



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΜΣ «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑ»

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΑΠΟ Ο/Σ**

ΤΣΟΛΑΚΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ  
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη **Τσολάκου Αναστασία**, με αριθμό μητρώου **14** φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «**Δομοστατικά Έργα**» του Τμήματος **Πολιτικών Μηχανικών** της Σχολής **Μηχανικών** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι **16/02/2021** και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.



Η Δηλούσα

Τσολάκου Αναστασία

ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ		
Επιβλέπων Καθηγητής	Πνευματικός Νικόλαος	
Μέλος	Δημάκος Κωνσταντίνος	
Μέλος	Μαγείρου Γεώργιος	

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Εισαγωγή.....	8
<b>1. ΚΟΠΩΣΗ .....</b>	<b>9</b>
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥ .....	9
1.2 Η ΑΝΑΓΚΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	9
1.3 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	9
1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ.....	10
1.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	10
1.5.1 Επιφανειακές κατεργασίες και Περιβαλλοντικοί πατάγοντες .....	10
1.5.2 Στατική & Δυναμική Καταπόνηση .....	11
1.5.3 Κυκλικές τάσεις .....	13
1.5.4 Καμπύλες S-N (Wöhler).....	14
1.5.5 Πολυκυκλική κόπωση και Ολιγοκυκλική κόπωση.....	16
1.5.6 Πειραματική Διαδικασία .....	16
1.5.7 Κριτήριο Miner .....	18
1.5.8 Χρόνος ζωής των κατασκευών λόγω ατελειών .....	18
<b>2. ΘΡΑΥΣΗ.....</b>	<b>19</b>
2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ.....	19
2.2 ΘΕΩΡΙΑ GRIFFITH ΓΙΑ ΤΗΝ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ .....	19
2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	24
2.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ K ΚΑΙ Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	25
2.5 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΥΠΟ ΚΟΠΩΣΗ .....	29
<b>3. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ.....</b>	<b>30</b>
3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΩΝ ΜΚΕ.....	30
3.2 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΜΚΕ .....	33
3.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	34
3.3.1 Οπτικός Έλεγχος .....	34
3.3.2 Οπτικός Έλεγχος με μικροσκόπιο .....	34
3.3.3 Οπτικός Έλεγχος με βιντεοσκόπηση.....	34
3.3.4 Οπτικός Έλεγχος με Laser .....	34
3.4 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	36
3.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΕΡΗΧΩΝ .....	37
3.6 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	37
3.6.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι .....	37
3.6.2 Μαγνητικές μέθοδοι .....	38
3.7 ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ.....	39

3.8	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	41
3.8.1	Μέθοδος θερμικών εκπομπών .....	41
3.8.2	Θερμογραφική μέθοδος.....	41
3.9	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	41
<b>4.</b>	<b>ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ .....</b>	<b>43</b>
4.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	43
4.2	ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ.....	43
4.3	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	43
4.4	ΦΑΣΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ.....	44
4.5	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ .....	44
4.6	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ λ .....	44
4.7	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΥΠΟ ΚΟΠΩΣΗ.....	48
<b>5.</b>	<b>ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΟΣΚΑΦΗΣ ΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ .....</b>	<b>50</b>
5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	50
5.2	ΜΟΡΦΕΣ ΥΠΟΣΚΑΦΗΣ .....	51
5.3	ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ .....	52
5.4	ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΥΠΟΣΚΑΦΗΣ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ .....	62
5.5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	64
5.6	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΥΠΟΣΚΑΦΗ 66	
5.7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΜΕΣΟΒΑΘΡΑ ΓΕΦΥΡΩΝ .....	72
5.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	74
<b>6.</b>	<b>ΕΠΙΤΑΚΤΙΚΗ ΑΝΑΓΚΗ ΣΥΝΤΑΞΗΣ ΜΗΤΡΩΟΥ ΓΕΦΥΡΩΝ .....</b>	<b>75</b>
<b>7.</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΦΥΡΑΣ.....</b>	<b>77</b>
<b>8.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>114</b>

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση και σχεδιασμός γέφυρας από Ο/Σ και μελέτη φορτίσεων στις οποίες υπόκεινται οι υφιστάμενες γέφυρες

Τσολάκου Α. (Επιβλέπων Πνευματικός Ν.)

### Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και τον σχεδιασμό μιας γέφυρας από Ο/Σ σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις των Ευρωπαϊκών Προτύπων. Η ανάλυση της κατασκευής υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος CSI Bridge στο οποίο αναπτύξαμε το προσομοίωμα του φέροντα οργανισμού της.

Στο Α' Μέρος της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες του φαινομένου της κόπωσης και της θραύσης. Γίνεται μελέτη των περιπτώσεων αυτών που πλήττουν διάφορες κατασκευές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ) και αναλύεται η εφαρμογή των μεθόδων αυτών. Έπειτα παρουσιάζεται το φαινόμενο της κόπωσης στην περίπτωση του δομοστατικού έργου της γέφυρας που είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, όπως τέλος παρουσιάζεται και το φαινόμενο της υποσκαφής των γεφυρών που είναι πολύ συχνό πλέον μιας και οι περισσότερες γέφυρες στη χώρα μας είναι αρκετών ετών και επιτάσσεται να εξελιχθεί και να μελετηθεί το φαινόμενο αυτό σε βάθος πια.

Στο Β' Μέρος αναλύεται το βασικό θέμα της παρούσας εργασίας, προσδιορίζοντας τα στοιχεία της γέφυρας που θα μελετηθεί. Με βάση τα κείμενα των Ευροκωδίκων αρχικά προσδιορίσαμε τα φορτία σχεδιασμού με τα οποία υλοποιήσαμε την ανάλυση του φορέα μας. Στο αρχικό στάδιο της μελέτης, τα αποτελέσματα των στατικών και δυναμικών αναλύσεων που εξήχθησαν από το πρόγραμμα λειτούργησαν ως έλεγχος μόρφωσης και οδηγός για τη βελτιστοποίηση του προσομοιώματος.

Με τα παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη της δυναμικής ανάλυσης πραγματοποιήσαμε τους αντισεισμικούς ελέγχους ασφάλειας της κατασκευής, σχεδιάσαμε τον φορέα, κάναμε κοστολόγηση της κατασκευής και τέλος παρουσιάσαμε ένα χρονοδιάγραμμα του έργου.

Από τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν την ανάλυση, το σχεδιασμό γεφυρών με παρόμοια χαρακτηριστικά, είτε αναφερόμαστε σε μεμονωμένα μέλη της κατασκευής είτε στη συμπεριφορά της γέφυρας ως σύνολο.

University of West Attica

Department of Civil Engineering

Postgraduate Thesis

Analysis and design of a bridge by concrete and study of loads to which the existing bridges are subject

Tsolakou A. (supervised by Pneumatikos N.)

### Abstract

This diploma thesis deals with the study and design of a bridge by concrete in accordance with the applicable provisions of European Standards. The analysis of the construction was carried out with the help of the CSI Bridge program in which we developed the simulation of its supporting organism.

In Part A of the work is an introduction to the basic concepts of the phenomenon of fatigue and fracture. These cases that affect various constructions are studied. Then the Non-Destructive Methods are presented and the application of these methods is analyzed. Then there is the phenomenon of fatigue in the case of the structural work of the bridge which is the subject of this diploma, as well as the phenomenon of digging bridges which is very common now since most bridges in our country are several years old and required to develop and study this phenomenon in depth now.

Part B analyzes the main topic of the present work, identifying the elements of the bridge that will be studied. Based on the texts of the Eurocodes, we initially determined the design loads with which we implemented the analysis of our body. In the initial stage of the study, the results of the static and dynamic analyzes extracted from the program functioned as a training control and guide for optimizing the simulation.

With the deformation and intensive quantities of the dynamic analysis, we carried out the anti-seismic safety inspections of the construction, designed the structure, made a costing of the construction and finally presented a project schedule.

From the study of the present dissertation, useful conclusions can be drawn regarding the analysis, the design of bridges with similar characteristics, whether we are referring to individual members of the construction or to the behavior of the bridge as a whole.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Δομοστατικά Έργα» του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η εργασία αυτή έχει ως θέμα την εξέταση των διαφόρων φορτίσεων στις οποίες υπόκεινται οι υφιστάμενες γέφυρες, καθώς και την ανάλυση και τον σχεδιασμό μιας γέφυρας από Ο/Σ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Νικόλαο Πνευματικό για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια του για την ολοκλήρωσή της.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αγαπημένα μου πρόσωπα για την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος το οποίο παρακολούθησα.

## Εισαγωγή

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος μελέτης έγινε λόγω του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για την επιστήμη του Δομοστατικού μηχανικού και ειδικότερα για τις γέφυρες. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν μέσω της εκπόνησης της μελέτης μίας γέφυρας να εφαρμοστούν οι γνώσεις που αποκτήθηκαν στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών, εμβαθύνοντας παράλληλα στις κανονιστικές διατάξεις των Ευρωπαϊκών Προτύπων και να αναπτυχθούν δεξιότητες που αφορούν το σχεδιασμό προσομοιωμάτων σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Επίσης, προσπάθεια έγινε να διερευνηθούν βέλτιστοι τρόποι σχεδιασμού συγκεκριμένων μελών και προσομοίωσής τους με τον πιο αντιπροσωπευτικό τρόπο στο πρόγραμμα ανάλυσης που χρησιμοποιήσαμε.

Δομή της εργασίας:

-Κεφάλαιο 1. Γίνεται παρουσίαση του φαινομένου της κόπωσης ως μέσω καταπόνησης των κατασκευών.

-Κεφάλαιο 2. Παρουσίαση του φαινομένου της θραύσης ως μέσω καταπόνησης των κατασκευών.

-Κεφάλαιο 3. Γίνεται αναφορά στις Μη Καταστροφικές Ελέγχους και ανάλυση των εφαρμογών κάθε μιας εξ'αυτών.

-Κεφάλαιο 4. Γίνεται αναφορά στο φαινομένου της κόπωσης ως μέσω καταπόνησης των γεφυρών.

-Κεφάλαιο 5. Αναφέρεται στο φαινόμενο της υποσκαφής των γεφυρών και παρουσιάζονται πολλά παραδείγματα από τον ελλαδικό χώρο που οδήγησαν στην κατάρρευση των κατασκευών.

-Κεφάλαιο 6. Δίνεται έμφαση στην ανάγκη σύνταξης μητρώου γεφυρών.

-Κεφάλαιο 7. Παρουσιάζεται η ανάλυση και ο σχεδιασμός της γέφυρας από Ο/Σ.



# 1. ΚΟΠΩΣΗ

## 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥ

Όταν σε ένα υλικό ασκείται μια επαναλαμβανόμενη φόρτιση η οποία έχει ως συνέπεια τη δημιουργία αυξομειούμενων τάσεων, με αποτέλεσμα να επέρχεται σε πολλές περιπτώσεις αστοχία του υλικού, ακόμη και αν οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται παραμένουν αρκετά μικρότερες από το όριο διαρροής του.

Ως **κόπωση (fatigue)**, ορίζουμε το φαινόμενο δημιουργίας μηχανισμού αστοχίας μέσω ανάπτυξης ρωγμών στο υλικό, επιπλέον τα φορτία και οι τάσεις αποκαλούνται φορτία και τάσεις κόπωσης.

## 1.2 Η ΑΝΑΓΚΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Η μελέτη του φαινομένου της κόπωσης και η πρόβλεψη και αποφυγή αστοχιών που οφείλονται σε αυτήν, είναι αντικείμενο επιστημονικών μελετών για πάνω από 150 χρόνια. Μάλιστα, καθώς η πρόοδος της τεχνολογίας έφερε σε χρήση νέα δομικά στοιχεία, τα οποία βρήκαν εφαρμογή σε κατασκευές όπως αυτοκίνητα, αεροσκάφη, συμπιεστές, στρόβιλοι, κ.λ.π., στα οποία οι μηχανικές καταπονήσεις είναι κατ' εξοχήν δυναμικές, η κόπωση απέκτησε σταδιακά όλο και μεγαλύτερη σημασία σαν μηχανισμός αστοχίας.

Σήμερα εκτιμάται ότι το 90% των αστοχιών, που προέρχονται από μηχανικά αίτια, οφείλεται σε κόπωση. Ιστορικά, έχουν καταγραφεί πολλά συμβάντα που προκλήθηκαν από αστοχία υλικών λόγω του φαινομένου της κόπωσης, που προκάλεσαν μεγάλες υλικές ζημιές και κόστισαν την ζωή πολλών ανθρώπων. Ατυχήματα, τα οποία υποδεικνύουν το ποσό μεγάλη καταστροφή μπορεί να προκαλέσει η αγνόηση του φαινομένου της κόπωσης, το οποίο μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις δεν δείχνει ορατά σημάδια προειδοποίησης της εκδήλωσής του.

## 1.3 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Για να εμφανιστεί αστοχία λόγω κόπωσης, πρέπει να υπάρχουν οι εξής βασικές προϋποθέσεις:

- Μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση
- Μία επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία
- Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της καταπόνησης.

## 1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

Η αντοχή ενός υλικού στο φαινόμενο της κόπωσης, μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες.

- Το σχήμα της δομής του υλικού, επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε κόπωση. Τετράγωνες οπές ή αιχμηρές γωνίες θα οδηγήσουν σε αυξημένες τοπικές τάσεις, που ευνοούν την εμφάνιση ρωγμών κόπωσης. Κυκλικές οπές και ομαλές ενώσεις συμβάλουν ως εκ τούτου σημαντικά στην αύξηση της αντοχής του εξαρτήματος σε κόπωση.
- Επίσης σημαντικό ρόλο στην αστοχία ενός εξαρτήματος λόγω κόπωσης παίζουν και διάφοροι αστάθμητοι παράγοντες, όπως ενδεχόμενες μικροατέλειες στην δομή του υλικού που ευνοούν την εμφάνιση ρωγμών λόγω κόπωσης, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η παρουσία διαβρωτικών παραγόντων, και άλλα.

Για τον λόγο αυτό, το φαινόμενο της κόπωσης είναι δύσκολο να αναλυθεί θεωρητικά, και ο υπολογισμός του βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε πειραματικές παρατηρήσεις και στατιστικές μετρήσεις.

## 1.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

### 1.5.1 Επιφανειακές Κατεργασίες και Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

Κατά τη διάρκεια επεξεργασίας στο εργοστάσιο, η δράση των εργαλείων εισάγει πάντοτε στην επιφάνεια του αντικειμένου μικρές αιχμές και αυλακώσεις. Αποτέλεσμα αυτών είναι τα σημάδια αυτά να μπορούν να περιορίσουν την διάρκεια ζωής σε κόπωση. Έχει παρατηρηθεί ότι η καλύτερευση των επιφανειακών με λείανση αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Επιπρόσθετα, περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη συμπεριφορά σε κόπωση των υλικών. Οι δύο αυτοί τύποι είναι: η θερμική κόπωση και η κόπωση από διάβρωση. Η **θερμική κόπωση** εισάγεται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες από κυμαινόμενες θερμικές τάσεις, ενώ δεν απαιτείται να είναι παρούσες μηχανικές τάσεις από εξωτερική πηγή. Η αφητηρία τους βρίσκεται στον περιορισμό της διαστολής των διαστάσεων ή και στην φυσιολογική συστολή που εμφανίζεται σε ένα δομικό στοιχείο λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας.

Για την **κόπωση από διάβρωση** έχουμε τις εξής προσεγγίσεις. Μπορούμε να πάρουμε μέτρα για τη μείωση του ρυθμού διάβρωσης με την εφαρμογή προστατευτικής επιφανειακής επικάλυψης, όπως και επιλογή πιο ανθεκτικού υλικού και ελάττωση της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος.

## 1.5.2 Στατική & Δυναμική Καταπόνηση

Οι ιδιότητες των υλικών που προκύπτουν από το στατικό αξονικό εφελκυσμό ή θλίψη χρησιμοποιούνται συχνά σε εγχειρίδια και στις προδιαγραφές των κατασκευών. Τα πειράματα αυτά είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν και τα αποτελέσματά τους θεωρούνται γενικώς αποδεκτά. Παρ' όλα αυτά η σχέση που μπορεί να έχουν με τη συμπεριφορά του ίδιου υλικού όταν βρεθεί υπό κόπωση είναι αρκετά μακρινή.

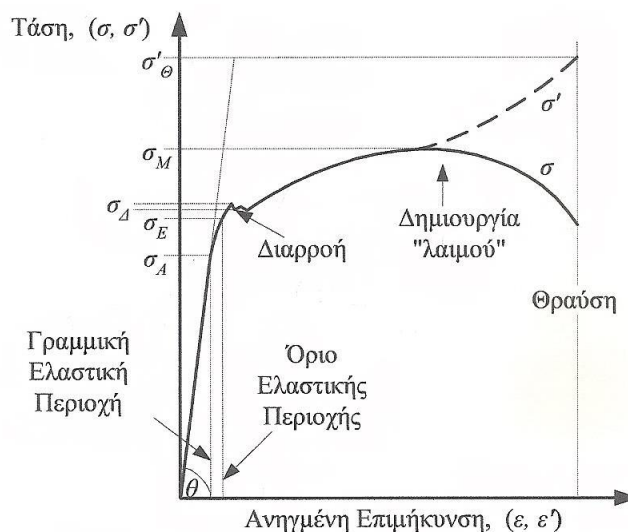
Αν και ο Sprangenburg το είχε διαπιστώσει αυτό από το 1876, υπάρχουν ακόμη και σήμερα μηχανικοί που προσπαθούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά υπό κόπωση με δεδομένα από απλά πειράματα όπως αυτά του αξονικού εφελκυσμού και θλίψης.

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαφορά, πριν προχωρήσουμε στη κόπωση θα δούμε τα βασικά στοιχεία των στατικών αξονικών πειραμάτων.

### Στατικός Αξονικός Εφελκυσμός ή Θλίψη

Σε ένα πείραμα αξονικού εφελκυσμού η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης μπορεί να περιγραφεί είτε με «συμβατικές» ή με «πραγματικές» ποσότητες.

Η συμβατική τάση είναι  $\sigma = P/F$ , όπου,  $P$  είναι το αξονικό φορτίο και  $F$  είναι το αρχικό εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου. Η ανηγμένη επιμήκυνση του δοκιμίου είναι  $\epsilon = \Delta l/l$ , όπου,  $l$  είναι το αρχικό μήκος του δοκιμίου και  $\Delta l$  είναι η αλλαγή στο μήκος του λόγω της παραμόρφωσης. Η σχέση μεταξύ των συμβατικών  $\sigma$  &  $\epsilon$  απεικονίζεται στο διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), που ακολουθεί.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» συμβατικών ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) & πραγματικών ( $\sigma'$ - $\epsilon'$ )

Η πραγματική τάση είναι  $\sigma' = P/F'$ , όπου,  $P$  είναι το αξονικό φορτίο και  $F'$  είναι το πραγματικό εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου. Η πραγματική ανηγμένη επιμήκυνση του δοκιμίου είναι  $\varepsilon' = \ln(l'/l)$ , όπου,  $l$  είναι το αρχικό μήκος του δοκιμίου και  $l'$  είναι το πραγματικό μήκος του δοκιμίου. Η σχέση μεταξύ των πραγματικών  $\sigma'$  &  $\varepsilon'$  απεικονίζεται και αυτή στο διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» ( $\sigma'$ - $\varepsilon'$ ). Όταν οι παραμορφώσεις είναι μικρές, δηλ. κάτω του 2%, οι συμβατικές ποσότητες συμπίπτουν πρακτικά με τις πραγματικές. Για μεγαλύτερες όμως παραμορφώσεις υπάρχει διαφορά η οποία είναι σημαντική, όπως φαίνεται και στο προηγούμενο διάγραμμα.

Τα συμβατικά και τα πραγματικά μεγέθη τάσης & ανηγμένης παραμόρφωσης τα συνδέουν οι παρακάτω σχέσεις:  $\sigma' = \sigma(1 + \varepsilon)$ , και,  $\varepsilon' = \ln(1 + \varepsilon)$ .

Άλλες ιδιότητες που προκύπτουν από το διάγραμμα  $\sigma$ - $\varepsilon$  είναι :

- το Όριο Αναλογίας  $\sigma_A$ , είναι η τιμή της τάσης μέχρι την οποία το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά και γραμμικά. Στην γραμμική ελαστική περιοχή ισχύει η γραμμική σχέση  $\sigma = E\varepsilon$ . Ο συντελεστής  $E$  λέγεται μέτρο Ελαστικότητας ή μέτρο Young του υλικού και η κλίση της ευθείας (Hooke) είναι ίση με  $\theta = \tan(\alpha)$ .
- το Όριο Ελαστικότητας  $\sigma_E$ , είναι η τιμή της τάσης μέχρι την οποία το υλικό συνεχίζει να συμπεριφέρεται ελαστικά αλλά όχι και γραμμικά.
- τα Όρια Διαρροής  $\sigma_{D1}$ ,  $\sigma_{D2}$ , είναι η ανώτερη και κατώτερη τάση που ορίζουν την ασταθή περιοχή που ακολουθεί την ελαστική περιοχή και στην οποία παρατηρούμε σημαντική αύξηση στη παραμόρφωση, χωρίς να έχουμε ανάλογη αύξηση στη τάση.
- το Όριο Αντοχής ή Όριο Θραύσης  $\sigma_M$ , είναι η τιμή της τάσης μετά την οποία το δοκίμιο σχηματίζει λαιμό και τελικά σπάει. Το διάστημα  $\sigma_D$ - $\sigma_M$ , λέγεται περιοχή κράτυνσης του υλικού. Η τάση  $\sigma_M$  είναι και η μέγιστη τάση στο διάγραμμα συμβατικών τάσεων  $\sigma$ - $\varepsilon$ . Στο διάγραμμα πραγματικών τάσεων  $\sigma'$ - $\varepsilon'$  η τάση  $\sigma_M$  αποτελεί το σημείο καμπής της καμπύλης.
- η πραγματική Τάση Θραύσης  $\sigma'_\theta$ , αποτελεί τη απόλυτα υψηλότερη τιμή τάσης για το υλικό και είναι η τιμή για την οποία επέρχεται η θραύση του λαιμού που σχηματίστηκε στο διάστημα  $\sigma_M$ - $\sigma_\theta$ . Η συμβατική Τάση Θραύσης  $\sigma_\theta$ , είναι πολύ μικρότερη καθώς υπολογίζεται βάσει της αρχικής διατομής του δοκιμίου και όχι βάσει της πραγματικής διατομής του λαιμού που μειώνεται συνεχώς.

Τα Όρια Διαρροής  $\sigma_{D1}$ ,  $\sigma_{D2}$ , και το Όριο Ελαστικότητας  $\sigma_E$ , δεν διακρίνονται πάντα μεταξύ τους. Όταν η ακρίβεια του πειράματος δεν είναι υψηλή, τα τρία όρια εμφανίζονται συνήθως σαν μια ευθεία γραμμή και αναφέρονται σαν μια ποσότητα  $\sigma_D$ .

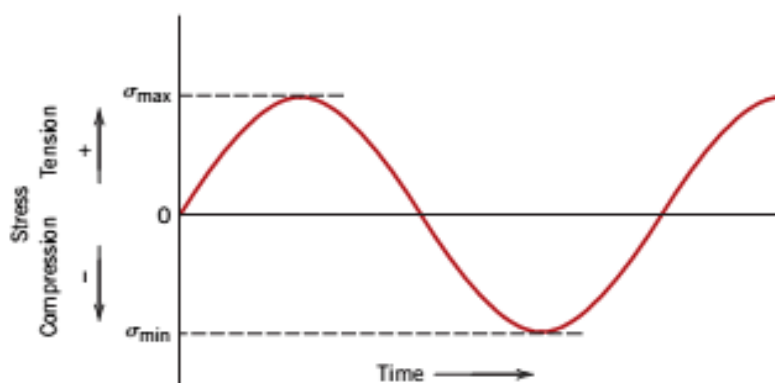
Το διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» δεν είναι ίδιο για όλα τα υλικά. Στα όλκιμα υλικά παρουσιάζονται έντονες πλαστικές παραμορφώσεις και στον εφελκυσμό σχηματίζεται λαιμός πριν από τη θραύση, το δε διάστημα  $\sigma_M$ - $\sigma_{\theta}$  είναι μεγάλο. Αντίθετα στα ψαθυρά υλικά η θραύση συμβαίνει απότομα χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις (π.χ. λαιμό) και τα σημεία  $\sigma_M$  &  $\sigma_{\theta}$  πρακτικά συμπίπτουν. Η όλκιμη θραύση λοιπόν συμβαίνει πιο αργά και είναι λιγότερο επικίνδυνη, ενώ η ψαθυρή θραύση διαδίδεται απότομα και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη. Στο σημείο αυτό παίζει ρόλο και η κόπωση του υλικού καθώς ακόμα και τα όλκιμα υλικά όταν υποβληθούν σε κόπωση παρουσιάζουν απότομη και ψαθυρή θραύση.

### 1.5.3 Κυκλικές τάσεις

Η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να είναι μπορεί να είναι αξονικής (εφελκυσμός – θλίψη), καμπτικής (λυγισμός), ή στρεπτικής (συστροφή) φύσης. Γενικά υπάρχουν τρεις τύποι χρονικά κυμαινόμενης τάσης:

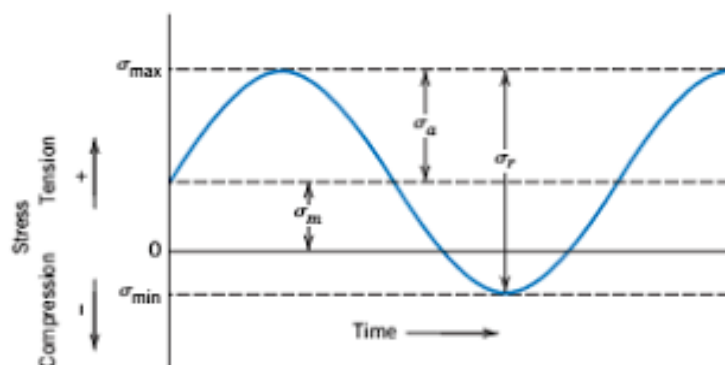
1. Η αναστρεφόμενη
2. Η επαναλαμβανόμενη
3. Ο τυχαίος κύκλος τάσης

Στην αναστρεφόμενη κυκλική τάση, η τάση εναλλάσσεται από μια μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{max}$ ) σε μια μέγιστη θλιπτική τάση ( $\sigma_{min}$ ) ίσου μεγέθους, όπου  $\sigma_{max} > 0$  και  $\sigma_{min} < 0$ .



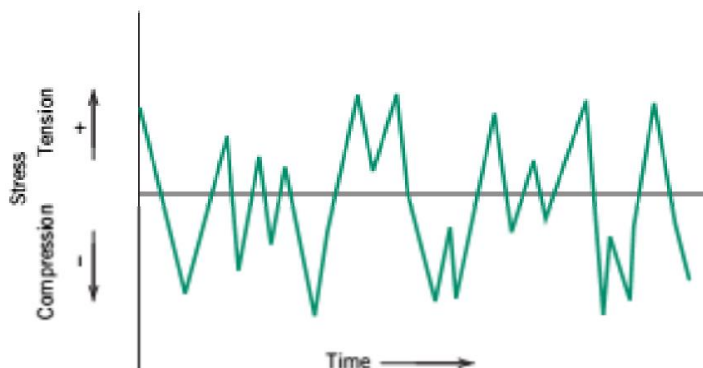
Σχ. 1.1 Η αναστρεφόμενη κυκλική τάση

Στην επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τάσης είναι μη συμμετρικές προς το επίπεδο της μηδενικής τάσης ( $\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$ ). Οι τιμές θα μπορούσαν να είναι θετικές, εφελκυστικές τάσεις, ή αρνητικές, θλιπτικές τάσεις, ή ακόμη και  $\sigma_{\max}$  εφελκυστική  $>0$  και  $\sigma_{\min}$  θλιπτική  $<0$ .



Σχ. 1.2 Η επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση

Ο τυχαίος κύκλος τάσης, είναι το είδος των τάσεων που συναντάται συχνότερα στην πράξη. Στη περίπτωση αυτή το επίπεδο της τάσης μπορεί να μεταβάλλεται τυχαία ως προς το πλάτος και τη συχνότητα.



Σχ. 1.3 Ο τυχαίος κύκλος τάσης

#### 1.5.4 Καμπύλες S-N (Wöhler)

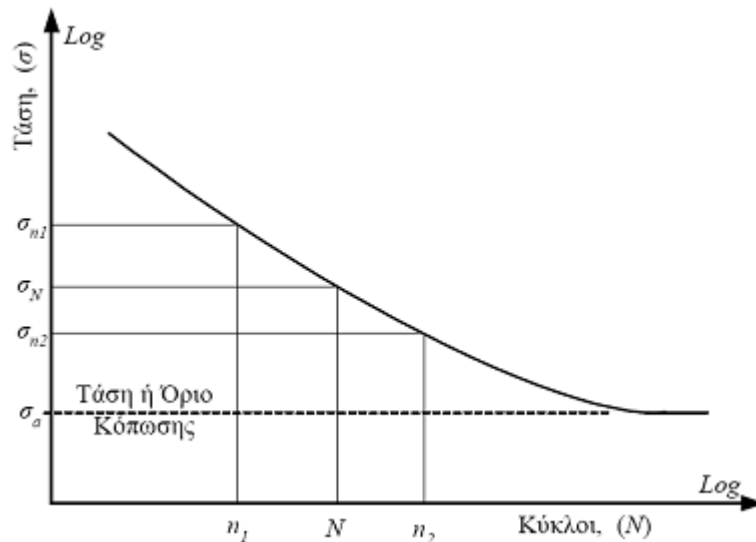
Τα πρώτα συστηματικά πειράματα κόπωσης τα πραγματοποίησε ο **Wöhler**, ο οποίος εισήγαγε το **διάγραμμα Τάσης-Κύκλων ( $\sigma$ - $N$ )**, και το «**Όριο Κόπωσης**». Για τη συμβολή του αυτή θεωρείται σήμερα ο πατέρας των συστηματικών δοκιμών κόπωσης.

$$\sigma_n = \sigma_N \left( \frac{N}{n} \right)^k$$

Ο Wöhler, διατύπωσε τη σχέση:

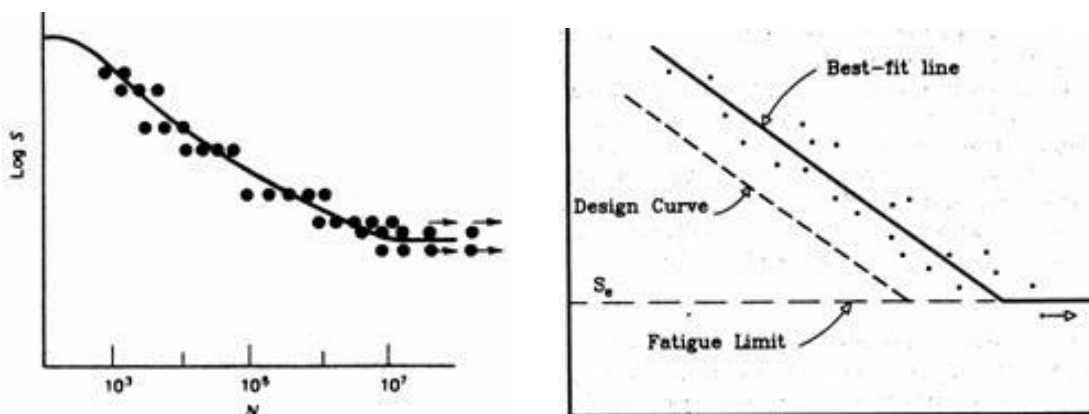
όπου,  $\sigma_n$  είναι η αντοχή κόπωσης για αστοχία στους  $n$  κύκλους  $\sigma_N$  είναι η τάση (φόρτιση) που προκαλεί αστοχία στους  $N$  κύκλους, και,  $k$  είναι η κλίση της ευθείας στο διάγραμμα  $\sigma$ - $N$

Το διάγραμμα  $\sigma$ - $N$  σχεδιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα (log-log). Το σημείο όπου η καμπύλη γίνεται πρακτικά οριζόντια λέγεται **τάση ή όριο κόπωσης** (ή και δυναμική αντοχή) και είναι η ανώτατη φόρτιση που μπορεί να δεχτεί ένα στοιχείο χωρίς να αστοχήσει, ακόμα και για άπειρο αριθμό επαναλήψεων.



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα  $\sigma$ - $N$

Τυπικές μορφές διαγραμμάτων που προκύπτουν από συστηματικά πειράματα κόπωσης είναι όπως οι παρακάτω:



### 1.5.5 Πολυκυκλική κόπωση (HCF) και Ολιγοκυκλική κόπωση (LFC)

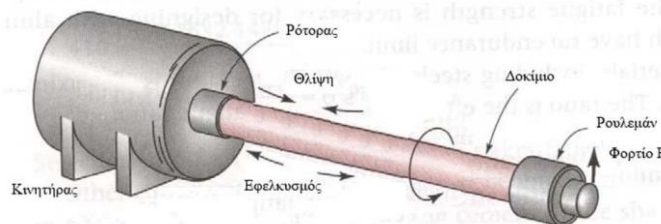
Το φαινόμενο της κόπωσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την **πολυκυκλική** και την **ολιγοκυκλική** κόπωση, ανάλογα το είδος των τάσεων και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης των καταπονήσεων που υφίσταται το υλικό.

Η **πολυκυκλική κόπωση** (*high cycle fatigue*) η οποία χαρακτηρίζεται από τον μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης που υφίσταται το υλικό μέχρι την αστοχία ( $N > 10^4$ ), καθώς οι τιμές των τάσεων που ασκούνται είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα το υλικό να μην υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις. Πολυκυκλική κόπωση, μπορεί να εμφανιστεί για παράδειγμα σε περιστρεφόμενους άξονες κατά την λειτουργία τους, ή στα φτερά ενός αεροπλάνου.

Η **ολιγοκυκλική κόπωση** (*low cycle fatigue*) η οποία εμφανίζεται στην περίπτωση που το υλικό δέχεται τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του, με αποτέλεσμα, σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Έτσι, μειώνεται κατά πολύ ο αριθμός των κύκλων φόρτισης του υλικού μέχρι την αστοχία ( $N < 10^4$ ). Κλασικό παράδειγμα εκδήλωσης ολιγοκυκλικής κόπωσης, είναι η καταπόνηση που υφίσταται ο σπλισμός των κτηρίων κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

### 1.5.6 Πειραματική Διαδικασία

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες μπορεί να διερευνηθεί πειραματικά η συμπεριφορά ενός υλικού σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις, δηλαδή σε κόπωση. Περισσότερο οικεία είναι πιθανότατα αυτή που πραγματοποιείται σε συνήθη δοκίμια εφελκυσμού. Ένας απλός τύπος δοκιμής κόπωσης, που έχει βρει πολύ μεγάλη πρακτική εφαρμογή, είναι η **δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου** (*rotating cantilever beam test*). Η πειραματική διάταξη της δοκιμής αυτής είναι σχετικά απλή και απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στη δοκιμή υποβάλλεται δοκίμιο κυλινδρικής γεωμετρίας του υπό εξέταση υλικού. Το ένα άκρο του δοκιμίου συγκρατείται σε έναν περιστρεφόμενο άξονα που συνδέεται με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ενώ στο άλλο άκρο τοποθετείται ένα εγκάρσιο φορτίο, ασκώντας έτσι κάμψη στο δοκίμιο.





Καθώς ο άξονας τίθεται σε περιστροφική κίνηση το δοκίμιο αρχίζει να υποβάλλεται σε μία εναλλασσόμενη καταπόνηση. Όπως είναι γνωστό από την θεωρία κάμψης δοκών, οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού. Έτσι και στην περίπτωση του περιστρεφόμενου προβόλου, ένα σημείο του υλικού που βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια δέχεται την μέγιστη εφελκυστική τάση. Μετά από περιστροφή 90° το σημείο αυτό έρχεται σε μία θέση όπου η τάση μηδενίζεται. Μετά από περιστροφή άλλων 90°, (δηλαδή συνολικά 180° από την αρχή) το σημείο έρχεται στην κάτω επιφάνεια, όπου εκεί δέχεται την μέγιστη θλιπτική τάση. Σε κάθε περιστροφή του δοκιμίου επαναλαμβάνεται η ίδια πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση, η οποία μάλιστα για την συγκεκριμένη δοκιμή κόπωσης έχει ημιτονοειδή μορφή με μέση τάση  $\sigma_m = 0$  και  $R = -1$ . Η μέγιστη και η ελάχιστη τάση που καταπονούν το δοκίμιο υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{M}{I} y$$

Όπου:

$M$  = Η ροπή που δημιουργείται στο σημείο θραύσης.

$I$  = Ροπή Αδράνειας κυλινδρικής διατομής.

$y$  = Το βέλος κάμψης όπου για  $\sigma_{max}$  ισχύει:

$$y_{max} = \frac{d}{2}$$

Η ροπή που δημιουργείται στο σημείο θραύσης, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$M = P * L$$

Όπου:

$P$  = Το φορτίο σε N

$L$  = Η απόσταση του σημείου θραύσης από το σημείο που ασκείται το φορτίο.

Η Ροπή Αδράνειας κυλινδρικής διατομής, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = \frac{\pi * d^4}{64}$$

άρα από τις σχέσεις παραπάνω για  $\sigma = \sigma_{max}$  έχουμε:

$$\sigma_{max} = \frac{P*L}{(\pi * d^4)/64} * \frac{d}{2} \quad \& \quad \sigma_{max} = -\sigma_{min} = \frac{P*L}{(\pi * d^3)/32}$$

### 1.5.7 Κριτήριο Miner

Το κριτήριο Miner συνοψίζεται στη παρακάτω συνθήκη για αστοχία υπό κόπωση η οποία λέει ότι, η κόπωση συσσωρεύεται γραμμικά και όταν το άθροισμα γίνει ίσο ή ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή επέρχεται η αστοχία:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad \text{ή} \quad \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = C$$

όπου,

$n_i$  = ο αριθμός κύκλων φόρτισης με τάση  $\sigma_i$  που έχει υποστεί μια κατασκευή.

$N_i$  = ο αριθμός κύκλων φόρτισης με τάση  $\sigma_i$  που της προκαλεί αστοχία.

$C$  = σταθερά που κυμαίνεται από 0.8 έως 2.2 αλλά στη σχεδίαση τίθεται ίση με **1.0**.

Το κριτήριο Miner αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα σημαντικό εργαλείο για τη πρόβλεψη του χρόνου ζωής των κατασκευών. Αν και χρησιμοποιείται ευρέως δεν μπορεί να εφαρμοστεί παντού ούτε μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Το κριτήριο λειτουργεί ικανοποιητικά για το στάδιο έναρξης των ρωγμών. Επίσης είναι αρκετά συντηρητικό και ασφαλές με τη σωστή επιλογή του  $C$  (=1.0).

Τα κυριότερα προβλήματα του οφείλονται στο ότι:

1. Οι ακολουθίες φορτίων είναι συνήθως ακανόνιστες.
2. Η σειρά των φορτίσεων παίζει ρόλο στη συσσώρευση των βλαβών.
3. Ο χρόνος ζωής δεν είναι πάντα καθορισμένος με σαφήνεια.
4. Δεν υπάρχει διαβεβαίωση ότι η συσσώρευση της βλάβης είναι γραμμική.

### 1.5.8 Χρόνος ζωής των κατασκευών λόγω ατελειών

Γνωρίζοντας την συμπεριφορά του συντελεστή συσσώρευσης τάσεων ( $K$ ,  $\Delta K$ ) για συγκεκριμένα υλικά και συνθήκες, μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάρκεια-ζωής τους, ολοκληρώνοντας την εξίσωση του Paris μεταξύ των ορίων των αρχικών και των τελικών διαστάσεων της ρωγμής.

Για παράδειγμα, αν η διάδοση της ρωγμής περιγράφεται αναλυτικά από τη σχέση:

$$\frac{d\alpha}{dN} = C(\Delta K)^n = C(\Delta\sigma\sqrt{\pi\alpha}f)^n$$

ολοκληρώνοντας την, από την αρχική ρωγμή  $a_I$  (εντοπισμού) με αρχικούς κύκλους φόρτισης  $N_I$ , έως την τελική ρωγμή  $a_F$  (θραύσης), βρίσκουμε τον συνολικό αριθμό των κύκλων φόρτισης  $N_F - N_I$  (ή,  $N_F$  αν  $N_I = 0$ ):

$$N_F = \frac{\alpha_I^{-n/2+1} - \alpha_F^{-n/2+1}}{(-n/2+1) \cdot C (\Delta\sigma\sqrt{\pi f})^n}$$

Η εξίσωση (25) είναι η γενική ολοκλήρωση της εξίσωσης του Paris όταν η  $f$  είναι ανεξάρτητη του μήκους της ρωγμής  $a$ , και  $n \neq 2$ . Η εξίσωση δεν είναι σωστή όταν ο συντελεστής  $f$  είναι συνάρτηση του μήκους  $a$ . Στη περίπτωση αυτή, που είναι και η πιο συχνή, δεν μπορούμε να καταλήξουμε πάντα σε κλειστούς τύπους για το  $N_F$ .

## 2. ΘΡΑΥΣΗ

### 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Θραύση (*fracture*) ονομάζεται ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η διαδικασία της θραύσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο διακριτά στάδια: την πυρήνωση (*initiation*) και την προώθηση (*propagation*) ρηγμάτων. Η θραύση των υλικών γενικά διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: όλκιμη (*ductile*) και ψαθυρή (*brittle*). Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρηγμάτων, τα οποία τελικά επιφέρουν τη θραύση. Αντίθετα, η ψαθυρή θραύση χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ταχύτητα με την οποία προωθούνται τα ρήγματα στο υλικό, χωρίς να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση. Η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας, με αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία εγκοπών ή άλλων ασυνεχειών στο υλικό. Η ψαθυρή θραύση, ακριβώς επειδή συμβαίνει ακαριαία και χωρίς προειδοποίηση, είναι συνήθως ιδιαίτερα καταστροφική και ο σχεδιασμός κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της.

### 2.2 ΘΕΩΡΙΑ GRIFFITH ΓΙΑ ΤΗΝ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

Πρώτος ο A. Griffith το 1920 προσπάθησε να εξηγήσει την απόκλιση, ανάμεσα στην θεωρητική και στην πειραματικά παρατηρούμενη αντοχή των υλικών σε θραύση.

Παρότι σήμερα αναγνωρίζεται ότι η θεωρία Griffith ισχύει απόλυτα μόνο για πολύ ψαθυρά υλικά, όπως για παράδειγμα το γυαλί, οι ιδέες που εισήγαγε η θεωρία αυτή ήταν πολύ διαφωτιστικές και για την θραύση πιο όλκιμων υλικών, όπως είναι τα μέταλλα. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, κάθε ψαθυρό υλικό περιέχει ένα πλήθος λεπτών ρηγμάτων, στα οποία δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις κοντά στα ρήγματα να ξεπερνούν την θεωρητική αντοχή του υλικού σε θραύση, παρότι μακριά από τα ρήγματα οι τάσεις μπορεί να βρίσκονται σε αρκετά χαμηλές τιμές. Όταν οποιοδήποτε από τα ρήγματα αυτά προωθείται μέσα στο υλικό, τότε δημιουργούνται δύο νέες ελεύθερες επιφάνειες, δηλαδή οι πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος.

Όπως είναι γνωστό, κάθε ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ένα ποσό ενέργειας που λέγεται επιφανειακή ενέργεια (surface energy), η φυσική προέλευση της οποίας οφείλεται στο γεγονός ότι τα άτομα στις ελεύθερες επιφάνειες έχουν “ανικανοποίητους” (δηλ. σπασμένους) χημικούς δεσμούς και είναι πιο ευκίνητα απ’ ότι τα άτομα στο εσωτερικό του υλικού. Κατά συνέπεια, με την προώθηση του ρήγματος και την αύξηση της ελεύθερης επιφάνειάς του, η συνολική ενέργεια του συστήματος (δηλ. του υλικού) αυξάνεται κατά ένα ποσό, ίσο με την επιφανειακή ενέργεια των νέων ελεύθερων επιφανειών που δημιουργήθηκαν. Επομένως, αφού γνωρίζουμε ότι κάθε φυσικό σύστημα τείνει αυθόρμητα προς καταστάσεις όπου ελαχιστοποιείται η συνολική του ενέργεια, θα περίμενε κανείς ότι σε κανένα υλικό δεν θα έπρεπε να συμβαίνει αυθόρμητη προώθηση ρηγμάτων (δηλαδή θραύση), αφού έτσι θα αυξανόταν η συνολική ενέργεια του συστήματος.

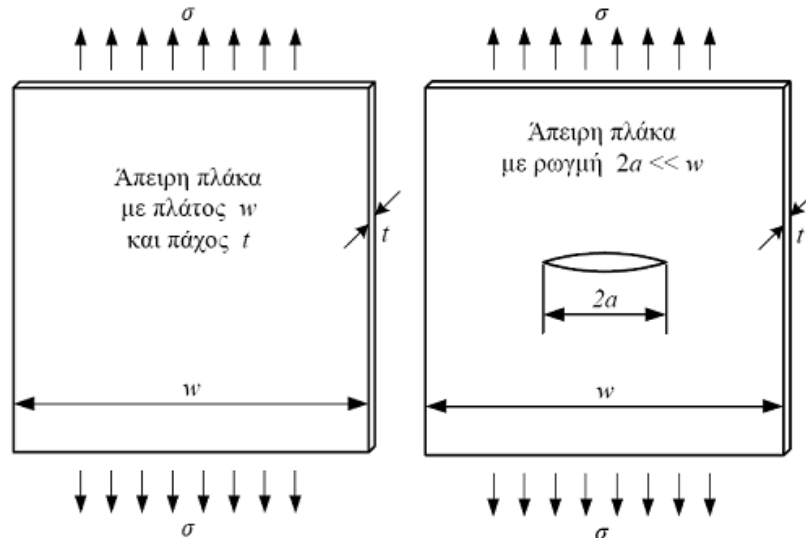
Ωστόσο, το σπάσιμο χημικών δεσμών που προκαλείται κατά την προώθηση ενός ρήγματος οδηγεί σε μείωση μίας άλλης μορφής ενέργειας του υλικού, της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης (elastic strain energy). Η ενέργεια αυτή οφείλεται στο έργο που παράγουν τα εξωτερικά φορτία που καταπονούν και παραμορφώνουν ελαστικά το υλικό. Η ενέργεια αυτή είναι αποθηκευμένη στο υλικό και όταν εκλείψουν τα εξωτερικά φορτία μηδενίζεται. Όταν ένα ρήγμα που προωθείται περάσει από ένα σημείο του υλικού και το χωρίσει σε δύο τμήματα, τα τμήματα αυτά παύουν πλέον να βρίσκονται υπό τάση, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης που βρισκόταν αποθηκευμένη εκεί.

Το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ **δυναμικής ενέργειας** από τη φόρτιση και **επιφανειακής ενέργειας** από τη ρωγμή, και διαπίστωσε ότι η **τάση**  $\sigma$  και το **μήκος της ρωγμής**  $a$  συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma\sqrt{\pi a} = (2E\gamma_s)^{1/2} = \sigma_{ταθ}.$$

## Το Ισοζύγιο Ενεργειών σε μια Φορτισμένη & Ρηγματωμένη Πλάκα

Έστω ότι έχουμε μια απείρου μήκους πλάκα υλικού, η οποία έχει πλάτος  $w$  και πάχος  $t$ . Στη πλάκα αυτή εφαρμόζουμε μια εφελκυστική τάση  $\sigma$ . Η δυναμική ελαστική ενέργεια της φορτισμένης συμπαγούς πλάκας είναι  $U_0$ , και είναι σταθερή (εφόσον είναι και η  $\sigma$  σταθερή).



Αν στο κέντρο της πλάκας δημιουργηθεί μια ρωγμή μήκους  $2a$ , ( $2a \ll w$ ) τότε η ενεργειακή κατάσταση αλλάζει και η νέα συνολική ενέργεια  $U$  της ρηγματωμένης πλάκας θα είναι συνάρτηση της αρχικής ενέργειας  $U_0$ , και των ενεργειακών μεταβολών που συνέβησαν εξαιτίας της ρωγμής.

Ένα μέρος από τη δυναμική ενέργεια θα εκτονωθεί λόγω της δημιουργίας της ρωγμής ( $U_a$ ). Η δημιουργία των νέων επιφανειών στη ρωγμή απαιτεί επίσης ενέργεια ( $U_\gamma$ ). Τέλος, υπάρχει και το έργο ( $F$ ) που παράγεται από τη μετατόπιση του μηχανισμού εφελκυσμού (για να διατηρήσει τη τάση σταθερή). Το έργο αυτό δεν λαμβάνεται υπ' όψιν όταν ο μηχανισμός είναι σταθερός και μειώνεται η τάση.

Η **συνολική ενέργεια**  $U$  μετά τη δημιουργία της ρωγμής γίνεται:

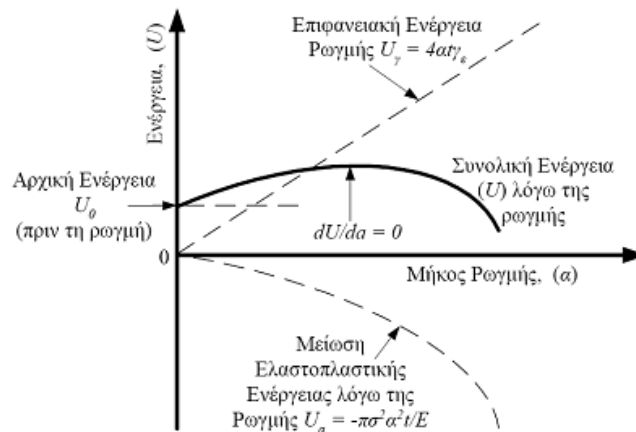
$$U = U_0 + U_a + U_\gamma - F \quad \Leftrightarrow \quad U - U_0 = U_a + U_\gamma - F$$

$U_a = -\frac{\pi\sigma^2 a^2 t}{E}$ , είναι η μείωση της δυναμικής ενέργειας λόγω της εμφάνισης της ρωγμής,  
 $U_\gamma = 2(2at\gamma_\epsilon)$ , είναι η ενέργεια δημιουργίας των επιφανειών της ρωγμής,  
 $F = (\text{Δύναμη} \cdot \text{Μετατόπιση})$ , είναι το έργο που παράγεται λόγω της απώλειας της ακαμψίας,

$E$  και  $\gamma_\varepsilon$  είναι, αντίστοιχα, το μέτρο ελαστικότητας και η ειδική ενέργεια επιφανείας, οι οποίες αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού.

Αντικαθιστώντας στον αρχικό τύπο τις παραπάνω ποσότητες και για  $F=0$ , (σταθερό μηχανισμό - fixed grip), ο τύπος για τη **συνολική ενέργεια** γίνεται:

$$U = U_0 - \frac{\pi\sigma^2 a^2 t}{E} + 4at\gamma_\varepsilon$$



Για να βρούμε τη συνθήκη ισορροπίας θέτουμε τη πρώτη παράγωγο της ενέργειας ως προς το μήκος της ρωγμής ίση με μηδέν ( $dU/da = 0$ ) και έχουμε:

$$\frac{\partial U}{\partial a} = 4t\gamma_\varepsilon - \frac{2\pi\sigma^2 a t}{E} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 2\gamma_\varepsilon = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad \Leftrightarrow$$

$$\sigma\sqrt{a} = \left(\frac{2E\gamma_\varepsilon}{\pi}\right)^{1/2} \quad \Leftrightarrow \quad \sigma\sqrt{\pi a} = (2E\gamma_\varepsilon)^{1/2}$$

Η τελευταία σχέση δείχνει ότι η ρωγμή διαδίδεται όταν το γινόμενο  $\sigma\sqrt{a}$  φτάσει σε μια κρίσιμη, και σταθερή για το υλικό, τιμή.

Ο Griffith διατύπωσε επίσης τις συνθήκες ισορροπίας για τον υπολογισμό επίπεδων τάσεων (plane stress) και επίπεδων παραμορφώσεων (plane strain) αντίστοιχα, ως εξής:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_\varepsilon}{\pi a}} \quad \& \quad \sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_\varepsilon}{\pi a(1-\nu^2)}}$$

Προφανώς, όπως προκύπτει από τη συνθήκη για να υπάρξει επέκταση της ρωγμής θα πρέπει η τάση να γίνει:

$$\sigma \geq \sqrt{2E\gamma_\varepsilon / \pi a}$$

Ο πιο κλασικός τρόπος διατύπωσης της **συνθήκης ισορροπίας** είναι ο εξής:

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2\gamma_\varepsilon$$

Το αριστερό μέλος καλείται **Ρυθμός Απελευθέρωσης Ενέργειας,  $G$** , και αντιπροσωπεύει την ελαστική ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας που γίνεται διαθέσιμη από την απειροελάχιστη αύξηση της ρωγμής. Το δεξί μέλος καλείται **Αντίσταση Ρωγμής,  $R$** , και αντιπροσωπεύει την αύξηση στην επιφανειακή ενέργεια για μια απειροελάχιστη αύξηση της ρωγμής.

Όπως προκύπτει από τη συνθήκη (9), για να υπάρξει διάδοση της ρωγμής θα πρέπει:  $G \geq R$ . Εάν το  $R$  είναι σταθερό, τότε το  $G$  πρέπει να ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή  $G_c = R$ .

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \geq \frac{\pi\sigma_c^2 a}{E} = G_c = R$$

Η κρίσιμη τιμή  $G_c$  μπορεί να οριστεί μετρώντας την απαιτούμενη τάση  $\sigma_c$  για τη θραύση μιας πλάκας με ρωγμή μεγέθους  $2a$ .

### Επέκταση και Εφαρμογή της Μεθόδου

Το 1948 ο **Irwin** πρότεινε την επέκταση της θεωρίας του Griffith, από τα ιδεατά ψαθυρά υλικά σε υλικά που παρουσίαζαν πλαστική παραμόρφωση. Η τροποποίηση που πρότεινε ήταν, η ενέργεια  $U_p$  να περιλαμβάνει το άθροισμα της ενέργειας επιφανείας  $\gamma_\varepsilon$  της ρωγμής και του έργου της πλαστικής παραμόρφωσης  $\gamma_p$ . Έτσι, η προηγούμενη συνθήκη (9) γράφεται:

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2(\gamma_\varepsilon + \gamma_p)$$

Σε ιδιαίτερα ψαθυρά υλικά  $\gamma_\varepsilon \gg \gamma_p$ , ενώ σε έντονα όλκιμα υλικά  $\gamma_\varepsilon \ll \gamma_p$ .

Παρ' όλες τις προσθήκες και επεκτάσεις, η εφαρμογή της μεθόδου δεν είναι πάντα εφικτή. Σε πολλές πραγματικές περιπτώσεις δεν ισχύουν οι προϋποθέσεις της ώστε να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία, και κυρίως σε περιπτώσεις αργής και σταθερής διάδοσης, όπως συμβαίνει στη διάβρωση.

Αυτό που πρέπει να έχει κανείς υπ' όψιν του όταν εφαρμόζει τη μέθοδο του ενεργειακού ισοζυγίου, σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω μορφές, είναι ότι: **δεν**

αποτελεί ικανή συνθήκη , αλλά μας δίνει μόνο την αναγκαία συνθήκη για την ασταθή διάδοση μιας αιχμηρής ρωγμής.

Με άλλα λόγια η μέθοδος μπορεί να μας βεβαιώσει αξιόπιστα όταν δεν υπάρχει η απαραίτητη ενέργεια ότι δεν θα υπάρξει και επέκταση των ρωγμών και μπορεί να μας δώσει τα επίπεδα ενέργειας πάνω από τα οποία η επέκταση των ρωγμών είναι δυνατή. Δεν μπορεί όμως να μας βεβαιώσει για το αν, πως, και, πότε αυτό θα γίνει.

### 2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

Έχοντας υπ' όψιν τις πρακτικές δυσκολίες της μεθόδου του Ενεργειακού Ισοζυγίου (Griffith-Irwin), το 1950 ο Irwin ανέπτυξε τη μέθοδο της Έντασης Τάσεων.

Κατ' αρχήν έδειξε ότι οι τάσεις  $\sigma$  στη περιοχή της ρωγμής έχουν τη μορφή:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

όπου,  $r$  &  $\theta$  είναι οι κυλινδρικές πολικές συντεταγμένες του σημείου ως προς την αιχμή της ρωγμής, και,  $K_I$  είναι μια σταθερά που μας δίνει το μέγεθος του πεδίου ελαστικής τάσης και καλείται **Συντελεστής Έντασης Τάσεων**.

Ο Συντελεστής Έντασης Τάσεων  $K_I$  δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

όπου  $f(a/w)$  είναι μια αδιάστατη παράμετρος η οποία εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του δοκιμίου, το πλάτος του ( $w$ ), και, το μήκος της ρωγμής ( $a$ ).

Ο Irwin έδειξε επίσης ότι η διάδοση της ρωγμής εξαρτάται από την επίτευξη μιας κρίσιμης τιμής για τον Συντελεστή Έντασης Τάσεων, την **K<sub>IC</sub>** , την **Αντοχή Θραύσης** ή **Σκληρότητα Θραύσης**, και επιπλέον, ότι αυτό είναι απ' ευθείας ισοδύναμο με την επίτευξη της κρίσιμης ελαστικής ενέργειας, **G<sub>C</sub>**, στη μέθοδο Griffith-Irwin. Μάλιστα, οι δύο κρίσιμες τιμές συνδέονται με τη παρακάτω σχέση:

$$G_C = \frac{K_{IC}^2}{E}$$



η δε συνθήκη για διάδοση της ρωγμής σε μια άπειρη πλάκα με κεντρική ρωγμή είναι:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \geq \sigma_c \sqrt{\pi a} = K_{IC}$$

### Γραμμική Ελαστική Θραυστομηχανική (Linear Elastic Fracture Mechanics – LEFM)

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος Έντασης Τάσεων και η μέθοδος Ενεργειακού Ισοζυγίου μας λένε και οι δύο ότι:

όταν το γινόμενο  $\sigma \sqrt{\pi a}$  φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, η ρωγμή μπορεί πλέον να διαδοθεί.

Η διαφορά με τη μέθοδο του Συντελεστή Έντασης Τάσεων,  $K$ , είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις και για διαφορετικές μορφές δοκιμίων. Σήμερα πλέον υπάρχουν πολλά εγχειρίδια που μας δίνουν με λεπτομέρεια τις σχέσεις μεταξύ του Συντελεστή Έντασης Τάσεων,  $K$ , και των γεωμετρικών στοιχείων των δοκιμίων, για διάφορα είδη ρωγμών, για διαφορετικές φορτίσεις, κλπ.

Ένα ακόμη ισχυρό σημείο της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις αργής και σταθερής διάδοσης όπως π.χ. στη διάβρωση. Επιπλέον, ο Συντελεστής Έντασης Τάσεων,  $K$ , αποτελεί τη βάση της θεωρίας της **Γραμμικής Ελαστικής Θραυστομηχανικής (Linear Elastic Fracture Mechanics – LEFM)** και των μεθόδων πρόβλεψης της **διάδοσης των ρωγμών υπό κόπωση (FCG – Fatigue Crack Growth)**.

## 2.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Κ ΚΑΙ Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Από τη προηγούμενη παράγραφο φαίνεται καθαρά πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος του Συντελεστή Έντασης Τάσεων  $K$ , στη Θραυστομηχανική. Ο συντελεστής  $K$  μας χρειάζεται, είτε, για να υπολογίσουμε τη στατική αντοχή μιας κατασκευής με ρωγμή, είτε, την επέκταση μιας ρωγμής σε κατασκευή που φορτίζεται δυναμικά, είτε, την επέκταση μιας ρωγμής λόγω διάβρωσης σε μια φορτισμένη κατασκευή.

Για να προβλέψουμε τη συμπεριφορά των ατελειών στα διάφορα υλικά, θα πρέπει να γνωρίζουμε ή να προσδιορίσουμε τη τιμή του συντελεστή  $K$  που αντιστοιχεί στη κάθε

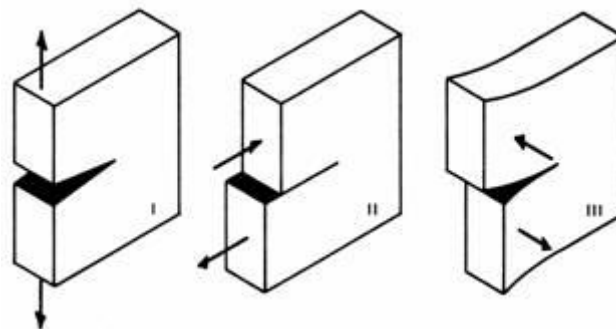
περίπτωση. Διακρίνουμε τρεις μορφές του συντελεστή K, μια για κάθε έναν από τους τρεις τρόπους (modes) φόρτισης μιας ρωγμής:

KI για τρόπο φόρτισης I : Άνοιγμα. (Mode I, Opening mode)

KII για τρόπο φόρτισης II : Ολίσθηση. (Mode II, Sliding mode)

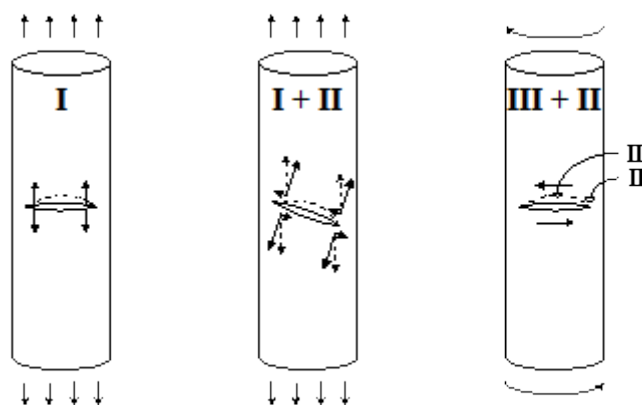
KIII για τρόπο φόρτισης III : Ψαλιδισμός. (Mode III, Tearing mode)

Οι τρεις τρόποι φόρτισης μιας ρωγμής (I, II & III) φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.1: Οι τρεις τρόποι φόρτισης μιας ρωγμής I (Άνοιγμα), II (Ολίσθηση) & III (Ψαλιδισμός).

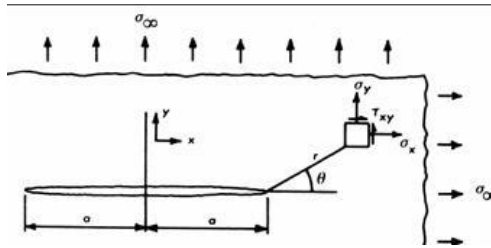
Ο Τρόπος I (εφελκυστική φόρτιση) συναντάται στη πλειοψηφία των περιπτώσεων και γι' αυτό έχει λάβει πολύ μεγαλύτερη προσοχή σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Ο Τρόπος II (ολίσθηση) είναι ο λιγότερο συχνός και λιγότερο σημαντικός. Εμφανίζεται συνήθως μαζί με τον I ή III οι οποίοι είναι και οι κυρίαρχοι τρόποι φόρτισης. Ο Τρόπος III (ψαλιδισμός) εμφανίζεται κατά την στρέψη μιας ράβδου που φέρει ρωγμή.



Εικόνα 2.2: Παραδείγματα εμφάνισης των τριών τρόπων φόρτισης ή των συνδυασμών τους.

### Υπολογισμός των Τάσεων

Έστω μια άπειρη πλάκα με μια κεντρική ρωγμή μήκους  $2a$  η οποία φορτίζεται στο επίπεδο X-Y με τάση  $\sigma$ .



Εικόνα 2.3: Τάσεις στη περιοχή της ρωγμής μιας φορτισμένης άπειρης πλάκας.

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις ισορροπίας τάσεων και χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις Airy, τη λύση Westergaard, μιγαδικές μεταβλητές, τις εξισώσεις Cauchy-Riemann, οριακές συνθήκες και πολικές συντεταγμένες, τελικά (...) προκύπτει ότι, για κάθε ένα σημείο  $(r, \theta)$  γύρω από το χείλος της ρωγμής (με  $r \ll a$ ), οι τάσεις που αναπτύσσονται δίνονται από τους παρακάτω τύπους, που είναι της μορφής της εξίσωσης (12) που έδωσε ο Irwin:

$$\sigma_y = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

Οι εξισώσεις αυτές μας δείχνουν ότι όλες οι τάσεις θα τείνουν στο άπειρο ( $\sigma_y \rightarrow \infty$ ) καθώς η απόσταση από το χείλος της ρωγμής θα τείνει στο μηδέν ( $r \rightarrow 0$ ). Βέβαια στη πράξη αυτό δεν συμβαίνει, γιατί η πραγματικότητα είναι πολύ πιο πολύπλοκη ώστε να περιγραφεί με τα απλοϊκά μοντέλα που χρησιμοποιούμε. Παρ' όλα αυτά οι παραπάνω σχέσεις οδηγούν σε πολύ χρήσιμα πρακτικά αποτελέσματα.

Παρατηρούμε ότι οι πιο πάνω εξισώσεις (16) έχουν ένα μέρος που εξαρτάται από τη θέση  $(r, \theta)$  του σημείου (οι τριγωνομετρικοί όροι και ο παρονομαστής), και, έναν όρο (τον αριθμητή) ο οποίος εξαρτάται από τις υπόλοιπες παραμέτρους ή συνθήκες (φορτίο, μήκος ρωγμής, γεωμετρία, κλπ.). Ο όρος αυτός δεν είναι άλλος από τον συντελεστή έντασης τάσεων για τη περίπτωση της άπειρης πλάκας ( $=KI$ ).

Χρησιμοποιώντας αντίστοιχα τους συντελεστές **KI**, **KII**, & **KIII**, για κάθε ένα τρόπο φόρτισης (I, II & III), οι εξισώσεις των τάσεων που προκύπτουν είναι:

$$\begin{aligned}
I : K_I &= \sigma\sqrt{\pi a}, \quad \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
II : K_{II} &= \tau\sqrt{\pi a}, \quad \sigma_x = \frac{-K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\
\sigma_y &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \quad \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
III : K_{III} &= \tau\sqrt{\pi a}, \quad \tau_{xz} = \frac{-K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \quad \tau_{yz} = \frac{-K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}
\end{aligned}$$

### Υπολογισμός του Συντελεστή $K_I$

Η πλειοψηφία των περιπτώσεων που έχουν μελετηθεί πειραματικά και θεωρητικά αφορούν τον τρόπο φόρτισης I (άνοιγμα ή εφελκυσμός) και τον συντελεστή  $K_I$ , και με αυτές τις περιπτώσεις θα ασχοληθούμε. Η πλέον γνωστή και απλή μορφή του

συντελεστή  $K$  είναι αυτή της εξίσωσης  $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ .

Η σχέση αυτή ισχύει για την ιδανική περίπτωση μιας άπειρης πλάκας και η πραγματικότητα σχεδόν πάντα διαφέρει. Η **γενική μορφή** του  $K_I$  είναι:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

Όπως είδαμε πιο πάνω, για την **άπειρη πλάκα** ή την πλάκα μεγάλου πλάτους  $w$  με κεντρική ρωγμή  $2a$  ( $2a \ll w$ ), ο  $K_I$  είναι:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Συχνά όμως γράφουμε την τάση σαν  $\sigma = F/2Bw$  όπου  $F$  η δύναμη και  $B$  το πάχος της πλάκας, οπότε και ο τύπος για τον  $K_I$  γράφεται και σαν:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} = \frac{F}{2Bw}\sqrt{\pi a}$$

Η τιμή της παράστασης  $f(\cdot)$  διαφέρει ανάλογα με τη γεωμετρία του δοκιμίου. Για την άπειρη πλάκα είναι μονάδα ( $f = 1$ ). Οι τιμές της ποσότητας  $f(a/w)$  για διάφορες περιπτώσεις δοκιμίων περιέχονται στον παρακάτω πίνακα:

	<p>Single Edge Notch Tension (SENT)</p> $h/W > 1$ $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/W)$ $F(a/W) = 0.265(1 - a/W)^4 + \frac{387 + 985a/W}{(1 - a/W)^{3/2}}$
	<p>Center Cracked Tension (CCT)</p> $h/W > 3$ $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/W)$ $F(a/W) = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2W}} [1 - .025(a/W)^2 + .06(a/W)^4]$
	<p>ASTM Standard Compact Tension (CT)</p> $h = 0.6W, h_1 = 0.275W, D = 0.25W, c = 0.25W,$ <p>thickness, <math>B = W/2</math></p> $K_I = \frac{P}{W B} \sqrt{a} F(a/W)$ $F(a/W) = 29.6 - 185.5(a/W) + 655.7(a/W)^2 - 1017.(a/W)^3 + 638.9(a/W)^4$

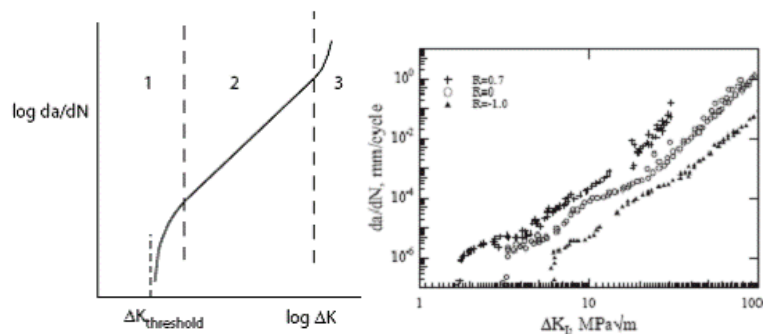
Εικόνα 2.3: Τυποποιημένα δοκίμια για τον καθορισμό των συντελεστών  $K_I$

## 2.5 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΥΠΟ ΚΟΠΩΣΗ

Γενικά διακρίνουμε τρία στάδια στη διάδοση των ρωγμών:

- (1) την έναρξη μιας ρωγμής,
- (2) τη σταθερή επέκταση της ρωγμής,
- (3) την απότομη επέκταση και τη τελική θραύση.

Στο στάδιο (1) αναπτύσσονται οι τυχόν ατέλειες και μικρορωγμές του υλικού μέχρις ότου ενωθούν και σχηματίσουν ρωγμές μήκους τουλάχιστον 1 mm. Στο στάδιο (2) η ρωγμή επεκτείνεται με σταθερό ρυθμό λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Στο στάδιο (3) η ρωγμή έχει μήκος τέτοιο ώστε  $K > K_{IC}$  και η κατασκευή μπορεί να αστοχήσει απότομα.



Εικόνα 2.4: Διαγράμματα του ρυθμού επέκτασης της ρωγμής ( $da/dN$ ) ως προς τη μεταβολή του συντελεστή  $K_I$  ( $\Delta K$ ). (α) Τα τρία στάδια. (β) Η επίδραση του λόγου R.

Το 1960, ο Paris έδειξε ότι ο ρυθμός αύξησης μιας ρωγμής υπό κόπωση  $da/dN$  συνδέεται με την μεταβολή του συντελεστή έντασης τάσεων  $\Delta K$ . ( $=K_{I\max}-K_{I\min}$ ) με τη παρακάτω εξίσωση ισχύος:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

Η εξίσωση που πρότεινε ο Paris είναι η πιο γνωστή σήμερα ημιεμπειρική φόρμουλα που περιγράφει ικανοποιητικά και ταιριάζει σε ένα μεγάλο αριθμό περιπτώσεων και δεδομένων.

Όταν λογαριθμίσουμε την εξίσωση Paris προκύπτει μια γραμμική σχέση η οποία και αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα του 2ου σταδίου της επέκτασης της ρωγμής:

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log(C) + n \cdot \log(\Delta K)$$

Ο εκθέτης  $n$  παίρνει γενικά τιμές:  $2 < n < 4$ . Ο τύπος του Paris έχει εμπλουτιστεί μέχρι σήμερα από διάφορους ερευνητές για να γίνει πιο γενικός ή πιο ευέλικτος, όπως π.χ. με τη προσθήκη του λόγου  $R$  της ακολουθίας της φόρτισης ή άλλων παραμέτρων από τον Forman.

### 3. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

#### 3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΩΝ ΜΚΕ

Οι όροι **μη καταστροφικός έλεγχος** (*nondestructive inspection – NDI*), **μη καταστροφική δοκιμή** (*nondestructive testing – NDT*) ή **μη καταστροφική αξιολόγηση** (*nondestructive evaluation – NDE*) αναφέρονται στη χρήση των ΜΚΕ, μιας κατηγορίας δηλαδή φυσικών δοκιμών που επιτρέπουν την ανίχνευση ή/και μέτρηση ιδιοτήτων του υλικού ή ατελειών χωρίς όμως να εμποδίζεται η λειτουργική χρήση της δομής.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι είναι απαραίτητοι για σχεδόν οποιοδήποτε βιομηχανικό προϊόν. Ο ΜΚΕ έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των υλικών διότι επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υλικού (όπως η μικροδομή και η μακροδομή, η μηχανική τάση, οι φυσικές ιδιότητες, και τα ελαττώματα/βλάβες) σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο, γραμμή, επιφάνεια, ή όγκο ενδιαφέροντος και σε σχεδόν

οποιαδήποτε κατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Ο μη καταστροφικός έλεγχος αναφέρεται σε πολλές διαφορετικές μεθόδους που βασίζονται σε ελαστικά κύματα, διεισδύουσες ακτινοβολίες, φως, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικά αισθητήρια, κλπ. Η κάθε μέθοδος μπορεί να χωρίζεται σε διαφορετικές τεχνικές, οι οποίες έχουν κοινή φυσική βάση (π.χ. ακουστική, οπτική, μαγνητισμός, κλπ.), όμως διαφοροποιούνται ως προς την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό επίπεδο ή στο πεδίο σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος ή της κατασκευής. Λόγω του μεγάλου αριθμού πιθανών μεθόδων και τεχνικών μη καταστροφικού χαρακτηρισμού και αξιολόγησης υλικών και δομών, οι ΜΚΕ δεν είναι ένα μεμονωμένο πεδίο, αλλά μια συνέργεια πολλών επιστημονικών και τεχνικών ειδικοτήτων.

Ο ρόλος του ΜΚΕ βασίζεται σε δύο κύριους άξονες. Ο πρώτος είναι προφανώς η αποτροπή της καταστροφικής αστοχίας των κατασκευών. Είναι πολλά τα παραδείγματα αστοχιών στην ιστορία του τεχνικού πολιτισμού τα οποία συνέβησαν λόγω αδυναμίας ανίχνευσης βλάβης σε αρχικό στάδιο. Λόγω καταπόνησης κατά τη λειτουργία η βλάβη αυξάνεται εκθετικά (όπως μία ρωγμή κατά την κόπωση) και ως εκ τούτου μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία με ανθρώπινα θύματα και δευτερευόντως απώλεια κεφαλαίου.

Η επιτροπή για τη μη καταστροφική αξιολόγηση του National Materials Advisory Board (NMAB) υιοθέτησε ένα σύστημα για την κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ σε έξι κύριες κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι :

- Οπτικός έλεγχος
- Έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες (penetrating radiation)
- Μαγνητικός-ηλεκτρικός έλεγχος
- Έλεγχος με μηχανικές δονήσεις
- Θερμικοί έλεγχοι
- Χημικοί και ηλεκτροχημικοί έλεγχοι

<u>Κατηγορίες</u>	<u>Εφαρμογές</u>	
Μηχανικές και Οπτικές	Χρώμα, Ρωγμές, Διαστάσεις, Πάχος	Επιφανειακή τραχύτητα Συντελεστής ανάκλασης, κ.α
Διεισδύουσες ακτινοβολίες	Ρωγμές Διαφοροποίηση πυκνότητας Εγκλείσματα, Πάχος	Μικροπορώδες Διαχωρισμός, κ.α

Ηλεκτρομαγνητισμός	Ανισοτροπία Κουλότητες Τοπικές παραμορφώσεις Σκληρότητα	Θερμική επεξεργασία Κρυσταλλική δομή Συγκέντρωση ιόντων, κ.α
Υπέρηχοι	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Αποκολλήσεις Πυκνότητα Μέτρο ελαστικότητας	Μηχανική υποβάθμιση Επιφανειακές τάσεις, κ.α
Υπέρυθρη ακτινοβολία	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Θερμική αγωγιμότητα Πάχος, Ρωγμές, Υγρασία	Διάβρωση Αποκολλήσεις Εγκλείσματα, Πορώδες, κ.α
Χημική ανάλυση	Σύσταση Στοιχειακή ανάλυση Μέγεθος κόκκου Εγκλείσματα	Επιφανειακές ατέλειες Πορώδες Αναγνώριση κραμάτων, κ.α

**Πίνακας 3.1: Οι 6 κύριες κατηγορίες των ΜΚΕ και οι εφαρμογές τους.**

Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες: α) πηγή ενέργειας ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες Χ, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία), β) φύση των σημάτων και η εικόνα ή υπογραφή που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο (εξασθένιση των ακτίνων Χ, ανάκλαση των υπερήχων), γ) μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι), δ) μέθοδοι καταγραφής των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπερύθρου), ε) ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ποσοτική ή ποιοτική).

Αντικείμενο της κάθε μεθόδου είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

- Ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.)
- Δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.)
- Διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.)
- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.)
- Σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμείξεις κ.ά.)
- Στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής)
- Ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος)
- Μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας



<b>Μέθοδος ΜΚΕ</b>	<b>Τυπικές ατέλειες που ανιχνεύει</b>	<b>Εφαρμογές</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Ραδιογραφία	Κενά, πορώδες, εγκλείσματα, ρωγμές	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολλήσεις, δομικές κατασκευές	Ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες, εφαρμόσιμη για μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Υψηλό κόστος, χαμηλή ευαισθησία σε λεπτές στρωματικές ατέλειες, όπως κλειστές ρωγμές κόπωσης και αποκολλήσεις, πιθανός κίνδυνος για την υγεία
Διεισδυτικά υγρά	Ρωγμές, σχισμές, πορώδες, επικαλύψεις, ραφές στην επιφάνεια	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολλήσεις, εξαρτήματα που υπόκεινται σε κόπωση ή ρηγμάτωση λόγω καταπόνησης και διάβρωσης	Χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων	Το ελάττωμα πρέπει να είναι ανοικτό σε μια προσιτή επιφάνεια, το επίπεδο ανιχνευσιμότητας εξαρτάται από τον χειριστή
Δινορεύματα	Ρωγμές, σύνθεση ή θερμική επεξεργασία κράματος, πάχος τοιχώματος, διαστάσεις	Σωληνώσεις, μεταλλικά ελάσματα, διαλογή κράματος, μέτρηση πάχους επικάλυψης	Μέτριο κόστος, αυτοματοποίηση, φορητότητα	Ανιχνεύει ατέλειες που μεταβάλουν την αγωγιμότητα των μετάλλων, μικρό βάθος διείσδυσης, ευαίσθητη στη γεωμετρία του δοκιμίου
Μαγνητικά σωματίδια	Ρωγμές, επικαλύψεις, κενά, πορώδες, εγκλείσματα	Χύτευση, σφυρηλασία, διέλαση	Απλή, χαμηλό κόστος, ανιχνεύει επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες	Εφαρμόσιμη μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, συχνά παρατηρούνται άσχετες ενδείξεις, εξαρτάται από τον χειριστή
Θερμογραφία	Κενά ή αποκολλήσεις σε μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά, θέση ζεστών ή ψυχρών περιοχών σε θερμικά ενεργές δομές	Πολυστρωματικές δομές, κυψελοειδείς δομές, ηλεκτρονικά κυκλώματα	Πλήρους πεδίου, σε πραγματικό χρόνο, θερμική απεικόνιση που ερμηνεύεται εύκολα	Δυσκολία ελέγχου της εκπνεπτικότητας της επιφάνειας, μικρή διακριτική ικανότητα ανάμεσα σε ατέλειες διαφορετικών τύπων
Υπέρηχοι	Ρωγμές, κενά, πορώδες, εγκλείσματα, αποκολλήσεις, έλλειψη συγκόλλησης μεταξύ ανόμοιων υλικών	Σύνθετα υλικά, σφυρηλασία, χύτευση, συγκολλήσεις, σωλήνες	Εξαιρετικό βάθος διείσδυσης, καλή ευαισθησία και ανάλυση, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Απαιτεί ακουστικό μέσο σύζευξης με το εξάρτημα, χαμηλής ταχύτητας, η ερμηνεία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη

**Πίνακας 3.2: Δυνατότητες συνήθων μεθόδων ΜΚΕ.**

### 3.2 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΜΚΕ

Σε πολλές κατασκευές απαιτείται καθ'όλη την διάρκεια ζωής τους περιοδικοί Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν γίνονται αντιληπτές με τις καθημερινές μεθόδους. Οι εφαρμογές τους καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού

- Στις κατασκευές (γέφυρες, κτίρια)
- Στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες)

- Στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο)
- Στην αεροδυναμική (κινητήρες, τζετ, πύραυλοι)
- Στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί, άξονες)
- Σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία
- Στα παρκα αναψυχής (παιχνίδια και τρένα μεγάλης ταχύτητας)
- Σε αγωγούς αερίου και πετρελαίου
- Στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, κ.α)

### **3.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

#### **3.3.1 Οπτικός Έλεγχος**

Ο πιο απλός τρόπος ελέγχου που δεν καταστρέφει μια κατασκευή είναι ο οπτικός έλεγχος. Ο οπτικός έλεγχος καταδεικνύει τα εμφανή ελαττώματα μιας κατασκευής, δηλαδή αυτά που βρίσκονται στην επιφάνεια του υλικού και έχουν ορατό μέγεθος. Ο οπτικός έλεγχος μπορεί να γίνει και με το μάτι αλλά συχνότερα γίνεται με μεγεθύνσεις x2-x4. Βέβαια στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν ένα ελάττωμα είναι ορατό με γυμνό οφθαλμό είναι πολύ αργά.

#### **3.3.2 Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκόπιο**

Σήμερα, χάρις στην κατασκευή ισχυρών μικροσκοπίων, μπορούμε να παρατηρήσουμε ακόμη και τη δημιουργία των μικρορωγμών σε κρυσταλλικό επίπεδο. Με την προϋπόθεση λοιπόν ότι μια ρωγμή βρίσκεται στην επιφάνεια του υλικού και χρησιμοποιώντας την κατάλληλη οπτική συσκευή μπορούμε να την παρατηρήσουμε με μεγάλη ακρίβεια και να παρακολουθήσουμε τη διάδοσή της.

Σε εργαστηριακό επίπεδο, ο οπτικός έλεγχος αποτελεί τη κύρια μέθοδο αναφοράς για όλες τις άλλες μεθόδους ΜΚΕ. Τα εργαστηριακά δοκίμια σχεδιάζονται έτσι ώστε η ρωγμή να είναι ορατή από το μικροσκόπιο του οποίου οι μετρήσεις θεωρούνται ακριβέστερες των άλλων μεθόδων. Με τη μέθοδο αυτή αξιολογούνται και ρυθμίζονται όλες οι άλλες μέθοδοι ΜΚΕ πριν εφαρμοστούν.

#### **3.3.3 Οπτικός Έλεγχος με Βιντεοσκόπηση**

Αγωγοί υγρών και αερίων, αποχετεύσεις και αγωγοί όμβριων υδάτων μπορούν να εξεταστούν οπτικά στο εσωτερικό τους με τη χρήση βιντεοκάμερας η οποία εισάγεται και μετακινείται μέσα στον αγωγό. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η κατάστασή τους χωρίς να χρειαστούν εκσκαφές ή διακοπή της παροχής.

#### **3.3.4 Οπτικός Έλεγχος με Laser**

## 1) Ολογραφία (Holography)

Όταν ένα αντικείμενο φωτίζεται με ακτίνες φωτός, η επιφάνειά του το αντανακλά παράγοντας κύματα διαφορετικού πλάτους και φάσης από το προσπίπτον φως. Τα κανονικά φιλμ καταγράφουν την ένταση του φωτός (πλάτος 2) που ανακλάται αλλά δεν χρησιμοποιούν πληροφορίες από τη μεταβολή της φάσης του. Στην ολογραφία χρησιμοποιούμε το Laser ώστε το φως να έχει σταθερή φάση. Το ανακλώμενο φως και ένα μέρος της αρχικής ακτίνας συναντώνται και συνδυάζονται έτσι ώστε η μεταβολές της φάσης να μετατραπούν σε μεταβολές έντασης και μαζί με το πλάτος να αποτυπωθούν σε φιλμ (ολογράφημα). Όταν περάσει ξανά η αρχική ακτίνα μέσα από το ολογράφημα διαθλάται και δημιουργεί μια 3-διάστατη εικόνα του αντικειμένου.

Όταν το αντικείμενο παραμένει στη θέση του η ξαναδημιουργούμενη εικόνα και το αντικείμενο συμπίπτουν ακριβώς. Αν όμως το αντικείμενο έχει μετακινηθεί ελάχιστα ή καταπονείται και έχει τοπικά παραμορφωθεί, τότε ο παρατηρητής βλέπει στην επιφάνεια κροσσούς συμβολής των οποίων το πλήθος και η απόσταση εξαρτώνται από τις μεταβολές στο αντικείμενο. Σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται η ολογραφική συμβολομετρία.

## 2) Συμβολομετρία (ESP Interferometry)

Η ολογραφική συμβολομετρία απαιτεί πολύ υψηλή ανάλυση που να φτάνει τις 1000 γραμμές ανά mm και πολύ υψηλή ένταση ώστε να έχει λογικούς χρόνους έκθεσης. Η τεχνική βασίζεται στη διπλή απεικόνιση του αντικειμένου πριν και μετά τη φόρτιση του. Αφού σχηματίσουμε το ολόγραμμα του αντικειμένου, το προβάλουμε επάνω του και στη συνέχεια παρατηρούμε τους κροσσούς συμβολής που σχηματίζονται καθώς το αντικείμενο καταπονείται ή δονείται. Αυτό λέγεται και φαινόμενο «ζωντανών κροσσών». Χρησιμοποιώντας επιπλέον ένα είδος στροβοσκοπίου μπορούμε να απομονώσουμε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή του κύκλου καταπόνησης την οποία θέλουμε να παρατηρήσουμε. Για την αποτύπωση της τελικής εικόνας, εκθέτουμε αρχικά το αντικείμενο στην ολογραφική πλάκα αφόρτιστο για το μισό του χρόνου έκθεσης και στη συνέχεια εφαρμόζουμε την τάση και το εκθέτουμε για τον υπόλοιπο χρόνο έκθεσης. Όλες οι τοπικές παραμορφώσεις θα εμφανιστούν στην τελική εικόνα σαν κροσσοί.

Η ολογραφική συμβολομετρία είναι κατάλληλη για το εντοπισμό παραμορφώσεων με τη μορφή εξογκωμάτων περισσότερο παρά τεντωμάτων. Χρησιμοποιώντας μάλιστα μια τηλεοπτική κάμερα και ψηφιακή εγγραφή οι αποτυπώσεις γίνονται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η σύνθετη αυτή τεχνική ονομάζεται και «ηλεκτροπτική ολογραφία».

### **3) Δυναμικός Έλεγχος Επιφανείας (Dynamic Surface-Inspection)**

Σε πολλά εξαρτήματα η παρουσία επιφανειακών ανωμαλιών, ρωγμών ακόμα και σκόνης μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία τους. Ο χειρωνακτικός έλεγχος παρόμοιων ελαττωμάτων παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα καθώς είναι υποκειμενικός, πολύ αργός και πολύ ακριβός.

Ο δυναμικός έλεγχος επιφανείας χρησιμοποιεί τηλεοπτική κάμερα για να καταγράψει τη σάρωση της επιφάνειας από μια ακτίνα Laser σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Το σήμα ψηφιοποιείται και οδηγείται σε κατάλληλο πρόγραμμα σε Η/Υ για επεξεργασία. Το πρόγραμμα ελέγχει το ψηφιακό τηλεοπτικό σήμα για «ανωμαλίες» που θα οφείλονται στα επιφανειακά ελαττώματα του υλικού.

Σε ειδικές περιπτώσεις, για μέγιστη ανάλυση και ταχύτητα, αντί της κάμερας χρησιμοποιούνται συστοιχίες φωτοδιόδων με οπτικές ίνες (π.χ. με 800x800 στοιχεία και διάκενο 25μm) και επιτυγχάνονται ταχύτητες έως και 60000 τεμάχια την ώρα.

## **3.4 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

### **1) Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays)**

Οι ακτίνες-Χ έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-Χ) έως τα 10-4nm («σκληρές» ακτίνες-Χ) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και ασάλι πάχους μισού μέτρου!

Οι ακτίνες-Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος, είναι και αυτές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-Χ και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία.

Οι ακτίνες-Χ και Γάμα ταξιδεύουν πάντα σε ευθείες γραμμές και δεν εστιάζονται γι' αυτό και η διάταξη λειτουργίας είναι πάντοτε: πηγή–εξεταζόμενο δείγμα–ραδιογραφική πλάκα.

### **2) Υποατομικά σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια κλπ.)**

Νετρόνια κατάλληλης ενέργειας παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες απορρόφησης από τα υλικά, παρ' όλο που είναι ατομικά σωματίδια και όχι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η χρήση υποατομικών σωματιδίων (νετρονίων ή πρωτονίων) έχει καθιερωθεί ευρέως σαν τεχνική και συνήθως αναφέρεται με το όνομα «νετρονική ραδιογραφία».

Η αξία της μεθόδου οφείλεται στο ότι η απορρόφηση των νετρονίων από τα υλικά δεν είναι ίδια με την απορρόφηση των ακτίνων-Χ που αυξάνει ομαλά με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου. Υλικά όπως το Υδρογόνο και το Λίθιο έχουν πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ενώ υλικά όπως το Αλουμίνιο και ο Σίδηρος έχουν 500-2000 φορές μικρότερο συντελεστή απορρόφησης. Η ιδιότητα αυτή κάνει τη μέθοδο πολύ αποτελεσματική στον εντοπισμό ατελειών, ειδικά όσων περιέχουν υδρογόνο όπως το νερό, λάδι, πλαστικό, κλπ., ακόμα και σε πολύ παχιές πλάκες μετάλλου ή άλλων υλικών.

Στη πράξη οι κύρια πηγή νετρονίων είναι ο πυρηνικός αντιδραστήρας. Άλλες πηγές που χρησιμοποιούνται είναι το ραδιϊσότοπο Californium-252, ή, συνδυασμός ακτίνων-Χ με Uranium ή Beryllium.

### **3.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΕΡΗΧΩΝ**

Οι μηχανικές δονήσεις διαδίδονται μέσα από στερεά, υγρά και αέρια καθώς η δόνηση μεταφέρεται από το ένα σωματίδιο της ύλης στο διπλανό του. Όταν τα σωματίδια της ύλης ταλαντώνουν και η κίνησή τους είναι κανονική τότε μετριέται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ( $\text{Hz} = \text{sec}^{-1}$ ). Όταν μάλιστα η συχνότητα της δόνησης είναι μεταξύ 10 και 20000 Hz, ο ήχος ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί. Οι δονήσεις με συχνότητα πάνω από 20000 Hz οι «ήχοι» δεν ακούγονται και ονομάζονται υπέρηχοι (ultrasound ή ultrasonic).

Τα ηχητικά κύματα δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Τα κύματα των ήχων και υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε (ΜΚΕ).

### **3.6 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

#### **3.6.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι**

Υπάρχουν πολλές ηλεκτρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον ΜΚΕ όπως για παράδειγμα, η μέτρηση της αντίστασης του υλικού, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, και η χρήση του τριβοηλεκτρικού, του θερμοηλεκτρικού ή του εξωηλεκτρονίου φαινομένου. Όμως, οι δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων είναι

η μέθοδος πτώσης δυναμικού για εντοπισμό ρωγμών, και, ο έλεγχος ρευμάτων eddy (Foucault).

### **1) Μέθοδος της Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop)**

Η μέθοδος λειτουργεί με τη μέτρηση της τάσης στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο διαρρέεται από σταθερό DC ή εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Η παρουσία ρωγμών, ή άλλων ατελειών, προκαλεί μεταβολές στη αγωγιμότητα του υλικού και αντίστοιχα στη μετρούμενη τάση. Η ίδια συσκευή που χρησιμοποιείται για την παροχή του ρεύματος και τη μέτρηση της τάσης μπορεί να μετατρέπει τις μεταβολές της πτώσης δυναμικού σε μεταβολές του μήκους της ρωγμής, εφόσον φυσικά έχει προηγηθεί η κατάλληλη ρύθμιση.

Η χρήση DC ρεύματος προσφέρει ευκολότερη τοποθέτηση και ρύθμιση, καθώς και μεγαλύτερη συσχέτιση τάσης και μήκους ρωγμής. Από την άλλη η χρήση AC ρεύματος απαιτεί πολύ μικρότερη ισχύ, διότι χάρις στο επιδερμικό φαινόμενο το ρεύμα κυκλοφορεί μόνο στην επιφάνεια του μετάλλου, έτσι δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του δοκιμίου και επιπλέον επιτρέπει τη χρήση μιας πληθώρας τεχνικών για τη μείωση του θορύβου.

Οι δύο τεχνικές των DC και AC ρευμάτων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ταυτόχρονα ώστε να συνδυάζονται τα προτερήματά τους και να βελτιώνονται τα αποτελέσματα.

### **2) Ρεύματα Eddy (Eddy-Current)**

Στην μέθοδο ρευμάτων eddy χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πηνίων που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας. Όταν αυτά βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού παράγουν σε αυτήν ρεύματα eddy τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν πεδίο που επιδρά στα πηνία και επηρεάζει το ρεύμα που τα διαρρέει. Οι αλλαγές αυτές μας πληροφορούν για την κατάσταση της επιφανείας του υλικού.

Η βασική τεχνική είναι να μετακινείται η κεφαλή με τα πηνία πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και να καταγράφεται κάθε αλλαγή στο ρεύμα και τη τάση των πηνίων. Όταν στην επιφάνεια υπάρχουν ατέλειες, τα πεδία των ρευμάτων eddy αλλοιώνονται και επηρεάζουν διαφορετικά το ρεύμα των πηνίων.

### **3.6.2 Μαγνητικές μέθοδοι**

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών του υλικού. Όταν ένα δοκίμιο μαγνητιστεί και περιέχει μια

ασυνέχεια στην επιφάνειά του ή κάτω από αυτήν, δημιουργείται μια παραμόρφωση στη μαγνητική ροή η οποία προκαλεί ένα τοπικό πεδίο απώλειας μαγνητικής ροής. Οι μέθοδοι βασίζονται στους νόμους του Maxwell (1873) και χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και πολύ ισχυρούς υπολογιστές.

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που μαγνητίζονται. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μαγνητική μέθοδος ελέγχου είναι η τεχνική των μαγνητικών ρινιδίων σε μελάνι ή σκόνη.

Τα υπό έλεγχο δοκίμια μαγνητίζονται κατάλληλα και στην επιφάνειά τους τοποθετούνται σιδηρομαγνητικά ρινίδια. Τα ρινίδια έλκονται και συγκεντρώνονται στα σημεία απώλειας της ροής, κάνοντας τις ατέλειες ορατές με γυμνό μάτι. Τα ρινίδια τοποθετούνται στην επιφάνεια ελέγχου είτε σαν χρωματιστό μαγνητικό μελάνι (magnetic ink) ή σαν μαγνητική σκόνη (magnetic particles).

Εναλλακτικά η μέτρηση της μαγνητικής ροής μπορεί να γίνει με ένα είδος μαγνητοταινίας η οποία πιέζεται στην επιφάνεια του μαγνητισμένου υλικού. Στη συνέχεια η ταινία αφαιρείται για επεξεργασία και ανάλυση των ενδείξεων. Η διαδικασία αυτή λέγεται μαγνητογραφία αλλά δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη.

Οι απώλειες μαγνητικής ροής μπορούν να καταγραφούν και με αισθητήρες που φέρουν πηνία ή μαγνητοδιόδους. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σωλήνες, αγωγούς, δεξαμενές και συρματόσχοινα.

### **3.7 ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ**

Ο έλεγχος με διεισδυτικό υγρό ή χρωστική ουσία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών σε μη σιδηρούχα κράματα ή σε σιδηρούχα κράματα στα οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αντίστοιχη ηλεκτρική ή μαγνητική μέθοδος. Μερικές φορές εφαρμόζεται και σε μη μεταλλικά υλικά.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Το υπό εξέταση υλικό, το οποίο περιέχει ρωγμές, μη ορατές με γυμνό οφθαλμό, καθαρίζεται επιμελώς.
2. Το διεισδυτικό υγρό απλώνεται στην επιφάνειά του υλικού ώστε να εισχωρήσει μέσα στις ρωγμές. Μικρότερα αντικείμενα βυθίζονται και ολόκληρα μέσα στο υγρό.
3. Στη συνέχεια το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε στο υλικό να παραμείνει μόνο το υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές.

4. Τέλος, στην επιφάνεια του υλικού απλώνεται ένα υγρό ή σκόνη «εμφάνισης» (developer), η οποία όταν έρχεται σε επαφή με το διεισδυτικό υγρό δημιουργεί έντονη χρωματική αντίθεση. Η έντονη αλλαγή στο χρώμα κάνει τις επιφανειακές ρωγμές ορατές

Η επιλογή του κατάλληλου διεισδυτικού υγρού καθορίζεται από την ευκολία διείσδυσής του στις ρωγμές και φυσικά την ευκολία εξαγωγής του από αυτές μετά τον έλεγχο. Η απλούστερη και παλαιότερη μέθοδος χρησιμοποιεί για διεισδυτικό λεπτόρρευστο λάδι και για την εμφάνιση λευκή σκόνη ανθρακικού ασβεστίου, η οποία χρωματίζεται έντονα από το λάδι των ρωγμών. Παραλλαγές της μεθόδου περιλαμβάνουν φωσφορίζουσες χρωστικές που γίνονται εύκολα ορατές με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας.

### **Συνδυασμός Διεισδυτικού υγρού και Ραδιογραφίας**

Μια πιο ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι ο συνδυασμός διεισδυτικού υγρού και ραδιογραφίας. Στις ραδιογραφίες δεν εντοπίζονται εύκολα οι επιφανειακές ρωγμές και τα διεισδυτικά υγρά δεν μας πληροφορούν για το τι γίνεται κάτω από την επιφάνεια. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων αφ' ενός αυξάνει την ποιότητα των ραδιογραφιών (contrast) με την επιλογή του κατάλληλου υγρού, και εφ' ετέρου μας πληροφορεί για το βάθος της επιφανειακής ρωγμής. Στη τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται οι διεισδυτικές ουσίες: νιτρικός άργυρος (silver nitrate), ιωδιούχος ψευδάργυρος (zinc iodide), χλωροφόρμιο (chloroform), και κυρίως, διιωδιούχο μεθάνιο (diiodomethane).

### **Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection)**

Πολλές συσκευές σχεδιάζονται να λειτουργούν με υψηλή εσωτερική πίεση και κατά συνέπεια πρέπει να ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με τη μέθοδο εντοπισμού διαρροών διοχετεύεται αέριο ή υγρό υπό πίεση στη συσκευή και ελέγχουμε την παρουσία του στην άλλη πλευρά του τοιχώματος καθώς και τυχόν μειώσεις στη πίεση του.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές, σε άλλες διοχετεύεται αέριο ενώ το σώμα είναι βυθισμένο σε υγρό οπότε δημιουργούνται φυσαλίδες (bubble testing), και σε άλλες διοχετεύεται χρωματιστό ή φωσφορίζον υγρό το οποίο εντοπίζεται στην άλλη πλευρά με ειδικό φωτισμό π.χ. υπέρυθρες λυχνίες. Το αέριο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το ήλιο, λόγω της αδρανούς του φύσης. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικές προδιαγραφές, ευαισθησία αλλά και κόστος.



## 3.8 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 3.8.1 Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, ένα μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που εκλύεται στο περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε θερμική εκπομπή.

Η θερμική εκπομπή στην περιοχή γύρω από τη ρωγμή μπορεί να μετρηθεί με ειδικούς θερμικούς αισθητήρες.

### 3.8.2 Θερμογραφική Μέθοδος (Thermographic Methods)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί θερμοκάμερα υπερύθρων ακτινών για τη μέτρηση της κατανομής της θερμοκρασίας σε μια επιφάνεια. Μπορεί να λειτουργήσει σαν παθητική τεχνική όπως η μέθοδος της θερμικής εκπομπής, ή σαν ενεργητική τεχνική χρησιμοποιώντας θερμικούς παλμούς (Laser) για τη θέρμανση της επιφάνειας. Η βασική ιδέα είναι ότι εφόσον το υλικό είναι ομοιογενές η θερμότητα θα διαδοθεί ομοιόμορφα, ενώ αν υπάρχουν ελαττώματα η διάχυση της θερμότητας θα αλλοιωθεί.

## 3.9 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΜΜΕΣΕΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ



ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟ

ΕΞΟΛΚΕΑΣ

ΥΠΕΡΗΧΟΣ

ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

- **Με χρήση κρουσιμέτρου:** Μετρούνται οι αναπηδήσεις της σφύρας του κρουσιμέτρου στην επιφάνεια του σκυροδέματος και λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων από την οποία εκτιμάται επιφανειακή αντοχή του σκυροδέματος.
- **Με χρήση εξολκέα:** Πρότυπος ήλος εξολκεύεται με ειδικό εξολκέα (HILTI tester) ο οποίος φέρει δυναμόμετρο. Μετράται η δύναμη εξολκεύσεως, η οποία ανάγεται σε θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.
- **Με χρήση υπερηχογράφου:** Μετράται η ταχύτητα μετάδοσης των διαμήκων κυμάτων του ήχου εντός της μάζας του σκυροδέματος. Με τη μέθοδο αυτή ελέγχεται η ομοιομορφία και η σχετική κατάσταση του σκυροδέματος, η ύπαρξη ρωγμών και το εύρος αυτών, καθώς και ο προσδιορισμός του πάχους της ασβεστοποιημένης ζώνης σκυροδέματος επηρεασμένο από φωτιά.
- **Έλεγχος ενανθρακωμένης ζώνης του σκυροδέματος:** Η μέθοδος πραγματοποιείται με ψεκασμό διαλείμματος φαινολοφθαλείνης σε δοκίμια σκυροδέματος.

**Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίζεται από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων (κρουσίμετρο, εξολκέας, υπέρηχος) λαμβάνοντας υπόψιν τις τυπικές αποκλίσεις τους.**

- **Εργαστηριακός Έλεγχος σκυροδέματος με πυρηνοληψία:** Η πυρηνοληψία πραγματοποιείται με την αδιατάρακτη διάτρηση και αποκοπή κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος με χρήση καροτιέρας. Τα δοκίμια – καρότα καταλήγουν σε πιστοποιημένα εργαστήρια δοκιμών θραύσης, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο εργαστηριακός έλεγχος, που αφορά τον προσδιορισμό αντοχής σε θλίψη, το πάχος ενανθράκωσης, τον προσδιορισμό μάζας και φαινόμενου βάρους του σκυροδέματος, την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson.
- **Εργαστηριακοί Έλεγχοι Σιδηροπλισμού:** Εργαστηριακός έλεγχος Προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του χάλυβα (όριο διαρροής, εφελκυστική αντοχή, κλπ).



**ΘΡΑΥΣΗ ΠΥΡΗΝΑ**



**ΠΥΡΗΝΑΣ ΠΛΑΚΑΣ**



**ΠΥΡΗΝΟΛΗΨΙΑ**

**Με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων του σκυροδέματος πραγματοποιείται βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων των έμμεσων μη καταστροφικών μετρήσεων.**

### **ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΙΔΗΡΟΠΛΙΣΜΩΝ**

Με τον κατάλληλο ανιχνευτή είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης, του βάθους και της διατομής των ράβδων σιδηροπλισμών σε φέροντα στοιχεία. Η μέτρηση βασίζεται στην ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τους υφιστάμενους σιδηροπλισμούς. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από τον σαρωτή-πομποδέκτη, ο οποίος κινείται σε επίπεδη επιφάνεια οπλισμένου σκυροδέματος. Ο σαρωτής αποθηκεύει τα δεδομένα της σάρωσης και τα μεταφέρει υπέρυθρα στην οθόνη-καταγραφέα έχοντας άμεσα, επιτόπου στο έργο την απεικόνιση - μαγνητογραφία των σιδηροπλισμών.



## 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στόχος με τον έλεγχο αυτό είναι να διασφαλισθεί με κάποιο αποδεκτό βαθμό πιθανότητας, ότι η συμπεριφορά της είναι ικανοποιητική σε όλη τη διάρκεια της ζωής της, ώστε να είναι λιγότερο εφικτό να αστοχήσει λόγω του φαινομένου της κόπωσης ή να απαιτηθεί αποκατάσταση των ζημιών λόγω της κόπωσης.

Απαιτούνται κατάλληλοι συντελεστές ασφαλείας. Ο Ευρωκώδικας 3 είναι αυτός που ασχολείται με τα παραπάνω, σύμφωνα με τον οποίο γίνεται έλεγχος και όλων των χαλύβδινων υλικών της κατασκευής, των συνδέσεων και των συγκολλήσεων.

Είναι απαραίτητο όλες οι ονομαστικές τάσεις να κυμαίνονται εντός των ορίων ελαστικότητας του υλικού. Δεν πρέπει να ξεπερνάτε η διακύμανση των τιμών σχεδιασμού στις ορθές τάσεις το:  $1,5f_y$  ή το  $1,5f_y/\sqrt{3}$ : στις διατμητικές.

Δεν απαιτείται έλεγχος σε κόπωση των πεζογεφυρών ή και οποιονδήποτε άλλων γεφυρών φορτίζονται κυρίως στατικά, εκτός εάν τμήμα τους ή και ολόκληρες, διεγείρονται από φορτία ανέμου ή πεζών. Επιπρόσθετα, δεν απαιτείται έλεγχος σε τμήματα οδογεφυρών ή σιδηροδρομικών γεφυρών, τα οποία δεν εντείνονται λόγω φορτίων κυκλοφορίας, ούτε διεγείρονται από φορτία ανέμου.

### 4.2 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Εφαρμόζονται τα φορτία κόπωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 και αναφέρονται σε οδικές ή σιδηροδρομικές γέφυρες. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μελλοντική αλλαγή των φορτίων, όπως αύξηση κυκλοφορίας, αλλαγή των συρμών φόρτισης, κλπ. Κατά την καταγραφή των διαγραμμάτων των τάσεων ( $\sigma$ - $t$ ), τα φορτία προσδιορίζονται επακριβώς από τις προδιαγραφές του έργου και ο αντίστοιχος έλεγχος γίνεται κατά τον κανόνα Palmgren-Miner, για συσσωρευμένη βλάβη.

Για τις οδικές γέφυρες μπορεί να εφαρμόζεται το μοντέλο φόρτισης 3 για κόπωση. Για τις σιδηροδρομικές γέφυρες, απλοποιητικά χρησιμοποιείται το μοντέλο φόρτισης 71 σε συνδυασμό με το δυναμικό συντελεστή  $\psi_2$ .

### 4.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

$\gamma_{Ff} = 1,0$  για τα φορτία &  $\gamma_{Mf} = 1,0$  έως  $1,35$  για την αντοχή κύριων ή δευτερευόντων μελών ανάλογα με τη μέθοδο εκτίμησης

Κύρια μέλη – αστοχία οδηγεί σε κατάρρευση της γέφυρας

Δευτερεύοντα μέλη – αστοχία δεν οδηγεί σε κατάρρευση της γέφυρας

#### 4.4 ΦΑΣΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ

Το εύρος των τάσεων προσδιορίζεται ως εξής με την βοήθεια γραμμών επιρροής, όπου προκύπτει η μέγιστη τάση  $\sigma_{r,max}$  και η ελάχιστη τάση  $\sigma_{r,min}$ .

Το εύρος της ορθής τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\sigma_r = |\sigma_{r,max} - \sigma_{r,min}|$$

Το ισοδύναμο εύρος τάσης για  $2 \times 10^6$  κύκλους είναι ίση με:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \times \varphi_2 \times \Delta\sigma_r$$

Όπου

$\varphi_2$  είναι ο δυναμικός συντελεστής

Για οδικές γέφυρες  $\varphi_2=1$ , για σιδηροδρομικές γέφυρες είναι  $1 \leq \varphi_2 \leq 1,67$ , και

$\lambda$  συντελεστής ισοδυναμίας βλάβης, ίσο με

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \text{ αλλά } \lambda < \lambda_{max}$$

$\lambda_i$  επιμέρους συντελεστές

#### 4.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Ο έλεγχος σε κόπωση γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

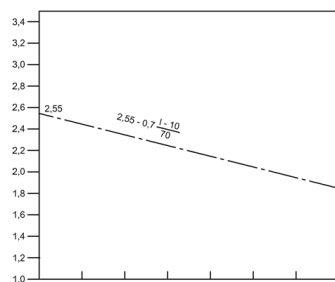
$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E2} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} \text{ και}$$

$$\gamma_{Ff} \times \Delta T_{E2} \leq \Delta T_c / \gamma_{Mf}$$

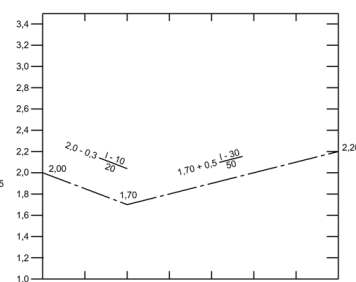
όπου τα  $\Delta\sigma_c$  και  $\Delta T_c$  είναι τα όρια κόπωσης για ορθή τάση και διάτμηση, όπου αντιστοιχούν σε  $2 \times 10^6$  κύκλους.

#### 4.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ $\lambda$

$\lambda_1$ : είναι ο συντελεστής βλάβης λόγω κυκλοφορίας και εξαρτάται από το μήκος της κρίσιμης γραμμής επιρροής ή ζώνης.



Μήκος  $L(m)$  στα ανοίγματα



Μήκος  $L(m)$  στις στηρίξεις

Μέγεθος	Φορέας/Μέλος	Θέση	
Ροπές	Αμφιέριςτος		$L_i$
	Συνεχής	Άνοιγμα	$L_i$ του θεωρούμενου ανοίγματος,
		Στήριγμα	Μέσος όρος των δύο ανοιγμάτων $L_i$ και $L_j$ γειτονικών στη στήριξη
	Διαδοκίδες που στηρίζουν συνδέσμους		Άθροισμα των δύο γειτονικών ανοιγμάτων των ενισχύσεων που φέρονται από τη διαδοκίδα
Τέμνουσες	Αμφιέριςτος/ Συνεχής	Άνοιγμα	Θεωρούμενο άνοιγμα $L_i$
		Στήριγμα	$0,4 \times$ το θεωρούμενο άνοιγμα $L_i$ .
Αντιδράσεις στήριξης		Ακραίες στήριξεις	Θεωρούμενο άνοιγμα $L_i$ ,
		Ενδιάμεσες στήριξεις	Άθροισμα των δύο γειτονικών ανοιγμάτων $L_i + L_j$
	Τοξωτές γέφυρες	Αναρτήσεις	Το διπλάσιο του μήκους των αναρτήρων
		Τόξα	Το μισό του ανοίγματος του τόξου

The diagram illustrates a continuous beam with two spans,  $L_1$  and  $L_2$ . It shows spans (άνοιγμα), supports (στήριγμα), and overhangs (τόξα). Dimensions are given as  $0,15L_1$ ,  $0,15L_2$ , and  $0,15L_2$ .

Πίνακας 4.1: Μήκος  $L$ .

$\lambda_2$ : περιλαμβάνει την επιρροή του όγκου κυκλοφορίας και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_2 = \frac{Q_{ml}}{Q_0} \left( \frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/5}$$

Όπου το  $Q_{m1}$  είναι το μέσο βάρος των φορτηγών στη λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας (σε kN), όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή και προκύπτει από τη σχέση:

$$Q_{m1} = \left( \frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i} \right)^{1/5}$$

Με

$$Q_0 = 480\text{kN}$$

$$N_0 = 0,5 \times 10^6$$

$N_{\text{obs}}$  είναι ο συνολικός αριθμός των φορτηγών ανά έτος στη λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας,

Κατηγορίες κυκλοφορίας		$N_{\text{obs}}$ ανά έτος και ανά λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας
1	Οδοί και αυτοκινητόδρομοι με 2 ή περισσότερες λωρίδες ανά κατεύθυνση και με υψηλό ποσοστό ροής βαρέων οχημάτων	$2,0 \times 10^6$
2	Οδοί και αυτοκινητόδρομοι με μέτριο ποσοστό ροής βαρέων οχημάτων	$0,5 \times 10^6$
3	Κύριες οδοί με χαμηλό ποσοστό ροής βαρέων οχημάτων	$0,125 \times 10^6$
4	Τοπικές οδοί με χαμηλό ποσοστό ροής βαρέων οχημάτων	$0,05 \times 10^6$
$N_0 = 0,5 \times 10^6$		

Πίνακας 4.2: Τιμές  $N_{\text{obs}}$  και  $N_0$ .

$Q_i$  είναι το βάρος του φορτηγού  $i$  (σε kN) στη λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας, όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή

$n_i$  είναι ο αριθμός των φορτηγών σε βάρος  $Q_i$  στη λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας, όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή.

Για δεδομένες τιμές των  $Q_{m1}$  και  $N_{\text{obs}}$ , ο συντελεστής  $\lambda_2$  προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα:

$Q_{m1}$	$N_{\text{obs}}$							
	0.25E6	0.50E6	0.75E6	1.00E6	1.25E6	1.50E6	1.75E6	2.00E6
200	0.362	0.417	0.452	0.479	0.500	0.519	0.535	0.550
300	0.544	0.625	0.678	0.712	0.751	0.779	0.803	0.825
400	0.725	0.833	0.904	0.957	1.001	1.038	1.071	1.100
500	0.907	1.042	1.130	1.197	1.251	1.298	1.338	1.374
600	1.088	1.250	1.356	1.436	1.501	1.557	1.606	1.649

**λ3: λαμβάνει υπόψη τη διάρκεια ζωής της γέφυρας και υπολογίζεται από τη σχέση:**

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100}\right)^{1/5}$$

Όπου  $t_{Ld}$  είναι η διάρκεια ζωής σχεδιασμού της γέφυρας σε χρόνια, όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή.

Συντελεστής λ3							
Διάρκεια ζωής, έτη	50	60	70	80	90	100	120
Συντελεστής λ3	0.871	0.903	0.931	0.956	0.979	1.000	1.037

**λ4: λαμβάνει υπόψη του την επιρροή της βαρειάς κυκλοφορίας στις υπόλοιπες λωρίδες κυκλοφορίας ή το δομικό στοιχείο που φορτίζεται με περισσότερες από μία τροχιές και προκύπτει από τη σχέση:**

$$\lambda_4 = \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^5 + \frac{N_3}{N_1} \left(\frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^5 \right]^{1/5}$$

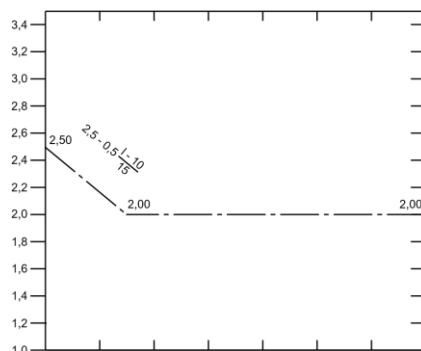
$k$  είναι ο αριθμός των λωρίδων βαρειάς κυκλοφορίας, όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή

$N_j$  είναι ο αριθμός των φορτηγών ανά έτος στη λωρίδα  $j$ , όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή

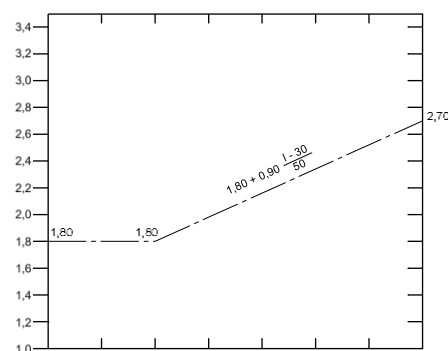
$Q_{mj}$  είναι το μέσο βάρος των φορτηγών στη λωρίδα  $j$ , όπως ορίζεται από την αρμόδια αρχή

$\eta_j$  είναι η τιμή της γραμμής επιρροής της εσωτερικής δύναμης, που προκαλεί το εύρος τάσεων στο μέσον της λωρίδας  $j$ .

**λ<sub>max</sub>: είναι η μέγιστη τιμή του λ, και λαμβάνει υπόψη το όριο κόπωσης**



Μήκος  $L(m)$  στα ανοίγματα



Μήκος  $L(m)$  στις στηρίξεις

#### 4.7 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΥΠΟ ΚΟΠΩΣΗ

Η I-35W είναι μια χαλύβδινη δικτυωτή γέφυρα στην Minneapolis των Η.Π.Α., η οποία κατάρρευσε εντελώς την 1 Αυγούστου 2007. Αρχικά η γέφυρα αυτή δόθηκε στην κυκλοφορία το 1967 και τα σχέδια προέβλεπαν δυο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση με μια εξωτερική λωρίδα επιτάχυνσης/επιβράδυνσης. Το 1988 επαναδιαγραμμίστηκε και προστέθηκε μια επιπλέον λωρίδα για κάθε κατεύθυνση, αυξάνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό των λωρίδων σε 8. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την διάρκεια κατάρρευσης της, η γέφυρας συντηρούνταν από κατασκευαστική εταιρεία. Η ανωδομή της γέφυρας αποτελούνταν από δύο κύρια συνεχόμενα διαμήκη δικτυώματα με τρία ανοίγματα μήκους 81m, 139m και 81m. Τα δύο διαμήκη δικτυώματα συνδέονταν μεταξύ τους με εγκάρσια δικτυώματα σε κάθε φάτνωμα, τα οποία προεκτείνονταν εξωτερικά από την δυτική και την ανατολική πλευρά της γέφυρας, με κάθε πρόβολο να αποτελεί μια λωρίδα κυκλοφορίας. Σύμφωνα με τα αρχικά σχέδια, το κατάστρωμα είχε πάχος 16.5cm, αλλά κατά την ανακατασκευή του την περίοδο 1977-1998 προστέθηκε επιπλέον πάχος 5cm στην επιφάνεια του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα το συνολικό πάχος να είναι 22cm. Μετά από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, πιστεύεται ότι ο φορέας U10 είναι αυτή που αρχικά είχε αστοχήσει και από την οποία ξεκίνησε η προοδευτική κατάρρευση της γέφυρας. Μια εβδομάδα μετά την κατάρρευση, μετρήθηκε το πάχος της πλάκας του φορέα U10 και βρέθηκε 22mm μικρότερο από τον σχεδιασμό που έπρεπε να πληρούνταν. Επίσης αποδείχτηκε, ότι οι συνδέσεις που βρίσκονταν στο εσωτερικού του υποστυλώματος του φορέα U10, ήταν τα πιο αδύναμα σημεία και ίσως να ήταν ο λόγος που είχε επέλθει αστοχία λυγισμού της πλάκας. Πριν την κατάρρευση της γέφυρας και για αρκετούς μήνες, η κατασκευαστική εταιρία, έκανε επισκευές στο κατάστρωμα. Οι επισκευές που πραγματοποιούνταν ήταν η αφαίρεση 5cm σκυροδέματος από την επιφάνεια του οδοστρώματος, η κοπή 100cm αρμού διαστολής από την πλάκα σκυροδέματος και η αντικατάστασή τους, και τέλος η αφαίρεση ενός τμήματος του καταστρώματος. Έτσι το συνολικό φορτίο της κατασκευής ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό και εκτιμάται ότι το συνολικό βάρος του υλικού κατασκευής καθώς και του εξοπλισμού στο κατάστρωμα ακριβώς πάνω από το κομβόελασμα του φορέα U10 ή κοντά σε αυτό ήταν 2600kN. Ακόμα από φωτογραφίες της γέφυρας που είχαν τραβηχτεί παλαιότερα, αποδεικνύεται ότι η I-35W είχε πρόβλημα διάβρωσης λόγω της διέλευσης του ποταμού. Αναφορές επιθεωρήσεων έδειξαν ότι η παρουσία διαβρώσεως σε κάποια κομβοελάσματα και σε παρακείμενες περιοχές είχαν σαν αποτέλεσμα να μεταβάλουν το πάχος σχεδιασμού των στοιχείων κατά την διάρκεια της κατάρρευσης.





Η Γέφυρα πριν την κατάρρευση



Η Γέφυρα μετά την κατάρρευση

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η γέφυρα αυτή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πριν το 1970, όταν ακόμα υπήρχε περιορισμένη αντίληψη της συμπεριφοράς κόπωσης των συγκολλημένων μελών και των συνδέσεων των μεταλλικών γεφυρών. Έτσι σε μια αναφορά που έγινε το 1998, βρέθηκαν ρωγμές κόπωσης σε περιοχές, όπου το ενισχυτικό διάφραγμα δεν είχε συγκολληθεί με το πάνω πέλμα. Τέτοιες ρωγμές είναι πιθανόν να προκαλέσουν θραύση του κυρίου μέλους ή των συνδέσεων των δικτυωμάτων, προκαλώντας την προοδευτική κατάρρευση ολόκληρου του ανοίγματος.



Λυγισμός κομβοελασμάτων του φορέα U10

## 5. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΟΣΚΑΦΗΣ ΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το φαινόμενο της υποσκαφής της γέφυρας μπορεί να οριστεί ως η διάβρωση του εδάφους περιμετρικά των θεμελίων της. Είναι η πιο κοινή αιτία κατάρρευσης γεφυρών σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών. Μία μελέτη υπολόγισε ότι σε μια περίοδο τριάντα ετών, περισσότερες από εξακόσιες αποτυχιές γεφυρών μπορούν να αποδοθούν στην υποσκαφή.

Μια πρόσφατη αξιοσημείωτη κατάρρευση γέφυρας από υποσκαφή ήταν η αποτυχία της οδογέφυρας Malahide στην Ιρλανδία το 2009. Αυτή η κατάρρευση οφειλόταν στην εμφάνιση υποσκαφής που δεν εντοπίστηκε σε οπτική επιθεώρηση. Είναι σημαντικό να υπάρχει ένα αξιόπιστο σύστημα παρακολούθησης για να διασφαλιστεί ότι δεν διακυβεύεται η ασφάλεια της γέφυρας. Η έγκαιρη ανίχνευση επιτρέπει επίσης τη συντήρηση με πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Παραδοσιακά, έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι οπτικής επιθεώρησης για την αξιολόγηση της κατάστασης των θεμελίων. Η μέθοδος είναι προβληματική στο ότι η ορατότητα είναι συχνά φτωχή κάτω από το νερό. Επίσης, μια τρύπα υποσκαφής τείνει να ξαναγεμίζει μετά τη λήξη μιας βαριάς ροής πλημμύρας, πράγμα που σημαίνει ότι η τρύπα θα μπορούσε να έχει πολύ μικρότερο βάθος από ό, τι προηγουμένως. Αυτή η πλήρωση έχει συνήθως μειωμένη μηχανική αντοχή, πράγμα που σημαίνει ότι το ζήτημα μπορεί να είναι χειρότερο από ό, τι εμφανίζεται οπτικά. Υπάρχουν μέθοδοι που αποσκοπούν στην απομακρυσμένη παρακολούθηση της υποσκαφής της γέφυρας μέσω της χρήσης οργάνων. Αυτές οι συσκευές παρακολουθούν γενικά τις αλλαγές στο βάθος μιας τρύπας. Ένα παράδειγμα μιας από αυτές τις συσκευές είναι μια συσκευή float-out που είναι εγκατεστημένη στην κοίτη του ποταμού κοντά στην αποβάθρα ενδιαφέροντος κάτω από το έδαφος. Όταν το τρίψιμο αφαιρεί το χώμα γύρω από τη συσκευή σε ένα προκαθορισμένο βάθος τρύπας καθαρισμού, απλώς επιπλέει στην επιφάνεια. Μια πιο περιεκτική επισκόπηση των τρεχουσών προσεγγίσεων παρέχεται από τους Prendergast και Gavin.

Οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε κραδασμούς έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια για τον εντοπισμό ζημιών στην ίδια τη δομή της γέφυρας. Η ζημιά έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας της γέφυρας και με τη σειρά της επηρεάζει τα σχήματα της λειτουργίας της γέφυρας και τις φυσικές συχνότητες των κραδασμών. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές εφαρμόζουν επίσης την ίδια προσέγγιση για την ανίχνευση της πληγής της γέφυρας. Το έδαφος που στηρίζει μια βάση γεφυρών παρέχει

μια αντίσταση μέσω μιας λειτουργικής ακαμψίας. Η υποσκαφή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της λειτουργικής ακαμψίας του εδάφους γύρω από το θεμέλιο της γέφυρας, ως αποτέλεσμα της εξάρτησης από το στέλεχος της ακαμψίας του εδάφους. Στην πραγματικότητα, η απομάκρυνση του εδάφους μειώνει την αποτελεσματική περιοχή επαφής μεταξύ της βάσης και του εδάφους, αυξάνοντας έτσι το επίπεδο καταπόνησης. Ένα ζήτημα με προσεγγίσεις που βασίζονται σε δόνηση είναι ότι σε μια γέφυρα πολλαπλών διαστάσεων, θα πρέπει να εγκατασταθούν πολλοί αισθητήρες. Επίσης, πρέπει να είναι διαθέσιμη μια βιώσιμη πηγή ισχύος για τους αισθητήρες και το σύστημα απόκτησης δεδομένων.

Η εγκατάσταση αισθητήρων (π.χ. επιταχυνσιόμετρα) σε μια γέφυρα μπορεί να ταξινομηθεί ως άμεση προσέγγιση που βασίζεται σε δονήσεις στην ανίχνευση υποσκαφής. Οι έμμεσες τεχνικές παρακολούθησης γεφυρών (επίσης γνωστές ως μέθοδοι «drive-by») χρησιμοποιούν δεδομένα που λαμβάνονται από αισθητήρες εγκατεστημένους σε ένα διερχόμενο όχημα για να αντλήσουν πληροφορίες σχετικά με τη δομή της γέφυρας. Μια εκτενής ανασκόπηση των έμμεσων μεθόδων παρακολούθησης γεφυρών πραγματοποιήθηκε από τους Malekjafarian et al. Οι μέθοδοι Drive-by είναι πλεονεκτικές στο ότι δεν χρειάζεται να εγκατασταθούν αισθητήρες ή συστήματα απόκτησης δεδομένων στη γέφυρα. Επιπλέον, πολλαπλές γέφυρες μπορούν να αξιολογηθούν χρησιμοποιώντας το ίδιο όχημα. Αυτό επιτρέπει μεγάλη εξοικονόμηση κόστους και μια πηγή ενέργειας κοντά στη γέφυρα δεν αποτελεί πλέον πρόβλημα.

## 5.2 ΜΟΡΦΕΣ ΥΠΟΣΚΑΦΗΣ

Υπάρχουν αρκετές μορφές διάβρωσης. Η γενική διάβρωση θα πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από την παρουσία της γέφυρας στη συγκεκριμένη διατομή. Η διάβρωση λόγω στένωσης πραγματοποιείται εξαιτίας της αλλαγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καναλιού λόγω της παρουσίας της γέφυρας και τέλος, η τοπική διάβρωση οφείλεται στην παρεμπόδιση της ροής από το βάθρο και διακρίνεται σε δυο τύπους.

- **Διάβρωση καθαρού νερού** (*clear water*) – Δεν πραγματοποιείται φερτών ή αν πραγματοποιείται είναι σε αιώρηση.
- **Διάβρωση ενεργού πυθμένα** (*live bed*) – Υπάρχει μεταφορά φερτών στα ανάντη.

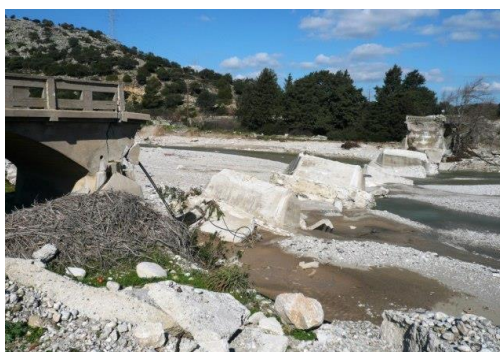
## 5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

### 1. Γέφυρα ποταμού Λουτάνη, Ρόδος



Η Γέφυρα Λουτάνη πριν την κατάρρευση

Η γέφυρα του ποταμού Λουτάνη, είναι (ήταν) γέφυρα από σκυρόδεμα που κατασκευάστηκε κατά τη διάρκεια της Ιταλικής κατοχής και αποτελεί τυπικό δείγμα της τότε τεχνοτροπίας. Στις αρχές Ιανουαρίου του 2011 η γέφυρα αυτή κατέρρευσε έπειτα από μεγάλη νεροποντή, ενώ στις 28.1.2011 κατέρρευσαν άλλα δυο τόξα της έπειτα από αντίστοιχη δεύτερη νεροποντή που προκάλεσε πλημμύρες στο νησί.



Η Γέφυρα Λουτάνη μετά από τη δεύτερη κατάρρευση (28.1.2011)

Η κατάρρευση της γέφυρας Λουτάνη, ήταν ένα αποτέλεσμα μάλλον αναμενόμενο, εν πολλοίς απόρροια των εκτεταμένων αμμοληψιών που γίνονται από τον ποταμό.



Λουτάνης – Αποκάλυψη θεμελίων 1

Με κύριο αίτιο τις εκτεταμένες και σε μεγάλο βάθος αμμοληψίες από τον ποταμό, είχαν αποκαλυφθεί τα θεμέλια της γέφυρας και είχε διαβρωθεί σταδιακά το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα αυτή στην κυριολεξία να «αιωρείται» και βέβαια σαν φυσικό επακόλουθο ήταν να καταρρεύσει δυο φορές. Η ζημιά είναι μη αναστρέψιμη.



Λουτάνης – Αποκάλυψη θεμελίων 2

## 2. Γέφυρα ποταμού Μάκαρη, Ρόδος

Παρόμοια γέφυρα είναι και αυτή του παραπλήσιου ποταμού Μάκαρη, της ίδιας τεχνοτροπίας και της ίδιας εποχής η οποία έχει κηρυχθεί διατηρητέα από το ΥΠΠΟ. Και η γέφυρα του ποταμού αυτού (παρά το γεγονός ότι είχαν προηγηθεί εργασίες προστασίας των θεμελίων), μετά τη δεύτερη νεροποντή της 28ης Ιαν. 2011, υπέστη αρκετά σοβαρές ζημιές έπειτα από καθίζηση ενόςπέδλου θεμελίωσης από αντίστοιχη υποσκαφή του νερού. Σημειώνουμε ότι και από τον ποταμό αυτό γίνονται εκτεταμένες αμμοληψίες.



Γέφυρα Μάκαρη – Εργασίες προστασίας θεμελίων πριν την κατάρρευση



Γέφυρα Μάκαρη – Καθίζηση πέλδλου



Γέφυρα Μάκαρη – Ρωγμή στο οδόστρωμα

### 3. Γέφυρα ποταμού Γαδουρά, Ρόδος

Η γέφυρα αυτή είναι μεταγενέστερη (1973) και αποτελεί τμήμα της κύριας οδικής αρτηρίας του νησιού της Ρόδου, της εθνικής οδού Ρόδου – Λίνδου. Και σ' αυτή τη γέφυρα συμβαίνουν τα ίδια. Υπάρχει υποσκαφή πέλδλου θεμελίωσης και πρέπει

να ληφθούν άμεσα μέτρα για την αποκατάστασή του. Κύριο αίτιο και πάλι οι εκτεταμένες αμμοληψίες από τον ποταμό.



Γέφυρα Γαδουρά – εκτεταμένες αμμοληψίες



Γέφυρα Γαδουρά – Πέδιλο θεμελίωσης υποσκαπτόμενο



Γέφυρα Γαδουρά – λεπτομέρεια

#### 4. Πλατύς ποταμός – Φάνες, Ρόδος

Οι εκτεταμένες αμμοληφίες αλλοιώνουν την κοίτη των ποταμών με ανυπολόγιστες συνέπειες όχι μόνο στα υπερκείμενα τεχνικά έργα αλλά και στο ευρύτερο οικοσύστημα και βέβαια στη διάβρωση και εν γένει υποβάθμιση των παραλιών. Κλασικό παράδειγμα και ο Πλατύς ποταμός.



Πλατύς ποταμός – Προσέξτε το βάθος των αμμοληπιών σε σχέση με τον άνθρωπο



Πλατύς ποταμός

#### 5. Γέφυρα στον ποταμό Κομφάτο, Θράκη

Η υποχώρηση ενός από τα βάθρα φαίνεται είναι η αιτία κατάρρευσης της γέφυρας. Οι εκτεταμένες αμμοληφίες που έγιναν στο παρελθόν ίσως να έχουν σημαντικό μερίδιο σε αυτό που συνέβη.





Ποταμός Κομφάτος

## 6. Γέφυρα του Κερίτη στον Αλκιανό ποταμό, Κρήτη

Κατά τη διάρκεια σφοδρής κακοκαιρίας στη γέφυρα είχε διαπιστωθεί πρόβλημα καθώς είχε υποσκαφή το σημείο στο οποίο το προηγούμενο διάστημα είχαν γίνει παρεμβάσεις από τις αρμόδιες υπηρεσίες χωρίς όμως τελικά η γέφυρα να σωθεί.



Η Γέφυρα πριν την κατάρρευση



Η Γέφυρα μετά από τη κατάρρευση

## 7. Γέφυρα Βαλμάδας ή Ανατολικού στον Αξιό ποταμό, Θεσσαλονίκη

Η κατάρρευση προκλήθηκε λόγω της πίεσης των υδάτων στον Αξιό ποταμό από την απόθεση φερτών υλικών (κορμοί δέντρων κ.ά.)



Η Γέφυρα μετά από τη κατάρρευση

## 8. Γέφυρα Εθνική Οδού Αθηνών – Θεσσαλονίκης, Πλαταμώνας Πιερίας

Αίτιο της κατάρρευσης ήταν η υποσκαφή του εδάφους μέχρι στάθμης 1.00-2.00 μέτρων, βαθύτερα της στάθμης έδρασης της θεμελίωσης των βάθρων της, η παράσυρση και μεταφορά του εδάφους, το οποίο περίβαλε και επί του οποίου εδράζονταν τα θεμέλια. Εξαιτίας της υποσκαφής τα βάθρα υπέστησαν σημαντική καθίζηση και στροφή, με αποτέλεσμα οι φορείς οι οποίοι εδράζονταν ισοστατικά επάνω στα βάθρα, να καταρρεύσουν και να θραυστούν.



Η Γέφυρα μετά από τη κατάρρευση στο χείμαρρο Ζηλιάνα



Μετατόπιση μεσοβάθρου στο χείμαρρο Ζηλιάνα λόγω υποσκαφής

### 9. Γέφυρα Διάβας στον Πηνειό Ποταμό, Τρίκαλα

Η γέφυρα της Διάβας κατασκευάστηκε το 1982. Η Περιφέρεια Θεσσαλίας είχε παρέμβει τεχνικά στη κοίτη του Πηνειού ποταμού, στο συγκεκριμένο σημείο, προκειμένου να διαχέονται τα νερά στις πλευρές της, αλλά δυστυχώς η μεγάλη ποσότητα του νερού επέφερε το χειρότερο αποτέλεσμα, ρίχνοντας το κεντρικό πέλδιλο της γέφυρας.



Η Γέφυρα μετά από τη κατάρρευση



Μετατόπιση μεσοβάθρου λόγω υποσκαφής

## 10. Γέφυρα «Μπαλάνου», Μουζάκι Καρδίτσας

*Αύγουστος 2020*

«Στην έγκριση ανάθεσης της μελέτης κατασκευής νέας γέφυρας στη θέση «Μπαλάνου» του δήμου Μουζακίου προχώρησε ομόφωνα στη συνεδρίαση της 3ης Αυγούστου 2020 η Οικονομική Επιτροπή της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Η υπάρχουσα γέφυρα παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα στατικής ασφάλειας καθώς και ότι υπάρχει κίνδυνος αιφνίδιας κατάρρευσης. Σημειώνεται ότι από τη συγκεκριμένη γέφυρα καθημερινά διέρχονται εκατοντάδες οχήματα όλων των μεγεθών ειδικά αυτή την περίοδο που υπάρχουν αυξημένες μετακινήσεις από τα αστικά κέντρα στα χωριά της ανατολικής Αργιθέας αλλά και προσκυνητών στο μοναστήρι της Παναγίας Σπηλιάς. Το γεγονός ότι μετά από επιτόπια επίσκεψη ειδικών Επιστημόνων – Μηχανικών η ηλικίας 85 ετών και μήκους 60 μέτρων Γέφυρα Μπαλάνου παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα στατικής ασφάλειας και επομένως υφίσταται ανάγκη άμεσης εκπόνησης της αναφερομένης στο θέμα μελέτης. Ειδικότερα διαπιστώθηκε ότι το δεύτερο μεσόβαθρο (από Μουζάκι προς Αργιθέα) έχει υποστεί σημαντική υποσκαφή και έχει απωλέσει περίπου το 1/3 της επιφάνειας έδρασής του και μάλλον υπάρχει “ροή” κάτω από μέρος της επιφάνειας έδρασης με αυξημένες πιθανότητες ολίσθησης. Η εν λόγω υποσκαφή οδήγησε σε μετακίνηση της ανωδομής του δευτέρου ανοίγματος. Ως αποτέλεσμα αυτού μειώθηκε η επιφάνεια στήριξης της κύριας δοκού του δευτέρου ανοίγματος και προκλήθηκε θραύση τόσο τμήματος του άοπλου, πρώτου μεσόβαθρου, όσο και του άκρου της κύριας δοκού λόγω τοπικής σύνθλιψης. Τα εφάδρανα τις εποχής κατασκευής, μάλλον από μολύβι, κρέμονται στον αέρα. Μετρήθηκε υποχώρηση πρώτου και δεύτερου ανοίγματος στην θέση του στηθαίου, αριστερά 3,00 cm και δεξιά 10,50 cm. Λόγω των παραπάνω αιτιών η ανωδομή στηρίζεται ανεπαρκώς και υπάρχει κίνδυνος αιφνίδιας κατάρρευσης, είτε λόγω περαιτέρω υποσκαφής και ροής κάτω από την επιφάνεια έδρασης, είτε λόγω οριζοντίων φορτίων που ασκούνται στον φορέα του δεύτερου ανοίγματος από την πέδηση /επιτάχυνση οχημάτων, για την αποφυγή της υπάρχουσας ανισοσταθμείας, είτε λόγω ενδεχόμενου σεισμού. Με βάση τα προαναφερόμενα στοιχεία ελέγχου διαπιστώθηκε η ανάγκη άμεσης εκπόνησης των ανωτέρω μελετών για την κατασκευή νέας γέφυρας στη θέση αυτή.»

*Σεπτέμβριος 2020*

Κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας του μεσογειακού κυκλώνα με το όνομα «Ιανός» που έπληξε την ευρύτερη περιοχή της Καρδίτσας, η γέφυρα του «Μπαλάνου» κατέρρευσε.



Η κατάσταση της γέφυρας πριν την κατάρρευση (Αύγουστος 2020)



Η κατάρρευση της γέφυρας (Σεπτέμβριος 2020)

## 5.4 ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΥΠΟΣΚΑΦΗΣ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ

Τα βάθρα των γεφυρών πρέπει πάντοτε να διασφαλίζονται κατά της υποσκαφής παίρνοντας υπόψη την αναμενόμενη εξέλιξη του πυθμένα του ρεύματος στο μέλλον.

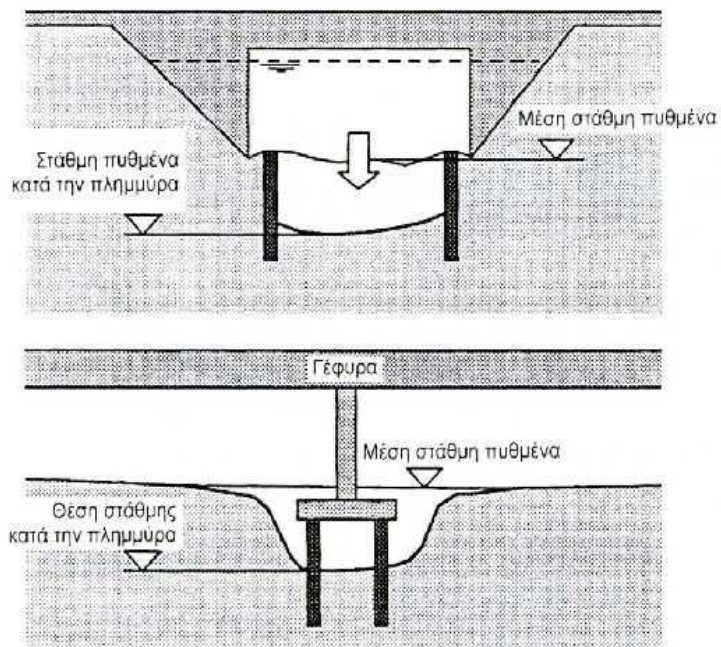
Για την προστασία των βάθρων από υποσκαφή χρησιμοποιούνται άκαμπτες και δύσκαμπτες μέθοδοι, ως εξής:

- Πάσσαλοι, τοιχώματα από πασσαλοσανίδες

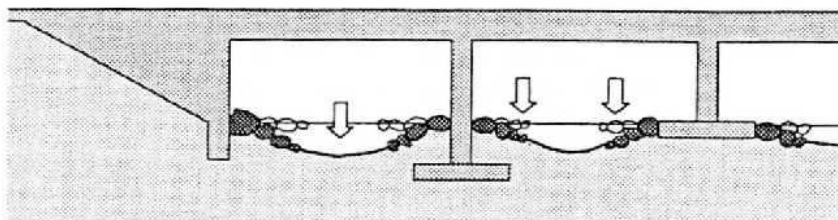
*(Επιμήκυνση της θεμελίωσης των βάθρων)*

- Λιθοτάπητες

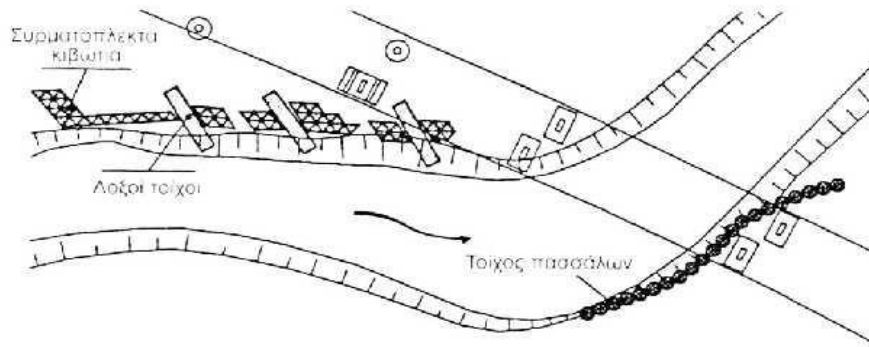
*(Προσαρμόζονται οι μεταβολές του πυθμένα και παρεμποδίζουν την υποσκαφή)*



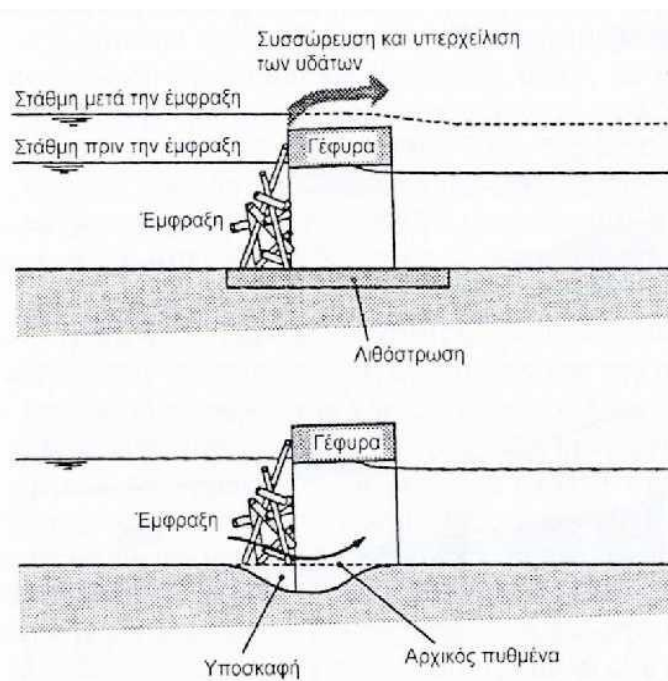
**Σχήμα 1:** Άκαμπτες μέθοδοι για την εξασφάλιση των βάθρων γεφυρών κατά της υποσκαφής



**Σχήμα 2:** Εύκαμπτες μέθοδοι προστασίας κατά της υποσκαφής βάθρων και τοίχων γέφυρας



**Σχήμα :** Προστασία πλευρικών υποσκαφών γέφυρας



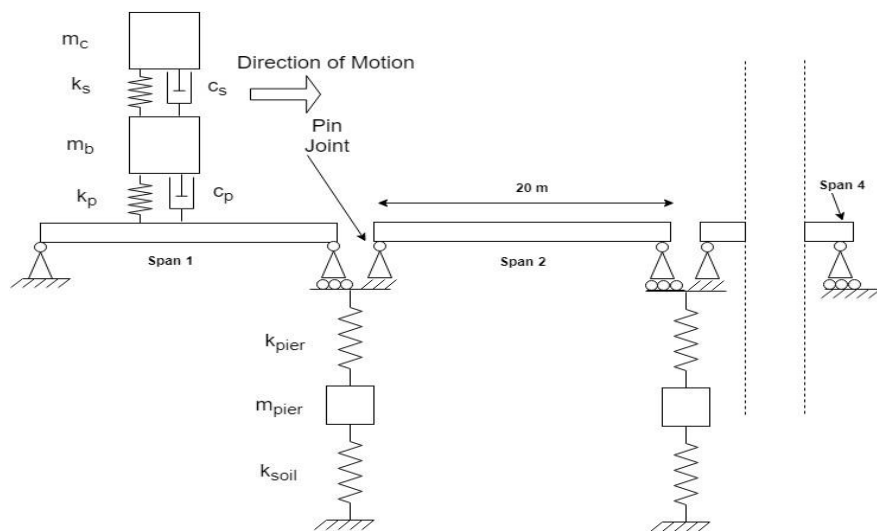
**Σχήμα :** Επιπτώσεις από την συσσώρευση κορμοτεμαχίων σε γέφυρα.

Στη περιοχή του πυθμένα θα πρέπει να εφαρμόζονται τα εξής:

- Επίχωση των κοιλοτήτων με βραχύδη θραυστά και λιθόδεμα.
- Αναβαθμοί για την μείωση της ταχύτητας ροής.
- Λιθόστρωτα με ανώμαλη επιφάνεια που αφενός θα μειώνουν την ταχύτητα ροής, αφετέρου θα προσαρμόζονται στο περιβάλλον.
- Διαμόρφωση αρμών που δεν θα επιτρέπουν την ανάπτυξη φυτών με ενίσχυση του υποστρώματος.
- Οι πλευρικές απολήξεις του πυθμένα (δεξιά και αριστερά) να έχουν το κατάλληλο στερεό εγκιβωτισμού, ώστε να μην υπάρχει πλευρική υποσκαφή.

## 5.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Το σχήμα που ακολουθεί αντιπροσωπεύει το δυναμικό μοντέλο αλληλεπίδρασης οχήματος / γέφυρας. Υπάρχουν τρία κύρια στοιχεία: το όχημα, η γέφυρα και οι στηρίξεις (που περιλαμβάνουν τις δυσκαμψίες που παρέχονται από τα θεμέλια). Και τα τρία στοιχεία του συστήματος είναι συνδεδεμένα. Απόσβεση τριών τοις εκατό προστίθεται επίσης στη γέφυρα και στη δομή στήριξης. Ένα μήκος προσέγγισης οχήματος 50 μέτρων περιλαμβάνεται στην αριθμητική ανάλυση για την αρνητική επίδραση του παροδικού οχήματος.



Σχήμα 5.1: Όχημα, γέφυρα και το σύστημα στήριξης/θεμελίωσης

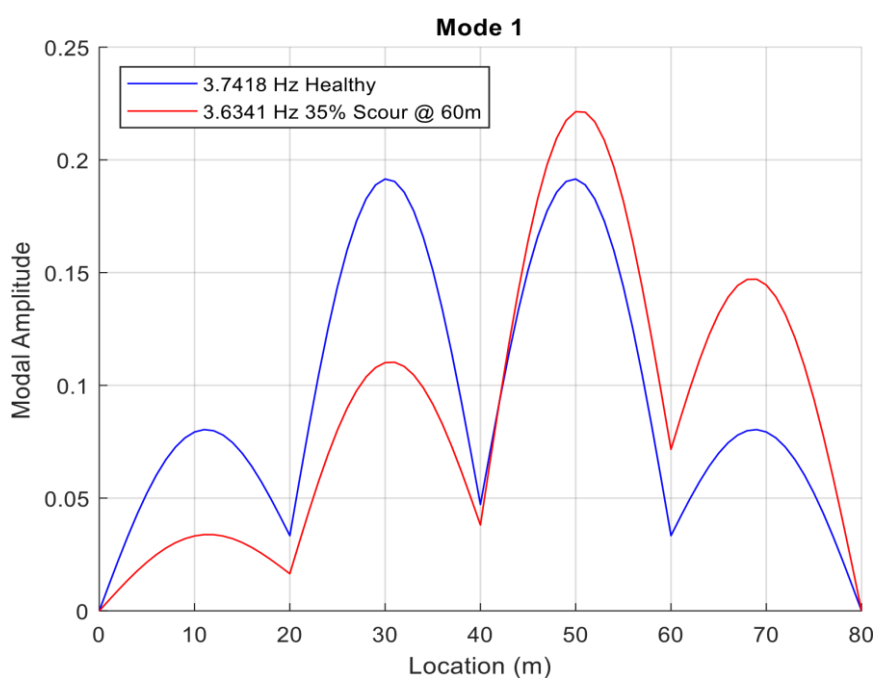
Το όχημα αυτής της μελέτης αντιπροσωπεύει μισή αμαξοστοιχία και μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας το εν τέταρτο ενός αυτοκινήτου δύο βαθμών ελευθερίας. Αναφερόμενοι στο Σχήμα 5.1, οι δύο μάζες αντιπροσωπεύουν ένα φορείο ( $m_b$ ) και το ήμισυ της μάζας του φορείου ( $m_c$ ). Η ακαμψία και η απόσβεση πρωτογενούς και δευτερεύουσας ανάρτησης αντιπροσωπεύονται αντίστοιχα από  $k_p$ ,  $c_p$ ,  $k_s$  και  $c_s$ . Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται στον Πίνακα παρακάτω. Επιλέγονται βάσει ενός πλήρους μοντέλου μεταφοράς που παρουσιάζεται από τους Quirke et al. Οι συχνότητες αναπήδησης μεταφοράς και φορείου είναι 0,8 Hz και 6,32 Hz αντίστοιχα.

Property	Value	Unit
$m_c$	23,900	kg
$m_b$	3,500	kg
$k_p$	4.8	MN/m
$c_p$	40	kNs/m
$k_s$	700	kN/m
$c_s$	40	kNs/m



Η γέφυρα έχει μήκος 80 μέτρα και αποτελείται από τέσσερα ανοίγματα 20 μέτρων, το καθένα διαμορφωμένο ως δοκός. Τα ανοίγματα υποστηρίζονται απλά και έχουν βάθος και πλάτος 1 μέτρο και 4 μέτρα αντίστοιχα. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται είκοσι του 1 μέτρου στοιχεία. Ο συντελεστής και η πυκνότητα κάθε δοκού επιλέγονται να είναι  $0,33 \text{ m}^4$ ,  $35 \times 10^9 \text{ N / m}^2$  και  $2400 \text{ kg / m}^3$  αντίστοιχα. Η γέφυρα έχει τρία βάθρα με διαστάσεις 7 μέτρα (ύψος), 2,5 μέτρα (βάθος) και 1 μέτρο (πλάτος) αντίστοιχα. Η αρχή και το τέλος της γέφυρας αυτής της μελέτης υποτίθεται ότι είναι σε πακτωμένα στηρίγματα και στερεώνονται με μια άρθρωση στο βάθρο. Η πυκνότητα των βάθρων είναι ίδια με τη γέφυρα, κάνοντας τη μάζα κάθε βάθρου ίση με  $42.000 \text{ kg}$ . Η τιμή του ελατηρίου κάτω από κάθε βάθρο επιλέγεται να είναι  $344 \text{ MN / m}$ . Αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη ακαμψία που παρέχεται από ένα πέλμα βάσης μήκους και πλάτους 4 μέτρων και 2 μέτρων αντίστοιχα και βασίζεται στη θεωρία Adhikary et al.

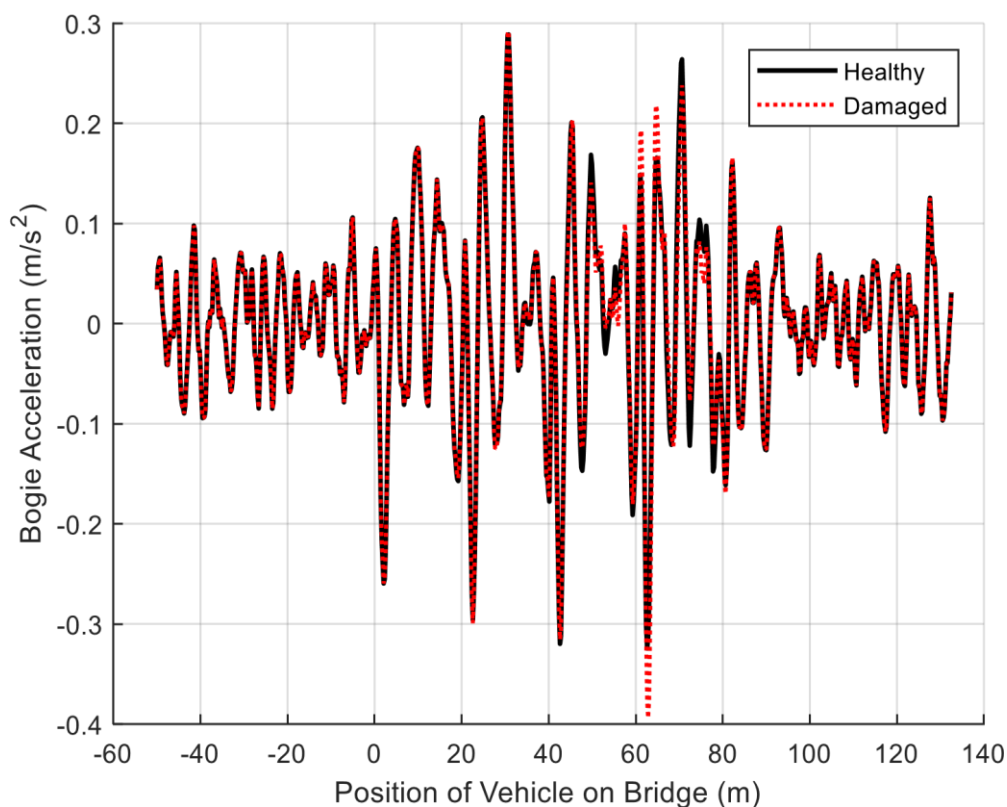
Σε αυτό το σημείο η υποσκαφή αντιπροσωπεύεται ως απώλεια δυσκαμψίας στην τιμή του  $k_{\text{soil}}$  κάτω από τον 3<sup>ο</sup> πάσσαλο, δηλαδή, κάτω από ένα σημείο 60 μέτρα από την αρχή της γέφυρας μήκους 80 μέτρων. Το Σχήμα 5.2 δείχνει πώς αλλάζει η πρώτη μορφή λειτουργίας της πλήρους δομής του Σχήματος 5.1 (εκτός του οχήματος) με ζημιά. Το σχήμα της λειτουργίας έχει αλλάξει σημαντικά λόγω της υποσκαφής. Είναι σαφές ότι στις θέσεις των βάθρων (20 m, 40 m και 60 m από την αρχή), η υποσκαφή έχει σημαντική επίδραση, ιδιαίτερα στο εν λόγω βάθρο (δηλ. στο σημείο των 60 μέτρων).



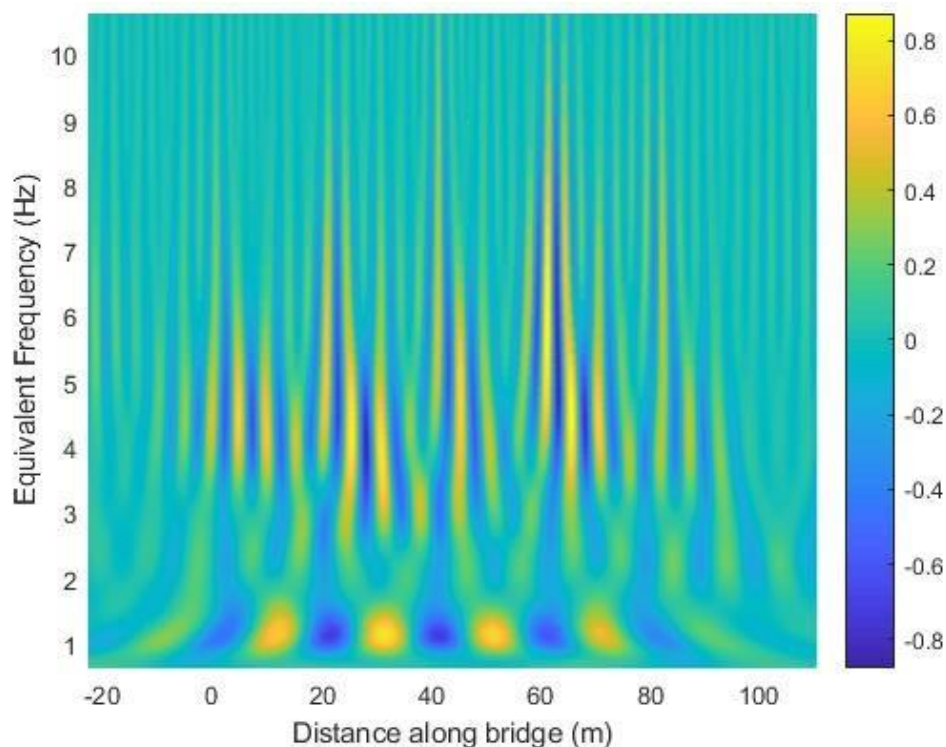
Σχήμα 5.2: Γέφυρα/ Στήριξη/ Θεμελίωση- πρώτη ιδιομορφή (εκτροπή καταστρώματος)

Εν κατακλείδι, η υποσκαφή αντιπροσωπεύεται ως απώλεια ακαμψίας εδάφους,  $K_{soil}$ , 35% κάτω από το βάθρο στο σημείο 60 m στη γέφυρα. Το Σχήμα 5.3 δείχνει τα υγιή και κατεστραμμένα σήματα επιτάχυνσης του βαθμού ελευθερίας μάζας φορείου για ταχύτητα διέλευσης 80 km/hr. Για λόγους σαφήνειας, το σήμα επιτάχυνσης απεικονίζεται στη θέση του οχήματος στη γέφυρα.

Από το Σχήμα 5.3, είναι σαφές ότι όταν το όχημα περνάει από το βάθρο που εμφανίζει υποσκαφή, υπάρχει μια αλλαγή στην επιτάχυνσή του. Οι διαφορές οφείλονται κυρίως όταν το όχημα κινείται στον κλάδο πριν και μετά το βάθρο που έχει υποστεί ζημιά, με τις μέγιστες διαφορές αμέσως μετά το όχημα να έχει διασχίσει την κατεστραμμένο βάθρο. Το σχήμα 5.4 δείχνει τις τιμές των συντελεστών για το σήμα επιτάχυνσης από μια διέλευση της κατεστραμμένης γέφυρας. Δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ανωμαλιών από τις ίδιες τις τιμές των συντελεστών κύματος. Ωστόσο, όταν η διαδικασία πραγματοποιείται τόσο για ένα υγιές όσο και για ένα κατεστραμμένο σήμα επιτάχυνσης, και οι συντελεστές αφαιρούνται, οι διαφορές έχουν μεγαλύτερα μεγέθη γύρω από τη θέση της βλάβης. Το σχήμα 5.4 δείχνει τις διαφορές στους συντελεστές κύματος.



Σχήμα 5.3: Η επιτάχυνση σε σχέση με την απόσταση κατά μήκος της γέφυρας



Σχήμα 5.4: Συντελεστές κύματος για κατεστραμμένο σήμα επιτάχυνσης

## 5.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΥΠΟΣΚΑΦΗ

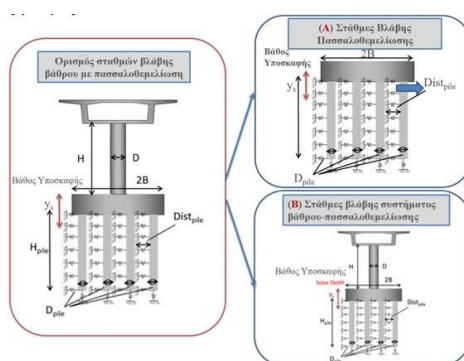
Για τον προσδιορισμό της σεισμικής τρωτότητας γεφυρών Ο/Σ έχει προταθεί από τους συγγραφείς μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται υπόψη όλες οι δυνάμεις κρίσιμες συνιστώσες, ήτοι τα μεσόβαθρα, τα εφέδρανα και τα ακρόβαθρα. Υπολογίζεται αρχικά η διαθέσιμη αντίσταση σε όρους επιλεγμένης παραμέτρου βλάβης λαμβάνοντας υπόψη τις εξατομικευμένες ιδιότητες της κρίσιμης συνιστώσας (για παράδειγμα για τα βάθρα λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική γεωμετρία, όπλιση, φόρτιση, κτλ.), στη συνέχεια η σεισμική απαίτηση στα σημεία ελέγχου και τέλος χαράσσεται η καμπύλη τρωτότητας, η οποία εκφράζει την πιθανότητα η σεισμική απαίτηση να είναι μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη αντίσταση για διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης. Η προαναφερθείσα μεθοδολογία προτείνει εξατομικευμένο προσδιορισμό τιμών κατωφλίων σταθμών βλάβης με βάση τις ιδιότητες της κάθε συνιστώσας καθώς και κλειστές σχέσεις για τον υπολογισμό τους. Ωστόσο, δεν συνεκτιμά τις βλάβες στη θεμελίωση, κάνοντας τη θεώρηση ότι έπονται των βλαβών στα βάθρα.

Η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό καμπυλών σεισμικής τρωτότητας γεφυρών λαμβάνει υπόψη την υποσκαφή των βάθρων από πλημμύρα που προηγήθηκε του σεισμού. Καθώς η υποσκαφή των βάθρων έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της

στάθμης θεμελίωσης, είναι πολύ πιθανό να παρουσιαστούν σημαντικές βλάβες στη θεμελίωση (π.χ. ανελαστική συμπεριφορά/βλάβες στους πασσάλους) πριν από την εμφάνιση της αντίστοιχης στάθμης βλάβης των βάθρων. Για το λόγο αυτόν προτείνεται τροποποίηση/επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ώστε να λαμβάνονται υπόψη ενδεχόμενες βλάβες στο σύστημα βάθρο-πασσαλοθεμελίωση, ο ποιοτικός και ποσοτικός ορισμός αυτών και ο προσδιορισμός τιμών κατωφλίου λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη ανελαστικής συμπεριφοράς και στη θεμελίωση. Είναι σαφές ότι η υποσκαφή έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση τμήματος εδάφους θεμελίωσης (το οποίο συνήθως είναι από 1 έως 5m), αποκαλύπτοντας τον κεφαλόδεσμο και τμήμα των πασσάλων, η λειτουργία των οποίων σαφώς αλλάζει καθώς παύουν να είναι σε επαφή με το έδαφος. Το βάθος της υποσκαφής, συνδέεται με το μέγεθος της πλημμυρικής παροχής, ενώ με τη συνεκτίμηση του βάθους υποσκαφής μεταβάλλεται τόσο η διαθέσιμη αντίσταση των βάθρων, η οποία υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα ανελαστικής στατικής ανάλυσης, όσο και η σεισμική απαίτηση, η οποία υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα ανάλυσης ιστορικού της απόκρισης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης αντίστασης και της σεισμικής απαίτησης του συστήματος βάθρο-πασσαλοθεμελίωση είναι η εξής:

### **A) Υπολογισμός διαθέσιμης αντίστασης βάθρων λαμβάνοντας υπόψη βλάβες στη θεμελίωση**

Για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης αντίστασης των μεσοβάθρων η μεθοδολογία που προτείνεται από τους συγγραφείς βασίζεται στα αποτελέσματα ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Οι τιμές κατωφλίου σταθμών βλάβης ορίζονται χρησιμοποιώντας καθολική παράμετρο (μετακίνηση σημείου ελέγχου), ενώ συσχετίζονται με τις τοπικές παραμέτρους βλάβης άμεσα, μέσω των αποτελεσμάτων ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, αντιστοιχίζονται οι μετακινήσεις στο σημείο ελέγχου (κορυφή μεσοβάθρου) με τις αναπτυσσόμενες καμπυλότητες κρίσιμων διατομών στις πιθανές θέσεις πλαστικών αρθρώσεων και με ποιοτικά ορισμένες βλάβες.

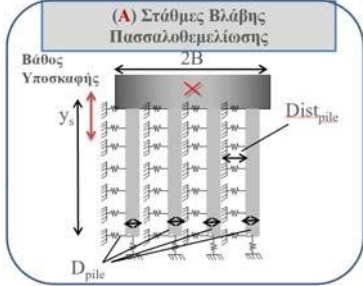
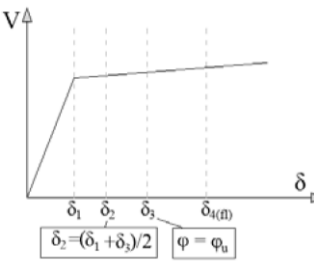



**Εικόνα 5.1: Ορισμός βλαβών στο σύστημα βάθρο-πασσαλοθεμελίωση: Ανελαστική στατική ανάλυση υποσυστήματος πασσαλοθεμελίωσης (A) και βάθρου-πασσαλοθεμελίωσης (B).**

Αντίστοιχα, με στόχο να ληφθούν υπόψη πιθανές βλάβες στη θεμελίωση και το ενδεχόμενο να πραγματοποιηθούν πριν τις βλάβες στα βάθρα λόγω υποσκαφής, προτείνεται η διενέργεια δύο ανελαστικών στατικών αναλύσεων σε επιμέρους ανελαστικά προσομοιώματα του συστήματος βάθρο-πασσαλοθεμελίωση για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης αντίστασης, η σύγκριση με τη σεισμική απαίτηση και η θεώρηση του δυσμενέστερου αποτελέσματος για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης βλάβης του συστήματος για διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης. Συγκεκριμένα, προτείνεται η πραγματοποίηση ανελαστικής στατικής ανάλυσης στο ανελαστικό προσομοίωμα της θεμελίωσης ομάδας πασσάλων (Σχήμα 2 (Α)) για τον ορισμό των τιμών κατωφλίου σταθμών βλάβης σε όρους μετακίνησης σημείου ελέγχου θεμελίωσης και στη συνέχεια ανελαστική στατική ανάλυση στο συνολικό ανελαστικό προσομοίωμα βάθρου-θεμελίωσης (Σχήμα 2 (Β)) για τον προσδιορισμό των τιμών κατωφλίου σε όρους μετακίνησης σημείου ελέγχου της ανωδομής (κεφαλή βάθρου). Ουσιαστικά από το πρώτο προσομοίωμα προσδιορίζονται ποσοτικά οι βλάβες στο σύστημα της θεμελίωσης σε όρους μετακινήσεων και από το δεύτερο οι βλάβες στο βάθρο, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαμορφώνεται αρχικά το προσομοίωμα της θεμελίωσης με τον κεφαλόδεσμο και την ομάδα πασσάλων, προσομοιώνοντας την ανελαστική συμπεριφορά των πασσάλων με πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των γραμμικών στοιχείων (μήκους 1~1,5m), όπως προτείνεται από τους Karros & Sextos. Το έδαφος προσομοιώνεται με ελατήρια (τριβής και οριζόντια), ενώ στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη η υποσκαφή αφαιρούνται τα ελατήρια που προσομοιώνουν την αντίσταση του εδάφους στο βάθος υποσκαφής. Ο ορισμός των σταθμών βλάβης του υποσυστήματος της πασσαλοθεμελίωσης δεν είναι αυτονόητος, και η θεώρηση ότι η διαρροή (ή η 'αστοχία') ενός μεμονωμένου πασσάλου συνεπάγεται μικρές ή σημαντικές βλάβες στο σύστημα της θεμελίωσης είναι, εν γένει, συντηρητική.

Για το λόγο αυτόν προτείνεται η χάραξη της καμπύλης αντίστασης (pushover curve) και ο ορισμός των τιμών κατωφλίου σταθμών βλάβης του συστήματος με βάση την καμπύλη, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1. Συγκεκριμένα προτείνεται η πρώτη στάθμη βλάβης να ορίζεται από τη μετακίνηση διαρροής ( $\delta_{0y}$ ) και η τελευταία από τη μετακίνηση αστοχίας ( $\delta_{0u}$ ) της διγραμμικοποιημένης καμπύλης, η τρίτη από τη μετακίνηση που αντιστοιχεί στην αστοχία του πρώτου πασσάλου και η δεύτερη να προκύπτει ως ενδιάμεση τιμή μεταξύ των  $\delta_{01}$  και  $\delta_{03}$ .

Προσομοίωμα	Ορισμός σταθμών βλάβης	
		<p><b>Σ.Β. 1:</b> Μικρές Βλάβες  <math>\delta_{\theta 1} : \delta_{\theta y}</math></p> <p><b>Σ.Β. 2 :</b> Μεσαίες Βλάβες  <math>\delta_{\theta 2} : (\delta_{\theta 1} + \delta_{\theta 3})/2</math></p> <p><b>Σ.Β. 3:</b> Εκτεταμένες Βλάβες  <math>\delta_{\theta 3} : \varphi = \varphi_u</math></p> <p><b>Σ.Β. 4 :</b> Σημαντικές Βλάβες  <math>\delta_{\theta 4} : \delta_{\theta u}</math></p>
	<p><b>ΣΒ 1 – Μικρές βλάβες</b></p> <p><b>ΣΒ 2 – Μεσαίες βλάβες</b></p> <p><b>ΣΒ 3 – Εκτεταμένες βλάβες</b></p> <p><b>ΣΒ 4 – Αστοχία</b></p>	<p><math>\varphi_1: \varphi_y</math></p> <p><math>\varphi_2: \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi: \varepsilon_c \leq 0.004 \\ \varphi: \varepsilon_s \geq 0.015 \end{array} \right\}</math></p> <p><math>\varphi_3: \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi: \varepsilon_c \leq 0.004 + 1.4 \cdot \rho_w \cdot \frac{f_{yw}}{f_{cc}} \\ \varphi: \varepsilon_s \geq 0.06 \end{array} \right\}</math></p> <p><math>\varphi_4: \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi: M_{rec} &lt; 0.90M_{max} \\ \varphi: \varepsilon_s \geq 0.075 \end{array} \right\}</math></p>
<p><math>\delta_{B1-4} :</math></p>		

**Πίνακας 5.1: Ορισμός σταθμών βλάβης στην πασσαλοθεμελίωση και στο μεσόβαθρο.**

Ο ορισμός των ΣΒ για το μεσόβαθρο καθαυτό γίνεται με βάση το προσομοίωμα του συστήματος μεσόβαθρο-πασσαλοθεμελίωση, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η ανάπτυξη ανελαστικής συμπεριφοράς τόσο στο βάθρο όσο και στους πασσάλους, θεωρώντας σημειακές πλαστικές αρθρώσεις. Με βάση τα αποτελέσματα ανελαστικής στατικής ανάλυσης και τη μεθοδολογία που αναφέρεται στην, ορίζονται οι τιμές κατωφλίου σε όρους μετακινήσεων του σημείου ελέγχου (κεφαλή βάθρου) και συσχετίζονται με τις τοπικές παραμέτρους βλάβης του μεσοβάθρου με βάση τον Πίνακα 5.2.

Βιβλιογραφική Αναφορά	Καμπύλες τρωτότητας σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης (multi-hazard fragility curves)			Κρίσιμες συνιστώσες
	Σεισμός	Πλημμύρες (υποσκαφή)	Περιβάλλον (διάβρωση)	
Ganesh Prasad & Banerjee [2]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Μεσόβαθρα
Alipour, Shafei, & Shinozuka [3]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Μεσόβαθρα
Yilmaz, Banerjee, & Johnson [4]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Όλες
Wang, Padgett, & Dueñas-Osorio [5]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Μεσόβαθρα - Θεμελίωση
Gehl & D'Ayala [6]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Όλες
Wang, Song, & Li [7]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Μεσόβαθρα - Πάσσαλοι
Dong, Frangopol, & Saydam [1]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Μεσόβαθρα
Ghosh & Padgett [8]	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	Όλες
Simon, Bracci, & Gardoni [9]	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	Μεσόβαθρα

Chandrashekar & Banerjee [10]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Μεσόβαθρα
----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--	-----------

Πίνακας 5.2: Διαθέσιμες μέθοδοι στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό καμπυλών τρωτότητας γεφυρών σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης.

### ***B) Υπολογισμός σεισμικής απαίτησης βάθρων με και χωρίς υποσκαφή***

Για τον υπολογισμό της σεισμικής απαίτησης στην περίπτωση υποσκαφής της θεμελίωσης είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η αύξηση του ελεύθερου ύψους των πασσάλων στο προσομοίωμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση των αναλύσεων. Πραγματοποιείται δυναμική ανελαστική ανάλυση ιστορικού της απόκρισης στο συνολικό ανελαστικό προσομοίωμα βάθρων-πασσαλοθεμελίωσης, στο οποίο θεωρούνται σημειακές πλαστικές αρθρώσεις στη βάση των βάθρων και στους πασσάλους, αφαιρώντας τα ελατήρια εδάφους στις θέσεις όπου λαμβάνεται υπόψη η υποσκαφή. Για τον υπολογισμό των σεισμικών μετακινήσεων στα σημεία ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί η λεπτομερής ή η προσεγγιστική μέθοδος, επιλέγοντας επιταχυνσιογραφήματα, κλιμακούμενα σε διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης.

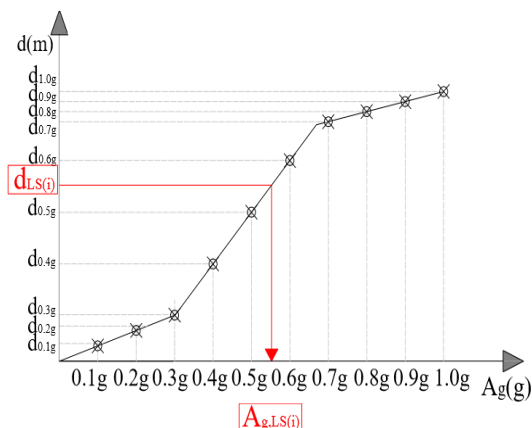
Από τις ανελαστικές αναλύσεις υπολογίζονται οι μετακινήσεις στα δύο σημεία ελέγχου, ήτοι στο σημείο ελέγχου της θεμελίωσης (κέντρο κεφαλόδεσμου) και του βάθρου (κεφαλή βάθρου), οι οποίες συγκρίνονται με τις τιμές κατωφλίου σταθμών βλάβης. Συνεπώς, η σεισμική απαίτηση που υπολογίζεται από τη δυναμική ανάλυση ιστορικού της απόκρισης στα δύο σημεία ελέγχου, ελέγχεται με τη διαθέσιμη αντίσταση που έχει προκύψει από ανάλυση των δύο επιμέρους συστημάτων, ήτοι της πασσαλοθεμελίωσης (λαμβάνοντας υπόψη βλάβες θεμελίωσης) και του συστήματος μεσόβαθρο-πασσαλοθεμελίωση (λαμβάνοντας υπόψη βλάβες στο μεσόβαθρο). Για τον ορισμό της βλάβης του συστήματος και την υπέρβαση της τιμής κατωφλίου της κάθε στάθμης βλάβης, λαμβάνεται υπόψη η ασθενέστερη συνιστώσα, μεσόβαθρο ή θεμελίωση, ελέγχοντας την υπέρβαση της διαθέσιμης αντίστασης σε κάθε στάθμη σεισμικής έντασης.

### ***Γ) Χάραξη καμπυλών σεισμικής τρωτότητας βάθρων με και χωρίς υποσκαφή***

Για τη χάραξη καμπυλών σεισμικής τρωτότητας του συστήματος βάθρο-πασσαλοθεμελίωση, υπολογίζεται η σεισμική απαίτηση για διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης, η οποία συγκρίνεται με τη διαθέσιμη αντίσταση. Ακολουθείται η προσεγγιστική μεθοδολογία, για τον προσδιορισμό μέσης τιμής με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων, προσδιορίζεται η επιτάχυνση  $A_{g,LS(i)}$  σύμφωνα με το Σχήμα 3, γίνεται θεώρηση λογαριθμοκανονικής κατανομής και τυπικής απόκλισης

(αβεβαιότητες) περίπου ίσης με 0.6 και χαράσσονται οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας με ή χωρίς τη θεώρηση υποσκαφής βάθρων, σύμφωνα με τη Σχέση (1).

$$P_f = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{tot,LS(i)}} \times \ln \left( \frac{A_{g,m}}{A_{g,LS(i)}} \right) \right] \quad (1)$$



Εικόνα 5.2: Υπολογισμός μέσης τιμής για την κάθε στάθμη βλάβης.

Σημειώνεται ότι οι καμπύλες τρωτότητας του συστήματος, προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη την τρωτότητα του βάθρου και της θεμελίωσης με ομάδα πασσάλων, θεωρώντας τα δύο υποσυστήματα συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ τόσο για τον υπολογισμό της διαθέσιμης αντίστασης όσο και της σεισμικής απαίτησης, λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της θεμελίωσης καθώς και του βάθους υποσκαφής, αφαιρώντας τα εδαφικά ελατήρια, όπως περιγράφηκε λεπτομερώς παραπάνω.

## 5.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΜΕΣΟΒΑΘΡΑ ΓΕΦΥΡΩΝ

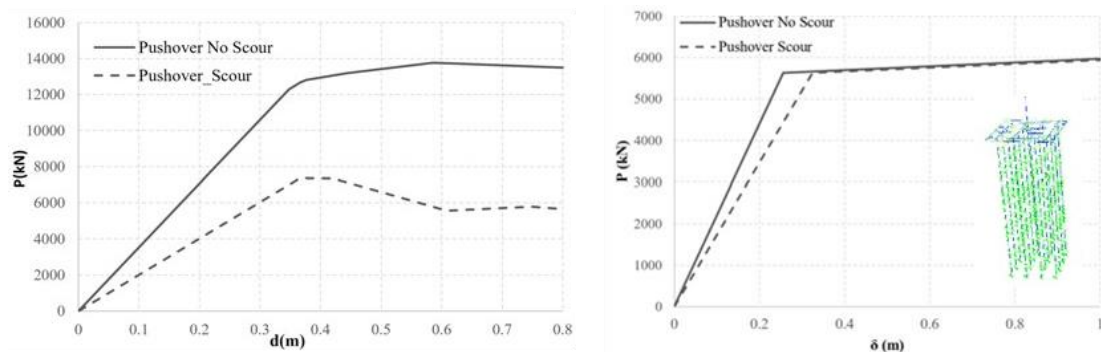
Η μεθοδολογία, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης αντίστασης, σεισμικής απαίτησης, και τελικώς της σεισμικής τρωτότητας μεσοβάθρου υφιστάμενης γέφυρας θεμελιωμένου με ομάδα πασσάλων με και χωρίς τη θεώρηση υποσκαφής στη θεμελίωση. Η πασσαλοθεμελίωση σχεδιάστηκε για έδαφος κατηγορίας D (σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 8) και αποτελείται από κεφαλόδεσμο διαστάσεων 12.0x12.0 (m) και διάταξη πασσάλων 4x4 με μήκος 25m και διάμετρο  $D=1m$ . Τα ελατήρια υπολογίστηκαν για έδαφος τύπου D, ενώ σημειώνεται ότι στην ανάλυση τρωτότητας και την κλιμάκωση της σεισμικής επιτάχυνσης από 0.1 έως 1g, θεωρήθηκε μείωση του μέτρου διάτμησης του εδάφους G και τροποποιήθηκαν τα ελατήρια για να ληφθεί υπόψη η ανελαστική συμπεριφορά. Το μεσόβαθρο της γέφυρας είναι κυλινδρικό με ύψος 5m, διάμετρο  $D=2.0m$  και ποσοστό διαμήκους οπλισμού 1%.



Για να ληφθεί υπόψη η περίπτωση πλημμύρας που προκαλεί υποσκαφή των βάθρων, αφαιρούνται τα ελατήρια με τα οποία προσομοιώνεται η αντίσταση του εδάφους στο βάθος της υποσκαφής. Στη συγκεκριμένη γέφυρα θεωρήθηκε βάθος υποσκαφής θεμελίωσης 2m και παρουσιάζεται η διαθέσιμη αντίσταση με βάση τα αποτελέσματα ανελαστικής στατικής ανάλυσης καθώς και η χάραξη καμπυλών τρωτότητας με βάση τα αποτελέσματα ανάλυσης ιστορικού της απόκρισης για τις περιπτώσεις με και χωρίς υποσκαφή.

#### **A) Υπολογισμός διαθέσιμης αντίστασης με και χωρίς υποσκαφή**

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3, η καμπύλη διαθέσιμης αντίστασης της πασσαλοθεμελίωσης, όπως αυτή προκύπτει από τις δυνάμεις και μετακινήσεις του σημείου ελέγχου (κέντρο κεφαλοδέσμου), διαφοροποιείται κυρίως στην αντοχή καθώς και στην τιμή της μετακίνησης διαρροής, στην περίπτωση υποσκαφής. Η πτώση στην αντοχή είναι αναμενόμενη καθώς η πλαστικοποίηση των πασσάλων συμβαίνει νωρίτερα, ενώ ο φορέας στην περίπτωση υποσκαφής είναι εμφανώς πιο εύκαμπτος. Η επιρροή της υποσκαφής στην καμπύλη αντίστασης του συστήματος βάθρο-θεμελίωση, όπως αυτή προκύπτει από τις δυνάμεις και μετακινήσεις του σημείου ελέγχου (κεφαλή μεσοβάθρου), είναι εμφανής (Εικόνα 5.3) καταλήγοντας σε μείωση της δυσκαμψίας λόγω αφαίρεσης των εδαφικών ελατηρίων, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ελεύθερου ύψους πασσάλων.

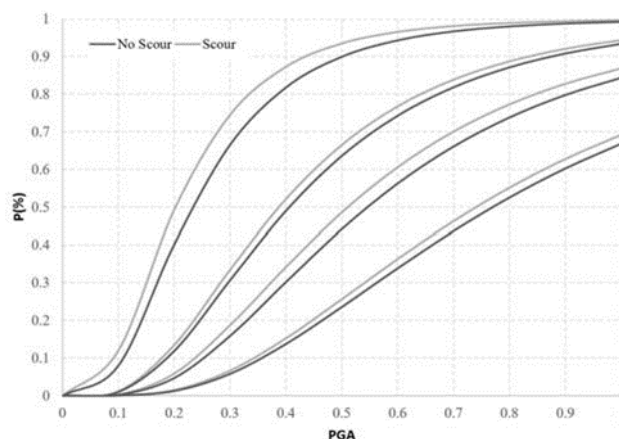


**Εικόνα 5.3: Καμπύλη αντίστασης ανελαστικού προσομοιώματος πασσαλοθεμελίωσης (αριστερά) με και χωρίς υποσκαφή και μεσοβάθρου (δεξιά) με και χωρίς υποσκαφή.**

#### **B) Καμπύλες σεισμικής τρωτότητας με και χωρίς υποσκαφή**

Για τον υπολογισμό των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας με και χωρίς υποσκαφή πραγματοποιείται δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα του συστήματος βάθρο-πασσαλοθεμελίωση, για τα επιταχυνσιογραφήματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Με βάση την οποία υπολογίζονται

οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας με και χωρίς υποσκαφή και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.4.



**Εικόνα 5.4:** Καμπύλες σεισμικής τρωτότητας βάρου για όλες τις στάθμες βλάβης με και χωρίς τη θεώρηση υποσκαφής.

Είναι εμφανές ότι η υποσκαφή της θεμελίωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σεισμικής τρωτότητας σε όλες τις στάθμες βλάβης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί, ότι η κρίσιμη συνιστώσα στο υπό μελέτη σύστημα μεσοβάθρου-πασσαλοθεμελίωσης είναι το βάθρο, το οποίο διαρρέει πρώτο. Συνεπώς, η δύναμη που μεταφέρεται στη συνέχεια στη θεμελίωση είναι σχεδόν σταθερή με αποτέλεσμα οι βλάβες στη θεμελίωση να εμφανίζονται πολύ αργότερα. Η επιρροή της υποσκαφής στη σεισμική τρωτότητα αναμένεται σημαντικότερη, στην περίπτωση συστήματος, η κρίσιμη συνιστώσα του οποίου είναι η θεμελίωση.

## 5.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της σεισμικής τρωτότητας με και χωρίς υποσκαφή (τρωτότητα σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης) είναι τα εξής:

- Η επιρροή της υποσκαφής στη διαθέσιμη αντίσταση είναι σημαντική, καταλήγοντας σε σημαντική μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας τόσο της πασσαλοθεμελίωσης όσο και του συνολικού συστήματος μεσόβαθρο-πασσαλοθεμελίωση.
- Η υποσκαφή της θεμελίωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σεισμικής τρωτότητας σε όλες τις στάθμες βλάβης.
- Η αξιολόγηση της επιρροής της υποσκαφής στην τρωτότητα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την κρίσιμη συνιστώσα για το σύστημα βάθρο-πασσαλοθεμελίωση. Στην περίπτωση όπου το βάθρο διαρρέει πριν από τη διαρροή του συστήματος πασσαλοθεμελίωσης τότε η δύναμη που μεταφέρεται στη θεμελίωση

είναι σχεδόν σταθερή και οι βλάβες στη θεμελίωση μπορεί να εμφανιστούν αργότερα. Παραμένει προς διερεύνηση εάν και καταπόσον καλά σχεδιασμένες θεμελιώσεις βάθρων γεφυρών μπορεί όντως να αποτελέσουν κρίσιμη συνιστώσα στην ανάλυση της σεισμικής τρωτότητας ή τα βάθρα είναι πάντοτε κρίσιμότερα.

- Η επιρροή της υποσκαφής στη σεισμική τρωτότητα αναμένεται σημαντικότερη, στην περίπτωση όπου κρίσιμη συνιστώσα είναι η θεμελίωση.



Γέφυρας η οποία είχε καταρρεύσει επί του Αχελώου ποταμού, και επί της οδού που συνδέει το Γκολφάρι Μυροφύλλου με την Εθνική οδό Τρικάλων – Άρτας, λόγω υποσκαφής των βάθρων της, κατά την πλημμύρα του Νοεμβρίου του 2010.

## 6. ΕΠΙΤΑΚΤΗ ΑΝΑΓΚΗ ΣΥΝΤΑΞΗΣ ΜΗΤΡΩΟΥ ΓΕΦΥΡΩΝ

Βλέποντας όλα τα παραπάνω που έχουν αναφερθεί φαίνεται επιτακτική η ανάγκη σύνταξης μητρώου γεφυρών για το οποίο γίνεται ιδιαίτερος λόγος τον τελευταίο καιρό. Θολό τοπίο, εν έτει 2020, παραμένει τόσο ο αριθμός, όσο και η συντήρηση των γεφυρών στην Ελλάδα. Κατά τις εκτιμήσεις, ανέρχονται στις 17.000, εκ των οποίων οι 3.000 περιλαμβάνονται στις νέες εθνικές οδούς. Σύμφωνα με τα όσα προκύπτουν από μελέτες, οι γέφυρες που μελετήθηκαν πριν από το 1982 φαίνεται να υπολογίστηκαν για αρκετά χαμηλότερα φορτία, ενώ αυτές που σχεδιάστηκαν πριν από το 1961 δεν είχαν σαφές κανονιστικό πλαίσιο. «Οι αντισεισμικές προβλέψεις πριν από το 1985 ήταν τουλάχιστον φτωχές, ενώ ακόμη και οι συστάσεις του 1993 θεωρούνται πλέον τεχνολογικά ξεπερασμένες.

Πρακτικά, οι γέφυρες οι οποίες μελετήθηκαν πριν από το 1982 και παρουσιάζουν μη σεισμικές βλάβες ή φθορές ή αυξημένα φορτία λειτουργίας, θα έπρεπε ήδη να αναβαθμίζονται. Ακόμη και οι πιο σύγχρονες γέφυρες (που μελετήθηκαν μετά το 1982 αλλά πριν από το 1993) και παρουσιάζουν σεισμικές βλάβες ή αυξημένα φορτία

λειτουργίας, θα έπρεπε να ελέγχονται ή να παρακολουθούνται τακτικότερα από τις νεότερες κατασκευές» αναφέρουν χαρακτηριστικά στην μελέτη. Έτσι, η ανάγκη για συντήρηση και αναβάθμιση των γεφυρών, ώστε να ανταποκρίνονται στα νέα αυξημένα φορτία κυκλοφορίας και τις ιδιαίτερες σύγχρονες σεισμικές απαιτήσεις, καθίσταται επιτακτική. Σήμερα, παραμένει άγνωστος ο ακριβής αριθμός των γεφυρών της χώρας, ωστόσο λόγω της κατασκευής των πολύ μεγάλων αυτοκινητοδρόμων τις τελευταίες δεκαετίες από ιδιωτικές κοινοπραξίες – οι οποίες είχαν μεταξύ άλλων την εκπόνηση μελετών για το ελληνικό δίκτυο ως κομμάτι του έργου που είχαν αναλάβει – υπάρχει μια κατά προσέγγιση εκτίμηση.

Ειδικότερα, οι νέες εθνικοί οδοί περιλαμβάνουν περίπου 3.000 γέφυρες μήκους άνω των 6 μέτρων (οι μισές εκ των οποίων είναι καινούργιες, ενώ οι υπόλοιπες ήταν προϋπάρχουσες), ενώ περίπου άλλες τόσες υπολογίζεται ότι βρίσκονται στις παλιές εθνικές οδούς και το επαρχιακό δίκτυο. Αν συμπεριληφθούν και μικρότερες γέφυρες (π.χ. μήκους 2 μέτρων και άνω), ο συνολικός αριθμός των γεφυρών στην Ελλάδα εκτιμάται γύρω στις 17.000. Με δεδομένο όμως ότι αρκετοί κύριοι οδικοί άξονες στην Ελλάδα κατασκευάστηκαν στις δεκαετίες του '50 και του '80, αφενός δηλαδή φτιάχτηκαν με πολύ διαφορετικές προδιαγραφές από αυτές που ισχύουν σήμερα και αφετέρου, ότι κάποιες από αυτές πλησιάζουν το τέλος της θεωρητικής τους ζωής καθώς δεν συντηρούνται ούτε αναβαθμίζονται τακτικά, το πρόβλημα φαίνεται να λαμβάνει τεράστιες διαστάσεις.

Παρά το γεγονός ότι σαν ιδέα υπάρχει εδώ και χρόνια η δημιουργία ενός Εθνικού Μητρώου Γεφυρών, ωστόσο δεν έχει προχωρήσει. Σύμφωνα με τους ειδικούς, ένα τέτοιο εργαλείο θα πρέπει να περιλαμβάνει τα πλήρη στοιχεία κάθε γέφυρας, από την ημερομηνία και τη μέθοδο κατασκευής μέχρι τα υλικά, τον όγκο διερχόμενων οχημάτων, τη σεισμικότητα της περιοχής και τυχόν επισκευές ή εργασίες συντήρησης έχουν συμβεί στο παρελθόν. Παράλληλα, πρέπει να εμπεριέχει και μια ενημερωμένη βαθμολόγηση της κατάστασης της κάθε γέφυρας, ώστε το Μητρώο να μην είναι μια απλή καταγραφή των γεφυρών αλλά ένα εργαλείο με το οποίο αρμόδιοι θα μπορούν να προσδιορίζουν προτεραιότητες. Θα πρέπει στο σχέδιο λοιπόν αυτό να περιλαμβάνονται και τα εξής:

- Τακτικά προγράμματα επιθεώρησης ιδίως παλαιότερων γεφυρών που δεν μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις σημερινές δράσεις και τα σύγχρονα πρότυπα.

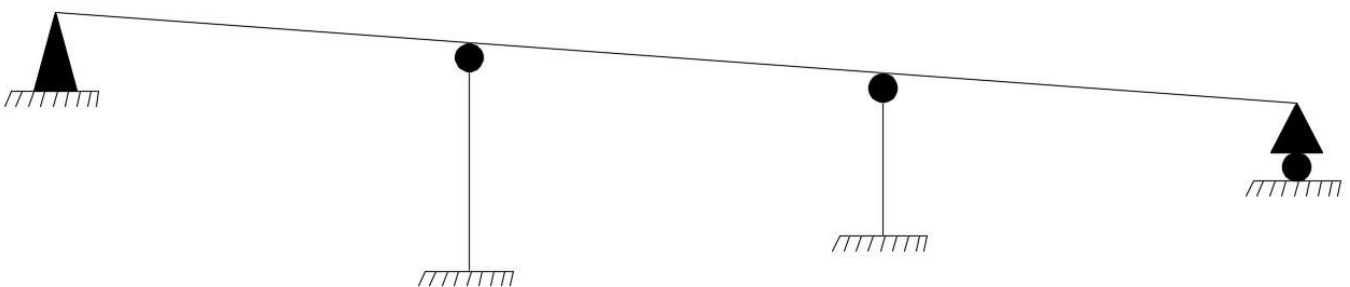
- Καταχώρηση ορίων φορτίων και ταχύτητας σε δομικά ανεπαρκείς και/ή λειτουργικά ξεπερασμένες γέφυρες.
- Ολοκληρωμένα προγράμματα για τη συντήρηση αλλά και για την ιεράρχηση και την επαρκή χρηματοδότηση της αντικατάστασης λειτουργικά παρωχημένων και ευάλωτων γεφυρών.

## 7. ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΦΥΡΑΣ

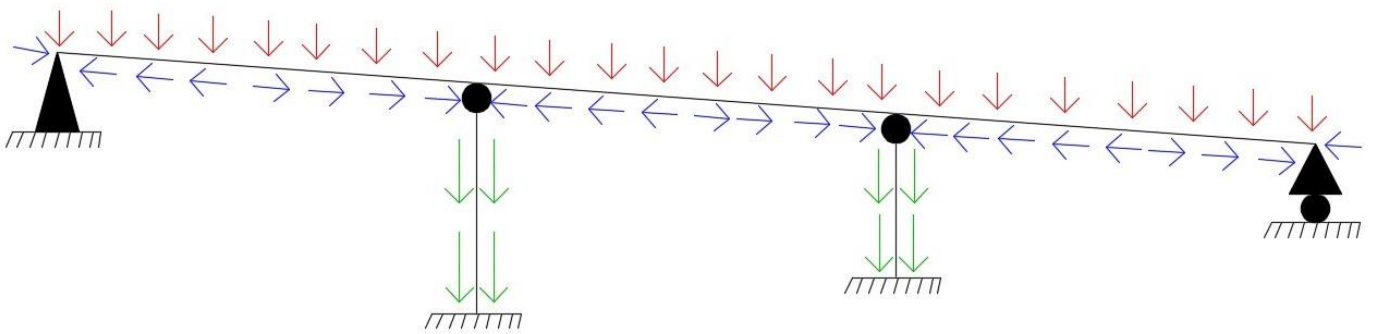
Τα βασικά στοιχεία της γέφυρας αυτής είναι τα εξής :

- Σύμφωνα με τη μορφή της σε κάτοψη αποτελεί **ορθή** γέφυρα.
- Σύμφωνα με το υλικό της είναι κατασκευασμένη από **σκυρόδεμα**.
- Σύμφωνα με τη χρήση της αποτελεί **οδική** γέφυρα.
- Σύμφωνα με τη στατική της λειτουργία διακρίνεται σε **αμφιέριστη**.
- Έγινε κατασκευή με τη **μέθοδο της σταδιακής προώθησης**.
- Έχει κλίση 6,56%.
- Το μήκος της ανέρχεται στα 285,00 μέτρα, με πλάτος 12,00 μέτρα.
- Αποτελείται από 3 ανοίγματα (2 ακρόβαθρα και 2 μεσόβαθρα).
- Το άνοιγμα μεταξύ των βάθρων της είναι 95,00 μέτρα
- Αριστερά και δεξιά της γέφυρα υπάρχουν οι πλάκες πρόσβασης μήκους 0,30 μέτρων.
- Επιπλέον και αρμός συστολής-διαστολής.

Το στατικό προσομοίωμα της γέφυρας είναι το εξής :



- Στη συνέχεια τοποθετούνται τα φορτία και παρουσιάζεται ο τρόπος ανάληψης τους από την ανωδομή. Συγκεκριμένα τα κατακόρυφα ( ίδια βάρη, κινητά, μόνιμα ) αναλαμβάνει το κατάστρωμα ( διακρίνονται με το κόκκινο χρώμα), ενώ τα οριζόντια ( άνεμος, σεισμός ) αναλαμβάνουν τα εφέδρανα ( διακρίνονται με το μπλε χρώμα ), και στη συνέχεια το σύνολο αυτών μεταφέρεται μέσω των βάθρων στη θεμελίωση ( διακρίνονται με το πράσινο χρώμα ) και από εκεί στο έδαφος.

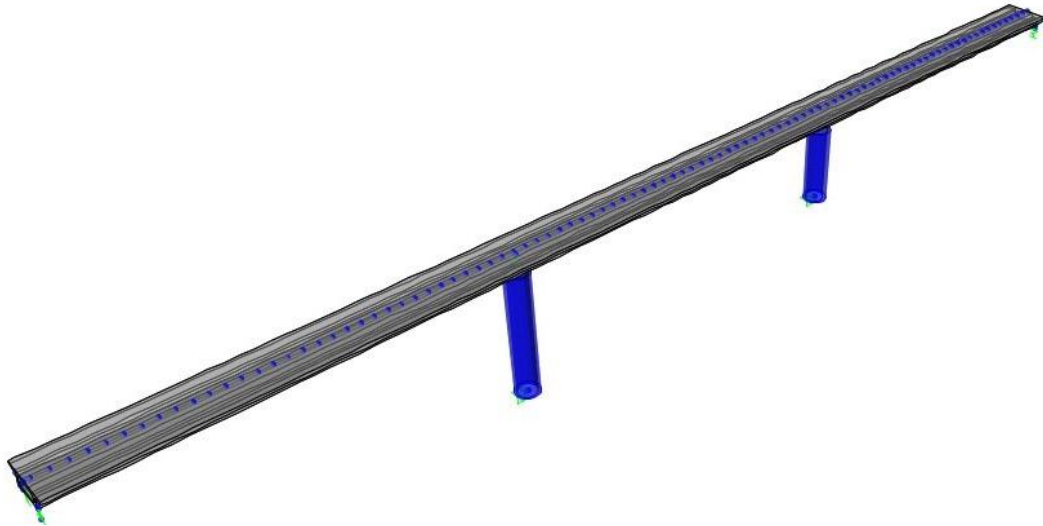


Σε αυτό το σημείο θα γίνει προδιαστασιολόγηση των διατομών των στοιχείων :

- Καταρχάς θα χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα C50/57, δομικός χάλυβας S355 και χάλυβας οπλισμού B500.
- Ελαστομεταλλικά εφεδρανα διαστάσεων (700x750x200)mm.
- Για τη κατασκευή θα χρησιμοποιηθούν 10 σπόνδυλοι μήκους 28 μέτρων και απλή κιβωτοειδής διατομή με τις δυο πάνω-κάτω επιφάνειές της να είναι (12,00-6,80) μέτρα, ύψος 3,35 μέτρα και τέλος πλάκα καταστρώματος 0,15 μέτρα.
- Τα βάθρα έχουν κυκλική διατομή με διάμετρο 6,00 μέτρων και πάχος 1,50 μέτρο.
- Το μέγιστο ύψος πυλώνα είναι αυτό του M1 σε ύψος 27,00 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους.
- Η θεμελίωση γίνεται σε πασσάλους.
- Τα πέδιλα έχουν διαστάσεις 11x11x3,50 μέτρα και αποτελούνται από 9 φρεατοπάσσαλους διατομής 2,00 μέτρων και μήκους 15,00 μέτρων.

✦ Για την επίλυση του Φορέα χρησιμοποιήθηκε το στατικό πρόγραμμα για γέφυρες CSiBridge 2016, ενώ στη συνέχεια παραθέτονται τα 2D και 3D προσομοιώματα της.





Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι υπολογισμοί για την εύρεση όλων των φορτίων που ασκούνται στη γέφυρα:

α) Το φορτίο λόγω ιδίου βάρους της κατασκευής :

$$A = 14.9 \text{ m}^2$$

$$V = A \times L = 14.9 \text{ m}^2 \times 285 \text{ m} = 4246.5 \text{ m}^3$$

$$q_{i,\beta} = B/L = (\gamma_{σκ} \times A \times L) / L = \gamma_{σκ} \times A = 25 \text{ kN/m}^3 \times 14.9 \text{ m}^2 = \underline{\underline{372.5 \text{ kN/m}}}$$

β) Το φορτίο λόγω των πρόσθετων -> Οδοστρωσία

$$A = 0.15 \text{ m} \times 12 \text{ m} = 1.8 \text{ m}^2$$

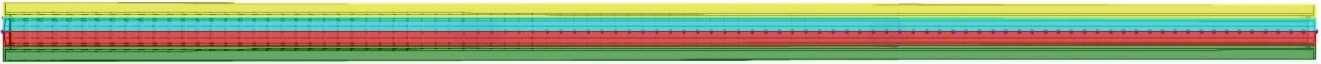
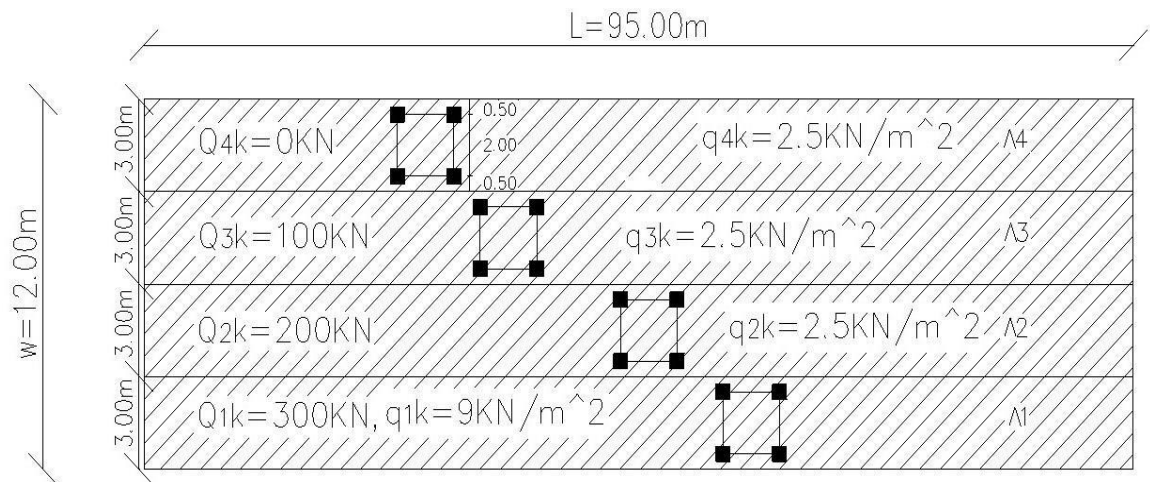
$$V = A \times L = 1.8 \text{ m}^2 \times 285 \text{ m} = 513 \text{ m}^3$$

$$q_{\text{προσθ.}} = \gamma_{σκ} \times A = 18 \text{ kN/m}^3 \times 1.8 \text{ m}^2 = \underline{\underline{32.4 \text{ kN/m}}}$$

**Η τιμή που θα πάρουμε για να καλύψουμε και τα στηθαία ασφαλείας είναι 35 kN/m.**

γ) Τα κατακόρυφα φορτία στη γέφυρα σύμφωνα με το Φορτιστικό Μοντέλο 1 του Ευροκώδικα 1:

- Το πλάτος καταστρώματος είναι  $w = 12,00$  μέτρα.
- Άρα είμαστε στη κατηγορία  $[ 6\mu \leq w ]$ .
- Για τη περίπτωση μας που  $[ 12\mu \leq w \leq 5\mu ]$  ο αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας είναι  $n_1 = 4$ .
- Το πλάτος της συμβατικής λωρίδας κυκλοφορίας είναι:  $w_1 = 3\mu$ .
- Το πλάτος της απομένουσας επιφάνειας  $[ w - 3 \times n_1 ]$  είναι:  $w_r = 0$ .
- Είμαστε στη περίπτωση που το οδόστρωμα υποδιαιρείται σε δυο τμήματα μέσω στηθαίων ασφαλείας τα οποία είναι προσωρινά.
- Μας ενδιαφέρει να δούμε τους ελέγχους σε οριακή κατάσταση αστοχίας και οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.



δ) Το φορτίο λόγω του ανέμου:

$$\rho_{\text{αέρα}} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$v_b = 33 \text{ m/s}$$

(η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα ορίζεται σε 33 m/s για τα νησιά και τα παράλια μέχρι 10 km από την ακτή και σε 27 m/s για την υπόλοιπη χώρα.)

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \text{ kg/m}^3 \times (33 \text{ m/s})^2 = 680.625 \text{ N/m}^2$$

$$\leq \underline{\underline{0.68 \text{ kN/m}^2}}$$

ε) Το φορτίο λόγω του χιονιού:

Ζώνη I ( $s_{k,o} = 0.4 \text{ kN/m}^2$ ) -> Νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας.

Ζώνη II ( $s_{k,o} = 0.8 \text{ kN/m}^2$ ) -> Υπόλοιπη χώρα.

Ζώνη III ( $s_{k,o} = 1.7 \text{ kN/m}^2$ ) -> Νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, Σποράδες και Εύβοια.

- όπου  $s_{k,o}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας (δηλ.  $A=0$ ), σε  $\text{kN/m}^2$ .
- $A$  είναι το υψόμετρο της συγκεκριμένης τοποθεσίας από τη στάθμη της θάλασσας, σε  $m$ .
- $M_i$  είναι ο συντελεστής μορφής χιονιού, υπολογιζόμενος κατά περίπτωση.



- $S_k$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου επί του εδάφους.
- $C_e$  είναι ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος σε κανονικές συνθήκες λαμβάνεται ίσος με 0. Συνιστώμενες τιμές για i) έκθεση σε ισχυρούς ανέμους  $C_e=0.8$  ii) κατασκευές προστατευόμενες (από κτίρια και δένδρα)  $C_e=1.2$ .
- $C_t$  είναι ο θερμικός συντελεστής, ο οποίος είναι συνήθως ίσος με 1 για κανονικές συνθήκες θερμικής μόνωσης της στέγης. Μπορεί να επιτρέπονται μικρότερες τιμές, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή της απώλειας θερμότητας μέσω της στέγης.

Στη περίπτωση μας  $A=300m$ .

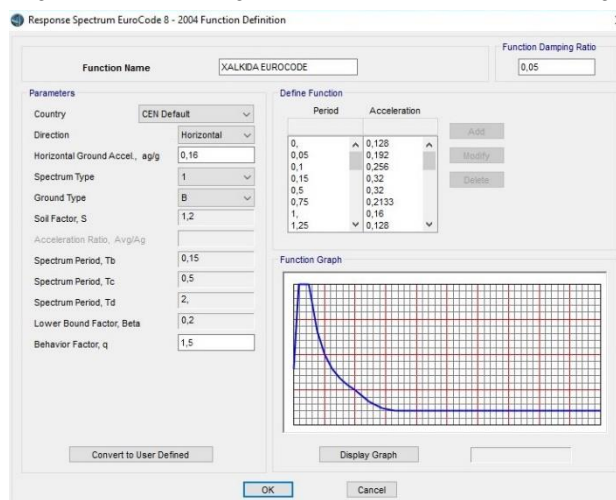
$$S_k = S_{k,o} \times [1 + (A/917)^2] = 1.7 \text{ kN/m}^2 \times [1 + (300/917)^2] = 1.88 \text{ kN/m}^2$$

$$S = M_i \times C_e \times C_t \times S_k = 1 \times 1.2 \times 1 \times 1.88 \text{ kN/m}^2 = \underline{\underline{2.256 \text{ kN/m}^2}}$$

**στ)** Το φορτίο λόγω του σεισμού:

Για να υπολογίσουμε τη τιμή του σεισμού στη κατασκευή εισάγουμε το φάσμα απόκρισης του στο πρόγραμμα δίνοντας του τα βασικά στοιχεία όπως φαίνονται παρακάτω:

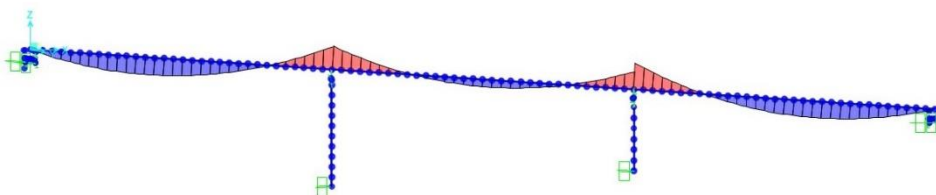
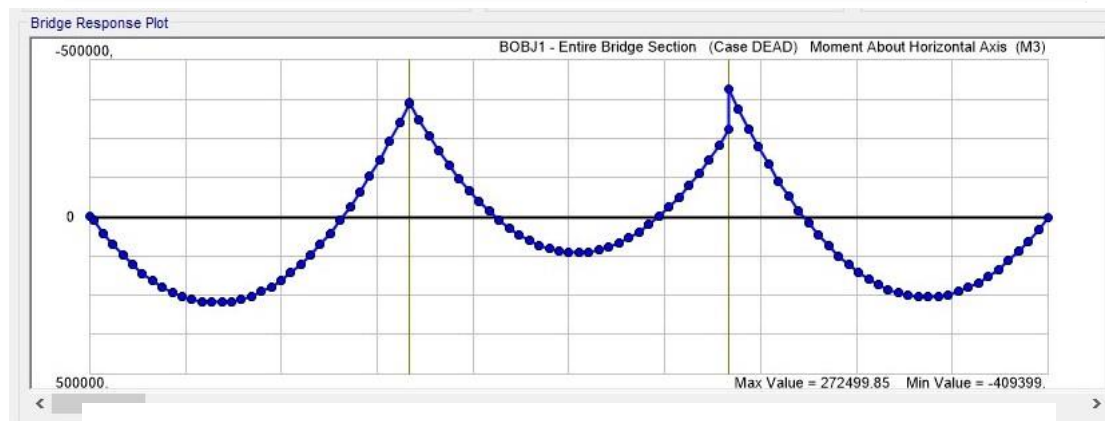
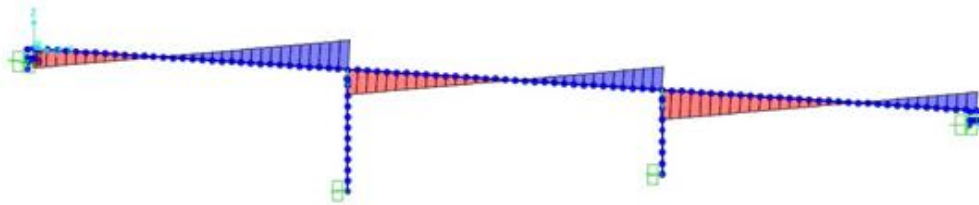
- Η Νότια Εύβοια βρίσκεται στη Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1(I), όπου  $a_{gR}/g = 0.16$ .
- Παίρνουμε το ελαστικό φάσμα **απόκρισης τύπου I**, για σεισμούς μεγέθους  $M_s > 5.5$ .
- Έχουμε **Κατηγορία Εδάφους B** με στρωματογραφία που αποτελείται από αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλικιών, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.
- Επίσης ο συντελεστής συμπεριφοράς που παίρνουμε για γέφυρες είναι  **$q=1.5$** .



Αφού προστέθηκαν όλα τα δεδομένα στο πρόγραμμα και έγινε η στατική επίλυση του φορέα προέκυψαν τα παρακάτω εντατικά μεγέθη των **Τεμνουσών(V)** [ $V_2$  κατακόρυφα -  $V_3$  οριζόντια] και **Ροπών(M)** [ $M_2$  οριζόντια -  $M_3$  κατακόρυφα] για κάθε μια φόρτιση ξεχωριστά :

Έστω οι στηρίξεις **A**(5), **B**(326), **Γ**(314), **Δ**(10) στις θέσεις 0, 95, 190, 285 αντίστοιχα, οι αντιδράσεις τους λόγω των μόνιμων φορτίων φαίνονται κι αυτές ως εξής :

**α) Για τα μόνιμα φορτία (ίδια βάρη + πρόσθετα) :**



Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	5		
	1	2	3
Force	9225,185	2,116	48,223
Moment	0,	0,	0,

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	326		
	1	2	3
Force	57458,225	-5,014	-11,053
Moment	0,	353,709	-160,432

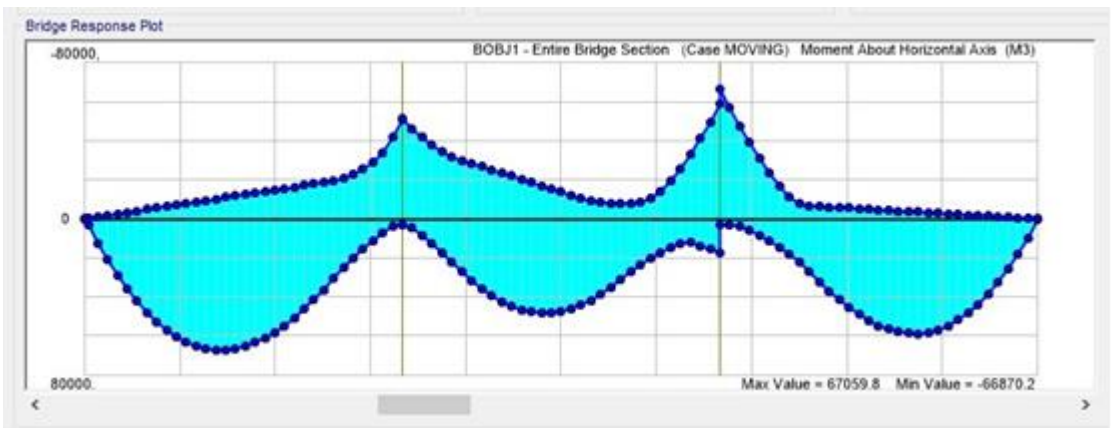
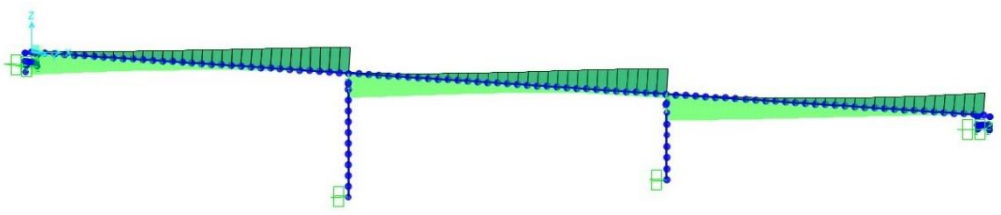
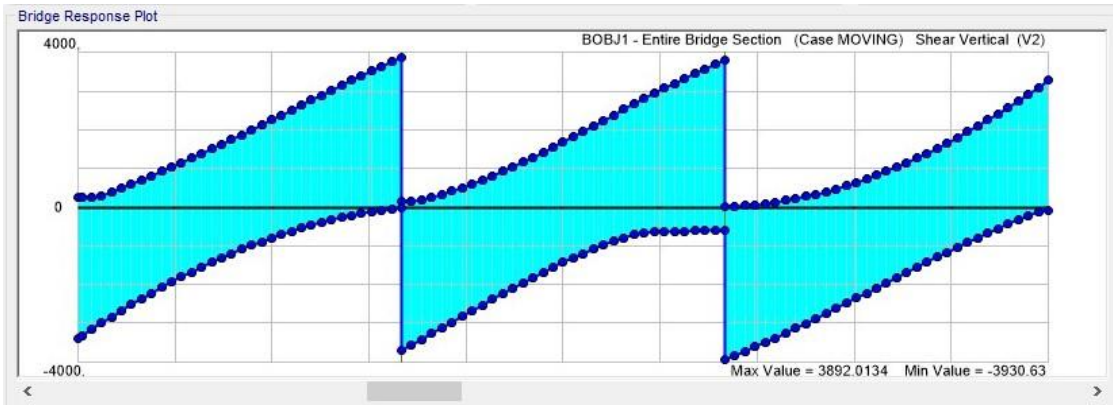
Joint Reactions in Joint Local CoordSys

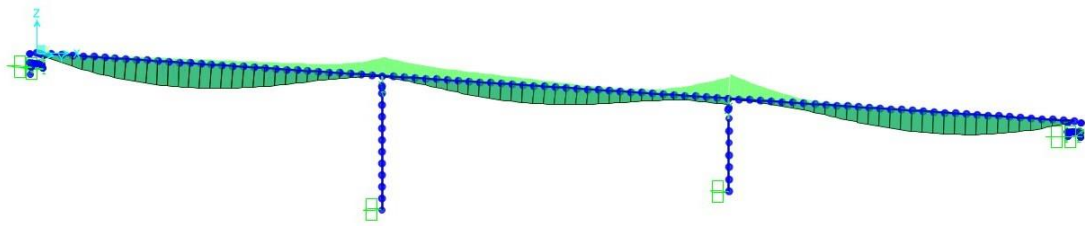
Joint Object	314		
	1	2	3
Force	50158,329	-3,461	28,474
Moment	-674,78	125011,03	27578,333

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	10		
	1	2	3
Force	7319,383	1,064	-81,004
Moment	0,	0,	0,

**β) Για τα *κινητά* φορτία :**





Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	Joint Element		
	5	5	5
	1	2	3
Force	2795,636	1,027	8,08
Moment	0,	0,	0,

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	Joint Element		
	326	326	326
	1	2	3
Force	5478,151	-2,851	-9,448
Moment	0,	302,348	-91,236

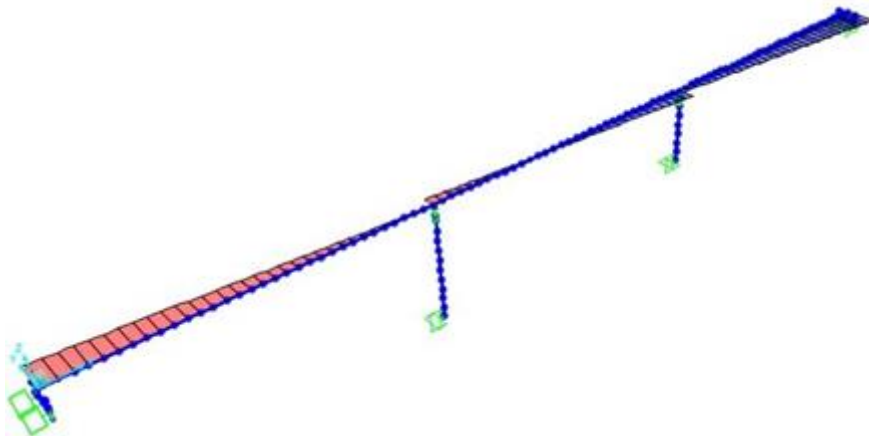
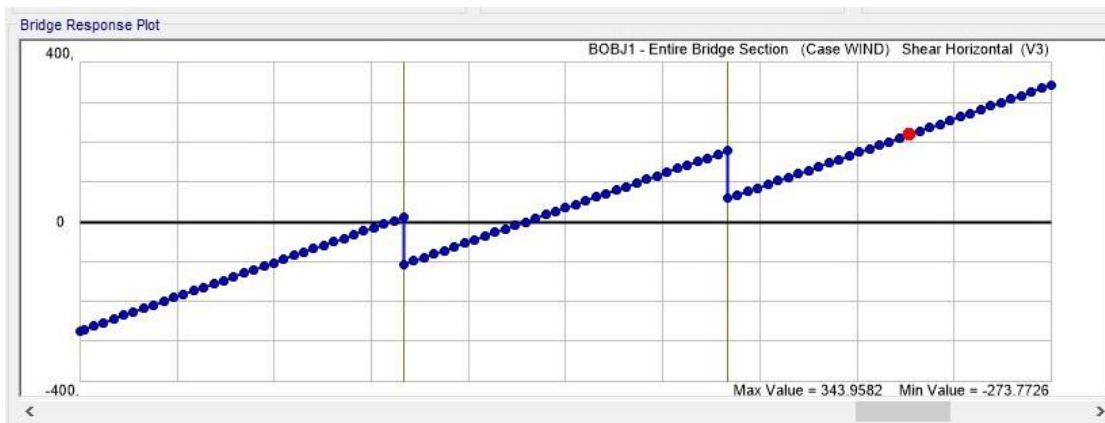
Joint Reactions in Joint Local CoordSys

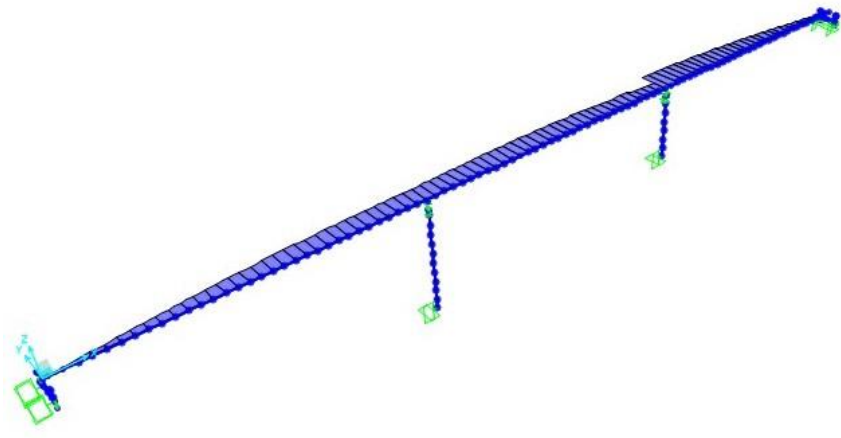
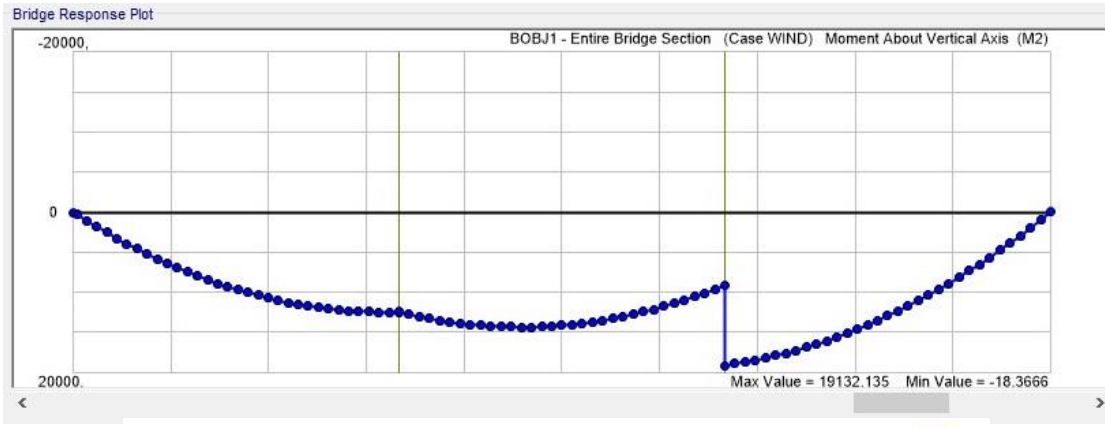
Joint Object	Joint Element		
	314	314	314
	1	2	3
Force	5553,046	-1,656	12,32
Moment	-323,495	56639,438	12126,86

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	Joint Element		
	10	10	10
	1	2	3
Force	2188,442	0,461	-13,939
Moment	0,	0,	0,

**γ) Για τα φορτία λόγω ανέμου :**





Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	5	Joint Element	5	
	1	2	3	
Force	216,336	91,258	1,255	
Moment	0,	0,	0,	

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	326	Joint Element	326	
	1	2	3	
Force	-0,176	119,447	3,938E-02	
Moment	0,	-1,26	3822,312	

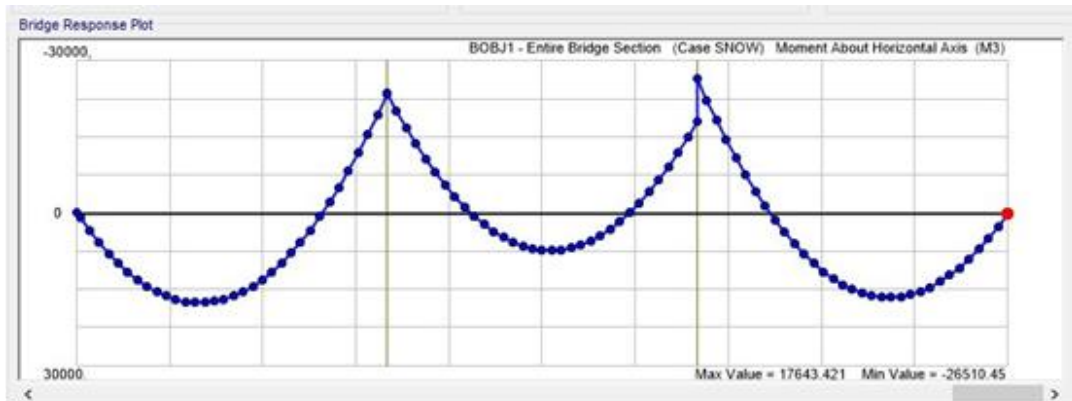
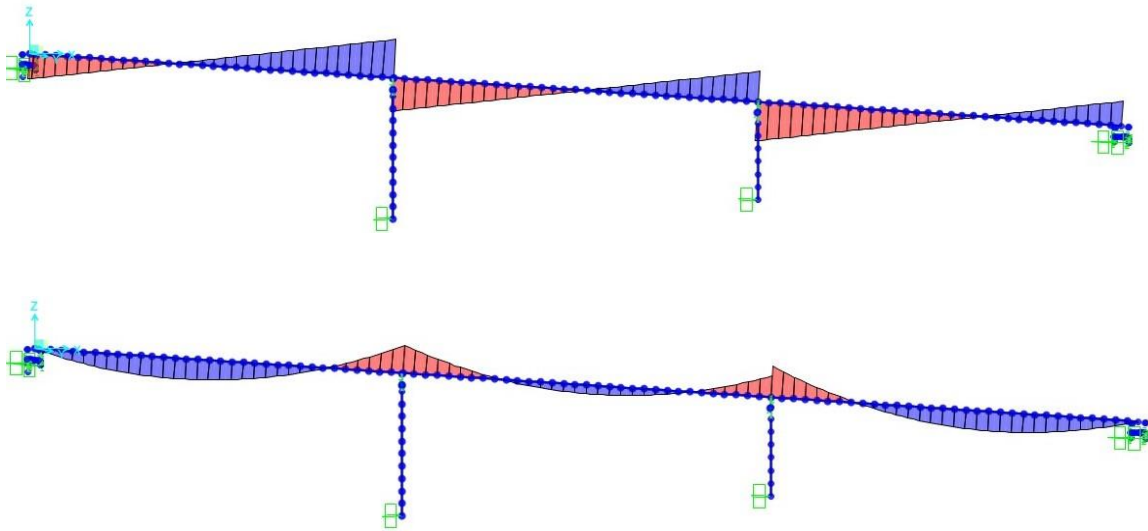
Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	314	Joint Element	314	
	1	2	3	
Force	0,123	119,66	0,206	
Moment	10014,94	-10,802	3939,668	

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

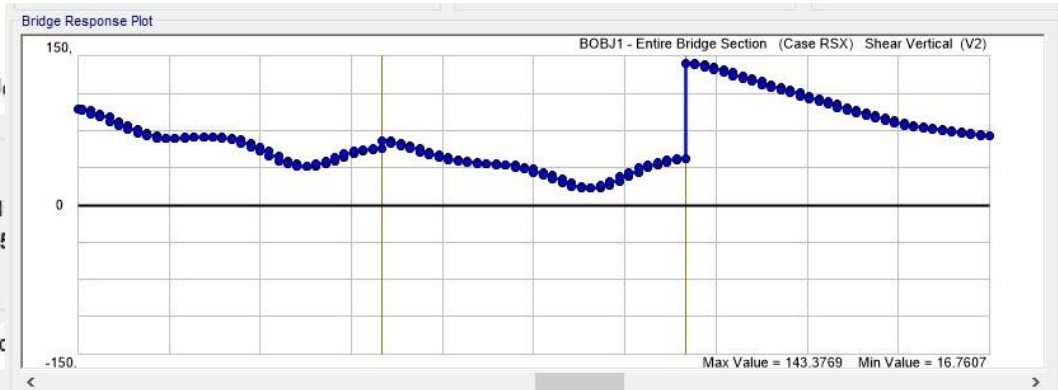
Joint Object	10	Joint Element	10	
	1	2	3	
Force	224,319	171,979	-2,807	
Moment	0,	0,	0,	

δ) Για τα φορτία λόγω χιονιού :



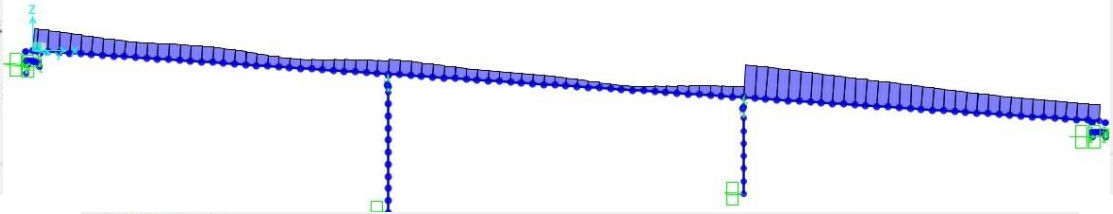
ε) Για τα φορτία λόγω **σεισμού** :

i) κατά τη διεύθυνση X

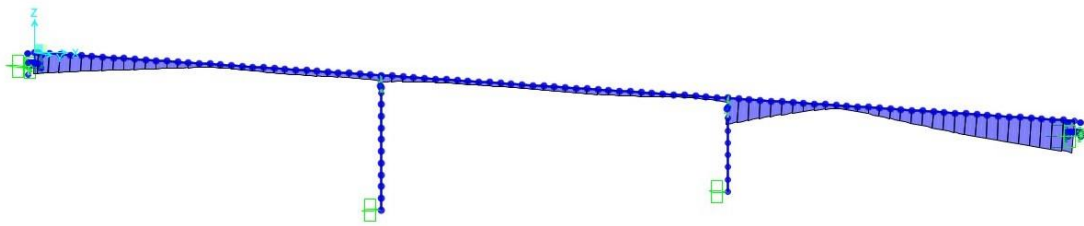
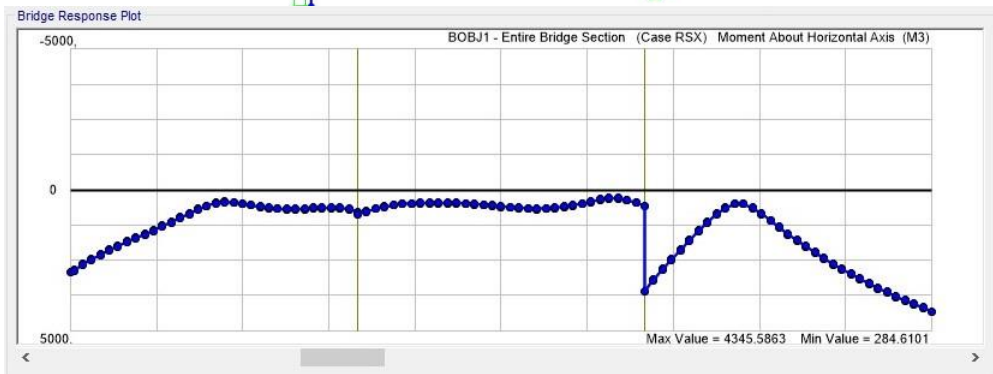


Joint Object	1	2	3
Force	326		
Moment			-0,717
			-10,389

Joint Object	5	314
Force	1	
Moment		



Joint Object	10
Force	3
Moment	-5,243
	0,



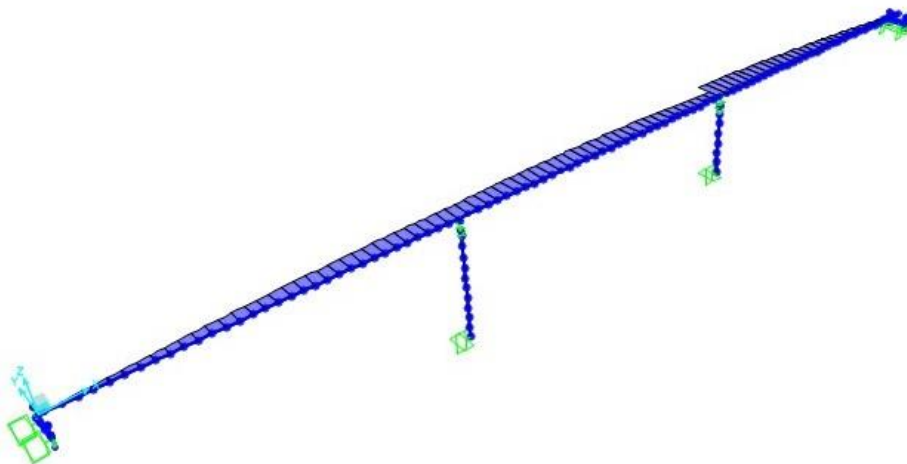
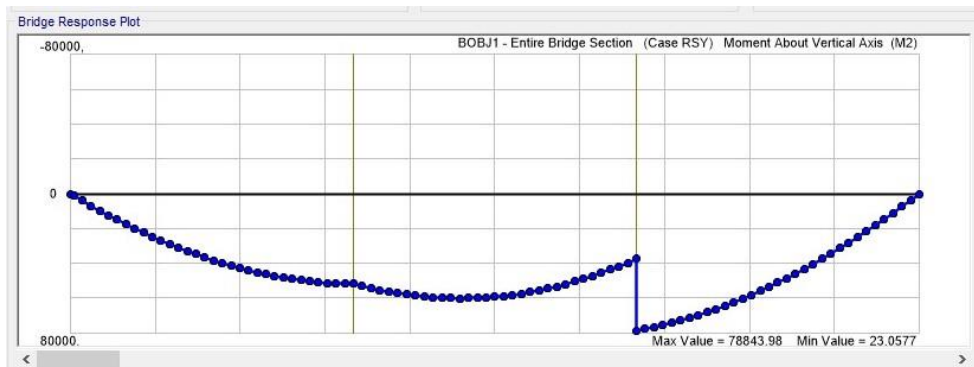
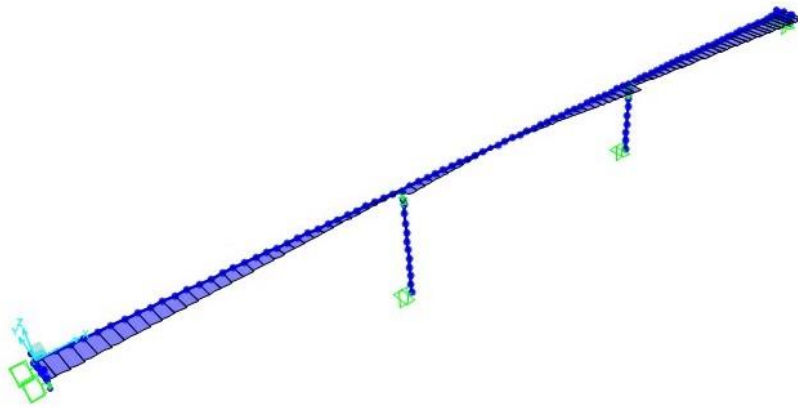
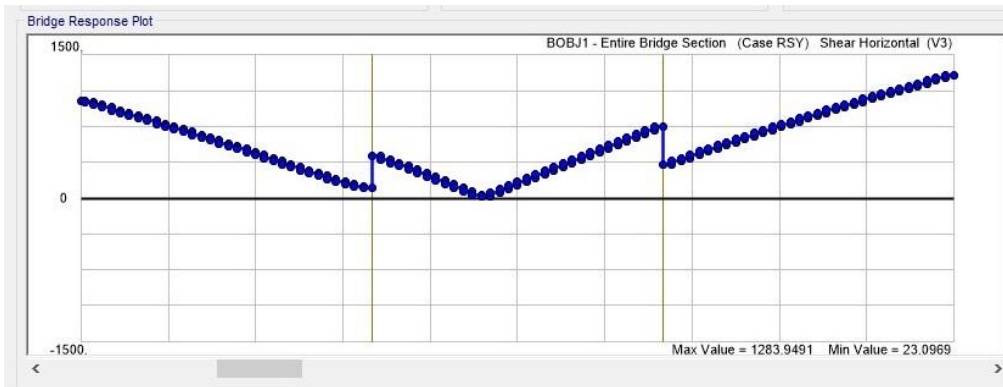
Joint Object	5	314
Force	26.265	
Moment		

Joint Object	326	10
Force	54.74	
Moment		

Joint Object	5	314
Force	26.265	
Moment		

Joint Object	326	10
Force	54.74	
Moment		

ii) κατά τη διεύθυνση Y





Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	5		
	1	2	3
Force	858,475	342,184	6,672
Moment	0,	0,	0,

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	326		
	1	2	3
Force	5,921	3250,483	2,614
Moment	0,	83,559	75878,418

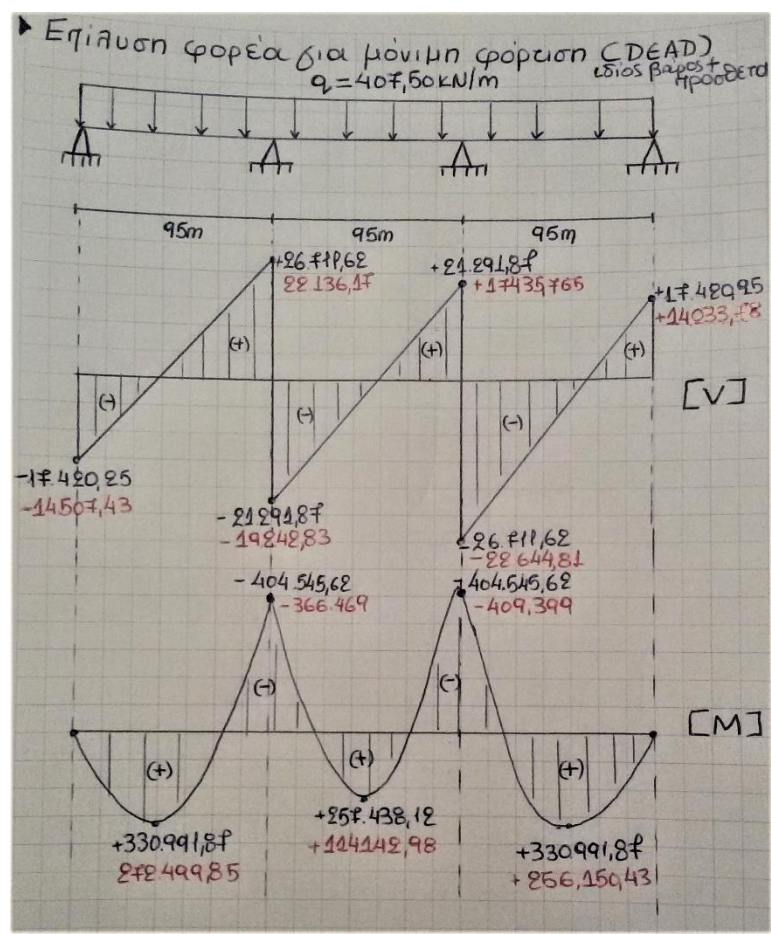
Joint Reactions in Joint Local CoordSys

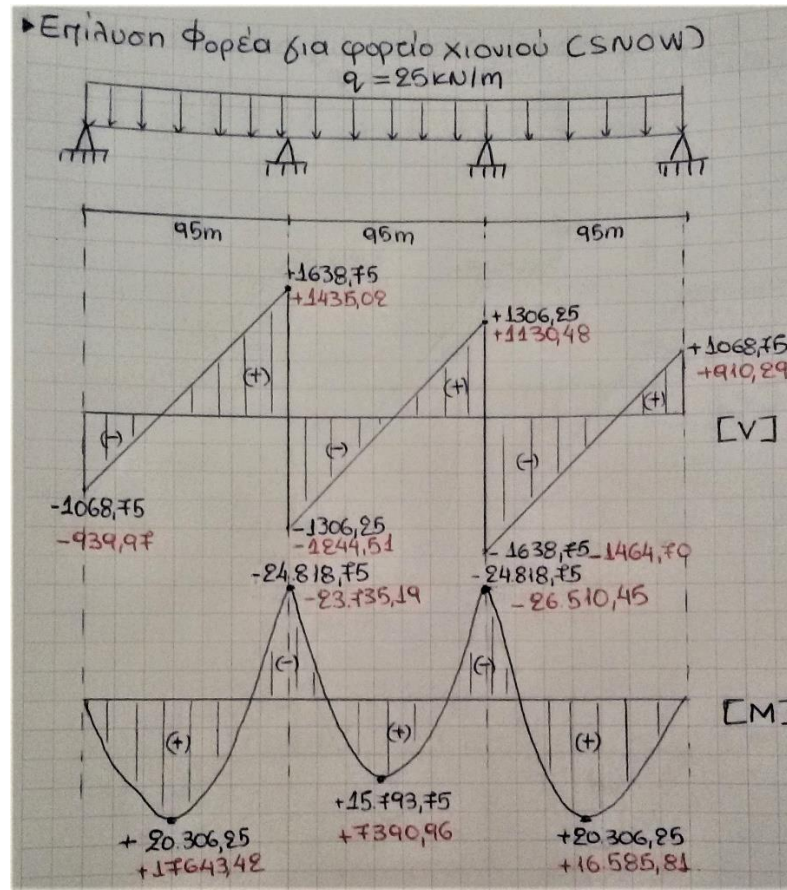
Joint Object	314		
	1	2	3
Force	4,274	459,632	3,148
Moment	41274,496	98,933	15715,043

Joint Reactions in Joint Local CoordSys

Joint Object	10		
	1	2	3
Force	866,078	648,638	10,119
Moment	0,	0,	0,

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιλύσεις για τα μόνιμα (DEAD) και τα φορτία χιονιού (SNOW), με το 'χέρι' σε ένα απλοποιημένο μοντέλο προσομοιώματος της γέφυρας, με μια αμφιέριστη δοκό τριών ανοιγμάτων, όπου βρίσκονται τα εντατικά μεγέθη και με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη που βρέθηκαν από την επίλυση του φορέα με το στατικό πρόγραμμα.

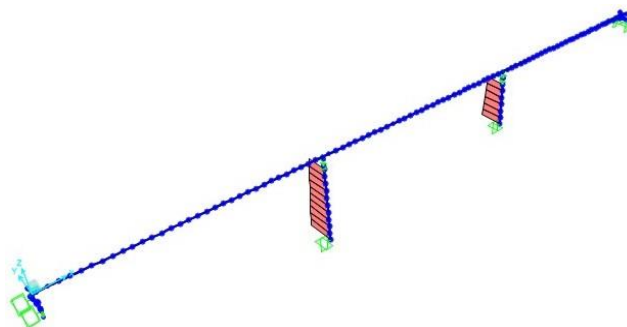




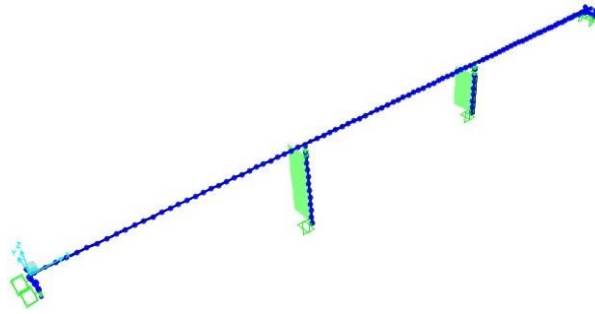
**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ:** Στα περισσότερα σημεία οι διαφορές που παρατηρούνται σε σχέση με το στατικό πρόγραμμα είναι πολύ μικρές κι αυτό θεωρείται φυσιολογικό, πλην μερικών περιπτώσεων όπου οι διαφορές είναι πιο ευδιάκριτες.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί πως οι **αξονικές δυνάμεις [N]** στο φορέα παρουσιάζονται μόνο στα βάρη στις κατακόρυφες φορτίσεις, ενώ στις οριζόντιες και στο κατάστρωμα με μικρές τιμές, χαρακτηριστικά φαίνονται ως εξής:

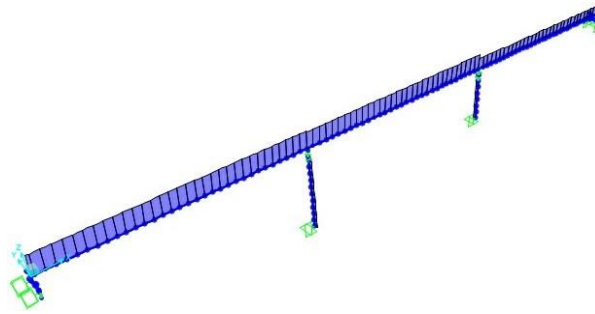
α) Μόνιμα Φορτία



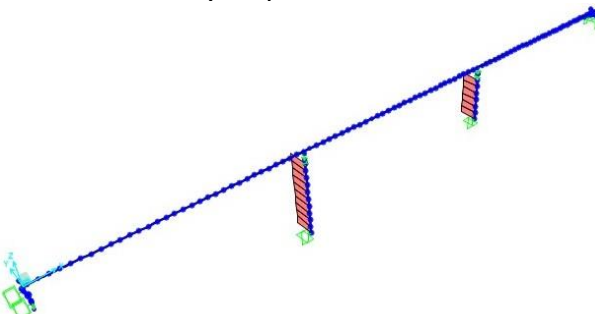
**β) Κινητά Φορτία**



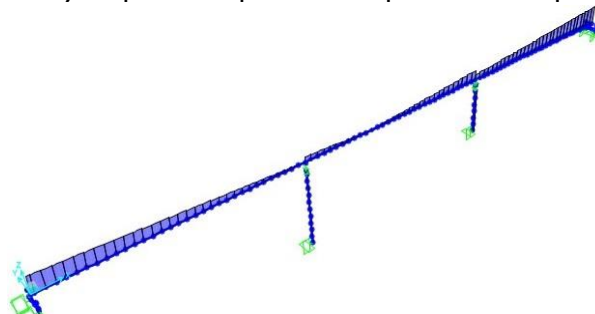
**γ) Φορτία Ανέμου**



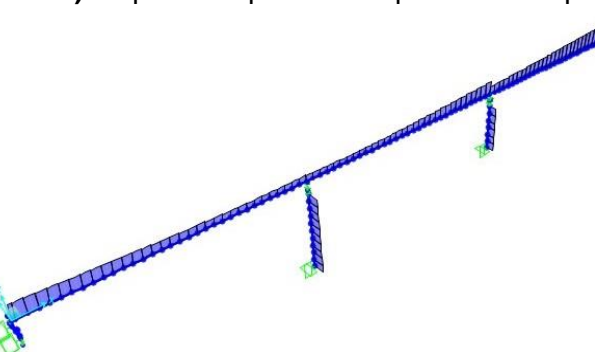
**δ) Φορτία Χιονιού**



**ε) Φορτία Σεισμού κατά τη Χ διεύθυνση**



**στ) Φορτία Σεισμού κατά τη Υ διεύθυνση**



Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα **μέγιστα βέλη κάμψης** στο μέσον κάθε ανοίγματος και η **στροφή στα άκρα** του ενδεικτικά για τη μόνιμη φόρτιση.

### Μόνιμα Φορτία

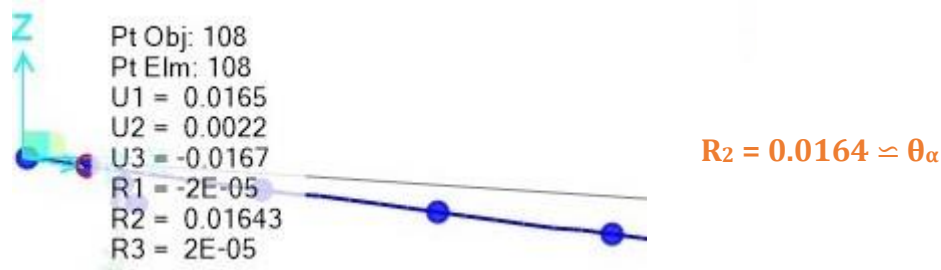
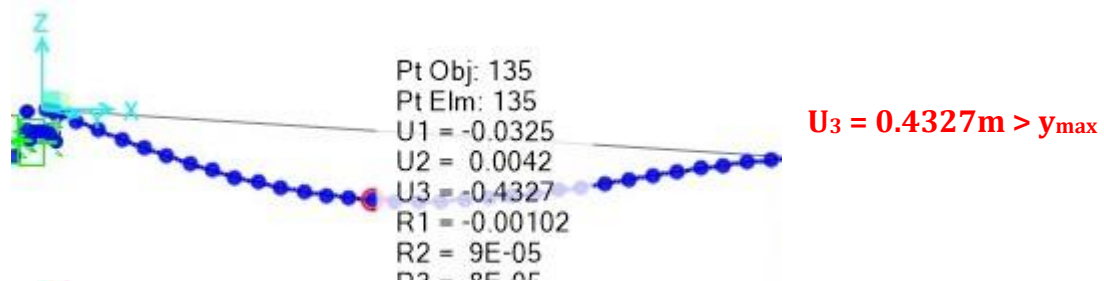
από τους υπολογισμούς για μία αμφιέρειστη δοκό με ομοιόμορφο καταναμεημένο φορτίο σε όλο της το μήκος θα πρέπει να ισχύουν τα εξής :

$$y_{\max} = (5 \times q \times l^4) / (384 \times E \times I) = (5 \times 407.5 \times 95^4) / (384 \times 30000000 \times 45) = \underline{\underline{0.3201\text{m}}}$$

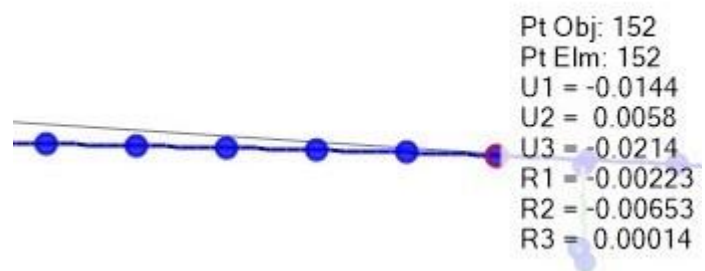
$$\theta_{\alpha} = (q \times l^3) / (24 \times E \times I) = (407.5 \times 95^3) / (24 \times 30000000 \times 45) = \underline{\underline{0.0107^{\circ}}}$$

$$\theta_{\beta} = -\theta_{\alpha} = \underline{\underline{-0.0107^{\circ}}}$$

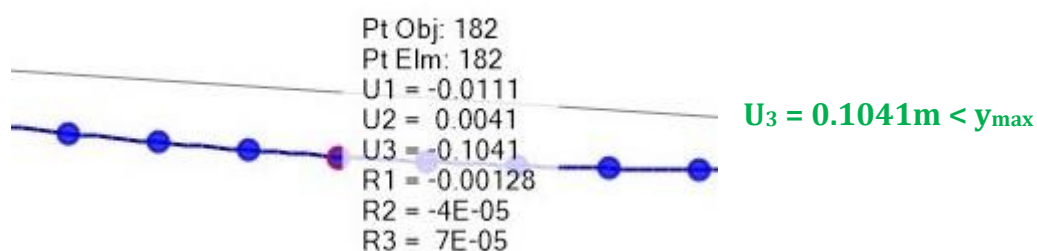
- ❖ στο πρώτο άνοιγμα από 0 έως 95 μέτρα προκύπτουν τα εξής :

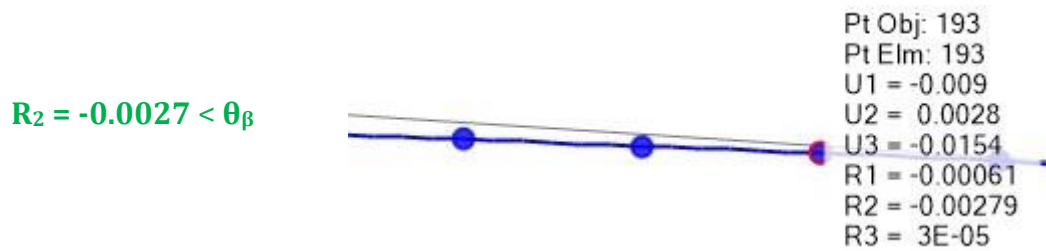
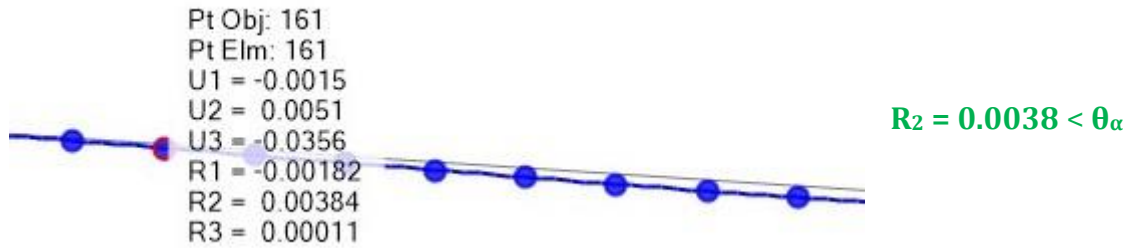


$$R_2 = -0.0065 < \theta_{\beta}$$

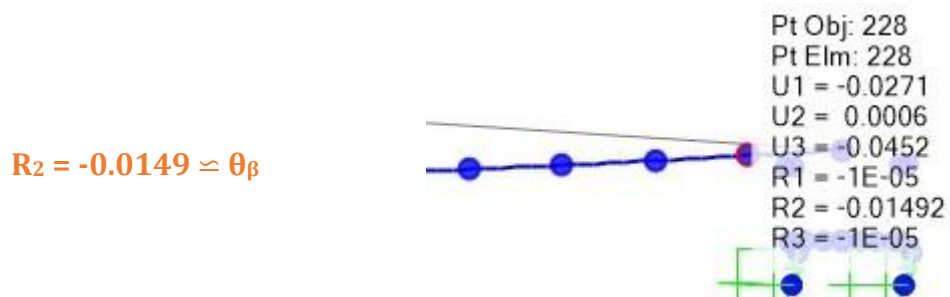
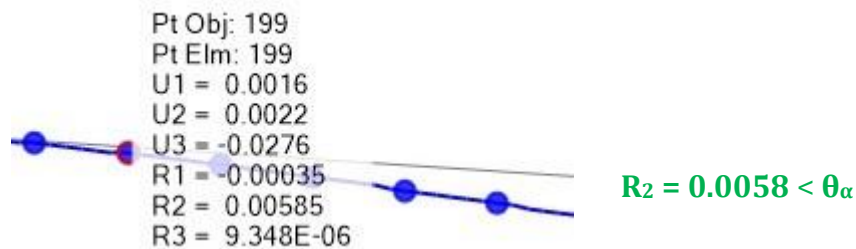
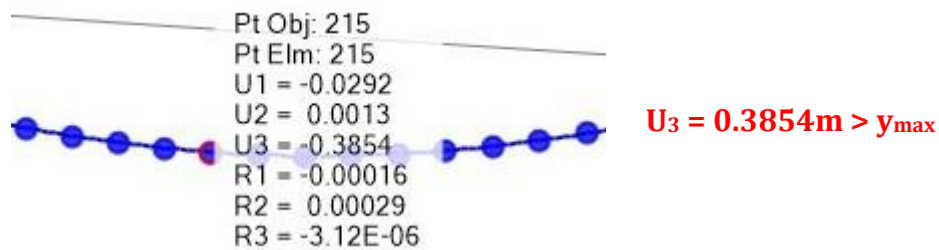


- ❖ στο δεύτερο άνοιγμα από 95 έως 190 μέτρα προκύπτουν τα εξής :





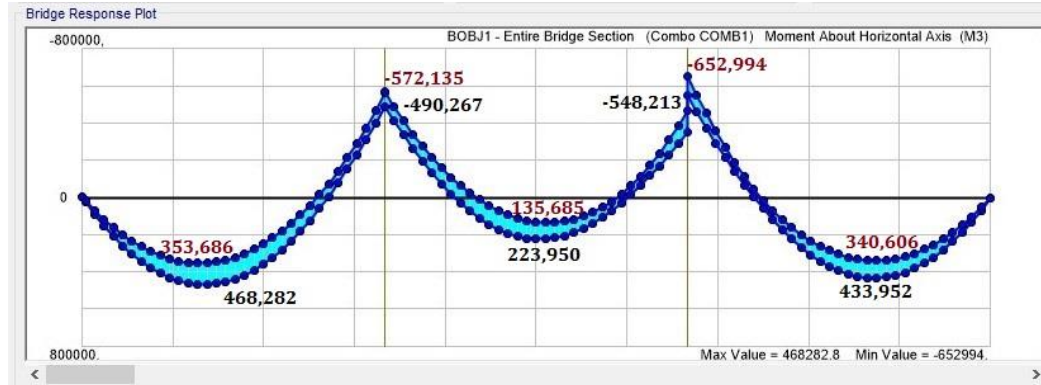
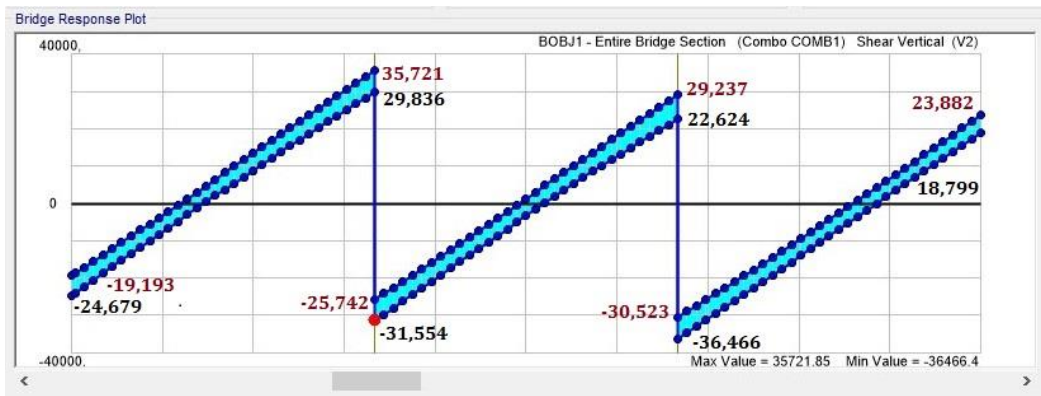
❖ στο τρίτο άνοιγμα από 190 έως 285 μέτρα προκύπτουν τα εξής :



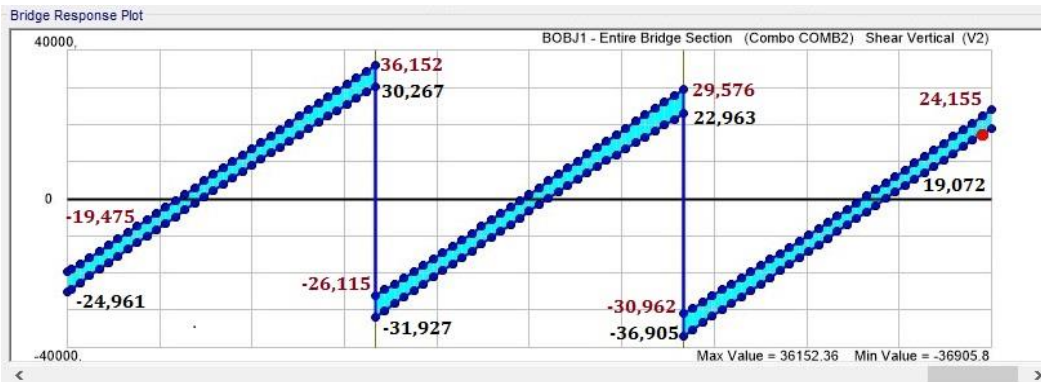
Οι τύποι ήταν οι ίδιοι και στα τρία ανοίγματα γιατί έχουν ίδιο μήκος και ίδια φόρτιση. Ομοίως πραγματοποιούνται και για τις υπόλοιπες φορτίσεις οι έλεγχοι κοιτάζοντας κάθε φορά τα αντίστοιχα  $U, R$  ανάλογα με τους άξονες  $X, Y, Z$ .

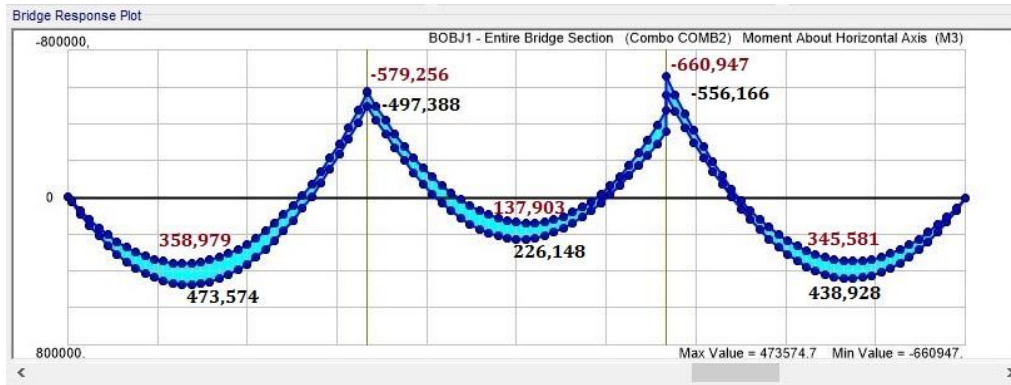
- Τέλος, για να φτάσουμε στο βήμα σχεδιασμού της κατασκευής θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι **συνδυασμοί φόρτισης**. Αυτοί είναι πάρα πολύ και είναι αδύνατον να γίνουν με το 'χέρι', το πρόγραμμα όμως θα τους επιλύσει όλους, ενδεικτικά προσθέσαμε κι εμείς τέσσερις. Στη συνέχεια για κάθε έναν από αυτούς θα παρουσιαστούν τα **διαγράμματα Τεμνουσών [V] και Ροπών [M]** που προέκυψαν από το πρόγραμμα. Η διαδικασία είναι η ίδια με αυτή της κάθε φόρτισης ξεχωριστά που παρουσιάστηκε αναλυτικά και παραπάνω (βρίσκουμε Διαγράμματα, αντιδράσεις, μετατοπίσεις, βέλη κλπ.).

### 1] $\Sigma\Phi_1 = 1.35 \times \text{Μόνιμα} + 1.50 \times \text{Κινητά}$

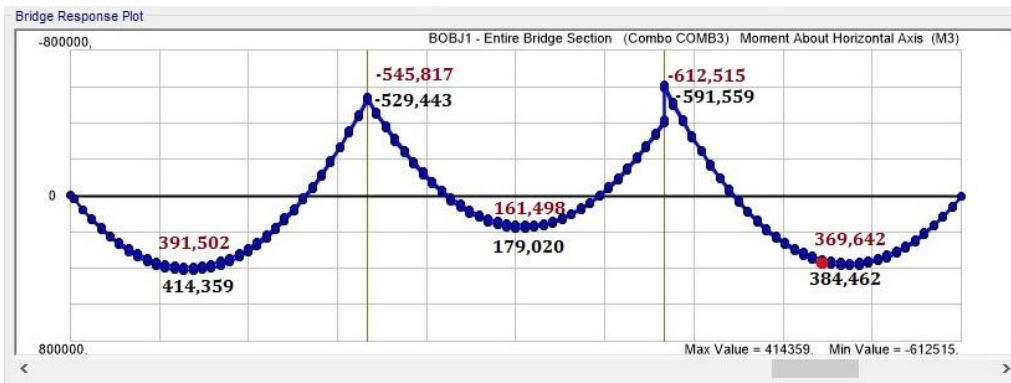
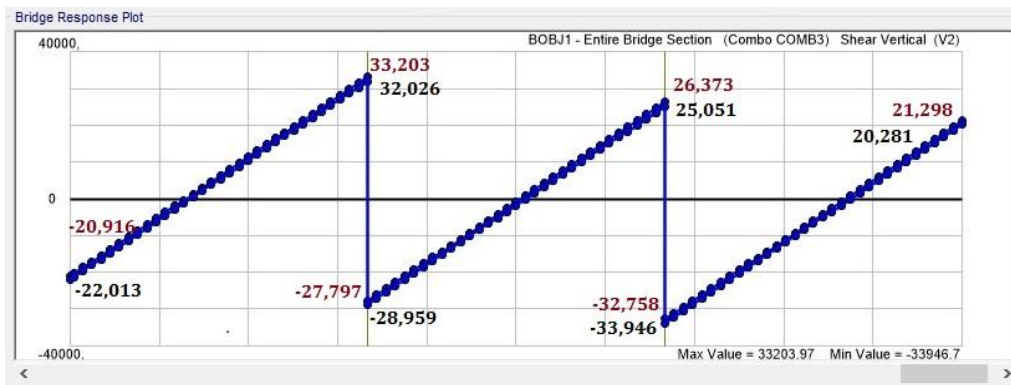


### 2] $\Sigma\Phi_2 = 1.35 \times \text{Μόνιμα} + 1.50 \times \text{Κινητά} + 0.30 \times \text{Χιόνι}$

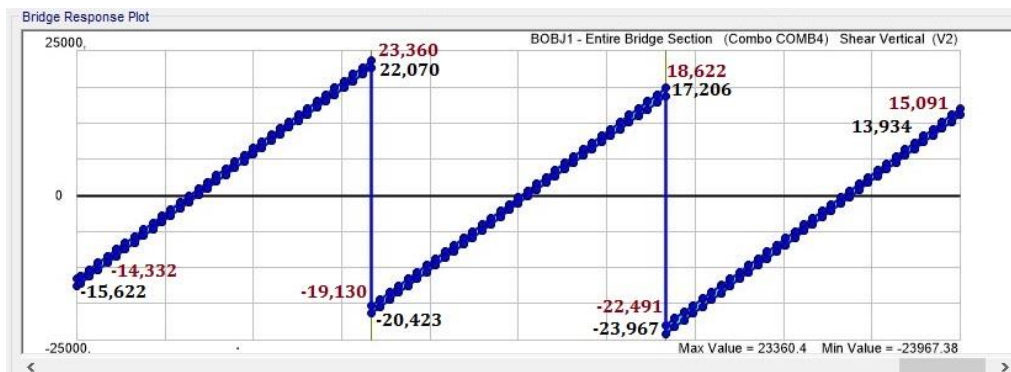


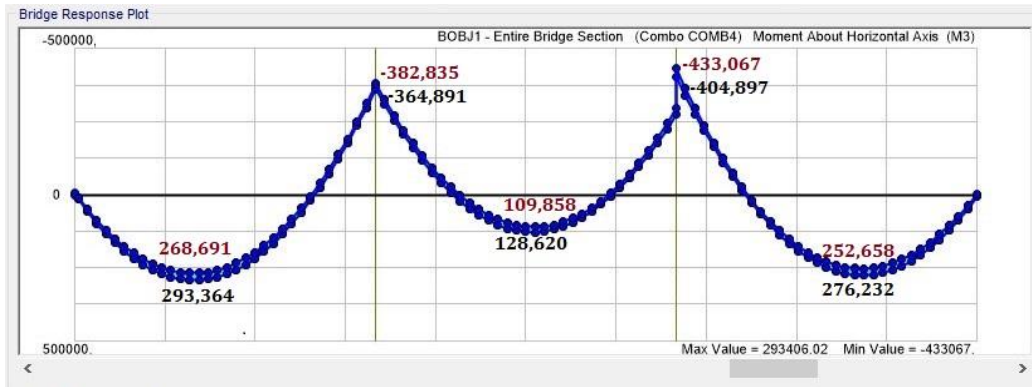


3]  $\Sigma\Phi_3 = 1.35 \times \text{Μόνιμα} + 0.30 \times \text{Κινητά} + 1.50 \times \text{Χιόνι}$



4]  $\Sigma\Phi_4 = 1.00 \times \text{Μόνιμα} + 0.3 \times \text{Κινητά} + 1.00 \times \text{Σεισμός κατά Χ}$





- Αφού θα επιλυθούν στατικά όλοι οι συνδυασμοί από το πρόγραμμα, δηλαδή αυτοί που δημιουργήσαμε και αυτοί που δημιούργησε το πρόγραμμα από μόνο του (συνολικά είναι γύρω στους 80!), τότε θα επιλεγούν τα **μέγιστα εντακτικά μεγέθη** που προκύπτουν για κάθε στοιχείο από έναν εξ' αυτών των συνδυασμών και βάσει αυτών των μεγεθών θα γίνει ο σχεδιασμός του αντίστοιχου στοιχείου (βάθρο-ακρόβαθρο, πλάκα καταστρώματος) στην οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας σύμφωνα με τους Κανόνες των Ευροκωδίκων.

Load Case/Load Combo

Case/Combo DEAD

COMB1  
StrIGroup1  
Str-I1  
Str-I2  
Str-I3  
Str-I4  
StrIGroup4  
Str-II1  
BOBJ1 - Entire Bri  
Str-II2  
StrIIIGroup2  
Str-III1  
Str-III2  
Str-III3  
Str-III4  
StrIVGroup4  
Str-IV1  
Str-IV2  
StrVGroup2  
Str-V1  
Str-V2  
Str-V3  
Str-V4  
Str-V5  
Str-V6  
Str-V7  
Str-V8  
Str-V9  
Str-V10  
Str-V11  
Str-V12

Snap Options

- Στη συνέχεια περνάμε στη φάση σχεδιασμού της γέφυρας.

✦ **Επιπλέον θα πρέπει να αναφέρουμε ότι θα χρησιμοποιηθούν 11 τένοντες, 7 στο κάτω πέλμα και 4 στο επάνω οι οποίοι θα εκτείνονται καταμήκος όλης της γέφυρας συνεχόμενοι σε όλα τα ανοίγματα και θα αποτελούνται από 7κλωνα συρματόσχοινα διαμέτρου 15.3mm με χαρακτηριστική τιμή θραύσης  $F_m=250kN$ , και μέγιστο μήκος διακριτοποίησης ανά 1 μέτρο.**

Tendon Area Calculator

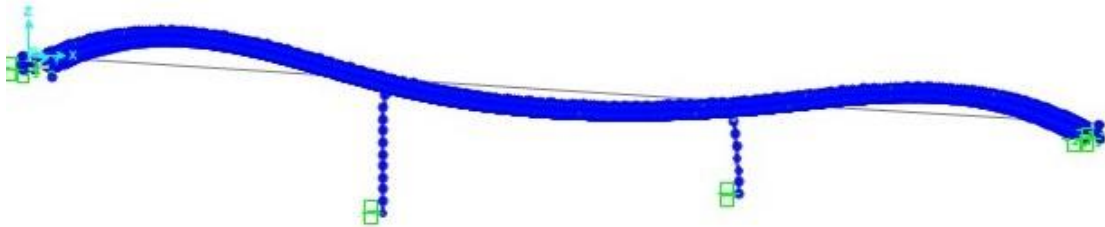
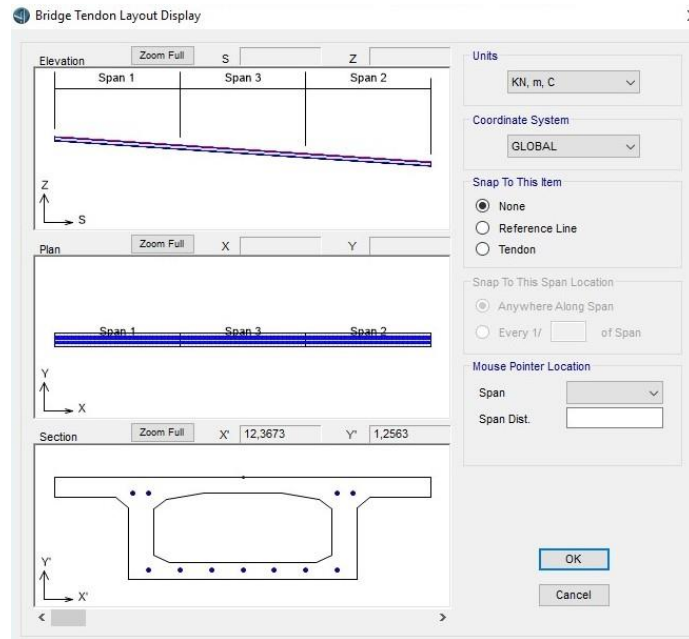
Strand Type: 15mm (0.6") | Nominal Diameter: EN 15.3mm | Strands per Tendon: 7 | No of Tendons: 1

Areas

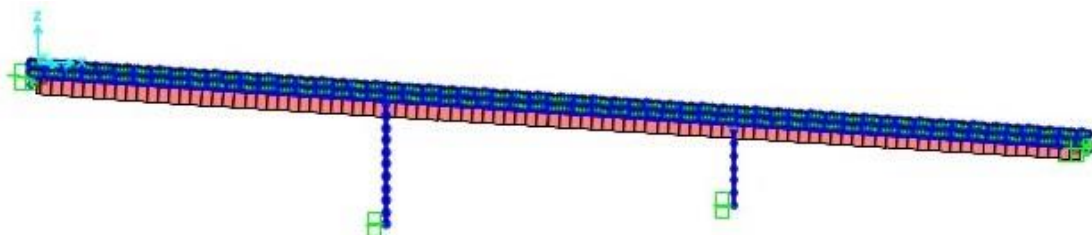
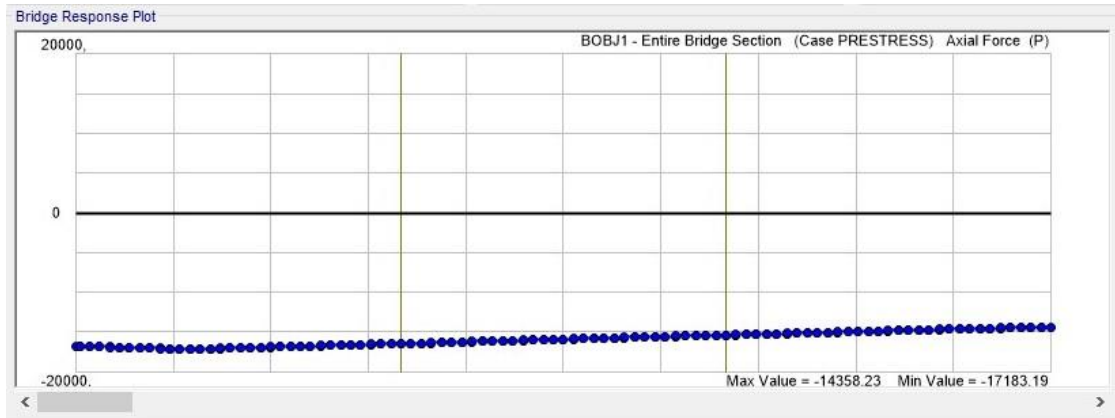
Units	Area Single Strand	Area Single Tendon	Area All Tendons
English units [in <sup>2</sup> ]	0,217	1,519	1,519
SI units [mm <sup>2</sup> ]	140	980	980

Use Area | Cancel





Η αξονική δύναμη της Προέντασης έχει το εξής διάγραμμα:



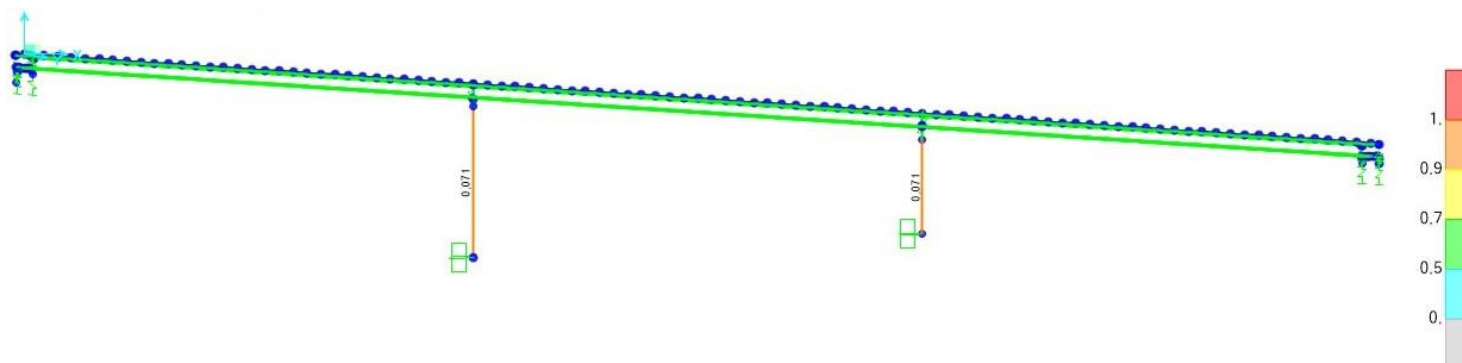
Κάνοντας το DESIGN της γέφυρας προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

α) Για τα μεσόβαθρα:

i) Αρχικά ορίζουμε τις Προδιαγραφές με τις οποίες θέλουμε να διαστασιολογήσει το πρόγραμμα: ( **Ευρωκώδικας 2 - για Σχεδιασμό Κατασκευών από Σκυρόδεμα** )

	Item	Value
1	Design Code	Eurocode 2-2004
2	Country	CEN Default
3	Combinations Equation	Eq. 6.10
4	Reliability Class	Class 2
5	Second Order Method	Nominal Curvature
6	Multi-Response Case Design	Envelopes
7	Number of Interaction Curves	24
8	Number of Interaction Points	11
9	Consider Minimum Eccentricity?	Yes
10	Theta0 (ratio)	5,000E-03
11	GammaS (steel)	1,15
12	GammaC (concrete)	1,5
13	AlphaCC (compression)	1,
14	AlphaCT (tension)	1,
15	AlphaLCC (lightweight compression)	0,85
16	AlphaLCT (lightweight tension)	0,85
17	Pattern Live Load Factor	0,75
18	Utilization Factor Limit	0,95

ii) Αφού γίνει το DESIGN των στοιχείων προκύπτει η εξής εικόνα:



iii) Επόμενο βήμα είναι η επιλογή ενός στοιχείου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων και των μεγεθών που προέκυψαν από το πρόγραμμα σε σχέση με τον έλεγχο που θα προκύψει με το 'χέρι':

Για το υποστήλωμα 1 έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Concrete Column Design Information (Eurocode 2-2004)

Frame ID	2296	Analysis Section	YPOSTHLWMA
Design Code	Eurocode 2-2004	Design Section	YPOSTHLWMA

COMBO ID	STATION LOC	LONGITUDINAL REINFORCEMENT	MAJOR SHEAR REINFORCEMENT	MINOR SHEAR REINFORCEMENT
DCON1	0,00	0,071	0,000	0,000
DCON1	3,20	0,071	0,000	0,000
DCON1	3,20	0,071	0,000	0,000
DCON1	6,40	0,071	0,000	0,000
DCON1	6,40	0,071	0,000	0,000
DCON1	9,60	0,071	0,000	0,000
DCON1	9,60	0,071	0,000	0,000

Modify/Show Overwrites: Overwrites

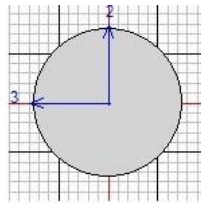
Display Details for Selected Item: Details (highlighted with a red arrow), Interaction

Display Complete Details: Tabular Data

Stylesheet: Default

Table Format File

OK Cancel



Eurocode 2-2004 COLUMN SECTION DESIGN Type: DC HIGH MRF Units: KN, m, C (Summary)

L=32,000  
 Element : 2296 D=3,000 dc=0,067  
 Section ID : YPOSTHLWMA E=2485578,1 fck,cyl=50000, Lt.Wt. Fac.=1,000  
 Combo ID : DCON13 fyk=413685,473 fywk=413685,47  
 Station Loc : 32,000 RLLF=1,000 SOM: Nominal Curvature  
 Combo Eq. : Eq. 6.10

Gamma (Concrete): 1,500 AlphaCC=1,000 AlphaCT=1,000  
 Gamma (Steel) : 1,150 AlphaLCC=0,850 AlphaLCT=0,850

AXIAL FORCE & BIAxIAL MOMENT DESIGN FOR NEd, MEd2, MEd3

Rebar Area	Design NEd	Design MEd2	Design MEd3	Minimum M2	Minimum M3
0,071	40688,042	4609,169	25151,426	4068,804	4068,804

AXIAL FORCE & BIAxIAL MOMENT FACTORS

	M0Ed Moment	Madd Moment	Minimum Ecc	Beta Factor	L Length
Major Bending (M3)	25151,426	0,000	0,100	1,000	32,000
Minor Bending (M2)	4609,169	0,000	0,100	1,000	32,000

SHEAR DESIGN FOR V2,V3

	Rebar Asw/s	Shear VEd	Shear VRdc	Shear VRds
Major Shear (V2)	0,000	5607,441	9186,189	0,000
Minor Shear (V3)	0,000	5607,441	9186,189	0,000

AXIAL COMPRESSION RATIO

Conc.Capa A*fcđ	CompRatio Ned/(A*fcđ)	CompRatio Limit	Seismic Load?	CompCheck Needed?	Ratio OK?
235619,449	0,173	0,550	Yes	Yes	Yes

JOINT SHEAR DESIGN

	Joint Shear Ash	Shear VEd,Top	Shear Vjhd	Shear Vrd,Conc	Shear Ratio	Joint Area
Major Shear (V2)	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
Minor Shear (V3)	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C

(1.3) BEAM/COLUMN CAPACITY RATIOS

Major Ratio	Minor Ratio
N/A	N/A

Για το υποστήλωμα 2 έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Concrete Column Design Information (Eurocode 2-2004)

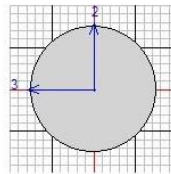
Frame ID: 2197      Analysis Section: YPOSTHLWMA  
 Design Code: Eurocode 2-2004      Design Section: YPOSTHLWMA

COMBO ID	STATION LOC	LONGITUDINAL REINFORCEMENT	MAJOR SHEAR REINFORCEMENT	MINOR SHEAR REINFORCEMENT
DCON1	0,00	0,071	0,000	0,000
DCON1	3,33	0,071	0,000	0,000
DCON1	3,33	0,071	0,000	0,000
DCON1	6,67	0,071	0,000	0,000
DCON1	6,67	0,071	0,000	0,000
DCON1	10,00	0,071	0,000	0,000
DCON1	10,00	0,071	0,000	0,000

Modify/Show Overwrites: Overwrites      Display Details for Selected Item: Details (highlighted with red arrow), Interaction      Display Complete Details: Tabular Data

Stylesheet: Default      Table Format File

OK      Cancel



Eurocode 2-2004 COLUMN SECTION DESIGN Type: DC HIGH MRF Units: KN, m, C (Summary)

L=20,000  
 Element : 2197      D=3,000      dc=0,067  
 Section ID : YPOSTHLWMA      E=24855578,1      fck,cyl=50000,      Lt.Wt. Fac.=1,000  
 Combo ID : DCON13      fyk=413685,473      fywk=413685,47  
 Station Loc : 20,000      RLLF=1,000      SOM: Nominal Curvature  
 Combo Eq. : Eq. 6.10

Gamma (Concrete): 1,500      AlphaCC=1,000      AlphaCT=1,000  
 Gamma (Steel) : 1,150      AlphaLCC=0,850      AlphaLCT=0,850

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN FOR NEd, MEd2, MEd3

Rebar Area	Design NEd	Design MEd2	Design MEd3	Minimum M2	Minimum M3
0,071	40461,401	27912,305	-15817,088	4046,140	4046,140

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT FACTORS

MOEd Moment	Madd Moment	Minimum Ecc	Beta Factor	L Length
Major Bending (M3)	-15817,088	0,000	0,100	1,000
Minor Bending (M2)	27912,305	0,000	0,100	1,000

SHEAR DESIGN FOR V2, V3						
	Rebar	Shear	Shear	Shear		
	A <sub>sw</sub> /s	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Rdc</sub>	V <sub>Rds</sub>		
Major Shear (V2)	0,000	8950,550	9152,513	0,000		
Minor Shear (V3)	0,000	8950,550	9152,513	0,000		

AXIAL COMPRESSION RATIO						
	Conc.Capa	CompRatio	CompRatio	Seismic	CompCheck	Ratio
	A* <sub>fcd</sub>	Ned/ (A* <sub>fcd</sub> )	Limit	Load?	Needed?	OK?
	235619,449	0,172	0,550	Yes	Yes	Yes

JOINT SHEAR DESIGN						
	Joint Shear	Shear	Shear	Shear	Shear	Joint
	A <sub>sh</sub>	V <sub>Ed,Top</sub>	V <sub>jhd</sub>	V <sub>rd,Conc</sub>	Ratio	Area
Major Shear (V2)	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
Minor Shear (V3)	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C

(1.3) BEAM/COLUMN CAPACITY RATIOS		
	Major	Minor
	Ratio	Ratio
	N/A	N/A

➤ Επομένως προκύπτει ο εξής **καμπτικός και διατμητικός** οπλισμός:

Για Rebar Area:  $A_s = 0.071 \text{ m}^2 = 710 \text{ cm}^2$  -> Θα τοποθετηθούν **3 σειρές:**

- 1<sup>η</sup> στρώση- Εξωτερικά ->  $80 \text{ } \varnothing 24 = 361.6 \text{ cm}^2$
- 2<sup>η</sup> στρώση- Μεσαία ->  $26 \text{ } \varnothing 20 = 78.5 \text{ cm}^2$
- 3<sup>η</sup> στρώση- Εσωτερικά ->  $60 \text{ } \varnothing 24 = 271.4 \text{ cm}^2$

Για Rebar ( Shear Design):  $A_{sw}/s = 0.000 \text{ m}^2$  -> Θα τοποθετηθεί ο ελάχιστος απαιτούμενος: Έστω  $s=15\text{cm}=0.15\text{m}$  και  $\varnothing 16/15$ .

β) Για την ανωδομη :

*ι) Αρχικά ορίζουμε ξανά τις Προδιαγραφές με τις οποίες θέλουμε να διαστασιολογήσει το πρόγραμμα: ( **Ευρωκώδικας** )*

	Item	Value
1	Design Code	EUROCODE
2	Alpha cc	0,85
3	Alpha ct	1,
4	Cr <sub>dc</sub>	0,12
5	k1	0,15

ii) Δημιουργούμε ένα DESIGN REQUEST με 50 συνδιασμούς φόρτισης :

Name: DESIGN 111

Notes: Modify/Show...

Bridge Object: BOBJ1

Check Type: Conc Box Shear

Station Ranges

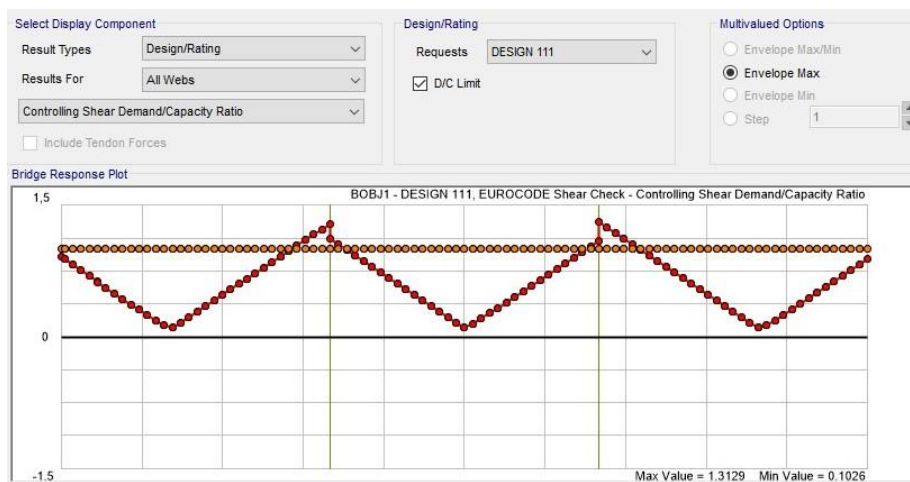
	Location Type	Start Type	Start Station	End Type	End Station	
1.	Both	Bridge Start		Bridge End		Add Delete

Design Request Parameters: Modify/Show...

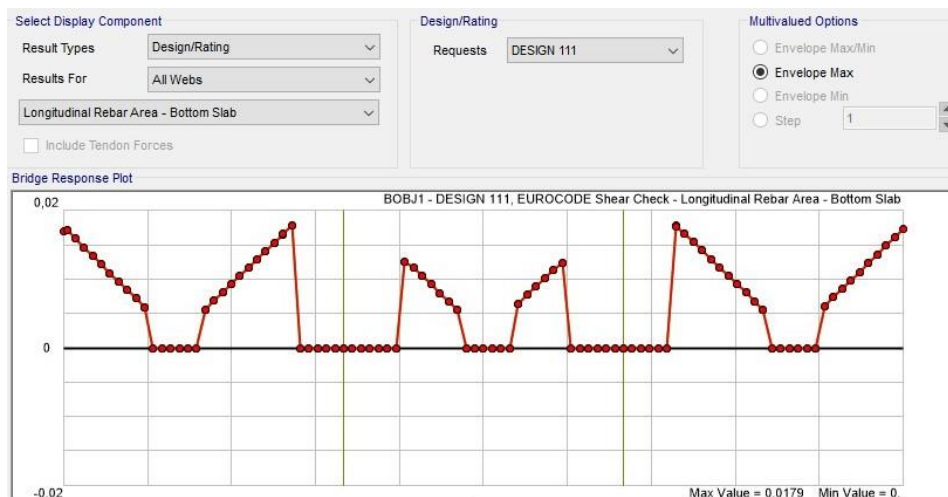
Demand Sets

Name	Combo	Parameters	
DSet1	COMB1	Modify/Show	Add Delete
DSet2	COMB2	Modify/Show	
DSet3	COMB3	Modify/Show	
DSet4	COMB4	Modify/Show	
DSet5	StrlGroup1	Modify/Show	

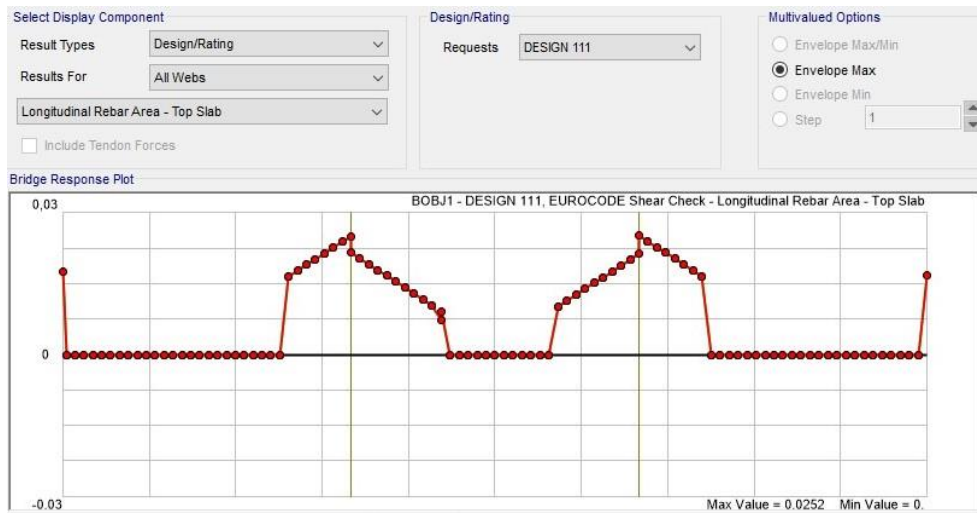
iii) Το διάγραμμα που προκύπτει για τις  $V_{Ed}/V_{Rd}$  ο οποίος πρέπει να είναι μικρότερος της ΜΟΝΑΔΟΣ, παρατηρείται στα βάθρα όμως ότι τον ξεπερνά:



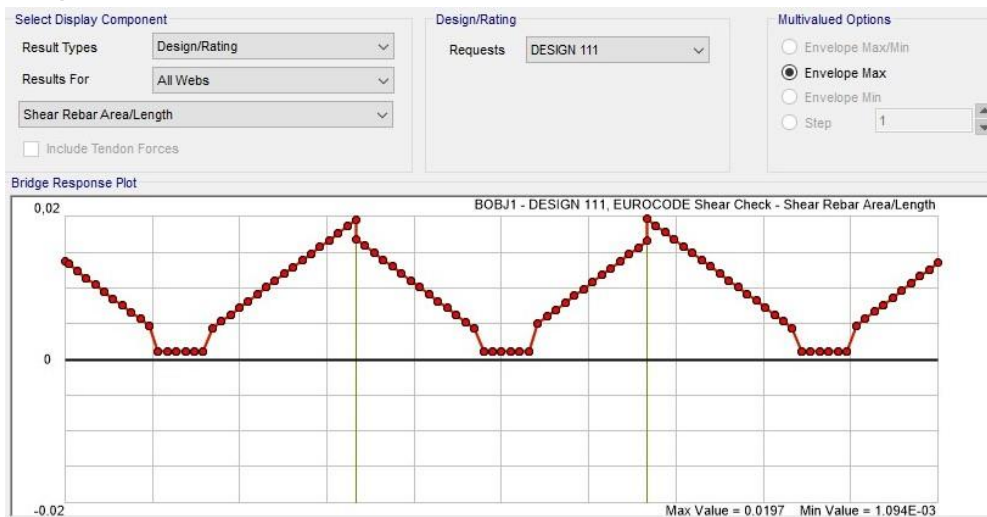
iv) Το διάγραμμα οπλισμού που απαιτείται στη κάτω πλάκα της διατομής:



v) Το διάγραμμα οπλισμού που απαιτείται στην **επάνω πλάκα** της διατομής:



vi) Το διάγραμμα του **διατμητικού οπλισμού** που απαιτείται κατά μήκος:



vii) Τέλος εμφανίζονται και οι πίνακες με τα **βασικά στοιχεία** της κατασκευής:

Units: As Noted		Bridge Super Design EUROCODE 02 - CBoxShear-Prop											
Filter:													
DesReqName	BridgeObj Text	Station m	Location Text	Girder Text	GirderDist m	LDV Unitless	LLDFactSect	WebWidth m	DuctFact Unitless	WebWidthEff	Ak m2	fckConc KN/m2	
DESIGN 111	BOBJ1	0	After	Left Exterior Girder	0	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	0	After	Right Exterior Girder	0	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	1	Before	Left Exterior Girder	1	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	1	Before	Right Exterior Girder	1	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	1	After	Left Exterior Girder	1	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	1	After	Right Exterior Girder	1	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	3,9375	Before	Left Exterior Girder	3,9375	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	3,9375	Before	Right Exterior Girder	3,9375	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	3,9375	After	Left Exterior Girder	3,9375	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	3,9375	After	Right Exterior Girder	3,9375	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	6,875	Before	Left Exterior Girder	6,875	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	6,875	Before	Right Exterior Girder	6,875	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	6,875	After	Left Exterior Girder	6,875	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	
DESIGN 111	BOBJ1	6,875	After	Right Exterior Girder	6,875	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8	17,3875	50000	

Units: As Noted		Bridge Super Design EUROCODE 02 - CBoxShear-Prop											
Filter:													
kConc N/m2	GammaC Unitless	fcdConc KN/m2	fctdConc KN/m2	FactAlpha Unitless	fykVRebar KN/m2	GammaS Unitless	fydVRebar KN/m2	fydLRebar KN/m2	ThetaAng Degrees	FlagPTPrsn Text	Girderbxb m4	IstAMomTop	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	
50000	1,5	28333,33	1933,33	1	413685,47	1,15	359726,5	359726,5	45	Prestressed	9,916029	3,97694	

➤ Επομένως προκύπτει ο εξής **καμπτικός και διατμητικός** οπλισμός:

• Για **BOTTOM SLAB**

- Longitudinal Rebar Area:  $A_s = 0.0179 \text{ m}^2 = 179 \text{ cm}^2$
- Θα τοποθετηθούν -> 48 Ø 22= 182.4 cm<sup>2</sup> σε 2 στρώσεις των 24.

• Για **TOP SLAB**

- Longitudinal Rebar Area:  $A_s = 0.0252 \text{ m}^2 = 252 \text{ cm}^2$
- Θα τοποθετηθούν -> 68 Ø 22= 258.4 cm<sup>2</sup> σε 2 στρώσεις των 34.

• Για **ΔΙΑΤΜΗΣΗ**

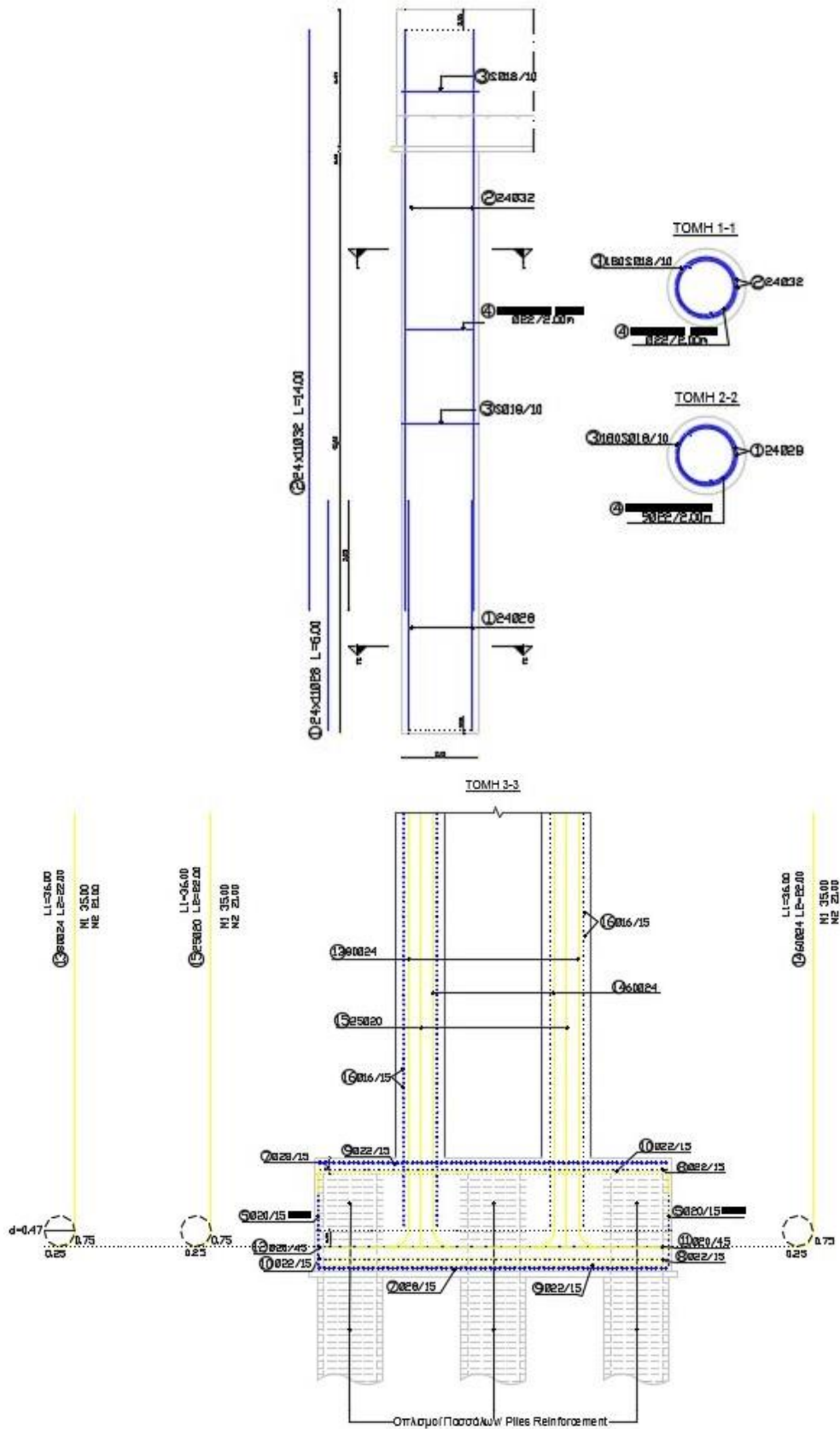
- Shear Rebar Area/Length :  $A_{sw}/s = 0.0197 \text{ m}$
- Έστω  $s = 10 \text{ cm} = 0.10 \text{ m}$ , τότε  $A_{sw} = 19.7 \text{ cm}^2$  ->  $d = 1.77 \text{ cm} = 17.7 \text{ mm}$
- Επομένως θα τοποθετηθούν συνδετήρες στα πλαινά τοιχώματα Ø18/10.

Στη συνέχεια περνάμε στο στάδιο δημιουργίας σχεδίων ξυποτύπου της γέφυρας για την ανωδομή, τα βάθρα και τη θεμελίωση (έγιναν εύλογες εκτιμήσεις καθώς δεν επιλύθηκε στατικά), λεπτομέρειες και αναπτύγματα οπλισμών.

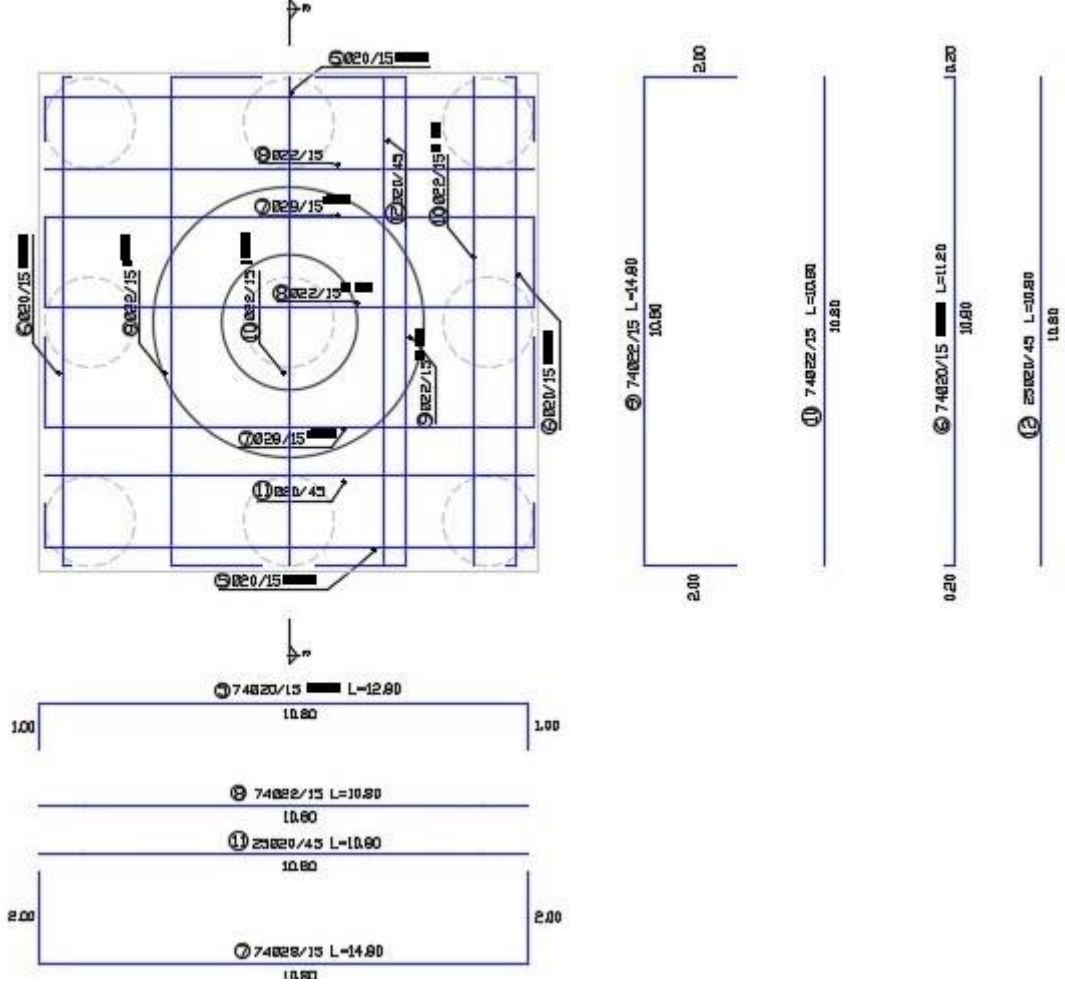


Τα σχέδια των ξυλοτύπων που δημιουργήθηκαν είναι τα εξής:

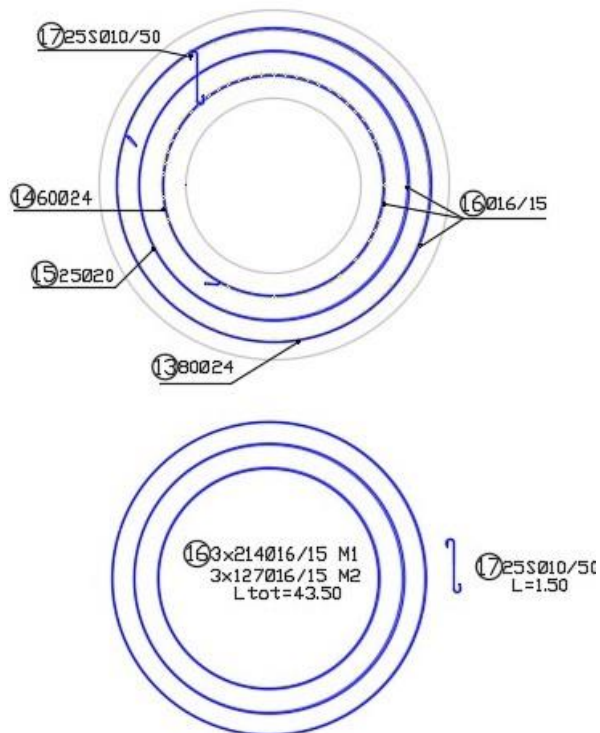
**ΟΠΛΙΣΜΟΙ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΩΝ Μ1 & Μ2**



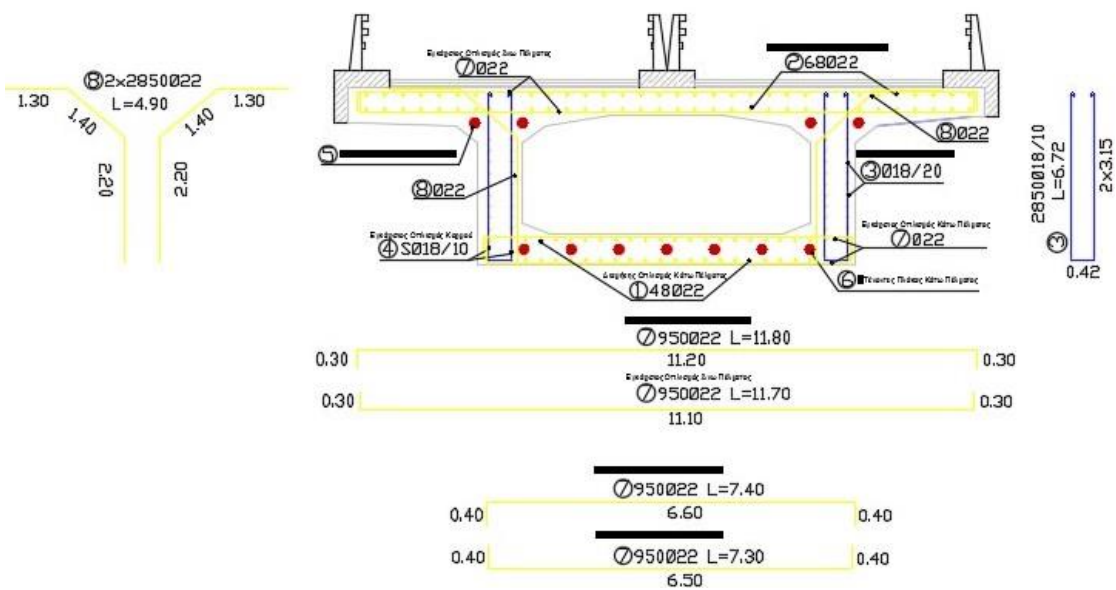
ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΤΟΨΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΜΕ ΣΟΒΑΘΡΩΝ Μ1 & Μ2



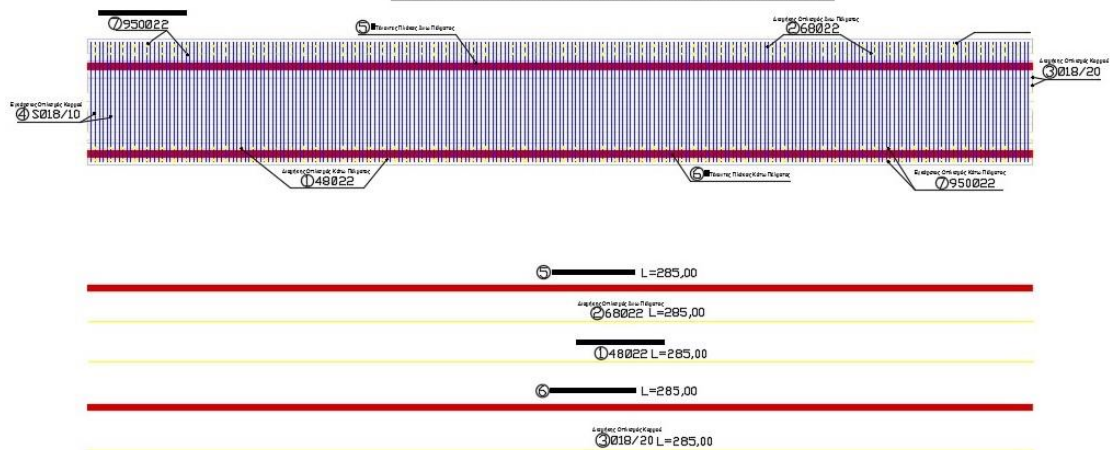
ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΤΟΨΗ ΜΕΣΟΣΟΒΑΘΡΩΝ Μ1 & Μ2



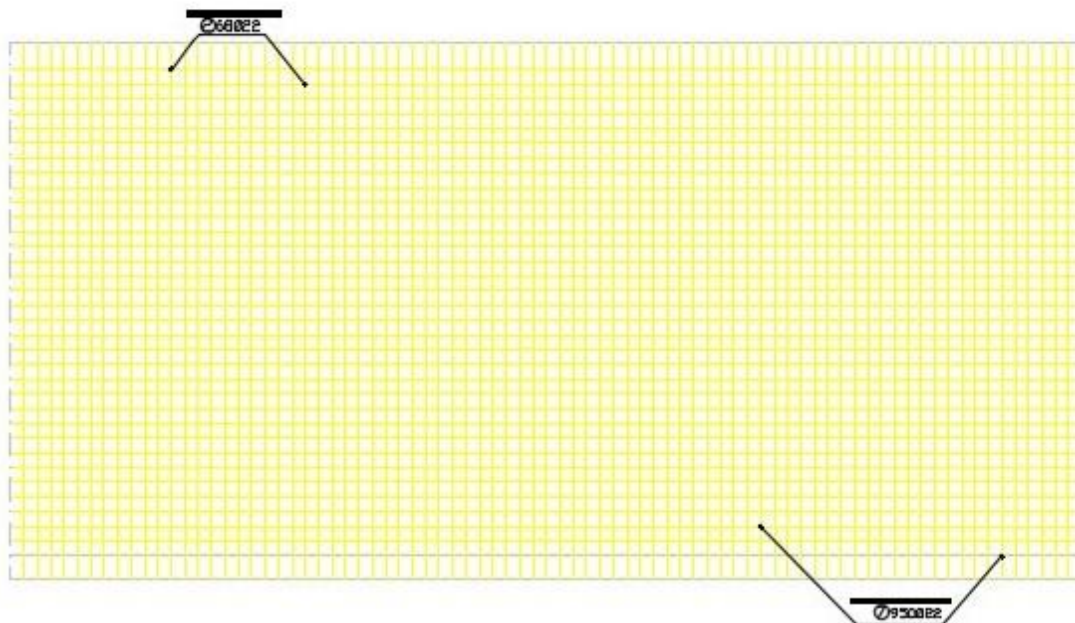
### ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΤΗ ΣΤΗΡΙΞΗ/ΑΝΟΙΓΜΑ



### ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΠΛΑΓΙΑΣ ΟΨΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ



### ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΚΑΤΟΨΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ





## ΒΑΣΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΟΠΛΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Σήμερα οι κιβωτιοειδείς γέφυρες κατά κανόνα προεντείνονται. Όταν το άνοιγμα είναι μικρό ή μέσο (έως ~60m) οι τένοντες τοποθετούνται στους κορμούς, το πάχος των οποίων εκλέγεται πλούσιο, οπότε πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ίδιοι κανόνες που ισχύουν για τη πλακοδοκό. Στις μεγάλες κιβωτιοειδείς γέφυρες συνηθίζεται όλο και περισσότερο όλοι οι τένοντες να τίθεται στις πλάκες πελμάτων και οι κορμοί να αφήνονται ελεύθεροι από μεγάλους τένοντες. Η χάραξη και αγκύρωση τους εξαρτάται έντονα από τη μέθοδο κατασκευής. Στη μέθοδο των *προωθούμενων τμημάτων* χρησιμοποιείται καταρχήν για τις φάσεις κατασκευής μια κεντρική προένταση παραλαβής των αρνητικών ροπών προβόλου και των θετικών ροπών ανοίγματος, η οποία ασκείται σε μικρούς διαμήκεις τένοντες που κατανέμονται στις πλάκες οροφής και πυθμένα. Στους κορμούς καταρχήν τοποθετούνται μόνον οι σωλήνες περιβλήματος των κυρίων τενόντων. Ο χάλυβας προέντασης τοποθετείται και τανύεται **μόνον** αφού η γέφυρα φθάσει στη τελική της θέση.

Ο διαμήκης οπλισμός κάτω πέλματος για τις ροπές ανοίγματος θα πρέπει να αποτελείται από πυκνά τοποθετημένες χοντρές ράβδους  $\varnothing$  μέχρι 28mm και θα συμμετέχει πλήρως στη συνολική αντοχή (φέρουσα ικανότητα) ως οπλισμός πέλματος σε ύψος μέχρι 2h. Όταν προβλέπονται περισσότερες από δύο στρώσεις, χρειάζεται κενό στο μέσον για τον δονητή.

Ο διαμήκης οπλισμός άνω πέλματος για ροπές στηρίξεων, σε σημαντικό βαθμό θα τοποθετείται στη πλάκα καταστρώματος και θα διανέμεται πλευρικά. Χοντρές ράβδοι με  $\varnothing > 1/10h_{pl}$  καλό είναι να διατάσσονται στο εσωτερικό των κορμών ή στην άμεση γειτονιά τους. Η διάμετρος των ράβδων θα μειώνεται καθώς απομακρύνονται από τον κορμό πχ  $\varnothing$  28mm στο κορμό και  $\varnothing$  20 έως  $\varnothing$  16mm έξω από αυτόν. Ο οπλισμός πέλματος είναι δυνατό να διανεμηθεί σε ολόκληρο το συνεργαζόμενο πλάτος.

Ο εγκάρσιος οπλισμός του κορμού = οπλισμός διάτμησης και στρέψης είναι καλύτερο να έχει τη μορφή συνδετήρων, οι οποίοι περικλείουν τον οπλισμό του κάτω πέλματος και αγκυρώνονται άνω με άγκυστρα ημικυκλικά ή ορθογωνικά στη πλάκα του άνω πέλματος. Οι αποστάσεις τους είναι σκόπιμο να τηρούνται μικρές, για να περιορίζεται η διατμητική ρηγμάτωση, (80 έως 200mm,  $\varnothing$  18 έως 18mm).

Για την αναλυτική προμέτρηση των υλικών απαιτείται λεπτομερή υπολογισμός των ποσοτήτων χάλυβα και σκυροδέματος που θα χρειαστούν σε κάθε τμήμα της κατασκευής χωριστά, έτσι λοιπόν προκύπτουν τα εξής :

- Για τη θεμελίωση των Ακροβάθρων-Μεσοβάθρων:
  - 1] Πάσσαλοι
    - α) χάλυβας :  $24 \times 0.5995 \text{ m}^3 = 14.388 \text{ m}^3$
    - β) σκυρόδεμα :  $24 \times 47.124 \text{ m}^3 = 1,130.973 \text{ m}^3$
  - 2] Πέδιλα Ακροβάθρων
    - α) χάλυβας :  $2 \times 1.5356 \text{ m}^3 = 3.0712 \text{ m}^3$
    - β) σκυρόδεμα :  $2 \times 261.690 \text{ m}^3 = 523.380 \text{ m}^3$
  - 3] Πέδιλα Μεσοβάθρων
    - α) χάλυβας :  $2 \times 2.4258 \text{ m}^3 = 4.8516 \text{ m}^3$
    - β) σκυρόδεμα :  $2 \times 423.500 \text{ m}^3 = 847.000 \text{ m}^3$
- Για τους κορμούς των μεσοβάθρων:
  - 1] Μεσόβαθρο 1:
    - α) χάλυβας :  $4.8103 \text{ m}^3$
    - β) σκυρόδεμα :  $678.584 \text{ m}^3$
  - 2] Μεσόβαθρο 2:
    - α) χάλυβας :  $3.3066 \text{ m}^3$
    - β) σκυρόδεμα :  $402.9087 \text{ m}^3$
- Για το κατάστρωμα της γέφυρας:
  - α) χάλυβας :  $79.2715 \text{ m}^3$
  - β) σκυρόδεμα :  $4,246.5 \text{ m}^3$

#### ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ:

Συνολικό Κόστος Σκυροδέματος =  $7829.35 \text{ m}^3 \times 80\text{€/m}^3 = \mathbf{626,348\text{€}}$

Συνολικό Κόστος Χάλυβα =  $109.70\text{m}^3 \times 7850\text{Kg/m}^3 = 861,145\text{Kg}$

$861,145\text{Kg} \times 0,90\text{€/Kg} = \mathbf{775,031\text{€}}$

Για τον υπολογισμό του προϋπολογισμού χρησιμοποιούμε τους εξής τύπους για την αντίστοιχη μηχανοποιημένη μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε:

β. Μέθοδος σταδιακής προώθησης (ή μέθοδος προώθησης του φορέα ανωδομής):

$$K_M = (10.000 + 5.500 * h) * \left(1 + \frac{L_M}{100}\right) \quad (1\beta)$$

$$K_\theta = (50.000 + 5.000 * h) * \left(1 + \frac{L_M}{100}\right) \quad (2\beta)$$

$$K_{AN} = 45.000 + 110 * L_{AN}^2 \quad (3\beta)$$

$$K_{EE} = 500.000 \text{ €}$$

Κόστος

Εξοπλισμού και Εγκατάστασης Εργοταξίου = 500,000€

Κόστος Θεμελίωσης Βάθρων = 1,224,500€

Κόστος Φορέα Ανωδομής = 2,496,750€

Κόστος Κατασκευής Μεσοβάθρων = 649,600€

**Συνολικός Προϋπολογισμός Έργου = 4,870,850€**

Η διαχείριση ενός κατασκευαστικού έργου είναι χωρίς αμφιβολία ένα σύνθετο και πολύπλοκο αντικείμενο και ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η σωστή αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν απαιτεί πολλαπλές δεξιότητες και ένα ευρύτερο πεδίο γνώσεων προκειμένου να γίνει μία διαχείριση αποτελεσματική. Ο διαχειριστής έργου πρέπει να καθορίζει το εύρος της απόκλισης του σχεδιασμού από την τελική εφαρμογή στην ακολουθία σχεδιασμός-εποπτεία-έλεγχος.

- Στη **φάση της σύλληψης** και του σχεδιασμού του έργου, η διαχείριση του αναφέρεται στη διαδικασία εκπονήσεως των μελετών και στην λήψη όλων των απαραίτητων για την απρόσκοπτη εξέλιξη του έργου μέτρων και στον καθορισμό και προγραμματισμό των μέσων παραγωγής (ανθρώπων, μηχανημάτων, κεφαλαίων)
- Στο **πρακτικό επίπεδο** η διαχείριση του έργου είναι η ανταπόκριση του υπεύθυνου Μηχανικού στα προβλήματα της κατασκευής, στις καθυστερήσεις, στις αλλαγές και στις απρόβλεπτες καταστάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται κατά την πρόοδο του έργου.

Ως **δραστηριότητες προγραμματισμού** του έργου νοούνται οι επι μέρους λεπτομερείς εργασίες, ενέργειες ή στάδια εκτέλεσης που απαιτούνται να εκτελεστούν για την περάτωση ενός έργου. Συνήθως οι δραστηριότητες εκτέλεσης ενός έργου καλύπτουν όλα τα τεχνικά δεδομένα του έργου με τη σειρά της εκτιμώμενης πραγματοποίησής τους. Ο αριθμός των δραστηριοτήτων του προγραμματισμού εκτέλεσης ενός έργου είναι συνάρτηση αφενός μεν των απαιτήσεων (συμβατικών ή όχι) που τίθενται, αφετέρου δε της δυνατότητας που υπάρχει για τον έλεγχο, παρακολούθηση και ενημέρωση του. Ένας εύλογος αριθμός δραστηριοτήτων παρέχει τη δυνατότητα άμεσου ελέγχου, παρακολούθησης και ενημέρωσης (προόδου), ενώ μια λεπτομερέστατη καταγραφή δραστηριοτήτων οδηγεί σε μεγάλο αριθμό δραστηριοτήτων και σε πλέον σύνθετες τεχνικές παρακολούθησης. Είναι φανερό ότι μια λεπτομερέστατη καταγραφή δραστηριοτήτων οδηγεί σε δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης και με κάθε λεπτομέρεια των απαιτούμενων πόρων εκτέλεσης του έργου. *Οι κυριότερες δραστηριότητες του έργου της κατασκευής της γέφυρας είναι οι εξής :*

- Χωματοουργικά.
- Θεμελίωση.
- Κατασκευή φέροντος σκελετού.
- Τοποθέτηση οδοστρωσίας και ασφαλτικών.
- Κατασκευή πεζοδρομίων, καναλιών εγκιβωτισμού έρματος.
- Εργασίες στεγανοποίησης, αποστράγγισης, σκυρόδεμα κλίσεων.
- Τοποθέτηση αρμών και κιγκλιδωμάτων.

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η έναρξη της κατασκευής γίνεται από τα μεσόβαθρα M1, M2, ενώ παράλληλα γίνεται και η τμηματική κατασκευή των ακρόβαθρων A1, A2. Αφού ολοκληρωθεί τουλάχιστον η κατασκευή των A1 και M1 τοποθετείται το εργοτάξιο πριν το A1 σε απόσταση 1,2 φορές το μήκος του από το ακρόβαθρο, όπου θα φέρει το χώρο προκατασκευής και προώθησης. Επόμενο στάδιο είναι η σταδιακή προώθηση του φορέα ανωδομής με τη τοποθέτηση του μεταλλικού ρύγχους στην αρχική του θέση και τη σταδιακή προώθηση των προκατασκευασμένων σπονδύλων επάνω στα μεσόβαθρα όπου γίνεται η ολίσθηση του καταστρώματος με τη βοήθεια των εφεδράνων, η οποία ακολουθεί την εξής δομή A1-M1-M2-A2. Επειδή τα ανοίγματα της γέφυρας είναι μεγάλα, τοποθετείται στο μέσον καθενός από αυτά ένα προσωρινό βοηθητικό μεταλλικό βάθρο και με το ρύγχος επιτυγχάνεται η μείωση των ροπών προβόλου που δημιουργούνται.

Για κάθε μεσόβαθρο προηγούνται οι εξής εργασίες:

- η κατασκευή των πασσάλων.
- η κατασκευή του πασσαλοδέσμου.
- η κατασκευή του κορμού του μεσοβάθρου με την βοήθεια αναρριχώμενου ξυλοτύπου.

### Χαρακτηριστικά στοιχεία βάθρων:

Βάθρο	A1	M1	M2	A2
Βάθος Θεμελίωσης	21.00	25.50	26.00	20.50
Πάσσαλοι	3	9	9	3

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι απαραίτητες εργασίες κατασκευής της γέφυρας:

	<u>Εργασίες</u>	<u>Κωδικός Αρίθμησης</u>	<u>Προαπαιτούμενη Εργασία</u>
	Λήψη Μέτρων Ασφαλείας	1	-
<u>Χωματουργικά</u>	Εκσκαφές Ακροβάθρων-Μεσοβάθρων	2	1
	Αντιστήριξη Πρανών Τοποθέτηση πασσάλων	3	2
	Επιχωμάτωση	4	3

Κατασκευή Φέροντος Σκελετού	Κατασκευή Μεσοβάθρων M1-M2	5	4
	Κατασκευή Ακροβάθρων A1-A2	6	4
	Τοποθέτηση Εργοταξίου Προκατασκευής-Πρωώθησης	7	6
	Σταδιακή Πρωώθηση Φορέα	8	7
	Απομάκρυνση Ξυλοτύπων	9	8
Λοιπές Εργασίες	Τοποθέτηση Οδοστρωσίας-Ασφαλτικών	10	9
	Κατασκευή πεζοδρομίων	11	9
	Κατασκευή καναλιών εγκιβωτισμού έρματος	12	9
	Ηλεκτρολογικές/Μηχανολογικές Εγκαταστάσεις	13	9
	Εργασίες Στεγανοποίησης	14	12
	Τοποθέτηση αρμών και κιγκλιδωμάτων	15	14
	Αποκατάσταση Χώρου	16	15
	Παράδοση Έργου	17	16

#### Εβδομαδιαίος κύκλος εργασιών καταστρώματος.

Δ	Τ	Τ	Π	Π	Σ	Κ

- Έλεγχος αντοχής σκυροδέματος. Επιβολή προεντάσεως. Καταβιβασμός εσωτερικού-εξωτερικού μεταλλότυπου. Δ
- Πρωώθηση φορέα – Καθαρισμός, επαν/ση του εξωτερικού μεταλλ/που. Δ
- Τοποθέτηση προκατασκευασμένου οπλισμού κάτω πλάκας. Ολοκλήρωση εγκάρσιας προέντασης προηγούμενου τμήματος. Δ - Τ
- Ολοκλήρωση οπλισμού κάτω πλάκας. Τοποθετούνται οι διαμήκεις και παραβολικοί τένοντες. Τοποθέτηση εσωτερικού μεταλλ/που. Τ
- Τελικές ρυθμίσεις μεταλλ/πων. Σκυροδέτηση κάτω πλάκας και κορμών. Τ
- Απομάκρυνση μετ/που κορμών. Τοποθέτηση μετ/που άνω πλάκας. Τοποθέτηση οπλισμού άνω πλάκας. Π
- Ολοκλήρωση του οπλισμού της άνω πλάκας. Σκυροδέτηση της πλάκας. Π
- Σκλήρυνση σκυροδέματος. Συντήρηση εξοπλισμού. Τ - Π - Π - Σ - Κ

Τέλος παρακάτω παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα του έργου υπολογίζοντας τις εργασίες σε ημέρες με μια εύλογη παραδοχή της διάρκειας των εργασιών, απ' όπου προκύπτει ότι όλες οι δραστηριότητες είναι κρίσιμης σημασίας και η κατασκευή της γέφυρας θα διαρκέσει **208 ημέρες**.



Πίνακας: Το Χρονοδιάγραμμα του Έργου

Δραστηριότητες	Διάρκεια	Προαπαιτούμενη	Νωρίτερος Χρόνος		Επόμενη	Βραδύτερος Χρόνος		Συνολικό Χρονικό Περιθώριο
			Αρχή	Τέλος		Αρχή	Τέλος	
1	3	-	0	3	2	0	3	0
2	25	1	3	28	3	3	28	0
3	7	2	28	35	4	28	35	0
4	7	3	35	42	5,6	35	42	0
5	40	4	42	82	-	42	82	0
6	35	4	42	77	7	42	77	0
7	3	6	77	80	8	77	80	0
8	90	7	80	170	9	80	170	0
9	8	8	170	178	10,11,12,13	170	178	0
10	30	9	178	208	-	178	208	0
11	10	9	178	188	-	178	188	0
12	8	9	178	186	14	178	186	0
13	8	9	178	186	-	178	186	0
14	6	12	186	192	15	186	192	0
15	6	14	192	198	16	192	198	0
16	7	15	198	205	17	198	205	0
17	3	16	205	208	-	205	208	0

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- «Γεφυροποιία», Καθηγητής Δημήτριος Κωνσταντινίδης, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τε, Τομέας Τεχνικών Έργων, Ιανουάριος 2012.
- Πτυχιακή Εργασία : «Προγραμματισμός των εργασιών για την κατασκευή γέφυρας της ΤΡΑΙΝΟΣΕ. Κοστολόγηση και Εφαρμογή των μέτρων ασφαλείας. Κοστολόγηση της κατασκευής. Προγραμματισμός εργασιών. Διαμόρφωση και επίλυση δικτύου. Διαμόρφωση πίνακα χρόνων δραστηριοτήτων και μετατροπή δικτύου σε διάγραμμα Gantt», Διονυσίου Αντώνης, Μέντης Παναγιώτης, Παπανικολάου Βασίλης, ΑΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τε, Σεπτέμβριος 2013.
- Παρουσίαση με θέμα «Γέφυρες κατασκευασμένες με την μέθοδο της σταδιακής προώθησης», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ι.Σιγαλάς,, Αθήνα 2014.
- «Ολόσωμες Κατασκευές, Τόμος 6<sup>ος</sup>, Ολόσωμες Γέφυρες», 1η έκδοση, Leonhardt Fritz, Monnig Eduard, 1980.
- Παρουσίαση «Τρωτότητα γεφυρών Ο/Σ σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης», Σ. Στεφανίδου, Α.Κάππος, 4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής, Αθήνα 2019.
- «Aging Considerations in the Development of Time-Dependent Seismic Fragility Curves» Jayadipta Ghosh, S.M.ASCE<sup>1</sup> and Jamie E. Padgett, A.M.ASCE, Article in Journal of Structural Engineering, December 2010.
- EN 1991, Ευρωκώδικας 1, «Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις στις κατασκευές».
- EN 1993, Ευρωκώδικας 3, «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα».
- EN 1994, Ευρωκώδικας 4, «Σχεδιασμός σύμμικτων φορέων από χάλυβα και σκυρόδεμα».
- EN 1998, Ευρωκώδικας 8, «Αντισεισμικός σχεδιασμός».
- [portal.tee.gr](http://portal.tee.gr)
- [el.wikipedia.org](http://el.wikipedia.org)
- [www.costonline.gr](http://www.costonline.gr)
- [www.halyvourgiki.com](http://www.halyvourgiki.com)
- [www.elsevier.com/locate/engstruct](http://www.elsevier.com/locate/engstruct)
- [www.researchgate.net/publication](http://www.researchgate.net/publication)