

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



## Μεταπτυχιακή διατριβή

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΗΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ  
ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Συντάκτης: Ραφαέλλα Βαρνάβα

Επιβλέπον: Έλια Ταντελέ, Επίκουρη Καθηγήτρια

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΗΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ  
ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

της

Ραφαέλλας Βαρνάβα

Λεμεσός 2016

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Ραφαέλλα Βαρνάνα, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέποντα καθηγήτρια μου κ. Έλια Ταντελέ για την εμπιστοσύνη αρχικά που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, την συνεχή της στήριξη, καθώς και καθοδήγηση κατά την διάρκεια της εργασίας αυτής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι να δείξει πως με την σωστή ολοκληρωμένη διαχείριση της γέφυρας σε όλο τον χρόνο ζωής της μπορείς να πετύχεις αύξηση του χρόνου ζωής της και της απόδοσης της, με οικονομικά συμφέροντα τρόπο. Με την βοήθεια των γενετικών αλγόριθμων μπορεί να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός τόσο για την κατασκευή αλλά και τη διαχείριση της γέφυρας κατά την διάρκεια όλου του κύκλου ζωής της. Με τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια, μπορεί να βρεθεί λύση η οποία λαμβάνει υπόψη τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την γέφυρα και να καταστήσουν την λύση ως βέλτιστη. Ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα εργασία δίνεται στην παραμόρφωση που παρουσιάζεται σε μια γέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια ζωής της. Συγκεκριμένα μελετούνται διάφορα είδη συντήρησης, συμπεριλαμβανομένου της προληπτικής, ώστε να βρεθεί το βέλτιστο σύστημα διαχείρισης της ζωής μιας γέφυρας λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος.

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to show that with proper integrated management of the bridge across its lifetime, an increased life time and performance can be achieved in a cost effective manner. With the help of genetic algorithms the optimum design can be found for both the construction and management of the bridge during its entire lifetime. With optimization algorithms with multiple criteria, the solution can be found, which takes into consideration the various factors affecting the bridge and therefore making the solution optimal. A highly important aspect of this assignment is given to the distortion that occurs in a reinforced concrete bridge during its lifetime. In particular the various types of maintenance are studied, including preventive maintenance, in order to find the optimum management system for the bridge's life expectancy, by also taking into account the cost.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
Abstract.....	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	viii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	ix
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ.....	x
1   Επικινδυνότητα .....	1
2   Έργο και Διαχείριση .....	4
3   Παρακολούθηση γεφυρών .....	7
4   Έλεγχος με Έξυπνα συστήματα παρακολούθησης.....	9
5   Βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια.....	12
6   Προληπτική συντήρηση .....	18
6.1   Μέτρα συντήρησης.....	26
7   Αστοχία γέφυρας.....	30
8   Μέθοδος πιθανολογικής ανάλυσης.....	34
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	41
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	46

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κόστη επιδιόρθωσης και συντήρησης της γέφυρας σε τιμές του έτους 1999(Highway Agency 1999) .....	23
Πίνακας 2: Επεμβάσεις για αύξηση της πλαστιμότητας στα διάφορα στοιχεία της γέφυρας. 28	
Πίνακας 3: Τυπικοί βαθμοί βλάβης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (Χρυσοστόμου 2009).....	32
Πίνακας 4: Βαθμοί βλάβης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (δοκοί, κόμβοι πλαισίων) (Χρυσοστόμου 2009).....	33
Πίνακας 5: Βαθμοί βλάβης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (υποστυλώματα, διατμητικά τοιχώματα) (Χρυσοστόμου 2009) .....	33



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Στοιχεία που πρέπει να ικανοποιηθούν για να ολοκληρωθεί ένα έργο με επιτυχία.....	5
Διάγραμμα 2: Βήματα για τη διαχείριση ενός έργου .....	6
Διάγραμμα 3: Παρακολούθηση έργων.....	9
Διάγραμμα 4: Απόδοση της κατασκευής χωρίς οποιαδήποτε επέμβαση (FIELD TRIALS DRAFT 2000).....	19
Διάγραμμα 5: Απόδοση της κατασκευής / Μεταβολή του δείκτη αξιοπιστίας στο χρόνο χωρίς συντήρηση (E0), με στοιχειώδη συντήρηση (E1), με προληπτική συντήρηση (E0,P) και με συνδυασμό στοιχειώδης και προληπτικής συντήρησης (E1,P) (Noortwilk and Frangopol 2004).....	20
Διάγραμμα 6: Προτεινόμενα μέτρα συντήρησης σε περίπτωση παραμόρφωσης της γέφυρας .....	29
Διάγραμμα 7: Επεξήγηση μεταβλητών $c_1$ , $c_2$ .....	34
Διάγραμμα 8: Κανονική κατανομή για $\mu=3\text{mm}$ και $\sigma =15\%$ .....	36
Διάγραμμα 9: Κανονική κατανομή για $\mu=4\text{mm}$ και $\sigma =20\%$ .....	37

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΤΕΠΑΚ.:	Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
ΦΠΑ:	Φόρος Προστιθέμενης Αξίας
APM:	Association for Project Management/ Βρετανική Ένωση Διαχείρισης Έργων
PMI:	Ινστιτούτου Διοίκησης Έργων
GPS	Global Positioning System/ Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης ή Θεσιθεσίας
CPV	Cost Per View/ Συνολικό Κόστος Ζωής του Έργου

## ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Data	Δεδομένα
Zero Risk	Μηδενικός Κίνδυνος
Analysis	Ανάλυση
Risk	Κίνδυνος
Cost	Κόστος
Benefit	Οφέλη
Project Manager	Διαχείρισης του Έργου
Optimal	Βέλτιστο
Frontier	Σύνορο
Normal Distribution	Κανονική κατανομή
Crack	Ρωγμή
Measure	Μέτρηση
Critical	Κρίσιμο
Standard Deviation	Τυπική Απόκλιση
Mean	Μέση τιμή

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι γέφυρες αποτελούν μια τεχνική κατασκευή μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ζεύξη δύο ή περισσοτέρων σημείων υπεράνω μεσολαβούντος εμποδίου. Το τελευταίο αιώνα η ανάπτυξη των γεφυρών έχει αυξηθεί δραματικά στις αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται η χρήση νέων υλικών και μορφών με στόχο την βελτιστοποίηση της κατασκευής. Η σχεδιαστική ζωή των γεφυρών έχει σήμερα αυξηθεί στα 120 χρόνια, ενώ η ανάγκη για τη διαχείρισή τους ώστε να αυξηθεί και άλλο ο χρόνος ζωής τους και να συνεχίσουν να λειτουργούν με ασφάλεια είναι μεγάλη αφού είναι ένα έργο με μεγάλο κόστος συντήρησης και κατασκευής. Επομένως, δημιουργείται η ανάγκη για εύρεση μιας βέλτιστης λύσης που να συνδυάζει την λειτουργικότητα, την ασφάλεια και την οικονομία της κατασκευής. Για το λόγο αυτό ιδιαίτερο ενδιαφέρον φαίνεται να δείχνουν οι επιστήμονες στο Σύστημα Διαχείρισης Γεφυρών, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο δράσεων επιθεώρησης, συντήρησης και βελτιστοποίησης σχεδιασμού για την εύρεση της βέλτιστης λύσης για την κατασκευή.

# 1 Επικινδυνότητα

Ο κίνδυνος βρίσκεται σε κάθε πτυχή της ανθρώπινης δραστηριότητας, ανεξάρτητα εάν τον γνωρίζουμε ή όχι. Εξαιτίας κάποιου κινδύνου, οποιαδήποτε δραστηριότητα μπορεί να παρεκκλίνει από την αρχική της πορεία. Η ανάγκη για έλεγχο αυτών των κινδύνων οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων που αναγνωρίζουν, αξιολογούν και ελέγχουν τους πιθανούς, μελλοντικούς κινδύνους (Αθανασόπουλος 2014). Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως Διαχείριση Κινδύνου και αποτελείται από μια τυποποιημένη διαδικασία κατά την οποία καταγράφονται και μοντελοποιούνται απλές διανοητικές και λογικές μέθοδοι του παρελθόντος.

Η βρετανική Ένωση διαχείρισης Έργων (APM) ορίζει ως κίνδυνο ένα αβέβαιο γεγονός ή σύνολο περιστάσεων που αν επέλθει θα έχει αντίκτυπο στην επίτευξη των στόχων του έργου. Ο κίνδυνος αυτός μπορεί να επιφέρει αρνητικό ή και θετικό αντίκτυπο στο στόχο ενός έργου. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να αντιμετωπίζονται και οι δύο πλευρές της αβεβαιότητας. Ο κίνδυνος δεν αποτελεί απλά ένα ανεξάρτητο γεγονός με συγκεκριμένες αιτίες και επιπτώσεις, αντιθέτως πολλές φορές η εμφάνιση του λειτουργεί ως αιτία για την ανάπτυξη και κάποιου άλλου κινδύνου με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κάποιου δικτύου κινδύνων.

Ο κάθε κίνδυνος μπορεί διακριθεί σε υψηλός, μεσαίος ή χαμηλός ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης του και τις συνέπειες του. Ανάλογα με την κατηγορία του κινδύνου λαμβάνονται και τα απαραίτητα μέτρα, στα οποία αναπροσαρμόζεται όλο το έργο. Πολλοί είναι αυτοί που ανέλυσαν και κατηγοριοποίησαν τους κινδύνους ανά τα χρόνια. Μερικά παραδείγματα είναι του Wideman και των Kliem and Ludin που αναλύονται παρακάτω.

Αρχικά ο Wideman (1992) τους κατηγοριοποιεί βάση των χαρακτηριστικών τους:

1. Με βάση την διαθέσιμη πληροφορία
  - ❖ γνωστός κίνδυνος και επιπτώσεις
  - ❖ γνωστός κίνδυνος, άγνωστες επιπτώσεις
  - ❖ άγνωστος κίνδυνος και επιπτώσεις

2. Με βάση τις επιπτώσεις τους

- ❖ κίνδυνος αντικειμένου (αλλαγή στο σκοπό και το αντικείμενο του έργου)
- ❖ κίνδυνος ποιότητας (αλλαγή απαιτούμενου επιπέδου απόδοσης)
- ❖ κίνδυνος προγράμματος (αλλαγή χρονικών ορίων εκτέλεσης εργασιών)
- ❖ κίνδυνος κόστους (αλλαγή προϋπολογισμού)

3. Με βάση την φύση τους

- ❖ κίνδυνοι χρονικά ανεξάρτητοι (μπορεί να συμβούν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή)
- ❖ κίνδυνοι χρονικά εξαρτημένοι (εξαρτάται από την εξεταζόμενη χρονική περίοδο η πιθανότητα εμφάνισης τους ή/και η σοβαρότητα των συνεπειών τους)

Αργότερα, οι Kliem and Ludin (1997) προσεγγίζουν διαφορετικά το όλο θέμα και κατηγοριοποιούν τους κινδύνους με το δικό τους τρόπο:

1. Αποδεκτούς / Μη αποδεκτούς κινδύνους: Στους αποδεκτούς κατατάσσονται αυτοί που δεν προκαλούν κάποιο ουσιώδες πρόβλημα στην πορεία του έργου, ενώ σαν μη αποδεκτοί θεωρούνται αυτοί που επηρεάζουν καθοριστικά το έργο
2. Βραχυχρόνιας/ Μακροχρόνιας επίπτωσης: Ανάλογα με το πότε παρουσιάζονται οι επιπτώσεις, άμεσα ή μελλοντικά
3. Θετικούς/ Αρνητικούς: Σαν θετικοί θεωρούνται οι ευκαιρίες και σαν αρνητικοί οι απειλές που παρουσιάζονται
4. Διαχειρίσιμους/ Μη διαχειρίσιμους: Διαχειρίσιμοι εννοούνται οι κίνδυνοι οι οποίοι με κατάλληλες ενέργειες είναι δυνατή η διαχείριση τους, ενώ μη διαχειρίσιμοι θεωρούνται κίνδυνοι όπως οι φυσικές καταστροφές
5. Εσωτερικούς/ Εξωτερικούς: Ανάλογα με αν μπορούν ή όχι να ελεγχθούν εσωτερικά από τον οργανισμό.

Ο βασικός στόχος στη διαχείριση κινδύνων είναι η βελτίωση της απόδοσης κάποιου έργου αντιμετωπίζοντας τις απειλές και εκμεταλλεύοντας τις ευκαιρίες που προκύπτουν. Για την επιτυχία αυτού του σκοπού απαιτείται συστηματική αναγνώριση, ανάλυση και διαχείριση των κινδύνων. Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για την δημιουργία μιας σειράς προτύπων και διαδικασιών, ωστόσο δεν έχει επικρατήσει κάποιο ακόμα. Ο κίνδυνος μπορεί να αντιμετωπιστεί με ένα από τους τρεις τρόπους: (Crouch and Wilson 1982)

1. Μηδενικός κίνδυνος / Zero Risk: Εξασφαλίζει την απουσία του κινδύνου
2. Όσο το δυνατόν πιο χαμηλός κίνδυνος – λογικά εφικτός (as low as reasonably achievable/possible): Μείωση του κινδύνου λαμβάνοντας υπόψη το κόστος για την αντιμετώπιση του
3. Ανάλυση κινδύνων, κοστών και οφελών (risk-cost-benefit analysis): Γίνεται ποσοτικοποίηση των τριών αυτών παραγόντων ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση, λαμβάνοντας υπόψη και τους τρεις αυτούς παράγοντες

Για να αντιμετωπίσουμε ένα κίνδυνο πολύ σημαντικό είναι να μπορούμε να τον αναγνωρίσουμε έγκαιρα. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε η ολοκληρωμένη διαχείριση των έργων, η οποία αναλαμβάνει την ευθύνη να παρακολουθεί ένα έργο σε όλη την διάρκεια της ζωής του και να συμβάλλει ώστε να δίνονται οι καλύτερες δυνατές λύσεις βάση των κριτηρίων και των απαιτήσεων που θέτονται.

## 2 Έργο και Διαχείριση

Σύμφωνα με τον Οδηγό Απόκτησης Γνώσεων σχετικά με την Διοίκηση Έργων, του Ινστιτούτου Διοίκησης Έργων (PMI), ως έργο ορίζεται « η προσωρινή και σύνθετη προσπάθεια όλων των εμπλεκόμενων σε αυτό φορέων, προκειμένου να παραχθεί ένα συγκεκριμένο και μοναδικό κάθε φορά προϊόν μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα, με καθορισμένο προϋπολογισμό για τους αναλωθέντες πόρους και δεδομένη ποιότητα».

Παρά την μοναδικότητα του κάθε έργου, σε όλα τα έργα παρατηρούνται κάποια κοινά χαρακτηριστικά (Lock 2000) :

- Κάθε έργο προορίζεται για να ικανοποιήσει συγκεκριμένες ανάγκες και πρέπει να είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές που τέθηκαν από την αρχή
- Κάθε έργο χαρακτηρίζεται από επιμέρους δραστηριότητες, οι οποίες είναι εξαρτημένες και επηρεάζει η μια την άλλη και ακολουθούν σειρά προτεραιότητας
- Το χρονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να ολοκληρωθεί το έργο (χρονικός ορίζοντας) καθορίζεται από την χρονική στιγμή έναρξης και λήξης του έργου
- Οι διαθέσιμοι πόροι (κεφάλαιο, ανθρώπινο δυναμικό κλπ.) είναι συγκεκριμένοι
- Τα χαρακτηριστικά του έργου θέτονται βάση των απαιτήσεων του πελάτη
- Κάθε έργο έχει μια ομάδα εκτέλεσης η οποία αποτελείται από άτομα με διαφορετικές γνώσεις και δεξιότητες, τα οποία συνεργάζονται με σκοπό την επιτυχή ολοκλήρωση του
- Ο διαχειριστής του έργου (project manager) είναι υπεύθυνος για τη συγκρότηση της ομάδας του έργου και έχει τον πρωταρχικό ρόλο στη σχεδίαση, τον προγραμματισμό και τον έλεγχο του, όπως επίσης και την ευθύνη του τελικού αποτελέσματος.

Για να επιτευχθεί η επιτυχή ολοκλήρωση ενός έργου πρέπει να ικανοποιηθούν τρία κρίσιμα στοιχεία:

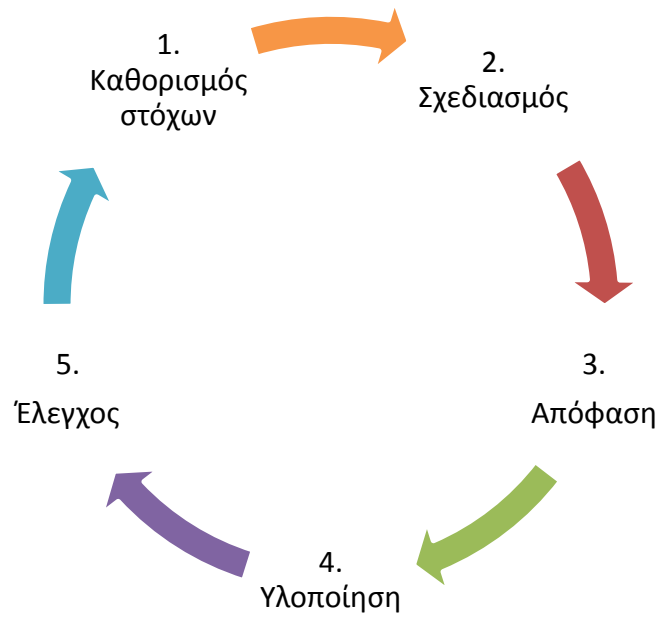




**Διάγραμμα 1: Στοιχεία που πρέπει να ικανοποιηθούν για να ολοκληρωθεί ένα έργο με επιτυχία**

Τα στοιχεία αυτά είναι άμεσα εξαρτημένα το ένα με το άλλο, γι' αυτό πρέπει να διατηρείται μια σωστή ισορροπία. Εάν για παράδειγμα μια δραστηριότητα χρειαστεί πέραν του προκαθορισμένου χρόνου για να υλοποιηθεί, εκτός του ότι θα καθυστερήσει τις υπόλοιπες δραστηριότητες, θα απαιτούνται και περισσότεροι πόροι για την υλοποίησή της. Εάν θέλουμε να παραμείνουμε στο προκαθορισμένο χρόνο θα πρέπει να αυξήσουμε του πόρους του έργου, με τελικό αποτέλεσμα όμως να αυξηθεί και το τελικό κόστος του έργου.

Παρόλο που ο αρχικός σχεδιασμός του έργου είναι πολύ σημαντικός για την εξέλιξη του, σχεδόν κανένα έργο δεν μένει πιστό στο σχεδιασμό αυτό. Με την εξέλιξη του έργου παρουσιάζονται δυσκολίες και στοιχεία τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στο αρχικό σχεδιασμό, ή λόγω κάποιων άλλων απρόβλεπτων καταστάσεων άλλαξαν. Για τον λόγο αυτό απαιτείται συνεχής παρακολούθηση του έργου και επαναπροσδιορισμός των στόχων του σε όλο το χρονικό του ορίζοντα. Η σωστή διαχείριση των έργων, όπως φαίνεται και πιο κάτω, αποτελεί μία διαδικασία συνεχούς προγραμματισμού και αναθεώρησης.



**Διάγραμμα 2: Βήματα για τη διαχείριση ενός έργου**

### 3 Παρακολούθηση γεφυρών

Οι γέφυρες, όπως και κάθε τεχνικό έργο, φθείρεται με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα ο χρόνος ζωής τους αλλά και το επίπεδο εξυπηρέτησής τους να μειώνεται συνεχώς. Η φθορά μπορεί να οφείλεται είτε σε απρόβλεπτες φυσικές καταστροφικές επεμβάσεις (π.χ. σεισμοί), είτε μπορεί να είναι φυσική όπως η γήρανση των υλικών κατασκευής, επιδράσεις περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ διάβρωση), αύξηση του φόρτου κυκλοφορίας, εκτεταμένη χρήση, ανεπαρκής συντήρηση ή ακόμη και ατέλειες της αρχικής μελέτης και κακοτεχνίες στη διάρκεια της κατασκευής της.

Η διαχείριση έργων άρχισε να αναπτύσσεται από τα μέσα του 19ου αιώνα και πλέον σήμερα είναι παγκόσμια αναγνωρισμένη ως η πιο κατάλληλη και αποδοτική μέθοδο για την επιτυχία μεγάλων και σύνθετων παραγωγικών διαδικασιών. Οι τεχνικές και οι μέθοδοι της διαχείρισης έργων εκτός του ότι μειώνουν την αβεβαιότητα, αυξάνουν και τις πιθανότητες επιτυχούς ολοκλήρωσης τους. Οι μέθοδοι αυτοί συμβάλλουν στο να κατανοείται καλύτερα το παρόν, αλλά και στο να προσομοιώνεται το μέλλον με τη χρήση παλαιότερων δεδομένων. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται η λήψη διορθωτικών ενεργειών και η μείωση της σπατάλης των πόρων μέσω της έγκαιρης αναγνώρισης των προβλημάτων.

Η συστηματική παρακολούθηση της κατάστασης τέτοιων μεγάλων και σημαντικών κατασκευών και ο καθορισμός των απαραίτητων διορθωτικών μέτρων στα τμήματα που έχουν υποστεί φθορές είναι πολύ σημαντικά. Η παρακολούθηση της κατάστασης των γεφυρών χωρίζεται σε τρία βασικά είδη τεχνικών παρακολούθησης: (Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και ΙΤΣΑΚ 2003)

1. Οπτικός έλεγχος: Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω επιφανειακής επιθεώρησης των διαφόρων στοιχείων του δομήματος και συμπλήρωσης ειδικών ερωτηματολογίων τα οποία σε παραπέμπουν στην κατάσταση της κατασκευής
2. Ενόργανος οπτικός έλεγχος: Στον έλεγχο αυτό οι εκτιμήσεις τεκμηριώνονται μέσω πειραματικών στοιχείων

3. Έξυπνα συστήματα παρακολούθησης: Στηρίζεται σε σύγχρονα τεχνολογικά μέσα, μέσω των οποίων συλλέγονται δεδομένα, επεξεργάζονται και δημιουργούνται προσομοιώματα σε υπολογιστές

Τα στοιχεία που προκύπτουν από τους παραπάνω ελέγχους συγκεντρώνονται σε βάσεις δεδομένων. Τα στοιχεία αυτά είναι σημαντικά τόσο για την ίδια την κατασκευή και τους ελέγχους που μπορεί να λάβουν χώρα στο μέλλον , όσο και στην πρόληψη και τον έλεγχο άλλων γεφυρών. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να υπάρχει συγκεντρωμένο το ιστορικό της κατασκευής, το οποίο να περιλαμβάνει όλους τους ελέγχους και τις εργασίες συντήρησης που έχουν γίνει.

## 4 Έλεγχος με Έξυπνα συστήματα παρακολούθησης

Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιεί σύγχρονα τεχνολογικά μέσα, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται συνεχή παρακολούθηση του έργου. Σκοπός των συστημάτων αυτών είναι η συνεχή συλλογή πληροφοριών και δεδομένων τα οποία επεξεργάζονται μέσω διαφόρων μαθηματικών προσομοιωμάτων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται συνεχής και ολοκληρωμένος έλεγχος και σε περίπτωση οποιασδήποτε βλάβης γίνεται άμεση ενημέρωση.

Παρόλο που υπάρχουν πολλοί τρόποι παρακολούθησης γεφυρών με σύγχρονα τεχνολογικά μέσα, η γενική φιλοσοφία που ακολουθούν είναι κοινή και μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια. (Ζυγούρης 2006)



**Διάγραμμα 3: Παρακολούθηση έργων**

Σαν πρώτο στάδιο αποτελεί η λήψη μετρήσεων. Για τη λήψη των μετρήσεων υπάρχουν διάφορα τεχνολογικά συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια κατασκευή. Για το σκοπό αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται κινητά δίκτυα επιταχυνσιομέτρων ή δυναμικών αισθητήρων, συνδεδεμένα με μια μονάδα παρακολούθησης και καταγραφής των μετρήσεων. Ένας άλλος τρόπος που συνηθίζεται για παρακολούθηση των γεφυρών, είναι μέσω δορυφόρων με GPS. Τα GPS αποτελούν ένα αξιόπιστο σύστημα καταγραφής των δυναμικών χαρακτηριστικών των γεφυρών. Μια πιο νέα τεχνολογία που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για τη συστηματική παρακολούθηση της γέφυρας και καταγραφή των φθορών είναι συστήματα που λειτουργούν με οπτικές ίνες, τα οποία τοποθετούνται στη γέφυρα κατά τη κατασκευή της. Τα συστήματα αυτά βοηθούν στην καταγραφή φθορών που

οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες καθώς και στον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης σε συγκεκριμένα τμήματα του δομήματος. Παρόμοια συστήματα, είναι και οι αισθητήρες που λειτουργούν με ακουστικά κύματα και συνδέονται μέσω υπολογιστών με τη μονάδα ελέγχου και παρακολούθησης. Οι αισθητήρες αυτοί, έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν ρωγμές στο σκυρόδεμα και να προειδοποιούν πότε υπάρχει κίνδυνος αστοχίας σε καλώδια αγκύρωσης ή σε μεταλλικές συνδέσεις. Γενικά, τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μεγάλων τεχνικών έργων μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται τα συστήματα τα οποία συνδέονται με τις μονάδες παρακολούθησης μέσω καλωδίων, ενώ στη δεύτερη κατηγορία, η οποία και πιο σύγχρονη, ανήκουν τα συστήματα τα οποία συνδέονται με τις οθόνες ελέγχου με ραδιενεργά ή ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Απαραίτητο για να είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων, είναι η ενεργοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται μέσα από κάποια διέγερση. Ένας τεχνητός τρόπος διέγερσης είναι η εξαναγκασμένη ταλάντωση του έργου η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσα από αυξημένη κυκλοφορία φορτηγών κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας ή κατά τη διάρκεια συνεχούς οδικής κυκλοφορίας. Για την λήψη μετρήσεων αρχικά λαμβάνεται ένας ενδεικτικός αριθμός μετρήσεων και ακολούθως περνούν μέσα από μια διαδικασία επεξεργασίας η οποία χαρακτηρίζεται ως “βαθμονόμηση μεθοδολογίας λήψης των μετρήσεων”. Κατά τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται ο έλεγχος όλων των μετρήσεων και η απαλοιφή τυχόν λαθών από όλη τη διαδικασία καταγραφής. Έπειτα συνεχίζονται οι μετρήσεις με τη σειρά που έχει επιλεγεί και διορθώνονται μέσα από τη βαθμονόμηση που είχε επιτευχθεί προηγουμένως. Τέλος, συγκεντρώνονται όλα τα δεδομένα που προέκυψαν ώστε να επεξεργαστούν κατάλληλα παρακάτω.

Σε δεύτερο στάδιο ακολουθούν οι υπολογιστικές τεχνικές αναγνώρισης των μετρήσεων μας. Αρχικά προσδιορίζεται η δυναμική απόκριση της γέφυρας λόγω τυχαίων διεγέρσεων. Ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών της κατασκευής, “Μορφική Αναγνώριση”, μέσα από πολύπλοκους μαθηματικούς τύπους ή με χρήση αριθμητικών μεθόδων.

Τέλος, σαν τρίτο στάδιο αποτελεί η αναθεώρησης του αρχικού μοντέλου. Στο στάδιο αυτό γίνεται διάγνωση των βλαβών και της στατικής ανεπάρκειας της κατασκευής. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας στο οποίο προσδιορίζονται όλες οι αρχικές παράμετροι ακαμψίας και στη συνέχεια το αρχικό μοντέλο τροποποιείται ώστε να προκύψουν οι τελικοί παράμετροι ακαμψίας της κατασκευής. Αυτό γίνεται ούτως ώστε να υπάρχει όσο το δυνατό ταύτιση των ιδιομορφών και ιδιοτιμών που μετρήθηκαν με τα αποτελέσματα του μοντέλου τα οποία θα υποδείξουν το βαθμό ανεπάρκειας της κατασκευής. Σε ένα δεύτερο επίπεδο, είναι σημαντικό να ακολουθείται ένα συγκεκριμένο πλάνο παρακολούθησης των γεφυρών , το οποίο θα καθορίζει τη σειρά και το μέγεθος των ελέγχων που πρέπει να γίνουν για την αποτίμηση της κατάστασης της κατασκευής.

## 5 Βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια

Βελτιστοποίηση ονομάζεται η μέθοδος εύρεσης και σύγκρισης διαφόρων εφικτών λύσεων έως ότου βρεθεί η καταλληλότερη για την συγκεκριμένη περίπτωση. Οι λύσεις αυτές θεωρούνται καλές ή κακές βάση του σκοπού τους, όπου μπορεί να είναι συνήθως για παράδειγμα, το κόστος της κατασκευής, η ποσότητα των αποβλήτων, η απόδοση της διαδικασίας, η αξιοπιστία του προϊόντος, ή άλλοι παράμετροι (Deb 2001).

Σε πολλά προβλήματα της καθημερινής ζωής, οι υπό εξέταση στόχοι που συναντάμε, συνήθως αντιτίθενται ή αντικρούονται ο ένας με τον άλλο. Βελτιστοποιώντας μια συγκεκριμένη λύση σε σχέση με ένα από αυτούς, μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδεκτά αποτελέσματα με τους υπόλοιπους στόχους. Μια λογική λύση σε ένα πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων είναι να διερευνηθεί μια σειρά από λύσεις, καθεμία από τις οποίες να ικανοποιεί τα κριτήρια σε ένα αποδεκτό βαθμό, χωρίς να κυριαρχείται από οποιαδήποτε άλλη λύση (Konak et al. 2006). Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να βρεθεί ένας αριθμός λύσεων που να προσφέρουν στο άτομο το οποίο είναι υπεύθυνο για τις αποφάσεις, τα στοιχεία και χαρακτηριστικά του προβλήματος, πριν να χρειάζεται να επιλεγεί μια τελική λύση (Fonseca and Fleming 1993).

Η βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια είναι μια διαδικασία με πολλαπλά κριτήρια λήψης αποφάσεων, που ασχολείται με μαθηματικά προβλήματα βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβάνοντας περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις που βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς της επιστήμης, όπου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι βέλτιστες αποφάσεις, βάση των επιθυμητών χαρακτηριστικών δύο ή περισσότερων αντικρουόμενων παραμέτρων. Ελαχιστοποιώντας για παράδειγμα, το κόστος και μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την άνεση, όταν αγοράζεις ένα αυτοκίνητο και μεγιστοποιώντας την απόδοση, ενώ ελαχιστοποιείς ταυτόχρονα την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων του οχήματος, είναι κάποια από τα παραδείγματα προβλημάτων της βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων που περιλαμβάνει δύο, τρία, ή και περισσότερα κριτήρια (Ehrgott 2005).

Ο γενικός τύπος προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια μπορεί επίσημα να διατυπωθεί και σαν (Carlos A. Coello n.d.):



Εύρεση του διανύσματος  $\vec{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$  η οποία θα ικανοποιεί τους  $m$  άνισους περιορισμούς:

$$g_i(\vec{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

τους  $p$  ίσους περιορισμούς

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

Και θα βελτιστοποιεί τη διανυσματική συνάρτηση

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T$$

Η βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων επιδιώκει να βελτιστοποιήσει τα κριτήρια μιας διανυσματικής συνάρτησης κόστους. Σε αντίθεση με την βελτιστοποίηση ενός μόνο κριτηρίου, η λύση του προβλήματος δεν είναι ένα ενιαίο σημείο, αλλά μια οικογένεια σημείων, γνωστό ως σετ “Pareto-optimal”. Κάθε σημείο αυτής της επιφάνειας είναι βέλτιστο, υπό την έννοια ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί περεταίρω βελτίωση σε κάποια διανυσματική συνιστώσα που να μην οδηγήσει σε υποβάθμιση σε τουλάχιστον μία από τις υπόλοιπες (Fonseca and Fleming 1993). Ένα διάνυσμα από μεταβλητές αποφάσεων  $\vec{x}^* \in F$  είναι Pareto βέλτιστο αν δεν υπάρχει άλλο  $\vec{x} \in F$  τέτοιο ώστε,  $f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{x}^*)$  για όλα τα  $i = 1, \dots, k$  και  $f_j(\vec{x}) < f_j(\vec{x}^*)$  για τουλάχιστον ένα  $j$ . Το διάνυσμα  $\vec{x}^*$  που ανταποκρίνεται στις λύσεις που περιλαμβάνονται στο “Pareto-optimal” σετ, ονομάζονται μη κυρίαρχα διανύσματα (Carlos A. Coello n.d.).

Για ένα δεδομένο σύστημα, το “Pareto frontier” ή το Pareto σετ είναι το σύνολο των παραμετροποιήσεων που είναι όλες αποδοτικές σύμφωνα με το Pareto. Με το να αποφέρουν όλες τις βέλτιστες λύσεις, ο σχεδιαστής μπορεί να λάβει αποφάσεις και να συμβιβαστεί με αυτό το περιορισμένο σύνολο παραμέτρων, αντί να χρειάζεται να εξετάσει το πλήρες σύνολο τους (Bogdan et al. 2013).

Συχνά υπάρχει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εξεύρεση ή προσέγγιση των κατά Pareto βέλτιστων σετ, κυρίως για την απόκτηση μιας βαθύτερης κατανόησης του προβλήματος και τη γνώση σχετικά με τις εναλλακτικές λύσεις. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για το έργο αυτό, καθώς επεξεργάζονται μια σειρά από λύσεις παράλληλα, ενώ τελικά αξιοποιούν τις ομοιότητες των λύσεων διασταυρώνοντας τις (Zitzler and Lothar 2006).

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι φαίνονται να είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια, επειδή ασχολούνται ταυτόχρονα με ένα σύνολο πιθανών λύσεων, το οποίο ονομάζεται πληθυσμός. Αυτό επιτρέπει την εξεύρεση διάφορων στοιχείων του βέλτιστου Pareto σε μια μονό εκτέλεση του αλγορίθμου, αντί για μια σειρά από ξεχωριστές εκτελέσεις, όπως στην περίπτωση των παραδοσιακών μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού. Επιπλέον, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι λιγότερο επιρρεπείς στο σχήμα ή τη συνέχεια του Pareto front, όπου τα δύο αυτά θέματα είναι μια πραγματική ανησυχία για τις τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού (Carlos A. Coello n.d.).

Η έννοια των γενετικών αλγορίθμων αναπτύχθηκε από τον Holland και τους συναδέλφους του την δεκαετία του 60 και 70. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι εμπνευσμένοι από την θεωρία της εξέλιξης, μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής/γεννητικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή, μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης.

Σύμφωνα με την ορολογία των γενετικών αλγορίθμων, μια διανυσματική λύση  $x \in X$  ονομάζεται χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα είναι πλασμένα από διακριτές μονάδες, τα λεγόμενα γονίδια. Υπό κανονικές περιστάσεις, ένα χρωμόσωμα ανταποκρίνεται σε μια ξεχωριστή λύση  $\chi$  στο πεδίο λύσεων. Αυτό απαιτεί μια κωδικοποίηση μεταξύ του τοπίου λύσεων και των χρωμοσωμάτων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν μαζί με μια συλλογή από χρωμοσώματα, ονομαζόμενοι πληθυσμός. Αυτή η συλλογή αρχικά και υπό κανονικές συνθήκες, είναι τυχαία. Καθώς η έρευνα εξελίσσεται, ο πληθυσμός περιλαμβάνει όλο και πιο εφαρμοσμένες, ακριβείς λύσεις μέχρι να κυριαρχηθεί από μια μονάχα λύση.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν δύο μεθόδους για να παράγουν νέες λύσεις από τις ήδη υπάρχουσες:

- i. Διασταύρωση: όπου δύο χρωμοσώματα, ονομαζόμενα γονείς συνδυάζονται για να σχηματίσουν νέα χρωμοσώματα, τα οποία με την σειρά τους ονομάζονται απόγονοι. Οι γονείς επιλέγονται με προτίμηση προς την καταλληλότητα, έτσι ώστε οι απόγονοι να κληρονομήσουν καλά γονίδια. Με αυτό τον τρόπο, οι γονείς γίνονται καταλληλότεροι. Με την εφαρμογή της διασταύρωσης, αναμένεται ότι τα γονίδια με καλά χρωμοσώματα, θα εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα στο πληθυσμό, οδηγώντας έτσι στο να συγκλίνουν ολικά σε μια καλή λύση.
- ii. Μετάλλαξη: με την μέθοδο αυτή, εισάγονται τυχαίες αλλαγές στα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων. Η μετάλλαξη διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στους γενετικούς αλγόριθμους επειδή ενώ η διασταύρωση οδηγεί το πληθυσμό στο να συγκλίνει, κάνοντας τα χρωμοσώματα με αυτό τον τρόπο πανομοιότυπα, η μέθοδος της μετάλλαξης επανεισαγάγει γενετική ποικιλία πίσω στο πληθυσμό και βοηθά την έρευνα να ξεφύγει από το τοπικό μέγιστο.

Η αναπαραγωγή περιλαμβάνει συλλογή χρωμοσωμάτων για τη νέα γενεά. Γενικά, η καταλληλότητα ενός «ατόμου» καθορίζει την πιθανότητα επιβίωσης του στη νέα γενεά(Konak et al. 2006).

Η βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια έχει χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τους γενετικούς αλγόριθμους. Με τη διατήρηση ενός πληθυσμού από λύσεις, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να ψάξουν για πολλές εξίσου σημαντικές λύσεις παράλληλα. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει τους γενετικούς αλγόριθμους πολύ ελκυστικούς για τη λύση πολύ-κριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης (Fonseca and Fleming 1993).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχτεί να είναι πολύ εύρωστες ερευνητικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Είναι αδιαμφισβήτητα, μια παγκόσμια ερευνητική διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία υπερνικά τα μειονεκτήματα της πλειοψηφίας των μεθόδων βασισμένων στην παραγωγή λύσεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χειρίζονται

συνεχείς ή διακριτές λειτουργίες, μπορούν να βρουν βέλτιστο για λειτουργίες με πολλούς τύπους ή να συγκλίνουν σε μη κυρτό Pareto front (Ivanov and K. Ray 2014).

Ένας γενικός αλγόριθμος με μόνο ένα κριτήριο, μπορεί να τροποποιηθεί για να βρει ένα σετ από πολλαπλές μη-κυριαρχικές λύσεις με μια μόνο εκτέλεση του προγράμματος. Η ικανότητα του γενετικού αλγόριθμου να ψάχνει συγχρόνως διαφορετικές περιοχές του πεδίου λύσεων, κάνει δυνατόν να βρεθεί ένα σετ με ποικίλες λύσεις για δύσκολα προβλήματα με μη-κυρτά ασυνεχή, και με πολλούς τύπους, πεδία λύσεων. Η διασταύρωση του γενετικού αλγόριθμου μπορεί να εκμεταλλευτεί δομές καλών λύσεων με σεβασμό στα διάφορα κριτήρια να δημιουργήσουν νέες μη-κυρίαρχες λύσεις σε ανεξερεύνητα κομμάτια του Pareto front. Επιπλέον, οι περισσότεροι γενετικοί αλγόριθμοι με πολλαπλά κριτήρια, δεν χρειάζονται από τον χρήστη να ορίσει προτεραιότητα, κλίμακα ή να ζυγίσει τους στόχους/κριτήρια. Γι' αυτούς τους λόγους, ο γενετικός αλγόριθμος έχει γίνει η πιο δημοφιλής ευρετική προσέγγιση στο σχεδιασμό πολλαπλών κριτηρίων και προβλημάτων βελτιστοποίησης (Konak et al. 2006).

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών μεθόδων για λύση βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Τα τελευταία χρόνια, ένας αριθμός τροποποιήσεων στις μεθόδους βασισμένες στους γενετικούς αλγόριθμους υπέστη σημαντική ανάπτυξη και δημοσιότητα στη λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων (Ivanov and K. Ray 2014).

Ο πρώτος γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών κριτηρίων, ονομαζόμενος διάνυσμα αξιολόγησης γενετικού αλγόριθμου (ή VEGA), είχε προταθεί από τον Schaffer. Στην συνέχεια, κι' άλλοι εξελικτικοί αλγόριθμοι πολλαπλών κριτηρίων αναπτύχθηκαν συμπεριλαμβανομένων των MOGA, NPGA, WBGA, RWGA, NSGA, SPEA, SPEA 2, PAES, PESA, PESA- II, NSGA- II, MEA, RDGA και DMOEA (Konak et al. 2006).

Γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι πολλαπλών κριτηρίων διαφέρουν με βάση την καταλληλότητα της διαδικασίας της εργασίας, ελιτισμό, ή διαφοροποίηση των προσεγγίσεων. Σύμφωνα με τους Konak et al., πολλοί ερευνητές οι οποίοι εφάρμοσαν γενετικούς αλγόριθμους με πολλαπλά κριτήρια στο πρόβλημα τους, προτίμησαν να

σχεδιάσουν τους δικούς τους προσαρμοσμένους αλγόριθμους, προσαρμόζοντας στρατηγικές από ποικιλία αλγορίθμων με πολλαπλά κριτήρια.

Μελετώντας τις αλλαγές που παρατηρούνται στις συνθήκες των γεφυρών με το πέρασμα των χρόνων, οι ερευνητές μπορούν να αναπτύξουν μοντέλα για να διαχωρίσουν τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων συντήρησης από τις κανονικές διαδικασίες αλλοίωσης των γεφυρών. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σε αυτό τον τομέα περιλαμβάνει εμβάθυνση της κατανόησης μας για τις φυσικές διαδικασίες αλλοίωσης. Ειδικότερα, το αποτέλεσμα των κατασκευαστικών ζημιών στην αξιοπιστία και απόδοση των κατασκευαστικών συστατικών βελτιωμένων τεχνικών βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιούν το παράγοντα του κύκλου ζωής και των κοινωνικών κοστών της απογραφής μιας γέφυρας και αυξάνουν την απόδοση της απογραφής με περιορισμένους πόρους. Με το να κάνουμε τα μοντέλα βελτιστοποίησης γρηγορότερα και πιο ευέλικτα, η εφαρμογή νέων υπολογιστικών τεχνικών και παραδειγμάτων, μπορεί να παρέχει ένα μέσο εφαρμογής των ερευνητικών αποτελεσμάτων με πιο λεπτομερή και ρεαλιστικά δεδομένα και μοντέλα, ξεκινώντας την εστίαση σε προληπτικές οικονομικά αποδοτικές στρατηγικές από την αρχή, όταν η γέφυρα είναι καινούργια. Μια περιοχή με έντονη ερευνητική δραστηριότητα τον τελευταίο καιρό αποτελεί η προληπτική συντήρηση.

## 6 Προληπτική συντήρηση

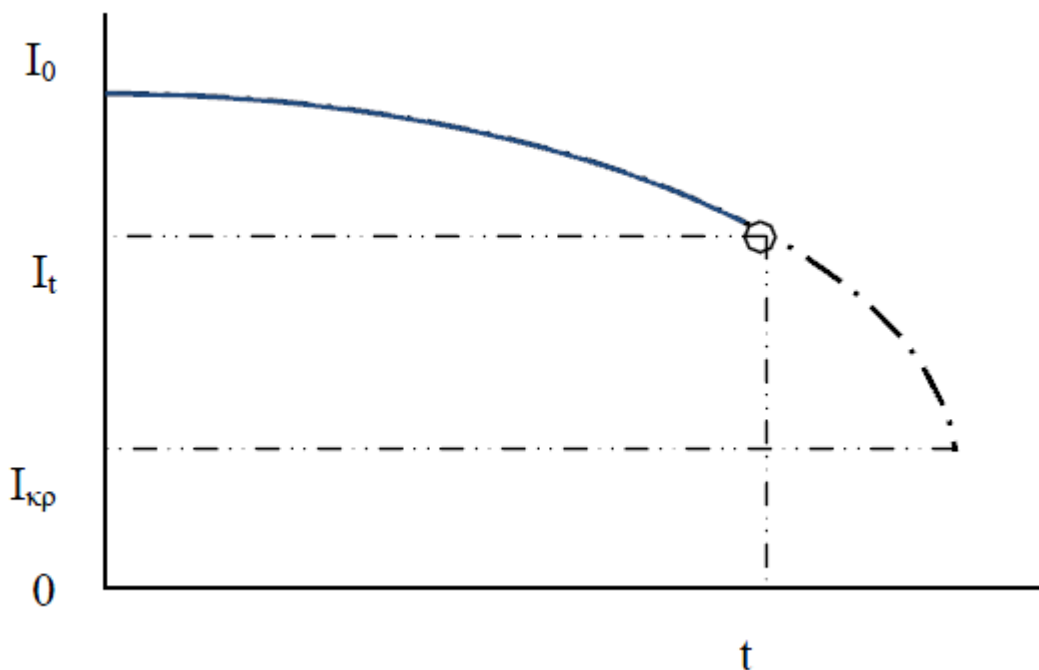
Οι γέφυρες αντιπροσωπεύουν ένα πολύτιμο περιουσιακό στοιχείο του δικτύου μεταφορών της κάθε χώρας, γι' αυτό η διατήρησή τους σε μια αποδεκτά επισκευάσιμη κατάσταση παρόλο που είναι ακριβό καθίσταται απαραίτητο. Η προληπτική συντήρηση χρησιμοποιείται ώστε να αναβάλει/καθυστερήσει την επιδείνωση της γέφυρας, με σκοπό την αύξηση του χρόνου ζωής της. Πάραυτα, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τον βαθμό αποτελεσματικότητας της μεθόδου αυτής. Ο χρόνος που πραγματοποιούνται για παράδειγμα τα προληπτικά αυτά μέτρα είναι πολύ σημαντικός αφού μπορεί να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα με χαμηλότερο κόστος.

Για να εκτιμηθεί η απόδοση μιας κατασκευής επεξεργάζονται τα δεδομένα επιθεώρησης με λογισμικά προσαρμοσμένα στις ανάγκες της κάθε διαχειριστικής ομάδας. Η αξιολόγηση της κατάστασης γίνεται συγκρίνοντας την μετρούμενη τιμή με μια κρίσιμη τιμή. Πιο αναλυτικά, μπορούν να διακριθούν στα πιο κάτω βήματα (FIELD TRIALS DRAFT 2000):

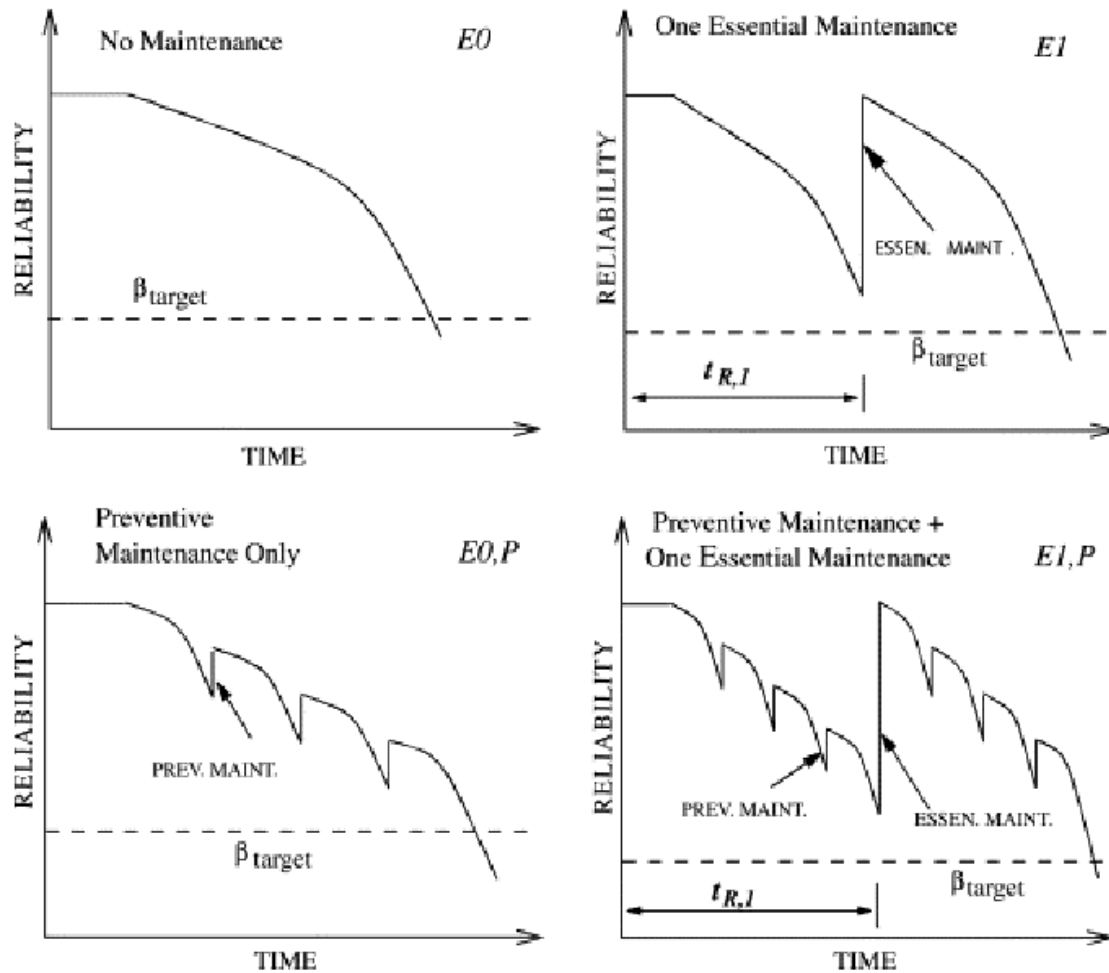
1. Αξιολόγηση της γέφυρας
2. Καθορισμός της αρχικής απόδοσης/ απόδοση σχεδιασμού,  $I_0$
3. Καθορισμός της απόδοσης την παρούσα χρονική στιγμή,  $I_1$
4. Καθορισμός της κρίσιμης τιμής απόδοσης,  $I_{κρ}$
5. Καθορισμός της μορφής της απόδοσης σε όλο το κύκλο ζωής
6. Έλεγχος της απόδοσης για κάθε χρονική και σύγκριση με την κρίσιμη
  - $I_1 < I_{κρ}$  : Επιδιόρθωση ώστε να αυξηθεί η απόδοση
  - $I_1 > I_{κρ}$  : Ενέργειες συντήρησης για αύξηση της απόδοσης ώστε να αποτραπεί οποιαδήποτε άμεση πτώση
  - $I_1 \gg I_{κρ}$  : Καμία ενέργεια
7. Υπολογισμός της παρούσας αξίας της εργασίας για κάθε μέλος περιλαμβάνοντας το κόστος εργασίας και το κόστος κυκλοφοριακής καθυστέρησης

8. Συγγραφή έκθεσης αναλύοντας σημεία που πιθανόν να χρειαστούν μελλοντικά αύξηση απόδοση

Η απόδοση μπορεί να χαρακτηριστεί με την βοήθεια του δείκτη αξιοπιστίας, ο οποίος ακολουθεί την μορφή της. Στα πιο κάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η απόδοση της κατασκευής σε σχέση με τον χρόνο. Αυτό που παρατηρείτε είναι πως όταν δεν γίνει οποιαδήποτε ενέργεια επέμβασης στη γέφυρα, ο δείκτης αξιοπιστίας μειώνεται εκθετικά και περνά κάτω από το κατώτατο όριο. Αντιθέτως, όταν γίνει προληπτική συντήρηση, συντήρηση δηλαδή προτού ο δείκτης αξιοπιστίας φτάσει το κατώτατο όριο αλλά έχει μειωθεί σε σχέση με το αρχικό, η απόδοση αυξάνεται και μειώνεται ξανά εκθετικά. Στην στοιχειώδη συντήρηση συμβαίνει ακριβώς το ίδιο απλά γίνεται όταν ο δείκτης αξιοπιστίας πλησιάσει το κατώτατο όριο. Στην πραγματικότητα τις περισσότερες φορές γίνεται συνδυασμός των δύο συντηρήσεων.



Διάγραμμα 4: Απόδοση της κατασκευής χωρίς οποιαδήποτε επέμβαση (FIELD TRIALS DRAFT 2000)



Διάγραμμα 5: Απόδοση της κατασκευής / Μεταβολή του δείκτη αξιοπιστίας στο χρόνο χωρίς συντήρηση (E0), με στοιχειώδη συντήρηση (E1), με προληπτική συντήρηση (E0,P) και με συνδυασμό στοιχειώδους και προληπτικής συντήρησης (E1,P) (Noortwilk and Frangopol 2004)

Η προληπτική συντήρηση υλοποιείται με σκοπό να μειώσει το μελλοντικό κόστος για αποκατάσταση της ασφάλειας της γέφυρας. Προσπαθεί δηλαδή να προλάβει ή να περιορίσει μέρη της κατασκευής πριν φτάσουν κοντά στην αστοχία, ώστε με χαμηλότερο κόστος να πετύχει την διατήρηση της απόδοσης της σε επιθυμητά επίπεδα, αυξάνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο ζωής της. Οι ενέργειες κατά την προληπτική συντήρηση σε μέλη της κατασκευής που δεν επιδεινώθηκαν με το χρόνο, ονομάζονται προορατικές και έχουν ως στόχο να καθυστερούν την εμφάνιση της αδυναμίας σε αυτά, ενώ σε στοιχεία που επιδεινώθηκαν ονομάζονται αντιδραστικές και γίνονται ώστε να περιορίσουν/μειώσουν τις επιπτώσεις της επιδείνωσης. Από την άλλη, η στοιχειώδης συντήρηση περιλαμβάνονται όλες τις αναγκαστικές ενέργειες ώστε να διατηρηθεί η κατασκευή πάνω από το κρίσιμο επίπεδο



απόδοσης. Υλοποιείται στα στοιχεία που αστόχησαν ή είναι κοντά στην αστοχία και περιλαμβάνει ενέργειες όπως την αντικατάσταση ενός ή περισσότερων στοιχείων με στόχο την επαναφορά της εντατικής κατάστασής στην αρχική.

Πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την λήψη απόφασης, ανάμεσα στις εναλλακτικές λύσεις, είναι το κόστος της κάθε ενέργειας και των επιπτώσεων του κόστους σε όλο το κύκλο ζωής του έργου. Οι εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται πρέπει να ικανοποιούν παράλληλα και τον στόχο απόδοσης του έργου. Το συνολικό κόστος ζωής του έργου CPV, υπολογίζεται τόσο για καινούργιες όσο και για υφιστάμενες κατασκευές και καθορίζεται από των πιο κάτω τύπο:

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

όπου:

- $C_i$ : το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής
- $C_{ins}$ : το κόστος επιθεώρησης
- $C_{maint}$ : το κόστος συντήρησης
- $C_{rep}$ : το κόστος επισκευής
- $C_{repl}$ : το κόστος αντικατάστασης
- $C_f$ : το κόστος αστοχίας
- $t_i$ : η διάρκεια ζωής της γέφυρας
- $r$ : προεξοφλητικό επιτόκιο

Όπως φαίνεται και στον πιο πάνω τύπο το κάθε κόστος μετατρέπεται σε κόστος με παρούσα αξία με τη βοήθεια του προεξοφλητικού επιτοκίου. Το κόστος επηρεάζεται από το προεξοφλητικό επιτόκιο, το οποίο ορίζεται από την Κεντρική Τράπεζα κάθε χώρας και από τη διάρκεια ζωής της γέφυρας. Το προεξοφλητικό επιτόκιο εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση σε τοπικό και διεθνές επίπεδο και τη σχεδιαστική ζωή της γέφυρας που είναι

σήμερα ίση με 120 χρόνια. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του επιτοκίου, μειώνεται η παρούσα αξία του κόστους και καθ' επέκταση και το συνολικό κόστος.

Στο κόστος συντήρησης, εκτός από το ίδιο το κόστος της, συνυπολογίζονται και κόστη που προκύπτουν λόγω αλλαγής δρομολογίου των χρηστών, λόγω της διακοπής λειτουργίας της γέφυρας, λόγω καθυστέρησης του οδηγού όσο αφορά το χρόνο ταξιδιού, η λειτουργία και τα καύσιμα του οχήματος. Επομένως, η διάρκεια των εργασιών στην γέφυρα αποτελεί ύψιστης σημασίας παράγοντα αφού με μια διαφορά μερικών βδομάδων στην υλοποίηση του προγράμματος συντήρησης στη γέφυρα, μπορεί να προκληθεί αύξηση του κόστους στο ύψος του ενός εκατομμύριου δολαρίων (Singh and Tiong 2005).

Όπως παρατηρείται και στο Πίνακα 1 , οι μικρές εργασίες έχουν μικρό κόστος. Για παράδειγμα είναι πιο φτηνό να γίνουν εργασίες επιδιόρθωσης στα μέλη από σκυρόδεμα, παρά την αντικατάσταση του. Επομένως, η οργανωμένη προληπτική συντήρηση πέραν του ότι διατηρεί την απόδοση της υποδομής σε αποδεκτά επίπεδα, είναι και οικονομικά πιο συμφέρουσα.

Πίνακας 1: Κόστη επιδιόρθωσης και συντήρησης της γέφυρας σε τιμές του έτους 1999 (Highway Agency 1999)

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

Κάθε δράση της προληπτικής συντήρησης αναβάλλει την εμφάνιση της αδυναμίας (Okasha and Frangopol 2009a). Ο χρόνος εμφάνισης της αδυναμίας ( $t_{oi}$ ) αφού γίνει προληπτική συντήρηση, προσδιορίζεται ως (Yang et al. 2006):

$$t_{oi} = t_o + i * t_{pi/2}$$

όπου:

- $i$ : αριθμός προληπτικής συντήρησης
- $t_{oi}$ : χρόνος εμφάνισης της αδυναμίας αφού γίνει προληπτική συντήρηση  $i$
- $t_o$ : αρχικός χρόνο εμφάνισης αδυναμίας χωρίς οποιαδήποτε συντήρηση

- $t_{pi}$ : χρόνο μεσολάβησης μεταξύ των συντηρήσεων

Για να βρεθούν οι δράσεις μέχρι την επιθυμητή χρονική στιγμή εμφάνισης της αδυναμίας θέτουμε το  $t_{pi} < t_{0(i-1)}$ , έτσι ώστε η πιθανότητα αστοχίας να διατηρηθεί σταθερή για το διάστημα  $t_{0i}$ . Με τον τρόπο αυτό, με λιγότερες ή χωρίς καθόλου δράσεις, η πιθανότητα αστοχίας παραμένει σταθερή για μικρότερο χρονικό διάστημα.

Η προληπτική συντήρηση, όταν εφαρμόζεται για όλα τα στοιχεία που μελετώνται, μπορεί να προσδιοριστεί με τη συνάρτηση επιβίωσης, με το μοντέλο του Kececioglu:

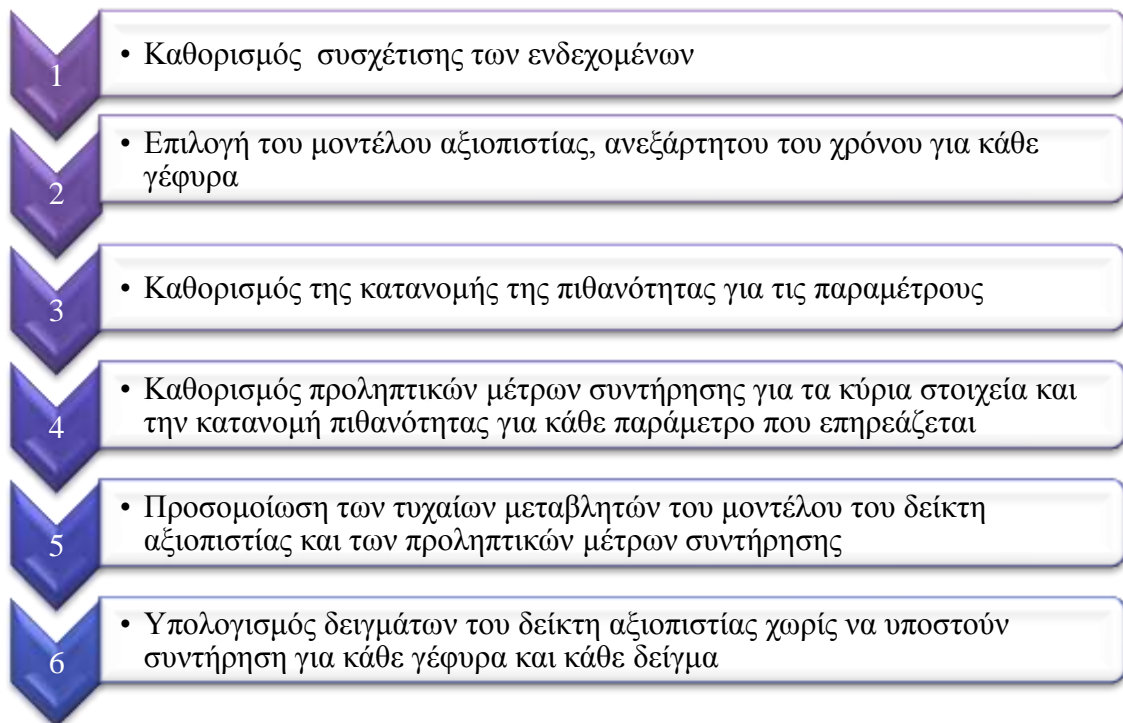
$$S_{tp}(t)=[S_t(t_p)]^j * S_t(\tau)$$

όπου:

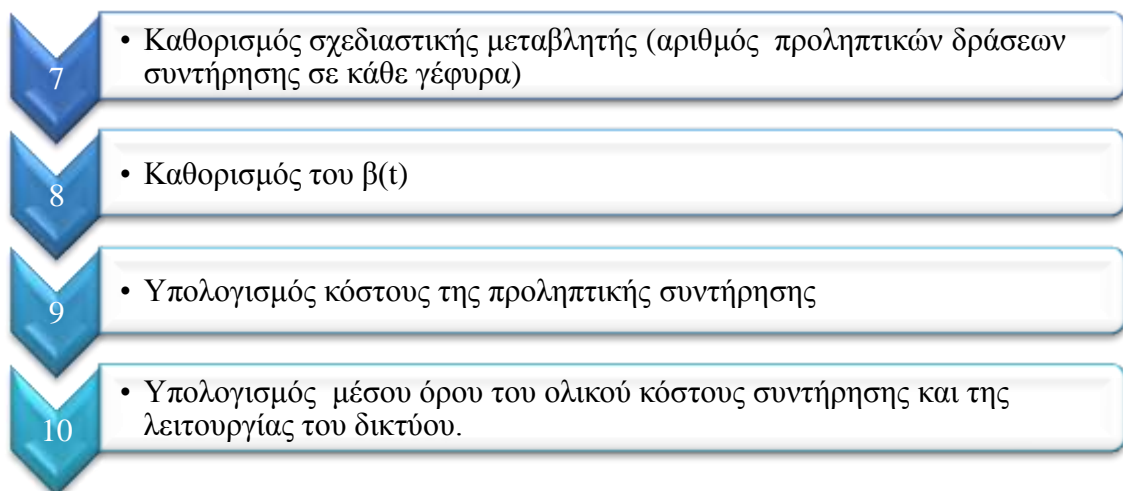
- $S_{tp}(t)$ : η συνάρτηση επιβίωσης της προληπτικής συντήρησης σε χρόνο  $t$
- $t_p$ : ο χρόνος μεσολάβησης των αντιδραστικών συντηρήσεων
- $S_{t(tp)}$ : η συνάρτηση επιβίωσης όταν δεν έγινε καμία συντήρηση
- $j$ : ο αριθμός των συντηρήσεων πριν το χρόνο  $t$
- $\tau$ : ο χρόνος που πέρασε από την τελευταία συντήρηση

Όταν η προληπτική συντήρηση δεν εφαρμόζεται σε όλα τα στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιηθούν συντελεστές αξιοπιστίας.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πιθανολογικού μοντέλου για εύρεση της Pareto βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης σε δίκτυο γεφυρών που ασχολείται αποκλειστικά με τη προληπτική συντήρηση είναι αυτό των Bocchini P. και Frangopol Dan. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι εξαρτημένο με τον χρόνο και συνδυάζει τις επιπτώσεις της επιδείνωσης με τις δράσεις συντήρησης. Οι προληπτικές συντηρήσεις επεξεργάζονται με την χρήση της προσομοίωσης του Monte Carlo, η οποία είναι μέρος του γενετικού αλγόριθμου. Στόχος του Γενετικού Αλγόριθμου είναι να βρει εάν η συγκεκριμένη στρατηγική προληπτικής συντήρησης είναι βέλτιστη. Το μοντέλο ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:



### Γενετικός Αλγόριθμος



Η επιλογή του μοντέλου αξιοπιστίας επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, την ηλικία της γέφυρας, τη πιθανή κατάσταση φόρτισης της και το περιβάλλον. Για το μοντέλο αξιοπιστίας γίνεται επιλογή μεταξύ των πιο κάτω μοντέλων:

- bilinear
- quadratic
- εκθετικό μοντέλο
- άλλα ντετερμινιστικά μοντέλα

Η αβεβαιότητα εισάγεται στα μοντέλα μέσω του μέσου όρου των παραμέτρων που λαμβάνονται ως τυχαίες μεταβλητές. Για να γίνει εφικτή η ανάλυση πρέπει να καθορισθεί τουλάχιστον μια από τις πιο κάτω υποθέσεις και να δοθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων παραμέτρων που εμπλέκονται:

- η βελτίωση του δείκτη αξιοπιστίας
- η καθυστέρηση στη επιδείνωση
- η γραμμική αύξηση του δείκτη αξιοπιστίας
- η βελτίωση του δείκτη αξιοπιστίας με παραβολική μορφή

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι περισσότερο της μιας βέλτιστης στρατηγικής. Για να είναι Pareto βέλτιστο πρέπει να παρέχει τη μέγιστη δυνατή αντοχή στη γέφυρα, με το ελάχιστο δυνατό κόστος συντήρησης. Όλες οι προτεινόμενες λύσεις που είναι Pareto front είναι και βέλτιστες, έτσι ο μηχανικός επιλέγει με βάση των διαθέσιμων πόρων, του επιθυμητού επιπέδου απόδοσης και της κρίσης του.

## **6.1 Μέτρα συντήρησης**

Στη συντήρηση οι δράσεις που μπορούν να ακολουθηθούν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: επισκευή, αντικατάσταση και αύξηση της αντοχής. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται (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 κλπ.) επιλέγεται η κατάλληλη συντήρηση. Πριν την όποια απόφαση, πρέπει να γίνεται εκτενής μελέτη. Από πλευράς μηχανικού απαιτείται γνώση νέων και συμβατικών τεχνικών συντήρησης, εμπειρία στην εφαρμογή και τις εργασίες κατασκευής τους, όπως επίσης 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, στην αγορά διατίθεται μια γκάμα υλικών που εφαρμόζονται για τέτοιες περιπτώσεις, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις σε κάθε περίπτωση. Τα υλικά πρέπει να συνεργάζονται με τα υφιστάμενα υλικά της γέφυρας, ώστε να δρουν σαν ένας φορέας που παραλαμβάνει και να μεταφέρει τα φορτία όπως αρμόζει στο σχεδιασμό τους. Παράδειγμα τέτοιων υλικών αποτελεί το πολυμερή σκυρόδεμα, όπου κατά την ανάμειξη των υλικών του σκυροδέματος προσθέτονται υλικά όπως epoxy, modified epoxy, methyl methacrylate, high molecular weight methacrylate (Dinitz and Stenko 2010). Τα κριτήρια για την επιλογή 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 επίσης, 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.

Στην εργασία αυτή συγκεκριμένα, μελετάται το φαινόμενο της παραμόρφωσης σε γέφυρά από οπλισμένο σκυρόδεμα. Μια κατασκευή για να μην παρουσιάσει παραμόρφωση πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να συμπεριφέρεται γραμμικά - ελαστικά. Παρόλο όμως, που το ιδανικό είναι ένας ελαστικός σχεδιασμός, είναι προφανές ότι είναι αντιοικονομικός ο σχεδιασμός μιας συνήθους κατασκευής για να αντέξει τον μεγαλύτερο πιθανό σεισμό χωρίς βλάβες. Για τον λόγο αυτό, ο οικονομικός σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι σεισμικών δράσεων, με βάση όλους τους σύγχρονους κανονισμούς, στηρίζεται στην πλαστιμότητά τους. Στο σημείο αυτό είναι που επεμβαίνει και ο πιθανολογικός σχεδιασμός για ολόκληρο τον κύκλο ζωής μιας κατασκευής ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση που περιλαμβάνει αποτελέσματα όχι μόνο για τον αρχικό σχεδιασμό της, αλλά και για όλα τα απαραίτητα μέτρα-συντηρήσεις που χρειάζονται.

Στην απόφαση αυτή λαμβάνονται επίσης υπόψη παράγοντες όπως:

- την σπουδαιότητα της κατασκευής

- τον τύπο της κατασκευής (π.χ. η υπερστατικότητα μιας κατασκευής, στην οποία διαρρέουν ορισμένα μέλη, οδηγεί σε ανακατανομή της έντασης σε γειτονικά μέλη)
- την πιθανότητα σεισμών

Οι περισσότεροι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί θέτουν τα πιο κάτω κριτήρια συμπεριφοράς για συνήθης κατασκευές (Χρυσοστόμου 2009):

- **Ασθενείς σεισμοί:** κατασκευές χωρίς βλάβες (εντός του ελαστικού εύρους των τάσεων)
- **Μεσαίοι σεισμοί:** κατασκευές με ελάχιστες βλάβες στα φέροντα στοιχεία και μερικές βλάβες στα μη φέροντα
- **Ισχυροί σεισμοί (σεισμός σχεδιασμού):** κατασκευές με περιορισμένες αλλά επιδιορθώσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό, αλλά πιθανότητα κατάρρευσης επαρκώς μικρή.

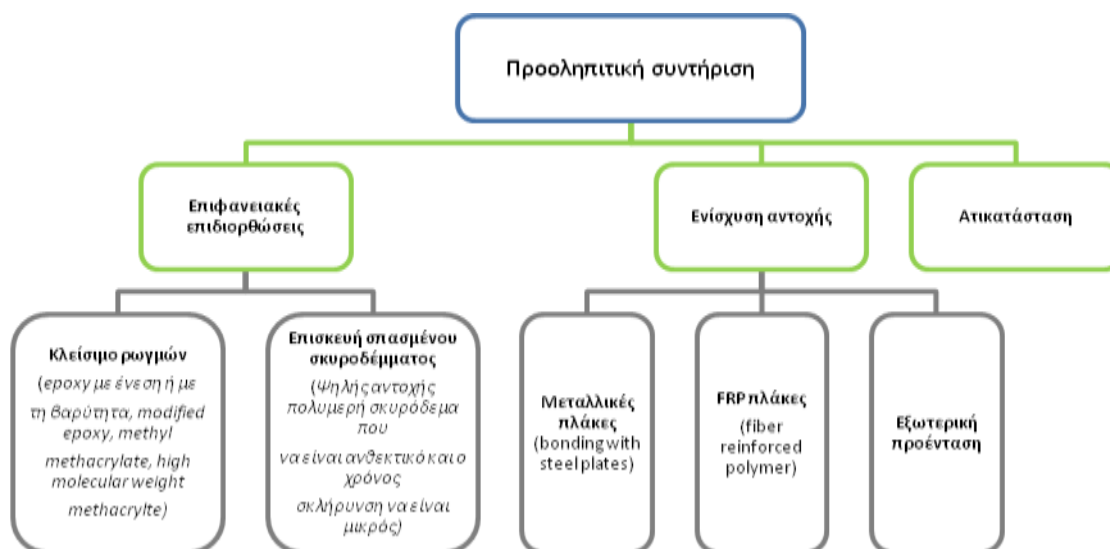
Η παραμόρφωση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω συνδέεται άμεσα με την πλαστιμότητα. Παρακάτω φαίνονται οι τρόποι αύξησης της πλαστιμότητας στα φέροντα στοιχεία της γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα (Γιαννόπουλος n.d.).

**Πίνακας 2: Επεμβάσεις για αύξηση της πλαστιμότητας στα διάφορα στοιχεία της γέφυρας**

Διατομές	Δοκοί	Υποστύλωματα
Αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος	Όλα όσα ισχύουν για τις διατομές  Αποφυγή αστοχιών από τη διάτμηση και συνάφεια.	Μείωση του αξονικού φορτίου
Μείωση της αντοχής του χάλυβα		Αύξηση περίσφιξης μέσω συνδετήρων
Μείωση του εφελκυσμένου οπλισμού		
Αύξηση του θλιβόμενου οπλισμού τοποθέτηση περισσότερων και πυκνότερων συνδετήρων		



Ανάλογα με την κατάσταση της γέφυρας αποφασίζεται και το είδος συντήρησης που θα ακολουθηθεί. Στο πιο κάτω διάγραμμα παρουσιάζονται μέτρα συντήρησης που προτείνονται σε περίπτωση παραμόρφωσης της γέφυρας (Ζωσιμα and Στρατηγη 2007; ΧΑΡΙΣ 2011):



**Διάγραμμα 6: Προτεινόμενα μέτρα συντήρησης σε περίπτωση παραμόρφωσης της γέφυρας**

## 7 Αστοχία γέφυρας

Πολλοί κώδικες καθορίζουν την μέγιστη αύξηση της καταπόνησης του χάλυβα να λαμβάνει χώρο μετά την ρηγματώση, όπως και τις μέγιστες απαιτήσεις για την ενίσχυση του. Η ύπαρξη των ρωγμών στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ουσιαστικά αποτελούν τα ορατά αποτελέσματα της παραμορφωσιμότητας ενός φορέα. Η καταρχήν διερεύνηση και εξακρίβωση των αιτιών των ρηγματώσεων και η μετέπειτα ορθή επιλογή της μεθόδου επέμβασης είναι ύψιστης σημασίας γιατί από αυτή την απόφαση θα εξαρτηθεί η εξέλιξη της συμπεριφοράς και το μέλλον της κατασκευής.

Οι βασικότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στην ανάπτυξη ρωγμών είναι οι ακόλουθες (ΦΩΤΗΣ and ΝΙΚΟΛΑΟΣ 2009):

- Συστολή ξύρασης του σκυροδέματος
  - Ο κορεσμένος τσιμεντοπολτός με νερό σε συνθήκες υγρασίας υφίσταται απώλεια νερού και συστέλλεται με συνέπεια την πρόκληση ρηγματώσεων
- Διάβρωση των ράβδων οπλισμού του σκυροδέματος
  - Οφείλεται κυρίως στη μικρή επικάλυψη με σκυρόδεμα, στην κακή ποιότητα του σκυροδέματος, στο πορώδες της μάζας του σκυροδέματος (δηλαδή από την καλή συμπίκνωση για την αποφυγή κενών), την τιμή του λόγου νερού προς τσιμέντο (καθορίζει το αν ή όχι ο στερεός ιστός του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού έχει πολλούς πόρους) κλπ
- Ελλιπής οπλισμός:
  - Ρωγμές λόγω υπέρβασης της αντοχής
  - Η επισκευή τους είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα στη δομική συμπεριφορά του μέλους ,αφού η περαιτέρω αύξηση της ροπής αντοχής της διατομής είναι πρακτικά αδύνατη
- Θερμοκρασιακές μεταβολές:
  - Συνήθως ακίνδυνες ρωγμές που επισκευάζονται για αισθητικούς λόγους
  - Παρατηρούνται κυρίως σε κατασκευές μεγάλου μεγέθους, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος κατά την ενυδάτωση του τσιμεντοπολτού

(λίγες ημέρες μετά τη σκυροδέτηση) προκαλεί ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων και ρηγμάτωση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των εξωτερικών επιφανειών (ψυχρότερες) με το εσωτερικό (θερμότερο) των στοιχείων.

- Συνηθισμένη μέθοδος περιορισμού της θερμοκρασιακής μεταβολής αποτελεί η πρόψυξη του σκυροδέματος με κρύα αδρανή κατά τη σκυροδέτηση, καθώς επίσης και με μερική αποκατάσταση του τσιμέντου με ποζολάνες
- Αυξημένα εξωτερικά φορτία:
  - Περαιτέρω αύξηση της εξωτερικής φόρτισης από τα προβλεπόμενα οδηγεί σε ρηγμάτωση της κατασκευής.
- Μη επαρκής συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος:
  - Εμφανίζεται μικρός αριθμός ρωγμών μεγάλου πλάτους στην περιοχή απώλειας της συνάφειας, συνήθως στις παρειές.
- Ανεπαρκής συντήρηση και τελείωμα:
  - Η εξωτερική επιφάνεια είναι πλουσιότερη σε νερό από το εσωτερικό
  - Παρουσιάζεται αρκετές εβδομάδες μετά τη σκυροδέτηση και γίνεται εμφανέστερη όταν η επιφάνεια έχει διαβραχεί.
  - Πρόκειται για τριχοειδείς ρωγμές μικρού μήκους και πολύ μικρού βάθους (1 mm) στην επιφανειακή στρώση του σκυροδέματος
- Πλαστική συστολή και πλαστική κάθιση
  - Η Πλαστική κάθιση παρουσιάζεται επί το πλείστον στο άνω άκρο υποστρώματος λόγω μεγάλης εξίδρωσης και συνθηκών απότομης αρχικής ξήρανσης
  - Η πλαστική συστολή εμφανίζεται συνήθως σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος λόγω μικρής εξίδρωσης, απότομης αρχικής ξήρανσης και ύπαρξης οπλισμού κοντά στην επιφάνεια.

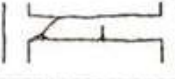
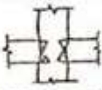

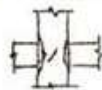


Αναγνωρίζοντας τον βαθμό βλάβης μιας κατασκευής, ακολουθείται η διαδικασία για επισκευή, ενίσχυση ή ακόμη και κατεδάφιση μέρους ή ολόκληρης της κατασκευής. Ο

βαθμός βλάβης μπορεί να συσχετιστεί με αντίστοιχες μορφές αστοχίας. Στους πίνακες πιο κάτω περιγράφονται οι μορφές αστοχίας ανάλογα με τον βαθμό βλάβης της κατασκευής και πιο συγκεκριμένα δίνονται ενδεικτικά μεγέθη ρωγμών για την κατάταξη τους. Για την λήψη πάντοτε της τελικής απόφασης απαιτείται πάντοτε η κρίση του μηχανικού.







**Πίνακας 3: Τυπικοί βαθμοί βλάβης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (Χρυσοστόμου 2009)**

Βαθμός βλάβης	Περιγραφή
1 = Καμία	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Κανένα ορατό σημάδι καταπόνησης</li> <li>2. Πολύ ελαφριές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία</li> <li>3. Τριχοειδής ρωγμές σε λίγες τοιχοπληρώσεις</li> <li>4. Ελαφρά απολέπιση της επικάλυψης</li> </ol>
2 = Ελαφρές	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Μικρές ρωγμές σε λίγες τοιχοπληρώσεις</li> <li>2. Ελαφρά απολέπιση σκυροδέματος. Ρωγμές σε κάποια φέροντα στοιχεία</li> <li>3. Διαταραχή, ολίσθηση</li> <li>4. Ρηγμάτωση ή μερική κατάρρευση στηθαίων</li> <li>5. Κλίση κατασκευής μόλις ορατή</li> </ol>
3 = Μέτριες -Σοβαρές	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Εκτεταμένες ή άλλες διαγώνιες μεγάλες ρηγματώσεις σε τοιχοπληρώσεις. Αποκολλήσεις ή μερικές αστοχίες τοιχοπληρώσεων</li> <li>2. Απολεπίσεις – μερική αποδιοργάνωση σκυροδέματος. Εντονότερες ρηγματώσεις σε αρκετά φέροντα στοιχεία</li> <li>3. Μετακινήσεις – μερικές καταρρεύσεις στηθαίων</li> <li>4. Ορατή κλίση. Ελαφριά μετακίνηση φερόντων στοιχείων</li> <li>5. Ήσσονος σημασίας παραμόρφωση εδάφους, αλλά όχι ενδείξεις αστοχίας θεμελίωσης</li> </ol>
4 = Βαριές - Ολικές	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Μερική ή ολική κατάρρευση</li> <li>2. Εκτεταμένες αστοχίες τοιχοπληρώσεων ή σοβαρές ρηγματώσεις ορατές και από τις δύο πλευρές</li> <li>3. Αποδιοργάνωση σκυροδέματος σε πολλά φέροντα στοιχεία και κόμβους, αποκάλυψη και λυγισμός ράβδων οπλισμού σε αρκετές θέσεις</li> <li>4. Κατάρρευση στηθαίων/ Εκτεταμένες βλάβες</li> <li>5. Σημαντική μετατόπιση φερόντων στοιχείων ή κλίση ολόκληρης της κατασκευής</li> <li>6. Σημαντικές μετακινήσεις εδάφους, ανασήκωμα πέδινων. Θραύση πεδילוδοκών ή κύρτωση περιμετρικών τοιχωμάτων</li> </ol>

Πίνακας 4: Βαθμοί βλάβης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (δοκοί, κόμβοι πλασιών) (Χρυσοστόμου 2009)

Βαθμός βλάβης	Δοκοί Ο.Σ.	Κόμβοι πλασιών Ο.Σ.
<b>1</b> Καμία	<ul style="list-style-type: none"> <li>Τριχοειδείς ρωγμές στο σκυροδέμα</li> </ul>	
<b>2</b> Ελαφρές	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{vert}} &lt; 2.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} &lt; 0.5 \text{ mm}</math></li> <li>Αποφλοιώση σκυροδέματος</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αποφλοιώση σκυροδέματος στις γωνιές</li> </ul> 
<b>3</b> Μέτριες - Σοβαρές	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{vert}} \leq 4.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>0.5 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li>Εκτενής αποφλοιώση, μερική αποδιοργάνωση σκυροδέματος</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αποφλοιώση σκυροδέματος</li> <li>Λοξές ρωγμές <math>d \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> </ul> 
<b>4</b> Βαριές - Ολικές	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>4.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{vert}}</math></li> <li><math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}}</math></li> <li>Λυγισμός οπλισμού</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Διαγώνιες ρωγμές <math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}}</math></li> <li>Αποδιοργάνωση σκυροδέματος</li> </ul> 
Συμβολισμός:	$d_{\text{diag}}$ : διαγώνιες ρωγμές (με κλίση ως προς τον άξονα του στοιχείου) $d_{\text{vert}}, d_{\text{horiz}}$ : κατακόρυφες και οριζόντιες ρωγμές (ως προς τον άξονα του στοιχείου) αντίστοιχα	

Πίνακας 5: Βαθμοί βλάβης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (υποστυλώματα, διατμητικά τοιχώματα) (Χρυσοστόμου 2009)

Βαθμός βλάβης	Υποστυλώματα Ο.Σ.	Διατμητικά Τοιχώματα Ο.Σ.
<b>1</b> Καμία	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μικρές ρωγμές στο κόνιαμα</li> <li>Ελαφρά αποφλοιώση σκυροδέματος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Δεν υπάρχουν ορατές ρωγμές</li> </ul>
<b>2</b> Ελαφρές	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{horiz}} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} \geq 0.5 \text{ mm}</math></li> <li>Αποφλοιώση σκυροδέματος</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_{\text{horiz}} \leq 1.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>d_{\text{diag}} \geq 0.5 \text{ mm}</math></li> </ul> 
<b>3</b> Μέτριες - Σοβαρές	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{horiz}} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>0.5 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}} \leq 2.0 \text{ mm}</math></li> <li>Μερική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>1.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{horiz}} \leq 3.0 \text{ mm}</math></li> <li><math>0.5 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}} \leq 1.0 \text{ mm}</math></li> <li>Αποφλοιώση σκυροδέματος</li> </ul> 
<b>4</b> Βαριές - Ολικές	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>5.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{horiz}}</math></li> <li><math>2.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}}</math></li> <li>Εκτεταμένη αποδιοργάνωση σκυροδέματος</li> <li>Λυγισμός διαμήκους οπλισμού</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>3.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{horiz}}</math></li> <li><math>1.0 \text{ mm} &lt; d_{\text{diag}}</math></li> <li>Αποδιοργάνωση σκυροδέματος</li> </ul> 
Συμβολισμός:	$d_{\text{diag}}$ : διαγώνιες ρωγμές (με κλίση ως προς τον άξονα του στοιχείου) $d_{\text{vert}}, d_{\text{horiz}}$ : κατακόρυφες και οριζόντιες ρωγμές (ως προς τον άξονα του στοιχείου) αντίστοιχα	

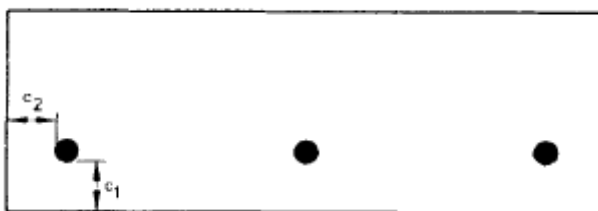
## 8 Μέθοδος πιθανολογικής ανάλυσης

Η ακόλουθη πιθανολογική διαδικασία υιοθετείται για τον υπολογισμό-υπόθεση της αποτελεσματικότητας των διάφορων μέτρων προληπτικής συντήρησης σε περίπτωση ριγματώσεων λαμβάνοντας υπόψη και πιθανές αβεβαιότητες που μπορεί να παρουσιαστούν. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται παρόμοια μεθοδολογία με την μελέτη της Ε. Ταντελέ (Ref. 36) καθηγήτρια του ΤΕΠΑΚ και επιβλέπων της εργασίας μου. Το πλάτος των ρωγμών στο σκυρόδεμα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο που προτείνεται στο (Ref. 7).

$$W_C = 4\Delta d \left\{ \left[ \frac{c_1 + d/2}{c_2 + d/2} \right] \sin \theta + \cos \theta \right\} \sin \theta \quad (2)$$

όπου:

- $d$  είναι η διάμετρος των ράβδων του οπλισμού (cm)
- $\Delta d$  είναι η αύξηση των διαμέτρων των ράβδων οι οποίες έχουν διαβρωθεί (cm) και ισούται με  $\Delta d = \left\{ \left( \sqrt{d^2 + 4W_t d / \rho} \right) - d \right\} / 2$
- $W_t$  είναι η απώλεια βάρους του χάλυβα ( $\text{g/cm}^2$ )
- $\rho$  είναι η πυκνότητα του προϊόντος διάβρωσης
- $c_1, c_2$  είναι η απόσταση μεταξύ της ράβδου και της κάλυψης της επιφάνεια και της κάθετης επιφάνειας (βλπ. διάγραμμα 7) (cm)
- $\theta$  είναι η γωνιά μεταξύ της κατεύθυνσης της πρώτης ρωγμής και της δεύτερης.



Διάγραμμα 7: Επεξήγηση μεταβλητών  $c_1, c_2$

Με την εφαρμογή των προληπτικών μέτρων σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, ο σχηματισμός των ρωγμών μπορεί να αναβληθεί ή / και αναστέλλεται. Ως αποτέλεσμα, η πιθανότητα αστοχίας μπορεί να διατηρηθεί μέσα σε ένα αποδεκτό επίπεδο που θέτουμε εμείς. Στην μελέτη αυτή αποτυχία θεωρείται ότι συμβαίνει όταν το πάχος της ρωγμής υπερβαίνει μια προκαθορισμένη τιμή. Μαθηματικά, αυτό μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη οριακή κατάσταση:

$$G(x) = C_{cc} - C_{cm} \quad (2)$$

όπου:

- $C_{cc}$  είναι το οριακό πλάτος ρωγμής που θεωρείται ότι η κατασκευή έχει αστοχήσει (mm)
- $C_{cm}$  είναι το πλάτος της ρωγμής που υπολογίζεται από τον τύπο 1 (mm)

Έτσι, η αποτελεσματικότητα των μέτρων που λαμβάνονται μπορεί να περιγραφεί ως η πιθανότητα αστοχίας χρησιμοποιώντας την παραπάνω οριακή κατάσταση:

$$p_{f(t)} = p(G(x) > 0) = p(C_{cc} - C_{cm} > 0) \quad (3)$$

Η πιθανότητα αποτυχίας ( $p_f$ ) των διαφόρων προληπτικών μέτρων εκτιμάται μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo. Ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των αποτυχιών που προέκυψαν από την εξίσωση 3 προς τον συνολικό αριθμό των κύκλων προσομοίωσης

$$p_{f(t)} = N_f(t)/N(t) \quad (4)$$

όπου :

- $N_f(t)$  είναι ο αριθμός των προσομοιώσεων όπου  $G(x) < 0$
- $N(t)$  είναι ο συνολικός αριθμός προσομοιώσεων

Η στατιστική ακρίβεια της πιθανότητας βάση των προσομοιώσεων εκτιμάται με τον συντελεστή διακύμανσης (CoV):

$$CoV(p_f) \cong \frac{\sqrt{\frac{(1-p_f)p_f}{N}}}{p_f} \quad (5)$$

Όσο μικρότερη είναι η τιμή CoV, τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια της εκτιμώμενης πιθανότητας  $p_f$ . Η αποτελεσματικότητα των διαφόρων μέτρων, βάση την ικανότητά τους να μειώνουν ή και να αναστέλλουν την δημιουργία ρωγμών ενσωματώνεται στο μοντέλο ώστε να παραχθεί το βέλτιστο.

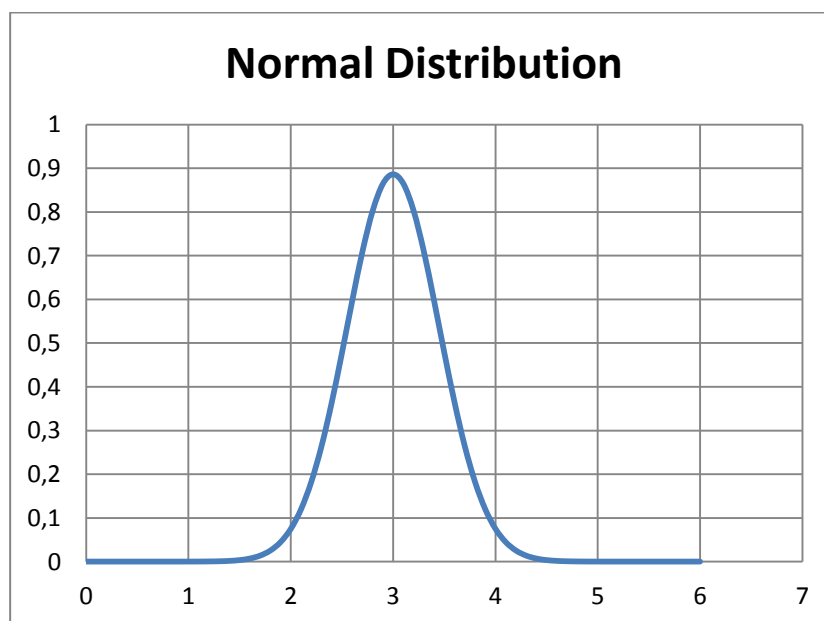
Παρακάτω γίνεται ανάλυση για την πιθανότητα αστοχίας σε γέφυρα με ρωγμή πλάτους 3 mm

Το  $C_{cc}$  θεωρείται ίσο με 4 mm, όπου είναι η κρίσιμη τιμή ρωγμής δοκού για βαριές- ολικές βλάβες σύμφωνα με τον οδηγό εκτέλεσης μετασεισμικών έργων για δοκούς

#### Crack measure

$\mu(m) = 3 \text{ mm}$

$\sigma(m) = 15 \%$



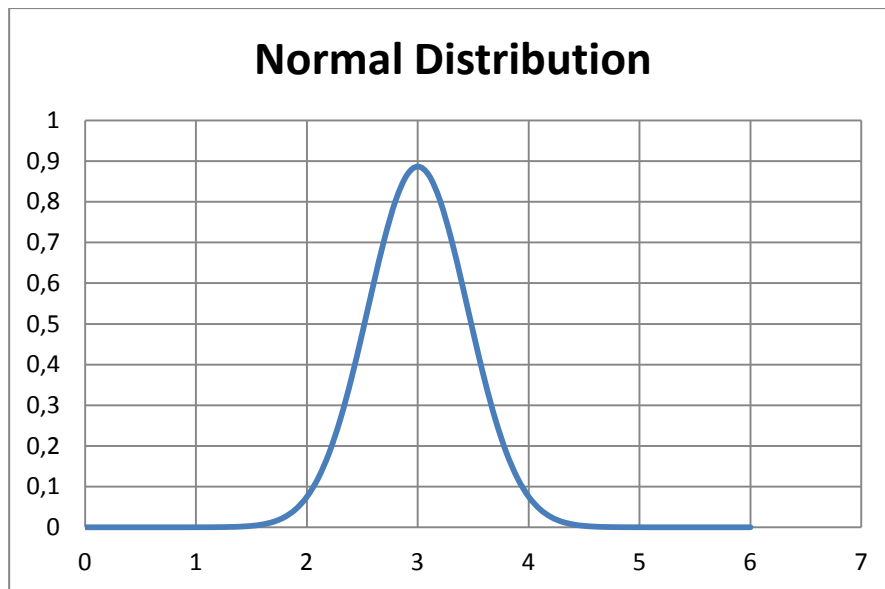
Διάγραμμα 8: Κανονική κατανομή για  $\mu=3\text{mm}$  και  $\sigma=15\%$



Crack critical

$$\mu(c) = 4 \text{ mm}$$

$$\sigma(c) = 20 \%$$



Διάγραμμα 9: Κανονική κατανομή για  $\mu=4\text{mm}$  και  $\sigma=20\%$

$$B = \frac{\mu_M}{\sigma_G} = \frac{4 - 3}{\sqrt{0,8^2 + 0,45^2}} = \frac{1}{0,917878} = 1,09$$

$$p_{f(t)} = p(G(x) > 0) = p(C_{cc} - C_{cm} > 0) = d(-B) = d(-1,09)$$

Από Παράρτημα 1:  $p_{f(t)} = 0,1379$

Πιθανότητα αστοχίας =  $1 - p_{f(t)} = 0,8621 = 86\%$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι γέφυρες αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά έργα ενός αυτοκινητόδρομου, τόσο από πλευράς τεχνικής δυσκολίας αλλά και οικονομικής βιωσιμότητας και η αστοχία τους θα επιφέρει ισχυρό κοινωνικό αντίκτυπο. Με την πάροδο του χρόνου, όπως και κάθε κατασκευή φθείρεται τόσο επιφανειακά αλλά και εσωτερικά. Η ζημιές αυτές μπορούν να καταταχθούν σε μηδενικής ή ύψιστης σημασίας. Σημαντικό είναι η ζημιές αυτές ή αστοχίες να επισκευάζονται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα ή ακόμη και να αποτρέπονται αν είναι εφικτό αφού όσο καθυστερεί η επισκευή το κόστος και ο χρόνος επαναφοράς μεγαλώνουν. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό έργα σαν αυτά να παρακολουθούνται όσο το δυνατό πιο συχνά αφού ένα συμβάν (π.χ. σεισμός ή τροχαίο ατύχημα στο φορέα) είναι αρκετό ώστε να μειώσει την αντοχή τους.

Η παρακολούθηση των έργων μπορεί να γίνει με οπτικό έλεγχο, με οπτικό ενόργανο έλεγχο είτε με έξυπνα συστήματα παρακολούθησης. Ανάλογα με την σημαντικότητα ενός έργου επιλέγεται και ο τρόπος παρακολούθησης. Σε γέφυρες ύψιστης σημασίας χρησιμοποιούνται έξυπνα συστήματα παρακολούθησης κατά τα οποία λαμβάνονται συνεχώς μετρήσεις και με τη βοήθεια υπολογιστικών επεξεργασιών γίνεται αναβάθμιση του μοντέλου της γέφυρας και παρουσιάζονται πιθανές ζημιές και αστοχίες που υπάρχουν ή που πιθανόν να υπάρξουν στο μέλλον. Η πιο σύγχρονες μέθοδοι λήψης μετρήσεων είναι είτε με οπτικές ίνες, οι οποίες τοποθετούνται στη γέφυρα κατά τη κατασκευή της, είτε με αισθητήρες που λειτουργούν με ακουστικά κύματα και συνδέονται μέσω υπολογιστών με τη μονάδα ελέγχου και παρακολούθησης. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν την δυνατότητα να εντοπίζουν ρωγμές στο σκυρόδεμα και να προειδοποιούν τότε υπάρχει κίνδυνος αστοχίας.

Η γέφυρα μπορεί να παρομοιαστεί με τον άνθρωπο. Δηλαδή, σαν ένα μοναδικό ζωντανό οργανισμό. Η κάθε γέφυρα έχει τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά, παρόλα αυτά όπως και στους ανθρώπους, ορισμένα είναι παρόμοια με άλλων. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται γήρανση του σώματος και η επαναφορά του στην αρχική του κατάσταση εκτός του ότι είναι πολύ δύσκολη, κοστίζει. Επίσης, όταν ένα από τα ζωτικά του όργανα υπολειτουργεί, τότε όλος ο οργανισμός είναι σε κακή κατάσταση. Χρησιμοποιώντας αυτή τη σύγκριση του ανθρώπου με τις κατασκευές, δημιουργήθηκαν και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι,

όπου σκοπός του είναι να κάνουν κάτι παρόμοιο με την φυσική εξέλιξη του ανθρώπου. Να βελτιώσουν δηλαδή το DNA παίρνοντας μόνο τα θετικά χαρακτηριστικά από τις προηγούμενες γενιές. Η χρήση των αλγορίθμων αυτών με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται όλο και πιο πολύ αφού με την βοήθεια τους μπορούν να βρεθούν βέλτιστες λύσεις που να καλύπτουν πολλά κριτήρια ταυτόχρονα.

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. Με την βοήθεια της προληπτικής συντήρησης, φαίνεται ότι επιτυγχάνεται η αύξηση της απόδοσης της γέφυρας με μικρότερο συνολικό κόστος στη διάρκεια της ζωής της. Ανάλογα με τη μέθοδο συντήρησης και τη χρονική στιγμή που θα γίνει, επηρεάζεται και το κόστος. Με την βοήθεια όμως των αλγόριθμων μπορούν να βρεθούν όλες οι πιθανές βέλτιστες λύσεις για κάθε περίπτωση. 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 τον τρόπο αυτό, θα περιοριστεί το προκαθορισμένο σχέδιο συντήρησης, που πιθανών να αναφέρει άσκοπες ενέργειες από πλευράς κόστους και απόδοσης, και να πραγματοποιούνται μόνο οι απαραίτητες ενέργειες στο χρόνο που θα καθοριστεί κατάλληλος σύμφωνα με μετρήσεις της παρούσας κατάστασης της γέφυρας και όχι με σενάρια πιθανής μεταβολής, όπως συνέβαινε παλαιότερα. Έτσι, η μορφή της δράσης είναι πλέον προληπτική και ολοκληρωμένη και όχι αντιδραστική. Ως επακόλουθο, είναι αναγκαίο να μειωθεί η αβεβαιότητα στο ελάχιστο δυνατό για την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης δράσης.

Μελετώντας τις αλλαγές που παρατηρούνται στις συνθήκες των γεφυρών με το πέρασμα των χρόνων, οι ερευνητές κατάφεραν να αναπτύξουν μοντέλα για να διαχωρίσουν τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων συντήρησης από τις κανονικές διαδικασίες αλλοίωσης των γεφυρών. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σε αυτό τον τομέα, μας βοήθησε να κατανοήσουμε εις βάθος τις φυσικές διαδικασίες αλλοίωσης, αλλά και να φτάσουμε στο επίπεδο ώστε να αναγνωρίζουμε το βαθμό που συμβάλει κάθε συντήρησης στην απόδοση της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, αναγνωρίζοντας τις κατασκευαστικές ζημιές στην αξιοπιστία και απόδοση

των κατασκευαστικών συστατικών, βελτιώνεται όλος ο κύκλος ζωής του έργου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση με περιορισμένους πόρους.

Με το να κάνουμε τα μοντέλα βελτιστοποίησης γρηγορότερα και πιο ευέλικτα, η εφαρμογή νέων υπολογιστικών τεχνικών και παραδειγμάτων, μπορεί να παρέχει ένα μέσο εφαρμογής των ερευνητικών αποτελεσμάτων με πιο λεπτομερή και ρεαλιστικά δεδομένα και μοντέλα, ξεκινώντας την εστίαση σε προληπτικές οικονομικά αποδοτικές στρατηγικές από την αρχή, όταν η γέφυρα είναι καινούργια.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Association for Project Management.” (n.d.). <<https://www.apm.org.uk>>.
2. Ballim, Y., and Reid, J. C. (2003). “Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams — an experimental critique of current test methods.” 25, 625–632.
3. Barone, G., and Frangopol, D. M. (2014). “Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost.”
4. Bocchini, P., and Frangopol, D. (2011a). “A probabilistic computational framework or bridge network optimal maintenance scheduling, *Reliability Engineering & System Safety*.” 96(2), 332–349.
5. Bocchini, P., and Frangopol, D. M. (2011b). “A probabilistic computational framework for bridge network optimal maintenance scheduling.” *Reliability Engineering & System Safety*, 96(2), 332–349.
6. Bogdan, T., Andreas, S., Antoni, S.-A., and Villafafila-Robles, R. (2013). “Pareto Optimal Reconfiguration of Power Distribution Systems Using a Genetic Algorithm Based on NSGA-II.”
7. Cabrera, J. G. (1996). “Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion.” 9465(95), 47–59.
8. Carlos A. Coello. (n.d.). “Evolutionary Multiobjective Optimization: Past, Present and Future.”
9. Chapman, C., and Ward, S. (2002). “Project Risk Managment: Processes Techniques and Insights.”
10. Crouch, E. A. C., and Wilson, R. (1982). *Risk/Benefit analysis*.
11. Darwin, D., Browning, J., and Lindquist, W. D. (2004). “Control of Cracking in Bridge Decks: Observations from the Field.” *Cement, Concrete, and Aggregates*, 26(2), 1–7.
12. Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*.

13. Dinitz, A. M., and Stenko, M. S. (2010). "The Successful Use of Thin Polysulfide Epoxy Polymer Concrete Overlays on Concrete and Steel Orthotropic Bridge Decks." *Structures Congress 2010*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 530–540.
14. Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria Optimization*. Springer.
15. FIELD TRIALS DRAFT. (2000). "Departmental advice note BA 81 Whole life assessment of highway bridges and structures."
16. Fonseca, C., and Fleming, P. (1993). "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization." *Proceedings of the Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, (July), 416–423.
17. Frangopol, D. M., Saydam, D., and Kim, S. (2012). "Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review." *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 8(1), 1–25.
18. Gilbert, I. (2001). "Shrinkage, Cracking and Deflection-the Serviceability of Concrete Structures." *Electronic Journal of Structural Engineering*, 1.
19. Hearn, G., Purvis, R. L., Thompson, P., Bushman, W. H., McGhee, K. K., and McKeel JR., W. T. (n.d.). "Bridge Maintenance and Management A Look to the Future."
20. Highway Agency. (1999). "Serviceable life of highway structures and their components."
21. Ivanov, S. Y., and K. Ray, A. (2014). "Multiobjective Optimization of Industrial Petroleum Processing Units Using Genetic Algorithms." *Procedia Chemistry*, 10, 7–14.
22. Konak, A., Coit, D. W., and Smith, A. E. (2006). "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial."
23. Lapko, A., and Urba, M. (2015). "Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar." 5.
24. Liu, M., and Frangopol, D. M. (2005). "Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-Cycle Cost." *Journal of Structural Engineering*.

25. Lock, D. (2000). *Διαχείριση έργων*. (Μ. Σ. Ν., ed.), Εκδόσεις Έλλην.
26. Nguyen, T. T., Yang, S., and Branke, J. (2012). “Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art.” *Swarm and Evolutionary Computation*, 6, 1–24.
27. Noortwijk, J., and Frangopol, D. (2004). “Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures, Probabilistic Engineering Mechanics.” 19(4), 345–359.
28. Okasha, N., and Frangopol, D. (2009a). “Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA, Structural Safety.” 31(6), 460–474.
29. Okasha, N. M., and Frangopol, D. M. (2009b). “Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA.” *Structural Safety*, 31(6), 460–474.
30. Okasha, N. M., and Frangopol, D. M. (2010). “Novel Approach for Multicriteria Optimization of Life-Cycle Preventive and Essential Maintenance of Deteriorating Structures.” *Journal of Structural Engineering*.
31. Orcesi, A. D., and Cremona, C. F. (2010). “A bridge network maintenance framework for Pareto optimization of stakeholders/users costs.” *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11), 1230–1243.
32. “Project Management Institute.” (n.d.). <<https://www.pmi.org/>>.
33. Rettner, D. L. (2014). “Analysis of Bridge Deck Cracking Data A Review of Mechanisms , Analysis of MnDOT.” (February).
34. Shaw, M. (n.d.). “STRUCTURAL STRENGTHENING WITH EXTERNAL PLATE BONDING.”
35. Singh, D., and Tiong, R. (2005). “Development of life cycle costing framework for highway bridges in Myanmar, International Journal of Project Management.” 23(1), 37–44.
36. Tantele, E. (n.d.). “Integration of probabilistic effectiveness with a two-stage genetic algorithm methodology to develop optimum maintenance strategies for bridges (Repaired).”

37. Van Veldhuizen, D. A., and Lamont, G. B. (2000). "Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art." *Evolutionary computation*, 8(2), 125–147.
38. Weise, T. (2009). *Global Optimization Algorithms – Theory and Application*.
39. Yang, I.-T., Hsieh, Y.-M., and Kung, L.-O. (2012). "Parallel Computing Platform for Multiobjective Simulation Optimization of Bridge Maintenance Planning." *Journal of Construction Engineering and Management*.
40. Yang, S., Frangopol, D., and Neves, L. (2006). "Optimum maintenance strategy for deteriorating bridge structures based on lifetime functions, Engineering Structures." 28(2), 196–206.
41. Zadlauskas, S., Augonis, M., and Krašauskas, L. (2013). "Investigation of Width of Vertical Cracks in Reinforced Concrete Box-Girder Viaducts." 3(3).
42. Zhou, A., Qu, B.-Y., Li, H., Zhao, S.-Z., Suganthan, P. N., and Zhang, Q. (2011). "Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art." *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), 32–49.
43. Zhu, J., and Liu, B. (2013). "Performance Life Cost-Based Maintenance Strategy Optimization for Reinforced Concrete Girder Bridges." 18(2), 172–178.
44. Zitzler, E., and Lothar, T. (2006). "Multiobjective optimization using evolutionary algorithms — A comparative case study." *Lecture Notes in Computer Science*, (A. E. Eiben, T. Bäck, M. Schoenauer, and H.-P. Schwefel, eds.), Berlin, Heidelberg.
45. Ζωσιμα, Ε., and Στρατηγη, Β. (2007). "Ένισχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδεματος με ffr ( ινοπλισμενα πολυμερη )." *13ο Φοιτητικό Συνέδριο : Επισκευές Κατασκευών*.
46. Αθανασόπουλος, Α. (2014). "Διαχείριση Κινδύνων έργων: Η περίπτωση της γέφυρας Ριου-Αντιρρίου." Πανεπιστήμιο Πατρών.
47. Γιαννόπουλος, Π. Ι. (n.d.). "ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ."
48. Δρίτσος, Σ. (2012). "Διαστασιολόγηση Επεμβάσεων."
49. Ζυγούρης, Κ. (2006). "Συστήματα Παρακολούθησης και Στρατηγικές Διαχείρισης Γεφυρών."



50. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, Α. (2009). “ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΛΑΦΡΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ FRP’s.”
51. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και ΙΤΣΑΚ. (2003). *Ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης και διάγνωσης στατικής ανεπάρκειας σημαντικών γεφυρών της Ε.Ο.Α.Ε, αναφορά για την ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.*
52. Πανέτσος, Π., Ρεντζεπέρης, Ι., and Λιώλιος, Α. (2006). “Σύστημα Διαχείρισης Κύριας Συντήρησης Οδικών Γεφυρών από Σκυρόδεμα στην ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.”
53. Ταντελέ, Έ. (2014). *Σημειώσεις μαθήματος Αειφόρος διαχείριση επικινδυνότητας και αξιοπιστία στην μηχανική*. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής.
54. Ταντελέ, Έ. (2015). *Σημειώσεις μαθήματος Αντοχή στον χρόνο και διαχείριση επικινδυνότητας έργων υποδομής*. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής.
55. ΦΩΤΗΣ, Κ., and ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Σ. (2009). “ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.” 9–24.
56. ΧΑΡΙΣ, Κ. (2011). “ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ FRP.” *17ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών*, 61–68.
57. Χρυσοστόμου, Κ. (2009). *Οδηγός για την εκτέλεση μετασεισμικών ελέγχων οικοδομών*.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**