα. Αυτό γίνεται μέσα από το Σύστημα Διαχείρισης Γεφυρών που περιλαμβάνει ένα σύνολο δράσεων επιθεώρησης και συντήρησης και τη Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού για την εύρεση της βέλτιστης λύσης για την κατασκευή.

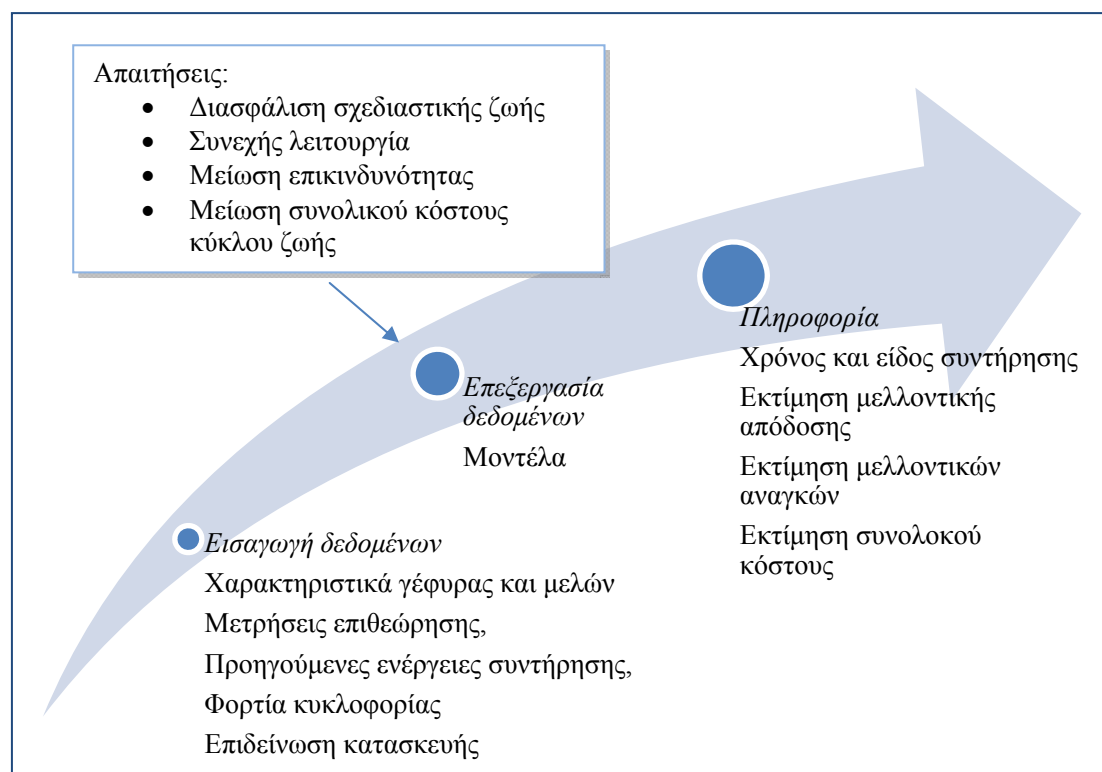
1. Βελτιστοποίηση διαχείρισης γεφυρών

Τις τελευταίες δεκαετίες η κατασκευή γεφυρών έχει εδραιωθεί σημαντικά σε αναπτυσσόμενες και αναπτυγμένες χώρες. Πρόκειται για κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας και μεγάλου χρόνου ζωής. Ο κύριος σκοπός είναι η ένωση δύο σημείων για τη μεταφορά από το ένα σημείο στο άλλο με όχημα ή μέσο μαζικής μεταφοράς. Η τοπογραφία του πεδίου μελέτης είναι συνήθως κοιλάδα ή ποταμός. Τα τελευταία χρόνια, όμως, η γέφυρα καλείται να προσθέσει ένα ανυψωμένο επίπεδο τροχιάς κυκλοφορίας πάνω από το υφιστάμενο για κάλυψη των κυκλοφοριακών αναγκών. Ανεξαρτήτως του σκοπού χρήσης, οι απαιτήσεις της κοινωνίας είναι τέτοιες που η κατασκευή πρέπει να λειτουργεί κανονικά σε όλη τη διάρκεια ζωής της, που σήμερα είναι 120 χρόνια με το μικρότερο δυνατό συνολικό κόστος στο κύκλο ζωής.

Η διασφάλιση της λειτουργίας της κάθε γέφυρας είναι περίπλοκη διαδικασία και απαιτεί εκ των προτέρων σχέδιο οργάνωσης των δράσεων, το λεγόμενο διαχείριση της γέφυρας. Αποτελείται από μια σειρά ενεργειών που ελέγχει την απόδοσή της και να λαμβάνει μέτρα για βελτίωση της κατάστασής της όταν απαιτείται (Road Research 1981). Οι ενέργειες είναι η επιθεώρηση και η συντήρηση. Το μέσο για λήψη απόφασης για τον τρόπο που θα αυξηθεί το επίπεδο απόδοσης της είναι το Σύστημα Διαχείρισης Γεφυρών (βλ. σχήμα 1.1). Οι απαιτήσεις του περιλαμβάνουν τη διασφάλιση της σχεδιαστικής ζωής, τη συνεχή λειτουργία, τη μείωση του κινδύνου αστοχίας και τη μείωση του συνολικού κόστους της γέφυρας. Ο σκοπός είναι η πρόβλεψη της επιδείνωσης στα μέλη και η πρόταση λύσεων συντήρησης. Επομένως, στο ΣΔΓ, λαμβάνοντας δεδομένα –γεωμετρικά χαρακτηριστικά μελών, ιδιότητες υλικών, μετρήσεις από τις επιθεωρήσεις, μέχρι στιγμής διαδικασίες συντήρησης, τα φορτία κυκλοφορίας – μέσα από επεξεργασία των μοντέλων δίνονται ο χρόνος και το είδος συντήρησης, εκτιμάται η μελλοντική απόδοση και μελλοντικές ανάγκες και το συνολικό κόστος που θα έχουν οι ενέργειες.

Οι τρόποι αντιμετώπισης της γέφυρας είναι δύο, ως μεμονωμένο έργο και ως ένα δίκτυο που περιλαμβάνει όλες τις γέφυρες της περιοχής (Ταντελέ Έλια 2011; Road Research 1981). Το πλεονέκτημα του δεύτερου ως προς το πρώτο είναι η διαχείριση των πόρων για όλες τις γέφυρες θέτοντας σε προτεραιότητα αυτές που είναι περισσότερο σημαντικές από τις άλλες και αυτές που η φθορά τους χρήζει άμεσης δράσης. Στις αναπτυγμένες χώρες όπως είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Κίνα λόγω του υπερβολικά μεγάλου αριθμού γεφυρών είναι αναγκαίο να γίνεται ολοκληρωμένη προσέγγιση διαχείρισής με απαραίτητες ενέργειες. Είναι οικονομικά ακατόρθωτο να συντηρούνται όλες στον ίδιο βαθμό χωρίς να σημαίνει ότι δεν θα πραγματοποιείται η αναγκαία συντήρηση. Με ένα σύστημα διαχείρισης συστημάτων γεφυρών αντιμετωπίζεται το θέμα στη γενική του μορφή. Γίνονται συγκρίσεις μεταξύ παρόμοιων γεφυρών ως προς την επιδείνωσή τους, παρατηρείται η επιρροή της κυκλοφορίας και εκτιμάται η οικονομικότερη λύση για διάφορα είδη συντηρήσεων. Στη πραγματικότητα, αυτό που γίνεται είναι ο συνδυασμός τους. Γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι της κατάστασης της κατασκευής,

αξιολογείται η κατάσταση για διάφορα μέλη, καθορίζονται οι απαιτήσεις της συντήρησης και τέλος λαμβάνονται οι απαραίτητες δράσεις συντήρησης για το σύστημα των γεφυρών και για κάθε γέφυρα.



Σχήμα 1.1 Σύστημα Διαχείρισης Γεφυρών

Η σημερινή προσέγγιση των ΣΔΓ γίνεται μέσα από ευφυή συστήματα στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας και μεγιστοποίηση της ακρίβειας σε όλα τα βήματα – στη λήψη μετρήσεων, στην επεξεργασία και στην απόφαση. Το Σύστημα Παρακολούθησης Υγείας της Υποδομής αποτελεί τη μοντέρνα προσέγγιση για τη λειτουργικότητα, την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Αποτελείται από (Adachi Y.) τις ευφυής κατασκευές, τους αισθητήρες, τις μη-καταστροφικές μεθόδους, την ευφυή επεξεργασία και διαχείριση των δεδομένων και το ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας. Σκοπός του είναι η δημιουργία ενός αυτόνομου συστήματος συνεχούς παρακολούθησης, επιθεώρησης και εντοπισμός αδυναμίας ώστε ο ιδιοκτήτης να διαχειριστεί προς όφελός του τους πόρους για επιδιόρθωση, επισκευή και αντικατάσταση για να μειωθεί ο χρόνος της μη λειτουργίας της γέφυρας και ταυτόχρονα να εκτιμηθεί ο κύκλος ζωής του έργου. Η εδραίωση του Συστήματος Παρακολούθησης Υγείας υποδομής οφείλεται στην ανάγκη για καθορισμό της συμπεριφοράς και της κατάστασης της γέφυρας με μεγάλης τάξης ακρίβεια για να στηρίζονται οι αποφάσεις για επένδυση με μετρίσιμους όρους.

2. Δράσεις στη γέφυρα

Η γέφυρα σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί κανονικά μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής της. Σκοπός είναι να μην φτάσει στην οριακή κατάσταση που είναι η ειδική κατάσταση (Ταντελέ Ε. 2009) όταν η γέφυρα παύει να ανταποκρίνεται σε τουλάχιστο ένα από τα κριτήρια σχετικά με τη φέρουσα ικανότητα και τη λειτουργικότητά. Υπάρχουν δύο κατηγορίες, η οριακή κατάσταση αστοχίας που προσδιορίζει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα της υποδομής και αφορά την ασφάλεια της υποδομής και την ασφάλεια των χρηστών, που είναι οι οδηγοί, οι πεζοί και άλλοι που επηρεάζονται άμεσα (άτομα σε πλοίο που περνά κάτω από τη γέφυρα) και η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σχετιζόμενη με τη κανονική χρήση και ανθεκτικότητα της υποδομής και αφορά την άνεση των χρηστών, την εμφάνιση και τη λειτουργικότητα. Συνεπώς, επιβάλλεται η δημιουργία ασφαλών και ανθεκτικών κατασκευών που ταυτόχρονα να είναι λειτουργικές και να δημιουργούν την αίσθηση της ασφάλειας στους χρήστες που να είναι όμως οικονομικές και πρακτικά εφαρμόσιμες κατασκευές.

Τα φορτία που ασκούνται σε μια γέφυρα διαχωρίζονται σε μόνιμα και κινητά. Οι δράσεις διακρίνονται σε αυτές που οφείλουν την επιδείνωση της κατάστασης της, τα φορτία κυκλοφορίας, τις ατυχηματικές δράσεις και τις ακραίες περιβαλλοντικές δράσεις. Η πρώτη οφείλεται σε περιβαλλοντικούς παραμέτρους που μειώνουν την ανθεκτικότητά της υποδομής με το χρόνο λόγω καταναγκασμών. Η δεύτερη αποτελεί ένα κινητό φορτίο που επηρεάζει εξίσου σημαντική την εντατική κατάσταση. Τα υπόλοιπα οφείλονται σε εξωγενής παράγοντες τον άνθρωπο και τη φύση αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα συζητηθούν οι πιο πάνω δράσεις ως προς το τι είναι και τι επιπτώσεις έχουν στην κατασκευή, σε επίπεδο ανθεκτικότητας της γέφυρας.

2.1 Επιδείνωση της κατάστασης της γέφυρας

Είναι σημαντικό να καλύπτονται οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας που επηρεάζονται άμεσα από τις περιβαλλοντικές δράσεις. Αυτές οι απαιτήσεις πρέπει να εκτιμούνται σε όλα τα στάδια σχεδιασμού, κατασκευής και ελέγχου της γέφυρας για να εξασφαλιστεί ο καθορισμένος χρόνος ζωής της. Η οποιαδήποτε ύπαρξη του φαινομένου στη κατασκευή χωρίς να αναγνωριστεί και να επιλυθεί πιθανών να οδηγήσει την κατασκευή σε αστοχία. Αναλόγως του υλικού κατασκευής, της μορφής και της ηλικία της γέφυρας, το περιβάλλον και την ανθεκτικότητα μελών, μπορεί να προκληθεί πρόωρη αστοχία της σε ανύποπτο χρόνο ή μετά από ένα έντονο δυσμενές φαινόμενο σε αυτή. Αυτή η αστοχία είναι αργή αφού μειώνεται σταδιακά η απόδοσή της και τα ορατά αποτελέσματα εντοπίζονται αρκετά μετά την έναρξη του φαινομένου. Είναι αναγκαία η καταστολή της όσο γίνεται πιο νωρίς για να μην μειωθεί η αντοχή των μελών και να τεθεί σε κίνδυνο η υποδομή.

Η μείωση της ανθεκτικότητας είναι αναπόφευκτη στη κατασκευή για αυτό και ο στόχος είναι η καθυστέρηση της εμφάνισής και ο έγκαιρος εντοπισμός της. Οι ορατές μορφές του φαινομένου γίνονται αντιληπτές αρκετό καιρό μετά τη δημιουργία αυτού

του μηχανισμού. Το πρόβλημα οξύνεται όταν γίνει αντιληπτό πολύ αργότερα από τη δημιουργία της εξωτερικής φθοράς. Στις καινούργιες υποδομές, με τα σύγχρονα μέσα σχεδιασμού, τη γνώση του θέματος και τα πιθανολογικά μοντέλα είναι δυνατό να καθοριστούν εκ των προτέρων το πότε αναμένεται να πρωτοεμφανιστούν οι αδυναμίες. Ταυτόχρονα, η δυνατότητα έλεγχου και παρακολούθησης της υγείας των κατασκευών σε τοπικό και γενικό επίπεδο συμβάλει σημαντικά στην έγκαιρη διάγνωση. Στις ηλικιωμένες γέφυρες, οι αδυναμίες φαίνονται έντονα με γυμνό μάτι και τίθεται σε κίνδυνο η ακεραιότητά τους (Dubbs N. κ.α.. Σε χώρες της Ευρώπης και των Ηνωμένων Πολιτειών υπάρχει ένα μεγάλος αριθμός ηλικιωμένων γεφυρών οι οποίες αντιμετωπίζουν προβλήματα ανθεκτικότητας σε διάρκεια και μάλιστα αρκετές αποτελούν κύριο άξονα κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομους. Ο τακτικός έλεγχος και τα έργα συντήρησης ή ακόμα και αντικατάστασης είναι απαραίτητος για να εξασφαλιστεί η ποιότητα της λειτουργίας τους και για μείωση του απαιτούμενου κόστους συντήρησης.

Οι αιτίες της επιδείνωσης προέρχονται από (Parker G. & Hewson N.; Road Research 1981) σχεδιαστικά λάθη, ατέλειες υλικών, κατασκευαστικά λάθη, φτωχούς έλεγχους ποιότητας και επίβλεψης στο εργοτάξιο. Η επιδείνωση προκαλείται από τρεις παράγοντες, τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα και το σκυρόδεμα, οι μεταλλικές κατασκευές και το οξείδιο σιδήρου, τις φυσικές διαδικασίες λόγω της επαφής μελών με ορισμένους παραμέτρους του περιβάλλοντος, όπως είναι η ύπαρξη νερού στο σκυρόδεμα που θα προκαλέσει ενανθράκωση και τα ακραία φαινόμενα όπως είναι η σεισμική δόνηση, η πλημμύρα, ατυχηματικές δράσεις ή τρομοκρατική επίθεση. Η υποδομή είναι επιρρεπής πέραν του ενός μηχανισμού που μπορεί να είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους ή όχι.

Οι οπτικές επιπτώσεις στο μέλος περιλαμβάνουν ρωγμές, παράξενες παραμορφώσεις ή διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας του, διάβρωση του χάλυβα ή θρυμματισμός του σκυροδέματος. Το κάθε υλικό επιδρά διαφορετικά με το περιβάλλον. Το σκυρόδεμα (Ταντελε Ε. 2009; Grosso A. κ.α.) αν και είναι ανθεκτικό επηρεάζεται από φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς. Για παράδειγμα, η είσοδος άλατος από το λιώσιμο του χιονιού και νερού βροχής διαμέσου των ρωγμών ή όταν οι πυλώνες βρίσκονται εντός νερού, μέσα από τις ρωγμές αυξάνεται το ποσοστό χλωριδίων στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα τη διάβρωση του οπλισμού. Ακόμα και η συστολή ξήρανσης επηρεάζει λόγω απουσίας κατάλληλων μέτρων κατά την κατασκευή. Τέλος, ο εχθρός του σκυροδέματος είναι το διοξείδιο του άνθρακα και τα χλώρια σε υγρό περιβάλλον (παραλιακό ή ποταμό) που προκαλούν ενανθράκωση με εμφάνιση μεγάλου πάχους ρωγμών και καταστροφή του καλύμματος του σκυροδέματος.

Ο χάλυβας αντιδρά με στοιχεία της ατμοσφαιράς (Shao X. κ.α.) όταν βρίσκεται σε υγρό περιβάλλον και διαβρώνεται αναλόγως της σύστασής του, της προστασίας που έχει, το σχήμα, τις τάσεις που ασκούνται σε αυτό, την κατάσταση επιφάνειας, το pH, την περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο και τη

θερμοκρασία. Η ταχύτητα διάβρωσης αυξάνεται με το μολυσμένο αέρα με υγρασία γύρω στο 50-70% (Parke G. & Hewson N.). Ο χάλυβας όταν έρθει σε επαφή με τα ιόντα χλωρίου δημιουργείται ένας ηλεκτρομαγνητικός μανδύας στην επιφάνεια του. Στο σκυρόδεμα η διάβρωση ξεκινά μετά την ενανθράκωση του σκυροδέματος με αποτέλεσμα τη μείωση της ανθεκτικότητας και της αντοχής σε κόπωση και την αύξηση της διατομής του. Οι τένοντες από τη διάβρωση και την κόπωση παθαίνουν ρωγματώσεις. Τα δε καλώδια εμφανίζουν αδυναμίες λόγω μείωσης της διατομής τους ή ρωγμές από τους μηχανισμούς της διάβρωσης.

Ακόμα το υλικό επηρεάζεται από το μέτρο καθώς και τη μεταβολή της θερμοκρασίας και τα κατασκευαστικά λάθη. Οι μεγάλες αυξομειώσεις θερμοκρασίας μειώνουν την αντοχή των μελών προκαλώντας παραμορφώσεις τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στο χάλυβα. Επιρρεπής είναι οι δοκοί από σκυρόδεμα ή χάλυβα, τα καλώδια (Lin H.) σε καλωδιότητες ή κρεμαστές γέφυρες και οι ράβδοι στα μεταλλικά δικτυώματα. Όταν χιόνι ή πάγος παραμένει στο κατάστρωμα της γέφυρας τότε εγκλωβίζεται νερό σε κρίσιμα σημεία όπως είναι οι κόμβοι δοκών και υποστυλωμάτων που διαβρώνονται από αυτό. Ακόμα και στα καλώδια, όταν παραμένει στην περιφέρειά τους πάγος για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα τότε αυξάνεται η διατομή και μειώνεται η αντοχή τους. Οι συνδέσεις των σύμμεικτων και μεταλλικών κατασκευών επηρεάζονται από τη συστολή και διαστολή.

Όσο αφορά τα κατασκευαστικά λάθη, όπως είναι η χαμηλή αντοχή σε τέμνουσα στις στηρίξεις (Mark P. κ.α.), η φτωχή προστασία σε νερό και μη ικανοποιητικού καλύμματος στο σκυρόδεμα είναι υπεύθυνα για την μείωση της ανθεκτικότητας. Αυτό οδηγεί σε σκυρωτά καταστρώματα να ρηγματώνονται λόγω κάμψης σε box girders κατασκευασμένα με τη μέθοδο του προβόλου, σε στηρίξεις να ανοίξουν όταν οι τένοντες δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις ή να ρηγματωθούν λόγω τέμνουσας. Στις αγκυρώσεις των τενόντων στο κορμό του box-girder και στη κάτω πλάκα προκαλούνται ρωγμές. Σε μεταλλικά καταστρώματα η διάβρωση είναι η κυριότερη αιτία μείωσης ανθεκτικότητας λόγω επαφής με το νερό και φτωχής προστασίας από αυτό και κόπωσης λόγω των φορτίων κυκλοφορίας.

Η λάθος ανάμειξη των υλικών για παρασκευή του σκυροδέματος έχει μερίδιο ευθύνης στη αντοχή στο χρόνο. Δεν είναι λίγες οι φορές, που γίνεται πρόσθεση επιπλέον νερού στο μείγμα με τη δικαιολογία ότι θα αναμειγνύεται καλύτερα ενώ στη πραγματικότητα μειώνεται η αντοχή του, ή ρίχνεται το σκυρόδεμα από ύψος μεγαλύτερο των προδιαγραφών ή χρησιμοποιούνται πρόσθετα, επιτάχυνσης της πήξης, χωρίς προδιαγραφές προκαλώντας ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης, επηρεάζοντας και την αντοχή του οπλισμού. Όταν πάλι χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα κομμάτια από σκυρόδεμα παρουσιάζεται το πρόβλημα της μη-επιτυχούς συναρμολόγησης, κυρίως όταν δεν έγιναν ακριβείς υπολογισμοί προκαλώντας μη-επιτυχής μεταφορά των δυνάμεων και κατανομή των τάσεων. Ο μειωμένος έλεγχος της θέσης και του είδους του οπλισμού προκαλεί πρόβλημα στο κάλυμμα του μέλους, αφού απαιτείται διαφορετικό πάχος ανάλογα του οπλισμού για προστασία από τη διάβρωση. Στο προεντεταμένο κατάστρωμα, η απουσία

προστασίας από το νερό και τα άλατα, η κακή αγκύρωση των τενόντων και η λάθος τοποθέτησή τους, θα προκαλέσει διαφορετική συμπεριφορά από αυτή που αναμένεται (Parker G & Hewson N.).

Στις μεταλλικές και σύμμεικτες κατασκευές, η πιθανότητα λάθους διαστάσεων είναι μειωμένη λόγω της προκατασκευής τους σε εργοτάξιο, όμως απαιτείται μεγάλη προσοχή στις συνδέσεις (με ήλους, πύρους ή συγκόλληση) γιατί γίνεται από τον άνθρωπο και στις μέχρι στιγμής κατασκευές, οι συνδέσεις αποτελούν το αδύναμό τους σημείο. Ταυτόχρονα, λόγω της αντίδρασης του μετάλλου με το διοξείδιο του άνθρακα και το χλώριο η διάβρωσή τους είναι έντονη. Πιθανών να υπάρξουν και ρωγμές στο κατάστρωμα από σκυρόδεμα λόγω παραγόντων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Τα εφέδρανα και οι αρμοί (Dubbs N. κ.α.) είναι επίσης ευαίσθητα με το χρόνο. Σε μεταλλικές κατασκευές οι μετακινήσεις των αρμών εξαρτώνται από τη διαστολή και συστολή και τα χαρακτηριστικά του άνω μέρους της γέφυρας. Σε κατασκευές από σκυρόδεμα, εξαρτώνται από τον ερπυσμό, τη συστολή ξήρανσης και τη προένταση. Οι αρμοί και οι στηρίξεις τους επηρεάζονται αρνητικά από τις επαναλαμβανόμενες δυναμικές φορτίσεις που δέχονται από τα φορτία κυκλοφορίας ή άλλες δονήσεις ειδικά όταν υπάρχει έστω και μικρή διαφορά ύψους μεταξύ αρμού και οδοστρώματος. (Parker G & Hewson N.)

2.2 Φορτία που ασκούνται στη γέφυρα

Η γέφυρα πέρα από τη φθορά του χρόνου επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες: τα φορτία κυκλοφορίας, οι ατυχηματικές δράσεις, όπως για παράδειγμα η σύγκρουση οχήματος ή πλοίου σε πυλώνα γέφυρας, στα ακρόβαθρα, η σύγκρουση οχήματος στα ερείσματα του καταστρώματος, και τέλος οι ατυχηματικές περιβαλλοντικές δράσεις, όπως είναι ο ισχυρός άνεμος, η σεισμική δόνηση και η πλημμύρα.

Λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής μιας γέφυρας και της ραγδαίας εξέλιξης της μηχανολογίας τα φορτία κυκλοφορίας μεταβάλλονται με τη πάροδο του χρόνου ως προς το μέγεθος και τη συχνότητά εμφάνισής τους. Είναι δύσκολο να προβλεφτεί με ακρίβεια η μελλοντική κυκλοφορία και πέραν αυτού, θα στοιχίσει αρκετά στο ολικό κόστος. Για αυτό και γίνονται παραδοχές. Υπάρχουν σήμερα τέτοια παραδείγματα σε αναπτυγμένες χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Οι ηλικιωμένες γέφυρες έχουν επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από την αύξηση, τόσο της συχνότητας κυκλοφορίας όσο και του βάρους του άξονα. Έχουν όλες δεχτεί παρατεταμένη συντήρηση που ακολουθείται από άλλες μικρότερες, γιατί η μεταβολή τους είναι μεγάλη. Στις νεότερες γέφυρες, οι επιπτώσεις δεν είναι τόσο μεγάλες, γιατί παρατηρείται μια πιο σταθερή πορεία στην μεταβολή των αξονικών φορτίων.

Οι ατυχηματικές δράσεις είναι δυσμενείς στη γέφυρα και πρέπει να ελέγχονται όταν παρουσιαστούν για την ακεραιότητα της. Υπάρχουν φορές που η λειτουργία της γέφυρας συνεχίζεται κανονικά και εξαρτάται από τον τρόπο της σύγκρουσης, του

μέλους της σύγκρουσης, τη καταστροφή του και εάν υπήρξαν στατικά φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα στη γέφυρα πέραν των προβλεπόμενων.

Οι ακραίες ατυχηματικές δράσεις, τείνουν να επιδεινώνουν την εντατική κατάσταση μιας γέφυρας. Το φορτίο του ανέμου (Ni Y. κ.α.) εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, το μέγεθος και το σχήμα της γέφυρας, ο τρόπος κατασκευής, η γωνία πρόσκρουσης και η ταχύτητα του ανέμου, η τοπογραφία της γύρω περιοχής και την ταχύτητα του ανέμου. Είναι δυνατό, ο άνεμος να προκαλέσει όμως και εγκάρσιες, διαμήκεις και κατακόρυφες δυνάμεις σε όλες τις γέφυρες. Δυσμενής καταστάσεις μπορεί να προκληθούν από δύο καταστάσεις ανέμου, πρώτον τις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις που παράγουν ταραχώδη ή στροβιλισμό και δεύτερον την ομαλή ροή. Όταν η ιδιοσυχνότητα των περισσότερων γεφυρών είναι μεγαλύτερη από αυτές του ανέμου τότε δεν υπάρχουν αποκρίσεις. Για ελαφριές κατασκευές που έχουν μικρότερη ιδιοσυχνότητα όπως αυτές με μεγάλο μήκος γέφυρας τότε επηρεάζονται από τις δυναμικές αστάθειες γιατί ο άνεμος θα προκαλέσει τόσο κατακόρυφες όσο και στρεπτικές δονήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γέφυρα Tacoma Narrow Bridge που αστόχησε το 1940 αν και σχεδιάστηκε για ισχυρούς ανέμους δεν μπορούσε να αντέξει τους ασθενείς ανέμους. Τα σεισμικά φορτία εκδηλώνουν μια σειρά παραμορφώσεων στις γέφυρες, ξεκινώντας από ρωγμές που δεν αποτελούν σοβαρό κίνδυνο σε ρωγμές λόγω αστοχίας σε τέμνουσα, μετακίνηση μέρους της γέφυρας και σπάσιμο μελών της. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι περισσότερο αναγκαίο να διασφαλίζεται η αντοχή της γέφυρας ανά πάσα χρονική στιγμή ώστε να είναι έτοιμη να δεχτεί αυτές τις ισχυρές παραμορφώσεις χωρίς να αστοχήσει.

2.3 Συζήτηση

Συνοπτικά, είναι σημαντικό να διατηρείται σταθερή τόσο η μεταβολή των δράσεων όσο και της αντοχής της γέφυρας, πράγμα σχεδόν ακατόρθωτο μέχρι στιγμής. Αυτό που συμβαίνει είναι μέσα από ένα στρατηγικό σχέδιο διαχείρισης της γέφυρας να τηρείται ένα σχέδιο συντήρησης και αποκατάστασης ώστε η αντοχή να μην μειώνεται πέραν μιας κρίσιμης τιμής αφού οι δράσεις δεν μπορούν να μειωθούν. Αυτό περιλαμβάνει μια σειρά επιθεωρήσεων και σχεδίου συντήρησης και επισκευής, είτε πρόκειται για φθορά λόγω περιβαλλοντικών επιδράσεων, είτε από άλλες δράσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες υπάρχουν και θα συνεχίσουν να υπάρχουν στο περιβάλλον της κατασκευής και το αποτέλεσμα τους είναι η μείωση της αντοχής της γέφυρας, για παραλαβή των φορτίων που σχεδιάστηκε.

Καθήκον του μηχανικού είναι να αποτρέψει την επίδρασή τους, πράγμα ακατόρθωτο, έτσι προσπαθεί να μειώσει την επίδραση λαμβάνοντας προστατευτικά μέτρα στα μέλη εκ των προτέρων, που αφορούν επιλογή υλικού, προστασία της επιφάνειάς του υλικού και απομάκρυνση της επικίνδυνης περιβαλλοντικής παραμέτρου πράγμα δύσκολο. Παρόλα αυτά είναι αναγκαίο να ακολουθείται μία σειρά ελέγχων για παρακολούθηση της μεταβολής των παραμέτρων με τη πάροδο του

χρόνου και κατά το σχεδιασμό ή επισκευή ή αντικατάσταση της γέφυρας να χρησιμοποιούνται έξυπνα υλικά και τεχνικές.

3. Ευφυής Σχεδιασμός Υποδομής

Τη τελευταία δεκαετία οι πολιτικοί μηχανικοί αναφέρονται στον όρο της ευφυής υποδομής υπό την έννοια ότι ακολουθείται στρατηγική διαφορετική της συμβατικής για το σχεδιασμό και τη διαχείριση της. Υπάρχει η δυνατότητα για επιθεώρηση με τεχνικές που δεν απαιτούν δείγμα από τη γέφυρα για πλήρη αστοχία του αλλά για μεθόδους που γίνονται κατά τη λειτουργία της γέφυρας με αποτροπή περαιτέρω ζημιάς σε αυτή. Υπάρχει η δυνατότητα εντοπισμού της αδυναμίας σε υλικά από σκυρόδεμα και χάλυβα με μεγάλη ακρίβεια μέσα από τις μη – καταστροφικές μεθόδους καθώς και το σύστημα ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε ένα ή περισσότερους παραμέτρους σε διάφορα σημεία του φορέα. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα για χρήση καινούργιων υλικών με ιδιότητες που τείνουν να καλύψουν μειονεκτήματα των συνήθων υλικών. Όλα αυτά συνδυάζονται για το καθορισμό ενός συστήματος διαχείρισης γέφυρας ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός της λαμβάνοντας υπόψη το κόστος ζωής της γέφυρας. Το σύστημα διαχείρισης περιλαμβάνει το πρόγραμμα για καθορισμό της επιθεώρησης και της συντήρησης.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι τρόποι επιθεώρησης μιας γέφυρας στο κατάστρωμα και στα καλώδια και όχι στους πυλώνες και τα θεμέλια.

3.1 Επιθεώρηση υποδομών

Η επιθεώρηση είναι μια σειρά ενεργειών κατά την λειτουργία της υποδομής που αφορούν τον εντοπισμό προβλημάτων στην υγεία της. Για να μπορεί να υπάρξει επικερδής διαχείριση της γέφυρας πρέπει οι επιθεωρήσεις να καταγράφονται σε αρχείο σε τακτά χρονικά διαστήματα και να είναι όσο το δυνατό πιο ακριβή και αντικειμενικό που εξαρτάται κυρίως από τις μεθόδους επιθεώρησης, μέσω και την κρίση του επιθεωρητή. Από τις επιθεωρήσεις παρέχονται πληροφορίες για προβληματικά σημεία της κατασκευής, για την επίδραση της μεταβολής των φορτίων κίνησης ή άλλων δράσεων που δέχεται η κατασκευή, την συμπεριφορά νέων δομικών υλικών και συστημάτων καθώς και νέων τεχνικών ενίσχυσης. Η σωστή επιθεώρηση είναι σημαντική για τις νέες και τις ηλικιωμένες γέφυρες. Για τις μεν επιβεβαιώνεται ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή έχει γίνει ορθά και στη περίπτωση που έχουν γίνει λάθη θα εντοπιστούν έγκαιρα με τη λήψη απαραίτητων μέτρων για την διασφάλιση της υγείας της κατασκευής και των χρηστών. Για τις δε, ελέγχονται ως προς την αντοχή αφού λόγω ηλικίας, η φθορά του χρόνου είναι πολύ μεγαλύτερη σε αυτές παρά στις νεότερες.

Η επιθεώρηση μπορεί να διακριθεί σε έξι είδη (Ταντελέ Ε. 2011): την ετήσια, την περιοδική, την επιφανειακή, τη γενική, την κύρια και την ειδική. Σε όλες πλην της κύριας επιθεώρησης, ο τρόπος είναι οπτικός εκτός εξαιρέσεων, δηλαδή καταγράφεται ότι υπάρχει ρωγμή σε συγκεκριμένη δοκό στο συγκεκριμένο άνοιγμα, χωρίς άλλες λεπτομέρειες που αφορούν την ακριβή θέση της, το πάχος, τη φορά και άλλα συναφή στοιχεία. Στην κύρια επιθεώρηση, που συνήθως είναι κάθε έξι χρόνια, παίρνονται φωτογραφίες, χρησιμοποιούνται καταστροφικές ή/και μη καταστροφικές μέθοδοι και

καταγράφονται εκθέσεις. Η ειδική επιθεώρηση πραγματοποιείται μετά από ένα συμβάν όπως είναι η πρόσκρουση οχήματος ή πλοίου σε μέρος της γέφυρας, μετά από σεισμό, άλλες ακραίες δυσμενείς δράσεις, ή όταν παρουσιαστεί φθορά σε παρόμοιο υλικό παρόμοιας γέφυρας.

Στην επιθεώρηση καταγράφονται τα ακόλουθα στοιχεία για ένα πλήρες αρχείο και αξιολόγηση της κατάστασης της γέφυρας (Road research 1992):

- Γενικά στοιχεία: όνομα και τοποθεσία γέφυρας, τροχαία κίνηση, είδος, ημερομηνία και κόστος επιθεώρησης, όνομα επιθεωρητή
- Στοιχεία κατασκευής: είδος κατασκευής, υλικό και διαστάσεις, αριθμός και χαρακτηριστικά girders, καλώδια και αγκύρωση καλωδίων, τα μέλη και τα προστατευτικά μέτρα τους, αριθμός εφένδρανων και αρμών, αριθμός και είδος πυλώνων και τοίχων, αριθμός Bracings
- Στοιχεία επιφάνειας καταστρώματος: προστατευτικά μέτρα έναντι νερού, αρμοί
- Άλλα στοιχεία: ηλιοφάνεια στη γέφυρα, φορά ανέμου
- Αδυναμία μέλους: το μέλος, η θέση και το βάθος της αδυναμίας, πιθανή αιτία πρόκλησης, επίδραση του φορτίου κυκλοφορίας, καθορισμός αναγκαιότητας για άμεση επιδιόρθωση, κατηγοριοποίηση της αδυναμίας
- Ειδικός εξοπλισμός: είδος και πώς χρησιμοποιήθηκε
- Άλλα σχόλια: παρατηρήσεις για μελλοντικές επιθεωρήσεις, σχόλιο για υφιστάμενη κατάσταση που θα είναι χρήσιμο στο μέλλον

Στις επιθεωρήσεις πρέπει να ελέγχονται τα ακόλουθα. Ως προς τη στατικότητα της γέφυρας, οι μετακινήσεις και στροφές των πυλώνων και υποστυλωμάτων, η αντίδραση των στηρίξεων και η παραμόρφωση των ανοιγμάτων των δοκών, κάτω από συγκεκριμένο συγκεντρωμένο και κινητό φορτίο, οι αντιδράσεις στις στηρίξεις υπό κανονική λειτουργία της γέφυρας, οι δυνάμεις στα καλώδια και στους τένοντες, η συμπεριφορά συγκεκριμένης περιοχής επιφάνειας – το μέγεθος σε τρεις διαστάσεις των ρωγμών, της παραμόρφωσης, οι απομένουσες τάσεις στα μέλη μετά από ατυχηματική δράση. Ως προς την ανθεκτικότητά, η διάβρωση οπλισμού σκυροδέματος, διάβρωση των τενόντων του προεντεταμένου σκυροδέματος, των καλωδίων, των μεταλλικών δοκών, των μεταλλικών συνδέσεων σε μεταλλικές και σύμμεικτες κατασκευές, η κόπωση στις μεταλλικές δοκούς και στις συνδέσεις, στους τένοντες και στα καλώδια, λόγω επαναλαμβανόμενου φορτίου.

Πρέπει να διευκρινιστεί εξ' αρχής ότι σε ένα σύστημα παρακολούθησης οι αδυναμίες που εντοπίζει το σύστημα διακρίνονται, σε προοδευτική σειρά, σε defect, damage και fault. Το defect υπάρχει από το ίδιο το υλικό και στατιστικά όλα τα υλικά έχουν άγνωστες κατασκευαστικές βλάβες χωρίς να σημαίνει ότι η υποδομή πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας. Όταν η βλάβη χαρακτηρίζεται ως damage τότε το μέλος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον ιδανικό τρόπο που έχει σχεδιαστεί αλλά μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του ικανοποιητικά. Η δυσμενέστερη είναι η αστοχία, όπου η υποδομή δεν εξυπηρετεί τον σκοπό λειτουργίας της γιατί η ποιότητά της είναι

απαράδεκτα μειωμένη. Ο εντοπισμός των βλαβών (Κουνούνης Α.) γίνεται με τέσσερις τρόπους με την ΕΔΥ. Ο πρώτος είναι η αναγνώριση (detection) όπου μια μέθοδος δίνει ποιοτική ένδειξη ότι υπάρχει βλάβη. Ο δεύτερος είναι ο εντοπισμός (localization) όπου πληροφορεί για την πιθανή θέση της βλάβης μετά από επεξεργασία δεδομένων από άλλους αισθητήρες. Ο τρίτος είναι η εκτίμηση (assessment) που εκτιμά την έκταση (extent) της βλάβης, δηλαδή το μέγεθός ή τις επιπτώσεις που θα έχει, και ο τελευταίος η πρόβλεψη (prediction) όπου παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια του κτιρίου για παράδειγμα εάν θα αυξηθεί το πάχος της ρωγμής.

Οι μέθοδοι για προσδιορισμό των πιο πάνω διακρίνονται σε καταστροφικές, μη-καταστροφικές, συνεχής παρακολούθησης υγείας προσωρινά ή μόνιμα, τοπικά ή σε όλη τη κατασκευή (Chen S. κ.α.). Η κάθε μια έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην εφαρμογή της. Σε σπουδαίες γέφυρες βλέπουμε να συνδυάζονται οι ευφυής μέθοδοι ενώ σε μικρότερης σπουδαιότητας να περιορίζονται στις καταστροφικές ή μη-καταστροφικές μεθόδους. Αναλόγως των μεθόδων προσδιορίζεται η κατάσταση του υλικού με τεχνικές σε δείγμα στο εργαστήριο ή στη κατασκευή και η συμπεριφορά της κατασκευής, μέσω τοπογραφικών και γεωμετρικών μετρήσεων, εφαρμογή φορτίων σε καίρια σημεία της γέφυρας και η συμπεριφορά της κατασκευής υπό τα φορτία και τις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Έτσι εντοπίζονται ρωγμές και προσδιορίζεται το μέγεθος, το σχήμα και η κατεύθυνση τους, εντοπίζεται και ποσοτικοποιείται η ύπαρξη νερού και άλλων συστατικών. Στη μελέτη θα παρουσιαστούν οι ευφυής μέθοδοι επιθεώρησης που είναι οι μη-καταστροφικές και η συνεχής παρακολούθηση υγείας.

Τα κριτήρια επιλογής μεθόδου είναι η κατάσταση της υγείας της κατασκευής, δηλαδή εάν έχει περισσότερες ή λιγότερες φθορές, ποια σημεία ή μέλη έχουν φθαρεί, η ηλικία της, το περιβάλλον που βρίσκεται η γέφυρα, δηλαδή εάν υπάρχει υγρασία, διοξείδιο του άνθρακα, την ευαισθησία του οργάνου μέτρησης, ατέλειες των υλικών που χρησιμοποιηθήκαν καθώς και η εμπειρία του επιθεωρητή. Σκοπός του ελέγχου εάν είναι εντός των προκαθορισμένων επιθεωρήσεων, εάν είναι μια μεταβολή που παρουσιάστηκε κάτω από συγκεκριμένα φορτία και τύπο γέφυρας σε συνδυασμό με την επιθυμία του ιδιοκτήτη και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με τον οικονομικότερο τρόπο.

3.2 Μη – καταστροφικές μέθοδοι

Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι αποτελούν το εργαλείο κυρίως των κύριων επιθεωρήσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις και των υπόλοιπων επιθεωρήσεων. Πρόκειται για μεθόδους οι οποίες εξετάζουν μέλη της κατασκευής – κατάστρωμα, δοκοί καταστρώματος, καλώδια, πυλώνες – ως προς τις ιδιότητες τους, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και έπειτα να συγκρίνονται με τις σχεδιαστικές τιμές ή με αυτές που καθορίστηκαν ως τιμές αναφοράς – baseline – μετά από τη κατασκευή ή μετά από επιδιόρθωσή της. Η σημαντικότητα τους είναι μεγάλη για γέφυρες ανεξαιρέτως μήκους τρόπου και υλικού κατασκευής. Πρόκειται για γνωστές

μεθόδους σε διεθνές επίπεδο. Αυτές οι μέθοδοι αποτελούν την εξέλιξη των καταστροφικών μεθόδων που ήθελαν να απομακρύνουν στοιχεία της γέφυρας και να δοκιμάζονται σε εργαστήριο μέχρι την τελική αστοχία τους για εκτίμηση των ιδιοτήτων τους.

Η ακρίβεια στις μετρήσεις αποτελεί ζωτική ανάγκη για κάθε μηχανικό. Αν και οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι μεγάλης ακρίβειας λόγω του τρόπου λειτουργίας τους που μειώνουν το ανθρώπινο σφάλμα πρέπει ο κάθε επιθεωρητής να προβληματίζεται για κάθε μέτρηση, πόσο ακριβής είναι συγκρίνοντας με την αναμενόμενη τιμή. Τα σφάλματα διακρίνονται σε χονδροειδή, συστηματικά και τυχαία (Χατζημιτσής Δ.). Τα πρώτα προέρχονται από απροσεξία ή απειρία του παρατηρητή και συνήθως έχουν μεγάλη τιμή για αυτό και εντοπίζονται γρήγορα και εξαλείφονται με επανάληψη της μέτρησης. Το δεύτερο σφάλμα προέρχεται από τη χρήση των οργάνων, δηλαδή λόγω της συνεχής χρήσης τους. Η εξάλειψή του γίνεται μέσω βαθμονόμησης του οργάνου από τον κατασκευαστή. Το τρίτο είναι αυτά που υπάρχουν πάντα και δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι αιτίες και πρόκειται συνήθως για μικρή τιμή. Για μείωσή τους πρέπει να ελέγχεται η ακρίβεια και η πιστότητα των οργάνων, που δίνεται από τον κατασκευαστή και η ομάδα της επιθεώρησης να είναι έμπειρη και να είναι γνώστες της εργασίας που εκτελούν. Ως προς τις συνθήκες περιβάλλοντος, πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις στις καθορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες που δίνονται από τον κατασκευαστή και συνήθως αφορούν την θερμοκρασία, την υγρασία, την ηλιοφάνεια και την κατάσταση του υλικού (υγρό ή ξηρό). Βέβαια είναι αναγκαίο να υπάρχει μια τιμή αναφοράς που να ελέγχονται οι μετρήσεις με αυτές της αναφοράς.

3.2.1 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις/Περιορισμοί

Σήμερα, οι μη-καταστροφικές μέθοδοι έρχονται να αντικαταστήσουν τις καταστροφικές μεθόδους γιατί μπορούν να εντοπίσουν χωρικά την αδυναμία ή αστοχία, και να τη χαρακτηρίσουν, δηλαδή να δώσουν μέγεθος, μορφή και προσανατολισμό καθώς και ιδιότητες των υλικών. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι μπορούν να εντοπίσουν την αδυναμία στα αρχικά της στάδια πριν εμφανίσει συμπτώματα που είναι ορατό με το ανθρώπινο μάτι διασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια της γέφυρας, με άμεση δράση, στη διαχείριση της, με εξοικονόμηση χρημάτων. Οι μέθοδοι εκτιμούν το βαθμό αδυναμίας του μέλους καθώς και την αιτία πρόκλησης της ζημιάς. Εφαρμόζονται τόσο για συγκεκριμένα μέλη όσο και για ολόκληρη τη κατασκευή και γίνονται κατά την λειτουργία της γέφυρας, δηλαδή δεν διακόπτεται η χρήση της.

Χαρακτηρίζονται από την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα τους με λιγότερο κόστος έναντι των καταστροφικών μεθόδων γιατί οι μετρήσεις γίνονται στην γέφυρα και δεν χρειάζεται να μεταφερθούν στο εργαστήριο όπου οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι ιδανικές και καθορισμένες και ταυτόχρονα δεν χρειάζεται να οδηγηθεί το μέλος που εξετάζεται σε αστοχία για να υπολογιστεί η αντοχή του αλλά ελέγχεται ενόσω το μέλος βρίσκεται σε λειτουργία. Από την άλλη πλευρά, λόγω του μεγάλου κόστους αγοράς, συντήρησης και χρήσης των οργάνων συνήθως

χρησιμοποιούνται μετά από οπτική επιθεώρηση όπου εντοπίστηκε αδυναμία ή σε κρίσιμα μέλη της γέφυρας κατά τις επιθεωρήσεις. Απαιτούν έμπειρους χρήστες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε σημεία που υπάρχει πρόσβαση. Να σημειωθεί ότι ορισμένα όργανα δεν μπορούν να μετακινούνται και πρέπει να παραμένουν στο χώρο της γέφυρας.

Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα είναι οι συντεταγμένες αναφοράς του οργάνου, η μορφή των μετρήσεων, η μονάδα μέτρησης και εάν είναι απευθείας εξαγόμενο αποτέλεσμα, τα βήματα της δοκιμής, η βαθμονόμηση, οι καιρικές συνθήκες και το επίπεδο θορύβου της περιοχής (Arndt R.W. et al). Οι περιοδικές επιθεωρήσεις σε διαφορετικές εποχές του χρόνου είναι προτιμότερο όταν πρόκειται για μέλη που επηρεάζονται από την αλλαγή των κλιματικών συνθηκών. Τέτοιο παράδειγμα είναι τα μέλη από σκυρόδεμα λόγω παρουσίας πάγου και νερού στην επιφάνειά τους. Με τη μέθοδο εντοπίζεται νερό στο εσωτερικό του μέλους λόγω κακής ποιότητας σκυροδέματος ή κακής ανάμειξης υλικών (Arndt R.W. κ.α.).

3.2.2 Είδη μη-καταστροφικών μεθόδων

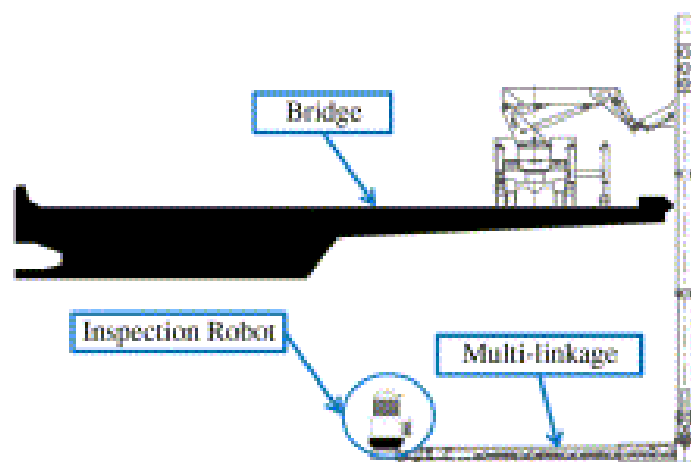
Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι διακρίνονται σε οπτική επιθεώρηση, penetrant επιθεώρηση, magnetic particle επιθεώρηση, eddy current, radiographic επιθεώρηση, ultrasonic επιθεώρηση, η impact-echo επιθεώρηση, η ground penetrating radar μέθοδος και acoustic emission επιθεώρηση (Zheng et Ellingwood). Η PT δεν χρησιμοποιείται σήμερα και η MT χρησιμοποιείται για μεταλλικές κατασκευές. Στη συνέχεια περιγράφονται οι μέθοδοι και δίνονται παραδείγματα εφαρμογής τους.

Η οπτική επιθεώρηση μπορεί να γίνει με το ανθρώπινο μάτι ή/και ένα κύκλωμα από ειδικές κάμερες. Από έρευνα της FHWA (FHWA 2001β) ως την χρήση των μη-καταστροφικών μεθόδων, το 2001 φαίνεται ότι η οπτική επιθεώρηση είναι μια από τις πιο συνηθισμένες μέθοδοι για χάλυβα και σκυρόδεμα γιατί στηρίζονται μόνο σε ό,τι βλέπει το ανθρώπινο μάτι του επιθεωρητή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Πρόκειται για την πιο οικονομική διαδικασία επιθεώρησης από θέμα λειτουργικού κόστους χωρίς αυτό να σημαίνει και την ακριβέστερη μέθοδο για απόφαση σε θέματα διαχείρισης γέφυρας. Ταυτόχρονα έδειξε την έλλειψη αξιοπιστίας της οπτικής επιθεώρησης αφού συνήθως ο ανώτερος επιθεωρητής απουσίαζε από τη διαδικασία, πολλοί επιθεωρητές δεν κατέγραφαν σημαντικά μέλη και τις φθορές τους, τα αποτελέσματα των περιοδικών επιθεωρήσεων διακυμαίνονταν με μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, οι επιθεωρήσεις σε βάθος (in-depth inspections) δεν επιβεβαίωναν τα ελαττώματα που έπρεπε να αναγνωρίσουν και δεν έδιναν περισσότερα στοιχεία από αυτά των περιοδικών επιθεωρήσεων. Οι προτάσεις της έρευνας είναι η ανακατανομή της αξιολόγησης της υγείας της γέφυρας και την εξάσκηση των επιθεωρητών στις επιθεωρήσεις σε βάθος. Στην έρευνα φαίνεται ότι υπάρχει η χρήση των ειδικών μεθόδων για περαιτέρω ακρίβεια όπως είναι το UT και AE.

Αυτά που καταγράφονται από την οπτική επιθεώρηση είναι σε οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα ρωγμές σε διάφορες κατευθύνσεις και μεγέθους στις

στηρίζεις και στο μέσο της δοκού, ρωγμές κατά μήκος του οπλισμού και των τενόντων, scaling, spalling, segregation cavities, swelling, bursting, quick or slow disintegration, θλίψη του καλύμματος και διάβρωση οπλισμού. Σε μεταλλικές κατασκευές, ρωγμές λόγω τέμνουσας, στρέψης, κάμψης, τοπικός και γενικός λυγισμός, αποδυνάμωση φλάντζας I δοκών και συνδέσεων, καταστροφή προστασίας έναντι νερού και διάβρωση σε σημεία επαφής με νερό.

Πέραν της επιθεώρησης με το ανθρώπινο μάτι, σε μεγάλο μεγέθους γέφυρες χρησιμοποιείται ειδική κάμερα που κινείται στον αέρα μέσω GPS σαν ελικόπτερο γύρω από την κατασκευή ή βρίσκεται πάνω σε όχημα. Αρχικά καταγράφει τα μέλη και έπειτα επιθεωρεί συγκεκριμένα σημεία που βρέθηκαν προηγουμένως ότι έχουν αδυναμίες και στηρίζεται στην ανάλυση εικόνας. Η κάμερα είναι Ultra-compact lightweight tri CCD με μεγάλη μεγέθυνση και καθοδηγείται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Έτσι μειώνεται το ανθρώπινο σφάλμα. Στην Ιαπωνία, το Hanshin Expressway Public Corporation (Adachi Y.), για την καθημερινή οπτική επιθεώρηση του καταστρώματος χρησιμοποιείται ένα όχημα το οποίο περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τη CCD camera για εντοπισμό των αδυναμιών, CCD camera για μέτρηση της αποτελμάτωσης του τροχού και λέιζερ στο μπροστινό μέρος του οχήματος, αισθητήρες για καθορισμό της ταχύτητας οχήματος, λέιζερ και αντένα GPS για προσδιορισμό της θέσης του. Για τις δοκούς, χρησιμοποιείται η ίδια κάμερα η οποία αφού τοποθετηθεί στο κάτω μέρος της δοκού κινείται αυτόματα κατά μήκος της και εντοπίζει ρωγμές. Σίγουρα απαιτεί τέτοιο σχεδιασμό ώστε να υπάρχει πρόσβαση στον επιθεωρητή να τοποθετήσει τη συσκευή και να υπάρχει επίσης δυνατότητα να κινηθεί άνετα η συσκευή ιδιαίτερα στα κρίσιμα σημεία της δοκού. Κάτι ανάλογο αλλά για χρήση πέραν του καταστρώματος παρουσιάζεται στην (Oh. J. κ.α.) και είναι ένα ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης (robotic inspection system) (βλ. σχήμα 3.2.2.1). Είναι αναπτυσσόμενο και είτε βρίσκεται στο κατάστρωμα και επεκτείνεται στο κάτω μέρος του από το πλάι είτε είναι στο δρόμο κάτω από τη γέφυρα και επιθεωρεί επίσης το κάτω μέρος του καταστρώματος. Επιθεωρεί και πυλώνες.



Σχήμα 3.2.2.1 Ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης (Oh. J. κ.α. εικόνα 2)

Η EC μέθοδος χρησιμοποιείται για έλεγχο ποιότητας συγκόλλησης και εντοπισμό απομένουσας τάσης στα μέλη. Στηρίζεται στην αγωγιμότητα του χάλυβα. Αποτελείται από μια πηγή ενέργειας η οποία τοποθετείται κοντά στη επιφάνεια του μεταλλική δοκιμίου και αφού βαθμονομηθεί στη σωστή συχνότητα επάγει ρεύμα συγκεκριμένου μεγέθους και φάσης στην επιφάνεια του δοκιμίου. Λόγω του ότι τα eddy currents είναι ανάλογα της αγωγιμότητας του χάλυβα (conductivity) όταν κατά τη διάρκεια της κίνησης τους στο δοκίμιο εμποδιστεί από ρωγμή ή οτιδήποτε άλλο τότε διακόπτεται η ροή και τότε δίνει πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και την τοποθεσία που παρουσιάστηκε η ασυνέχεια. Τα πλεονεκτήματά της είναι δύο ότι ο εξοπλισμός (a probe and data acquisition) είναι φορητός και πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αγωγίμες και μη-αγωγίμες επικαλύψεις των χαλύβδινων μελών. Ενώ τα μειονεκτήματα είναι η επίδραση του πάχους της επικάλυψης λόγω του ότι το πάχος είναι ανάλογο του ρεύματος γιατί εάν είναι μεγάλου πάχους η επικάλυψη και υπάρχει μικρή αδυναμία τότε δεν θα μετρηθεί η φθορά (Bader J.) καθώς και η επίτευξη της βαθμονόμησης του οργάνου που χρειάζεται εμπειρία.

Η λειτουργία της RT στηρίζεται στην παραγωγή ακτινών X-ray όπου μεταφέρονται στο μέλος και παράγουν μια δισδιάστατη μαυρόασπρη high contrast εικόνα που φαίνονται οι θέσεις και το μέγεθος, με σκούρο χρώμα γραμμή, των αδυναμιών και αστοχιών του μέλους. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό της θέσης των τενόντων εντός του προεντεταμένου σκυροδέματος και έμμεσα πιθανόν αδυναμιών που παρουσιάζουν στους τένοντες και τον εντοπισμό αδυναμιών στις μεταλλικές συνδέσεις στις δοκούς διαφόρων διατομών. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι τέσσερα, ο χρόνος για λήψη μέτρησης, η αδυναμία καθορισμού του βάθους της ρωγμής και ασυνέχειες, η απαίτηση για εξειδικευμένο προσωπικό και η ασφάλεια λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία και τέλος ως συνέπεια των παραπάνω το υψηλό κόστος. Άλλες μέθοδοι τείνουν να το αντικαταστήσουν.

Η UT είναι μια καινούργια μέθοδος εφαρμογής σε ομοιογενή υλικά όπως είναι το μέταλλο και το σκυρόδεμα και προσπαθεί να επιλύσει τα μειονεκτήματα της RT. Η πιο γνωστή τεχνική είναι το Ultrasonic Pulse Velocity (Bader J.). Βασίζεται στο χρόνο ταξιδιού Ultrasonic παλμών από μια πηγή παραγωγής στο δοκίμιο. Αποτελείται από το Ultrasonic pulse echo transducer που εκπέμπει γνωστής ταχύτητας και συχνότητας παλμούς, το computerized data acquisition system που συλλέγει τα δεδομένα από το Ultrasonic παλμό και το spatial control system που προσδιορίζει με συντεταγμένες τις αδυναμίες του δοκιμίου. Παράγεται μια τρισδιάστατη εικόνα παρουσιάζοντας το μέγεθος, τη θέση και το βάθος της ρωγμής. Η συσκευή συνηθίζεται να τοποθετείται στη μια πλευρά της δοκού λόγω της μη προσβασιμότητας στις άλλες. Το μήκος που εξετάζεται είναι περίπου 1-2 μέτρα και το pace 10-20 εκατοστά.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για καθορισμό του πορώδους του σκυροδέματος (Hernandez M.; Izquierdo M. κ.α.) που είναι μια αιτία για μείωση της ανθεκτικότητάς του, για μετρήσεις βάθους (Thickness measurements), για προσδιορισμό θέσης οπλισμού και οπών τενόντων και για περιγραφή του μεγέθους και του σχήματος των

ρωγμών (Kohl C. & Streicher D.). Στις μεταλλικές κατασκευές, χρησιμοποιείται για εντοπισμό αδυναμιών στις συνδέσεις μεταξύ των οποίων είναι το οι διαμήκης και εγκάρσιες ρωγμές (NDT; Weldments). Το πλεονέκτημα της έναντι της RT είναι ότι δίνει το βάθος της ρωγμής και είναι λιγότερο επικίνδυνο. Τα μειονέκτημα είναι ο μεγάλος χρόνος υλοποίησης του ελέγχου ως προς τις άλλες μεθόδους και η δύσκολη μεταφορά του εξοπλισμού (Bader J.).

Η μέθοδος IE είναι μια ακόμα μέθοδος που στηρίζεται στη παραγωγή κυμάτων που στέλνονται σε υλικό από σκυρόδεμα (Hsiao C. κ.α.). Τα αποτελέσματα φαίνονται σε εικόνα ως προς τις συχνότητες που μετρήθηκαν. Ο εξοπλισμός αποτελείται από δύο αισθητήρες – δέκτη, ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή και μια συσκευή παραγωγή κυμάτων – Impactors. Τα κύματα ανακλώνται στις έξι επιφάνειες του τρισδιάστατου μέλους και αναλόγως της συχνότητας που λαμβάνεται από το δέκτη της συσκευής, δημιουργείται το φάσμα συχνοτήτων. Οι συχνότητες προκύπτουν από τη διάρκεια του ταξιδιού του κύματος που καταγράφουν οι αισθητήρες. Η αδυναμία του μέλους εντοπίζεται από το φάσμα αφού έχει τη μεγαλύτερη τιμή συχνότητας ως προς το βάθος που εντοπίστηκε η αδυναμία από τα υπόλοιπα σημεία γιατί λόγω των ανακλάσεων και του ότι τα κύματα ταξιδεύουν γύρω από το σημείο της αδυναμίας. Πέραν της συσκευής Impact – echo, χρησιμοποιούνται αισθητήρες – επαφής με την εξεταζόμενη επιφάνεια και air-coupled sensors (μικρόφωνα) (Zhu J. κ.α.). Καθοριστικό ρόλο για την ακρίβεια των μετρήσεων είναι η γεωμετρία της δοκού, το εύρος των συχνοτήτων της συσκευής παραγωγής κυμάτων, η διάρκεια του γεγονότος μεταξύ της συσκευής και της επιφάνειας του σκυροδέματος που εξαρτάται από το υλικό και το μέγεθος των impact sources (Colla C. & Lausch R.) και το μέγεθος της αδυναμίας γιατί οι κινήσεις των κυμάτων καθορίζονται και από το υλικό και στην προκειμένη περίπτωση χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητες του υλικού, τη συχνότητα των κυμάτων και το μέγεθος του μέλους.

Η αδυναμία που εντοπίζει σε μέλη από σκυρόδεμα είναι η θέση των κενών, οι ρωγμές, η διάβρωση του οπλισμού καθώς και τη θέση των τενόντων, την απόσταση τους από την ελεύθερη επιφάνεια του σκυροδέματος (Colla C. & Lausch R.) και την ύπαρξη κενών με τη βοήθεια του SIBIE (stack imaging of spectral amplitudes based on the impact-method) (Muldoon R. κ.α.). Σύμφωνα με τη πηγή (Liang M. κ.α.) η μέθοδος μπορεί να αναγνωρίσει μικρορωγμές στο σκυρόδεμα και για να εκτιμήσει τη διάβρωση του οπλισμού χρησιμοποιεί το φάσμα των μετακινήσεων που εξάχθηκε από τη μέθοδο και με τη μετατροπή του σε φάσμα επιταχύνσεων θα εκτιμηθεί ο βαθμός διάβρωσης μέσω της σχετικής επιτάχυνσης. Από την εφαρμογή του air-coupled αισθητήρα (Zhu J & Popovics J., 2007) τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά ως προς την αξιοπιστία της χρήσης τους. Εντοπίστηκαν και εκτιμήθηκε εμβαδόν αδύναμης περιοχής και κενών κοντά και μακριά από την εξεταζόμενη επιφάνεια και το βάθος υπολογίστηκε από εξισώσεις και τέλος, εντοπίστηκαν κενά στις μεταλλικές και πλαστικές οπές των τενόντων.

Η λειτουργία της μεθόδου GPR μοιάζει με την προηγούμενη όπου ηλεκτρομαγνητικά κύματα στέλνονται από την επιφάνεια του μέλους από σκυρόδεμα

στο εσωτερικό του και λαμβάνονται μέσω αντένας οι ανακλάσεις που προκαλούνται από τις ασυνέχειες. Η διαφορά είναι ότι μετατρέπεται ο χρόνος ταξιδιού σε βάθος και προσδιορίζεται η θέση της αδυναμίας. Οι συχνότητες είναι υψηλές και κυμαίνονται από 20 MHz και 2.5 GHz (Kohl C. & Streicher D.). Οι χρήσεις στις επιθεωρήσεις είναι η εκτίμηση του βάθους ενός αντικειμένου ως προς την επιφάνεια που είναι τοποθετημένη η συσκευή, ο προσδιορισμός της θέσης του οπλισμού και των μεταλλικών οπών τενόντων, προσδιορισμός των μεταβολών της υγρασίας, προσδιορισμός κενών στο σκυρόδεμα και προσδιορισμός μεγέθους των μεγάλων κενών, προσδιορισμός θέσης ρωγμής, εκτίμηση διαμέτρου του οπλισμού (Bungey J.) και εκτίμηση κενών στις οπές των τενόντων (Muldoon R. κ.α).

Η μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα (Bungey J.) όπως είναι ότι εξετάζει γρήγορα μεγάλες επιφάνειες σκυροδέματος, τα αποτελέσματα είναι γραφικά σε ψηφιακή μορφή ώστε το σήμα να τύχει επεξεργασία, δεν απαιτούνται μέτρα προστασίας από τα μικροκύματα όπως απαιτείται στη Radiographic inspection και ο εξοπλισμός είναι κινητός. Τα μειονεκτήματα περιστρέφονται γύρω από την ανάγκη για ειδικευση στο όργανο, η ύπαρξη πολύπλοκων καταστάσεων του υλικού δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα, απαιτεί κάποιες φορές περαιτέρω ανάλυση του σήματος είναι ευαίσθητη σε παραμέτρους του υλικού, για αυτό και εφαρμόζεται μόνο στο σκυρόδεμα, ταυτόχρονα επηρεάζεται από το ποσοστό υγρασίας εντός του υλικού (Laurens S. κ.α.) και παραμέτρους του περιβάλλοντος.

Η ΑΕ είναι μια τεχνική που εκμεταλλεύεται την παραγωγή ενέργειας όταν προκαλείται ένα γεγονός στο υλικό. Χρειάζεται μια συσκευή συσσώρευσης κυμάτων (αισθητήρας) και με βάση την ένταση και του χρόνου ταξιδιού προς τη συσκευή υπολογίζονται η θέση και άλλα περιγραφικά χαρακτηριστικά της αδυναμίας ή αστοχίας. (NDT Resource Center). Το σύστημα επομένως αποτελείται από τον ΑΕ αισθητήρα, το pre-amplifier, το main amplifier και το band-pass φίλτρο. Προτιμάται ο resonance-type αισθητήρα παρά ο broad-band, που η συχνότητά του είναι 50-250kHz (RILEM Technical Committee, Vol. 43, No. 9, σελ. 1177-1181) για το σκυρόδεμα ο οποίος είναι λιγότερο ευαίσθητος στις μεταβολές της θερμοκρασίας, στις συνθήκες υγρασίας και δονήσεων. Ακόμα, με τη χρήση των air coupled sensors, δηλαδή μικροφώνων, στο σκυρόδεμα εντοπίζονται τα ακουστικά κύματα, δηλαδή οι μεταβολές της πίεσης στην εξεταζόμενη περιοχή, χωρίς ο αισθητήρας να εφάπτεται της επιφάνειας.

Το πλεονέκτημα είναι ότι τα επιφανειακή κύματα είναι πιο μεγάλα από τα κύρια κύματα και έτσι εντοπίζονται γρήγορα από τους air-coupled αισθητήρες. Όμως, εάν χρησιμοποιηθούν εικόνες των επιφανειακών κυμάτων (surface wave images) πρέπει να μελετηθεί η ευαισθησία των επιφανειακών κυμάτων για εντοπισμό των αδυναμιών του υλικού (Zhu J & Popovics J., Vol. 38, No 9 pg. 801-806). Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να εξετάσουν περιοχή με μήκος 10 μέτρα με αποτέλεσμα εξοικονόμηση χρόνου για μεγάλες γέφυρες και γίνεται διάκριση των κυμάτων μεταξύ λεπτής και μεγαλύτερου πάχους πλάκα, σε Lamb waves και Rayleigh waves αντίστοιχα (Zhu J &

Popovics J., Vol. 38, No 9 pg. 801-806). Το μειονέκτημά της είναι ότι εφαρμόζεται μόνο σε μέλη από σκυρόδεμα (Nair A. & Cai C. S.).

Εφαρμόζεται ευρέως για προσδιορισμό της θέσης της διάβρωσης των διαβρωμένων καλωδίων, διαβρωμένων τενόντων, για εντοπισμό σπασμένου καλωδίου και για εντοπισμό ρωγμών και μικρορωγμών στη δοκό από σκυρόδεμα. Στις εφαρμογές του, παρουσιάζεται σημαντική τιμή του ΑΕ μόνο των μεγάλων γεγονότων, όπως έγινε στη δοκιμή (Ramadan S. κ.α.) με τρεις εξεταζόμενοι τένοντες υψηλής αντοχής χάλυβα, δηλαδή τη στιγμή των ρωγμών και της αστοχίας των τενόντων. Το σπάσιμο του πρώτου οφειλόταν στη τοπική διάβρωση που είχε, ο δεύτερος λόγω αύξησης της ρωγμής και ο τρίτος λόγω αστοχίας του χάλυβα. Οι ρωγμές σε δοκό που οφείλονται σε αστοχία σε κάμψη, έχουν ως αποτέλεσμα τη διαρροή του οπλισμού, ενώ σε αστοχία σε τέμνουσα οι ρωγμές είναι διαγώνιες στις στηρίξεις (RILEM Technical Committee, Vol. 43, No. 9, pg. 1183-1186). Με τη χρήση μικροφώνων συχνότητας από 0-20kHz (Zhu J & Popovics J., Vol. 38, No 9 pg. 801-806) αναγνωρίστηκαν οι ρωγμές του μέλους από σκυρόδεμα και έπειτα από περεταίρω επεξεργασία του σήματος εξάχθηκαν εικόνες με κανονικοποιημένη ταχύτητα και κανονικοποιημένο λόγο ενέργειας.

3.2.3 Εφαρμογές μη-καταστροφικών μεθόδων

Μέσα από τις πηγές φαίνονται μια σειρά εφαρμογών των μη-καταστροφικών μεθόδων. Ενδεικτικά αναφέρονται στις κατασκευές από σκυρόδεμα, ο εντοπισμός οπλισμού καταστρώματος και δοκών, θέση τενόντων στις δοκούς, διάβρωση οπλισμού και καλωδίων και ρωγμές σε πυλώνες μετά από σεισμό.

Ο εντοπισμός και προσδιορισμός της θέσης οπλισμού καταστρώματος (Kohl C. & Streicher D.) μπορεί να γίνει με τις μεθόδους impact-echo και ultrasonic pulse echo. Σε γέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα, για εντοπισμό των οπλισμών εντός του καταστρώματος χρησιμοποιήθηκαν δύο σαρωτές αυτόματων μετρήσεων – μικρής μετρούμενης επιφάνειας 1.80X1.80 μέτρα και μεγάλης μετρούμενης επιφάνειας 4X10 μέτρα – επιθεωρεί την επιφάνεια του σκυροδέματος του καταστρώματος πριν την τοποθέτηση της ασφάλτου και ένας τρίτος σαρωτής την κάθετη επιφάνεια κορμών των box girders και ένα ραντάρ για όλο το εμβαδόν του δείγματος με συχνότητα 1.5GHz. Η ταχύτητα που κινείται η αντένα είναι 0.1μέτρα/δευτερόλεπτο με απόσταση 1-2εκατοστά. Οι συσκευές των impact-echo και ultrasonic pulse echo σταματούν σε κάθε σημείο μέτρησης όταν οι αισθητήρες σπρώχνονται προς την επιφάνεια για λήψη μέτρησης και έπειτα ανασηκώνονται και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Με την ολοκλήρωση, σε ένα μέλος διαστάσεων 2X1.5X0.5 μέτρα εντοπίστηκε ο διαμήκης και κάθετος οπλισμός, η οπή του προεντεταμένου τένοντα και οι τσιμεντενέσεις και έξι ρωγμές. Στο άρθρο φαίνεται η δισδιάστατη και τρισδιάστατη εικόνα.

Για προσδιορισμό της θέσης των τενόντων και το πάχος της άνω και κάτω επιφάνειας (Kohl C. & Streicher D.) χρησιμοποιείται η μέθοδος GPR και ultrasonic pulse echo. Οι δοκοί είναι post-tensioned τένοντες 12 καλωδίων διαμέτρου 45

χιλιοστά και απόσταση μεταξύ των οπών είναι 75 εκατοστά και εξετάζονται οι άνω και κάτω επιφάνεια της δοκού από το εσωτερικό της εγκάρσια της γέφυρας. Η πρώτη μέθοδος καθορίζει το πάχος και η δεύτερη τη θέση των τενόντων. Δια μήκος της γέφυρας στο λαιμό της δοκού, εξετάζεται η θέση των τενόντων και μη-εφελκυστικού οπλισμού. Με το ραντάρ, η συχνότητα της αντένας ήταν 1.5GHz και προσδιορίστηκαν οι θέσεις των τενόντων και με το ultrasonic method φαίνονταν οι κάθετοι οπλισμοί. Το πλεονέκτημά της έναντι του ραντάρ είναι ότι δείχνει και του οπλισμούς που βρίσκονται σε βάθος.

Για το καθορισμό της διάβρωσης οπλισμού σε σκυρόδεμα υπάρχουν ορισμένες άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, κατ' αρχάς πρέπει να βρεθεί η θέση του οπλισμού και μετά να ελεγχθεί εάν είναι διαβρωμένος. Ο προσδιορισμός μπορεί να γίνει με ειδικές ηλεκτρομαγνητικές συσκευές ή με cover-meters. Μια άλλη μέθοδος είναι η half-cell potential για εντοπισμό διαβρωμένου οπλισμού. Πάλι με μέτρηση του καλύμματος του σκυροδέματος προσδιορίζεται ο κίνδυνος για διάβρωση μεταξύ των οποίων οι πιο γνωστές είναι η surface permeability, electric resistance και η polarization resistance method. (Parke G. & Henwson N., σελ. 630-631) Η πρώτη χρησιμοποιεί μια τρίποδη συσκευή που τοποθετείται στη επιφάνεια του σκυροδέματος η οποία βγάζει αέρα προκαλώντας internal vacuum. Ο χρόνος για επαναφορά στη ατμοσφαιρική πίεση αντικατοπτρίζει the permeability, που είναι η αντίσταση της επιφάνειας του σκυροδέματος για διείσδυση παραμέτρων από την ατμόσφαιρα στο εσωτερικό του και μπορούν να συγκριθούν τιμές μεταξύ διαφόρων σημείων στο μέλος.

Το δεύτερο μετράται η ηλεκτρική αντίσταση του καλύμματος του σκυροδέματος με τη τοποθέτηση τεσσάρων μεταλλικών ηλεκτροδίων στην επιφάνεια και ρεύμα περνά μέσα από τα δύο και μετά υπολογίζεται η υγρασία και τα άλατα εάν υπάρχουν στο σκυρόδεμα λόγω της αντιστρόφους ανάλογης σχέσης τους. Η τρίτη στηρίζεται στη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και η τοποθέτηση του εξοπλισμού γίνεται κατά την κατασκευή του μέλους. Τοποθετείται ένα μεταλλικό counter – electrode μεταξύ του οπλισμού που ερευνάται και της πλησιέστερης επιφάνειας σκυροδέματος, όπου ταξιδεύει το ρεύμα από το πρώτο στο δεύτερο και εάν υπάρχει διάβρωση εντοπίζεται μέσω της ισχύς του ρεύματος (current density). Στο πείραμα (Liang M. κ.α.), εκτελώντας τρεις διαφορετικές ηλεκτροχημικές μεθόδους IE, την open-circuit potential (OCP), direct current (DC) και alternating current (AC). Η πρώτη προσδιορίζει το στάδιο της διάβρωσης όμως δεν είναι ακριβής στη πρόβλεψη της φθοράς στους υπόλοιπους οπλισμούς του δείγματος, η δεύτερη και η τρίτη εκτιμούν το βαθμό διάβρωσης.

Για τη διάβρωση των καλωδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μια άλλη μέθοδος, η electromagnetic survey for single-stands cables που ελέγχει ένα – ένα τα καλώδια. (Parke G. & Henwson N., Σελ. 635) Δύο ημικύκλια περιβάλλουν το καλώδιο και με συχνότητα ρεύματος 10kHz δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο. Η διάβρωση εντοπίζεται χωρίς να προσδιορίσει σε πιο βαθμό είναι εάν δηλαδή έσπασε ή όχι, όταν το ρεύμα αυξάνεται αφού το σημείο εκείνο αφήνει λιγότερο ρεύμα για να περάσει.

Για εντοπισμό σπασμένου καλωδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια μέθοδος αλλά με χρήση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Στη περίπτωση της επιθεώρησης μετά από σεισμό, στην Ιαπωνία (Adachi Y.) μετά το δυνατό κτύπημα του σεισμού Kobe, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τρεις μεθόδους, την απευθείας οπτική παρακολούθηση που ήταν δύσκολη γιατί δεν εκτιμήθηκε η κατεύθυνση και το μέγεθος των ρωγμών και δεν ήταν ορατό όλο το μήκος του πυλώνα, η δεύτερη ήταν μια άμεση οπτική μέθοδος μέσω μιας bored-hole κάμερας που εισάγεται εντός του πυλώνα και εκτιμάται η κατάσταση στο εσωτερικό του και η τρίτη είναι το pile integrity test μέσω της ανάκλασης των κυμάτων.

3.3. Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Το ΑΔΑ προτιμάται για την παρακολούθηση της μεταβολής παραμέτρου με το χρόνο. Στόχος της είναι η παρακολούθηση της υγείας σε πραγματικό χρόνο κατά τη λειτουργία της γέφυρας μέσω ενός δικτύου αισθητήρων που συλλέγει τα δεδομένα και τα αποστέλλει σε μια μονάδα συλλογής μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας ώστε να φαίνεται η μεταβολή της κατάστασης των εξαγόμενων παραμέτρων που εξετάζονται από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη. Τα κριτήρια σχεδιασμού είναι ο σκοπός της συνεχούς παρακολούθησης, η σπουδαιότητα της κατασκευής, τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της, η ηλικία και η κατάστασή της, το διατεθειμένο κεφάλαιο, το είδος αισθητήρων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, τα χαρακτηριστικά της βάσης δεδομένων και του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

3.3.1 Πλεονεκτήματα

Ο συνεχής έλεγχος εξασφαλίζει βελτιωμένη ποιότητα πληροφορίας μέσα από τους αισθητήρες, την ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων, τις επικοινωνίες και την μοντελοποίηση και επεξεργασία της πληροφορίας. Ως αποτέλεσμα, η προσέγγιση του μηχανικού είναι προληπτική αντί αντιδραστική (Κουνούνης Α.). Ο κύκλος ζωής του έργου επιμηκύνεται αφού μειώνονται οι αβεβαιότητες του σχεδιασμού του κύκλου ζωής και της αποδοτικότητας της ανθρώπινης παρέμβασης στο στάδιο της συντήρησης μέσω των μεθοδολογιών στατιστικής ανάλυσης ρίσκου βασισμένο σε πιθανότητες. Έτσι, η κατασκευή αντιμετωπίζεται ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και ο σχεδιασμός και η διοίκησή της είναι στρατηγικός και όχι κατακερματισμένος με την χρήση πολλαπλών παραμέτρων βασισμένα στην ανάλυση επικινδυνότητας.

Πρακτικά, σε ανεγειρόμενες κατασκευές αυξάνεται ο κύκλος ζωής λόγω του συγκεκριμένου συστήματος με σημαντικά μειωμένο κόστος συντήρησης και αποκατάστασης των βλαβών. Η επεξεργασία της πληροφορίας από τη συνεχή παρακολούθηση αυξάνει την αξιοπιστία των μοντέλων για πρόληψη της υποδομής στο μέλλον (μειώνοντας τις αβεβαιότητες και αυξάνοντας την ακρίβεια) γιατί οι παράγοντες με δυσμενή επίδραση όπως η επιδείνωση, το περιβάλλον και η αύξηση της ζήτησης προβλέπονται με μειωμένη ακρίβεια (N. M. Okasha & D. M. Frangopol). Στις υφιστάμενες υποδομές και κυρίως στις γερασμένες, οι ανθρώπινες παρεμβολές,

οι κλιματολογικές αλλαγές και η μειωμένη απόδοση και αξιοπιστία τους προκαλούν επίσης αβεβαιότητες στη πρόβλεψη της συμπεριφορά τους.

Από πλευράς ΑΔΑ, το ΑΔΑ έχει αντικαταστήσει το ενσύρματο δίκτυο μέσα σε μία δεκαετία λόγω ορισμένων σημαντικών πλεονεκτημάτων που έχει χωρίς όμως να αποτελεί το βέλτιστο μέσο συνεχούς παρακολούθησης της υποδομής. Τα ασύρματα δίκτυα υπερτερούν στην εύκολη εγκατάσταση των κόμβων αισθητήρων ακόμα και σε σημεία που προηγουμένων δεν είναι προσβάσιμα καθώς και στην επέκταση του δικτύου ανά πάσα χρονική στιγμή είτε σε προσθήκη αισθητήρων με άλλη μονάδα μέτρησης είτε με αυξομείωση αριθμού υφιστάμενων αισθητήρων σε υφιστάμενο ή καινούργιο κόμβο. Ως εκ τούτου, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι χαμηλότερο από τον ενσύρματο τρόπο και ανάλογο του μεγέθους της υποδομής λόγω του λιγότερου χρόνου εγκατάστασης, λιγότερου εξοπλισμού (όχι καλώδια) και λιγότερου εξοπλισμού συντήρησης. Ταυτόχρονα, όταν ολοκληρωθεί η παρακολούθηση στη συγκεκριμένη υποδομή, τότε οι κόμβοι αισθητήρων μεταφέρονται σε άλλη υποδομή, χωρίς να έχει καταστραφεί η προηγούμενη και χωρίς καινούργιο εξοπλισμό για την καινούργια.

3.3.2 Προκλήσεις/Περιορισμοί

Υπάρχουν όμως άλλα εξίσου σημαντικά ζητήματα που καθιστούν περαιτέρω έρευνα στα ΑΔΑ. Αφορά την απαίτηση για αυστηρά πραγματικό χρόνο στις επικοινωνίες, την αξιοπιστία και ασφάλεια των δεδομένων που φτάνουν στη βάση δεδομένων, την μικρή χωρητικότητα του καναλιού επικοινωνίας (bandwidth), τους περιορισμούς σε παροχή ενέργειας, το κόστος συντήρησης, η καταστροφή των συσκευών από εξωγενής παράγοντες όπως είναι οι καιρικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, τέτοια συστήματα δεν εφαρμόζονται σε περιβάλλον με υψηλό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, απαιτούν την παράλληλη υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων (π.χ. αισθητήρας και κάμερα), ο σχεδιασμός και η υλοποίηση τους είναι πολύπλοκη λόγω συνδυασμού κόστους, σκοπού εφαρμογής και συντηρητικής συμπεριφορά βιομηχανίας. Τέλος, έχουν περιορισμούς στα φυσικά μεγέθη που καταγράφουν οι αισθητήρες απαιτώντας συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων για λήψη απόφασης (Hoult N. & κ.α).

Λόγω της περιορισμένης παροχής ενέργειας των αισθητήρων, που είναι ένα από τα πιο καυτά θέματα, λόγω της ανεξάρτητης λειτουργίας τους με χρήση μπαταρίας, πρέπει να γίνεται σωστή διαχείριση του δικτύου ως προς τη θέση των κόμβων για επικοινωνία, τον αριθμό παραμέτρων και της συχνότητας της μέτρησης για περισσότερα αποθέματα ενέργειας και για αξιόπιστη και ασφαλή μεταφορά δεδομένων. Οι κύριοι λόγοι κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων (sensor node) επικεντρώνονται (Κουνούδης Α.) στην αποστολή και λήψη των δεδομένων και είναι οι συγκρούσεις των πακέτων γειτονικών κόμβων και απαιτείται αναμετάδοση (collisions), η παραλαβή πακέτων στους κόμβους που δεν προορίζονταν για αυτούς (overhearing), η απαίτηση αποστολής πακέτων ελέγχου σε πολλά πρωτόκολλα (control packet overhead) και η αναμονή κόμβων να λάβουν πακέτα που δεν έρχονται

τελικά (idle listening). Κατανάλωση ενέργειας γίνεται και από τους υπολογισμούς που είναι προγραμματισμένος να εκτελεί ο κόμβος. Για το θέμα της ενέργειας, για να επιλυθεί εν μέρει το ζήτημα, αρκετές εφαρμογές συνδυάζουν ασύρματο και ενσύρματο μέρος στο δίκτυο για να αποφεύγεται η αντικατάσταση της παροχής. Πέραν αυτών, παραμένει αναπάντητο το ερώτημα για τη βέλτιστη θέση των αισθητήρων στο μέλος για την καλύτερη λήψη μετρήσεων από την πλευρά του μηχανικού. Δηλαδή, η εκλογή της κρίσιμης «περιοχής» της γέφυρας και ταυτόχρονα η εκλογή της θέσης του αισθητήρα σε συνδυασμό με το μέγεθος μέτρησής του.

3.3.3 Είδη Συνεχής Παρακολούθησης

Η συνεχής παρακολούθηση κατηγοριοποιείται ως προς το χρόνο εφαρμογής και ως προς το μέγεθος του δικτύου αισθητήρων. Ως προς το χρόνο διακρίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα, για προσδιορισμό συμπεριφοράς γέφυρας για σύντομο χρονικό διάστημα όπως είναι η επέκταση του κύκλου ζωής για λιγότερο από ένα χρόνο, η παρακολούθηση των φορτίων, η κόπωση της και η συμπεριφορά της γέφυρας για ένα συγκεκριμένο κυκλοφοριακό φορτίο. Σε μεγάλο χρονικό διάστημα όταν πρόκειται για περισσότερο από δώδεκα μήνες για σκοπούς επιθεώρησης, για προσδιορισμό της κατάστασης της υποδομής ή μελών της για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στα πλαίσια της επιθεώρησης για παράδειγμα κάθε δύο χρόνια και για έγκαιρη ειδοποίηση εντοπισμού παραμέτρων που πλησιάζουν ή έφτασαν σε κρίσιμες τιμές. Λόγου χάριν, όταν η γέφυρα ταλαντώνεται με μεγάλη συχνότητα και τα συστήματα ειδοποίησης για πτώση (collapse warning).

Ως προς το μέγεθος, διακρίνεται σε τοπικό και γενικό. Το τοπικό σύστημα επικεντρώνεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή, για παράδειγμα στο πάχος των ρωγμών, τον τοπικό λυγισμό, τη διάβρωση μελών χαλύβδινων και ενανθράκωση σκυροδέματος, σε μέλος δηλαδή σε μια δοκό, σε υποστύλωμα ή ράβδο για παρακολούθηση των παραμορφώσεών του. Σε γενικό σύστημα, όλη η γέφυρα είναι υπό την παρακολούθηση των αισθητήρων, όπως είναι τα acoustic emission, η παραμόρφωση της γέφυρας, οι συχνότητες και οι ιδιομορφές της γέφυρας (Gastinea A. κ.α).

Για το προσδιορισμό των στατικών χαρακτηριστικών αρκεί μόνο ένα σύστημα παρακολούθησης σε συγκεκριμένα σημεία αναλόγως της παραμέτρου μελέτης χωρίς της ανάγκη για κάλυψη όλης της γέφυρας. Για το προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών εφαρμόζεται ένα δίκτυο αισθητήρων που καλύπτει όλη τη γέφυρα ώστε να ληφθούν μετρήσεις κατά τα δυναμικά τεστ (Koh H. κ.α.). Τα δυναμικά τεστ (Ren W. & Peng X.) είναι δοκιμή δόνησης λόγω εξωτερικής δύναμης, δοκιμή ελεύθερης δόνησης και δοκιμή περιβάλλουσας δόνησης. Η δοκιμή δόνησης λόγω εξωτερικής δύναμης είναι δύσκολη και κοστίζει αρκετά και απαιτεί το κλείσιμο της γέφυρας, η δοκιμή ελεύθερης δόνησης γίνεται με το να αφηθεί ξαφνικά ένα μεγάλο φορτίο που επίσης απαιτεί κλείσιμο της γέφυρας και τέλος η δοκιμή περιβάλλουσας δόνησης που γίνεται κατά τη λειτουργία της γέφυρας με χρήση μόνο επιταχυνσιομέτρων και για αυτό είναι η φθηνότερη επιλογή. Με τη δοκιμή, μετρείται

η απόκριση της κατασκευής χωρίς να προσδιορίζονται τα υφιστάμενα φορτία. Το μειονέκτημά της είναι ότι δεν προσδιορίζει άμεσα τη συχνότητα ή την παλμική κίνηση και για αυτό προσδιορίζεται μια ιδιομορφική παράμετρος στα εξαγόμενα αποτελέσματα με δύο τρόπους, τη Peak Picking (PP) μέθοδο και την Stochastic Subspace Identification (SSI) μέθοδο (Lee J. & Yun C.).

3.3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΕΔΥ

Το ΑΔΑ περιλαμβάνει τους κόμβους αισθητήρων που βρίσκονται στην υποδομή, οι οποίοι μέσω του δικτύου μεταφέρουν τα δεδομένα (πακέτα στην ηλεκτρολογία) μέσω των κόμβων στο συσσωρευτή ο οποίος μεταφέρει την πληροφορία σε μια αποθηκευτική μονάδα που στο χώρο της κατασκευής ή συνήθως σε ένα γραφείο μέσω του διαδικτύου. Ένας κόμβος αισθητήρων (Κουνούνης Α.) αποτελείται από ένα ή περισσότερους αισθητήρες, την πηγή ενέργειας, το μικρο-κοντρόλερ και άλλα μέρη που αφορούν το κλάδο της ηλεκτρολογίας.

Ο αισθητήρας αποτελείται από τα transducers και τους μετατροπείς από αναλογικό σε ψηφιακό/ψηφιακό σε αναλογικό και μετρά την παράμετρο του περιβάλλοντος που είναι ρυθμισμένος. Χαρακτηρίζεται από τη/τις/το (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας):

- Διακριτότητα: είναι η μικρότερη μεταβολή στο μετρούμενο μέγεθος που μπορεί να παράγει τη μικρότερη μεταβολή στο ηλεκτρικό σήμα εξόδου η οποία είναι δυνατό να καταγραφεί.
- Απόκριση συχνοτήτων: Είναι το εύρος συχνοτήτων πάνω από το οποίο το ηλεκτρικό σήμα εξόδου είναι σταθερό για σταθερή μηχανική κίνηση.
- Μετάθεση φάσης: Είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της δημιουργίας της κίνησης και της παραγωγής του ηλεκτρικού σήματος του συστήματος.
- Απαιτήσεις Βαθμονόμησης: Είναι η επιτρεπόμενη διακύμανση στο ηλεκτρικά παραγόμενο σήμα που προκύπτει από τις μεταβολές στο εύρος συχνοτήτων των δεδομένων, μεταβολές στο περιβάλλον και μεταβολές στο εύρος του μεγέθους των δεδομένων.
- Ευαισθησία: Είναι το πηλίκο της ηλεκτρικής τάσης εξόδου προς το μηχανικό μέγεθος που μετρά.
- Εγκάρσια ευαισθησία: Ευαισθησία σε κίνηση παράλληλα προς το επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα κύριας ευαισθησίας.
- Μέγεθος και μάζα: Το μέγεθος παίζει σημαντικό ρόλο στην εγκατάσταση του αισθητήρα και στην ευαισθησία του και είναι πιθανό να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του συστήματος.
- Περιβαλλοντική ευαισθησία: Είναι ο τρόπος που επηρεάζεται η απόκριση του αισθητήρα από τις μεταβολές των συνθηκών του εξωτερικού περιβάλλοντος (υγρασία, θερμοκρασία, θόρυβος).

Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται (Κουνούδης Α.) ως προς το φυσικό μέγεθος μέτρησης. Οι πιο γνωστοί σε θέματα γεφυρών είναι το επιταχυνσιόμετρο για μέτρηση επιτάχυνσης, το θερμομέτρο για καταγραφή μεταβολών θερμοκρασίας σε φέροντα στοιχεία, ο αισθητήρας υγρασίας για ατμόσφαιρα, έδαφος και φέροντα στοιχεία, ανεμόμετρο για ένταση και διεύθυνση ανέμου, ο ηλεκτρομηχανικός αισθητήρας Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT) για μετατοπίσεις φερόντων στοιχείων και υπολογισμός βέλους κάμψης, το μηκυσιόμετρο για καθιζήσεις, ανυψώσεις, επιμηκύνσεις και σμικρύνσεις στα στοιχεία, οι acoustic emission αισθητήρες εντοπισμού ηχητικών κυμάτων και το σύστημα με χρήση άνοδο και καθόδου για εντοπισμό διάβρωσης.

Πιο συγκεκριμένα, οι acoustic emission αισθητήρες εφαρμόζονται για τη διάκριση ως προς την αιτία πρόκλησης των μικρορωγμών σε σκυρόδεμα, λόγω εφελκυσμού ή διάτμησης (Ohno K. & Ohtsu M.) όπου ο αισθητήρας τοποθετείται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, για εντοπισμό σπασμένου τένοντα σε προεντεταμένο σκυρόδεμα λόγω του ότι ο ήχος που παράγει μια τέτοια ενέργεια είναι πάνω από 100dB (Yuyama S. κ.α.) και για εντοπισμό κινητού φορτίου αφού λόγω της κίνησης παράγει ενέργεια που σε αισθητήρες πάνω στη δοκό λαμβάνονται έως και 90dB (Yuyama S. κ.α.).

Ο εντοπισμός της διάβρωσης με τη συνεχή παρακολούθηση γίνεται από αισθητήρες μέσα στο σκυρόδεμα. Οι εντός σκυροδέματος αισθητήρες, μετράνε ένα ή περισσότερους παραμέτρους. Η απλή μορφή (McCarter W. & Vennesland) είναι η τοποθέτηση ενός ηλεκτρόδιου κοντά στον οπλισμό που ενώνεται με ένα βολτόμετρο και ένα άλλο καλώδιο ενώνεται με τον οπλισμό. Αναλόγως της τάσης ρεύματος κατατάσσεται η διάβρωση. Όσο πιο μεγάλη είναι η τάση τόσο μεγαλύτερη είναι η διάβρωση. Μια εναλλακτική μορφή είναι η ηλεκτροχημική μέθοδος (McCarter W. & Vennesland) με τη χρήση ενός counter ηλεκτρόδιο. Όσο μεγαλύτερη είναι το ρεύμα που μετράται τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός διάβρωσης. Άλλη μέθοδος απλούστερη της προηγούμενης και πιο λειτουργική είναι η Macrocell current (McCarter W. & Vennesland, Shao X) και στηρίζεται στη μεταφορά ρεύματος από τη κάθοδο στην κάθοδο. Τοποθετείται πέραν της μία ανόδου εντός του σκυροδέματος καταφέροντας να λαμβάνονται πληροφορίες για το ποσοστό και το βάθος της διάβρωσης σε διάφορα σημεία μεταξύ οπλισμού και επιφάνειας σκυροδέματος. Η τοποθέτηση των ανόδων γίνεται διαγώνια και όχι κάθετα και η άνοδος είναι μαύρος χάλυβας (black steel). Η σημαντική αύξηση του ρεύματος συνεπάγεται με εντοπισμό φαινομένου διάβρωσης. Μία άλλη μέθοδος στηριζόμενη στο open circuit potential (Duffo G. & Farina S.) είναι η τοποθέτηση αισθητήρα εντός σκυροδέματος που μετρά πέραν της μία παραμέτρου – τη πυκνότητα του ρεύματος του οπλισμού, την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος, το οξυγόνο, τη παρουσία ιόντων χλωρίου και θερμοκρασία εντός σκυροδέματος. Για αυτό αποτελείται από ένα μαύρο χάλυβα, δύο ηλεκτρόδια, ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, ένα ειδικό ηλεκτρόδιο για εντοπισμό ιόντων χλωρίου και ένα θερμομέτρο και είναι όλα από epoxy resin.

Ως προς το υλικό, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ως ακολούθως. Οι κοινοί αισθητήρες για σκυρόδεμα και χάλυβα είναι η επιτάχυνση για το προσδιορισμό των ταλαντώσεων, οι συνθήκες περιβάλλοντος (μέγεθος και διεύθυνση άνεμου, θερμοκρασία, υγρασία και ηλιοφάνεια), οι μετακινήσεις σε μια, δύο ή τρεις διαστάσεις σε τοπικό και γενικό σύστημα, τα φορτία κυκλοφορίας και η κλίση για καταγραφή της μεταβολής γωνιάς μέλους. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται για την περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου, τις μεγάλου πάχους, μακριές και πολλές ρωγμές, την αναγνώριση θέσης οπλισμού και αντοχής σκυροδέματος, τις παραμορφώσεις στο κατάστρωμα και στις δοκούς, η αντοχή, την εφελκυστική αντοχή των τενόντων. Για τα χαλύβδινα μέλη είναι η διάβρωση δοκών και ράβδων, οι ρωγμές, οι παραμορφώσεις και ο εφελκυσμός των καλωδίων (Gastinea A. κ.α.).

Η επικοινωνία των κόμβων καθορίζεται από το μέγεθος της γέφυρας. Σε κανονικές γέφυρες η επικοινωνία θα γίνεται με ad-hoc δίκτυο. Σε ένα ad-hoc δίκτυο, μέσω του πρωτοκόλλου με το πιο γνωστό να είναι το AODV routing protocol, όπου οι διαδρομές των πακέτων γίνονται από κόμβο σε κόμβο και μπορεί να διασχίσουν πολλές διαδρομές μέχρι τον προορισμό τους. Με αυτή τη δυνατότητα είναι δυνατό να γίνει αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου αφού έχει την ικανότητα της ανασυγκρότησης. Έτσι αναπτύσσεται εύκολα και γρήγορα ένα δίκτυο και εξαρτάται πολύ λίγο από σταθερή υποδομή. Υπάρχουν ορισμένες παραλλαγές, δηλαδή μπορεί να είναι πλήρως συμμετρικό περιβάλλον όπου όλοι οι κόμβοι να έχουν πανομοιότυπες δυνατότητες και ευθύνες, από την άλλη πλευρά μπορεί οι κόμβοι μεταξύ τους να έχουν ασύμμετρες δυνατότητες λόγω διάρκειας ζωής της πηγής ενέργειας, διαφορετικών υπολογιστικών πόρων ή ακόμα και εμβέλειας μετάδοσης, ή μπορεί να έχουν ασύμμετρες ευθύνες, δηλαδή ορισμένοι κόμβοι να μπορούν να δρομολογήσουν πακέτα είτε κάποιιοι κόμβοι να λειτουργήσουν σαν αρχηγοί των γειτονικών κόμβων (head of a cluster).

Τα χαρακτηριστικά του φορτίου ανάμεσα σε διαφορετικά ad-hoc δίκτυα διαφέρουν ως προς το data rate, τους χρονικούς περιορισμούς, τις απαιτήσεις αξιοπιστίας, την εκπομπή προς έναν ή πολλούς σταθμούς (unicast/multicast) και τη διευθυνσιοδότηση. Σίγουρα, υπάρχουν ορισμένα θέματα που χαρακτηρίζονται ως περιορισμούς/προκλήσεις αυτών των δικτύων. Οι κυριότεροι είναι οι περιορισμοί στην εμβέλεια της ασύρματης μετάδοσης, το broadcast φύση του ασύρματου δικτύου, οι απώλειες πακέτων λόγω λαθών μετάδοσης, η κινητικότητα των κόμβων οι ενεργειακοί περιορισμοί και η ευκολία παρακολούθησης των ασύρματων μεταδόσεων για θέματα ασφάλειας μεταφοράς δεδομένων.

Σε μεγάλες γέφυρες, η επικοινωνία των κόμβων γίνεται μέσω ενός multi-hop σε δύο φάσεις τη δρομολόγηση (routing) και την μεταφορά δεδομένων (data transport). Η όλη διαδικασία μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, τη συγκεντρωτική διαδικασία αθροίσματος των δεδομένων (centralized data aggregation) και την αποκεντρωμένη διαδικασία αθροίσματος δεδομένων (decentralized data aggregation). Στην πρώτη περίπτωση ένας κόμβος ελέγχει το δίκτυο και όλοι οι άλλοι επικοινωνούν μόνο με αυτόν δηλαδή όλοι-σε-ένα (many-to-one). Η επικοινωνία του κόμβου σχετίζεται με

την διαμόρφωση των δεδομένων που ακολουθείται από προκαθορισμένες εργασίες όπως το χρόνο συγχρονισμού, αίσθηση και συλλογή δεδομένων.

Στη δεύτερη περίπτωση οι κόμβοι συνήθως λειτουργούν ανεξάρτητοι ή συντονίζουν τις κινήσεις τους με άλλους κόμβους. Το δίκτυο χωρίζεται σε clusters τα οποία επεξεργάζονται αρκετά τα δεδομένα και επικοινωνούν μεταξύ τους μόνο. Συνολικά, σε ένα τέτοιο δίκτυο συνδυάζονται διάφοροι τρόποι εφαρμογής μεταξύ των οποίων είναι η μεταφορά δεδομένων μέσω clusters, η μεταφορά δεδομένων με μεγάλη διαφορά απόστασης μεταξύ τους μέσω cluster heads και του gateway node ή ακόμα και την επικοινωνία μεταξύ γειτονικών clusters. Η μεταφορά των δεδομένων μπορεί να γίνει με το One-to-one data transfer, one-to-many multicast, many-to-one data sink καθώς και ο συνδυασμός τους. Έτσι, ο όγκος δεδομένων που θα αποσταλεί στο τελικό κόμβο θα είναι μικρότερος από την πρώτη μέθοδο αν και ο συνδυασμός της προέλευσης και του προορισμού κόμβοι είναι πιο περίπλοκος και απαιτεί ένα ανεκτικό σύστημα δρομολόγησης. Στην περίπτωση των μικρών γεφυρών χρησιμοποιείται ένα ad-hoc network.

Οι μετρήσεις μέσω του δικτύου συλλέγονται σε μια μονάδα συλλογής δεδομένων όπου με βάση τους αλγόριθμους που έχουν ετοιμαστεί από πριν τα δεδομένα επεξεργάζονται και έπειτα εντοπίζουν τις αδυναμίες. Επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται και στο κόμβο αισθητήρων και περιλαμβάνει την απομάκρυνση του θορύβου, την ενίσχυση του σήματος και άλλες διαδικασίες αυτού του είδους. Αφού στη συνέχεια σταλούν στο συλλέκτη φαίνεται σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις των κόμβων σε γραφική παράσταση. Με κατάλληλη επεξεργασία, μέσω των αλγορίθμων οι μετρήσεις αποκτούν σημαντικότητα ως προς τη εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για αναβάθμιση των αναλυτικών μοντέλων και άλλων μοντέλων για εκτίμηση άλλων μεγεθών όπως είναι η απομένουσα αντοχή λόγω κόπωσης.

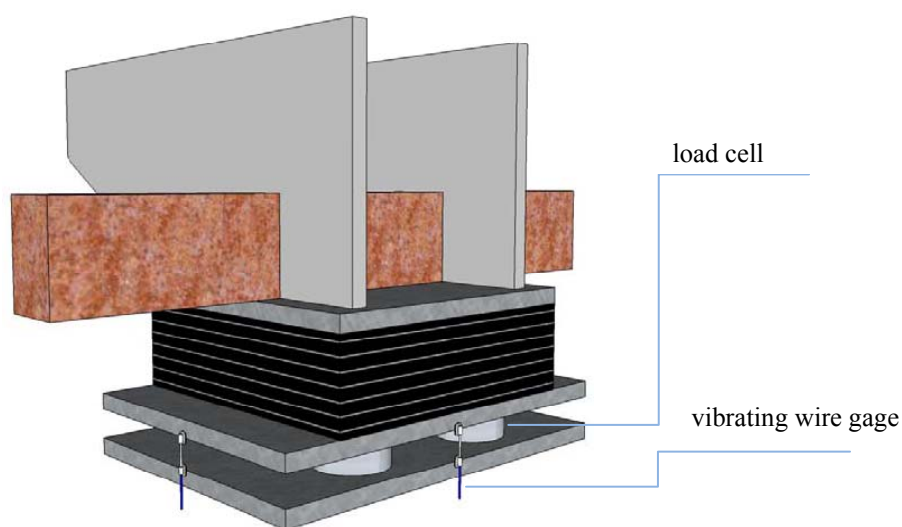
3.3.5 Εφαρμογές

Όπως έχει λεχτεί το σύστημα παρακολούθησης υγείας κατασκευής χρησιμοποιείται για μέτρηση παραμέτρων που μεταβάλλονται οι τιμές τους με την πάροδο του χρόνου. Πιο κάτω αναφέρονται ορισμένες εφαρμογές τους: η παρακολούθηση ρωγμής σε σκυρόδεμα λόγω κόπωσης, φθοράς των εφένδρανων, συμπεριφοράς μεταλλικής ένωσης σε δοκό, φθοράς σε επιφάνεια μεταλλικής δοκού και της διάβρωσης οπλισμού και ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα.

Για τον προσδιορισμό του πάχους της ρωγμής γίνεται μέσω των fiber optic αισθητήρων στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Leung C. κ.α.) και με AE αισθητήρες ή όπως αναφέρει η πηγή (Chase S.) με ένα καινοτόμο αισθητήρα το λεγόμενο fatigue measurement sensor να τοποθετείται στη ρωγμή και να υπολογίζει το άνοιγμά της. Για την παρακολούθηση των αδυναμιών στα εφένδρανα γίνεται με την τοποθέτηση Multi-axis fiber optic strain sensors (Chase S.) στα εφένδρανα για να αισθάνονται τις

αδυναμίες που συμβαίνουν στη γέφυρα αφού οποιαδήποτε αδυναμία επηρεάζεται άμεσα το συγκεκριμένο σημείο.

Στη γέφυρα Burlington-Bristol Bridge (Dubbs N. κ.α.) εφαρμόστηκε ένα ΑΔΑ για την παρακολούθηση των δεκατεσσάρων εφέδρων που αντικατάστησαν τα προηγούμενα λόγω φθοράς. Σκοπός είναι η παρακολούθηση των μόνιμων και κινητών φορτίων που ασκούνται στο κατάστρωμα και τις επιπτώσεις στα εφέδρανα από το περιβάλλον, κυρίως από τη μεταβολή της θερμοκρασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιήθηκε η load cell sensing technology. Τα load cell εφέδρανα τοποθετήθηκαν στα δύο κύρια ανοίγματα. Σε κάθε εφέδρανο υπάρχουν 5 load cells τοποθετημένα συμμετρικά και 4 vibrating wire gages όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6.1. Στο σύνολο της γέφυρας υπάρχουν 70 load cells και 56 vibrating wire gages.



Σχήμα 3.6.1 Τοποθέτηση αισθητήρων στα εφέδρανα (Dubbs N. κ.α.)

Στη γέφυρα Hafez-Taleghani Fly-over στη Tehran (Kashefi K. κ.α.) είναι μια μεταλλική γέφυρα με 31-simple spans και ορθοτροπικό κατάστρωμα. Φαίνεται η διαφορά εκτίμησης των αναλυτικών μοντέλων που οφείλεται στις παραδοχές που γίνονται και στα φορτία που λαμβάνονται τα σχεδιαστικά και όχι τα πραγματικά. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός της απομένουσα αντοχής σε κόπωση για να αποφασιστεί εάν μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί και να το συγκρίνει με την τιμή που προκύπτει από την αναλυτική ανάλυση από το Iranian Standards No. 139 που λέει ότι δεν είναι ικανή να λειτουργεί στο μέλλον. Λόγω του ότι η διατομή της μεταλλικής δοκού είναι αντίστροφο T με σύνδεση από ήλους και πύρους αναπτύσσονται μέγιστες τάσεις λόγω φορτίων κυκλοφορίας στις κάτω φλάντζες στο κέντρο της δοκού. Αποτέλεσμα είναι η πρόκληση οριζόντιων ρωγμών στο κορμό ή στη σύνδεση κορμού-φλάντζας και οριζόντιες ή κατακόρυφες ρωγμές στις ενώσεις κορμού και πλάκα συγκόλλησης λόγω κόπωσης. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο κρισιμότερο άνοιγμα για σκοπούς οικονομίας που είναι στο τέταρτο άνοιγμα από το βορρά. Οι αισθητήρες είναι δύο αισθητήρες παραμόρφωσης στη κάτω φλάντζα στο μέσο κάθε δοκού 500mm μακριά από τα splices και η συχνότητα δειγματοληψίας

είναι 1 ανά 0.125 δευτερόλεπτα σε μια βδομάδα κάτω από κανονική τροχαία κίνηση. Μέσα από ανάλυση των μετρήσεων, προσπαθεί να εκτιμηθεί η αντοχή σε κόπωση με των S-N curves. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι κύριες δοκοί έχουν άπειρη αντοχή σε κόπωση σύμφωνα με το AASHTO 1990 και τις ενεργείς τάσεις 31.6 MPa και 28.4 MPa αντίστοιχα για τις κύριες δοκούς 3 και 4 με αξιοπιστία (R_s) 1.75 έτσι ώστε $R_s * S_{re} < CAFL$ (=110 MPa).

Στη γέφυρα Birmingham Bridge στη Pittsburgh, Pennsylvania και κατασκευάστηκε το 1976. (Kwon K. & Frangopol D.) Η εφαρμογή του ΑΔΑ είχε σκοπό την εύρεση του βέλτιστου τρόπου για κοπή της αδύναμης περιοχής της φλάντζας μεταλλικής δοκού και εκτίμηση της αξιοπιστίας της κόπωσης με εφαρμογή αισθητήρων παραμόρφωσης για λήψη μετρήσεων και συνδυασμό ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Οι εγκάρσιοι δοκοί έχουν μεταξύ τους απόσταση 9.45m και ύψος 2.84m. Το 2002 εντοπίστηκαν ρωγμές λόγω κόπωσης στις εγκάρσιες δοκούς στις ενώσεις με τα girders και η αιτία ήταν οι σχετικές διαμήκης μετακινήσεις της γέφυρας μεταξύ του καταστρώματος και του girder με αποτέλεσμα τις μετακινήσεις εκτός επιπέδου στο κορμό πάνω από τις γωνίες των ενώσεων γιατί οι φλάντζες δεν ήταν απευθείας ενωμένες με το girder. Για αν αποφασιστεί η επιφάνεια που θα αποκοπεί από τη φλάντζα τέθηκε ένα ασύρματο δίκτυο με τρεις αισθητήρες παραμόρφωσης σε τρεις θέσεις ώστε να περιβάλλουν την αδύναμη επιφάνεια στην άκρη της φλάντζας. Έπειτα οι παραμορφώσεις με τη βοήθεια του Finite Element Analysis έγινε η κατανομή των τάσεων και αποφασίστηκε εμβαδόν της περιοχής.

Στη υπό κατασκευή γέφυρα Qingdao Bay Bridge στο Qingdao, Shandong Province, Κίνα (Shao X. κ.α.) πρόκειται να τοποθετηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης της διάβρωσης για το καθορισμό των αιτιών πρόκλησης της διάβρωσης (υγρασία και αντίσταση του σκυροδέματος) και τη περιγραφή της διάβρωσης του οπλισμού (οριακές τιμές των de-passivation, potential difference, polarization resistance) ώστε να μην υπάρχει περιθώριο μείωσης αντοχής. Κατασκευαστικά έχει μήκος 28,047 m, διασχίζει θάλασσα και αποτελείται από μία σειρά γεφυρών. Για αυτό, τοποθετήθηκαν αισθητήρες στον οπλισμό του σκυροδέματος με τρεις τρόπους, το Anode Ladder System, το Expansion Ring System και το the Embedded Corrosion Instrument (Type ECI-1) που αναγράφονται αναλυτικά στη πηγή.



Σχήμα 3.6.2 Διάταξη συστήματος Anode Ladder System (Shao X. κ.α.)

Παράδειγμα για δυναμική ανάλυση γέφυρας είναι η γέφυρα Ghi-Lu Bridge στη Nantou County, Taiwan μια μεγάλου ανοίγματος καλωδιαστή γέφυρα που λόγω των ζημιών που προκλήθηκαν από το σεισμό Chi-Chi earthquake το 1999 επισκευάστηκαν και τέθηκε σε παρακολούθηση για την συμπεριφορά της μέσα από την παρακολούθηση των ταχυτήτων που αναπτύσσονται κατά τη δοκιμή της περιβάλλουσας δύναμης. Χρησιμοποιήθηκαν 12 ασύρματοι αισθητήρες ταχύτητας με τέσσερα κανάλια και υψηλής ποιότητας μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού σήματος, υψηλής ευαισθησίας transducers, ένας φορητός υπολογιστής για λήψη των μετρήσεων. Λαμβάνονταν 100 μετρήσεις το δευτερόλεπτο σε κάθε κανάλι και ήταν συγχρονισμένες οι χρονοσειρές. Η αυτόνομη μέθοδος επεξεργασίας SSI χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς. Η παρακολούθηση έγινε για τρία διαφορετικά σενάρια (Weng J. κ.α.). Ανάλογη μεθοδολογία ακολουθείται για εντοπισμό αδυναμίας σε μεταλλική girder γέφυρα σε μεγάλου μήκους γέφυρα (Lee J. & Yun C.) με τη διαφορά της εφαρμογής της FFD μεθόδου για εξαγωγή των χαρακτηριστικών της ιδιομορφής και της χρήσης των κατακόρυφων επιταχύνσεων αντί της ταχύτητας. Από το πείραμα βγήκε ένα σημαντικό συμπέρασμα, ότι ο εντοπισμός του/των αδύναμου/ων μέλους/ών πραγματοποιούταν μόνο όταν επιλέγονταν αυτά ως τα αρχικά υπο εξέταση μέλη και ταυτόχρονα υπήρχαν αυξημένα σφάλματα λόγω του θορύβου που είναι μεγάλο μειονέκτημα. Ένα άλλο συμπέρασμα είναι το μήκος της χρονοσειράς που πρέπει να είναι μεγάλο για καλύτερα αποτελέσματα.

3.4 Αβεβαιότητα των μεθόδων

Όσο αφορά τις μη-καταστροφικές μεθόδους περιλαμβάνουν αβεβαιότητες οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, για αυτό και τα αποτελέσματα των μετρήσεων επεξεργάζονται με μοντέλα πιθανοτήτων για να εκτιμηθεί η αξιοπιστία τους. Η οπτική επιθεώρηση περιλαμβάνει περισσότερη αβεβαιότητα από τις άλλες μεθόδους. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την υγεία της κατασκευής, δηλαδή

εάν έχει περισσότερες ή λιγότερες φθορές, ποια σημεία ή μέλη έχουν φθαρεί, η ηλικία της, το περιβάλλον που βρίσκεται, δηλαδή η υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα, η ευαισθησία του οργάνου μέτρησης, οι ατέλειες των υλικών που χρησιμοποιηθήκαν καθώς και την εμπειρία του επιθεωρητή. Επομένως εάν παραμεληθούν τα πιο πάνω τότε τα αποτελέσματα θα έχουν σφάλμα και οι αποφάσεις για συντήρηση δεν θα στηρίζονται σε ακριβή δεδομένα.

Είναι σημαντικό να προσδιορίζεται η ποιότητα των μετρήσεων της κάθε μη-καταστροφικής μεθόδου για να εκλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος ανά περίπτωση. Η ποιότητα προσδιορίζεται από την πιθανότητα εντοπισμού, που είναι η πιο κύρια παράμετρος για την ακρίβεια της μέτρησης και λαμβάνεται υπόψη όταν η αξιοπιστία των επιθεωρημένου στοιχείου αναβαθμίζεται από τις τιμές της επιθεώρησης (Opoufiriou T. & Frangopol D., Zheng R. & Enningwood B.) μέσα από τα μοντέλα βελτιστοποίησης στηριγμένα στην αξιοπιστία της επιθεώρησης. Τα μοντέλα αυτά έχουν δύο στοιχεία, το πιθανολογικό μοντέλο επιδείνωσης και την αναβάθμιση μέσω της αξιοπιστίας.

Τα δεδομένα των μετρήσεων εισάγονται στα αναλυτικά μοντέλα της κατασκευής για λήψη απόφασης σχετικά με τη συντήρηση και την επιδιόρθωση πετυχαίνοντας την καλύτερη διαχείριση της γέφυρας μέσω των προσεγγίσεων των πιθανοτήτων. Οι επιθεωρήσεις δίνουν πληροφορίες για την λειτουργία της κατασκευής, δηλαδή πόση είναι η αντοχή της. Για παράδειγμα, έστω ότι μια μεταλλική ράβδος έχει διαγνωστεί με ρωγμή λόγω κόπωσης και το μετρούμενο μέγεθος είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο μέγεθος τότε θα πρέπει να επισκευαστεί/αντικατασταθεί (Zheng R. Et Ellingwood B. R.). Αν όμως η ράβδος έχει διαγνωστεί και είναι κάτω από το κρίσιμο μέγεθος ή δεν έχει διαγνωστεί τότε η απόφαση για συνέχιση της λειτουργίας της θα εξαρτηθεί από τις αβεβαιότητες της μέτρησης και της συνάρτησης πυκνότητας του μεγέθους και της επιθεώρησης. Όπως σχολιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου σημαντικό ρόλο έχει και η ακρίβεια του οργάνου. Γιατί, το όργανο μπορεί να διαγνώσει λανθασμένα ότι έχει υποστεί φθορά.

Λόγου χάριν, έστω μια ράβδος που επιθεωρείται για διάβρωση. Για δύο διαφορετικά όργανα μέτρησης, O1 και O2, τα αντίστοιχα δεδομένα είναι 95% και 99% πιθανότητα να διαγνώσει ορθά την διάβρωση, 20% και 5% πιθανότητα να διαγνώσει λανθασμένα ότι η ράβδος έχει διαβρωθεί και ότι στη συγκεκριμένη επιδεινούμενη γέφυρα η πιθανότητα διάβρωσης είναι 30% (κακή γέφυρα). Τα δεδομένα φαίνονται στον Πίνακα 3.4.1. Εάν τώρα πρόκειται για μια γέφυρα με πιθανότητα διάβρωσης 10% τότε τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4.2 (Ταντελέ Ε. 2011).

<i>Όργανο μέτρησης</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν διαβρωμένη</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να μην διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν διαβρωμένη</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν μη-διαβρωμένη</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να μην διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν μη-διαβρωμένη</i>
<i>O1: λιγότερης ακρίβειας</i>	0,345	0,655	0,007	0,993
<i>O2: περισσότερης ακρίβειας</i>	0,688	0,312	0,001	0,999

Πίνακας 3.4.1 Ακρίβεια οργάνου μέτρησης σε γέφυρα 30% πιθανότητα διάβρωσης

<i>Όργανο μέτρησης</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν διαβρωμένη</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να μην διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν διαβρωμένη</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν μη-διαβρωμένη</i>	<i>Πιθανότητα της ράβδου να μην διαβρώνεται δεδομένου ότι έχει διαγνωστεί σαν μη-διαβρωμένη</i>
<i>O1: λιγότερης ακρίβειας</i>	0,671	0,329	0,026	0,974
<i>O2: περισσότερης ακρίβειας</i>	0,895	0,105	0,004	0,996

Πίνακας 3.4.2 Ακρίβεια οργάνου μέτρησης σε γέφυρα 10% πιθανότητα διάβρωσης

Στα συστήματα παρακολούθησης της υγείας της υποδομής, η έννοια αβεβαιότητα υπάρχει σε όλα τα βήματα λειτουργίας του, από τη λήψη μέτρησης μέχρι τους αλγόριθμους επεξεργασίας. Για ακριβή μέτρηση, πρέπει ο αισθητήρας να επιλέγεται αυστηρά ως προς τα χαρακτηριστικά του γιατί ως συσκευή είναι ευαίσθητη. Το ίδιο συμβαίνει και με το κόμβο αισθητήρας όπου τα χαρακτηριστικά των καναλιών πρέπει να επιλεγούν με μεγάλη προσοχή γιατί θα καθορίσει την ποσότητα και ποιότητα των μετρήσεων που θα στέλλονται στη μονάδα συλλογής. Από πλευράς επικοινωνίας, η τοποθέτηση των ασύρματων αισθητήρων είναι σημαντική τόσο για την πρόσβαση συντηρητή για αλλαγή πηγής ενέργειας όσο και

για να μεταφέρονται τα δεδομένα τηρώντας το θέμα της γρήγορης και ασφαλούς μετάδοσής τους χωρίς σπατάλη ενέργειας.

3.5 Συζήτηση

Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι και τα συστήματα συνεχούς παρακολούθησης της γέφυρας εξελίσσονται με ραγδαίο ρυθμό. Η εμφάνισή τους οφείλεται στην ανάγκη για μείωση της αβεβαιότητας των κατασκευών, δηλαδή την ανάγκη να γνωρίζει ο μηχανικός την κατάσταση της γέφυρας κατά την διάρκεια ζωής της. Η εδραίωση και η ολοκληρωτική χρήση σε μεγάλο ανοίγματος γέφυρας φανερώσει τη πλεονεκτική τους θέση έναντι των άλλων συμβατικών μεθόδων και που πλέον άρχισε να εφαρμόζονται σε μικρότερο βαθμό στις υπόλοιπες γέφυρες. Βάση των προηγούμενων στοιχείων, οι μη-καταστροφικές μέθοδοι αποτελούν εργαλείο της κύριας επιθεώρησης. Σε μεγάλο ανοίγματος γέφυρες είναι δεδομένο ότι χρησιμοποιούνται. Στις πιο μικρές γέφυρες, αναλόγως της σπουδαιότητάς τους, εάν αποτελούν μέρος ενός συστήματος γεφυρών ή όχι και το κόστος που διατίθεται θα χρησιμοποιηθούν ανάλογα γιατί πρόκειται για μεθόδους που κοστίζουν. Αυτό που είναι δυνατό να συμβαίνει είναι να χρησιμοποιείται μια μη-καταστροφική μέθοδος για εξοικονόμηση χρημάτων.

Τα συστήματα παρακολούθησης εφαρμόζονται ως απευθείας μέθοδοι που οι παράμετροι ή τα γεγονότα παρακολουθούνται απευθείας και δίνουν τιμές ή κατάσταση και οι έμμεσοι μέθοδοι που η παράμετρος που παρακολουθείται είναι τουλάχιστον μια και χρησιμοποιώντας ορισμένες σχέσεις (μαθηματικές και φυσικές) υπολογίζονται τιμές που είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα. Το κόστος είναι υψηλό για αυτό και προτιμάται να χρησιμοποιούνται για ορισμένο χρονικό διάστημα στη γέφυρα ίσως για περισσότερο της μιας φοράς παρά να είναι μόνιμο για όλη τη διάρκεια ζωής της γέφυρας. Το κόστος δεν αφορά μόνο την εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος αλλά και το κόστος επεξεργασίας των δεδομένων λόγω της πληθώρας μετρήσεων. Το πρόβλημα μεγαλώνει όταν γίνεται προσπάθεια καθορισμού συσχέτισης ή όχι των μεταβλητών. Για αυτό το λόγο οι παράμετροι που μετρούνται επιλέγονται με μεγάλη προσοχή ώστε να μην υπερφορτώνουν το δίκτυο με περιττά στοιχεία και να προκαλείται καθυστέρηση και οι υπολογιστικές απαιτήσεις να είναι μεγαλύτερες. Όπως και στις εφαρμογές που αναλύθηκαν, το σύστημα παρακολούθησης παρακολουθεί παραμέτρους εξαρτώμενους του χρόνου.

Για τις πιθανές θέσεις που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες, ο μηχανικός να κάνει μια εκτίμηση από την πείρα του τα κρίσιμα σημεία σε μια γέφυρα. Για παράδειγμα, η διάβρωση σε οπλισμένο σκυρόδεμα θα συμβεί στους κόμβους του καταστρώματος, δηλαδή στα εφένδρανα και στους αρμούς, λόγω φτωχής προστασίας από το νερό και κατά μήκος της δοκού όταν υπάρχουν ήδη ρωγμές. Η διάβρωση σε προεντεταμένο σκυρόδεμα θα προκληθεί στα σημεία που δεν έχουν προστασία από τα ιόντα χλωρίου όπως είναι οι αγκυρώσεις λόγω έλξης νερού λόγω των κόμβων, οι κόμβοι μεταξύ των κομματιών του καταστρώματος που πιθανών να μην έχουν προστασία έναντι του νερού, τα άνω και κάτω σημεία των οπών ducks που πλησιάζουν την επιφάνεια του

σκυροδέματος. Επιπλέον, ο μηχανικός πρέπει να βρει την βέλτιστη θέση του αισθητήρα, από τη σκοπιά της φυσικής σημασίας της μέτρησης στους υπολογισμούς του, στη γέφυρα για να πάρει τις αναγκαίες μετρήσεις. Η εκλογή στηρίζεται στις απαιτήσεις του έργου του.

Η μεταβολή του χρόνου που έχει μεγάλη σημασία σε τέτοιου είδους κατασκευές τώρα μπορεί να περιοριστεί. Η παρακολούθηση σε μια ανεγειρόμενη κατασκευή, σε μια νεαρή κατασκευή ή σε μια ηλικιωμένη είναι εξίσου σημαντική. Εφαρμόζονται ευρέως μετά την συντήρηση, επισκευή ή αντικατάσταση όταν πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι ανθρώπινες επεμβάσεις είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αποτελεί επίσης το μαγικό ραβδί για καθορισμό της αιτίας όταν συμβεί μια αστοχία στην κατασκευή κατά την λειτουργία της που δεν προκλήθηκε από καθορισμένη δράση. Η μη-καταστροφική μέθοδος δεν μπορεί να την προσδιορίσει παρά μόνο να εκτιμήσει την κατάσταση της γέφυρας λόγω της αστοχίας. Ένα άλλο συχνό φαινόμενο είναι οι κατασκευές που χρησιμοποιούν καινοτόμα υλικά και τεχνικές, ή βρίσκονται σε ένα περιβάλλον που ο κίνδυνος είναι μεγάλος, όπως η γέφυρα Ρίο-Αντίριο που είναι πάνω από ρήγμα γιατί είναι επιτακτική ανάγκη η παρακολούθηση της αντίδρασής τους στο πραγματικό περιβάλλον και φορτία.

4. Λήψη απόφασης

Η Διαχείριση της γέφυρας ή του συστήματος γεφυρών περιλαμβάνει μια σειρά ενεργειών για να διατηρηθεί ο σκοπός σχεδιασμού της γέφυρας μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής της. Η γέφυρα είναι εκτεθειμένη στο περιβάλλον και δέχεται επιδράσεις από αυτό καθώς και από ανθρώπινες επιδράσεις. Όταν για αυτούς του λόγους μειωθεί ο δείκτης αξιοπιστίας πρέπει να γίνουν ορισμένες ενέργειες συντήρησης για να αυξηθεί στο επιθυμητό βαθμό. Ο δείκτης αξιοπιστίας εξαρτάται από τη σπουδαιότητα της γέφυρας και κατ'επέκταση το μέγεθος, το υλικό, τα φορτία, την τοποθεσία και το σκοπό λειτουργίας. Σήμερα, η λήψη απόφασης στηρίζεται στο συνολικό κόστος ζωής και στην απόδοση της κατασκευής με την εισαγωγή του όρου «Βελτιστοποίηση της Διαχείρισης γεφυρών ή συστήματος γεφυρών» και λαμβάνεται μέσα από στοχαστικά μοντέλα βασισμένα στην αξιοπιστία. Μαζί με τις μετρήσεις των ευφών συστημάτων παρακολούθησης, η συντήρηση μετατρέπεται από αντιδραστική σε προληπτική για θέματα επιδείνωσης και κόπωσης.

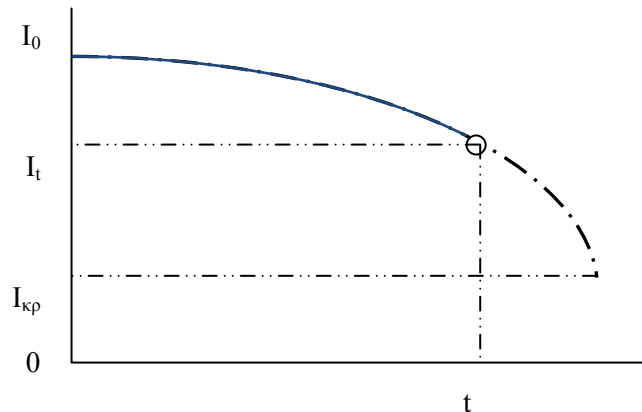
4.1 Κύκλος ζωής και συνολικό κόστος ζωής

Η απόδοση της υποδομής επηρεάζεται άμεσα από το χρόνο, το είδος, τον αριθμό και τον χρόνο εφαρμογής των ενεργειών συντήρησης. Είναι απαραίτητο να αξιολογείται η απόδοση της κατασκευής σε όλα τα χρόνια ζωής της ώστε να γίνεται έλεγχος της απόδοσης. Εάν κριθεί απαραίτητο θα πραγματοποιηθούν ενέργειες συντήρησης σε προληπτικό ή αντιδραστικό σχέδιο δράσης για κάλυψη των σημερινών και μελλοντικών αναγκών της γέφυρας. Για εκτίμηση της απόδοσης χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της επιθεώρησης. Η επεξεργασία τους είναι δύσκολη και χρησιμοποιούνται λογισμικά προσαρμοσμένα στις ανάγκες της κάθε διαχειριστικής ομάδας. Η αξιολόγηση της κατάστασης γίνεται με σύγκριση του μεγέθους με μια κρίσιμη τιμή. Αναλυτικά, τα βήματα αξιολόγησης της απόδοσης είναι τα εξής (Field Trials Draft):

1. Αξιολόγηση της γέφυρας
2. Καθορισμός της αρχικής απόδοσης, I_0 κατά το στάδιο του σχεδιασμού
3. Καθορισμός της απόδοσης την παρούσα χρονική στιγμή, I_1 από τις τιμές της επιθεώρησης, την κατάσταση του μέλους και την αντοχή του
4. Καθορισμός της κρίσιμης απόδοσης, $I_{κρ}$
5. Καθορισμός της μορφής της απόδοσης σε όλο το κύκλο ζωής
6. Έλεγχος της απόδοσης για κάθε χρονική στιγμή εάν είναι μικρότερη της $I_{κρ}$.
 - a. Εάν είναι μικρότερη πρέπει να γίνει επιδιόρθωση για να ανεβεί η απόδοση πάνω από την κρίσιμη τιμή
 - b. Εάν είναι λίγο μεγαλύτερη από την $I_{κρ}$ να γίνουν ενέργειες συντήρησης για αύξηση της απόδοσης και αποτροπή άμεσης πτώσης
 - c. Εάν είναι αρκετά μεγαλύτερη από την $I_{κρ}$ δεν γίνεται τίποτα.

7. Υπολογισμός της παρούσας αξίας της εργασίας για κάθε μέλος περιλαμβάνοντας το κόστος εργασίας και το κόστος κυκλοφοριακής καθυστέρησης
8. Ετοιμασία έκθεσης αναφέροντας και σημεία που πιθανών να χρειαστούν αύξηση απόδοσης στο μέλλον.

Η μορφή της απόδοσης φαίνεται στο σχήμα 4.1.1.



Σχήμα 4.1.1 Απόδοση της κατασκευής (Field Trials Draft)

Ο δείκτης αξιοπιστίας είναι ένα ακόμα ποσοτικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κατάστασης της υποδομής και ακολουθεί την μορφή της απόδοσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.2 (Noortwijk J. & Frangopol Dan, Fig.8) όταν δεν γίνει επέμβαση στη γέφυρα, ο δείκτης αξιοπιστίας μειώνεται εκθετικά και περνά κάτω από το κατώτατο όριο (σχήμα 4.1.2 E0), όταν γίνει προληπτική συντήρηση (σχήμα 4.1.2 E0,P), που θα γίνει όταν ο δείκτης αξιοπιστίας είναι πιο κάτω από τον αρχικό και πιο πάνω από τον κατώτατο, αυξάνεται και μετά μειώνεται πάλι εκθετικά και όταν θα γίνει στοιχειώδη συντήρηση όταν ο δείκτης αξιοπιστίας πλησιάσει το κατώτατο όριο (σχήμα 4.1.2 E1), συμβαίνει το ίδιο. Στην πραγματικότητα στο κύκλο ζωής της γέφυρας ο δείκτης αξιοπιστίας μεταβάλλεται συνεχώς αφήνοντας να αυξηθεί ελαφρώς με μικρές προληπτικές συντηρήσεις και να αυξάνεται ραγδαία με μια στοιχειώδη συντήρηση (σχήμα 4.1.2 E1,P). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Να σημειωθεί ότι οι πιο πάνω καταστάσεις δεν έχουν περιγραφεί μέχρι στιγμής με εξίσωση λόγω περιπλοκότητας και επιρροής πολλών παραμέτρων.

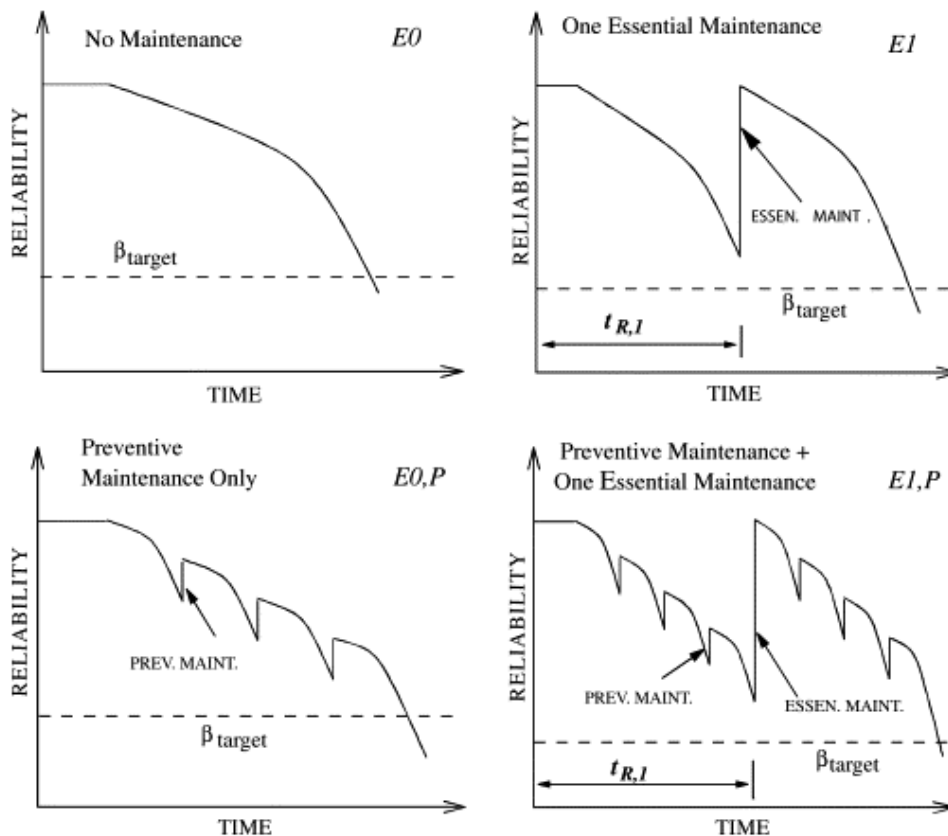


Fig. 8. Reliability profiles associated with different maintenance scenarios.

Σχήμα 4.1.2 Μεταβολή δείκτης αξιοπιστίας στο χρόνο χωρίς συντήρηση (E0), με στοιχειώδη συντήρηση (E1), με προληπτική συντήρηση (E0,P) και με συνδυασμό (E1,P) (Noortwijk J. & Frangopol Dan, Fig. 8)

Για τη λήψη απόφασης είναι απαραίτητη η γνώση του κόστους της κάθε ενέργειας και των επιπτώσεων που θα έχει στο κόστος ολόκληρου του κύκλου ζωής. Γίνεται με αυτό τον τρόπο, αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων και συγκρίνονται μεταξύ τους. Οι εναλλακτικές λύσεις πρέπει, ταυτόχρονα, να ικανοποιούν τα θέματα απόδοσης της κατασκευής. Το συνολικό κόστος ζωής C_{PV} , γίνεται για καινούργιες και υφιστάμενες κατασκευές και σε γενικές γραμμές προσδιορίζεται από τις ακόλουθες κατηγορίες κόστους: το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής C_i , το κόστος επιθεώρησης C_{ins} , το κόστος συντήρησης C_{maint} , το κόστος επισκευής C_{rep} , το κόστος αντικατάστασης C_{repl} και το κόστος αστοχίας C_f . Η κάθε κατηγορία υποδιαιρείται σε άλλα μικρότερα ποσά. Το κόστος της κάθε ενέργειας συντήρησης αποτελεί ένα από τα δύο κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών επιλογών. Το κάθε κόστος μετατρέπεται σε κόστος με παρούσα αξία με τη χρήση του προεξοφλητικού επιτοκίου. Οι παράγοντες επιρροής είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο και η διάρκεια ζωής της γέφυρας t_i . Το προεξοφλητικό επιτόκιο ορίζεται από την Κεντρική Τράπεζα κάθε χώρας και εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση σε τοπικό και διεθνές επίπεδο και τη σχεδιαστική ζωή της γέφυρας που είναι σήμερα 120 χρόνια. Για

μείωση του κόστους προτιμάται μεγάλη τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου για να μειώνεται η παρούσα αξία του κόστους.

$$C_{PV} = C_i + C_{ins} + C_{maint} + C_{rep} + C_{repl} + C_f = \sum_i^j \frac{C_i}{(1+r)^{t_i}}$$

Στο κόστος συντήρησης περιλαμβάνονται, το κόστος της συντήρησης καθώς και το κόστος της αλλαγής δρομολογίου των χρηστών, λόγω της διακοπής λειτουργίας της γέφυρας, το κόστος λόγω καθυστέρησης στο χρόνο ταξιδιού του οδηγού, το κόστος λειτουργίας του οχήματος και το κόστος των καυσίμων. Επομένως είναι σημαντική η διάρκεια των εργασιών στην γέφυρα. Μια εκτίμηση του ποσού έγινε (Singh D. & Tiong R.) έχοντας αναφορά γέφυρες από σπλισμένο σκυρόδεμα στη Myanmar. Η περίοδος ανάλυσης λαμβάνεται ίση με τέσσερα χρόνια και προεξοφλητικό επιτόκιο 8%, ώστε το κόστος μετά τα 40 χρόνια να είναι πολύ χαμηλό. Το παρούσα αξία του συνολικού κόστους είναι το άθροισμα του αρχικού κόστους και του κόστους συντήρησης και επιθεώρησης. Με μια διαφορά τριών βδομάδων στην υλοποίηση του προγράμματος συντήρησης στη γέφυρα (Singh D. & Tiong R.) προκαλείται αύξηση μέχρι και ένα εκατομμύριο δολάρια. Η διαφορά θα ήταν μεγαλύτερη εάν το προεξοφλητικό επιτόκιο ήταν πιο χαμηλό.

Για τον υπολογισμό του κόστους πρέπει να γίνει ανάλυση για κάθε ένα μέλος ξεχωριστά και κατ' επέκταση να ομαδοποιηθούν τα κοινά μέλη και να υπολογίσει το κόστος της κυκλοφοριακής καθυστέρησης. Μελετώντας τώρα το πεδίο της διαχείρισης της γέφυρας, αυτό που πρέπει να μελετηθεί είναι το κόστος επιθεώρησης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης. Για το θέμα της συντήρησης θα εξεταστούν πέραν της μιας εναλλακτικής για να εκλεγεί η οικονομικότερη. Στο Πίνακα 4.1.1 καταγράφονται το κόστος επιδιόρθωσης για μέλη της γέφυρας, για συγκεκριμένες δράσεις (Highway Agency, σελ. 29). Φαίνεται ότι οι μικρές εργασίες όπως η προστασία από το νερό και η αλλαγή των εφένδρων έχουν μικρό κόστος. Άλλες εργασίες επιδιόρθωσης στα μέλη από σκυρόδεμα είναι κατά πολύ πιο φθηνές από την αντικατάστασή του. Συγκεκριμένα η προστασία καθόδου στοιχίζει στο σύνολο £320 και η αντικατάσταση σκυροδέματος £1,940 το τετραγωνικό μέτρο, ενώ η πλήρης αντικατάσταση της δοκού είναι £19,620 το τετραγωνικό μέτρο. Επομένως, η οργανωμένη προληπτική δράση είναι οικονομικά συμφέρουσα, πέραν του ότι μειώνεται η πιθανότητα η απόδοση της υποδομής να είναι μικρότερη της κρίσιμης απόδοσης.

Επιδιόρθωση	Μονάδα μέτρησης	Μέση τιμή κόστους (£)
<i>Επισκευή στηθαίων</i>	m	100
<i>Κόμβοι</i>	m	150
<i>Επιφάνεια</i>	m ²	25
<i>Προστατευτικά νερού</i>	m ²	25
<i>Βαφή</i>	m ²	40
<i>Εφέδρανα</i>	A/A	130
<i>Επισκευή τοιχοποιίας</i>	m ²	10
Σκυρόδεμα		
<i>Γενική προσθήκη σκυροδέματος</i>	m ²	300
<i>Επισκευή πλάκας</i>	m ²	395
<i>Επισκευή πυλώνων</i>	m ²	340
<i>Αντικατάσταση σκυροδέματος</i>	m ²	1940
Προστασία καθόδου		
<i>Εγκατάσταση</i>	m ²	185
<i>Συντήρηση ανόδων</i>	m ²	80
<i>Παρακολούθηση</i>	m ²	50
<i>Σιλάνιο</i>	m ²	5
Αντικατάσταση σκυροδέματος δοκού		
<i>Αντικατάσταση</i>	m ³	2870
<i>Προσωρινές στηρίξεις</i>	m	16750

Πίνακας 4.1.1 Κόστος επιδιόρθωσης και συντήρησης για μέλη της γέφυρας λαμβάνοντας τιμές του έτους 1999 (Highway Agency, σελ. 29)

4.2 Τρόποι λήψης απόφασης

Μέχρι την προηγούμενη δεκαετία, το κριτήριο αξιολόγησης των εναλλακτικών επιλογών ήταν ένα, το συνολικό κόστος ζωής. Γινόταν εκτίμηση του και επιλεγόταν η φθηνότερη λύση. Παλιότερα, η επιλογή του κόστους επικεντρωνόταν στο κόστος κάθε ενέργειας χωρίς να συνυπολογίζονται οι επιπτώσεις της κάθε ενέργειας στη μελλοντική απόδοσή της. Σήμερα, λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας και της διαχείρισης των οικονομικών, η απόφαση στηρίζεται στο συνολικό κόστος ζωής και στην απόδοση της γέφυρας με δυνατότητα πρόβλεψης της απόδοσης στο μέλλον. Επιπρόσθετα, η συντήρηση παίρνει τη μορφή της πρόληψης για θέματα επιδείνωσης και κόπωσης.

Για την λήψη απόφασης, χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα εκτίμησης της συμπεριφοράς της γέφυρας και πρόβλεψης του χρόνου αστοχίας σε τοπικό επίπεδο ή σε ολόκληρο το φορέα της γέφυρας. Κύριος σκοπός των μοντέλων είναι να αξιολογήσουν την αξιοπιστία του στοιχείου ή της κατασκευής, να περιγράψουν τα στάδια της υποβάθμισης με τη χρήση πιθανοτήτων, καθώς και να αναπτύξουν συναρτήσεις πρόβλεψης βασικών παραμέτρων, όπως είναι ο δείκτης αξιοπιστίας, και να βελτιστοποιηθεί η στρατηγική συντήρησης. Η χρήση πιθανοτήτων (Frangopol Dan

κ.α.; Eng. Str., Vol. 30, Issue 12, pg. 3644) έχει το πλεονέκτημα να μειώνει την αβεβαιότητα των μεταβλητών, μιας και οι μεταβλητές λαμβάνονται ως τυχαίες, δηλαδή εξ' ορισμού αναγνωρίζουν την αβεβαιότητα και την ποσοτικοποιούν. Τα δεδομένα των μοντέλων λαμβάνονται από την επιθεώρηση, κυρίως από τα συνεχή συστήματα παρακολούθησης (Strauss A. κ.α.), επειδή η τιμή των παραμέτρων μεταβάλλεται με το χρόνο. Επιπλέον, με την τήρηση αρχείου μετά από κάθε περίοδο παρακολούθησης, το μοντέλο αναβαθμίζεται με την επανεκτίμηση των τιμών των παραμέτρων, δίνοντας καλύτερες εκτιμήσεις. Ενώ, σε μειονεκτική θέση βρίσκονται τα αναλυτικά μοντέλα λόγω της αβεβαιότητας των ντετερμινιστικών μεταβλητών. Τα δεδομένα προκύπτουν συνήθως από τις σχεδιαστικές τιμές των μεγεθών που δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές λόγω κατασκευαστικών λαθών και επιδείνωσης της κατασκευής. Έτσι με μετρήσεις από το πεδίο, με όργανα που δεν θα μειώσουν ή θα μηδενίσουν τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά τους – όπως είναι η μη-καταστροφικές μέθοδοι και οι αισθητήρες – εισάγονται οι πραγματικές τιμές στο μοντέλο.

Υπάρχουν διάφορα είδη πιθανολογικών μοντέλων, αναλόγως του τρόπου λειτουργίας τους. Τα περισσότερα μοντέλα στηρίζονται στην αξιοπιστία, ορισμένα σε γεγονότα και άλλα στη σύμπτωση. Αναλόγως της επεξεργασίας των μεταβλητών διακρίνονται σε στοχαστικά και αναλυτικά. Τα σημερινά μοντέλα είναι κυρίως στοχαστικά, στηρίζονται στην αξιοπιστία, αναλύονται από τον Γενετικό Αλγόριθμο (Okasha N. & Frangopol Dan) και οι μεταβλητές υπολογίζονται με την προσομοίωση Monte Carlo (Noortwijk J. & Frangopol Dan). Αυτά τα μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα με ένα κριτήριο και μοντέλα με πολλά κριτήρια. Στο πρώτο, λόγω περιπλοκότητας των πράξεων, τα περισσότερα μοντέλα (Okasha N. & Frangopol Dan) δέχονται να πραγματοποιούνται διαφορετικά είδη συντήρησης, σε διαφορετικά σημεία πάνω στη γέφυρα την ίδια χρονική διάρκεια και κανένα δεν συμπεριλαμβάνει το πλεονασμό του συστήματος. Ενώ, σε ένα μοντέλο με πολλά κριτήρια, το μοντέλο επιλέγει τις βέλτιστες ενέργειες συντήρησης είτε είναι προληπτική ή στοιχειώδης συντήρηση, σε διαφορετικά σημεία της γέφυρας την ίδια στιγμή.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για θέματα βελτιστοποίησης σε περίπλοκα συστήματα (Okasha N. & Frangopol Dan), όπως αυτά των γεφυρών και ιδιαίτερα για σχεδιασμό μοντέλων σε θέματα επιδείνωσης, όπως για παράδειγμα η περιεκτικότητα ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα. Η λειτουργία στηρίζεται στη γενετική και τη φυσική επιλογή με το πλεονέκτημά του συνδυασμού διακριτών και συνεχών μεταβλητών. Για μείωση των δεδομένων και πιο εύκολη επεξεργασία τους, συνηθίζεται να λαμβάνονται οι ακραίες τιμές παρακολούθησης. Η πιο γνωστή αναβάθμισή των μοντέλων γίνεται μέσω του θεωρήματος του Bayes (Strauss A. κ.α.). Η ποσότητα των δεδομένων παρακολούθησης εξαρτάται από (Frangopol Dan κ.α.; Eng. Str., Vol. 30, Issue 12, pg. 3644) τη συχνότητα μέτρησης, το σύστημα συλλογής δεδομένων, τον αριθμό των αισθητήρων, το φυσικό μέγεθος και την αναμενόμενη διακύμανση του σε χρόνο και χώρο, την προγραμματιζόμενη περίοδο παρακολούθησης και το δημοσιονομικό περιορισμό.

Η περιπλοκότητα των πιθανολογικών μοντέλων είναι μεγάλη, για αυτό ελαχιστοποιούνται, στο εφικτό οι τυχαίες μεταβλητές που είναι αυτές με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, οι οποίες επηρεάζουν την απόκριση της κατασκευής. Οι υπόλοιπες μεταβλητές λαμβάνονται ως ντετερμινιστικές (Biondini F. κ.α). Στο σκυρόδεμα οι συνηθέστερες τυχαίες μεταβλητές είναι η αντοχή του σκυροδέματος, η αντοχή του οπλισμού και τα ιόντα χλωρίου στο σκυρόδεμα, γιατί είναι πιο εύκολα να προσεγγιστούν και να προκύψουν άμεσες μετρήσεις από τη γέφυρα. Στα περισσότερά μοντέλα βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης μέχρι στιγμής, η σχεδιαστική μεταβλητή (Okasha N. & Frangopol D.) είναι ο χρόνος εφαρμογής της προκαθορισμένης δράσης συντήρησης σε ένα μέρος της κατασκευής που είναι καθορισμένα από πριν. Για παράδειγμα, το μοντέλο που εξετάζει την περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου (Tantele E. & Onoufriou T.) σε μέλος από σκυρόδεμα, προτείνει συγκεκριμένες λύσεις συντήρησης στο μέλος, που είχαν προταθεί εξαρχής. Το μοντέλο θα προτείνει τη χρονική στιγμή και το είδος της συντήρησης για αυτό μόνο το κομμάτι.

Για το φαινόμενο της επιδείνωσης της γέφυρας, οι μεταβλητές των μοντέλων είναι ο χρόνος εφαρμογής της συντήρησης και το είδος της συντήρησης ή η περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου (Tantele E. & Onoufriou T.). Ενώ, για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης της γέφυρας και εξαγωγή των ιδιομορφών, ιδιοσυχνοτήτων και απόσβεσης αρκούν μόνο οι μετρήσεις της επιτάχυνσης της γέφυρας, με χρήση των μεθόδων Fourier-based Frequency Domain Decomposition FDD με μέγιστες τιμές και η Stochastic Subspace identification SSI, με την προϋπόθεση ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν κάτω από τη περιβάλλουσα μέθοδο δυναμικού τεστ που δεν επιβάλλεται κανένα εξωτερικό φορτίο (Whelan M. κ.α., Cho S. κ.α.; σελ. 439 και 461, Ren W. & Peng X.) Ο λόγος χρήσης των μεθόδων είναι η εξαγωγή παραμέτρων για υπολογισμό των ιδιομορφών. Στο σχήμα 4.2.1 φαίνονται σχηματικά τα βήματα του μοντέλου βελτιστοποίησης στρατηγικής συντήρησης επιδεινωμένης κατασκευής, στο σχήμα 4.2.2 η αναβάθμιση του προηγούμενου μοντέλου και στο σχήμα 4.2.3 η διαδικασία υπολογισμού της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής.



Σχήμα 4.2.1 Μοντέλο βελτιστοποίησης συντήρησης επιδεινωμένης κατασκευής



Σχήμα 4.2.2 Αναβάθμιση μοντέλου βελτιστοποίησης στρατηγικής συντήρησης επιδεινωμένης κατασκευής



Σχήμα 4.2.3 Υπολογισμός δυναμικής απόκρισης κατασκευής

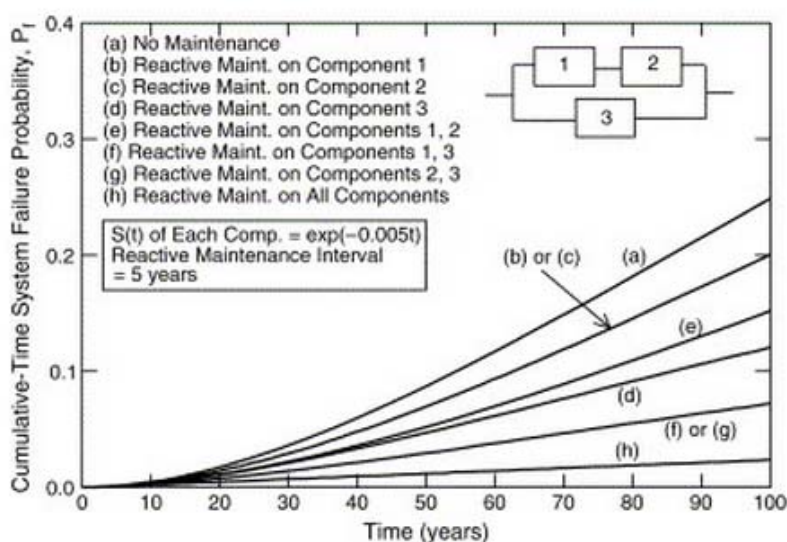
4.3 Αβεβαιότητα στην λήψη απόφασης

Η αβεβαιότητα παρουσιάζεται και σε αυτό το κομμάτι της διαχείρισης γεφυρών. Αβεβαιότητα υπάρχει στο κόστος που αντιστοιχεί σε κάθε δράσει συντήρησης από την άποψη της τιμής του προεξοφλητικού επιτοκίου και του υπολογισμού όλου του κόστους που έχει αυτή η διαδικασία που είναι το κόστος απόφασης της προτεινόμενης λύσης, το κόστος κατασκευής, το κόστος εξοπλισμού και το κόστος των εργαζομένων. Η αβεβαιότητα των εισαγόμενων δεδομένων στο μοντέλο από τις μετρήσεις σχολιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Τα μοντέλα εκτίμησης της κατάστασης και της προτεινόμενης λύσης, έχουν αβεβαιότητες ως προς τις παραδοχές που γίνονται και το προσδιορισμό των συντελεστών των μεταβλητών. Τα μοντέλα που στηρίζονται στις πιθανότητες περιορίζουν την αβεβαιότητα, με τη χρήση κατανομών, όπως είναι η κανονική κατανομή και τυχαίων μεταβλητών. Η μέθοδος επεξεργασίας των μεταβλητών έχει μεγάλη σημασία, ώστε να γίνουν όλοι οι συνδυασμούς. Για αυτό και σε θέματα βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται οι Γενετικοί Αλγόριθμοι.

Επιπρόσθετα, η αβεβαιότητα παρουσιάζεται στον τρόπο προσέγγισης του ζητήματος και οι παραδοχές που θα γίνουν στην ανάλυση. Λόγω δυσκολιών, σε πολλά προβλήματα εξετάζονται μεμονωμένα τα μέλη και χάνεται η έννοια του φορέα. Από την άλλη πλευρά, η δυνατότητα που υπάρχει σήμερα για ανάλυση του φορέα είναι μέσω των δυναμικών χαρακτηριστικών του, που και πάλι υπάρχουν εμπόδια για την αξιοπιστία. Πέραν αυτών, η αβεβαιότητα σχετίζεται και με την συσχέτιση των μελών μεταξύ τους σε ένα σύστημα, εάν τα στοιχεία είναι σε σειρά ή παράλληλα. Πιο συγκεκριμένα, εάν η αστοχία του ενός συνεπάγεται με την αστοχία του συστήματος ή εάν η αστοχία όλων των στοιχείων είναι η αστοχία του συστήματος. Ο καθορισμός αυτού του γεγονότος είναι αρκετά δύσκολος και απαιτεί προσεκτικό έλεγχο. Μία λάθος παραδοχή οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα. Η ανεξαρτησία ή η πλήρως συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων είναι εξίσου σημαντική. Στην πραγματικότητα, η

αληθινή τιμή της συσχέτισης είναι μεταξύ των δύο καταστάσεων της ανεξαρτησίας και της πλήρους συσχέτισης. Για αυτό υπολογίζονται και οι δύο περιπτώσεις και αναμένεται η συσχέτιση να είναι μεταξύ αυτού του διαστήματος.

Η σημασία του συστήματος φαίνεται από το παράδειγμα της (Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196, Fig. 8) στο σχήμα 4.3.1. Είναι ένα μεικτό σύστημα όπου τα στοιχεία 1 και 2 είναι σε σειρά και το 3 παράλληλο των προηγούμενων. Όταν γίνει αντιδραστική προληπτική συντήρηση στο 1 ή στο 2 η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγαλύτερη από το να γίνει στο 3, διατηρώντας της ίδια τάξη μεγέθους. Όταν γίνουν σε δύο στοιχεία, εάν είναι τα στοιχεία 1 και 2 η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγαλύτερη από τα γίνει στα στοιχεία 1 και 3 ή στα στοιχεία 2 και 3. Φυσικά, εάν γίνει συντήρηση και στα τρία στοιχεία τότε η πιθανότητα αστοχίας είναι η μικρότερη. Να σημειωθεί ότι οι τιμές της πιθανότητας αστοχίας για όλους τους συνδυασμούς κυμαίνονται από το 0 μέχρι το 0.25 περίπου.



Σχήμα 4.3.1 Επιρροή συνδυασμών δράσεων σε μεικτό σύστημα μελών (Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196, Fig. 8)

4.4 Κριτήρια λήψης απόφασης

Η σημαντικότητα του προβλήματος θα καθορίσει την αναγκαιότητα για δράση. Ανάλογα του τι καθορίζεται ως αστοχία, κρίνεται η λήψη απόφασης της διαχειριστικής ομάδας. Η ομάδα προσπαθεί να επιλέξει μεταξύ εναλλακτικών λύσεων την βέλτιστη λύση μέσα από κριτήρια τα οποία διαχωρίζονται σε οικονομικά και λειτουργικά. Το κόστος αποτελεί καταλυτικό παράγοντα και για αυτό επιλέγεται η δράση συντήρησης που θα είναι επικερδές στο κύκλο ζωής και όχι αυτό που έχει τα λιγότερα έξοδα κατασκευής, χωρίς να μένουν στο περιθώριο οι οικονομικές επιπτώσεις στην τοπική κοινωνία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η αποτελεσματικότητα της επιλογής είναι εξίσου σημαντική. Πρέπει να επιλέγεται αυτή η στρατηγική συντήρησης που θα αυξήσει την απόδοση για το χρονικό διάστημα που έχει τεθεί ως όριο.

Η αποτελεσματικότητα συνδυάζεται με τον χρόνο εφαρμογής της συντήρησης και της κατάστασης της γέφυρας. Δηλαδή, όταν παρουσιαστεί ένα σημαντικό πρόβλημα αντοχής λίγο πριν τη προγραμματιζόμενη στοιχειώδη συντήρηση τότε η δράση θα είναι διαφορετική από το να παρουσιαστεί μετά την συντήρηση. Ταυτόχρονα αυτό εξαρτάται και από την ηλικία της γέφυρας. Η δράση θα είναι διαφορετική σε γέφυρα ηλικίας τριάντα χρόνων και εξήντα χρόνων. Άλλοι περιορισμοί προέρχονται από τις κλιματολογικές συνθήκες – ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία – που θα επηρεάσει την αποτελεσματικότητα των ενεργειών, τις δυνατότητες του εργατικού δυναμικού, δηλαδή εάν θα πρέπει να επιμορφωθούν ή να έρθει εξειδικευμένο προσωπικό, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής – κοιλάδα, ποτάμι – για το είδος του εξοπλισμού.

4.5 Απαιτήσεις απόφασης

Οι απαιτήσεις της διαχείρισης της γέφυρας είναι η κατασκευή να εκπληρώνει το σκοπό που κατασκευάστηκε κάθε χρονική στιγμή και όταν αυτό δεν γίνεται, να λαμβάνονται μέτρα στα πλαίσια της συντήρησης και επισκευής. Οι απαιτήσεις από τη συντήρηση είναι οι ενέργειες να είναι τέτοιες, ώστε να είναι οικονομικές στο σύνολο της ζωής τους και ταυτόχρονα να είναι αποτελεσματικές. Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης γεφυρών έχει σκοπό μέσα από την ανάλυση κόστους και επικινδυνότητας να ορίσει πότε και πώς θα πραγματοποιηθεί η συντήρηση για κάθε έργο. Με αυτό τον τρόπο, θα περιοριστεί το προκαθορισμένο σχέδιο συντήρησης, που πιθανόν να αναφέρει άσκοπες ενέργειες από πλευράς κόστους και απόδοσης, και να πραγματοποιούνται μόνο οι αναγκαίες ενέργειες στο χρόνο που θα καθοριστεί σκόπιμο σύμφωνα με μετρήσεις της παρούσας κατάστασης της γέφυρας και όχι σενάρια πιθανής μεταβολής, όπως συνέβαινε μέχρι στιγμής. Έτσι, η μορφή της δράσης θα είναι προληπτική και ολοκληρωμένη και όχι αντιδραστική. Ως επακόλουθο είναι αναγκαίο να μειωθεί η αβεβαιότητα στο ελάχιστο δυνατό για την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης δράσης με τρόπους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.3.

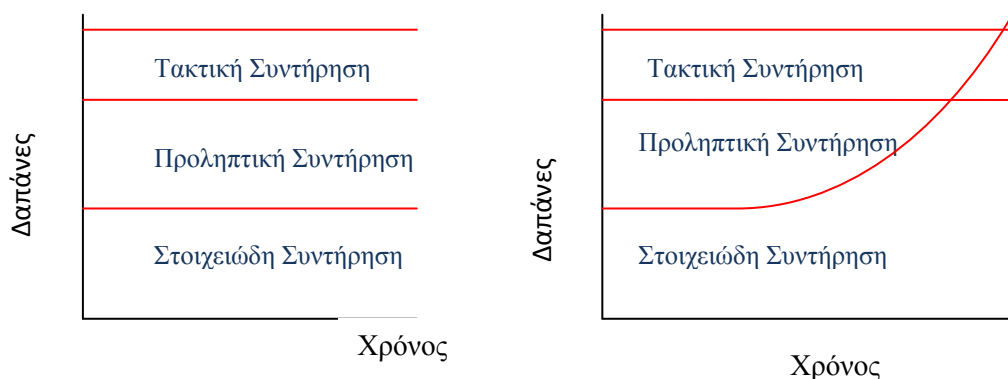
Άλλες απαιτήσεις έχουν να κάνουν με την επίπτωση των ενεργειών συντήρησης στη τοπική κοινωνία. Η γέφυρα δεν μπορεί να είναι κλειστή για μεγάλο χρονικό διάστημα, γιατί θα προκληθεί υπερφόρτιση άλλων οδικών αρτηριών, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση στις μετακινήσεις οχημάτων και μέσω μαζικής μεταφοράς. Ο θόρυβος των εργασιών είναι εξίσου σημαντικός όταν πρόκειται για εργασίες που απαιτούν εξοπλισμό και διεργασίες με υψηλό επίπεδο θορύβου.

4.6 Συντήρηση και Αντικατάσταση

Η συντήρηση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, την προληπτική και την στοιχειώδη συντήρηση (Ταντελέ Ε.; Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196). Ένα άλλο είδος συντήρησης είναι η τακτική συντήρηση (Ταντελέ Ε.; Parke G. & Hawson N.) που αφορά μικρά ζητήματα όπως είναι η κοπή δέντρων κοντά στη γέφυρα που

εμποδίζουν τη λειτουργία της και η απομάκρυνση λίμνης νερού στην επιφάνεια του καταστρώματος. Η προληπτική συντήρηση είναι δύσκολο να καθοριστεί και αυτό που την ξεχωρίζει από την στοιχειώδη είναι ότι εάν δεν υλοποιηθεί, το κόστος για αποκατάσταση της ασφάλειας της γέφυρας θα είναι μεγάλο. Ενώ στη στοιχειώδη συντήρηση περιλαμβάνονται όλες οι αναγκαστικές ενέργειες για να διατηρηθεί η κατασκευή πάνω από το κρίσιμο επίπεδο απόδοσης. Όταν τώρα γίνουν ενέργειες στα πλαίσια της προληπτικής συντήρησης σε στοιχεία της κατασκευής που δεν επιδεινώθηκαν με το χρόνο, ονομάζονται προορατικές και καθυστερούν την εμφάνιση της αδυναμίας σε αυτά, ενώ σε στοιχεία που επιδεινώθηκαν ονομάζονται αντιδραστικές και έχουν ως σκοπό να περιορίσουν ή να μειώσουν τις επιπτώσεις της επιδείνωσης (Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196). Η στοιχειώδη συντήρηση γίνεται στα στοιχεία που αστόχησαν ή είναι κοντά στην αστοχία και έτσι οι ενέργειες περιλαμβάνουν την αντικατάσταση του στοιχείου ή περισσότερων, αναλόγως της ζημιάς με στόχο την επαναφορά της εντατικής κατάστασής στην αρχική.

Ιδανικά, όταν οι διαθέσιμοι πόροι είναι αρκετοί για τη συντήρηση, οι δαπάνες για τα τρία είδη συντήρησης θα έπρεπε να είναι σταθερές για όλα τα χρόνια. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, οι πόροι είναι λιγότεροι, με αποτέλεσμα να απουσιάζουν οι προληπτικές δαπάνες και να αυξάνεται το κόστος της στοιχειώδους συντήρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.1 (Parke G. & Hawson N. σελ. 605-606).



Σχήμα 4.6.1 Προληπτική συντήρηση με ικανοποιητικό κόστος συντήρησης στα αριστερά και μη-ικανοποιητικό κόστος συντήρησης στα δεξιά (Parke G. & Hawson N. σελ. 605-606)

4.6.1 Προληπτική συντήρηση

Η προορατική προληπτική συντήρηση είναι δύσκολο να καθοριστεί και χρειάζεται μεγάλη εμπειρία. Η κάθε τέτοια δράση αναβάλλει την εμφάνιση της αδυναμίας (Okasha N. & Frangopol Dan). Ο χρόνος εμφάνισης της αδυναμίας (t_{oi}) μετά από την πραγματοποίηση της προορατικής προληπτικής συντήρησης (i) λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο μεσολάβησης μεταξύ των συντηρήσεων (t_{pi}) και ο αρχικός χρόνος εμφάνισης της αδυναμίας χωρίς οποιαδήποτε συντήρηση (t_o) είναι ίσος με (Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196):

$$t_{oi} = t_0 + i \frac{t_{pi}}{2}$$

Έτσι για την εύρεση των δράσεων μέχρι την επιθυμητή χρονική στιγμή εμφάνισης της αδυναμίας μπορεί να προσδιοριστεί θέτοντας το $t_{pi} < t_{0(i-1)}$. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται σταθερή η πιθανότητα αστοχίας για το διάστημα t_{oi} και αναλόγως χωρίς δράσεις ή κάνοντας λιγότερες να μένει για λιγότερο χρόνο σε σταθερή πιθανότητα αστοχίας.

Η αντιδραστική προληπτική συντήρηση (Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196) προσδιορίζεται με τη συνάρτηση επιβίωσης ($S_{t_p}(t)$) σε χρόνο (t) όταν ο χρόνος μεσολάβησης των αντιδραστικών συντηρήσεων γίνονται σε χρόνο (t_p) και $S_t(t_p)$ είναι η συνάρτηση επιβίωσης όταν δεν έγινε καμία συντήρηση και ο αριθμός των συντηρήσεων είναι (j) πριν το χρόνο (t) και (τ) είναι ο χρόνος που πέρασε από την τελευταία συντήρηση, σύμφωνα με το μοντέλο του Kececioglu είναι:

$$S_{t_p}(t) = [S_t(t_p)]^j * S_t(\tau)$$

Η σχέση ισχύει όταν η αντιδραστική προληπτική συντήρηση εφαρμόζεται για όλα τα στοιχεία που μελετώνται διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιηθούν συντελεστές αξιοπιστίας.

Ένα παράδειγμα πιθανολογικού μοντέλου για εύρεση της Pareto βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης για δίκτυο γεφυρών στηριζόμενο μόνο στη προληπτική συντήρηση είναι αυτό των Bocchini P. και Frangopol Dan. Το μοντέλο ως εξαρτημένο του χρόνου συνδυάζει τις επιπτώσεις της επιδείνωσης και των δράσεων συντήρησης. Οι μεταβλητές του μοντέλου είναι οι προληπτικές συντηρήσεις οι οποίες επεξεργάζονται από την προσομοίωση Monte Carlo, που αποτελεί μέρος του γενετικού αλγόριθμου. Το αποτέλεσμα του Γενετικού Αλγόριθμου μας δείχνει εάν η συγκεκριμένη στρατηγική προληπτικής συντήρησης είναι βέλτιστη. Η διαδικασία του μοντέλου είναι:

1. Καθορισμός της συσχέτισης των ενδεχομένων
2. Επιλογή του μοντέλου αξιοπιστίας που είναι ανεξάρτητου του χρόνου για κάθε γέφυρα
3. Καθορισμός της κατανομής πιθανότητας για τις παραμέτρους του μοντέλου
4. Καθορισμός των προληπτικών μέτρων συντήρησης για τα κύρια στοιχεία και καθορισμός της κατανομής πιθανότητας για κάθε παράμετρο που επηρεάζεται
5. Προσομοίωση των τυχαίων μεταβλητών του μοντέλου του δείκτη αξιοπιστίας και του μοντέλου των προληπτικών μέτρων συντήρησης
6. Υπολογισμός δειγμάτων του δείκτη αξιοπιστίας χωρίς να υποστούν συντήρηση για κάθε γέφυρα και κάθε δείγμα

7. Καθορισμός σχεδιαστικής μεταβλητής που είναι ο αριθμός των προληπτικών δράσεων συντήρησης σε κάθε γέφυρα
8. Καθορισμός του $\beta(t)$
9. Υπολογισμός του κόστους της προληπτικής συντήρησης
10. Υπολογισμός του μέσου όρου του ολικού κόστους συντήρησης και της λειτουργίας του δικτύου.

Τα βήματα 7-10 αποτελούν τη διαδικασία του Γενετικού Αλγόριθμου. Το μοντέλο αξιοπιστίας επιλέγεται μεταξύ των bilinear, quadratic, και το εκθετικό μοντέλο ή άλλων ντετερμινιστικών μοντέλων. Για τα πρώτα τρία μοντέλα, η επιλογή τους εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, την ηλικία, τη πιθανή κατάσταση φόρτισης και το περιβάλλον. Η αβεβαιότητα εισάγεται στα μοντέλα μέσω του μέσου όρου των παραμέτρων που λαμβάνονται ως τυχαίες μεταβλητές. Για την ανάλυση πρέπει να καθοριστούν τουλάχιστον μια από τις τέσσερις ακόλουθες υποθέσεις: η βελτίωση του δείκτη αξιοπιστίας, η καθυστέρηση στη επιδείνωση, η γραμμική αύξηση του δείκτη αξιοπιστίας και η βελτίωση του δείκτη αξιοπιστίας με παραβολική μορφή. Ανάλογα με το τι θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να δοθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων παραμέτρων που εμπλέκονται.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης θα είναι περισσότερο της μιας βέλτιστης στρατηγικής αλλά θα υπάρχει το Pareto front. Για να είναι Pareto βέλτιστο πρέπει να δίνεται μια μόνο στρατηγική, βάσει των υποθέσεων που έχουν γίνει – να παρέχει τη μέγιστη δυνατή αντοχή στη γέφυρα, με το ελάχιστο δυνατό κόστος συντήρησης. Σίγουρα όλες οι προτεινόμενες λύσεις που είναι Pareto front είναι και βέλτιστες, έτσι η επιλογή θα γίνει με βάση τους διαθέσιμους πόρους, του επιθυμητού επιπέδου απόδοσης και της κρίσης του μηχανικού.

4.6.2 Τακτική συντήρηση

Ο προσδιορισμός της τακτικής συντήρησης είναι πιο περίπλοκος από τα προηγούμενα. Για τη δημιουργία του μοντέλου (Yang S. κ.α. Eng. Str., Vol. 28, Is. 2, pg. 196) απαιτούνται εννέα βήματα:

1. Δημιουργία του συστήματος της κατασκευής που θα είναι ένα μεικτό σύστημα σειράς και παράλληλων στοιχείων και η ετοιμασία ενός χρονοδιαγράμματος
2. Καθορισμός της συνάρτησης επιβίωσης για κάθε στοιχείο
3. Υπολογισμός της συνάρτησης επιβίωσης για το σύστημα της γέφυρας όταν δεν έγινε καμία εργασία συντήρησης
4. Δημιουργία ενός συστήματος αξιοπιστίας ορίζοντας την κατώτερη τιμή που θα πρέπει να γίνει συντήρηση
5. Καθορισμός όλων των πιθανών ενεργειών για συντήρηση και το κόστος τους
6. Καθορισμός όλων των στρατηγικών συντήρησης ως προς το χρόνο και συνδυασμούς τους

7. Υπολογισμός της συνάρτησης επιβίωσης για το σύστημα για κάθε στρατηγική συντήρησης
8. Υπολογισμός της παρούσας αξίας για κάθε στρατηγική συντήρησης
9. Καθορισμός της βέλτιστης χρήσης, βάση της μικρότερης παρούσας αξίας ολόκληρου του κύκλου ζωής.

Για το μοντέλο, πρέπει να καθοριστεί η ζωή της λειτουργικότητας της γέφυρας που ορίζεται ως η διάρκεια ζωής της γέφυρας μέχρι να εντοπιστεί κατά την επιθεώρηση η πρώτη σημαντική αδυναμία και διαχωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Καμία σημαντική αδυναμία
2. Μικρού βαθμού αδυναμίες μη επίγοντου χαρακτήρα
3. Αδυναμίες που θα ήταν προτιμότερο να συμπεριληφθούν στο επόμενο χρονιαίο πρόγραμμα συντήρησης
4. Σημαντική αδυναμία και απαιτείται άμεση δράση.

4.6.3 Μοντέλα βελτιστοποίησης στρατηγικής συντήρησης σε επιδεινωμένη κατασκευή

Τα προηγούμενα μοντέλα διαχώριζαν τα δύο είδη συντήρησης. Λόγω της δυσκολίας εξακρίβωσης ποια δράση ανήκει σε πιο είδος συντήρησης, υπάρχουν μοντέλα που δεν κάνουν τέτοια διάκριση στην εισαγωγή των δεδομένων με τη διαφορά ότι στο αποτέλεσμα της ανάλυσης αναλόγως με τις τιμές των αποτελεσμάτων διακρίνονται σε προληπτική ή στοιχειώδη συντήρηση. Τέτοιο παράδειγμα είναι το μοντέλο Rijkswaterstaat και Frangopol που περιγράφεται στη συνέχεια (Noortwijk J. & Frangopol Dan). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δύο εφαρμόζονται αντίστοιχα από το Υπουργείο Μεταφορών της Ολλανδίας και του Ηνωμένου Βασιλείου.

Τα δύο αυτά μοντέλα συντήρησης για βελτιστοποίηση της στρατηγική συντήρησης, περιγράφονται ως age replace models, το πρώτο στηρίζεται σε γεγονότα (conditions) και το δεύτερο στην αξιοπιστία. Εφαρμόζεται για προσδιορισμό μόνο προληπτικής, μόνο στοιχειώδη ή και συνδυασμό των δύο, συντήρησης σε επιδεινωμένες κατασκευές. Ο Rijkswaterstaat (RM) ετοίμασε ένα τέτοιο μοντέλο προσπαθώντας να προτείνει ένα εύκολο τρόπο για βελτιστοποίηση της συντήρησης των κρίσιμων στοιχείων, και ο Frangopol (FM) στην αξιοπιστία για να συνδυάσει όλα τις δράσεις συντήρησης. Οι διαφορές στην σύλληψη της ιδέας είναι:

1. Το RM μελετά ένα στοιχείο, μια μορφή αστοχίας και μια αβεβαιότητα, ενώ το FM πολλά στοιχεία, πολλές λειτουργίες αστοχίας και πολλές αβεβαιότητες,
2. Στο RM η στρατηγική συντήρησης γίνεται ανά ομάδες παρόμοιων στοιχείων, ενώ στο άλλο για παρόμοιες γέφυρες,
3. Το RM προσδιορίζει την βελτιστοποίηση, ενώ το άλλο την αξιολόγηση (evaluation)

4. Το RM στηρίζεται σε αναλυτικό μοντέλο ενώ το άλλο στη προσομοίωση Monte Carlo

Διαφορές υπάρχουν και στην ορολογία, για αυτό στην εφαρμογή τους πρέπει να μελετηθεί. Οι ομάδες των γεφυρών στο FM μοντέλο γίνονται βάσει του τύπου της γέφυρας και της περιόδου κατασκευής. Το FM μοντέλο μπορεί να τροποποιηθεί σε μοντέλο στηριγμένο στην βελτιστοποίηση έναντι της αξιολόγησης, μέσω της επανάληψης της αξιολόγησης για μια σειρά από στρατηγικές συντήρησης. Η αβεβαιότητα έχει καθοριστικό ρόλο στο αποτέλεσμα και εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του κάθε μοντέλου. Το FM μοντέλο θέτει ως τυχαίες μεταβλητές τις ακόλουθες μορφές αβεβαιότητας: αρχική απόδοση, χρόνος έναρξης φθοράς, ρυθμός επιδείνωσης χωρίς επέκταση χρόνου ζωής, ρυθμός επιδείνωσης με επέκταση χρόνου ζωής, χρόνος πρώτης ενέργειας για επέκταση ζωής, χρόνος της επαναεφαρμοζόμενης επέκτασης ζωής και διάρκεια επιπτώσεων. Οι ακόλουθες μορφές αβεβαιότητας παίρνονται ως ντετερμινιστικές: κόστος συντήρησης, προληπτική αντικατάσταση, αντιδραστική αντικατάσταση, επέκταση ζωής, όριο χρόνου και προεξοφλητικό επιτόκιο. Το RM θέτει μόνο μια αβεβαιότητα ως τυχαία μεταβλητή στο μοντέλο, το ρυθμό επιδείνωσης χωρίς επέκταση χρόνου ζωής, οι άλλες που αναφέρθηκαν προηγουμένως παίρνονται ως ντετερμινιστικές μεταβλητές.

Ένα άλλο μοντέλο με πολλά κριτήρια (Okasha N. & Frangopol Dan) στηρίζεται στο δείκτη αξιοπιστίας, στο πλεονασμό του συστήματος, καθώς και στο κόστος κύκλου ζωής. Ο συνδυασμός και των τριών παραμέτρων παρέχει τη δυνατότητα βέλτιστης στρατηγικής βάσει του κόστους και της απόδοσης. Για την επίλυση του περίπλοκου προβλήματος χρησιμοποιείται Γενετικός Αλγόριθμος και συγκεκριμένα ο NSGA-II ο οποίος είναι τυχαίος και έχει μνήμη (random and book-keeping) που πλεονεκτεί των συνηθισμένων Γενετικών Αλγορίθμων. Το πρόγραμμα για επίλυση του προβλήματος δίνει απάντηση στο ποια συντήρηση – προληπτική ή στοιχειώδης –, τότε και σε ποιο στοιχείο ή ομάδα στοιχείων θα εφαρμοστεί η συντήρηση την ίδια χρονική στιγμή.

Οι δυνατότητες επίλυσης του προγράμματος είναι δύο. Η πρώτη έχει την ικανότητα να επιλέγει ένα συνδυασμό ειδών συντήρησης, που θα εφαρμοστούν σε διαφορετικά στοιχεία της κατασκευής την ίδια χρονική στιγμή και η δεύτερη έχει την ικανότητα να παρέχει περιορισμένο αριθμό δυνατών ειδών συντήρησης. Η πρώτη αποτελείται από n κωδικοποιημένες σχεδιαστικές μεταβλητές που είναι το είδος της συντήρησης – MCs – που περιγράφουν τη συντήρηση του κάθε στοιχείου ή της ομάδας στοιχείων και έχει τιμή ενός δυαδικού ψηφίου, 0 για καμία συντήρηση και άλλη τιμή για κάθε ένα είδος συντήρησης. Αναπαριστάται με τη μορφή MC $[x \ x \ x]$, για παράδειγμα MC $[1 \ 4 \ 0]$, όπου η συντήρηση είναι τύπου 1 για το στοιχείο 1, τύπου 4 για το στοιχείο 2 και καμία συντήρηση για το στοιχείο 3. Δίνεται και ο χρόνος εφαρμογής της κάθε μιας. Στη δεύτερη, η σχεδιαστική μεταβλητή MC έχει ακέραια τιμή. Η διαφορά των δύο έγκειται στο ρεαλισμό των απαντήσεων. Αν και η πρώτη προσφέρει οικονομικότερες λύσεις, ορισμένα αποτελέσματα είναι μη εφαρμόσιμα, για παράδειγμα λέει ότι θα γίνει αντικατάσταση των δοκών, χωρίς να

γίνει αντικατάσταση του καταστρώματος πράγμα αδύνατον, ενώ η δεύτερη λόγω των προκαθορισμένων τύπων συντήρησης, δεν έχει τέτοια προβλήματα. Έτσι πρέπει να ελέγχεται από τον μηχανικό η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων λύσεων, σε συνδυασμό με το κόστος.

Ο στόχος του προβλήματος είναι η εύρεση του χρόνου και του τύπου της συντήρησης ή περισσότερων, δηλ. t_1, t_2, \dots, t_n και MC_1, MC_2, \dots, MC_n ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη τιμή του $P_{f(syst),max}$ και να μεγιστοποιηθεί η ελάχιστη τιμή για το δείκτη πλεονασμού RI_{min} για όλη τη διάρκεια ζωής της που αποτελούν τις χειρότερες τιμές. Η λύση είναι να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος με n δυνατά είδη αποτυχίας, που είναι εξαρτώμενη του χρόνου $P_{f(syst),max}$, να μεγιστοποιηθεί ο πλεονασμός του συστήματος RI_{min} και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος $C_\tau = LCC$ όπου:

$$P_{f(syst)}(t) = P[any\ g_i(t) < 0] \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, n$$

όπου $g_i(t)$: performance function with respect to failure mode

$$P_{f(dmg)}(t) = P[any\ h_j(t) < 0] \quad \text{για } j = 1, 2, \dots, m$$

όπου $h_j(t)$: performance function with respect to damage of component j

$$RI(t) = \frac{P_{f(dmg)}(t) - P_{f(syst)}(t)}{P_{f(syst)}(t)}$$

$$LCC = C_o + \sum_{i=1}^n \frac{C_{mi}}{(i + v)^{t_c}}$$

Και,

$$P_{f(syst),max} \leq P_{f(syst),\epsilonπιτρεπτό}$$

$$RI_{min} \geq RI_{\epsilonπιτρεπτό}$$

$$t_{min} \leq t \leq t_{max} \quad \text{και } t_j - t_i \geq 2\chi\rhoόνια$$

Για το διαχωρισμό της προληπτικής και της στοιχειώδης συντήρησης θα εξακριβωθεί εάν ένας από τους δείκτες απόδοσης παίρνει τη χειρότερη τιμή, δηλαδή $P_{f(syst),max}$ ή RI_{min} , που σημαίνει ότι η συντήρηση είναι στοιχειώδης.

Παρόμοιας φιλοσοφίας είναι το ακόλουθο μοντέλο που εφαρμόζεται για επιδεινωμένες κατασκευές (Neves L. & Frangopol Dan). Λαμβάνει υπόψη τις φορές που θα γίνει η συντήρηση και τις επιπτώσεις της συντήρησης στη κατάσταση, στην ασφάλεια και στο κόστος κύκλου ζωής, αλλά και μόνο καθορίζοντας τις επηρεαζόμενες παραμέτρους ως τυχαίες μεταβλητές. Έτσι εκτιμά την επιδείνωσή της κατασκευής κάτω από προληπτική, στοιχειώδη ή καμία συντήρηση. Η συσχέτιση μεταξύ της κατάστασης και της ασφάλειας γίνεται μέσω πιθανοτήτων και

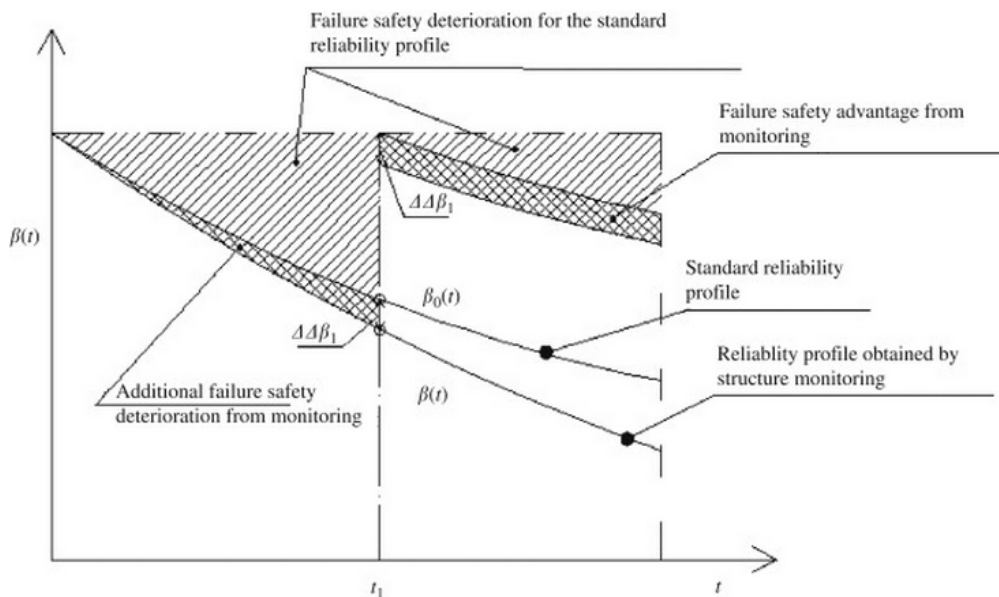
ντετερμινιστικών σχέσεων και τα πιθανολογικά χαρακτηριστικά των τριών στοιχείων των επιδεινωμένων κατασκευών, εξάγονται από προσομοίωση Monte-Carlo. Η διαφορά από το προηγούμενο, είναι η αντιμετώπιση δύο σοβαρών μειονεκτημάτων των συστημάτων διαχείρισης γεφυρών: πρώτον, την συσχέτιση της εκτίμησης κατάστασης και της εκτίμησης της ασφάλειας και δεύτερον, λαμβάνει υπόψη τη χρονοσειρά της επιδείνωσης και συντήρησης μέσα από τη κράτηση αρχείου της κατάστασης, ασφάλειας και κόστους. Η κατάσταση και η ασφάλεια προσδιορίζονται ως bilinear. Οι επιπτώσεις της συντήρησης θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές και είναι οι εξής: αύξηση στο δείκτη απόδοσης και ασφάλειας αμέσως μετά τη συντήρηση, η χρονική στιγμή που η επιδείνωση του δείκτη κατάστασης και δείκτη ασφάλειας καταστέλλεται, η χρονική στιγμή που ο ρυθμός επιδείνωσης του δείκτη κατάστασης και ασφάλειας καταστέλλεται ή μειώνεται και η μείωση του ρυθμού επιδείνωσης του δείκτη κατάστασης και αξιοπιστίας. Αναλόγως του χρόνου εφαρμογής της συντήρησης, η συντήρηση είναι βασιζόμενη στο χρόνο, βασιζόμενη στην απόδοση και βασιζόμενη και στα δύο.

Τα μοντέλα αξιοπιστίας που βασίζονται σε ενδείξεις (Ceravolo R. κ.α.) χρησιμοποιούνται κυρίως για καθορισμό της απομένουσας ικανότητας $\Delta D(s)$ και του συνολικού κόστους συμπεριλαμβανομένου της συντήρησης $C_{TOT}(t_1)$. Μετά θα επανεκτιμηθεί η ασφάλειά της, σύμφωνα με τα νέα δεδομένα που προκάλεσε η αστοχία.

$$\Delta D(s) = R(S) = P(S \leq S_b \setminus S < S_1)$$

$$C_{TOT}(t_1) = C_1(t_1) + C_{Pf1,\beta_0}(t_1)$$

Από την παρακολούθηση παίρνεται η υπερβολική (excessive) τιμή της ένδειξης. Ένδειξη είναι ένα οποιοδήποτε φυσικό μέγεθος, ο χρόνος, η παραμόρφωση και έπειτα υπολογίζει, με τη βοήθεια του δείκτη αξιοπιστίας του συστήματος, τα ζητούμενα μεγέθη. Στη γραφική παράσταση της πηγής φαίνεται το περιθώριο ασφαλείας του δείκτη αξιοπιστίας από το σχεδιαστικό και το πραγματικό μέγεθος της κατασκευής που είναι μεγάλο.



Σχήμα 4.6.3.1 Μεταβολή δείκτη αξιοπιστίας χωρίς και με παρακολούθηση (Ceravolo R. κ.α.)

Προσπαθώντας να εισαχθεί η προληπτική συντήρηση στα μοντέλα βελτιστοποίησης σχεδιασμού, προτείνεται ένα μοντέλο, που έχει ως τυχαία μεταβλητή την περιεκτικότητα ιόντων χλωρίου σε σκυρόδεμα, για πρόληψη της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα (Tantele E. & Οπουφριου T.). Η βελτιστοποίηση στηρίζεται σε Γενετικό Αλγόριθμο και η αναβάθμισή του στη θεωρία του Bayes. Συγκεκριμένα, καθορίζονται τέσσερις προορατικές προληπτικές δράσεις συντήρησης – φροντίδα επιφάνειας σκυροδέματος με σιλάνιο, στεγανωτικό και επίστρωση – και την αντιδραστική προληπτική συντήρησης – μέθοδος καθόδου. Θέτοντας ως οριακή κατάσταση την περιεκτικότητα ιόντων να είναι μεγαλύτερη της οριακής περιεκτικότητας και το ολικό κόστος των ενεργειών συντήρησης να είναι ίσο με το άθροισμα του κόστους της κάθε ενέργειας ανά έτος. Ο Γενετικός Αλγόριθμος δίνει σε ποιο χρόνο θα γίνουν οι πιο πάνω ενέργειες και με ποιο κόστος. Η αναβάθμιση του Γενετικού Αλγόριθμου γίνεται με την εισαγωγή νέων παρατηρήσεων σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, ως δεδομένη πιθανότητα τη μέτρηση της επιθεώρησης. Το συνολικό κόστος της συντήρησης χωρίς και με μη αναβάθμιση είναι £70 και £66 το τετραγωνικό μέτρο. Τα αποτελέσματα μετά την πρώτη και μοναδική αναβάθμιση είναι ενθαρρυντικά για περαιτέρω αναβάθμιση του αλγόριθμου, αφού δίνει αποτελέσματα όμοια με αυτά χωρίς την αναβάθμιση, πέραν της μείωσης του συνολικού κόστους ζωής.

4.7 Ενέργειες συντήρησης, επισκευής και ανακατασκευής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η προληπτική συντήρηση γίνεται πριν να αστοχήσει το μέλος και μάλιστα οι ενέργειες διακρίνονται σε προορατικές που δεν εμφανίστηκε οποιοδήποτε σημάδι αδυναμίας και σε αντιδραστικές όταν υπάρχουν ενδείξεις αδυναμίας. Αν και είναι δύσκολος ο διαχωρισμός τα πρώτα τρία στοιχεία

που παρατίθενται πιο κάτω μπορούν να κατηγοροποιηθούν στα πλαίσια της προορατική προληπτικής συντήρησης. Οι ενέργειες είναι:

1. Βάψιμο μεταλλικών μελών όπως είναι η μεταλλική δοκός, η μεταλλική ράβδος στο δικτύωμα πριν να διαβρωθούν
2. Βάψιμο καλωδίων πριν τη διάβρωση
3. Αλλαγή καλωδίων, τενόντων και εφέδρανων όταν κριθεί ότι ολοκληρώθηκε ο κύκλος ζωής τους.
4. Καθοδική προστασία στον οπλισμό του σκυροδέματος
5. Βάψιμο των μεταλλικών επιφανειών όπως είναι οι μεταλλικοί δοκοί, τα καλώδια, οι ράβδοι
6. Αλλαγή καλωδίων, τενόντων και εφέδρανων όταν παρουσιάσουν ενδείξεις μειωμένης απόδοσης
7. Τοπική επισκευή σκυροδέματος
8. Εφαρμογή σιλάνιου
9. Απομάκρυνση νερού ή άλατος από το κατάστρωμα ή από τους αρμούς
10. Επιδιόρθωση οδοστρώματος του καταστρώματος

Στην στοιχειώδη συντήρηση οι δράσεις είναι τρεις η επισκευή, η αντικατάσταση και η αύξηση της αντοχής. Οι παράγοντες επιρροής είναι η αιτία της κατάστασης, το μέγεθος της καταστραμμένης επιφάνειας και το υλικό της, η κατάσταση της επιφάνειας του υλικού, η θέση της επιφάνειας στη γέφυρα – δοκός, πυλώνας, κατάστρωμα, το εξωτερικό περιβάλλον – θερμοκρασία, υγρασία, τοπογραφικά χαρακτηριστικά -, το διαθέσιμο κόστος, ο απαιτούμενος χρόνος ζωής, τα διαθέσιμα υλικά και άλλες απαιτήσεις ως προς την κοινωνία – θόρυβος εργασιών, κλείσιμο γέφυρας. Πριν την απόφαση, πρέπει να γίνεται εκτενής μελέτη, ώστε να απαντηθούν τα πιο πάνω ερωτήματα. Απαιτείται από πλευράς μηχανικού, γνώση τεχνικών συντήρησης, νέων και συμβατικών, εμπειρία στις εργασίες κατασκευής τους και γνώσεις στην αντιμετώπιση αυτών των μελών, κατά τον κύκλο ζωής τους. Τόσο η επιδιόρθωση όσο και η αποτυχία της, έχει μεγάλο κόστος και η λύση είναι μοναδική για κάθε περίπτωση.

Σήμερα είναι διαθέσιμα στην αγορά μια γκάμα υλικών που εφαρμόζονται για τέτοιες περιπτώσεις, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, για αυτό πρέπει να ελέγχονται τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις που έχουν. Όποια υλικά και να είναι, πρέπει να συνεργαστούν με τα υφιστάμενα υλικά της γέφυρας, ώστε να είναι ένας φορέας και να παραλαμβάνουν και να μεταφέρουν τα φορτία όπως αρμόζει στο σχεδιασμό τους. Τέτοια υλικά είναι το πολυμερή σκυροδέμα, όπου κατά την ανάμειξη των υλικών του σκυροδέματος προσθέτονται υλικά όπως epoxy, modified epoxy, methyl methacrylate, high molecular weight methacrylate (Dinitz M. & Stenko M.). Τα κριτήρια επιλογής του υλικού είναι η αντοχή σε θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας, η παραμόρφωση, το ιξώδες, τα όρια στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η πλαστιμότητα (εάν είναι ψαθυρό ή όλκιμο) και ο εξοπλισμός για παρασκευή και τοποθέτηση. Απαιτείται να ελεγχθεί ποια θα είναι η ζωή του, εάν οι ιδιότητές του είναι συμβατές με αυτές του υφιστάμενου σκυροδέματος, ο χρόνος σκλήρυνσης και

οι απαιτήσεις για μελλοντική συντήρηση. Το πού θα χρησιμοποιούνται, πρέπει να ελέγχεται με σοβαρότητα, γιατί μια κακή παρασκευή και τοποθέτηση τους μπορεί να προβεί μοιραία. Μέχρι στιγμής έχει εντοπιστεί ότι απαγορεύεται να χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με αντοχή μικρότερη της 1.7MPa (Dinitz M. & Stenko M.), όταν το σκυρόδεμα της κατασκευής είχε αναμειχτεί στο παρελθόν με χημικά και όταν το ποσοστό υγρασίας στο σκυρόδεμα είναι μεταξύ 50-90% για να είναι αποτελεσματική η συγκόλληση, διαφορετικά δεν θα λειτουργεί (Courard L. κ.α.). Πριν την τοποθέτηση τους ακολουθείται διαδικασία, ώστε η επιφάνεια να είναι έτοιμη να δεχτεί το πολυμερή σκυρόδεμα και να συνεργαστεί μαζί του. Πρέπει να δίνεται προσοχή στην ανάμειξη των υλικών και στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την σκυροδέτηση.

Στα πλαίσια της επισκευής εντάσσονται οι εργασίες για κλείσιμο ρωγμών στο σκυρόδεμα, για τοποθέτηση σκυροδέματος σε μικρό εμβαδόν, για απαλλαγή από τη διάβρωση σε μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα, μεταλλικές δοκούς και ράβδους, και κοπής μεταλλικής επιφάνειας λόγω κόπωσης.

Για το κλείσιμο ρωγμών οι μέχρι τώρα μέθοδοι είναι το epoxy (Dinitz M & Stenko M.; Issa C. & Debs P.) με ένεση ή με βαρύτητα, modified epoxy, methyl methacrylate, high molecular weight methacrylate σκυρόδεμα αρκεί το υλικό να αντέχει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και η επιφάνεια σκυροδέματος να είναι ξηρή για να είναι αποτελεσματική η εργασία, διαφορετικά η ρωγμή δεν θα κλείσει. Στην ένεση με epoxy πρέπει να ελέγχεται η κόπωση του λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας, γιατί σύμφωνα με (Shin H. κ.α.) προκαλείται μείωση της αντοχής. Δεύτερη λύση είναι το Super-absorbent resin (SAR) (Song X. κ.α.) που όταν τοποθετηθεί στη ρωγμή συνθέτεται με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας, όπου με την τοποθέτηση νερού στην επιφάνεια, το υλικό φουσκώνει και γεμίζει τις ρωγμές στο σκυρόδεμα. Το υλικό αποτελείται από τσιμέντο, αδρανή, και τα χημικά Acrylic acid, acrylamide, N-dimethylformamide, ammonium persulfate και sodium hydroxide. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρό ιξώδες, για αποτελεσματικότερο κλείσιμο ρωγμών με μικρό πλάτος. Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ξηρότητας, μετά τη τοποθέτησή του, είναι μικρή στις ιδιότητες του. Γενικά, το κλείσιμο των ρωγμών επιφέρει προστασία στο υλικό από το νερό, ιόντα χλωρίου, διοξείδιο του άνθρακα και τα θειικά άλατα που επιδεινώνουν το μέλος. Η διαδικασία απαιτεί την προετοιμασία της επιφάνειας, που είναι η απομάκρυνση λαδιών, νερού ή άλλων καταστάσεων.

Για επισκευή σπασμένου σκυροδέματος, ένωση κόμβου και για πλάκες τοποθέτησης εφένδρων προτείνεται η χρήση ψηλής αντοχής πολυμερές σκυρόδεμα, που να είναι ανθεκτικό και με μικρό χρόνο σκλήρυνση. Πρέπει να ελέγχεται το ελάχιστο και μέγιστο πάχος της στρώσης που θα χρησιμοποιηθεί. Όταν πρόκειται για διαμόρφωση επιφάνειας στο κατάστρωμα προτείνονται το epoxy, modified epoxy, methyl methacrylate, και polyester σκυρόδεμα. Να σημειωθεί ότι παρέχουν προστασία έναντι διάβρωσης. (Dinitz M. & Stenko M.).

Για τα μέλη από διαβρωμένο οπλισμό σε σκυρόδεμα και ύπαρξη ιόντων χλωρίου, προτείνεται η απαλλαγή από τα ιόντα χλωρίου, μέσω της μεθόδου της ηλεκτροχημικής επανακαλιοποίησης του σκυροδέματος και της ηλεκτροχημική αφαίρεση των ιόντων χλωρίου (Atkins C. κ.α.). Η πιο γνωστή μέθοδος είναι η Cathodic Protection. Το ηλεκτρικό κύκλωμα μετατρέπει τον οπλισμό σε κάθοδο και ένα αδρανές ηλεκτρόδιο δημιουργεί μια τεχνητή άνοδο στην επιφάνεια του σκυροδέματος, έτσι προκαλείται διάχυση των ιόντων χλωρίου από τον οπλισμό στην άνοδο προστατεύοντας το από την διάβρωση. Τα πλεονεκτήματά της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται αφαίρεση όλου του σκυροδέματος που περιείχε ιόντα χλωρίου, παρά μόνο αυτού που έχει ενανθρακωθεί και θρυμματιστεί, μειώνοντας τον όγκο του υλικού που θα έπρεπε να απομακρυνθεί και να τοποθετηθεί νέο σκυρόδεμα ή άλλου είδους αντικατάσταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χρόνος που θα είναι κλειστή η γέφυρα να μειώνεται δραματικά και να μειώνεται η ανάγκη για στήριξη της γέφυρας κατά τα έργα επισκευής. Αν δεν μπορεί να γίνει τοποθέτηση της ανόδου λόγω πρόσβασης ή πάχους διατομής πρέπει να βρεθεί εναλλακτικός τρόπος.

Άλλος τρόπος απαλλαγής, λιγότερο διαδεδομένος, είναι η τοποθέτηση ενός elector-osmosis συστήματος (Atkins C. κ.α.), για να παράγει μια ελεγχόμενη χαμηλή τάση ρεύματος, διατηρώντας το ποσοστό υγρασίας σε κανονικά πλαίσια, γύρω στο 60%. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει μια ρύθμιση όταν βρέχει, μειώνοντας έως και μηδενίζοντας την πιθανότητα να διαβρωθεί ο οπλισμός. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το ψηλό κόστος λειτουργίας.

Σε μεταλλικές δοκούς, λόγω κόπωσης, οι ρωγμές εμφανίζονται αρχικά στο κορμό της δοκού και μεταδίδονται στη φλάντζα, κατά μήκος της σύνδεσης κορμού και φλάντζας. Οι μέθοδοι επισκευής είναι η δημιουργία οπής στο άκρο της ρωγμής, για να σταματήσει προσωρινά η διάδοση και η κοπή μέρους της αδύναμης επιφάνειας, για να μαλακώσει η σύνδεση και να επιτραπεί να γίνουν οι σχετικές μετακινήσεις του κορμού (Liu M. κ.α.). Η δεύτερη είναι αυτή που εφαρμόζεται, γιατί δίνει μονιμότερη λύση έναντι της πρώτης. Τα ερωτήματα που προκύπτουν από τη δεύτερη μέθοδο, είναι το μέγεθος της επιφάνειας που θα κοπεί για να μην υπάρχει επέκτασή της ρωγμής και να μην επηρεάσει αρνητικά το κύκλο ζωής λόγω κόπωσης. Η απόφαση εξαρτάται από το μέγεθος της ρωγμής. Το συνηθέστερο σχήμα κοπής είναι το ορθογώνιο με στρογγυλεμένες γωνίες για οικονομικούς και λειτουργικούς λόγους. Γίνεται αποτελεσματική κατανομή των τάσεων και αυξάνει την αντοχή σε κόπωση. Η τελική απόφαση λαμβάνεται με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

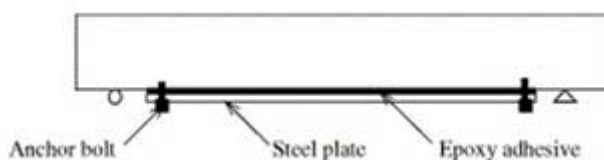
Όταν υπάρχει πρόβλημα με τις δονήσεις των καλωδίων, σε καλοδιοτές και κρεμαστές γέφυρες, προτείνεται η τοποθέτηση οριζόντιων καλωδίων που να ενώνει τα καλώδια, καθώς και η χρήση καλύτερης ποιότητας αποσβεστήρων στις άκρες των καλωδίων (Fujino Y.). Ακόμα προτείνεται και η τοποθέτηση αποσβεστήρων στο κατάστρωμα όπως στη Γέφυρα Ρίο-Αντίριο.

Η αντικατάσταση αφορά τα καλώδια, τους τένοντες, τα εφέδρανα και τις ράβδους, που δεν θα προκαλέσουν ανακατασκευή και γίνεται από στοιχεία που θα

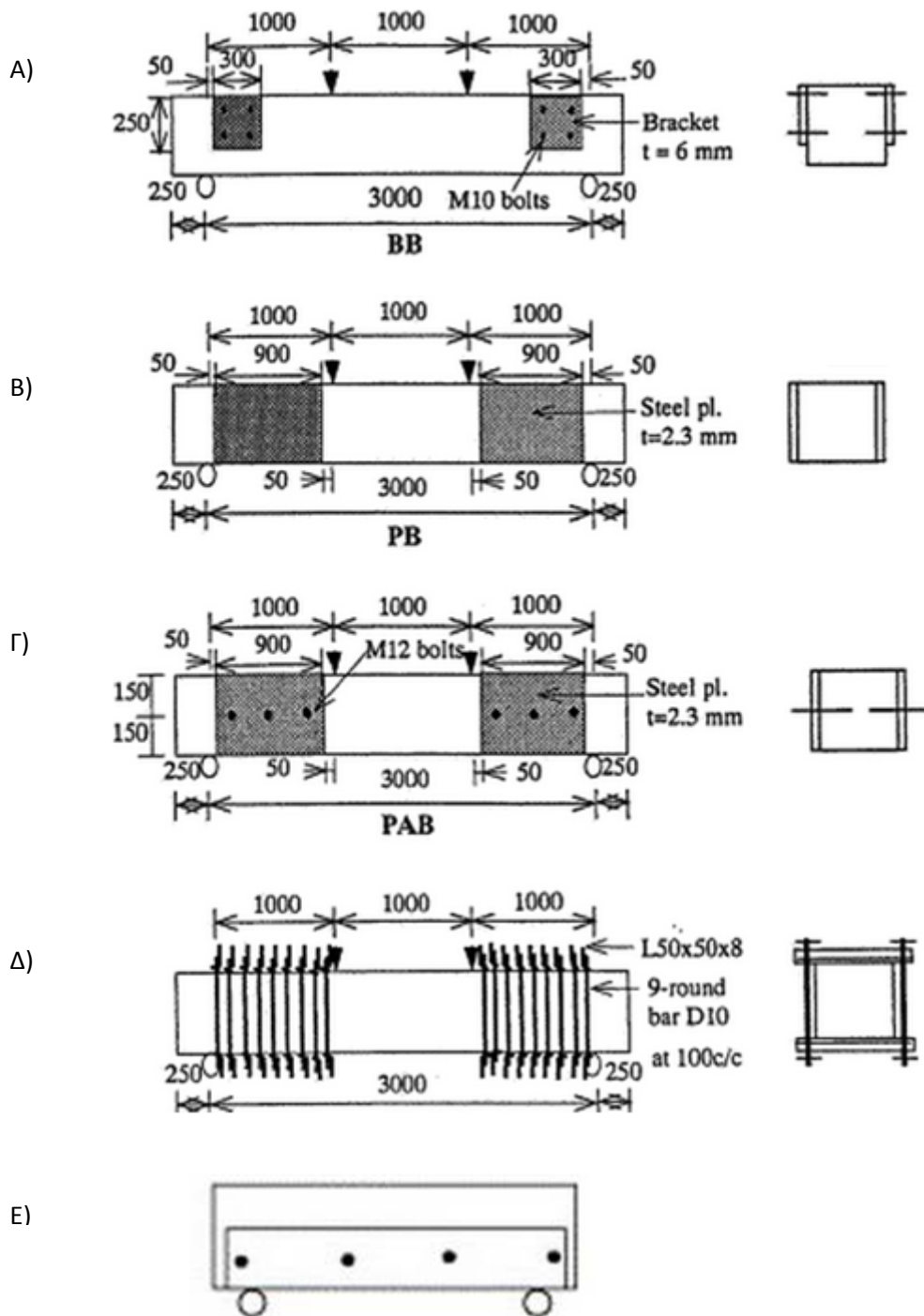
έχουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτά που αντικαθιστούν. Τα πρώτα έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής, που προβλέπεται από την αρχή. Για την αντικατάστασή τους πρέπει να ακολουθηθεί συγκεκριμένη διαδικασία, ώστε κατά την αφαίρεση τους, να μην είναι σε κίνδυνο η κατασκευή.

Οι λύσεις για αύξηση της αντοχής, σε μέλη από σκυρόδεμα, είναι η ενίσχυση με μεταλλική πλάκα (bonding with steel plates), με glass fiber reinforced plastic πλάκες (GFRP), με fiber reinforced polymer πλάκες (RP), με εξωτερική προένταση και με πρόσθεση σκυροδέματος. Η περισσότερο εφαρμόσιμη είναι η ενίσχυση με μεταλλικές και FRP πλάκες, λόγω εύκολης κατασκευής και μικρή αλλαγή στη διατομή του υλικού, αν και η μεταλλική πλάκα είναι επιρρεπές στη διάβρωση, προκαλώντας μείωση στην αντοχή της. Η τοποθέτησή τους σε δοκό από σκυρόδεμα (Adhikary B & Mutsuyoshi H. 2006α&β) γίνεται με ενίσχυση στο κάτω μέρος για αντοχή σε κάμψη (βλ. σχήμα 4.7.1), και με ενίσχυση στη κάθετη πλευρά για αντοχή σε τέμνουσα (βλ. σχήμα 4.7.2) με διάφορα ενδεχόμενα (Adhikary B & Mutsuyoshi H. 2006β), όπως η τοποθέτηση κατακόρυφων συνδετήρων στη δοκό, συνεχής πλάκα σε όλο το μήκος της κάθετης πλευράς της δοκού, συνεχής πλάκα σε όλο το μήκος της κάτω πλευράς. Όταν η συνεχής πλάκα είναι παράλληλη στον άξονα της δοκού, τότε αυξάνεται η αντοχή σε κάμψη και τέμνουσα.

Κριτήρια επιλογής της μεταλλικής πλάκας (Adhikary B & Mutsuyoshi H.) είναι ο λόγος του πάχους πλάκας και του πάχους της δοκού, η αντοχή του σκυροδέματος και ο λόγος του εσωτερικού οπλισμού για κάμψη και τέμνουσα. Για μεταλλικές δοκούς (Al-Saidy A. κ.α.) χρησιμοποιούνται τα FRP ή GFRP γιατί είναι πιο ελαφριά από τη μεταλλική πλάκα, έχουν λιγότερο κόστος τοποθέτησης και είναι λιγότερο επιρρεπής στη διάβρωση. Για αύξηση αντοχής σε κάμψη, οι πλάκες τοποθετούνται στις εφελκόμενες (κάτω) φλάντζες. Η εξωτερική προένταση (Matta F. κ.α.) γίνεται με μεταλλικούς τένοντες και ευθύγραμμους GFRP τένοντες. Οι GFRP τένοντες έχουν μεγάλη αντοχή, μικρή χαλάρωση, μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και μικρό βάρος, με τα δύο τελευταία να υπερτερούν των μεταλλικών τενόντων. Αναλόγως της επιθυμητικής κατάστασης θα επιλεγεί ο αριθμός και η θέση των τενόντων.



Σχήμα 4.7.1 Ενίσχυση δοκού για αντοχή σε κάμψη με μεταλλική πλάκα (Adhikary B. & Mutsuyoshi H. 2006α)



Σχήμα 4.7.2 Ενίσχυση δοκού για αντοχή σε τέμνουσα με μεταλλική πλάκα
 α) τέσσερις πηροί, β) μόνο, γ) τρεις πηροί, δ) με εξωτερικούς συνδετήρες,
 ε) συνεχής πλάκα (Adhikary B & Mutsuyoshi H. 2006β)

4.8 Συζήτηση

Η ανάλυση των μετρήσεων αποτελεί ένα απαιτητικό κομμάτι της διαχείρισης κατασκευών που θα καθορίσει το σχέδιο συντήρησης και την αναβάθμιση της απόδοσής. Τα προβλήματα που καλείται ο μηχανικός να επιλύσει είναι περίπλοκα, για αυτό διασπώνται σε μέλη όταν πρόκειται για την επιδείνωσή τους. Μέσα από την

αποσπασματική προσέγγιση, πρέπει να υπάρχει και γενική προσέγγιση στο πρόβλημα, δηλαδή την επίπτωση στο φορέα από την συντήρηση ενός μέλους ή μιας ομάδας μελών. Η γέφυρα είναι ένα σύνολο μελών που εργάζονται όλα μαζί για την ασφάλειά και την λειτουργικότητά της. Αυτό μαζί με το κριτήριο του ελάχιστου δυνατού ΣΚΖ και της μέγιστης δυνατής απόδοσης αποτελούν τον στόχο της βέλτιστης διαχείρισης γεφυρών. Επομένως, η χρήση στοχαστικών μοντέλων με δύο κριτήρια δίνουν το είδος και τον αριθμό της προληπτικής ή/και στοιχειώδους συντήρησης σε ένα μέλος ή σε όλη την γέφυρα ανάλογα του προγραμματισμού του μοντέλου καθώς και της διορατικότητας της ομάδας διαχείρισης. Από πλευράς μοντέλου, για περιορισμό της πολυπλοκότητας και αβεβαιότητας, προτιμάται να δίνονται από την αρχή σενάρια συντήρησης που συμβαίνουν συνήθως και το μοντέλο να προτείνει λύσεις βάσει αυτών. Αυτό απαιτεί την αξιοπιστία των προτεινόμενων ειδών συντήρησης. Σήμερα, σε κάθε ομάδα διαχείρισης υπάρχουν μοντέλα που εξετάζουν συγκεκριμένα θέματα με αποτέλεσμα να συνδυάζονται οι λύσεις του κάθε ενός για τη βέλτιστη διαχείριση τους είτε σε επίπεδο γέφυρας είτε σε επίπεδο συστήματος γεφυρών. Από την άλλη πλευρά, όταν εξετάζεται όλος ο φορέας, μέσα από την ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών του, τότε η ανάλυση αποκτά διαφορετικό χαρακτήρα. Οι απαιτήσεις από τις δύο αναλύσεις διαφέρουν, για αυτό ο συνδυασμός τους, εάν είναι εφικτός, θα συμβάλλει σε καλύτερη λύση συντήρησης.

5. Μελέτες

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τεχνικές διαχείρισης γεφυρών με σύγκριση εφαρμογών. Θα συζητηθεί καλωδιότη γέφυρα μεγάλου ανοίγματος από σκυρόδεμα.

5.1 Γενικά χαρακτηριστικά και κίνδυνοι γέφυρας

Μια καλωδιότη γέφυρα αποτελείται από τους πυλώνες, το κατάστρωμα, τις δοκού του καταστρώματος και τα καλώδια. Το κατάστρωμα είναι μια σειρά από box girders. Η πτώση οποιοδήποτε καλωδίου είναι επικίνδυνη για την ευστάθεια της κατασκευής. Συνήθως λαμβάνεται ως ασφάλεια να μπορεί να πέσει ένα ή δύο καλώδια και η κατασκευή να αντέξει μέχρι την επιδιόρθωσή τους. Το μεγαλύτερο ίσως πρόβλημα που αντιμετωπίζει είναι οι δονήσεις που δημιουργούνται από τον άνεμο και τη βροχή πέραν του θέματος της διάβρωσης και κόπωσης στο κατάστρωμα και στα καλώδια. Τέτοια κατασκευή είναι ελαφριά και εάν το σχέδιο δεν είναι αεροδυναμικό προκαλούνται αυτά τα προβλήματα. Από μελέτες που έγιναν, βρέθηκε ότι ορισμένες γέφυρες αντιμετωπίζουν πρόβλημα μεγάλης δόνησης στα καλώδια όταν συνυπάρχει ελαφρύς άνεμος και χαμηλή βροχόπτωσης.

Η διάβρωση είναι ένα ακόμα φλέγον ζήτημα στα καλώδια και στα μέλη από σκυρόδεμα. Η διάβρωση των καλωδίων μειώνει την αντοχή τους και σε συνδυασμό με την κόπωση λόγω της επαναλαμβανόμενης ταλάντωσης από τα φορτία ανέμου και κυκλοφορίας οδηγεί σε δυσμενές γεγονότα. Η παρουσία ιόντων χλωρίων στα box girders προκαλεί ενανθράκωση του σκυροδέματος, διάβρωση του οπλισμού, διάβρωση των τενόντων και ρωγμές στην επιφάνεια του. Το πρόβλημα μεγαλώνει όταν το περιβάλλον είναι υγρό, όταν δηλαδή η γέφυρα διασχίζει ποτάμι ή νερό ή βρίσκεται σε περιβάλλον με υψηλές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Ρωγμές παρουσιάζονται και λόγω αστοχίας σε τέμνουσα κοντά στους κόμβους μεταξύ δοκών και δοκών και πυλώνων. Τα εφέδρανα και οι αρμοί λόγω μικρής διάρκειας ζωής ως προς τη ζωή της γέφυρας παύουν να λειτουργούν κανονικά λόγω κόπωσης από τα κυκλοφοριακά φορτία, καταστροφής λόγω εξωτερικής δύναμης όπως είναι η εδαφική κίνηση και μείωσης αντοχής λόγω παρουσίας νερού σε αυτά.

5.2 Μέθοδοι επιθεώρησης

Μέσα από τις επιθεωρήσεις με τη χρήση μη-καταστροφικών μεθόδων και συστημάτων συνεχούς παρακολούθησης θα εντοπιστούν αδυναμίες στο αρχικό στάδιο εμφάνισής τους. Η επιθεώρηση θα λειτουργήσει ως προληπτικό μέτρο. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3, η επιθεώρηση γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ένα πρόγραμμα επιθεώρησης θα ήταν η ετήσια κάθε ένα χρόνο με οπτική επιθεώρηση σε προσβάσιμα σημεία, η περιοδική επιθεώρηση, η επιφανειακή και η γενική. Στη κύρια επιθεώρηση θα χρησιμοποιηθούν όργανα μέτρησης όπως είναι αυτά των μη-καταστροφικών μεθόδων. Με τις υφιστάμενες μεθόδους ελέγχονται τα στοιχεία που φαίνονται στον Πίνακα 5.2.1. Για τα καλώδια θα χρησιμοποιηθεί η

acoustic emission μέθοδος. Για τον εντοπισμό των ρωγμών και των διαστάσεων τους είναι οι άλλες τρεις μέθοδοι, οι υπέρηχοι, η Impact-echo και η GPR. Θα εξαρτηθεί από την κάθε εταιρεία και τα κριτήρια είναι ο εξοπλισμός που διαθέτει, το κόστος και η εμπειρία της ομάδας. Σίγουρα πρόκειται για ακριβής μεθόδους. Για την ακρίβεια της μέτρησης πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα εντοπισμού, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Μέλη\Μη-καταστροφική μέθοδος	VI	UT	IE	AE	GPR
Κατάστρωμα					
<i>Ρωγμές δοκών</i>	•	•	•	•	•
<i>Διάβρωση τένοντα</i>			•	•	
<i>Κενά στην οπή τένοντα</i>					•
<i>Διάβρωση οπλισμού</i>			•		
<i>Ρωγμές επιφάνειας καταστρώματος</i>	•				
<i>Θλίψη σκυροδέματος</i>	•				
<i>Υγρασία σκυροδέματος</i>					•
<i>Θέση τενόντων και οπλισμού</i>			•		•
Καλώδια					
<i>Σπασμένο καλώδιο</i>				•	
<i>Διάβρωση καλωδίου</i>				•	

Πίνακας 5.2.1 Μη-καταστροφικές μέθοδοι στα μελή

Πέραν αυτών των μετρήσεων που αφορούν τον έλεγχο σε διακριτές τιμές χρόνου, γίνεται η τοποθέτηση δικτύων αισθητήρων για παρακολούθηση της μεταβολής των παραμέτρων ως προς το χρόνο. Θα καλύψει τα κενά των μη-καταστροφικών μεθόδων εκτιμώντας καταστάσεις που είναι αδύνατον να γίνουν με τις προηγούμενες μεθόδους. Αυτά είναι:

- Εξαγωγή ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων
- Παρακολούθηση της επίδρασης του ανέμου και της βροχόπτωσης
- Παρακολούθηση της μεταβολής της θερμοκρασίας στα καλώδια
- Παρακολούθηση της διαδικασίας διάβρωσης του σκυροδέματος
- Παρακολούθηση δημιουργίας ρωγμής και η μεταβολή των διαστάσεων
- Εντοπισμός σπασμένου τένοντα και καλωδίου

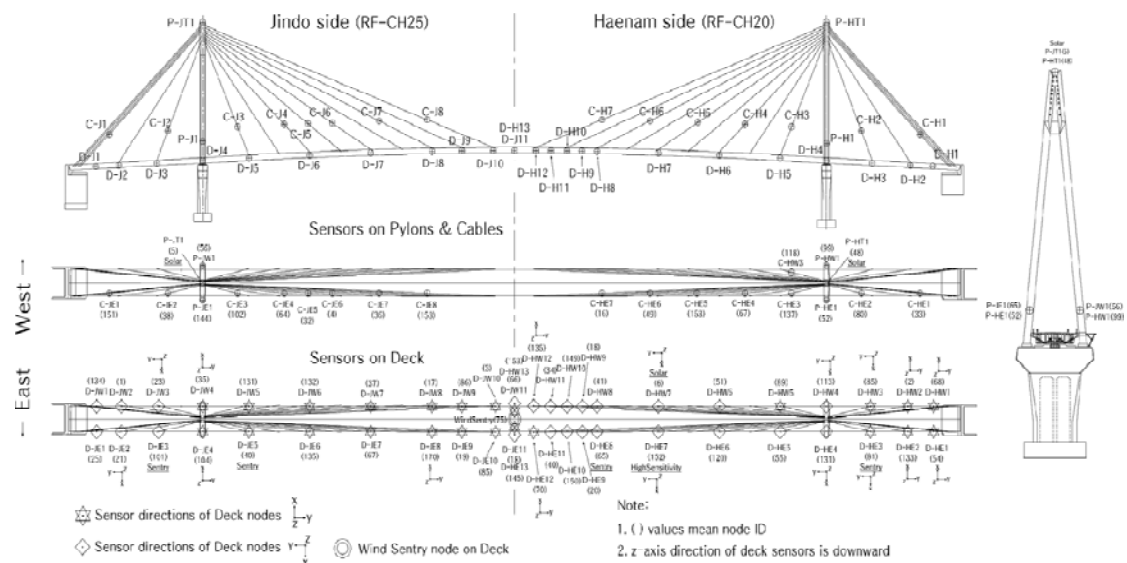
Στη συνέχεια θα δοθούν παραδείγματα εφαρμογών τέτοιων συστημάτων.

5.3 Παρακολούθηση δυναμικών χαρακτηριστικών γέφυρας

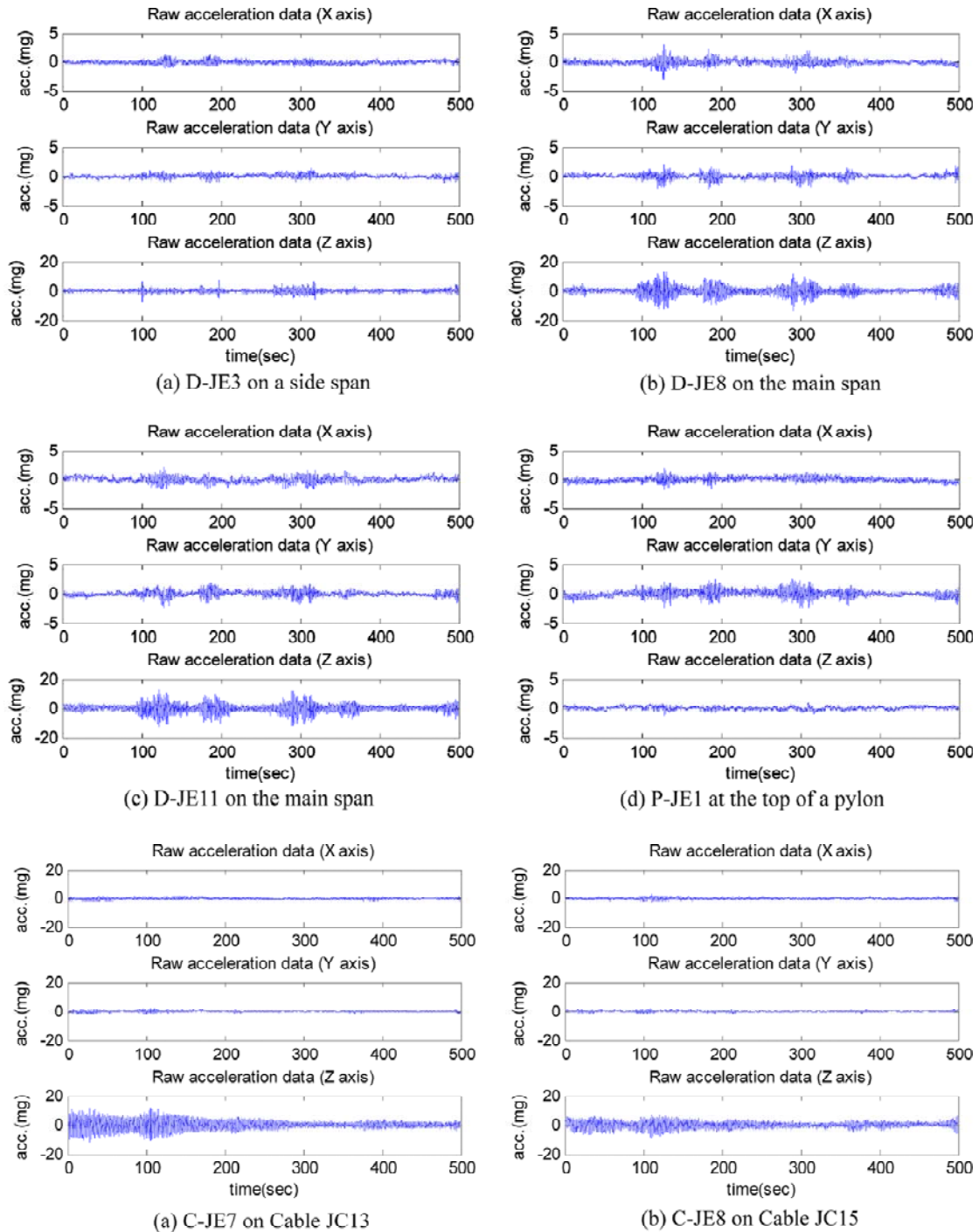
Η εξαγωγή των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας γίνεται με τα δυναμικά τεστ, την επιβολή εξωτερικής δύναμης και την περιβάλλουσα δύναμη. Χρειάζονται μόνο επιταχυνσιόμετρα για μέτρηση των επιταχύνσεων από όπου προκύπτει το φάσμα απόκρισης. Ακολουθεί, η εξαγωγή των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων. Για το δυναμικό τεστ της περιβάλλουσας δύναμης, στη γέφυρα

Qingzhou στην Κίνα (Ren W. & Peng X.) χρησιμοποιήθηκαν 15 επιταχυνσιόμετρα τριών αξόνων απευθείας στο κατάστρωμα. Μετά από στοχαστική ανάλυση, εξάγονται οι ιδιομορφές της γέφυρας η κατακόρυφη, η διαμήκης και στρέψης (Ren W. & Peng X.).

Άλλη εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η δίδυμη γέφυρα Jindo Bridge στη Νότιο Κορέα (Cho S. κ.α. σελ. 439 και 461). Τοποθετήθηκαν επιταχυνσιόμετρα στο κατάστρωμα, στους πυλώνες και στα καλώδια (βλ. Σχήμα 5.3.1). Από τις μετρήσεις, η μέγιστη επιτάχυνση στο κατάστρωμα είναι 8mg, στο πυλώνα 5mg και στα καλώδια 40mg (βλ. Σχήμα 5.3.2). Φαίνεται ότι τα καλώδια επηρεάζονται σε πολύ μεγάλο βαθμός από τα δυναμικά φορτία σε σύγκριση με τα άλλα μέλη της γέφυρας. Ο δυσμενέστερος άξονας επιτάχυνσης στα καλώδια είναι ο κατακόρυφος, στο κατάστρωμα είναι επίσης ο κατακόρυφος αναμενόμενο λόγω των φορτίων κυκλοφορίας και στο πυλώνα ο εγκάρσιος άξονας και σχεδόν καθόλου ο κατακόρυφος. Πάλι για την εξαγωγή των ιδιομορφών χρησιμοποιήθηκε η στοχαστική μέθοδος. Η διαφορά της μεθόδου από αυτήν στη γέφυρα Qingzhou είναι η εισαγωγή της συνεισφοράς των καλωδίων και των πυλώνων στην απόκριση της κατασκευής που όπως φαίνεται είναι αρκετά σημαντικά.



Σχήμα 5.3.1 Θέση αισθητήρων στη Jindo Bridge (Cho S. κ.α. σελ. 439 και 461).



Σχήμα 5.3.2 Επιταχυνσιογραφήματα σε τρεις άξονες των αισθητήρων στο κατάρωμα D-JE3, D-JE8 και D-JE11, στο πυλώνα P-JE1 και στα καλώδια JC13 και JC15 (Cho S. κ.α. σελ. 439 και 461).

Από τις μετρήσεις της επιτάχυνσης, υπολογίζεται η αξονική δύναμη των καλωδίων. Η εξίσωση είναι (Cho S. κ.α.):

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T}{4mL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2 n^2}{4mL_{eff}^4} = a + bn^2$$

$$T = 4mL_{eff}^2 a$$

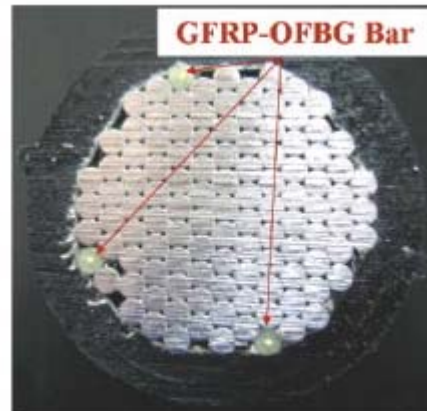
Όπου, T : αξονική εφελκυστική δύναμη
 n : βαθμός των ιδιομορφών,
 f_n : ιδιοσυχνότητα της n ιδιομορφής
 m : μάζα καλωδίου
 L_{eff} : ενεργό μήκος καλωδίου.

Για τους υπολογισμούς λήφθηκε μόνο η κατακόρυφη και οριζόντια επιτάχυνση. Η αξονική δύναμη των καλωδίων είναι μεγαλύτερη από την αρχική και μεγαλύτερη από τις μετρήσεις των δύο προηγούμενων χρόνων. Μέχρι στιγμής, οι τιμές βρίσκονται κάτω από τις μέγιστες οριακές που τέθηκαν ως το όριο για να υπάρξει συντήρηση. Όσο αφορά τη συσχέτιση της ταλάντωσης του καταστρώματος και των καλωδίων, βγαίνει το συμπέρασμα ότι εάν η συχνότητα του καταστρώματος είναι στις πρώτες ιδιομορφές τότε θα υπάρξουν μεγάλες ταλαντώσεις στα καλώδια λόγω του ότι ορισμένες συχνότητες καλωδίων και καταστρώματος είναι κοντά.

Από τα δύο πιο πάνω συστήματα αισθητήρων, δεν γίνεται συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης των καλωδίων παρά μόνο την χρονική περίοδο που εξετάζονται. Για την παρακολούθησή τους προτείνεται η τοποθέτηση μόνιμων αισθητήρων επιτάχυνσης, η χρήση acoustic emission αισθητήρες ώστε να εντοπιστεί σπασμένο καλώδιο όταν αυτό ξεκινήσει τη διαδικασία θραύσης τους και η λιγότερο εφαρμόσιμη μεν αλλά υποσχόμενη, η χρήση OFBG αισθητήρες επιμήκυνσης και αισθητήρες θερμοκρασίας που θα είναι τοποθετημένο μέσα σε FRP ράβδο για να προστατεύονται οι αισθητήρες (Li H. κ.α.). Η ράβδος θα έχει την ίδια διάμετρο με τα καλώδια και θα τοποθετείται μαζί τους όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.3.



FRP-OFBG bars and steel wires twisted and passed through frames



Cross-section of cable with GFRP-OFBG bars



The exposed FRP-OFBG bars after PE sheaths decorticated



The anchor cup containing cable end, anchor and cover plates and epoxy resin mortar

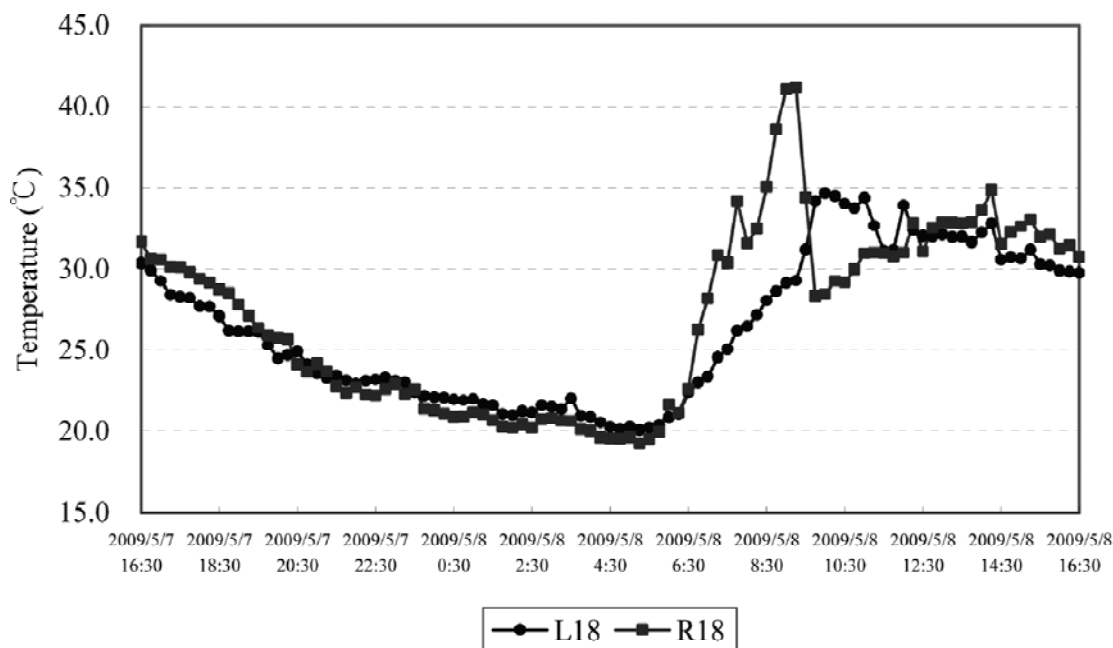
Σχήμα 5.3.3. Η FRP-OFBG ράβδος που έχει τους OFBG αισθητήρες επιμήκυνσης και θερμοκρασίας.

5.4 Παρακολούθηση συμπεριφοράς γέφυρας λόγω καιρικών συνθηκών

Ο προσδιορισμός της επίδρασης του ανέμου και της βροχής γίνεται μέσω των επιταχύνσεων. Σε σύστημα παρακολούθησης γέφυρας Dongting Lake (Ni Y. κ.α) τοποθετήθηκαν αισθητήρες μόνο σε ένα καλώδιο μήκους 122m που είναι λίγο πιο κάτω από το μέγιστο ύψος καλωδίου στη συγκεκριμένη γέφυρα. Οι αισθητήρες είναι 4 επιταχυνσιόμετρα στο κατάστρωμα, 8 στο καλώδιο λίγο πιο πάνω από τους αποσβεστήρες και 3 στους πυλώνες, 1 αισθητήρας επιμήκυνσης στο κατάστρωμα, 2 ανεμόμετρα τριών αξόνων, και 1 μετρητής βροχής στο κατάστρωμα κοντά στο καλώδιο. Η παρακολούθηση διήρκεσε 45 μέρες. Από τις μετρήσεις βρέθηκε ότι η κρίσιμη μέση τιμή ταχύτητας ανέμου είναι 6-14m/s και η κρίσιμη μέση τιμή διεύθυνσης ανέμου είναι 10°-50° και η επικίνδυνη βροχή είναι η ελαφριά βροχόπτωση με ένταση μικρότερη των 8mm/h. Η επιτάχυνση στο επίπεδο είναι διπλάσια από την επιτάχυνση εκτός επιπέδου. Η μέγιστη επιτάχυνση είναι 10g με

μικρές όμως μετακινήσεις. Η σημασία αυτών των μετρήσεων είναι η εκ των προτέρων γνώση της συμπεριφοράς της γέφυρας έναντι αυτών των μη-ανθρωπογενών παραγόντων. Σκοπός είναι η λήψη προληπτικών μέτρων όταν υπάρξουν οι κρίσιμες συνθήκες, όπως για παράδειγμα, η διακοπή λειτουργίας της γέφυρας.

Είναι σημαντικό να γίνει έλεγχος της επίδρασης της θερμοκρασίας στα καλώδια λόγω χαρακτηριστικών του υλικού. Αναλόγως του προσανατολισμού με τον ήλιο, επηρεάζεται η μεταβολή της. Γίνεται με την τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας στα καλώδια για την αύξηση και την πτώση της θερμοκρασίας από την μέρα στη νύχτα. Από τον έλεγχο που έγινε στη γέφυρα Chi-Lu στην Ταιβάν (Lin H. κ.α.), υπήρξαν απότομες μεταβολές με μέγιστη μεταβολή 20°C με απότομη αύξηση τις πρωινές ώρες και σταδιακή μείωση το απόγευμα. Η θερμοκρασία μεταξύ διπλανών καλωδίων διαφέρει 2-3 °C το βράδυ. Σίγουρα θα ήταν προτιμότερο, να παρακολουθηθεί η θερμοκρασία και σε άλλη περίοδο πάλι σε 24ωρη βάση λόγω αλλαγής θέσης του ήλιου και διαφορετικών εποχών. Η μεταβολή της θερμοκρασίας για 24 ώρες φαίνεται στο σχήμα 5.4.1.



Σχήμα 5.4.1 Μεταβολή θερμοκρασίας σε ένα 24ώρο στα καλώδια L18 και R18 που είναι στη μέση της αριστερής και δεξιάς ομάδας των καλωδίων (Lin H. κ.α.).

5.5 Παρακολούθηση επιδείνωσης γέφυρας

Στη γέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα, η παρακολούθηση της διάβρωσης θα γίνει με ένα αισθητήρα διάβρωσης για να συλλέγει μετρήσεις της περιεκτικότητας ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα στην απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια του σκυροδέματος μέχρι τη θέση του αισθητήρα (Marsh P. & Frangopol Dan). Για τη γέφυρα, θεωρείται ότι η αστοχία του καταστρώματος ισοδυναμεί με την αστοχία της

γέφυρας για αυτό και εξετάζεται το κατάστρωμα. Η τυχαία μεταβλητή είναι η περιεκτικότητα ιόντων χλωρίου $C(x, t)$ που δίνεται από την εξίσωση:

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\}$$

Όπου C_0 : συγκέντρωση χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος

D : συντελεστής διάχυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα

erf : standard error function

και ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης T_{corr} είναι:

$$T_{corr} = \frac{x^2}{4D \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{th}}{C_0} \right) \right]^2}$$

Όπου: x : βάθος από την επιφάνεια σκυροδέματος

erfc^{-1} : αντιστρόφως ανάλογο του standard error function

C_{th} : οριακή τιμή περιεκτικότητας χλωριδίων

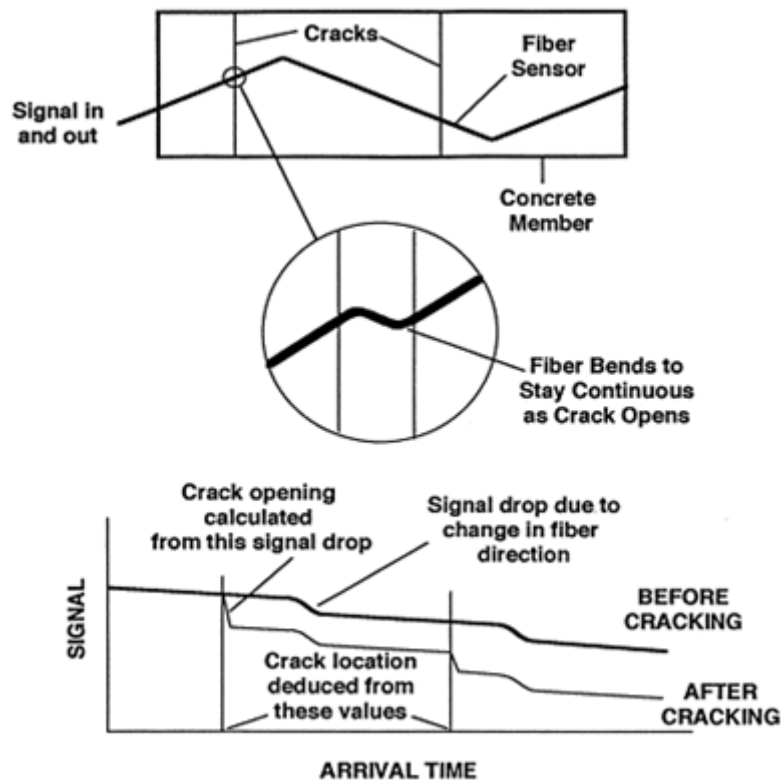
C_0 : επιφανειακή περιεκτικότητα χλωρίων

Η μεταβλητή του συστήματος είναι η ροπή στο κατάστρωμα όπου το Safety Margin M ισούται με $M = M_R - M_Q$ και χαρακτηρίζονται από ντετερμινιστικές και τυχαίες μεταβλητές που φαίνονται στην πηγή και εισάγει το εμβαδόν του οπλισμού που είναι διαβρωμένος. Με την προσομοίωση Monte Carlo, υπολογίζεται η συνάρτηση πυκνότητας του χρόνου έναρξης της διάβρωσης του διαμήκους οπλισμού και μετά με υπολογισμό υπολογίζεται το εμβαδόν του οπλισμού που έχει μειωθεί.

Η παρακολούθηση της διάβρωσης του οπλισμού του σκυροδέματος γίνεται και με την τοποθέτηση linear polarization rate αισθητήρα στην επιφάνεια του οπλισμού για μέτρηση του βαθμού διάβρωσής και παρακολούθηση των τριών σταδίων της διάβρωσης. Το μοντέλο έχει τυχαία μεταβλητή την είσοδο ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα και εξετάζει τη θέση που βρίσκονται τα ιόντα και προσδιορίζει το χρόνο που πραγματοποιείται. Η εκλογή της βέλτιστης θέσης τους γίνεται μέσα από ένα μοντέλο (Marsh P. & Frangopol Dan) που συνδυάζει την ακρίβεια μέτρησης και το κόστος. Το κατάστρωμα που είναι το σύστημα μελέτης χωρίστηκε σε κρίσιμα μέλη που αποτελούν τα μέλη του συστήματος. Κάθε τρία εφαπτόμενα μέλη θεωρούνται ότι είναι παράλληλα μεταξύ τους, και σε σειρά με τα άλλα τρία εφαπτόμενα μέλη. Το μοντέλο υπολογίζει το βαθμό διάβρωσης, και στη συνέχεια, με άλλα μοντέλα, προσδιορίζεται ο τρόπος συντήρησης αναλόγως του βαθμού διάβρωσης.

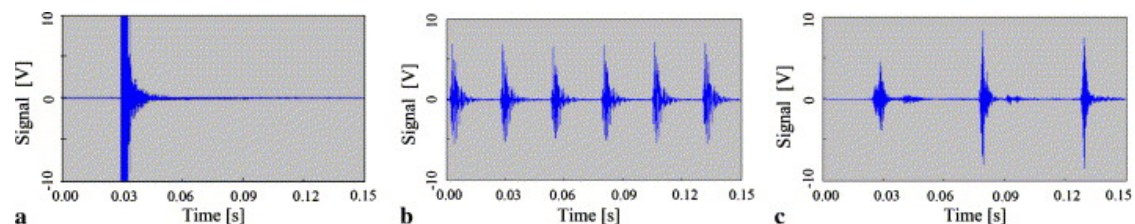
Ο εντοπισμός ρωγμών στο σκυρόδεμα είναι εφικτός με τη χρήση acoustic emission αισθητήρων στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Ohno K. & Ohtsu M.). Η ανάλυση του κύματος που λαμβάνει ο αισθητήρας δίνει πληροφορίες για τη θέση της ρωγμής και με το λόγο του χρόνου για την πραγματοποίηση της μέγιστης τιμής του κύματος προς τη μέγιστη τιμή του κύματος και με τη μέση συχνότητα του κύματος διακρίνεται η ρωγμή σε αστοχία λόγω κάμψης ή τέμνουσας. Όσο περισσότεροι είναι

οι αισθητήρες τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει. Πέραν της θέσης της ρωγμής είναι σημαντικό να είναι γνωστό το πάχος και πώς αυτό μεταβάλλεται με το χρόνο. Αυτό γίνεται με την τοποθέτηση fiber optic αισθητήρα στην επιφάνεια του σκυροδέματος (βλ. σχήμα 5.5.1) (Leung C. κ.α.). Η λειτουργία στηρίζεται στη μείωση του σήματος που στέλνει ο αισθητήρας στο σκυρόδεμα λόγω αύξησης της απόστασης που διανύει. Ο fiber optic αισθητήρας μπορεί να είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό του σκυροδέματος (Leung C. κ.α.; Zhang Z. & Ansari F.).



Σχήμα 5.5.1 Μεταβολή του σήματος με τον εντοπισμό ρωγμής στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Ο εντοπισμός σπασμένου τένοντα με τη χρήση συνεχούς παρακολούθησης γίνεται με τη τοποθέτηση acoustic emission αισθητήρων (Fricker S. & Vogel T.) στην επιφάνεια του προεντεταμένου σκυροδέματος. Με την ανάλυση του κύματος, όταν υπάρξει απότομη αύξηση του ύψους, τότε πραγματοποιείται σπάσιμο. Από τη γέφυρα, δίνονται τα κύματα για σπασμένο τένοντα, drilling και chipping (βλ. σχήμα 5.5.2).



Σχήμα 5.5.2 Κύματα για σπασμένο τένοντα, drilling και chipping. (Fricker S. & Vogel T.)

5.6 Συντήρηση αδύναμων μελών

Όταν κατά τους ελέγχους εντοπιστούν αδυναμίες στη γέφυρα, τότε πρέπει να ληφθούν μέτρα επισκευής ή αντικατάστασης όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4. Οι πιο γνωστές λύσεις των προβλημάτων φαίνονται στον Πίνακα 5.6.1.

Αδυναμίες σε μέλη καλωδιοτής γέφυρας	Προτεινόμενες λύσεις
<i>Ρωγμή στην επιφάνεια σκυροδέματος</i>	<i>Κλείσιμο ρωγμής με epoxy με ένεση ή με τη βαρύτητα, modified epoxy, methyl methacrylate, high molecular weight methacrylate</i>
<i>Για επισκευή σπασμένου σκυροδέματος, ένωση κόμβου και για πλάκες τοποθέτησης εφένδρανων</i>	<i>Ψηλής αντοχής πολυμερή σκυρόδεμα που να είναι ανθεκτικό και ο χρόνος σκλήρυνση να είναι μικρός</i>
<i>Διαβρωμένος οπλισμός / ιόντα χλωρίου στο σκυρόδεμα</i>	<i>Cathodic Protection</i>
<i>Διαβρωμένος/ο και σπασμένος/ο τένοντας ή καλώδιο</i>	<i>Αντικατάσταση</i>
<i>Μη ανεκτές δονήσεις γέφυρας</i>	<i>Αποσβεστήρες στα καλώδια ή στο κατάστρωμα</i>
<i>Μείωση αντοχής προεντεταμένο σκυροδέματος</i>	<i>Ενίσχυση αντοχής με μεταλλικές πλάκες ή FRP πλάκες</i>

Πίνακας 5.6.1 Προτεινόμενες λύσεις για επισκευής ή αντικατάσταση αποδυναμωμένου μέλους

5.7 Συζήτηση

Η καλωδιοτή γέφυρα, λόγω υλικών και τρόπου κατασκευής, αντιμετωπίζει συγκεκριμένα προβλήματα σχετικά με την επιδείνωση και την κόπωση. Όλα τα μέλη επηρεάζονται από τα στοιχεία περιβάλλοντος και τα φορτία που ασκούνται σε αυτά. Αν και τα μέλη εξετάζονται μεμονωμένα για θέματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος και μεταλλικών στοιχείων, όπως είναι οι τένοντες και τα καλώδια, για θέματα κόπωσης, εξετάζονται και για τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους που συνεπάγεται με την αξιολόγηση της κατάστασης του φορέα. Απαραίτητα εργαλεία είναι τα ευφυή συστήματα παρακολούθησης και τα μοντέλα βελτιστοποίησης για αξιολόγηση, εύρεση της βέλτιστης δράσης συντήρησης και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των στοιχείων στο μέλλον.

Συμπεράσματα

Η γέφυρα είναι ένας ζωντανός οργανισμός όπως τον άνθρωπο και η κάθε μία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, αν και ορισμένα είναι παρόμοια με αυτά άλλων γεφυρών. Αποτελείται από τον κύριο φορέα – θεμελίωση, πυλώνες και κατάστρωμα – και η αστοχία ενός από αυτά συνεπάγεται με την αστοχία της γέφυρας. Ο χρόνος φέρνει επιφανειακές φθορές αλλά και εσωτερικές, αλλού λιγότερης και αλλού περισσότερης σημασίας. Το κόστος επαναφοράς είναι μεγάλο και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα διακοπής της λειτουργίας της κατασκευής. Υπάρχει η δυνατότητα της παρακολούθησης της υγείας μέσα από τις επιθεωρήσεις, σε διακριτό και συνεχές χρόνο. Το ίδιο συμβαίνει με τον άνθρωπο. Ο κάθε ένας έχει μοναδική προσωπικότητα, αλλά κάποιοι μοιάζουν με κάποιους άλλους. Όταν ένα από τα ζωτικά του όργανα υπολειτουργεί, όλος ο οργανισμός είναι σε κακή κατάσταση. Το σώμα γερνά και δεν είναι εύκολο να επαναφερθεί στην αρχική του κατάσταση και επιπλέον κοστίζει. Ένα ατύχημα είναι αρκετό για να θέσει σε κίνδυνο τη ζωή του, όπως ένα συμβάν είναι αρκετό να μειώσει την αντοχή της γέφυρας, όπως είναι ο σεισμός ή ένα τροχαίο δυστύχημα στο φορέα.

Η γέφυρα από μόνη της δεν μπορεί να «αναγεννηθεί», για αυτό ο μηχανικός παίζει το ρόλο του «από μηχανή θεού». Μέσα από ένα Σύστημα Διαχείρισης Γέφυρας, αξιολογείται η κατάσταση ανά μέλος, με βάση τα στοιχεία από τις επιθεωρήσεις και με βάση τις απαιτήσεις απόδοσης και κόστους, λαμβάνονται αποφάσεις ως προς τις ενέργειες για διατήρηση ή αύξηση της απόδοσής της. Η μοντέρνα προσέγγιση του συστήματος που εδραιώθηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες είναι η χρήση των ευφυή συστημάτων παρακολούθησης. Περιλαμβάνει την επιθεώρηση με μη-καταστροφικές μεθόδους και συνεχή συστήματα παρακολούθησης της υγείας του μέλους και του φορέα, την εύρεση της στρατηγικής συντήρησης, με χρήση πιθανολογικών μοντέλων, βασισμένων στην αξιοπιστία. Η εφαρμογή τους έχει εντατικοποιηθεί σε γέφυρες μεγάλης σπουδαιότητας, ενώ σε γέφυρες με μικρότερη σπουδαιότητα γίνεται σε μικρότερο βαθμό. Ο λόγος είναι το κόστος εξοπλισμού και επεξεργασίας των δεδομένων και η απουσία γνώσης επί αυτού του τομέα. Τα πλεονεκτήματα των μοντέρνων μεθόδων είναι αρκετά και σημαντικά για αυτό στα επόμενα χρόνια θα χρησιμοποιούνται ευρέως για καλύτερη διαχείριση των γεφυρών.

Η ανάγκη αυτών των μεθόδων προήλθε από την επιθυμία για μεθόδους λιγότερου λειτουργικού χρόνου, μεγαλύτερης ακρίβειας που να επιλύουν περίπλοκα προβλήματα όπως αυτά της διαχείρισης των γεφυρών. Σκεπτόμενοι μόνο το συνολικό κόστος που έχει η γέφυρα, αναγκάζει τους κατασκευαστές να κινηθούν προς αξιόπιστες μεθόδους. Είναι από όλους αποδεκτό, ότι ο χρόνος και το εξωτερικό περιβάλλον επιδεινώνει την κατασκευή. Η πρόληψη του φαινομένου είναι η καλύτερη λύση αφού τα έξοδα για έργα επιδιόρθωσης και αντικατάστασης θα είναι περισσότερα και τέτοιες λύσεις θα απαιτούν διακοπή λειτουργίας της γέφυρας, πράγμα ανεπιθύμητο. Για αυτό σε σπουδαίες γέφυρες, προτείνεται η εφαρμογή ασύρματων δικτύων αισθητήρων, που να επιτρέπουν την παρακολούθηση των

μηχανισμών της επιδείνωσης. Ακόμα, προτείνεται η παρακολούθηση της περιεκτικότητας ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα και της ρωγμάτωσης του καταστρώματος από τη διάβρωση ή τα φορτία κυκλοφορίας. Σε συνδυασμό με τακτικές επιθεωρήσεις, να εφαρμόζονται ευφυής τεχνικές, όπως είναι οι μη-καταστροφικές μέθοδοι. Για μικρότερης σπουδαιότητας γέφυρες, προτείνεται η εφαρμογή ασύρματων δικτύων αισθητήρων για μικρό χρονικό διάστημα και η παρακολούθηση λιγότερων παραμέτρων.

Βέβαια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, υπάρχει η δυνατότητα να εντοπίζονται αδυναμίες στην κατασκευή με τον καθορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών της, δηλαδή τις ιδιομορφές, τις ιδιοσυχνότητες και την απόσβεση, μέσα από την μέτρηση των επιταχύνσεων της κατασκευής. Αυτό δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθεί η «υποψία», και με περεταίρω ελέγχους είτε με άλλο ασύρματο δίκτυο ή με μη-καταστροφικές μεθόδους, να βρεθεί το ασθενές μέλος. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε μεγάλου ανοίγματος γέφυρες, που πέραν από την παρακολούθηση της γενικής κατάστασης της, είναι επιρρεπής στις ταλαντώσεις λόγω του μικρού βάρους και του σχήματός της. Το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο λόγω των καλωδίων και των μικρών ταχυτήτων ανέμου, που πιθανών να οδηγήσει σε συντονισμό.

Οι ευρέως εφαρμόσιμες μη-καταστροφικές μέθοδοι είναι: η οπτική επιθεώρηση, η Ultrasonic επιθεώρηση, η Acoustic emission επιθεώρηση, η Impact echo επιθεώρηση και η Ground penetrate radar επιθεώρηση, με την πρώτη να είναι η πιο εύκολη και οικονομική επιλογή με λιγότερη όμως αξιοπιστία. Στα περισσότερα είδη επιθεώρησης, ο κύριος τρόπος επιθεώρησης είναι ο οπτικός και εάν εντοπιστούν ενδείξεις περαιτέρω αδυναμίας, χρησιμοποιούνται οι εξειδικευμένες μέθοδοι. Η Ultrasonic inspection χρησιμοποιείται για εντοπισμό και περιγραφή ρωγμών σε μέλη από σκυρόδεμα καθώς και εντοπισμό τενόντων και οπλισμού σε αυτό. Η Impact Echo μέθοδος εφαρμόζεται για εντοπισμό ρωγμών σε μέλη από σκυρόδεμα, για εντοπισμό διαβρωμένου τένοντα και οπλισμού και για προσδιορισμό της θέσης τένοντα και οπλισμού. Η Acoustic emission επιθεώρηση είναι γνωστή για τον εντοπισμό ρωγμών σε μέλη από σκυρόδεμα, σπασμένου καλωδίου και διαβρωμένου τένοντα και καλωδίου. Τέλος η ground penetrating radar μέθοδος εφαρμόζεται για εντοπισμό ρωγμών σε μέλη από σκυρόδεμα, τη θέση των τενόντων και των κενών στις οπές του τένοντα και για εκτίμηση της υγρασίας στο σκυρόδεμα. Για την εκτίμηση της κατάστασης ενανθράκωσης του σκυροδέματος και διάβρωσης του οπλισμού χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι με την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος. Για τον εντοπισμό διαβρωμένου καλωδίου χρησιμοποιείται πέραν της οπτικής επιθεώρησης, ο ηλεκτρομαγνητικός έλεγχος σε κάθε καλώδιο.

Από πλευράς των αισθητήρων, οι πιο γνωστοί αισθητήρες είναι οι ακόλουθοι: το επιταχυνσιόμετρο για μέτρηση επιτάχυνσης, το θερμόμετρο για καταγραφή μεταβολών θερμοκρασίας σε φέροντα στοιχεία, ο αισθητήρας υγρασίας για ατμόσφαιρα, έδαφος και φέροντα στοιχεία, ανεμόμετρο για ένταση και διεύθυνση του ανέμου, ο ηλεκτρομηχανικός αισθητήρας Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός

Μετασχηματιστής (LVDT), για μετατοπίσεις φερόντων στοιχείων και υπολογισμού βέλους κάμψης, το μηκυνσιόμετρο (strain gauges) για καθιζήσεις, ανυψώσεις, επιμηκύνσεις και σμικρύνσεις στα στοιχεία, οι acoustic emission αισθητήρες, για εντοπισμό των ηχητικών κυμάτων και το σύστημα με χρήση ανόδου και καθόδου για εντοπισμό διάβρωσης.

Συνεπώς, η επιθεώρηση με τη χρήση μη-καταστροφικών μεθόδων και δικτύου αισθητήρων είναι μια επένδυση για την προληπτική και στοιχειώδη συντήρηση της γέφυρας. Το πώς οργανώνεται το χρονοδιάγραμμα των επιθεωρήσεων καθορίζεται από την ομάδα διαχείρισης. Υπάρχουν δύο κύριες περιπτώσεις. Η πρώτη είναι η απόφαση για συνεχή παρακολούθηση της συμπεριφοράς της γέφυρας για όλη τη ζωή της που περιλαμβάνει τις τακτικές επιθεωρήσεις. Η δεύτερη είναι η επιθεώρηση μέσω των τακτικών επιθεωρήσεων και η χρήση αισθητήρων για μικρό χρονικό διάστημα και για συγκεκριμένες παραμέτρους. Στη πρώτη περίπτωση, λαμβάνονται εκ των προτέρων μέτρα για τοποθέτηση των αισθητήρων. Λόγω του περιορισμού αποθεμάτων ενέργειας και αριθμού δεδομένων, γίνεται παρακολούθηση είτε των δυναμικών χαρακτηριστικών της γέφυρας, που έχει την ικανότητα να προειδοποιεί για αδυναμία στη κατασκευή και να ελέγχεται στην συνέχεια με εξειδικευμένες μεθόδους, είτε παρακολούθηση συγκεκριμένης παραμέτρου, λόγω της κατασκευής ή του εξωτερικού περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα η παρακολούθηση της διάβρωσης του σκυροδέματος όταν η γέφυρα βρίσκεται σε υγρό περιβάλλον. Οι εξειδικευμένες μέθοδοι είναι οι μη-καταστροφικές μέθοδοι. Στη δεύτερη περίπτωση, όταν εντοπιστεί από τις μη-καταστροφικές μεθόδους αδυναμία, εάν η παράμετρος μεταβάλλεται με το χρόνο θα προτιμηθεί ένα δίκτυο αισθητήρων για περισσότερες μετρήσεις και εξαγωγή επιρροής του χρόνου σε αυτό. Ακόμα, είναι δυνατό να οριστεί εξαρχής σε συγκεκριμένα χρόνια και δομικά μέλη η χρήση αισθητήρων για να ελεγχθεί η κατάστασή του.

Οι μέθοδοι δρουν ως προληπτικά μέτρα ελέγχου για να εντοπίσουν την αδυναμία στην έναρξη της και όχι όταν θα πρέπει να γίνει επισκευή ή αντικατάσταση και ως δραστικά μέτρα ελέγχου. Προληπτικό μέτρο ελέγχου είναι η παρακολούθηση των ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα, η παρακολούθηση της κατάστασης του σκυροδέματος μέσα από τους acoustic emission αισθητήρες, η παρακολούθηση της κατάστασης του τένοντα και η παρακολούθηση της μεταβολής των δυναμικών χαρακτηριστικών της γέφυρας. Δραστικό μέτρο είναι όταν έχει ήδη εντοπιστεί αδυναμία. Ένα παράδειγμα είναι η παρακολούθηση της κατάστασης του τένοντα στο προεντεταμένο σκυρόδεμα, όταν οπτικά αναγνωρίζεται ότι η αντοχή του σκυροδέματος έχει μειωθεί. Άλλο παράδειγμα είναι η παρακολούθηση της αντοχής της γέφυρας μετά από μεγάλο σεισμό ή μεγάλο άνεμο, μέσω της παρακολούθησης των δυναμικών χαρακτηριστικών της.

Μια σημαντική παράμετρος της απόφασης για την απόδοση της γέφυρας είναι η αξιοπιστία που καθορίζεται από την αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα υπάρχει σε κάθε βήμα της διαχείρισης της γέφυρας, στις μετρήσεις και στο μοντέλο. Για αυτό και προτιμάται η επιθεώρηση να γίνεται με εξειδικευμένα όργανα έναντι της οπτικής

επιθεώρησης για καλύτερο προσδιορισμό της κατάστασης του εξεταζόμενου μέλους. Η ποιότητα των μετρήσεων εξαρτάται από την κατάσταση της υγείας της κατασκευής, δηλαδή εάν έχει περισσότερες ή λιγότερες φθορές, ποια σημεία ή μέλη έχουν φθαρεί την ηλικία της, το περιβάλλον που βρίσκεται η γέφυρα, δηλαδή εάν υπάρχει υγρασία, διοξείδιο του άνθρακα, την ευαισθησία του οργάνου μέτρησης, ατέλειες των υλικών που χρησιμοποιηθήκαν καθώς και την εμπειρία του επιθεωρητή. Επομένως, εάν παραμεληθούν τα πιο πάνω, τότε τα αποτελέσματα θα έχουν σφάλμα και οι αποφάσεις για επισκευή και συντήρηση που θα ληφθούν δεν θα στηρίζονται σε ακριβή δεδομένα. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα του προσδιορισμού της ακρίβειας των μετρήσεων με την πιθανότητα εντοπισμού.

Στο επόμενο βήμα, στο μοντέλο βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης η αβεβαιότητα υπάρχει από τις παραδοχές και τον τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων. Όταν η ανάλυση στηρίζεται στην αξιοπιστία και κατ' επέκταση στις πιθανότητες, τότε η αβεβαιότητα μειώνεται λόγω του ότι αρκετές από τις μεταβλητές του μοντέλου είναι τυχαίες. Αβεβαιότητα υπάρχει και στο κόστος που αντιστοιχεί σε κάθε δράση συντήρησης από την άποψη της τιμής του προεξοφλητικού επιτοκίου και του υπολογισμού όλου του κόστους που έχει αυτή η διαδικασία. Αυτό το κόστος αποτελείται από το κόστος απόφασης της προτεινόμενης λύσης, το κόστος κατασκευής, το κόστος εξοπλισμού και το κόστος των υπαλλήλων. Αβεβαιότητα παρουσιάζεται και στη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών και στον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος.

Η λήψη απόφασης για την απόδοση της κατασκευής, γίνεται με την επεξεργασία των μετρήσεων της επιθεώρησης και εάν η απόδοση είναι κάτω ή πλησιάζει το κατώτατο όριο απόδοσης πρέπει να ληφθούν μέτρα συντήρησης, επισκευής ή αντικατάστασης μελών της γέφυρας. Υπάρχουν μοντέλα βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης με πολλά κριτήρια που δίνουν τη βέλτιστη, δηλαδή την αποτελεσματικότερη επιλογή συντήρησης. Τα δύο βασικά κριτήρια είναι η απόδοση και το κόστος της κάθε ενέργειας στο κύκλο ζωής. Αυτά τα μοντέλα στηρίζονται στην αξιοπιστία και την χρήση πιθανοτήτων και συνηθίζεται η χρήση Γενετικού Αλγόριθμου που είναι εφαρμόσιμος για περίπλοκα συστήματα όπως είναι οι γέφυρες. Απαραίτητη ενέργεια, για αύξηση της ακρίβειάς των μοντέλων, είναι η αναβάθμισή τους με την εισαγωγή νέων μετρήσεων από τις επιθεωρήσεις. Το αποτέλεσμα αυτών των αλγορίθμων φαίνεται στη μείωση του συνολικού κόστους της γέφυρας.

Η μοντέρνα μορφή του Συστήματος Διαχείρισης Γέφυρας, με το Σύστημα Παρακολούθησης Υγείας της Υποδομής, έχει εδραιωθεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε γέφυρες μεγάλης σπουδαιότητας. Περιοριστικοί παράγοντες για εφαρμογή του και σε άλλες γέφυρες, είναι το κόστος εξοπλισμού και επεξεργασίας των δεδομένων ως προς το συνολικό κόστος της γέφυρας. Είναι γνωστό το γεγονός της μείωσης του συνολικού κόστους, λόγω της βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης όμως σίγουρα δεν είναι αρκετό το επιχείρημα για γέφυρες μικρότερης σπουδαιότητας. Άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με το δίκτυο αισθητήρων είναι τα αποθέματα ενέργειας των κόμβων που αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για συνεχή παρακολούθηση, για

μεγάλο χρονικό διάστημα και για παραμέτρους πέραν της μιας. Επιπλέον, τα μοντέλα επεξεργασίας των μετρήσεων απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Κλείνοντας, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων μιας γέφυρας ή συστήματος γεφυρών πρέπει να υπάρχει ένα Σύστημα Διαχείρισης Γέφυρας ή Συστήματος Γεφυρών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης. Απαραίτητο εργαλείο είναι τα ευφυή συστήματα παρακολούθησης. Με βάση τα κριτήρια για συνεχή λειτουργία της γέφυρας με ασφάλεια και συνέχιση της εξυπηρέτησης του σκοπού της, στο κύκλο ζωής της με οικονομικά συμφέρον τρόπο, απαιτείται ένα ολοκληρωμένο σχέδιο επιθεώρησης, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της. Συνεπώς, η συντήρηση θα είναι προληπτική για θέματα επιδείνωσης και κόπωσης. Δηλαδή, η συντήρηση θα πραγματοποιείται πριν το μέλος αστοχήσει ή ακόμα πριν να παρουσιαστούν ενδείξεις αδυναμίας. Να μην ξεχνάμε ότι σήμερα με τη υπολογιστική ισχύ των υπολογιστών, οι αλγόριθμοι είναι ικανοί να επεξεργάζονται περίπλοκα ζητήματα και να συνδυάζουν γεγονότα, έτσι ο μηχανικός μπορεί να εκμεταλλευτεί τις πολλές μετρήσεις που λαμβάνονται από την επιθεώρηση και να κάνει τη βέλτιστη επιλογή δράσης.

Αναφορές

Κουνούδης Α. (2010) *Σημειώσεις μαθήματος Έξυπνη διαχείριση έργων υποδομής με αισθητήρες*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Ταντελέ Έλια (2009) *Σημειώσεις μαθήματος Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος Ι*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Ταντελέ Έλια (2010) *Σημειώσεις μαθήματος Αντοχή στο χρόνο και Διαχείριση επικινδυνότητας έργων υποδομής*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας (2009) *Ενόργανη Παρακολούθηση δομικής κατάστασης σημαντικών έργων με σκοπό την πληρέστερη συντήρησή τους*.

Χατζημιτσής Δ. (2007) *Γεωδαισία Ι Σημειώσεις μαθήματος: μετρήσεις & Σφάλματα*, Τμήμα Πολιτικών μηχανικών και μηχανικών γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Adachi Y. (2005) *Monitoring Technologies for maintenance and Management of Urban Highways in Japan, A case of Hanshin Express Public Corporation*, Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, Chapter I, pg. 13-22

Adhikary B & Mutsuyoshi H. (2006) *Shear strengthening of RC beams with web-bonded continuous steel plates*, Construction and Building Materials, Vol. 20, Issue 5, pg. 296-307

Adhikary B & Mutsuyoshi H. (2006) *Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques*, Construction and Building Materials, Vol. 20, Issue 6, pg. 366-373

Al-Saidy A., Klaiber F. & Wipf T. (2007) *Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer plates*, Construction and Building Materials, Vol. 21, Issue 2, pg. 295-302

Arndt R. W., Jalinoos F., Cui J. & Huston D. (2010) *Periodic NDE in support of structural health monitoring of bridges*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization – Frangopol, sause & Kusko, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2, IABMAS

Atkins C., Lambert P., Brueckner R., Merola R. & Foster A. (2010) *Sustainable and cost effective solutions to life extension of bridges*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization – Frangopol, Sause & Kusko, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2, IABMAS

Bader J. (2008) *Nondestructive Testig and Evaluation of Steel Bridges*, ENCE 710. Λήφθηκε από http://www.ence.umd.edu/~ccfu/ref/BADER_NDE_of_Steel_Bridges.pdf

Biondini F., Frangopol Dan & Malerba P. (2008) *Uncertainty effects on ;ifetime structural performance of cable-stayed bridges*, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 23, Issue 4, pg. 509-522

Bocchini P. & Frangopol Dan. (2011) *A probabilistic computational framework or bridge network optimal maintenance scheduling*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 96, Issue 2, pg. 332-349

Bungey J (2004) *Sub-surface radar testing of concrete: a review*, Construction and Building Materials, Vol. 18, Issue 1, pg. 1-8

Ceravolo R., Pescatore M. & Stefano A. (2009) *Symptom-based reliability and generalized repairing cost in monitored bridges*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94, Issue 8, pg. 1331-1339

Chatelet R. & Yalaoui F. (2003) *New methods to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 82, Issue 3, pg. 247-255

Chase S. (2005) *The role of sensing and measurement in achieving FHWA;s strategic vision for highway infrastructure*, Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, Chapter I, pg. 13-32, SpringerLink

Chean S., Hauser E. et al (2010) *Enhanced bridge management via integrated remote sensing*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization – Frangopol, Sause & Kusko, Taylor & Francis Group, London, ISBN 976-0-415-87786-2, IABMAS

Cho S., Jo h., Jang S., Park J., Jung H., Yun C., Spencer B., Jr. & Seo J. (2010) *Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: deployment & evaluation*, Smart Structures & Systems, Vol. 6, No.5-6, pg. 439

Cho S., Jo h., Jang S., Park J., Jung H., Yun C., Spencer B., Jr. & Seo J. (2010) *Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: data analyses*, Smart Structures & Systems, Vol. 6, No.5-6, pg. 461-480

Colla C. & Lausch R. (2003) *Influence of source frequency on impact-echo data quality for testing concrete structures*, NDT & E international, Vol. 36, Issue 4, pg 203-213

Courard L., Leears J., Michel F. & Garbacz A. (2011) *Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems*, Construction and Building materials, Vol 25, Issue 5, pg. 2488-2494

Dinitz M & Stenko M. (2010) *Choosing the appropriate sustainable polymer concrete material for bridge preservation and maintenance*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, IABMAS 2010, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2

Dubbs N., Moon F. & Aktan A. (2010) *Design and implementation of load cell bearings to measure dead and live load effects in an aged long span bridge*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, IABMAS 2010, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2

Duffo G. & Farina S. (2009) *Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures*, Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 8, pg. 2746-2751

Hernandez M., Izquierdo M, Ibanez A., Anaya J. & Ultate L. (2000) *Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE*, Ultrasonics, Vol. 38, Issue 1-8, pg. 531-533

Hsiao C., Cheng Chia-Chi, Liou T. & Juang Y (2008) *Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method*, NDT & E International, Vol. 41, Issue 2, pg 98-107

Issa C. & Debs P. *Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete*, Construction and Building Material, Vol. 21, Issue 1, pg. 157-163

Feltrin G, Meyer J., Bischoff R. & Saukh O. (2010) *In-node data processing in structural monitoring with wireless sensor networks*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, IABMAS 2010

FHWA (2001) *Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges*, NDE Validation Centre, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transport Publication Nos. FHWA-RD-01-020 and -021, USA Λήφθηκε από <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/nde/pdfs/01105.pdf>

FHWA (2001) *Highway Bridge Inspection: State-of-the Practice Survey*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transport Publication Nos. FHWA-RD-01-033, USA Λήφθηκε από <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/nde/pdfs/01033.pdf>

FIELD TRIALS DRAFT (2000) *Departmental advice note BA 81 Whole life assessment of highway bridges and structures*

Frangopol Dan, Strauss A. & Kim S. (2008) *Use of monitoring extreme data for the performance prediction of structures: General approach*, Engineering Structures, Vol. 30, Issue 12, pg. 3644-3653

Fricker S. & Vogel T. (2007) *Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring*, Construction and Building Materials, Vol. 21, Issue 3, pg. 501-510

Fujino Y. (2002) *Vibration, control and monitoring of long-span bridges-recent research, development and practice in Japan*, Journal of Construction Steel Research, Vol. 58, Issue 1, pg. 71-97

Gastineau A., Johnson T. & Schulz A. (2009) *Bridge Health Monitoring and Inspection – A survey of methods*, Minnesota Department of Transport, Research Services Section. Λήφθηκε από <http://www.lrrb.org/pdf/200929.pdf>

Grosso A., Lanata F., Posenato D. & Mercalli A. (2010) *Validation of an SHM procedure for concrete bridges based on static strain records*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, IABMAS 2010

Highway Agency (1999) *Serviceable life of highway structures and their components*

Hoult1 Neil A.*, Fidler Paul R.A., Hill Peter G. & Campbell R. Middleton2 (2010) *Wireless structural health monitoring of bridges: present and future*, Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 3(2010) 277-290 277

Kashefi K., Zeinoddini M. & Zandi A. (2010) *Assessment of remaining fatigue life of aging orthotropic steel deck bridges*, IABMAS, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2

Koh H., Kim S. & Choo J. *Recent Development of bridge health monitoring in Korea*, Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, Chapter I, pg. 33-42

Kohl C. & Streicher D. (2006) *Results of reconstructed and fused NDT-data measured in the laboratory and on-site at bridges*, Cement & Concrete Composites, Vol. 28, pg. 402-413

Kwon. K & Frangopol D. (2010) *Bridge retrofit design optimization for fatigue based on monitoring and FE analysis*, IABMAS, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2

Laurens S., Balayssac J., Rhazi J. Klysz G. & Arliguie G. (2005) *Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling*, Materials and Structures, Vol. 38, No. 9, pg. 827-832

Lee J. & Yun C. (2006) *Damage detection of steel girder bridges using ambient vibration data*, Engineering Structures, Vol. 28, Issue 6, pg. 912-925

Leung C., Elvin N., Olson N., Morse T. & He Y. (2000) *A novel distributed optical crack sensor for concrete structures*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, Issue 2-3, pg. 133-148

Liang Ming-Te & Su Po-Jen (2001) *Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method*, Cement and Concrete Research, Vol. 31, Issue 10, pg. 1427

Li H., Ou J. & Zhou Z. (2009) *Applications of optical fibre Bragg gratings sensing technology-based smart stayed cables*, Optics and Laser in Engineering, Vol. 47, Issue 10, pg. 1077-1084

Lin H., Chen C., Chen P., Tsai F., Huang J., Li J., Lin C. & Wu W. (2010) *Design of wireless sensor network and its application for structural health monitoring of cable-stayed bridge*, Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 8, pg. 939-951

Liu M., Frangopol Dan & Kwon K. (2010) *Optimization of retrofitting distortion-induced fatigue cracking of steel bridges using monitored data under uncertainty*, Engineering Structures, Vol. 32, Issue 11, pg. 3647-3677

Mark P., Bender M., Strack M., Fust Ch. & Birtel V. (2010) *Shear resistances and strengthening of aged prestressed concrete bridges considering deterioration and fatigue effects*, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, IABMAS 2010

Matta F., Nanni A., Abdelrazaq A., Gremel D. & Koch R. (2009) *Externally post-tensioned carbon FRP bar system for deflection control*, Construction and Building Materials, Vol. 34, Issue 4, pg. 1628-1639

Marsh P. & Frangopol Dan (2008) *Reinforced concrete bridge deck reliability model incorporating temporal and spatial variations of probabilistic corrosion rate sensor data*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93, Issue 3, pg. 394-409

McCarter W. & Vennesland (2004) *Sensor systems for use in reinforced concrete structures*, Construction and Building Materials, Vol. 18, Issue 6, pg. 351-358

Muldoon R., Chalker A., Forde M., Ohtsu M. & Kunisue F. (2007) *Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact-echo, SIBIE and tomography*, Construction and Building Materials, Vol. 21, Issue 3, pg. 527-237

NDT Resource Center Weldments, Ultrasound. Λήφθηκε από <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/SelectedApps/weldments.htm>

Nair A. & Cai C.S. (2010) *Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies*, Engineering structures, Vol. 32, Issue 6, pg. 1704-1714

Neves L. * Frangopol Dan (2005) *Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 89, Issue 2, pg. 185-198

Ni Y., Wang X. & Chen Z. (2007) *Field observations of rain-wind-induced cable vibration in cable-stayed Dongting Lake Bridge*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 95, Issue 5, pg. 303

Noortwilk Jan & Frangopol Dan. (2004) *Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures*, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 19, Issue 4, pg. 345-359

Oh J., Jang G., Oh S., Lee J. H., Yi B., Moon Y., Lee J.S. & Choi Y. (2009) *Bridge inspection robot system with machine vision*, Automation in Construction, Vol. 18, Issue 7, pg. 929-941

Ohno K. & Ohtsu M. (2010) *Crack classification in concrete based on acoustic emission*, Construction and Building Materials, Vol. 24, Issue 12, pg. 2339-2346

Okasha N. & Frangopol Dan. (2009) *Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA*, Structural Safety, Vol. 31, Issue 6, pg. 460-474

Parke G. & Hewson N. (2008) *ICE manual of bridge engineering Second Edition*, ICE, Thomas Telford Ltd ISBN 978-0-7277-3452-5

Ramadan S, Gaillet L., Tessier C. & Idrissi H. (2008) *Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique*, Applied Surface Science, vol, 254, Issue 8, pg. 2255-2261

Ren W. & Peng X. (2005) *Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests*, Computers & Structures, Vol. 83, Issue 8-9, pg. 536-550

RILEM Technical Committee (2010) *Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete, Measurement method for acoustic emission signals in concrete*, Materials and Structures, Vol. 43, No. 9, pg 1177-1181

RILEM Technical Committee (2010) *Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete, Test method for damage qualification of reinforced concrete beams by acoustic emission*, Materials and Structures, Vol. 43, No. 9, pg 1183-1186

Road Research (1981) *Bridge maintenance*, OECD road group

Road Research (1992) *Bridge management*, OECD road group

Shao X., Guo B. & Ni Y. (2010) *Instrumentation for reinforced concrete durability monitoring of Qingdao Bay Bridge*, IABMAS, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-87786-2

Shin H., Miyauchi H. & Tanaka K. (2011) *An experimental study of fatigue resistance on epoxy injection for cracked mortar and concrete considering the*

temperature effect, Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 3, pg. 1316-1324

Singh D. & Tiong R. (2005) *Development of life cycle costing framework for highway bridges in Myanmar*, International Journal of Project Management, Vol. 23, Issue 1, pg. 37-44

Song X., Wei J. & He T. (2009) *A method to repair concrete leakage through cracks by synthesizing super-absorbent resin in situ*, Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 1, pg. 386-391

Strauss A., Frangopol Dan & Kim S. (2008) *Use of monitoring extreme data for the performance prediction of structures: Bayesian updating*, Engineering Structures, Vol. 30, Issue 12, pg. 3654-3666

Tantele E. & Onoufriou T. (2009) *Optimum preventative maintenance strategies using genetic algorithms and Bayesian updating*, Ships and Offshore Structures, Vol. 4, No. 3, pg. 299-306

Washer Glenn A. (2000) *Developing NDE Technologies for Infrastructure Assessment*, Public Roads, Vol. 63 No4, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transport. Λήφθηκε από <http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/00jan/nde.cfm>

Washer Glenn A. (2003) *Improving Bridge Inspections*, Public Roads, Vol. 67 No3, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transport. Λήφθηκε από <http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/03nov/12.cfm>

Weng J., Loh C., Lynch J., Lu K., Lin P. & Wang Y (2008) *Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems*, Engineering Structures, Vol. 30, Issue 7, pg. 1820-1830

Whelan M., Gangone M., Janoyan K. & Jha R. (2009) *Real-time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge*, Engineering Structures, Vol. 31, Issue 10, pg. 2224-2235

Yang S., Frangopol Dan. & Neves L. (2006) *Optimum maintenance strategy for deteriorating bridge structures based on lifetime functions*, Engineering Structures, Vol. 28, Issue 2, pg. 196-206

Yuen K. & Lam H. (2006) *On the complexity of artificial neural networks for smart structures monitoring*, Engineering structures, Vol. 28, Issue 7, pg. 977-984

Yuyama S., Yokoyama K., Niitani K., Ohtsu M. & Uomoto T. (2007) *Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission*, Construction and Building Materials, vol 21, Issue 3, pg. 491-500

Zhang Z. & Ansari F. (2005) *Crack tip opening displacement in micro-cracked concrete by an embedded optical fiber sensors*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, Issue 16, pg. 2505-2518

Zheng r. & Ellingwood B.R. (1998) *Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis*, Structural safety Vol. 20, Issue 4, pg. 325-339

Zhu J & Popovics J., (2005) *Non-contact imaging for surface-opening cracks in concrete with air-coupled sensors*, Materials and Structures, Vol. 38, No 9, pg. 801-806

Zhu J & Popovics J. (2007) *Imaging Concrete Using Air-Coupled Impact-Echo*, Journal of Engineering Mechanics, Vol.133, Issue 6, pg. 628-640