



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Ανάλυση Σύμμικτων Γεφυρών σε Κόπωση



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Γ. Γιαννάτος

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012 40

Γιαννάτος Σ. Γ. (2012).
Ανάλυση Σύμμικτων Γεφυρών σε Κόπωση
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/40
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Giannatos S. G. (2012).
Analysis of Composite Bridges to Fatigue
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2012/40
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract.....	3
Ευχαριστίες	4
1 Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Κόπωση – θεωρητικά στοιχεία.....	6
1.2.1 Γενικά στοιχεία – Μηχανισμός Κόπωσης	6
1.2.2 Αντοχή σε Κόπωση	7
1.2.3 Κανόνες και σχέσεις.....	10
1.3 Δοκιμή Κόπωσης.....	13
1.3.1 Περιγραφή.....	13
1.3.2 Δοκιμές εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής	14
1.3.3 Δοκιμές εστιασμένες στην προώθηση της ρωγμής	20
1.4 Σύντομη αναφορά στις σιδηροδρομικές γέφυρες	23
1.5 Ιστορική Αναδρομή - Γνωστές Περιπτώσεις Καταρρεύσεων λόγω κόπωσης	26
1.5.1 Εισαγωγή – Ιστορική Αναδρομή.....	26
1.5.2 Ατύχημα τρένου στις Βερσαλλίες (1842).....	27
1.5.3 Ανατροπή πετρελαϊκής πλατφόρμας Alexander L. Kielland (1980).....	28
1.5.4 Αεροπορικά δυστυχήματα της BOAC Flight 781 και South African Airways Flight 201 (1954).....	29
2 Μέθοδος Δεξαμενής – Κώδικας σε Visual Basic.....	31
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Εφαρμογή στο Excel	31
2.3 Κώδικας σε Visual Basic.....	32
3 Εφαρμογή Ελέγχου Κόπωσης σε σύμμικτη γέφυρα τεσσάρων ανοιγμάτων μεταλλικής κύριας δοκού	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Κανονιστικό πλαίσιο	44
3.3 Περιγραφή Φορέα	50
3.4 Εφαρμογή Ελέγχου Κόπωσης.....	56
3.4.1 Έλεγχος έναντι κόπωσης με την απλοποιημένη μέθοδο του Ευρωκώδικα	56
3.4.2 Έλεγχος έναντι κόπωσης με τη γενική μέθοδο (μοντέλο φόρτισης 4).....	66
4 Συμπεράσματα.....	72
5 Βιβλιογραφία.....	74
Παράρτημα Α. Κατηγορίες λεπτομερειών	76
Παράρτημα Β. Επίλυση με τη γενική μέθοδο των φορτηγών του σημείου +100m της γέφυρας.....	82
Παράρτημα Γ. Εικόνες Μεθόδου Δεξαμενής – Διαγράμματα και Ιστογράμματα	86
Παράρτημα Δ. Λωρίδες Κυκλοφορίας – Περιπτώσεις.....	99

Ανάλυση Σύμμικτων Γεφυρών σε Κόπωση

Γιαννάτος Σ. Γ. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Το θέμα με το οποίο ασχολείται αυτή η διπλωματική εργασία είναι η ανάλυση σύμμικτων γεφυρών σε Κόπωση.

Αρχικά, γίνεται μια παρουσίαση, θεωρητικώς, του φαινομένου της κόπωσης των υλικών, και ειδικότερα των μετάλλων, και δίνονται κανόνες και νόμοι που διέπουν το μηχανισμό του. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται η δοκιμή της κόπωσης με όλα τα χαρακτηριστικά και τις διαδικασίες που ακολουθούνται, δηλαδή τις πειραματικές διατάξεις, τα προσδοκώμενα αποτελέσματα και τις αναλύσεις.

Για την καλύτερη -και σφαιρικότερη- κατανόηση του αναγνώστη ως προς το φαινόμενο της κόπωσης και των συνεπειών της αγνόησης (μη εξέτασης) του, κρίνεται αναγκαίο να παρουσιαστούν τρεις περιπτώσεις φαινομένων κατάρρευσης φορέων λόγω κόπωσης μετάλλων, ακόμα και αν αυτές δεν αφορούν το άμεσο αντικείμενο της διπλωματικής, που είναι οι (σύμμικτες) γέφυρες, καθώς και μια σύντομη αναφορά στις σιδηροδρομικές γέφυρες που επηρεάζονται ιδιαίτερα από το φαινόμενο.

Η διπλωματική εκπονήθηκε σε δυο στάδια ανάλυσης. Το πρώτο έχει να κάνει με την πιο διαδεδομένη μέθοδο ανάλυσης των τυχουσών ανακυκλιζόμενων ορθών τάσεων –που κατά κόρον προκαλούν τις ρωγμές λόγω κόπωσης-, δηλαδή τη μέθοδο της δεξαμενής. Σ' αυτή την φάση, παρουσιάζεται σε μορφή κώδικα Visual Basic (στο Microsoft Excel) η μέθοδος της δεξαμενής.

Στο δεύτερο στάδιο, αναλύθηκε και ελέγχθηκε έναντι κόπωσης σύμμικτη γέφυρα τεσσάρων ανοιγμάτων μεταλλικού κύριου φορέα, συγκολλητής διατομής. Έγινε έλεγχος με τη μέθοδο του Ευρωκώδικα, όπου χρησιμοποιούνται συντελεστές και ο έλεγχος γίνεται με βάση τη διαφορά τάσεων ($\Delta\sigma$), και έλεγχος με τη γενικότερη μέθοδο των φορηγών, με το μοντέλο φόρτισης 4 του Ευρωκώδικα, με βάση τους κύκλους φόρτισης.

Παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος των φορηγών είναι πολύ πιο ακριβής και στον εν λόγω φορέα δεν είχε σχεδόν καμία επιρροή, δηλαδή δεν «έδειχνε» καμία ζημιά.

Τέλος, παρατηρήθηκε μια ανισοκατανομή της επιρροής των φορηγών σε σχέση με το βάρος τους. Δηλαδή, δεν είναι γενικό επακόλουθο ότι όλα τα σημεία των διατομών θα υποστούν μεγαλύτερη καταπόνηση από το βαρύτερο φορηγό.

Analysis of Composite Bridges to Fatigue

Giannatos S. G. (supervised by Vayas I.)

Abstract

The issue addressed by this diploma thesis is the analysis of composite bridges to Fatigue.

Initially, I present, theoretically, the phenomenon of fatigue of materials, especially metals, and give rules and laws governing the mechanism. In addition, I present the fatigue test with all the features and procedures which are followed, such as experimental devices, expected results and analyzes.

For a better and more comprehensive understanding of the reader as to the effect of fatigue and the effects of ignoring (non-test) it, it is necessary to present three cases of collapsing due to fatigue of metal bodies, even if they are not related to the direct object of this thesis, which is the (composite) bridges. Furthermore, a brief reference to railway bridges, particularly affected by this phenomenon, is added.

The thesis is developed in two stages of analysis. The first has to do with the most common methodology for arbitrary cyclic stress -that routinely cause cracks due to fatigue- ie the reservoir method. In this phase, the method is shown in form of a code of Visual Basic (in Microsoft Excel).

In the second stage, a composite bridge with four openings and steel main body, with welded section, is analyzed and checked against fatigue. The check operated with the method of Eurocode, which uses factors and control is based on the stress range (σ_s), and with the general method of trucks by loading model 4 of Eurocode, based on the loading cycles.

The most important observation is that the method of trucks is more accurate and in the bridge had virtually no influence, ie "showing" no damage.

Finally, the fifth truck presented greater influence on the web of the second test section than the heavier third truck. This shows that, in such loading (general fatigue method), there is no rule that in all the fibres of the cross-sections we have greater stress concentration from the heavier truck. Therefore, we have inequality at the influence of the loading trucks.

Ευχαριστίες

Για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθώς και την επίβλεψη που έκανε σ' αυτή τη διπλωματική εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο καθηγητή Ι. Βάγια.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και τη γραμματεία του, για την βοήθεια και τις πληροφορίες-πηγές που μου παρείχε.

Επίσης, ευχαριστώ όλους τους φίλους που ήμασταν μαζί όλα αυτά τα χρόνια, και εντός και εκτός σχολής. Τα παιδιά που στην ουσία μεγαλώσαμε μαζί, τους αδερφικούς μου φίλους και φίλες, την παρέα. Αλλά και τους φίλους που γνωριστήκαμε εδώ, περάσαμε από πολλά και δεθήκαμε με απίστευτο τρόπο.

Και τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε και μου παρείχε ότι χρειαζόμουν.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι το φαινόμενο της κόπωσης των μετάλλων, και ειδικά των σιδηρών γεφυρών, και γίνεται μια εφαρμογή του ελέγχου κόπωσης σε σύμμικτη γέφυρα.

Τα κίνητρα της εργασίας ανιχνεύονται στην ίδια την φύση του φαινομένου. Η κόπωση είναι υπαρκτή σε όλες της κατασκευές. Η κόπωση των μετάλλων ειδικότερα, και κυρίως στις κατασκευές που αποτελούν κύριους φορείς, δηλαδή σιδηρές και σύμμικτες, αποτελεί απαραίτητο τομέα εξέτασης. Η μορφή πραγματικής επιβολής της, δηλαδή όχι απευθείας σαν φορτίο αλλά σαν αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενων τάσεων, «κρύβει» τις σοβαρές επιπτώσεις της στην ασφάλεια και λειτουργικότητα της κατασκευής. Στις οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες, με τη συχνή διέλευση βαρέων οχημάτων, και άρα άσκηση μεγάλων ευρών εναλλασσόμενων τάσεων, ο έλεγχος έναντι κόπωσης κρίνεται αναγκαίος.

Η εργασία ξεκινά με μια περιγραφή του φαινομένου της κόπωσης και της θεωρίας που το ακολουθεί. Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι μαθηματικές σχέσεις μηχανικής των υλικών που καλύπτουν την κόπωση και οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης. Ολοκληρώνεται με την περιγραφή της εργαστηριακής δοκιμής κόπωσης, με τις εργαστηριακές διατάξεις, τα προσδοκώμενα αποτελέσματα και τις αναλύσεις και μεθόδους που χρησιμοποιούνται.

Στη συνέχεια, αφού αναφερθούμε λίγο στις σιδηροδρομικές γέφυρες που επηρεάζονται από το φαινόμενο με πολύ σοβαρές συνέπειες, γίνεται μια σύντομη σχηματική ιστορική αναδρομή της μελέτης του φαινομένου και παρουσιάζονται οι διάσημες περιπτώσεις καταρρεύσεων λόγω κόπωσης που έχουν καταγραφεί, ανεξαρτήτως τομέα εφαρμογής. Εστιάζει στη σοβαρότητα του φαινομένου και γίνεται αναφορά στις μελέτες επάνω στα ατυχήματα και τα αίτια που τα προκάλεσαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μπαίνοντας στο αναλυτικό μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται η μέθοδος της δεξαμενής σε μορφή κώδικα Visual Basic του Excel. Ο κώδικας παρουσιάζεται με επεξηγηματικές υποσημειώσεις, και περιγράφει μια μετατροπή τυχούσας φόρτισης υπό μορφή τάσεων σε ιστόγραμμα μέγιστων τασικών διαφορών και αντίστοιχων κύκλων φόρτισης.

Στο τρίτο κεφάλαιο και δεύτερο μέρος της ανάλυσης της διπλωματικής εργασίας, γίνεται παρουσίαση της μορφής του ελέγχου σε κόπωση στις σιδηρές και σύμμικτες γέφυρες, καλύπτεται το πλέγμα του κανονισμού (Ευρωκώδικας, EN) που διέπει τους ελέγχους κόπωσης στις σιδηρές και σύμμικτες κατασκευές, και πραγματοποιείται έλεγχος σε δοθείσα σύμμικτη γέφυρα μεταλλικού κύριου φορέα (ανοιχτής συγκολλητής διατομής) και σύμμικτου καταστρώματος. Παρουσιάζεται στατική ανάλυση με χρήση προγράμματος Nemetschek SCIA Engineer, και γίνεται έλεγχος με το μέθοδο του Ευρωκώδικα και με τη γενική μέθοδο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία, όσον αφορά τη μελέτη του φαινομένου της κόπωσης στις σύμμικτες γέφυρες.

Στο τέλος, παραθέτονται οι βιβλιογραφικές αναφορές και παραρτήματα.

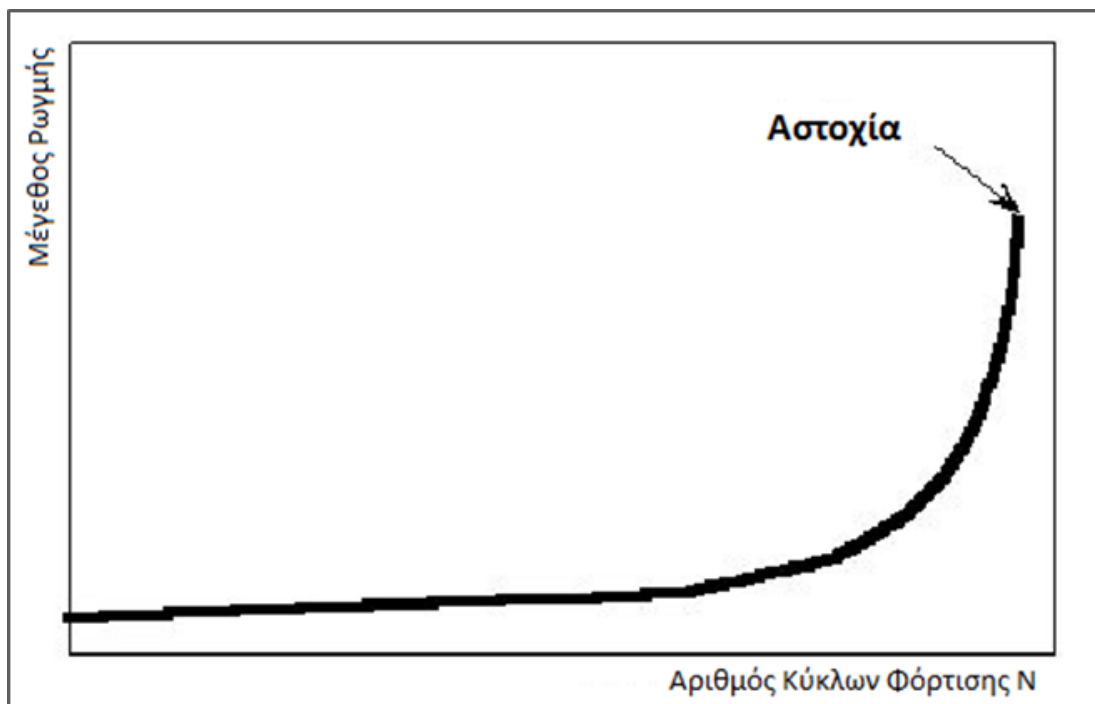
1.2 Κόπωση – θεωρητικά στοιχεία

1.2.1 Γενικά στοιχεία – Μηχανισμός Κόπωσης

Κόπωση ονομάζεται ο μηχανισμός κατά τον οποίο σχηματίζονται και αυξάνονται ρωγμές στην κατασκευή, υπό την επίδραση μεταβαλλόμενων τάσεων. Η τελική αστοχία επέρχεται συνήθως σε περιοχές εφελκυστικών τάσεων, όταν η μειωμένη διατομή δεν μπορεί να παραλάβει τα φορτία χωρίς θραύση. (Βάγιας, 2012) Η κόπωση εμφανίζεται ως μορφή αστοχίας σε έργα που υποβάλλονται σε δυναμικές φορτίσεις με μεγάλο αριθμό κύκλων, όπως γέφυρες, γερανοδοκοί, ανεμογεννήτριες κλπ. Υπό οιονεί σταθερές φορτίσεις, π.χ. μόνιμα φορτία, δεν αυξάνουν οι ρωγμές και δεν υφίσταται κίνδυνος κόπωσης. Επειδή ως κύριος παράγοντας της εμφάνισης της κόπωσης είναι, πλην του αριθμού των κύκλων φόρτισης, το εύρος των τάσεων, ιδιαίτερα ευαίσθητες είναι οι γέφυρες μικρού έως μεσαίου ανοίγματος όπου ο λόγος των φορτίων κυκλοφορίας προς τα μόνιμα φορτία είναι μεγάλος.

Η κόπωση είναι ένα τοπικό φαινόμενο, δεδομένου ότι ρωγμές εμφανίζονται σε ορισμένα μόνο σημεία του φορέα με συγκέντρωση τάσεων. Τέτοια σημεία είναι οπές σε θέσεις κοχλιών, απότομες μεταβολές της διατομής (όπως σε θέσεις νευρώσεων), ή συγκολλήσεις. Οι συγκολλήσεις είναι ευαίσθητες λόγω μεταλλουργικών αλλοιώσεων του χάλυβα που ευνοούν την ανάπτυξη ρωγμών και τραχύτητας της υφής τους, ιδιαίτερα στις περιοχές λαιμού και της ρίζας.

Στο Σχήμα 1.1 δίδεται τυπικό διάγραμμα συνάρτησης του μεγέθους ρωγμής και του αριθμού κύκλων (N) της φόρτισης.



Σχήμα 1.1: Ποιοτικό Διάγραμμα Μεγέθους Ρωγμής - Αριθμού Κύκλων Φόρτισης N , μέχρι την Αστοχία (Βάγιας, 2012)

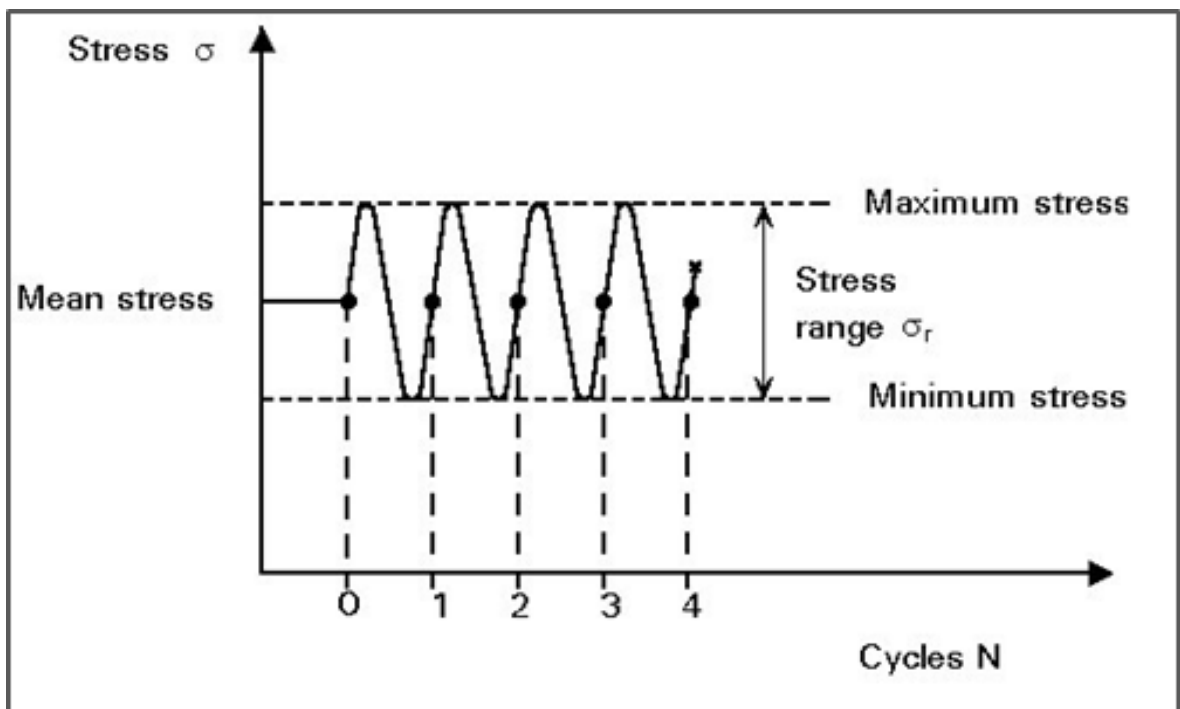
1.2.2 Αντοχή σε Κόπωση

Η αντοχή σε κόπωση δεν εξαρτάται από το όριο διαρροής ή την εφελκυστική αντοχή των κοινών χαλύβων. Υπολογίζεται σε συνάρτηση των κύκλων φόρτισης. Αυτοί μπορεί να είναι είτε σταθερού εύρους, είτε μεταβλητού, που είναι και η συνήθης κατάσταση στις πραγματικές κατασκευές.

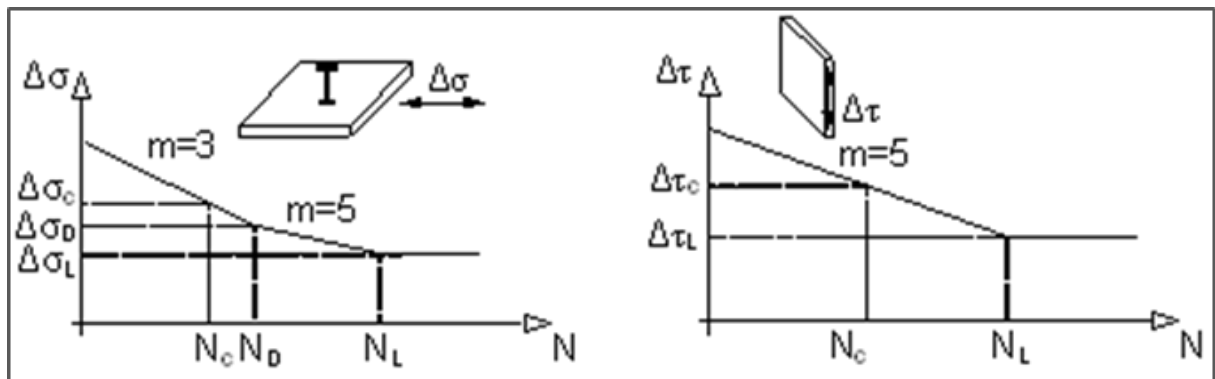
1.2.2.1 Αντοχή σε Κόπωση κύκλων σταθερού εύρους

Για σταθερούς κύκλους φόρτισης, η αντοχή εξαρτάται από τον αριθμό των επιβαλλόμενων κύκλων N και το εύρος των επιβαλλόμενων τάσεων (Σχήμα 1.2).

Η αντοχή σε κόπωση δίνεται από καμπύλες S-N (ή καμπύλες Wöhler) με τετμημένο τον αριθμό των κύκλων N και τεταγμένη το εύρος τάσεων (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.2: Εύρος Τάσεων (Βάγιας, 2012)



Σχήμα 1.3: Καμπύλες Κόπωσης S-N (Wöhler) (Βάγιας, 2012)

Η ονομαστική αντοχή σε κόπωση $\Delta\sigma_c$ είναι το εύρος τάσεων για $N_c = 2 \cdot 10^6$ (2 εκατομ.) κύκλους. Ο αριθμός των κύκλων συναρτάται σε λογαριθμική κλίμακα γραμμικά με το εύρος τάσεων και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\log N = \log a - m \log \Delta\sigma_R \quad (1.1)$$

Η κλίση της ευθείας έχει για δομικό χάλυβα την τιμή $m = 3$ και αλλάζει σε $m = 5$ για αριθμό κύκλων $N_D = 5 \cdot 10^6$ και εύρος τάσεων $\Delta\sigma_D$, ενώ για αριθμό κύκλων $N_L = 10^8$ η αντοχή σε κόπωση $\Delta\sigma_L$ παραμένει σταθερή. Σε περιοχές σταθερής κλίσης η εξ. (1.1) εκφράζεται και από τη σχέση:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} \right)^m = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{ή} \quad \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{1/m} \quad (1.2)$$

Για παράδειγμα στην περιοχή με $m = 3$ είναι:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_C} \right)^3 = \frac{N_C}{N_D} = \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma_D = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C \quad (1.3)$$

ενώ στην περιοχή με $m = 5$ είναι:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_D} \right)^5 = \frac{N_D}{N_L} = \frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8} \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma_L = 0,549 \cdot \Delta\sigma_D \quad (1.4)$$

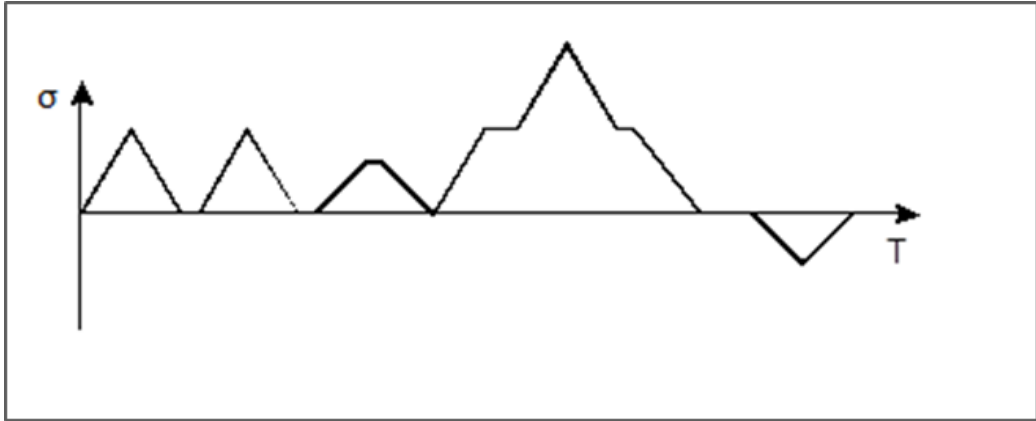
Με τη βοήθεια του διαγράμματος S-N μπορεί να υπολογισθεί η βλάβη που προκαλεί μία επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Έστω ότι επιβάλλονται n_1 κύκλοι εύρους τάσεων $\Delta\sigma_1$. Από την καμπύλη S-N προσδιορίζεται ο αριθμός των κύκλων αντοχής σε κόπωση N_1 για το συγκεκριμένο εύρος. Η προκαλούμενη βλάβη δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{n_1}{N_1} \quad (1.5)$$

Είναι προφανές ότι $0 \leq D \leq 1$. Για $D = 0$ δεν υπάρχει καμία βλάβη, ενώ για $D = 1$ υπάρχει αστοχία.

1.2.2.2 Αντοχή σε Κόπωση κύκλων μεταβλητού εύρους – Μέθοδος της δεξαμενής

Στην πράξη η επιβαλλόμενη φόρτιση είναι συνήθως μεταβλητού εύρους. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι ανάλυσης (π.χ. rainflow method). Η συνηθέστερη και αυτή που αναλύεται παρακάτω είναι η μέθοδος της δεξαμενής (reservoir method).

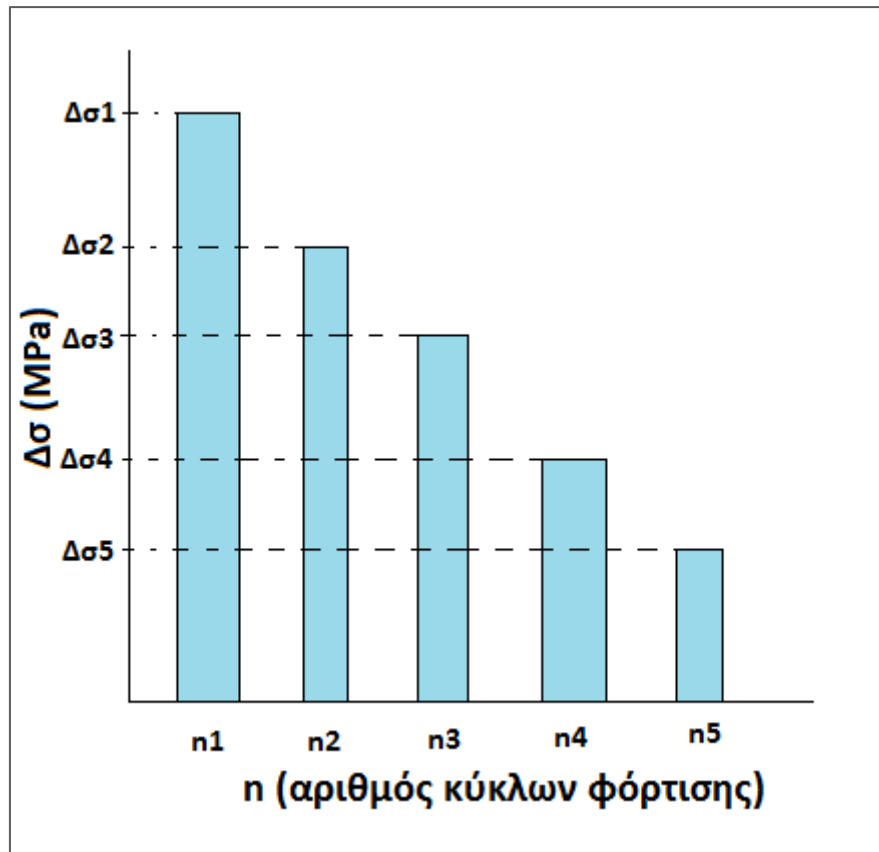


Σχήμα 1.4: Ιστορικό τάσεων λεπτομέρειας

Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής φαίνεται στο Σχήμα 1.4. το οποίο βασίζεται στο διάγραμμα σ - t που προκύπτει από μετρήσεις με μηχανοσυστοιχίες (strain gauges) συνδεδεμένα στην υπό μελέτη λεπτομέρεια της κατασκευής ή προσδιορίζεται με προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για τους σκοπούς της ανάλυσης σε κόπωση, φορτίσεις μεταβλητού εύρους μετατρέπονται σε τμήματα φορτίσεων σταθερού εύρους που αντιπροσωπεύουν το ιστογράμμα τάσεων. Σύμφωνα με τη μέθοδο, καταγράφεται κατ' αρχήν η διακύμανση της τάσης του εξεταζόμενου σημείου κατά τη διέλευση ενός οχήματος ή ενός συρμού στον φορέα. Το διάγραμμα συμπληρώνεται έτσι ώστε οι μέγιστες τιμές να απαντώνται δύο φορές. Στη συνέχεια το διάγραμμα γεμίζεται εν είδη δεξαμενής με νερό. Κατόπιν ανοίγεται μία τρύπα στο κατώτερο σημείο της δεξαμενής, η οποία αδειάζει μερικώς και σημειώνεται η διαφορά μέγιστης $\sigma_{\max,1}$ και ελάχιστης τάσης $\sigma_{\min,1}$. Η διαφορά των τάσεων $\Delta\sigma_1 = \sigma_{\max,1} - \sigma_{\min,1}$ δίνει το πρώτο, το μεγαλύτερο, εύρος τάσεων. Στη συνέχεια εκκενώνεται το αμέσως κατώτερο σημείο της δεξαμενής και προσδιορίζεται το δεύτερο μεγαλύτερο εύρος τάσεων $\Delta\sigma_2$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να αδειάσει πλήρως η δεξαμενή. Κάθε εύρος τάσεων έχει $n = 1$ κύκλους, εκτός αν κατά κάποιο άδειασμα εμφανιστούν δύο ακριβώς ίδια εύρη τάσεων. Επειδή αυτό σπάνια συμβαίνει, ομαδοποιούνται τα εύρη τάσεων σε ορισμένες τιμές (π.χ. ανά 10 MPa) ώστε να προκύπτουν περισσότεροι κύκλοι για κάθε ομάδα. Στο τέλος, καταρτίζεται το σχετικό ιστογράμμα τάσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5.

Συνίσταται το διάγραμμα να γυρίσει ανάποδα πριν ακολουθηθεί η άνωθεν διαδικασία. Βασική προϋπόθεση είναι ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά για μια μακρά χρονική περίοδο.



Σχήμα 1.5: Τυπικό ιστόγραμμα τάσεων

1.2.3 Κανόνες και σχέσεις

1.2.3.1 Κανόνας του Miner (Miner's rule) ή Υπόθεση Γραμμικής Βλάβης Palmgren-Miner (Palmgren-Miner linear damage hypothesis)

Το 1945 ο Miner διατύπωσε κατάλληλα ένα κριτήριο για τη γραμμική συσσώρευση βλαβών λόγω κόπωσης, το οποίο είχε προτείνει το 1924 ο Palmgren, ότι δηλαδή, η συνθήκη για αστοχία υπό κόπωση είναι:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C$$

Όπου:

n_i : ο αριθμός κύκλων φόρτισης με τάση S_i που έχει υποστεί μια κατασκευή

N_i : ο αριθμός κύκλων φόρτισης με την ίδια τάση S_i που προκαλεί αστοχία.

C : κλάσμα βλάβης (damage fraction)

k : Ο αριθμός των διαφορετικών μεγεθών τάσης (stress magnitudes) S_i ($1 \leq i \leq k$)

Πειραματικά έχει προκύψει ότι το C είναι μεταξύ 0,7 και 2,2. Για συνήθεις σχεδιαστικές ανάγκες το C θεωρείται 1.

Έτσι με τον κανόνα του Miner μπορεί να βρεθεί ποιο ποσοστό ζωής καταναλώνεται από κάθε μέγεθος και ο γραμμικός συνδυασμός τους.

Ποσοτικοποιώντας τη ζημιά δημιουργούνται τα εξής μεγέθη:

$$W_i = n_i \times S_i$$

$$W_{\text{Failure}} = N_i \times S_i$$

Για παράδειγμα, ας πούμε $W_{\text{Failure}} = 50$ για ένα στοιχείο. Έτσι, το στοιχείο θα αστοχήσει μετά από 10 κύκλους σε ένα επίπεδο έντασης 5, ή μετά από 25 κύκλους για να αστοχήσει σε επίπεδο έντασης 2, και ούτω καθεξής. Το W_{Failure} ως κρίσιμη ποσότητα βλάβης που θα οδηγήσει σε αστοχία.

Άρα ο κανόνας του Miner γίνεται:

$$\frac{\sum_{i=1}^k n_i \times S_i}{W_{\text{Failure}}} = C$$

Σωρευτική ζημιά (Cumulative damage)

Σωρευτική βλάβη είναι η συνεχώς προστιθέμενη ζημιά σύμφωνα με τον κανόνα Miner. Για παράδειγμα:

Έστω τα εξής στοιχεία έντασης σε ένα στοιχείο:

Τάση/Stress (μονάδα μέτρησης) Si	Κύκλοι Εφαρμογής / Test cycles ni	Ζημιά σε κάθε επίπεδο τάσης / Damage at stress level Wi	Σωρευτική Ζημιά / Cumulative Damage
15	4	60	60
30	4	120	180
45	4	180	360

(Weibull.com, 2010)

Μειονεκτήματα

Η σχέση του Miner αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο στη μελέτη της κόπωσης και χρησιμοποιείται κατά κόρον. Παρ' όλ' αυτά έχει συγκεκριμένους περιορισμούς:

1. Αποτυγχάνει να αναγνωρίσει την πιθανολογική φύση της κόπωσης και δεν υπάρχει απλός τρόπος για να συσχετιστεί η προβλεπόμενη από τον κανόνα αντοχή με τα χαρακτηριστικά μιας κατανομής πιθανοτήτων. Αναλυτές του κλάδου χρησιμοποιούν συχνά τις καμπύλες του σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τον υπολογισμό της διασποράς, για να βρουν τα N_i (S_i).

2. Υπάρχει, μερικές φορές μια ανατροπή στο πώς θα εμφανιστούν οι βλάβες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κύκλοι χαμηλών τάσεων ακολουθούνται από κύκλους υψηλών τάσεων, οι οποίοι προκαλούν μεγαλύτερη ζημιά από την προβλεπόμενη από τον κανόνα. Δεν λαμβάνει, συνεπώς, υπόψη το φαινόμενο της υπερφόρτωσης ή τις υψηλότερες τάσεις οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε απομένουσες θλιπτικές τάσεις. Υψηλές τάσεις ακολουθούμενες από χαμηλές μπορεί να έχουν μικρότερη ζημιά λόγω της παρουσίας των απομένουσων θλιπτικών τάσεων.

1.2.3.2 Σχέση του Paris (Paris Relationship)

Στη θραυστομηχανική οι Anderson, Gomez και Paris (1961) δημιούργησαν σχέσεις για το στάδιο II της προώθησης της ρωγμής με κύκλους N , χρησιμοποιώντας το ανακυκλιζόμενο στοιχείο ΔK του παράγοντα έντασης τάσης (stress intensity factor) K .

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

da : το μήκος της ρωγμής (crack length)

m : τυπικό μέγεθος με τιμές 3-5 για μέταλλα

Η σχέση αυτή αργότερα τροποποιήθηκε από τον Forman (1967) έτσι ώστε να έχει καλύτερη ανοχή, καλύτερο επιτρεπόμενο όριο όσον αφορά τη μέση τάση (mean stress).

Αυτό επετεύχθη με την εισαγωγή, στον παρονομαστή, ενός μεγέθους εξαρτώμενου του ($I-R$) όπου R :

$$R = \frac{\min S}{\max S}$$

$\min S$: ελάχιστη τάση (min stress)

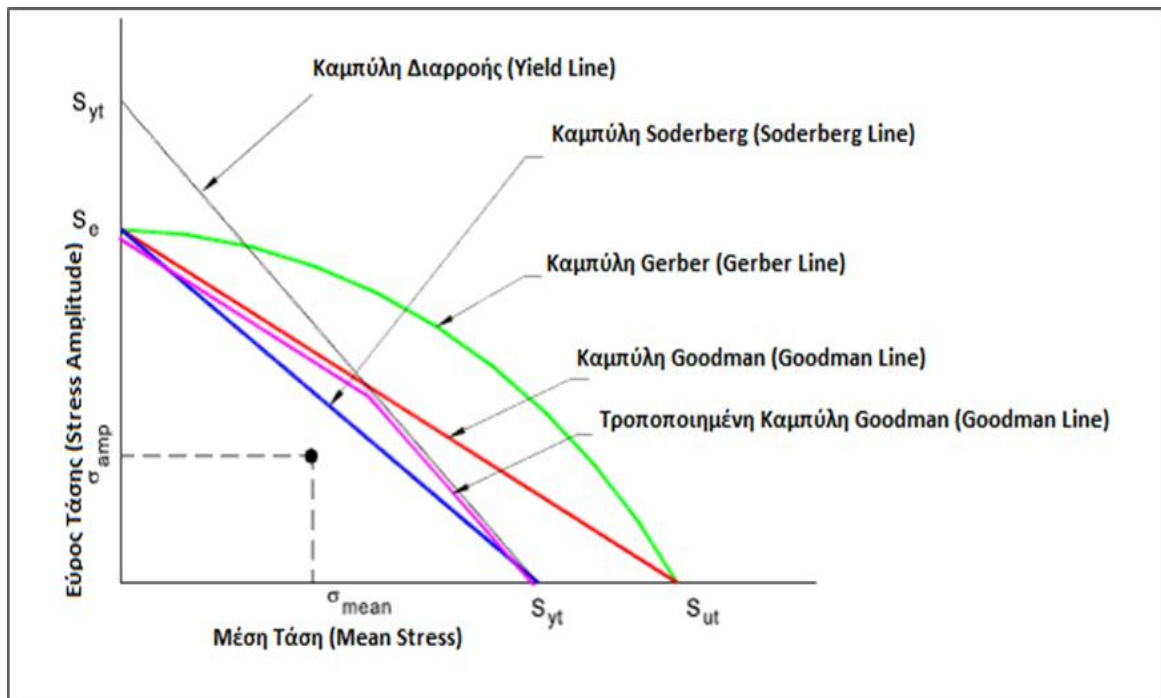
$\max S$: μέγιστη τάση (max stress)

(Paris, 1961)

1.2.3.3 Συσχέτιση του Goodman (Goodman Relation) και Κριτήρια Αστοχίας Goodman, Gerber και Soderberg

Η συσχέτιση Goodman μπορεί να υπολογίσει την κατάσταση αστοχίας σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις με παρουσία επάλληλων τάσεων. Συσχετίζει το εύρος τάσης με τη μέση τάση και βρίσκει το όριο κόπωσης και το όριο θραύσης του υλικού των δύο άκρων. Εναλλακτικά κριτήρια αστοχίας περιλαμβάνουν οι Soderberg και Gerber.

Σε συνήθειες φορτίσεις κόπωσης η μέση τάση έχει αμελητέα επιρροή σε σχέση με τις εναλλασσόμενες τάσεις. Τα κριτήρια αστοχίας που αναφέρθηκαν από πάνω φαίνονται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Κριτήρια Αστοχίας από Κόπωση Goodman, Gerber και Soderberg

Καμπύλη Soderberg

Αν ο συνδυασμός εύρους τάσεων - μέσης τάσης (σ_{amp} , σ_{mean}) βρίσκεται κάτω από την καμπύλη Soderberg τότε το στοιχείο είναι ασφαλές. Είναι ένα αρκετά συντηρητικό κριτήριο βασισμένο στο σημείο διαρροής του υλικού (S_{yt}). Η εξίσωση από τη οποία προκύπτει ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$\frac{K_f \sigma_{amp}}{S_e} + \frac{\sigma_{mean}}{S_{yt}} = \frac{1}{N_f}$$

Καμπύλη Goodman / Τροποποιημένη Καμπύλη Goodman

Αν ο συνδυασμός εύρους τάσεων - μέσης τάσης (σ_{amp} , σ_{mean}) βρίσκεται κάτω από την καμπύλη Goodman τότε το στοιχείο είναι ασφαλές. Είναι ένα λιγότερο συντηρητικό κριτήριο βασισμένο στο σημείο θραύσης του υλικού (S_{ut}). Η εξίσωση από τη από την οποία προκύπτει ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$\frac{K_f \sigma_{amp}}{S_e} + \frac{\sigma_{mean}}{S_{ut}} = \frac{1}{N_f}$$

Καμπύλη Gerber

Αν ο συνδυασμός εύρους τάσεων - μέσης τάσης (σ_{amp} , σ_{mean}) βρίσκεται κάτω από την καμπύλη Gerber τότε το στοιχείο είναι ασφαλές. Είναι ένα λιγότερο συντηρητικό κριτήριο βασισμένο στο ανώτατο όριο θραύσης του υλικού (S_{ut}). Η εξίσωση από τη από την οποία προκύπτει ο συντελεστής ασφάλειας είναι:

$$\frac{N_f K_f \sigma_{amp}}{S_e} + \left(\frac{N_f \sigma_{mean}}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$

Μεγέθη

S_e : τροποποιημένη αντοχή σε κόπωση

S_{ut} : ανώτατο όριο θραύσης υλικού

S_{yf} : όριο διαρροής υλικού

N_f : συντελεστής ασφαλείας Κόπωσης

K_f : Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων κόπωσης (συναρτήσε των K_t , q):

K_t : θεωρητικός ή γεωμετρικός συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων. Επιφανειακά χαρακτηριστικά και ψεγάδια μπορεί να οδηγήσουν σε τοπικά αυξημένες τάσεις (σημεία συγκέντρωσης τάσεων). Προκύπτει από διαγράμματα και πίνακες.

q : ευαισθησίες εγκοπής. Υλικά με αρκετά ψεγάδια ήδη δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από άλλο ένα \rightarrow χαμηλή ευαισθησία εγκοπής (low notch sensitivity). Αντιθέτως, τέλεια υλικά, χωρίς ψεγάδια, επηρεάζονται σημαντικά από κάποια νέα εγκοπή ή ψεγάδι \rightarrow υψηλή ευαισθησία εγκοπής (high notch sensitivity).

Το K_f προκύπτει:

$$K_f = 1 + q (K_t - 1)$$

1.3 Δοκιμή Κόπωσης

1.3.1 Περιγραφή

Στη δοκιμή της κόπωσης, το δοκίμιο καταπονείται αρκετές φορές και μετριέται η αντοχή του με βάση τον αριθμό των δοκιμών (fatigue life prediction). Απαιτείται η εφαρμογή εφελκυστικής τάσης και πλαστικής παραμόρφωσης για να εξελιχθεί το φαινόμενο. Ο χρόνος ζωής σε Κόπωση του δοκιμίου είναι ο αριθμός των κύκλων εφαρμογής της τάσης μέχρι τη θραύση. Είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων (μέγεθος δοκιμίου σε σχέση με το μέγεθος της κατασκευής, μεταλλουργική ιστορία υλικού, περιβάλλον, επίπεδο τάσεων, εντατική κατάσταση κτλ) και άρα ακόμα και μετρήσεις σε δοκίμια του ίδιου υλικού δεν συνεπάγονται απόλυτη πρόβλεψη του χρόνου ζωής.

Η διεργασία της κόπωσης εξελίσσεται σε τρία στάδια:

1. Στάδιο έναρξης της ρωγμής
2. Στάδιο αργής προώθησης της ρωγμής
3. Στάδιο τελικής απότομης θραύσης

Έτσι, οι εργαστηριακές δοκιμές Κόπωσης χωρίζονται στις:

- Δοκιμές εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής
- Δοκιμές εστιασμένες στην προώθηση της ρωγμής

1.3.2 Δοκιμές εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής

Σ' αυτό το στάδιο, το δοκίμιο υπόκειται σε μεγάλο κύκλο εναλλασσόμενων φορτίσεων σε επίπεδα τάσεων τέτοια ώστε να επιτευχθεί έναρξη και κατ' επέκταση προώθηση ρωγμών.

Υπάρχει αρχική διάκριση Κόπωσης μικρού αριθμού κύκλων φόρτισης (low-cycle fatigue, LCF) και Κόπωσης υψηλού αριθμού κύκλων φόρτισης (high-cycle fatigue, HCF).

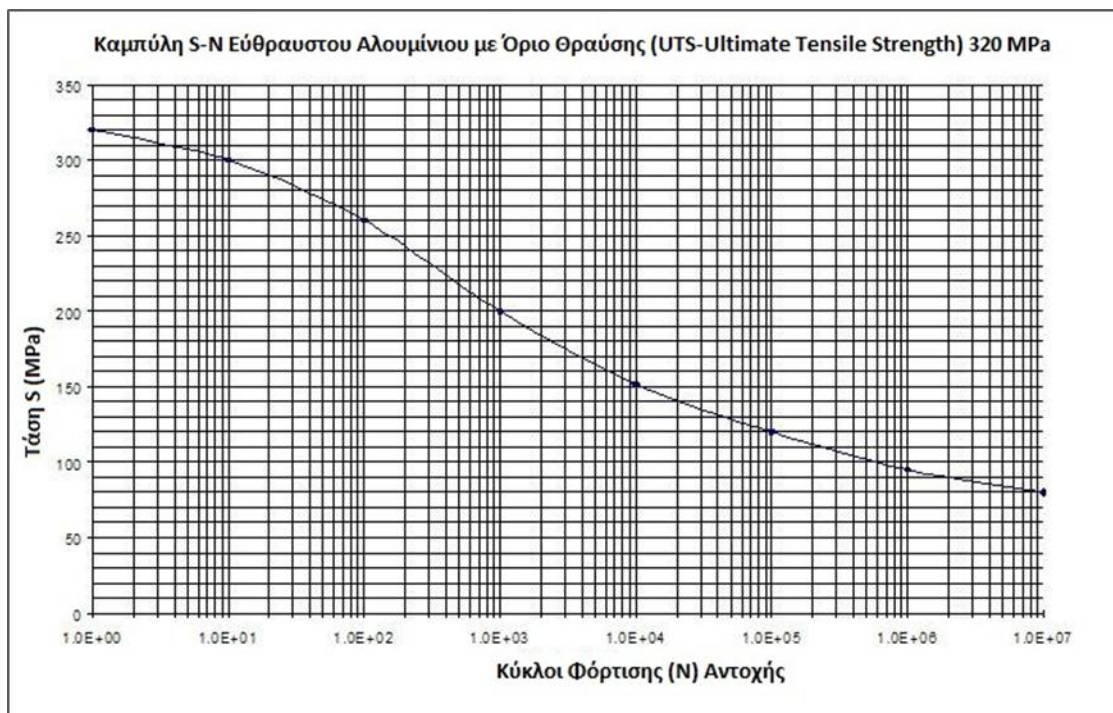
Η κανονικοποιημένη τάση (nominal stress), που εφαρμόζεται κυκλικά στο δοκίμιο, μετράται με το μέγεθος της υπέρτασης (overstress), δηλαδή του ποσού της διαφοράς κατά την οποία ξεπερνά η πρώτη το όριο Κόπωσης του υλικού (αντοχή σε Κόπωση).

Αν το μέγεθος της υπέρτασης είναι χαμηλό, τότε το δοκίμιο υπομένει περισσότερους κύκλους και άρα ο αριθμός τους είναι μεγάλος (high-cycle fatigue, HCF). Αν το μέγεθος της υπέρτασης είναι υψηλό, είναι πιθανή η έναρξη πολλαπλών ρωγμών και το μέγεθος τελικής επιφάνειας αποκόλλησης του δοκιμίου μεγαλώνει. Τότε ο αριθμός κύκλων φόρτισης είναι μικρός (low-cycle fatigue, LCF).

Διαχωρισμός μεταξύ HCF και LCF παρατηρείται και από το είδος της παραμόρφωσης που επιτυγχάνεται καθώς στην πρώτη συναντάται κυρίως ελαστική παραμόρφωση, ενώ στη δεύτερη πλαστική. Πάντως γενικώς αποδεκτό, αν και αυθαίρετο, όριο θεωρούνται οι 104 με 105 κύκλοι φόρτισης.

Γραφικά, η δοκιμή με HCF παρίσταται με τις καμπύλες S-N (Καμπύλες Wohler) (π.χ. για Εύθραστο Αλουμίνιο: Σχήμα 1.7).

Η εφαρμοζόμενη τάση βρίσκεται στην ελαστική περιοχή και άρα καλύπτεται από βασικούς κανόνες της Μηχανικής.



Σχήμα 1.7: Καμπύλη S-N (Wohler) για εύθραστο Αλουμίνιο. Δοκιμή HCF

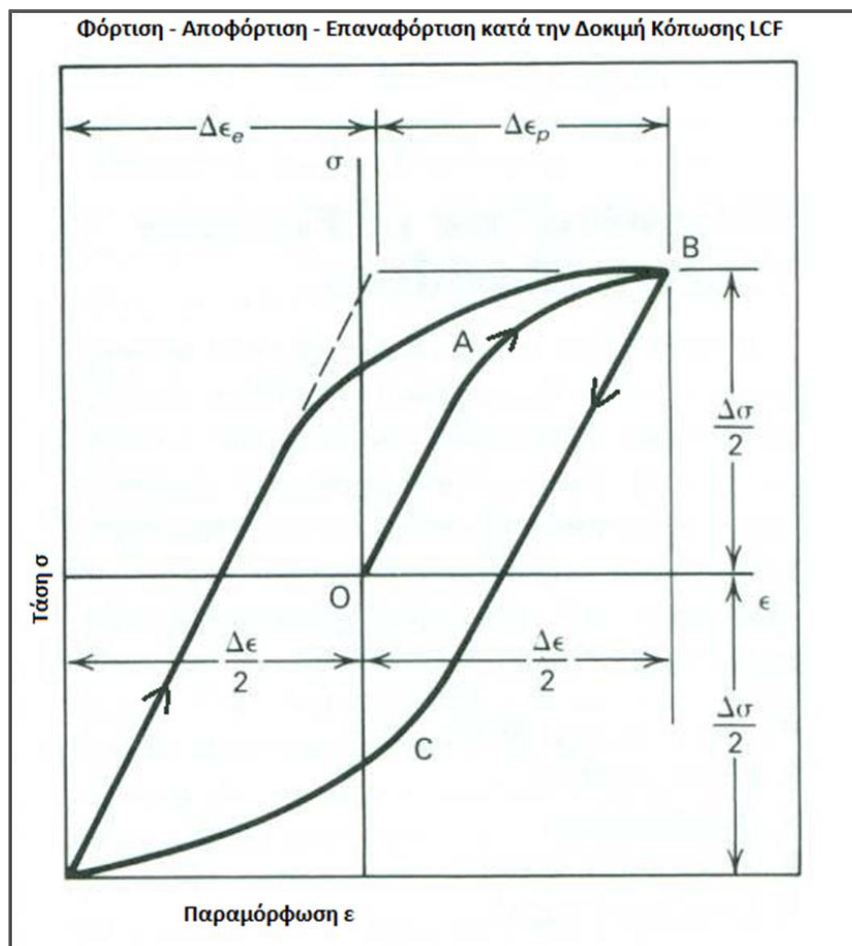
Κατά τη δοκιμή με LCF, βρισκόμαστε στην πλαστική περιοχή. Η φόρτιση γίνεται υπό ελεγχόμενη παραμόρφωση σε κατάλληλη διάταξη. Η διαδικασία περιγράφεται στο Σχήμα 1.8.

Κατά την αρχική εφελκυστική φόρτιση, η καμπύλη σ - ϵ (τάσης-παραμόρφωσης) είναι η καμπύλη OAB και περιγράφει την κλασσική πορεία φόρτισης με ελαστική-ελαστοπλαστική-πλαστική συμπεριφορά.

Κατά την αποφόρτιση, η διαρροή εμφανίζεται στις συνθήκες θλίψης και σε μια χαμηλότερη τάση C (φαινόμενο Bauschinger).

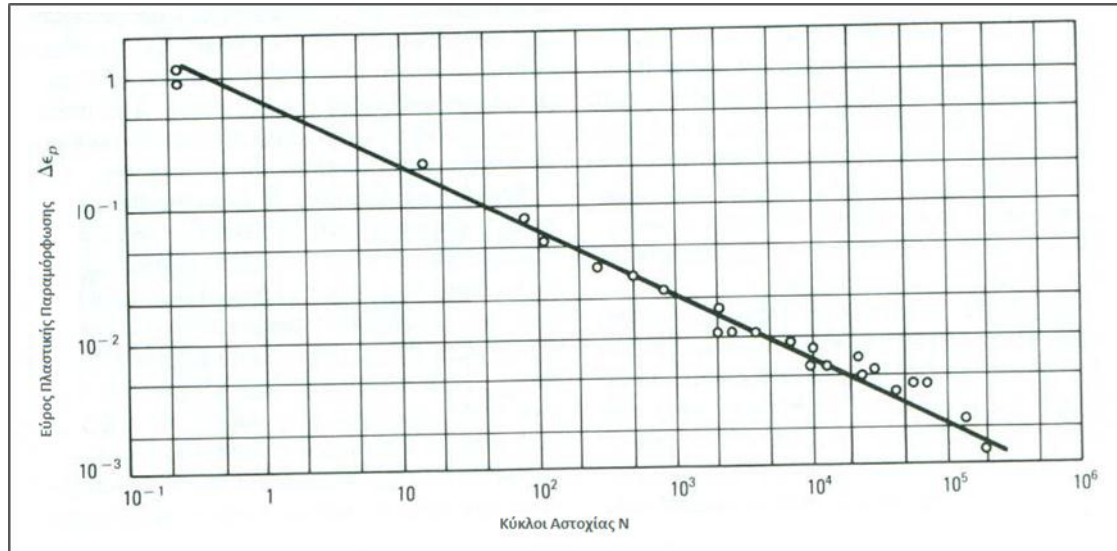
Κατά την επαναφόρτιση σε εφελκυσμό, ολοκληρώνεται ένας κύκλος υστέρησης με διαστάσεις το πλάτος του $\Delta\epsilon$ (συνολικό εύρος παραμόρφωσης) και το ύψος του $\Delta\sigma$ (συνολικό εύρος τάσης). Το συνολικό $\Delta\epsilon$ αποτελείται από ένα $\Delta\epsilon_e$ (συνολικό εύρος ελαστικής παραμόρφωσης: $\Delta\epsilon_e = \Delta\sigma / E$) και ένα $\Delta\epsilon_p$ (συνολικό εύρος πλαστικής παραμόρφωσης). Το πλάτος του βρόγχου υστέρησης (εύρος παραμόρφωσης) εξαρτάται από το επίπεδο της κυκλικής παραμόρφωσης (όταν είναι μικρό \rightarrow στενός, ρηχός βρόγχος).

Για δοκιμές με σταθερό $\Delta\epsilon$, το $\Delta\sigma$ μεταβάλλεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων (Ανοπτημένα Μέταλλα: ισχυροποίηση κυκλικής παραμόρφωσης: μεγαλύτερο $\Delta\epsilon \rightarrow$ μεγαλύτερη αύξηση $\Delta\sigma$) (Μέταλλα που υπέστησαν αρχικά εργοσκήρυνση: μαλάκυνση κατά την κυκλική παραμόρφωση: μεγαλύτερος αριθμός κύκλων παραμόρφωσης \rightarrow $\Delta\sigma$ μικραίνει).



Σχήμα 1.8: Κλασσική καμπύλη υστέρησης σ - ϵ . Δοκιμή LCF

Από τις δοκιμές LCF προκύπτουν δεδομένα που καταρτίζουν τα γραφήματα $\Delta\epsilon_p$ -N ή $\Delta\epsilon$ -N (Σχήμα 1.9). Το γράφημα σε λογαριθμική κλίμακα δίνει ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση στην περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης εμφανίζει μικρή μεταβολή για ένα μεγάλο αριθμό μετάλλων και κραμάτων. Η εκθετική αυτή σχέση ονομάζεται σχέση Coffin-Mason (1954). (Σχήμα 1.9)



Σχήμα 1.9: Αποτελέσματα Δοκιμής Κόπωσης LCF, Καμπύλη Coffin-Mason

Διάταξη Δοκιμής Κόπωσης εστιασμένη στην έναρξη της ρωγμής

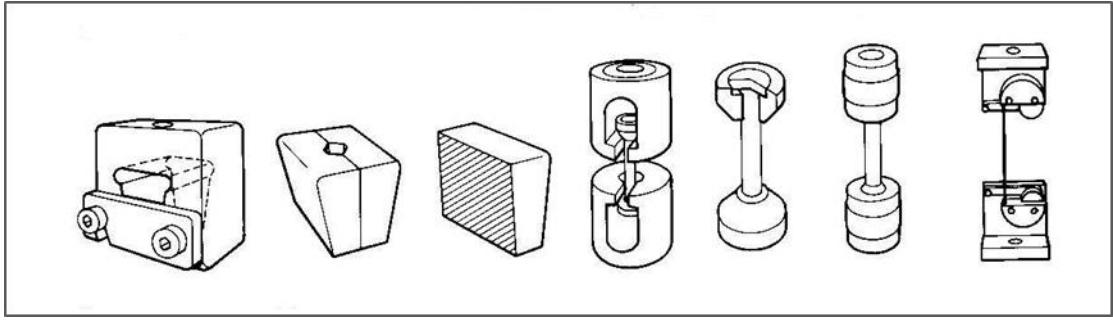
Υπάρχουν πολλές διατάξεις για την εκτέλεση της άνωθι δοκιμής. Τα δοκίμια κατ' αρχάς διαχωρίζονται με βάση τον τύπο φόρτισης που τους επιβάλλεται:

- Καθαρή αξονική φόρτιση
- Επίπεδος λυγισμός
- Περιστρεφόμενη ράβδος
- Εναλλασσόμενη Στρέψη
- Συνδυασμός Τάσεων

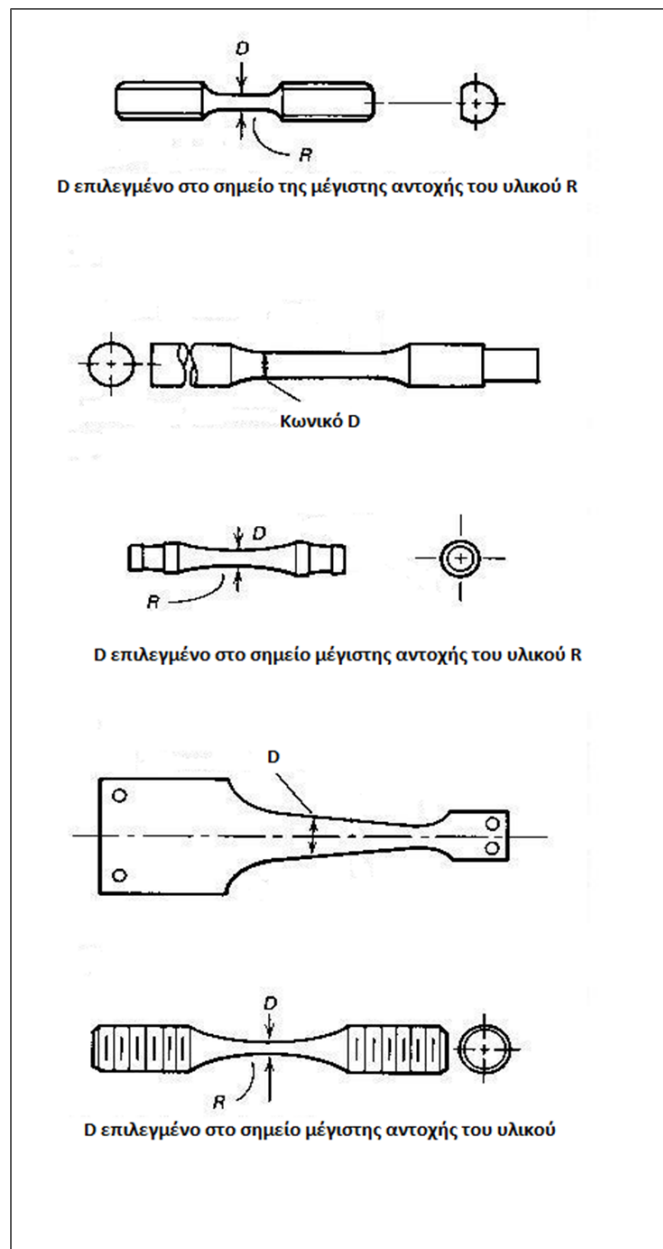
Οι μηχανές που εκτελούν τη δοκιμή φόρτισης ομαδοποιούνται με βάση τα σχεδιαστικά τους χαρακτηριστικά (τύπο φόρτισης που επιβάλλουν), τις παραμέτρους ελέγχου της δοκιμής (φορτίο, ροπή κτλ) και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους (ηλεκτρομηχανικές, σερβουδραυλικές, ηλεκτρομαγνητικές κτλ). Στην αγορά κυκλοφορούν από universal μηχανές που πληρούν σχεδόν όλες τις παραμέτρους και εκτελούν ακριβείς, προγραμματισμένες από υπολογιστή, διαδικασίες μέχρι εξαιρετικά απλές, που εκτελούν ένα συγκεκριμένο τύπο φόρτισης η κάθε μια.

Δύο σημεία εξετάζονται διεξοδικά και αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους κατά την δοκιμή της Κόπωσης αυτού του τύπου: (α) οι αρπαγές πάκτωσης του δοκιμίου στη μηχανή (Εικόνα 1.1) και (β) η μορφή του δοκιμίου (Εικόνα 1.2, Εικόνα 1.3).

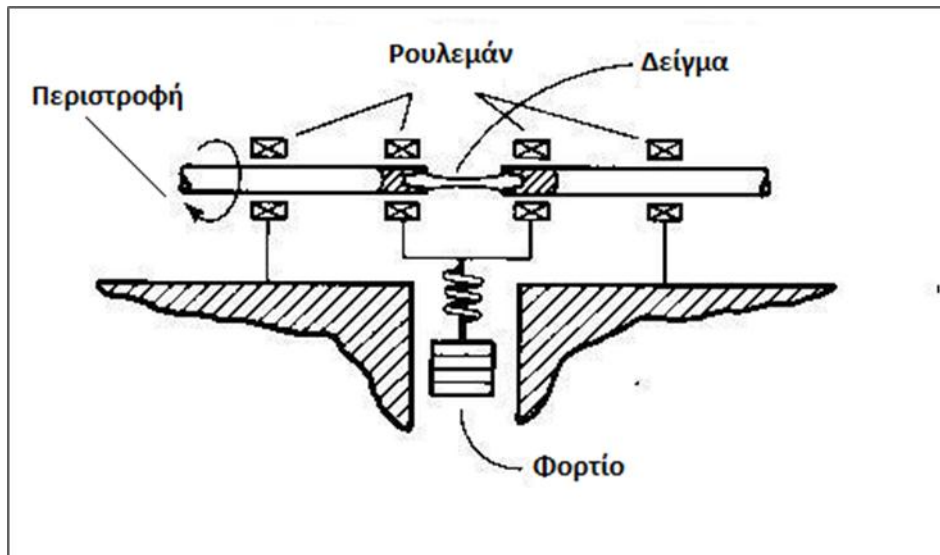
Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η αντοχή σε κόπωση των δοκιμίων επηρεάζεται σημαντικά (μειώνεται) από την παρουσία σε αυτά των συγκεντρωτών τάσεων (stress concentrators). Τέτοιοι είναι η τραχύτητα της επιφάνειας (surface roughness) και η ακτίνα μετάβασης από την περιοχή καταπόνησης του δοκιμίου μέχρι την άκρη πάκτωσης της μηχανής. Είναι προφανές ότι τα σημεία αυτά πρέπει να αποφεύγονται προκειμένου να είναι αξιόπιστη η δοκιμή.



Εικόνα 1.1: Διάφοροι συνδυασμοί πάκτωσης δοκιμίων στην αξονική φόρτιση

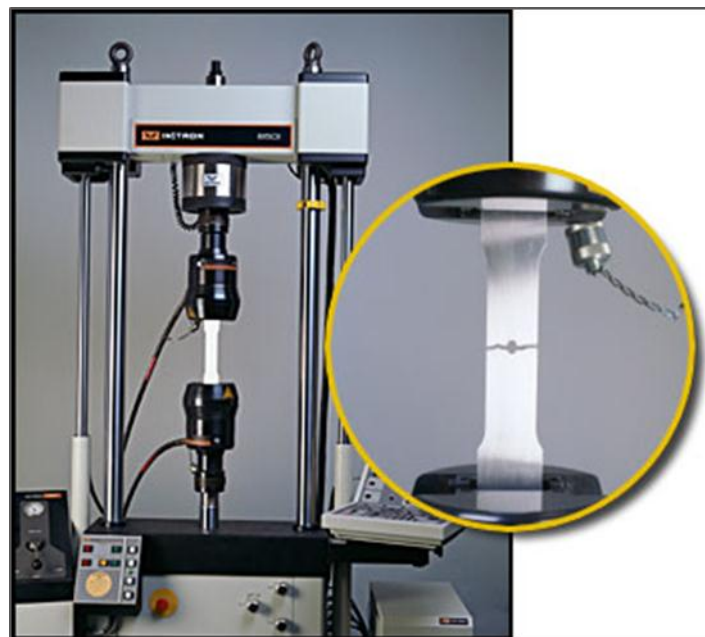


Εικόνα 1.2: Δοκίμια Κόπωσης

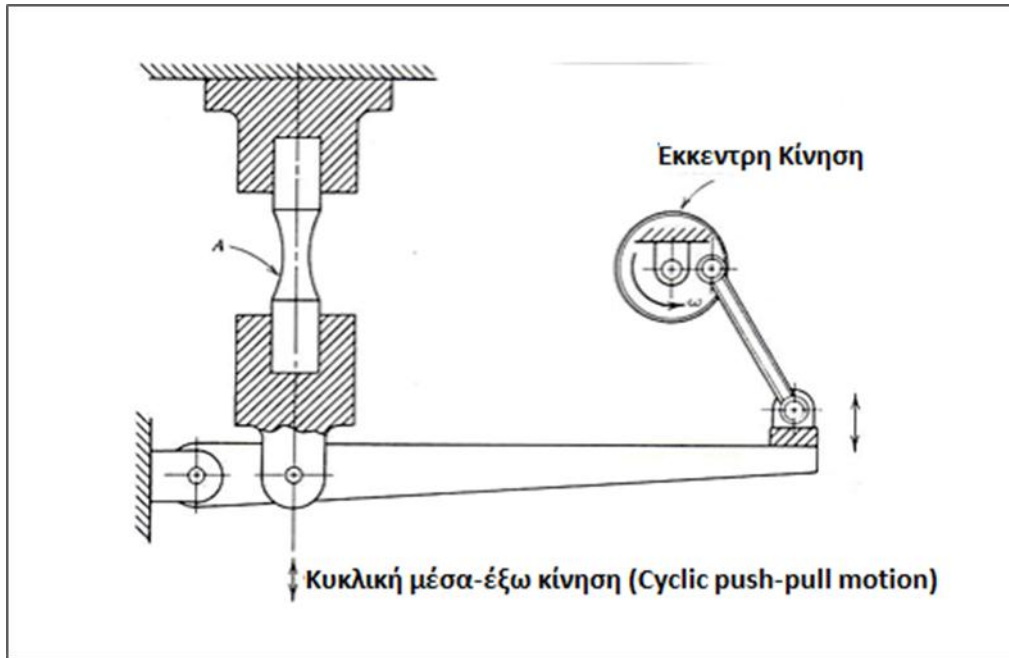


Εικόνα 1.3: Μηχανή Κόπωσης Περιστροφόμενης Ράβδου (Διάταξη R.R.Moore, 1937)

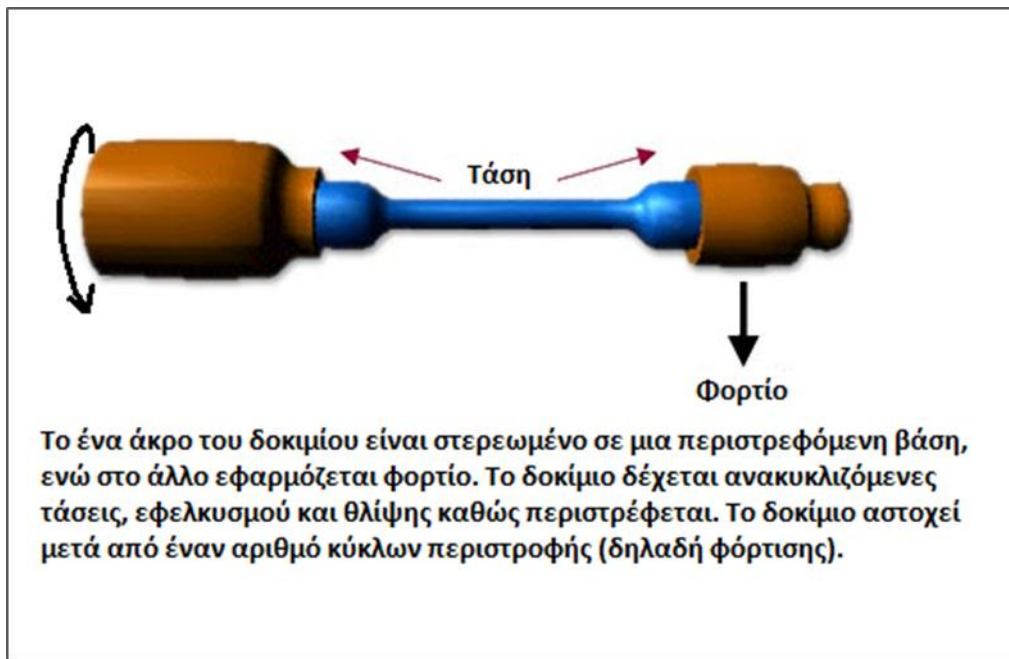
Στις Εικόνες 1.4, 1.5 και 1.6 βλέπουμε μηχανές και διατάξεις δοκιμών κόπωσης εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής



Εικόνα 1.4: Διάταξη δοκιμής LCF (WCI's Materials Testing Laboratory)



Εικόνα 1.5: Δοκιμή Κόπωσης Ορθής Τάσης (Collins, 1981/ πηγή: Collins, 1993)



Εικόνα 1.6: Δοκιμή Κόπωσης (Wohler, 1871)

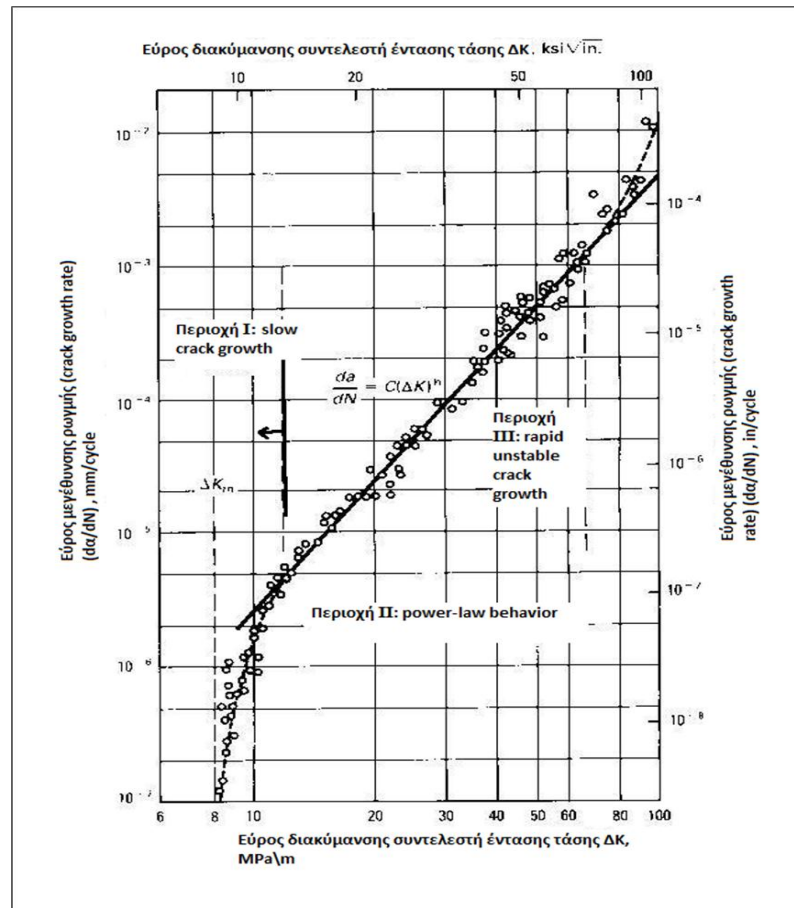
1.3.3 Δοκιμές εστιασμένες στην προώθηση της ρωγμής

Οι δοκιμές αυτές βασίζονται σε εφαρμογές αρχών της θραυστομηχανικής. Εφαρμόζονται μοντέλα ικανά να μετρήσουν την ταχύτητα προώθησης της ρωγμής με επαναλαμβανόμενες φορτίσεις σε προρηγματωμένα δοκίμια (pre-cracked specimen).

Βασικό εργαλείο εδώ αποτελεί, σε γράφημα λογαριθμικής κλίμακας, η τυπική σχέση μεγέθυνσης της ρωγμής (crack growth: da/dN) ως προς το εύρος διακύμανσης του συντελεστή έντασης τάσης ΔK (MPa). Στο διάγραμμα (Σχήμα 1.10) διακρίνονται τρεις περιοχές:

- Περιοχή I: Παρουσιάζεται ένας λαιμός (threshold) στην επέκταση της ρωγμής κόπωσης που περιλαμβάνει το πεδίο των τιμών του K κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται προώθηση της ρωγμής (περιοχή χαμηλής επέκτασης της ρωγμής – low-growth regime).
- Περιοχή II: Περιοχή τιμών του ΔK που βρίσκονται στην ενδιάμεση περιοχή και περιγράφονται από την κεκλιμένη ευθεία με την εκθετική σχέση:
 $da/dN = C (\Delta K)^n$, $C, n = \text{σταθερές του υλικού}$ (Σχέση του Paris / Paris Relationship)
- Περιοχή III: Μεγάλες τιμές του ΔK κατά τις οποίες παρατηρείται ασταθής συμπεριφορά η οποία οδηγεί σε ταχεία επέκταση της ρωγμής και τελικά σε θραύση.

Κυρίαρχη παράμετρος που επηρεάζει την ταχύτητα επέκτασης της ρωγμής είναι το εύρος τιμών K , σε αντίθεση με μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες του υλικού που έχουν αμελητέα επιρροή.



Σχήμα 1.10: Τυπικό διάγραμμα $da/dN - \Delta K$

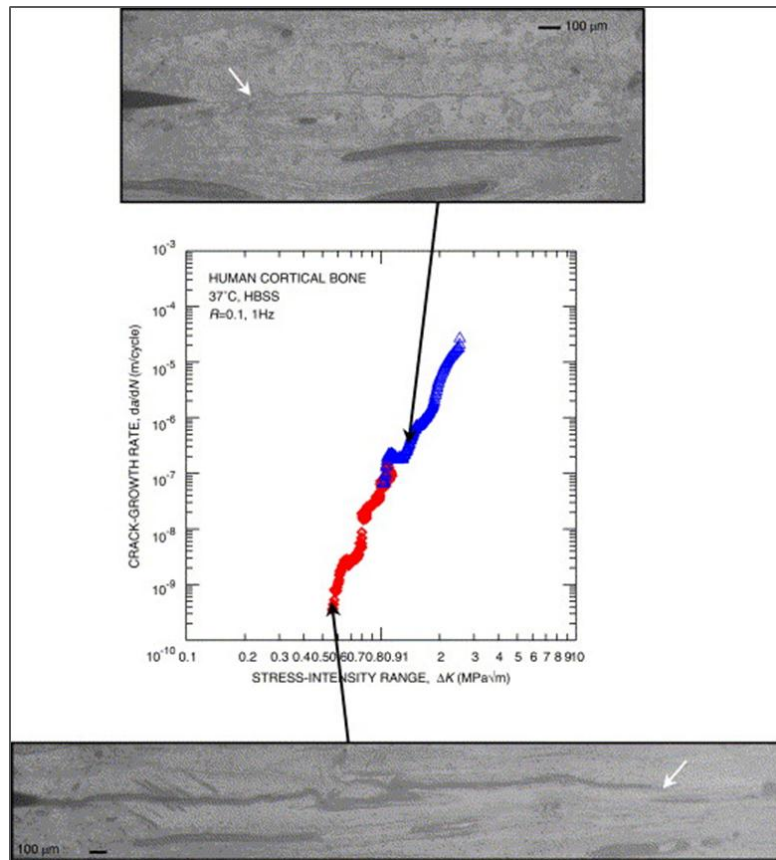
Διάταξη δοκιμών και τρόπος μέτρησης μεγέθους ρωγμής

Το ASTM Standard E 647 (ASTM E647 - 11e1 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates) περιγράφει τις διαδικασίες δοκιμών για μέτρηση της ταχύτητας επέκτασης των ρωγμών κόπωσης. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε μέσες έως υψηλές τιμές ταχύτητας επέκτασης ρωγμών ($>10^{-8}$ m/κύκλο) και στο ASTM Standard E 647 γίνεται αναφορά για αντοχή μέχρι 10^6 κύκλους φόρτισης. Για περισσότερους κύκλους φόρτισης, η ταχύτητα προώθησης είναι $<10^{-8}$ /κύκλο (περιοχή I) και απαιτούνται πολύ εξειδικευμένες τεχνικές μέτρησής της.

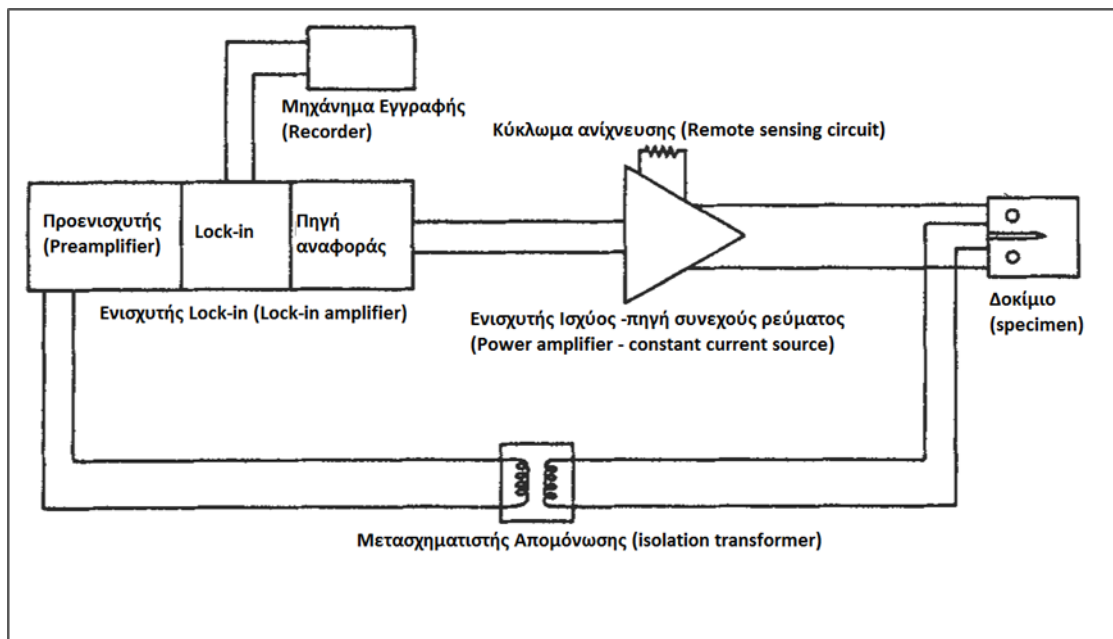
Εφαρμόζεται το κυκλικό φορτίο και το μέγεθος της προώθησης της ρωγμής μετράται με τρεις μεθόδους:

1. Με την οπτική μέθοδο (optical technique) με μετακινούμενο οπτικό μικροσκόπιο χαμηλής ισχύος με μεγέθυνση από 20x μέχρι 50x, και μετρήσεις μήκους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. (Σχήμα 1.11)
2. Με τη μέθοδο συμβιβασμού (compliance method of crack extension). Μόνο σε εφελκυστική φόρτιση. Σε μια αρχική ρωγμή μήκους a ενός ελαστικά καταπονούμενου μετάλλου, ο συμβιβασμός εκφράζεται ως ο λόγος της μετατόπισης δ (άνοιγμα στο χείλος της ρωγμής) προς το εφαρμοζόμενο φορτίο P .
3. Με τη μέθοδο ρύθμισης του ηλεκτρικού δυναμικού (electrical potential crack monitoring technique). Η αρχή της βασίζεται στο γεγονός ότι επέρχεται μια παραμόρφωση στην κατανομή του πεδίου του ηλεκτρικού δυναμικού γύρω από κάθε ασυνέχεια ενός ηλεκτρικά φορτισμένου μετάλλου, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται

ευθέως από το σχήμα και το μέγεθος της ασυνέχειας. Αυτή η μέθοδος κερδίζει πλέον όλο και περισσότερο έδαφος σε σχέση με τις άλλες δύο. (Σχήμα 1.12)



Σχήμα 1.11: Οπτική μέθοδος (Nalla, Kruzica, Kinney, Ritchie, 2005)



Σχήμα 1.12: Διάταξη μεθόδου ρύθμισης του ηλεκτρικού δυναμικού (Wei and Brazil, 1980/ πηγή: Merah, 2003)

1.4 Σύντομη αναφορά στις σιδηροδρομικές γέφυρες

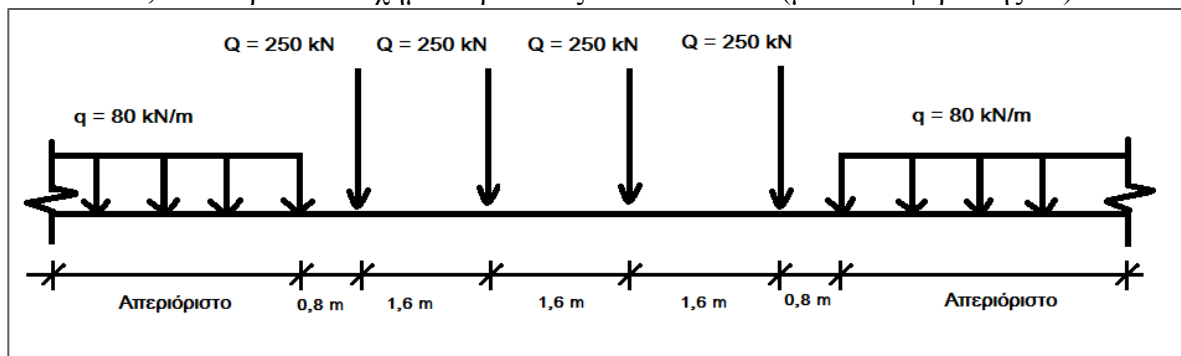
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στις σιδηροδρομικές γέφυρες και το κανονιστικό πλαίσιο που τις διέπει έναντι κόπωσης, καθώς σ' αυτές το φαινόμενο αποκτά καθοριστική σημασία.

Φορτία κυκλοφορίας σε σιδηροδρομικές γέφυρες

Τα συνήθη φορτία σχεδιασμού εφαρμόζονται σε σιδηροδρομικό δίκτυο με κανονικές ή μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σιδηροτροχιών και είναι πλασματικά και όχι πραγματικά φορτία, τα οποία, μετά τις δυναμικές προσαιξήσεις, πρέπει να εφαρμοστούν στη γέφυρα ως φορτία λειτουργίας.

Όσον αφορά τα κατακόρυφα φορτία, οι δράσεις ορίζονται υπό μορφή δυο μοντέλων φόρτισης, εκ των οποίων το ένα αντιπροσωπεύει την κανονική κυκλοφορία (μοντέλο φόρτισης 71), ενώ το άλλο αντιπροσωπεύει συνήθως βαρέα φορτία (μοντέλα φόρτισης SW). Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις λόγω πλευρικής μετακίνησης των κατακόρυφων φορτίων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μια εκκεντρότητα (μόνο στο μοντέλο φόρτισης 71).

Ενδεικτικά, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ΜΦ 71 (μοντέλο φόρτισης 71).



Σχήμα 1.13: Μοντέλο Φόρτισης 71

Άλλα είδη κατακόρυφων φορτίων, που λαμβάνονται υπόψη στις σιδηροδρομικές γέφυρες, είναι:

- Αφόρτιστος συρμός: όταν απαιτείται για συγκεκριμένους ελέγχους η χρήση αφόρτιστου συρμού, ως τέτοιος συρμός λαμβάνεται ένα ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο με ονομαστική τιμή $12,5 \text{ kN/m}$.
- Φορτία πεζοδρομίων: Προβλέπεται έλεγχος για φορτία πεζοδρομίων για εξουσιοδοτημένο προσωπικό μόνο και για κοινό (όπως στις πεζογέφυρες).
- Δυναμικές επιδράσεις: Λόγω της κίνησης των συρμών, όπως και στις οδικές γέφυρες, προκαλείται στο φορέα δυναμική ταλάντωση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την επαύξηση των καταπονήσεων και των παραμορφώσεών του. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών είναι η φυσική συχνότητα της κατασκευής, η απόσταση των αξόνων, η ταχύτητα κυκλοφορίας των συρμών πάνω στη γέφυρα, η απόσβεση της κατασκευής, οι ατέλειες των σιδηροτροχιών κ.α. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή των παραπάνω παραγόντων, ο κανονισμός ορίζει δυναμικό συντελεστή (Φ_2).

Όσον αφορά τις οριζόντιες δράσεις, οι πιο σημαντικές που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- Φυγόκεντρες δυνάμεις: Όταν η σιδηροδρομική γραμμή βρίσκεται σε καμπύλη, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η φυγόκεντρη δύναμη όσο και η εγκάρσια κλίση της γραμμής.
- Πλευρική δύναμη: Η πλευρική δύναμη πρέπει να λαμβάνεται ως μια συγκεντρωμένη οριζόντια δύναμη στο άνω μέρος των σιδηροτροχιών τόσο για ευθύγραμμη όσο και για καμπύλη σιδηροδρομική γραμμή κάθετα στον άξονά της.
- Δράσεις λόγω εκκίνησης και τροχοπέδησης: Οι δυνάμεις αυτές επενεργούν στο άνω μέρος των σιδηροτροχιών κατά τη διαμήκη διεύθυνση της γραμμής και πρέπει να συνδυάζονται με τα κατακόρυφα φορτία.

Τέλος, υπάρχουν και οι τυχηματικές δράσεις, καθώς οι κατασκευές επί των οποίων κινούνται σιδηροδρομικοί συρμοί πρέπει να έχουν σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε περίπτωση εκτροχιασμού, η καταστροφή η οποία θα συμβεί να περιορίζεται στο ελάχιστο και πάντως να μην υφίσταται κίνδυνος κατάρρευσης της όλης κατασκευής.

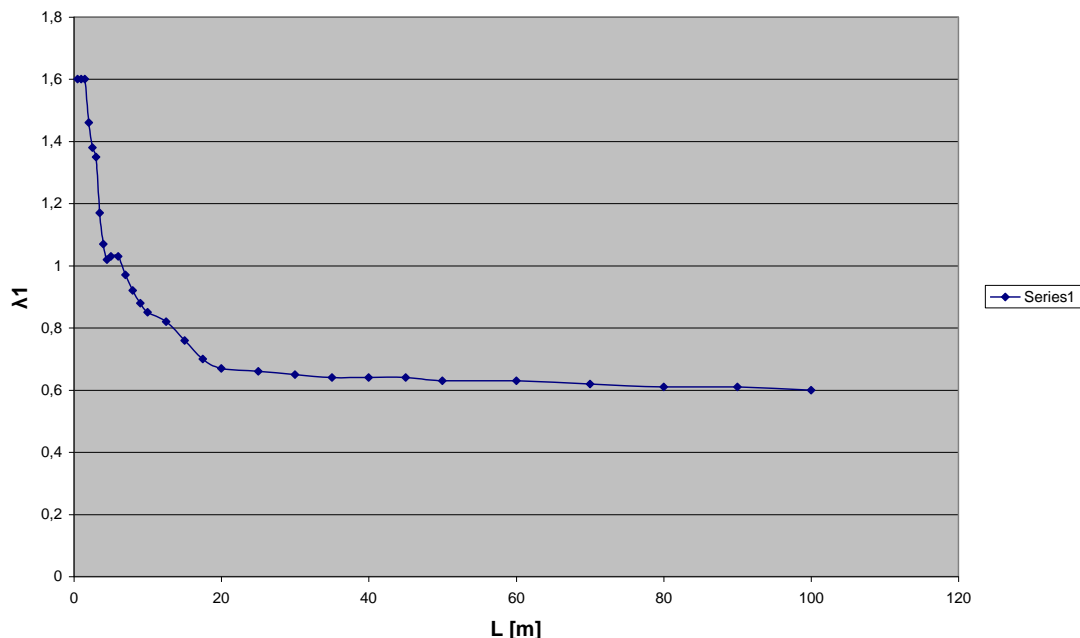
Όλα τα μέλη της κατασκευής που υπόκεινται σε εναλλαγές τάσεων, πρέπει να ελέγχονται σε κόπωση. Το κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τις σιδηροδρομικές γέφυρες ομοιάζει με αυτό των οδικών γεφυρών (βλέπε κεφάλαιο 3.2) με τις εξής προσθήκες:

Το φορτίο κόπωσης για σιδηροδρομικές γέφυρες είναι ο συρμός LM 71 (ΜΦ 71), λαμβανομένου υπόψη του συντελεστή ταλάντωσης Φ_2 .

Έλεγχος σε κόπωση στις σιδηροδρομικές γέφυρες (Ευρωκώδικας)

Συντελεστές λ για σιδηροδρομικές γέφυρες

- Συντελεστής λ_1



Σχήμα 1.14: Συντελεστής λ_1 για σιδηροδρομικές γέφυρες (L από πίνακα 3.2, παράγραφος 3.2)

- Συντελεστής λ_2

Πίνακας 1.1: Συντελεστής λ_2

Ετήσια κυκλοφορία [10^6 t / τροχιά]	5	10	15	20	25	30	35	40	50
λ_2	0,72	0,83	0,90	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,15

- Συντελεστής λ_3

Πίνακας 1.2: Συντελεστής λ_3

Ζωή σχεδιασμού [έτη]	50	60	70	80	90	100	120
λ_3	0,87	0,90	0,93	0,96	0,98	1,00	1,04

- Συντελεστής λ_4

Πίνακας 1.3: Συντελεστής λ_4

$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2}$	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
λ_4	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71
$\Delta\sigma_1$ είναι το εύρος τάσεων στη θέση ελέγχου, λόγω του μοντέλου φόρτισης 71 σε μία τροχιά, $\Delta\sigma_{1+2}$ είναι το εύρος τάσεων στην ίδια θέση, λόγω του μοντέλου φόρτισης 71 σε οποιοσδήποτε δύο τροχιές.						

Ο Πίνακας 1.3 ισχύει μόνο όταν τα $\Delta\sigma_1$ και $\Delta\sigma_{1+2}$ έχουν το ίδιο πρόσημο.

- Συντελεστής λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = 1,4$$

Προσδιορισμός ευρών τάσεων

Τα εύρη τάσεων προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta\sigma_E = \lambda \cdot \phi_2 \cdot |\sigma_{\max,f} - \sigma_{\min,f}|$$

$$\Delta\tau_E = \lambda \cdot \phi_2 \cdot |\tau_{\max,f} - \tau_{\min,f}|$$

Έλεγχος σε κόπωση

- Γενική ανισότητα ελέγχου

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{M,f}}$$

- Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας δράσεων

$$\gamma_{Ff} = 1,0$$

- Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας αντιστάσεων

Πίνακας 1.4: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας αντιστάσεων δομικού χάλυβα $\gamma_{Mf,a}$

Επιπτώσεις αστοχίας	Χαμηλές (δευτερεύοντα στοιχεία)	Υψηλές (κύρια στοιχεία)
Ανοχή βλαβών (επισκέψιμα στοιχεία)	1,00	1,15
Ασφάλεια ζωής (μη επισκέψιμα στοιχεία)	1,15	1,35

Για διατμητικούς ήλους υπό διάτμηση ο συντελεστής είναι είναι $\gamma_{Mf,s}$ με συνιστώμενη τιμή

$$\gamma_{Mf,v} = 1,0$$

1.5 Ιστορική Αναδρομή - Γνωστές Περιπτώσεις Καταρρεύσεων λόγω κόπωσης

1.5.1 Εισαγωγή – Ιστορική Αναδρομή

Στο υπό-κεφάλαιο αυτό, έχοντας δοθεί στο πρώτο κεφάλαιο η γενική περιγραφή και βασικές έννοιες του φαινομένου και κανόνες που το διέπουν, παρατίθενται και αναλύονται συνοπτικώς γνωστές περιπτώσεις καταρρεύσεων που οφείλονται στο φαινόμενο της κόπωσης των μετάλλων. Στην παρούσα εισαγωγή γίνεται μια σχηματική ιστορική αναδρομή με τους σταθμούς της μελέτης του φαινομένου της κόπωσης. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι πρώτες μελέτες στο φαινόμενο (Παράγραφος 1.5.2), αλλά και οι σημαντικές προσθήκες από την παρατήρηση των ατυχημάτων στη θάλασσα (Παράγραφος 1.5.3) και στην αεροναυπηγική (Παράγραφος 1.5.4). Το κεφάλαιο αυτό, παρ' ότι δεν σχετίζεται με τις γέφυρες, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη σοβαρότητα του φαινομένου.

Ιστορική αναδρομή

1837: Ο W. Albert δημοσιεύει το πρώτο άρθρο σχετικά με την κόπωση. Επινόησε μια μηχανή δοκιμής σε κόπωση για τις αλυσίδες μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στα ορυχεία Clausthal στη Γερμανία. (Schutz, 1996)

1842: Ο J. W. M. Rankine αναγνωρίζει τη σημασία των συγκεντρώσεων τάσεων σε έρευνα του άξονα σιδηροδρόμου. Αποφαινεται ότι η συντριβή τρένου στις Βερσαλλίες

(αναλυτικότερα: Παράγραφος 1.5.2) προκλήθηκε από κόπωση του μεταλλικού άξονα. (Rankine, 1842)

1843: Ο J. Glynn αναφέρει την κόπωση του άξονα σε ατμομηχανή. Προσδιορίζει τη διαδρομή προέλευσης ρωγμής.

1849: Ο E. Hodgkinson χορηγείται ένα μικρό χρηματικό ποσό (και υποβάλει έκθεση στο Κοινοβούλιο του Ηνωμένου Βασιλείου) για το έργο του στην εξακρίβωση με πείραμα, των αποτελεσμάτων της συνεχούς αλλαγής του φορτίου σε κατασκευές από σίδηρο και σε ποιο βαθμό η φόρτιση αυτή είναι ασφαλής. (Rawson, 1865)

1854: Ο F. Braithwaite αναφέρεται σε κοινές αποτυχίες λόγω κόπωσης και χρησιμοποιεί πρώτη φορά τον όρο. (Braithwaite, 1854)

1860: Ο Sir W. Fairbairn και ο A. Wöhler πραγματοποιούν συστηματική δοκιμές κόπωσης.

1870: Ο A. Wöhler συνοψίζει το έργο του σχετικά με τους άξονες σιδηροδρόμων. Καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το εύρος των ανακυκλιζόμενων τάσεων είναι πιο σημαντικό από την τιμή μέγιστης τάσης. Εισάγει την έννοια του ορίου αντοχής. (Schutz, 1996)

1903: Ο Sir J. A. Ewing αποδεικνύει την αιτιότητα της κόπωσης σε μικροσκοπικές ρωγμές.

1910: Ο H. Basquin προτείνει μια λογαριθμική σχέση για S-N καμπύλες, χρησιμοποιώντας δεδομένα δοκιμών του Wöhler

1945: Ο A. M. Miner γενικεύει τη υπόθεση γραμμικής βλάβης του A. Palmgren (1924) ως ένα πρακτικό εργαλείο σχεδιασμού.

1954: Οι L. F. Coffin και S. S. Manson εξηγούν την ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης σε όρους πλαστικής παραμόρφωσης στην άκρη των ρωγμών.

1961: Ο P. C. Paris προτείνει μεθόδους για την πρόβλεψη του ρυθμού ανάπτυξης των μεμονωμένων ρωγμών κόπωσης.

1968: Οι T. Endo και M. Matsuishi επινοούν τη rainflow μέθοδο (εναλλακτική της μεθόδου δεξαμενής – reservoir method) για να καταστεί δυνατή η αξιόπιστη εφαρμογή του κανόνα του Miner για τυχαία φορτία

1970: Ο W. Elber διασαφηνίζει τους μηχανισμούς και τη σημασία της ρωγμής κλεισίματος στην επιβράδυνση της ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης.

1.5.2 Ατύχημα τρένου στις Βερσαλλίες (1842)

Μετά τις γιορτές του βασιλιά στο Παλάτι των Βερσαλλιών, ένα τρένο επιστρέφοντας στο Παρίσι συνετρίβη το Μάιο 1842 στο Meudon όταν στη μεγαλύτερη ατμομηχανή έσπασε ένας άξονας. Τα βαγόνια πίσω συγκρούστηκαν με τις κατεστραμμένες μηχανές και έπιασε φωτιά. Τουλάχιστον 55 επιβάτες σκοτώθηκαν παγιδευμένοι στα βαγόνια. Το ατύχημα αυτό είναι γνωστό στη Γαλλία ως «Catastrophe ferroviaire de Meudon» (Σιδηροδρομική καταστροφή του Meudon). Μελετήθηκε εκτενώς από μηχανικούς, που αναζήτησαν μια εξήγηση.

Η Κόπωση του μετάλλου ήταν ελάχιστα κατανοητή την εποχή του ατυχήματος και γι' αυτό το «Catastrophe ferroviaire de Meudon» συνδέεται με τις απαρχές της συστηματικής έρευνας του προβλήματος της Κόπωσης.

Ο εκτροχιασμός ήταν το αποτέλεσμα ενός σπασμένου άξονα ατμομηχανής. Στη Βρετανία, η έρευνα του Rankine¹ για τους σπασμένους άξονες τόνισε τη σημασία της

¹ Η έρευνα του καθώς και άλλων (όπως ο Edwards) που πρότειναν ένα μηχανισμό ανάπτυξης ρωγμών μέσω επαναλαμβανόμενης φόρτισης, ωστόσο, αγνοήθηκαν με αποτέλεσμα αστοχίες λόγω κόπωσης να συμβούν με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό στο σιδηροδρομικό δίκτυο που συνεχώς επεκτεινόταν.

συγκέντρωσης τάσεων, καθώς και τον μηχανισμό ανάπτυξης της ρωγμής με επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

Αργότερα, το 1856-1870, το έργο του August Wöhler για την κόπωση των μετάλλων θα συμβάλει στη βελτίωση του ελέγχου αξόνων, και έτσι θα αυξήσει τη διάρκεια ζωής του άξονα.



Εικόνα 1.7: Σκίτσο του 1842 που αναπαριστά την τραγωδία του Meudon. (Sendekiγj, 2006)



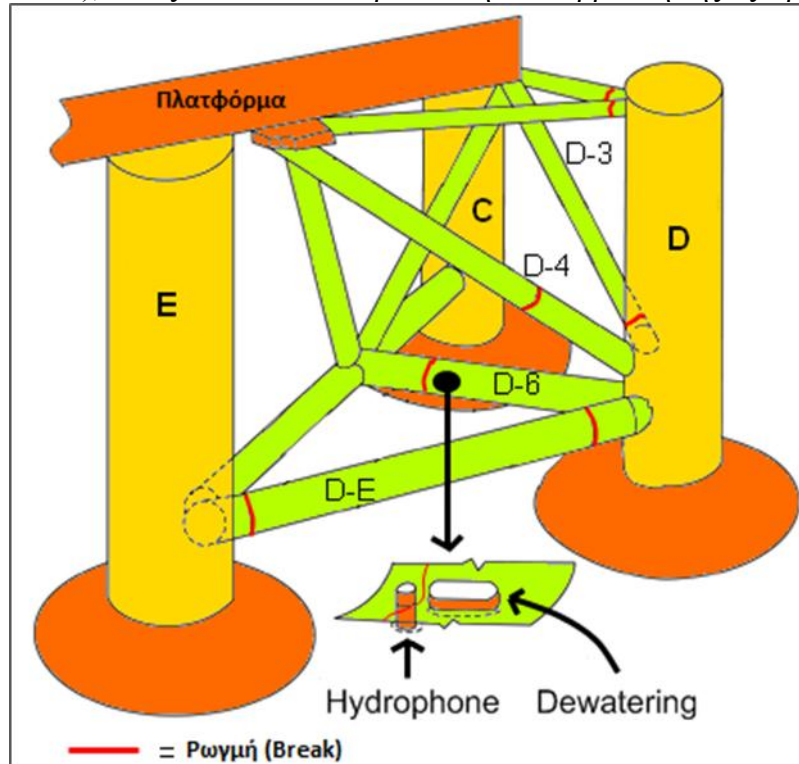
Εικόνα 1.8: Ανάπτυξη των ρωγμών στον άξονα από τον Marcoux (1853). (Sendekiγj, 2006)

1.5.3 Ανατροπή πετρελαιϊκής πλατφόρμας Alexander L. Kielland (1980)

Το Alexander L. Kielland ήταν ένα νορβηγικό ημι-υποβρύχιο γεωτρύπανο-πλατφόρμα που ανατράπηκε στα κοιτάσματα πετρελαίου του Ekofisk στη Νορβηγία το Μάρτιο του 1980 σκοτώνοντας 123 άτομα. Αυτό ήταν το καταστροφικότερο ατύχημα της ιστορίας της χώρας από την εποχή του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η πλωτή εξέδρα δεν χρησιμοποιούνταν για γεώτρηση, αλλά ως «Flotel», δηλαδή ημι-υποβρύχιο που παρέχει χώρους διαβίωσης για τους εργαζόμενους που δουλεύουν στην ανοικτή θάλασσα. Το 1980 η πλατφόρμα λειτουργούσε στη νορβηγική Βόρεια Θάλασσα ως εγκατάσταση υπεράκτιας διαμονής. Υπό δυνατή βροχή και ομίχλη, περισσότεροι από 200 εργαζόμενοι ήταν εκτός υπηρεσίας στα καταλύματα του Alexander L. Kielland. Ο άνεμος έφτανε τους 40 κόμβους (74 km / h) και τα κύματα μέχρι τα 12 μ ύψος. Η εξέδρα είχε μόλις αποσυνδεθεί από την πλατφόρμα παραγωγής Edda. Οι επί του καταστρώματος αισθάνθηκαν «κάποιο απότομο είδος κουνήματος». Ξαφνικά η εξέδρα έγειρε πάνω από 30 ° και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε. Πέντε από τα έξι καλώδια-άγκυρες είχαν σπάσει, και το τελευταίο

εμπόδιζε την εξέδρα να ανατραπεί. Έπειτα, έσπασε και το τελευταίο καλώδιο-άγκυρα και η εξέδρα γύρισε ανάποδα. Από τους 212 επιβαίνοντες σκοτώθηκαν οι 123.

Ένα χρόνο αργότερα, το 1981, ερευνητική έκθεση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εξέδρα κατέρρευσε λόγω ρωγμής από κόπωση σε έναν από τους έξι συνδέσμους (τον D-6), ο οποίος οδήγησε στην κατάρρευση του ενός ποδιού πάνω στην υπόλοιπη εξέδρα. Κρύες ρωγμές στις συγκολλήσεις, αυξημένες συγκεντρώσεις τάσεων λόγω μιας εξασθενημένης πλάκας, ένα κακό προφίλ συγκόλλησης, και ανακυκλιζόμενες τάσεις (που είναι συνήθεις στη Βόρεια Θάλασσα), έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην κατάρρευση της εξέδρας.



Σχήμα 1.15: Σχέδιο του ατυχήματος. Ρωγμή στο σύνδεσμο.

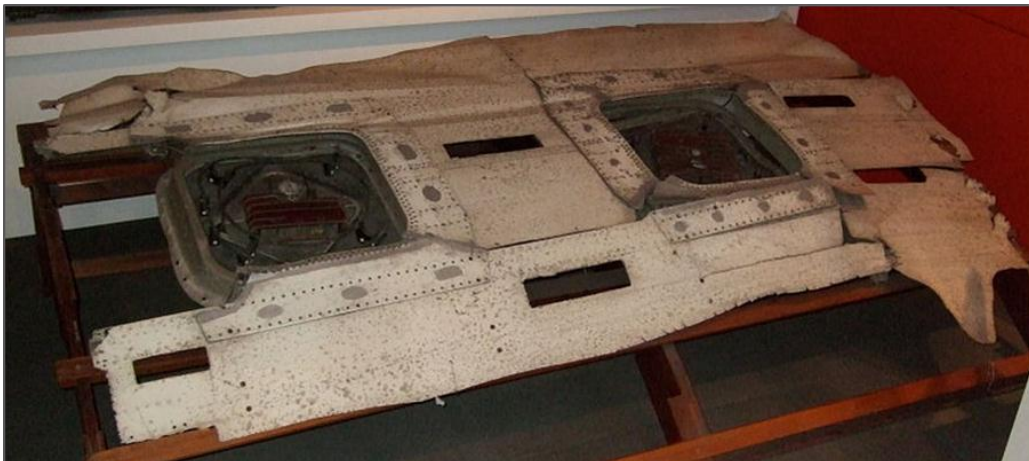
1.5.4 Αεροπορικά δυστυχήματα της BOAC Flight 781 και South African Airways Flight 201 (1954)

Στις 10 Ιανουαρίου 1954, για την BOAC (British Overseas Airways Corporation) πτήση 781, ένα DH 106 Comet (de Havilland Comet DH.106.1), απογειώθηκε από το αεροδρόμιο Ciampino της Ρώμης, καθ' οδόν προς το αεροδρόμιο Heathrow του Λονδίνου. Το αεροσκάφος υπέστη μια εκρηκτική αποσυμπίεση στον αέρα και συνετρίβη στη Μεσόγειο Θάλασσα, σκοτώνοντας όλους τους επιβαίνοντες (35 άτομα). Στις 09:34 το αεροπλάνο απογειώθηκε από το αεροδρόμιο Ciampino της Ρώμης. Στις 09:50 έχασε επικοινωνία όταν κ εθεάθη να συντρίβεται στη θάλασσα, ανάμεσα στα νησιά Elba και Montecristo, από ντόπιους ψαράδες.

Λίγους μήνες αργότερα, στις 8 Απριλίου του 1954, ένα ίδιο αεροσκάφος (de Havilland Comet DH.106.1) συνετρίβη σχεδόν στην ίδια περιοχή σε πτήση από τη Ρώμη στο Κάιρο. Το αεροπλάνο απογειώθηκε από το Ciampino της Ρώμης στις 18:32 και συνετρίβη στις 19:07. Το αεροσκάφος διαλύθηκε στο νυχτερινό ουρανό σκοτώνοντας όλους τους επιβαίνοντες (21 άτομα).

Η έρευνα του BOAC 781 αποκάλυψε ελαττώματα σχεδιασμού και κατασκευής καθώς και κόπωση του μετάλλου, που οδήγησαν τελικά στην εκρηκτική αποσυμπίεση η οποία προκάλεσε τα δύο ατυχήματα.

Συστηματικές δοκιμές διεξήχθησαν σε μια βυθισμένη άτρακτο και συμπίεσμένη σε μια δεξαμενή νερού. Έτσι, η Royal Aircraft Establishment (RAE) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συντριβή ήταν λόγω της αστοχίας της καμπίνας πίεσης προς το εμπρός παράθυρο στην οροφή. Αυτό το «παράθυρο» ήταν στην πραγματικότητα ένα από τα δύο ανοίγματα για τις κεραίες ενός ηλεκτρονικού συστήματος πλοήγησης στο οποίο αδιαφανές πάνελ fiberglass παίρνει τη θέση του γυαλιού του παραθύρου. Η αστοχία ήταν αποτέλεσμα της κόπωσης του μετάλλου που προκαλείται από την επαναλαμβανόμενη συμπίεση και αποσυμπίεση του θαλάμου του αεροσκάφους. Το πρόβλημα επιδεινώνεται από την τεχνική που χρησιμοποιείται στην σύνδεση του μετάλλου με καρφιά (ήλους). Η ατελής της φύση προκαλεί ρωγμές κατασκευαστικά που μπορεί να αποτελέσουν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και έναρξης ρωγμών κόπωσης γύρω από τον ήλο. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι οι τάσεις γύρω από ανοίγματα στην καμπίνα πίεσης ήταν σημαντικά υψηλότερες από ό, τι είχε προβλεφθεί, ειδικά γύρω από αιχμηρές γωνίες (cut-outs), όπως τα παράθυρα. Ως αποτέλεσμα, όλα τα μελλοντικά αεροπλάνα διαθέτουν παράθυρα με στρογγυλεμένες γωνίες, εξαλείφοντας πολύ σημαντικό μέρος των τάσεων. Αυτό ήταν ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό όλων των μοντέλων αργότερα του Comet. Οι ερευνητές από τη RAE σημείωσαν ότι οι αιχμηρές γωνίες κοντά σε ανοίγματα των παραθύρων «ενήργησαν ως θέσεις εκκίνησης ρωγμών».



Εικόνα 1.9: Η άτρακτος του Comet της πτήσης BOAC 781, όπου φαίνονται τα δύο σπασμένα ADF παράθυρα της οροφής από όπου εκκίνησε το δυστύχημα. (πηγή: Science Museum in London, photo capture)

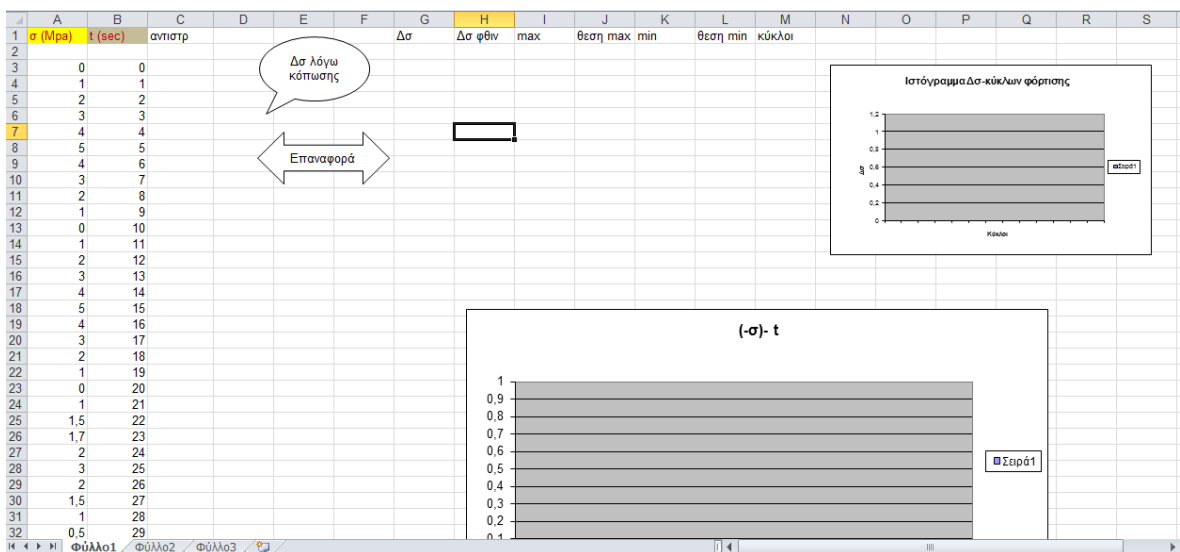
2 Μέθοδος Δεξαμενής – Κώδικας σε Visual Basic

2.1 Εισαγωγή

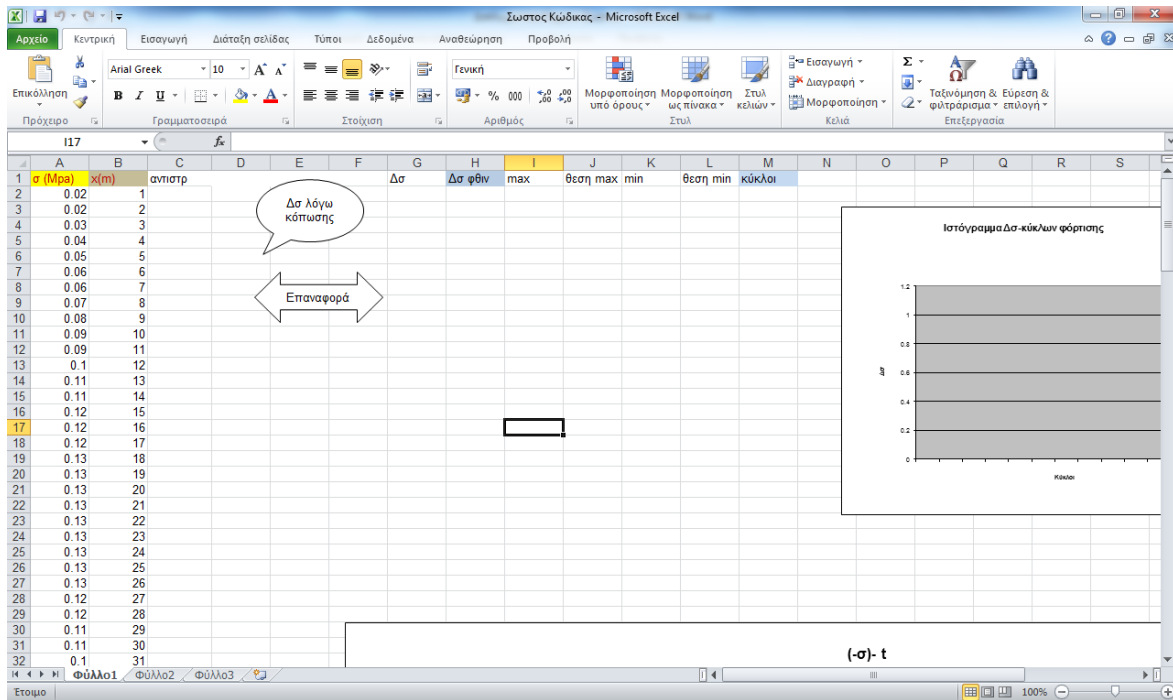
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος της δεξαμενής, που αναφέρεται στην παράγραφο 1.2.2.2., σε μορφή κώδικα Visual Basic. Η εφαρμογή δημιουργείται σε περιβάλλον Microsoft Excel και δίνει τη μετατροπή ενός διαγράμματος τάσεων (είτε σε συνάρτηση χρόνου, είτε κατά μήκος απόστασης, δηλαδή γραμμή επιρροής) μεταβλητού εύρους σε ιστόγραμμα εύρων τάσης με κύκλους φόρτισης (Σχήμα 1.5).

2.2 Εφαρμογή στο Excel

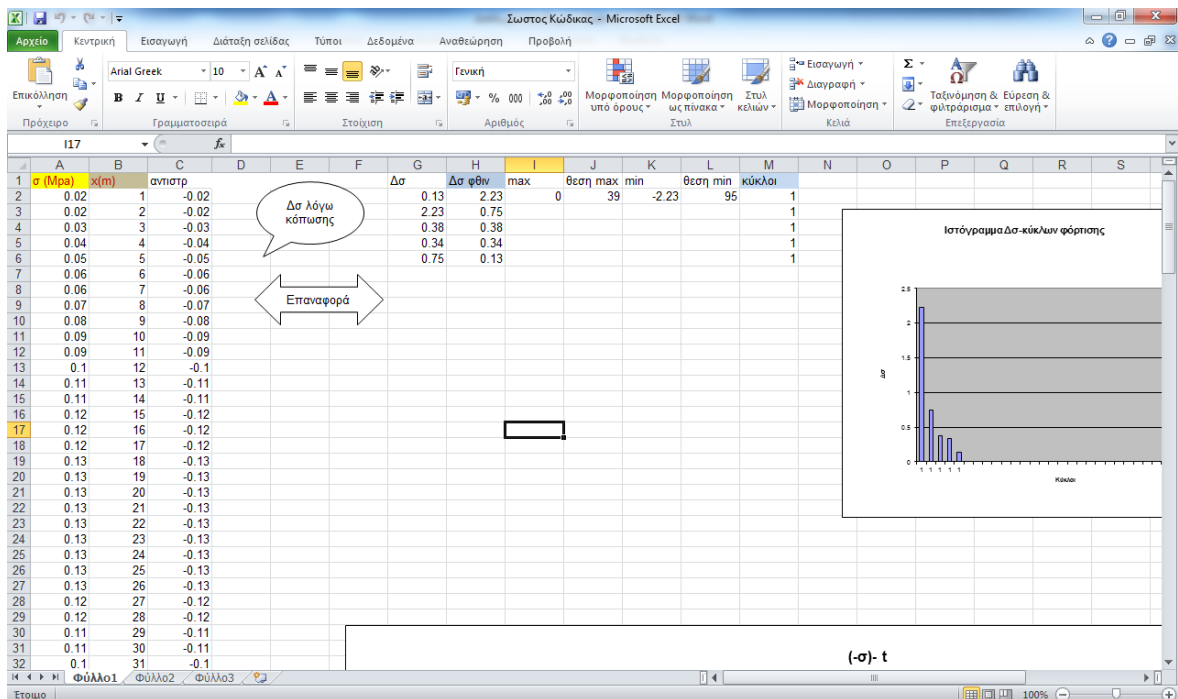
Ο κώδικας προγραμματισμού της μεθόδου της δεξαμενής που υλοποιείται στο Excel δέχεται στοιχεία φόρτισης τάσης (εδώ ορθής) συναρτήσεως του χρόνου. Δηλαδή δίνονται συντεταγμένες (σ , t), όπου σ = ορθή τάση (σε μονάδες τάσης, εδώ MPa) και t = χρόνος (σε sec) ή x = απόσταση κατά μήκος (σε m) αν πρόκειται για γραμμή επιρροής. Στις Εικόνες 2.2.1, 2.2.2 και 2.2.3 φαίνεται μια τυπική φόρτιση και επεξηγείται συνοπτικά η λειτουργία του προγράμματος.



Εικόνα 2.2.1: Φύλλο Excel με τυχαία φόρτιση. Στις στήλες A (τάση- σ) και B (χρόνος- t) δίδεται η φόρτιση. Το πρόγραμμα, υλοποιώντας τη μέθοδο της δεξαμενής, συμπληρώνει το διάγραμμα (κάτω διάγραμμα) αντιστρόφου τάσης με χρόνο, και στη συνέχεια υπολογίζει τις διαφορές τάσεων ($\Delta\sigma$) και τους κύκλους φόρτισης και συμπληρώνει το ιστόγραμμα τάσεων (πάνω διάγραμμα).



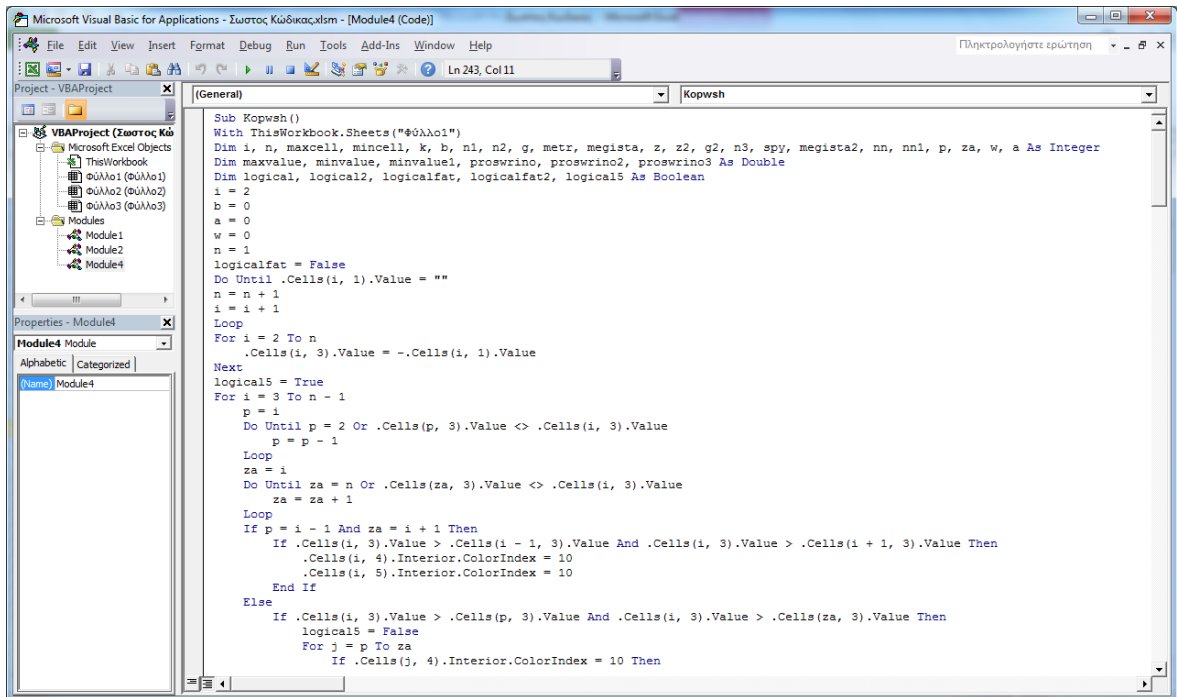
Εικόνα 2.2.2: Όμοια με την Εικόνα 3.1, με τη διαφορά της ύπαρξης x (m) αντί για t (sec) στη στήλη Β. Αυτό χρησιμοποιήθηκε και στην επίλυση της γενικής μεθόδου των φορτηγών στη συνέχεια της διπλωματικής (Κεφάλαιο 4)



Εικόνα 2.2.3: Εικόνα μετά την εκτέλεση του προγράμματος. Φαίνονται τα αποτελέσματα.

2.3 Κώδικας σε Visual Basic

Στην Εικόνα 2.2.4 φαίνεται το περιβάλλον της Visual Basic μέσα στο Excel.



Εικόνα 2.2.4: Περιβάλλον Visual Basic στο Excel

Ο κώδικας της μεθόδου είναι:

(Με πορτοκαλί οι επεξηγηματικές επισημάνσεις που δεν εμφανίζονται στον κώδικα.)

```

Sub Kopwsh()
With ThisWorkbook.Sheets("Φύλλο1")

Dim i, n, maxcell, mincell, k, b, n1, n2, g, metr, megista, z, z2, g2, n3, spy, megista2, nn, nn1, p, za, w, a As Integer
Dim maxvalue, minvalue, minvalue1, proswrino, proswrino2, proswrino3 As Double
Dim logical, logical2, logicalfat, logicalfat2, logical5 As Boolean

i = 2
b = 0
a = 0
w = 0
n = 1
logicalfat = False
Do Until .Cells(i, 1).Value = ""
n = n + 1
i = i + 1
Loop
For i = 2 To n
.Cells(i, 3).Value = -.Cells(i, 1).Value
Next
logical5 = True
For i = 3 To n - 1
p = i
Do Until p = 2 Or .Cells(p, 3).Value <> .Cells(i, 3).Value
p = p - 1
Loop
za = i
Do Until za = n Or .Cells(za, 3).Value <> .Cells(i, 3).Value
za = za + 1
Loop
If p = i - 1 And za = i + 1 Then
If .Cells(i, 3).Value > .Cells(i - 1, 3).Value And .Cells(i, 3).Value > .Cells(i + 1, 3).Value Then
.Cells(i, 4).Interior.ColorIndex = 10
.Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 10
End If
Else
If .Cells(i, 3).Value > .Cells(p, 3).Value And .Cells(i, 3).Value > .Cells(za, 3).Value Then
For j = p To za
If .Cells(j, 4).Interior.ColorIndex = 10 Then

```

```
Do Until .Cells(i, 1).Value = ""
```

```
    n = n + 1
```

```
    i = i + 1
```

```
Loop
```

Η πάνω διαδικασία μετράει τον αριθμό των καταχωρήσεων των σ-t (τάσεις-χρόνος)

```
For i = 2 To n
```

```
    .Cells(i, 3).Value = -.Cells(i, 1).Value
```

```
Next
```

Εύρεση αντιθέτου τιμής τάσεων, απαραίτητη διαδικασία για τη μέθοδο της δεξαμενής

```
logical5 = True
```

```
For i = 3 To n - 1
```

```
    p = i
```

```
    Do Until p = 2 Or .Cells(p, 3).Value <> .Cells(i, 3).Value
```

```
        p = p - 1
```

```
    Loop
```

```
    za = i
```

```
    Do Until za = n Or .Cells(za, 3).Value <> .Cells(i, 3).Value
```

```
        za = za + 1
```

```
    Loop
```

```
    If p = i - 1 And za = i + 1 Then
```

```
        If .Cells(i, 3).Value > .Cells(i - 1, 3).Value And .Cells(i, 3).Value > .Cells(i + 1, 3).Value
```

```
            Then
```

```
                .Cells(i, 4).Interior.ColorIndex = 10
```

```
                .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 10
```

```
            End If
```

```
    Else
```

```
        If .Cells(i, 3).Value > .Cells(p, 3).Value And .Cells(i, 3).Value > .Cells(za, 3).Value Then
```

```
            logical5 = False
```

```
            For j = p To za
```

```
                If .Cells(j, 4).Interior.ColorIndex = 10 Then
```

```

        logical5 = True
    End If
Next
If logical5 = False Then
    .Cells(i, 4).Interior.ColorIndex = 10
    .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 10
End If
End If
End If
Next
Εύρεση «κορυφών» (peak). Δηλαδή τοπικών μεγίστων.
logical5 = True
For i = 3 To n - 1
    p = i
    Do Until p = 2 Or .Cells(p, 3).Value <> .Cells(i, 3).Value
        p = p - 1
    Loop
    za = i
    Do Until za = n Or .Cells(za, 3).Value <> .Cells(i, 3).Value
        za = za + 1
    Loop
    If p = i - 1 And za = i + 1 Then
        If .Cells(i, 3).Value < .Cells(i - 1, 3).Value And .Cells(i, 3).Value < .Cells(i + 1, 3).Value
            Then
                .Cells(i, 4).Interior.ColorIndex = 15
                .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 15
            End If
        Else
            If .Cells(i, 3).Value < .Cells(p, 3).Value And .Cells(i, 3).Value < .Cells(za, 3).Value Then
                logical5 = False
            End If
        End If
    End If
Next

```

```

For j = p To za
    If .Cells(j, 4).Interior.ColorIndex = 15 Then
        logical5 = True
    End If
Next
If logical5 = False Then
    .Cells(i, 4).Interior.ColorIndex = 15
    .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 15
End If
End If
End If
Next

```

Εύρεση «πηγαδιών» (trough). Δηλαδή τοπικών ελαχίστων.

```

maxvalue = .Cells(3, 3).Value
maxcell = 3
For i = 2 To n
    If .Cells(i, 3).Value > maxvalue Then
        maxvalue = .Cells(i, 3).Value
        maxcell = i
    End If
Next

```

```

.Cells(2, 9).Value = maxvalue
.Cells(2, 10).Value = maxcell - 1

```

Εύρεση μεγίστου

```

minvalue = maxvalue
mincell = maxcell
For i = 2 To n
    If .Cells(i, 3).Value < minvalue Then
        minvalue = .Cells(i, 3).Value
    End If
Next

```

```

    mincell = i
End If
Next
.Cells(2, 11).Value = minvalue
.Cells(2, 12).Value = mincell - 1
Εύρεση ελαχίστου
k = 2
minvalue1 = minvalue
mincell = 3
minvalue = maxvalue
mincell = 3
For metr = 2 To maxcell
    If .Cells(metr, 3).Value < minvalue Then
        minvalue = .Cells(metr, 3).Value
        mincell = metr
    End If
Next
.Cells(k, 7).Value = maxvalue - minvalue
k = k + 1
.Cells(mincell, 5).Interior.ColorIndex = 25
minvalue = maxvalue
mincell = 3
Διαδικασία εύρεσης Δσ στην περίπτωση του μεγίστου.
For metr = maxcell To n
    If .Cells(metr, 3).Value < minvalue Then
        minvalue = .Cells(metr, 3).Value
        mincell = metr
    End If
Next
.Cells(k, 7).Value = maxvalue - minvalue

```

```

k = k + 1

.Cells(mincell, 5).Interior.ColorIndex = 25

minvalue2 = maxvalue

mincell = maxcell

.Cells(maxcell, 5).Interior.ColorIndex = 20

For i = 2 To n
  If .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 10 And .Cells(i, 3).Value = maxvalue Then
    j = i
    Do Until j = 2 Or .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15
      j = j - 1
    Loop
    If .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15 Then
      w = j
      Do Until w = 2 Or .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 10 Or
        .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 20 Or .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value
        w = w - 1
      Loop
      If .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value And .Cells(j, 3).Value < .Cells(i, 3).Value
        Then
          .Cells(k, 7).Value = .Cells(i, 3).Value - .Cells(j, 3).Value
          k = k + 1
          .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 25
        End If
      End If
    j = i
    Do Until j = n Or .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15
      j = j + 1
    Loop
    If .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15 Then
      w = j

```



```

Do Until w = n Or .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 10 Or
    .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 20 Or .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value
    w = w + 1
Loop
If .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value And .Cells(j, 3).Value < .Cells(i, 3).Value
Then
    .Cells(k, 7).Value = .Cells(i, 3).Value - .Cells(j, 3).Value
    k = k + 1
    .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 25
End If
End If
.Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 20
End If

```

Next

Διαδικασία εύρεσης των Δσ στην περίπτωση των παραπάνω από ένα μεγίστων.

logicalfat2 = False

a = 0

For i = 2 To n

```
If .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 10 Then
```

```
    j = i
```

```
    Do Until j = 2 Or .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15
```

```
        j = j - 1
```

```
    Loop
```

```
    If .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15 Then
```

```
        w = j
```

```
        Do Until w = 2 Or .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 10 Or
```

```
            .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 20 Or .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value
```

```
            w = w - 1
```

```
        Loop
```

```
        If .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value Or w = 2 And
```

```

.Cells(j, 3).Value < .Cells(i, 3).Value Then
    .Cells(k, 7).Value = .Cells(i, 3).Value - .Cells(j, 3).Value
    k = k + 1
End If
End If
j = i
Do Until j = n Or .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15
    j = j + 1
Loop
If .Cells(j, 5).Interior.ColorIndex = 15 Then
    w = j
    Do Until w = n Or .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 10 Or
        .Cells(w, 5).Interior.ColorIndex = 20 Or .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value
        w = w + 1
    Loop
    If .Cells(w, 3).Value >= .Cells(i, 3).Value Or w = n And
        .Cells(j, 3).Value < .Cells(i, 3).Value Then
            .Cells(k, 7).Value = .Cells(i, 3).Value - .Cells(j, 3).Value
            k = k + 1
        End If
    End If
    .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 20
End If
Next

```

Επαναληπτική διαδικασία εύρεσης υπολοίπων Δσ εκτός από αυτά που προκύπτουν από το ολικό μέγιστο.

```

k = 2
nn = 1
i = 2
Do Until .Cells(i, 7).Value = ""

```

```

i = i + 1

nn = nn + 1
Loop
For i = 2 To nn
    If .Cells(i, 7).Value > 0 Then
        .Cells(k, 8).Value = .Cells(i, 7).Value
        k = k + 1
    End If
Next
nn1 = 1
i = 2
Do Until .Cells(i, 8).Value = ""
    i = i + 1
    nn1 = nn1 + 1
Loop
proswrino = 0
For i = 2 To nn1
    For j = 2 To nn1 - 1
        If .Cells(j + 1, 8).Value > .Cells(j, 8).Value Then
            proswrino = .Cells(j + 1, 8).Value
            .Cells(j + 1, 8).Value = .Cells(j, 8).Value
            .Cells(j, 8).Value = proswrino
        End If
    Next
Next
For i = 2 To nn1
    .Cells(i, 13).Value = 0
    For j = 2 To nn1
        If .Cells(j, 8).Value = .Cells(i, 8).Value Then
            .Cells(i, 13).Value = .Cells(i, 13).Value + 1

```

```

    If i < j Then
        .Cells(j, 8).Value = ""
        .Cells(j, 13).Value = ""
    End If
End If
Next
Next
For i = 2 To nn1
    If .Cells(i, 8).Value = "" Then
        .Cells(i, 13).Value = ""
    End If
Next
For i = 2 To n
    .Cells(i, 4).Interior.ColorIndex = 0
    .Cells(i, 5).Interior.ColorIndex = 0
Next
Έλεγχος διπλογραφής και κατάταξη κατά φθίνουσα σειρά των αποτελεσμάτων.
End With
End Sub

```

Και ο κώδικας της επαναφοράς στην, πριν την επίλυση, κατάσταση είναι:

```

Sub epanafora()
With ThisWorkbook.Sheets("Φύλλο1")
Dim i, n As Integer
n = 1
i = 2
Do Until .Cells(i, 3).Value = ""
    i = i + 1
    n = n + 1
Loop
For i = 2 To n
    .Cells(i, 3).Value = ""
Next
n = 1
i = 2

```

```
Do Until .Cells(i, 7).Value = ""
    i = i + 1
    n = n + 1
Loop
For i = 2 To n
    .Cells(i, 7).Value = ""
Next
For i = 2 To n
    .Cells(i, 8).Value = ""
Next
For i = 2 To n
    .Cells(i, 13).Value = ""
Next
.Cells(2, 9).Value = ""
.Cells(2, 10).Value = ""
.Cells(2, 11).Value = ""
.Cells(2, 12).Value = ""
End With
End Sub
```

3 Εφαρμογή Ελέγχου Κόπωσης σε σύμμικτη γέφυρα τεσσάρων ανοιγμάτων μεταλλικής κύριας δοκού

3.1 Εισαγωγή

Σε περίπτωση καταπόνησης των στοιχείων μιας κατασκευής υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση με μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης (όπως γίνεται στην περίπτωση των γεφυρών) απαιτείται η εξέταση της αντοχής τους σε κόπωση. Η αντοχή αυτή εξαρτάται εν γένει από τη διαμόρφωση της συγκεκριμένης κατασκευαστικής λεπτομέρειας και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 1).

Οι συνηθέστερες λεπτομέρειες συνοψίζονται σε κατηγορίες οι οποίες έχουν μια συγκεκριμένη αντοχή σε κόπωση ορθής τάσης $\Delta\sigma_C$ για αριθμό κύκλων $N_C=2 \times 10^6$. Παρόμοιες καμπύλες ισχύουν και για επιβολή διατμητικών τάσεων $\Delta\tau_C$.

3.2 Κανονιστικό πλαίσιο

Προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανή βλάβη σε ένα τμήμα της γέφυρας που μπορεί να προκληθεί από επαναλαμβανόμενες μεταβολές των τάσεων, λόγω της κυκλοφορίας οχημάτων, ο κανονισμός ορίζει μια σειρά από πέντε μοντέλα φόρτισης για κατακόρυφα φορτία. Με βάση αυτά, υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις και το φάσμα διακύμανσης των τάσεων στην κάθε φορά υπό εξέταση θέση. Πρέπει να αποδειχθεί με κάποια μέθοδο ότι κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της γέφυρας, θα συμπεριφερθεί με ασφάλεια με μία αποδεκτή πιθανότητα ότι δε θα συμβεί αστοχία σε κόπωση (δηλαδή βαθμιαία ανάπτυξη και διάδοση ρωγμής λόγω της μεταβολής των τάσεων).

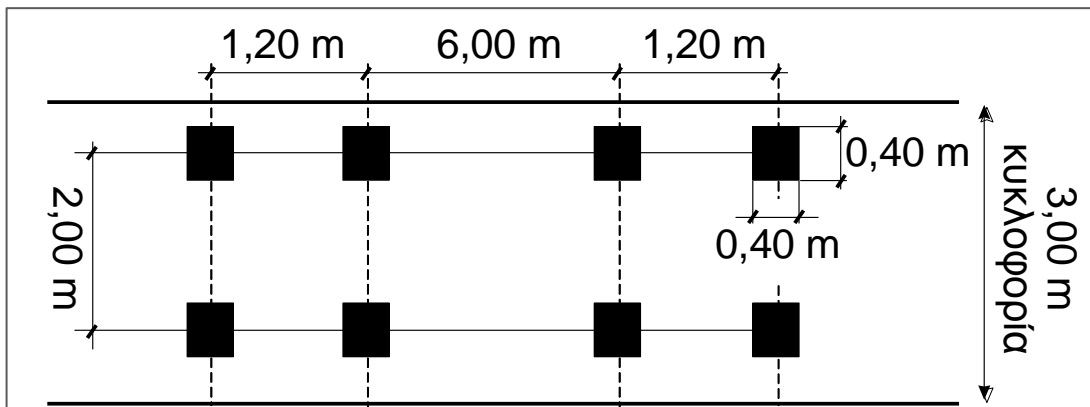
Κατά τον έλεγχο σε κόπωση οδικών γεφυρών, προσδιορίζονται κατ' αρχήν για την εξεταζόμενη λεπτομέρεια τα εύρη τάσεων που προκαλούνται από τη διέλευση διαφόρων οχημάτων στη γέφυρα. Τα εύρη αυτά τάσεων συνοψίζονται με τη βοήθεια μιας κατάλληλης μεθόδου μέτρησης, π.χ. μέθοδος δεξαμενής (δες Κεφάλαια 1, 2), σε φάσματα σχεδιασμού. Αυτά με τη σειρά τους εκφράζουν ιστογράμματα εύρων τάσεων με κύκλους φόρτισης. Ο έλεγχος γίνεται με τη βοήθεια του λόγου του Miner της γραμμικής συσσώρευσης βλάβης.

Ο έλεγχος σε κόπωση στις σύμμικτες γέφυρες αφορά τη σιδηροδοκό τους (αντικείμενο που παρουσιάζεται και στη συνέχεια του κεφαλαίου), τους διατμητικούς συνδέσμους, τον εφελκόμενο χάλυβα οπλισμού και τους χάλυβες προέντασης. Στην παρούσα παράγραφο θα δοθούν οι κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 2, για τον έλεγχο της σιδηροδοκού. Στο τέλος θα γίνει αναφορά του ελέγχου σε κόπωση των διατμητικών συνδέσμων και του εφελκόμενου οπλισμού.

Η φόρτιση για τον έλεγχο σε κόπωση προέρχεται από ένα τυποποιημένο όχημα (Σχήμα 4.1.), το οποίο, αναλόγως του όγκου κυκλοφορίας, διέρχεται πάνω από τη γέφυρα N_{obs} (Πίνακας 4.3.) φορές ανά έτος και ανά λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας. Το όχημα αυτό αποτελεί το μοντέλο φόρτισης 3 του Ευρωκώδικα και περιλαμβάνει 4 άξονες με βάρος κάθε άξονα 120 kN και επιφάνεια επαφής του τροχού ίση με 0,40x0,40 m².

Για οδογέφυρες ανοίγματος μέχρι 80 m και σιδηροδρομικές γέφυρες ανοίγματος μέχρι 100 m:

φορτίο άξονα 120 kN, συνολικό βάρος $Q_{m,1}=480$ kN



Σχήμα 3.1: Τυποποιημένο όχημα μοντέλου φόρτισης 3 σε κόπωση

Σημείωση: για μήκος γέφυρας > 40 m τοποθετούνται δύο οχήματα στη σειρά σε απόσταση 40 m

Για κίνηση του οχήματος αυτού κατά μήκος της γέφυρας υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις καθώς και η διακύμανση των τάσεων. Δηλαδή η αλγεβρική διαφορά μεταξύ των ακραίων τιμών ενός συγκεκριμένου κύκλου τάσεων.

Στον παρακάτω Πίνακα 3.1. δίνονται οι χαρακτηριστικοί συνδυασμοί δράσεων για έλεγχο σε κόπωση.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικοί συνδυασμοί δράσεων για έλεγχο κόπωσης

Γέφυρες	Ίδια βάρη G	Ερπυσμός C_{sec}	Συστολή ξήρανσης S_{sec}	Θερμοκρασία T	Φορτία κυκλοφορίας Q
Οδικές	1,0	1,0	1,0	0,6	Μοντέλο κυκλοφορίας 3
Σιδηροδρομικές /	1,0	1,0	1,0	0,6	$\Phi_2 \cdot LM 71$

Τα ακραία εντατικά μεγέθη βρίσκονται από το άθροισμα των μεγεθών λόγω μονίμων δράσεων και των φορτίων κυκλοφορίας. Για παράδειγμα οι ελάχιστες και μέγιστες δρώσες ροπές βρίσκονται από τις σχέσεις:

$$M_{min,f,E} = M_{per} + M_{min,f}$$

$$M_{max,f,E} = M_{per} + M_{max,f}$$

όπου:

M_{per} = ροπές λόγω μονίμων δράσεων

$M_{min,f}$ $M_{max,f}$ = ελάχιστες – μέγιστες ροπές λόγω φορτίων κυκλοφορίας

Από τα εντατικά μεγέθη προσδιορίζονται οι ελάχιστες – μέγιστες τιμές των τάσεων στις θέσεις ελέγχου. Στις περιοχές θετικών ροπών κάμψης η πλάκα σκυροδέματος λαμβάνεται υπόψη με λόγο μέτρων ελαστικότητας χάλυβα – σκυροδέματος η_0 για βραχυχρόνια

φόρτιση. Στις περιοχές αρνητικών ροπών η συμμετοχή του σκυροδέματος αγνοείται ή λαμβάνεται μόνο μεταξύ των ρωγμών.

Στον απλοποιημένο έλεγχο σε κόπωση, ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή λαμβάνονται υπόψη μέσω ενός διορθωτικού συντελεστή λ , όπως δίνεται στη συνέχεια:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{\max}$$

όπου λ_1 είναι ο συντελεστής βλάβης λόγω κυκλοφορίας και εξαρτάται από το μήκος της κρίσιμης γραμμής επιρροής ή ζώνης,

λ_2 είναι ο συντελεστής όγκου κυκλοφορίας,

λ_3 είναι ο συντελεστής για τη διάρκεια ζωής της γέφυρας,

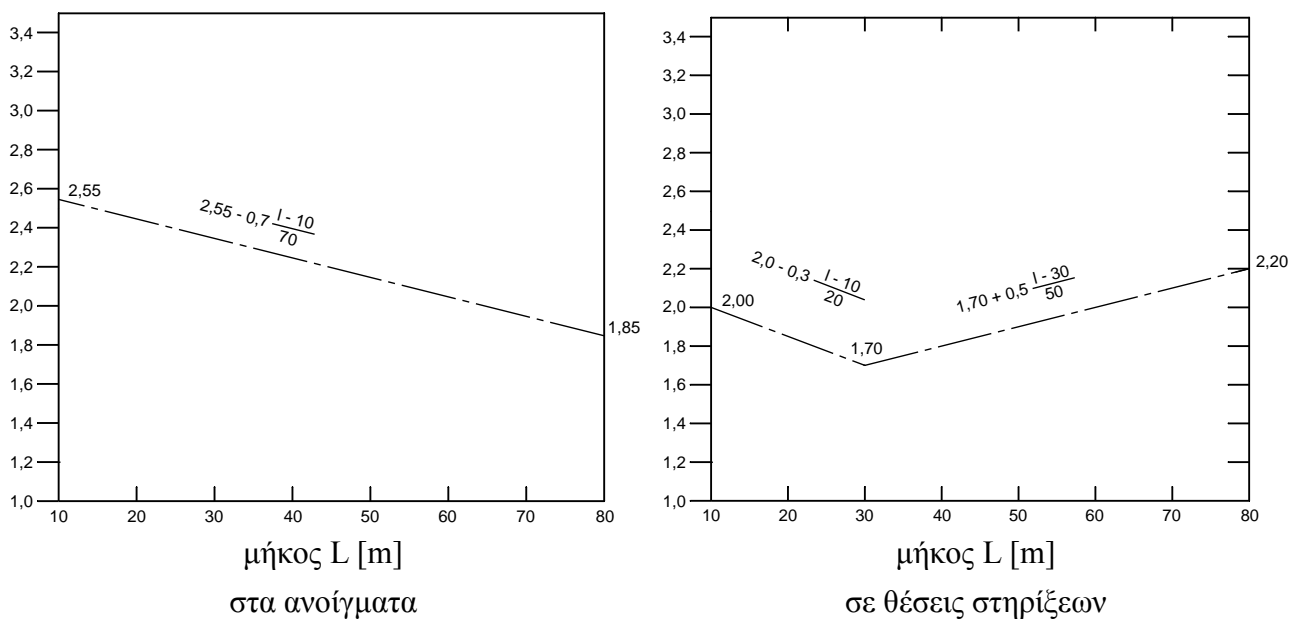
λ_4 είναι ο συντελεστής για κυκλοφορία σε άλλες λωρίδες (οδικές γέφυρες) ή για το δομικό στοιχείο που φορτίζεται με περισσότερες από μία τροχιές (σιδηροδρομικές γέφυρες),

λ_{\max} είναι η μέγιστη τιμή του λ , λαμβανομένου υπόψη του ορίου κόπωσης,

Οδογέφυρες

- Συντελεστής λ_1

Η τιμή του συντελεστή λ_1 δίνεται στο Σχήμα 3.2. Για διατμητικούς ήλους λαμβάνεται $\lambda_{v1} = 1,55$. Το κρίσιμο μήκος της γραμμής ή ζώνης επιρροής L λαμβάνεται από τον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.2: Συντελεστής λ_1 για ροπές σε οδογέφυρες

Πίνακας 3.2: Μήκος L

Μέγεθος	Φορέας / μέλος	Θέση	
Ροπές	Αμφιέριεστος		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	Αμφιέριεστος/ Συνεχής	Άνοιγμα	θεωρούμενο άνοιγμα L_i
		Στήριγμα	$0,4 \times$ το θεωρούμενο άνοιγμα L_i .
Αντιδράσεις στήριξης		Ακραίες στηρίξεις	θεωρούμενο άνοιγμα L_i ,
		Ενδιάμεσες στηρίξεις	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 three spans. The spans are labeled 'άνοιγμα' (span) and the supports are labeled 'στήριγμα' (support). The first span length is L_1 and the second is L_2 . The diagram shows the distribution of moments and reactions. At the supports, the moment is $0,15L_1$ and $0,15L_2$. At the ends, the moment is $0,15L_2$.

- Συντελεστής λ_2

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left(\frac{N_{Obs}}{N_0} \right)^{1/5} = \frac{480}{480} \cdot \left(\frac{N_{Obs}}{N_0} \right)^{1/5}$$

Σημείωση: Για διατμητικούς ήλους ο εκθέτης 1/5 γίνεται 1/8

Πίνακας 3.3: Τιμές N_{obs} και N_0

Κατηγορίες Κυκλοφορίας		N_{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	$0,05 \times 10^6$
$N_0 = 0,5 \times 10^6$		

- Συντελεστής λ_3

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

όπου t_{Ld} είναι η διάρκεια ζωής σχεδιασμού της γέφυρας σε έτη.

Σημείωση: Για διατμητικούς ήλους ο εκθέτης $1/5$ γίνεται $1/8$

- Συντελεστής λ_4

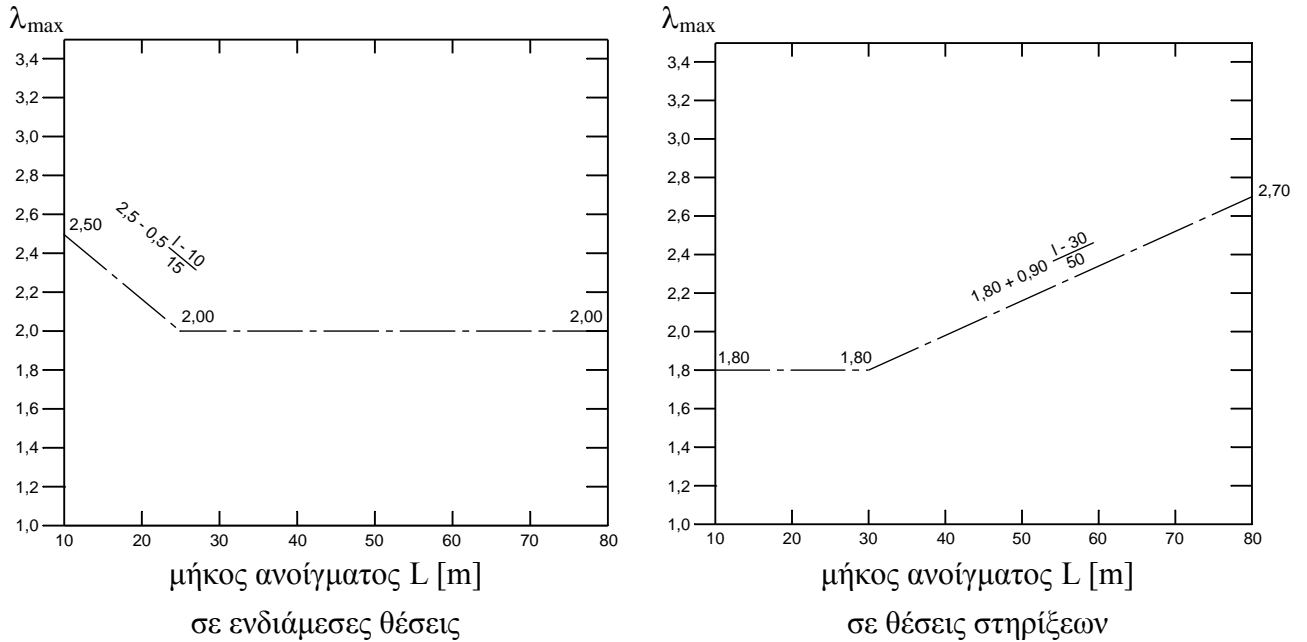
$$\lambda_4 = \left[1 + \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^m + \left(\frac{\eta_3}{\eta_1} \right)^m + \dots + \left(\frac{\eta_k}{\eta_1} \right)^m \right]^{1/m}$$

k είναι ο αριθμός λωρίδων βαρείας κυκλοφορίας,

η_j είναι η τιμή της γραμμής επιρροής του εξεταζόμενου εντατικού μεγέθους στο μέσον της λωρίδας j .

$m = 5$ και για διατμητικούς ήλους $m = 8$

- Συντελεστής λ_{\max}



Σχήμα 3.3: Συντελεστής λ_{\max} για ροπές σε οδογέφυρες

Προσδιορισμός ευρών τάσεων

Τα εύρη τάσεων προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta\sigma_E = \lambda \cdot |\sigma_{\max,f} - \sigma_{\min,f}|$$

$$\Delta\tau_E = \lambda \cdot |\tau_{\max,f} - \tau_{\min,f}|$$

Γενική ανισότητα ελέγχου

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{M,f}}$$

$$\gamma_{Ff} = 1,0$$

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας αντιστάσεων δομικού χάλυβα $\gamma_{Mf,a}$

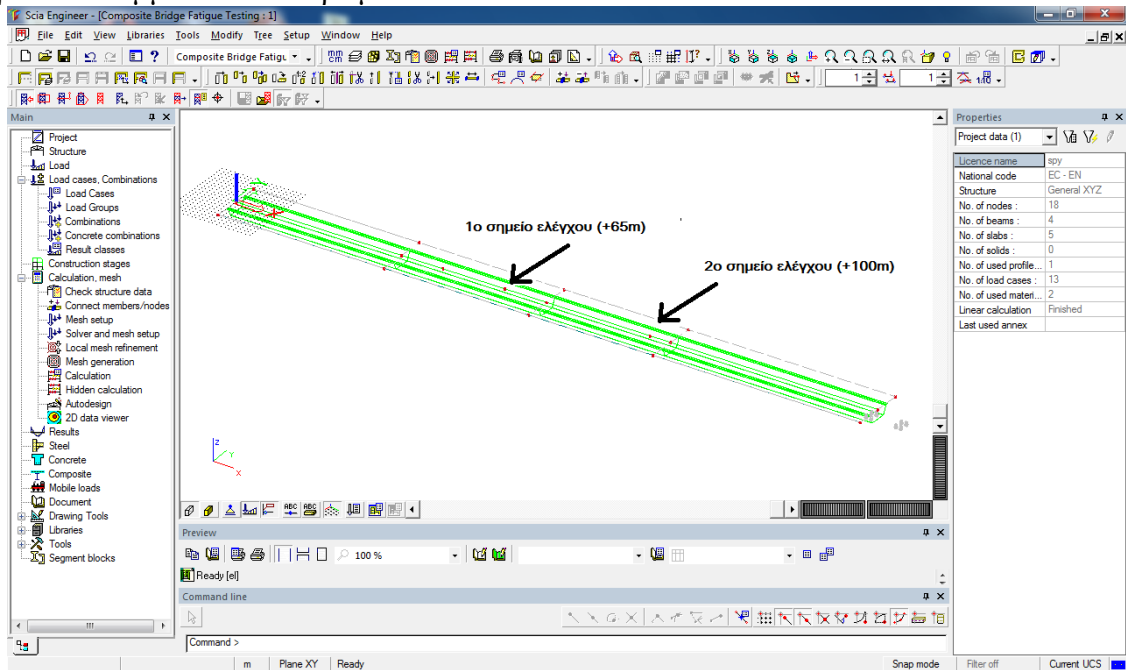
Επιπτώσεις αστοχίας	Χαμηλές (δευτερεύοντα στοιχεία)	Υψηλές (κύρια στοιχεία)
Ανοχή βλαβών (επισκέψιμα στοιχεία)	1,00	1,15
Ασφάλεια ζωής (μη επισκέψιμα στοιχεία)	1,15	1,35

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι μεγάλη σημασία στον έλεγχο σιδηρών και σύμμικτων γεφυρών έχουν οι λεπτομέρειες του κάθε υπό εξέταση σημείου, με βάση τις οποίες κατατάσσονται κιόλας σε κατηγορίες λεπτομερειών, που επηρεάζουν την επίλυση.

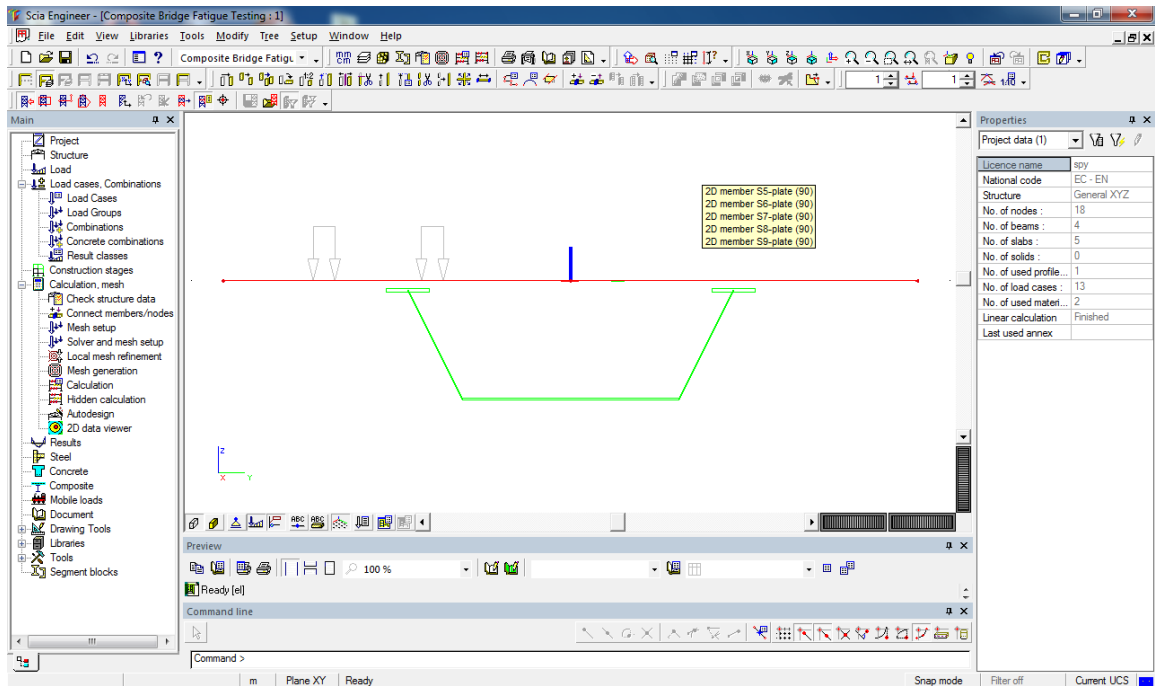
Η ένταξη διαφόρων λεπτομερειών σε κατηγορίες γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων πινάκων, όπως ενδεικτικά δίνονται (για οικονομία χώρου) στο Παράρτημα Α.

3.3 Περιγραφή Φορέα

Ο φορέας υλοποιήθηκε στο λογισμικό Nemetchek SCIA Engineer 2009. Είναι μια σύμμικτη γέφυρα, 155 μέτρων, τεσσάρων ανοιγμάτων με μεταλλικό κύριο φορέα και σύμμικτο κατάστρωμα.

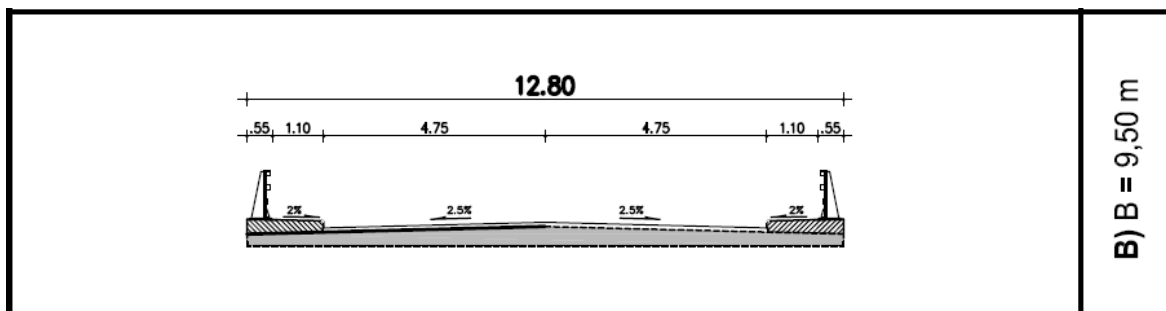


Εικόνα 3.3.1: Φορέας

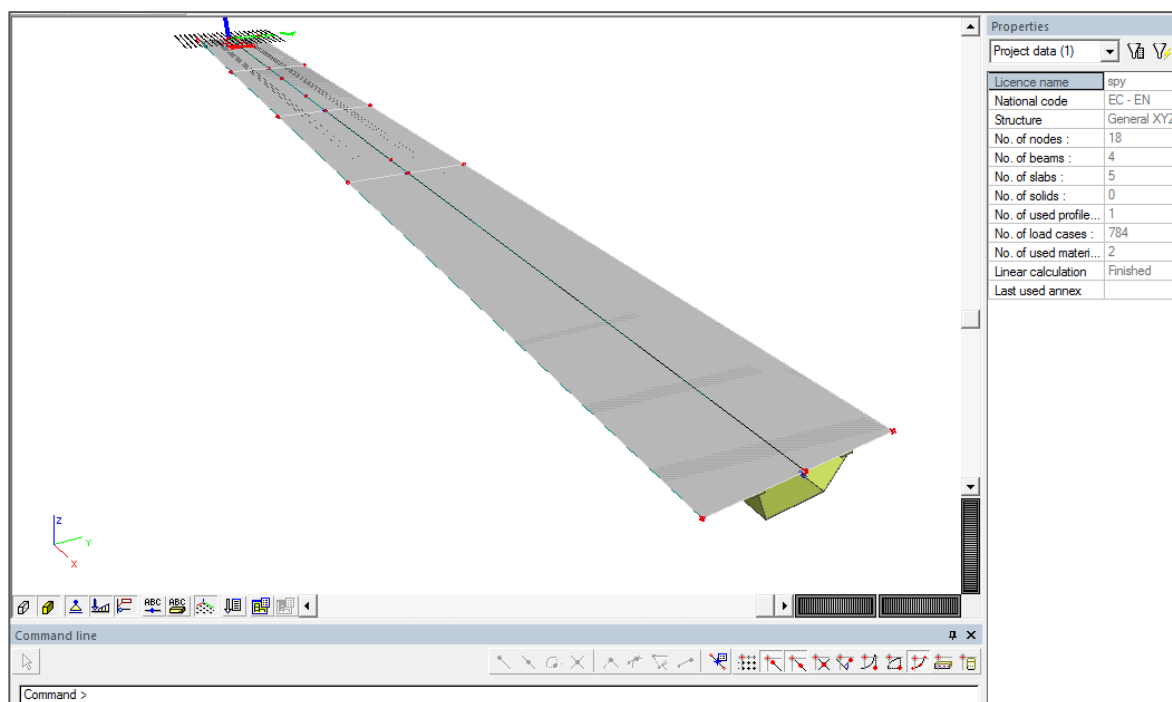


Εικόνα 3.3.2: Εγκάρσια τομή γέφυρας

Τα στοιχεία της γέφυρας παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

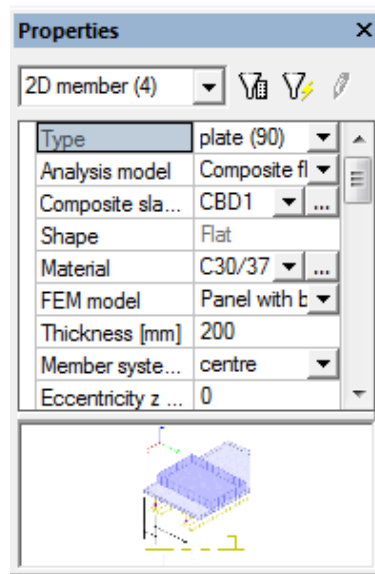


Εικόνα 3.3.3: Στοιχεία οδοστρώματος γέφυρας

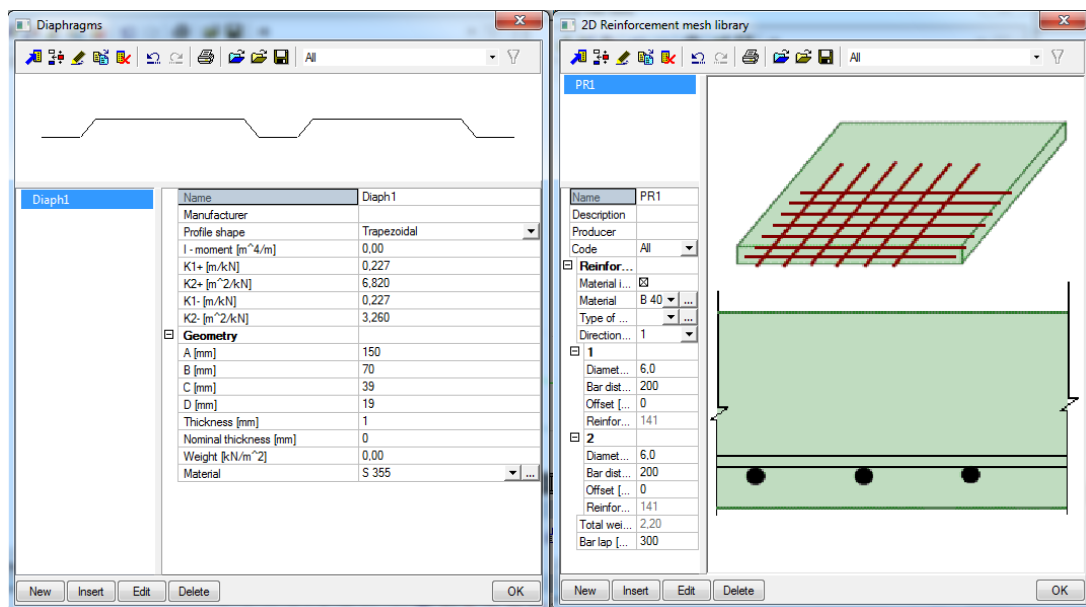


Εικόνα 3.3.4: Ο φορέας σε προοπτική

Στην Εικόνα 3.3.5. φαίνονται τα στοιχεία του σύμμικτου καταστρώματος πάχους 200mm με χαλυβδόφυλλα και άνω οπλισμό σκυροδέματος (Εικόνα 3.3.6).

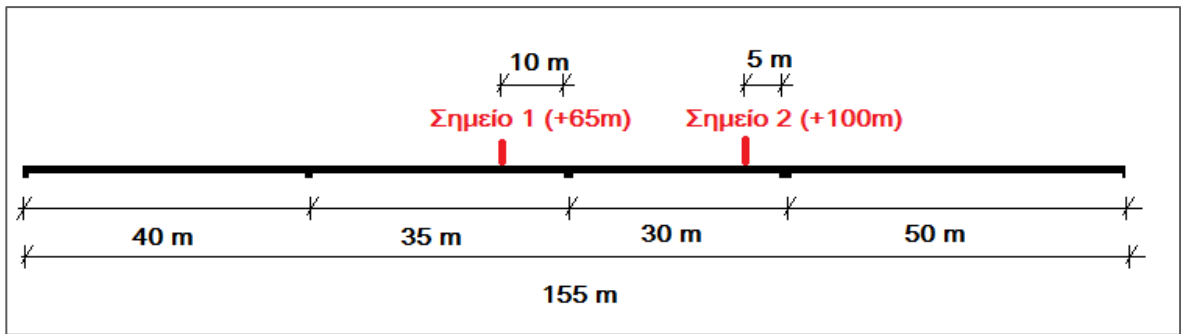


Εικόνα 3.3.5: Στοιχεία σύμμικτου καταστρώματος

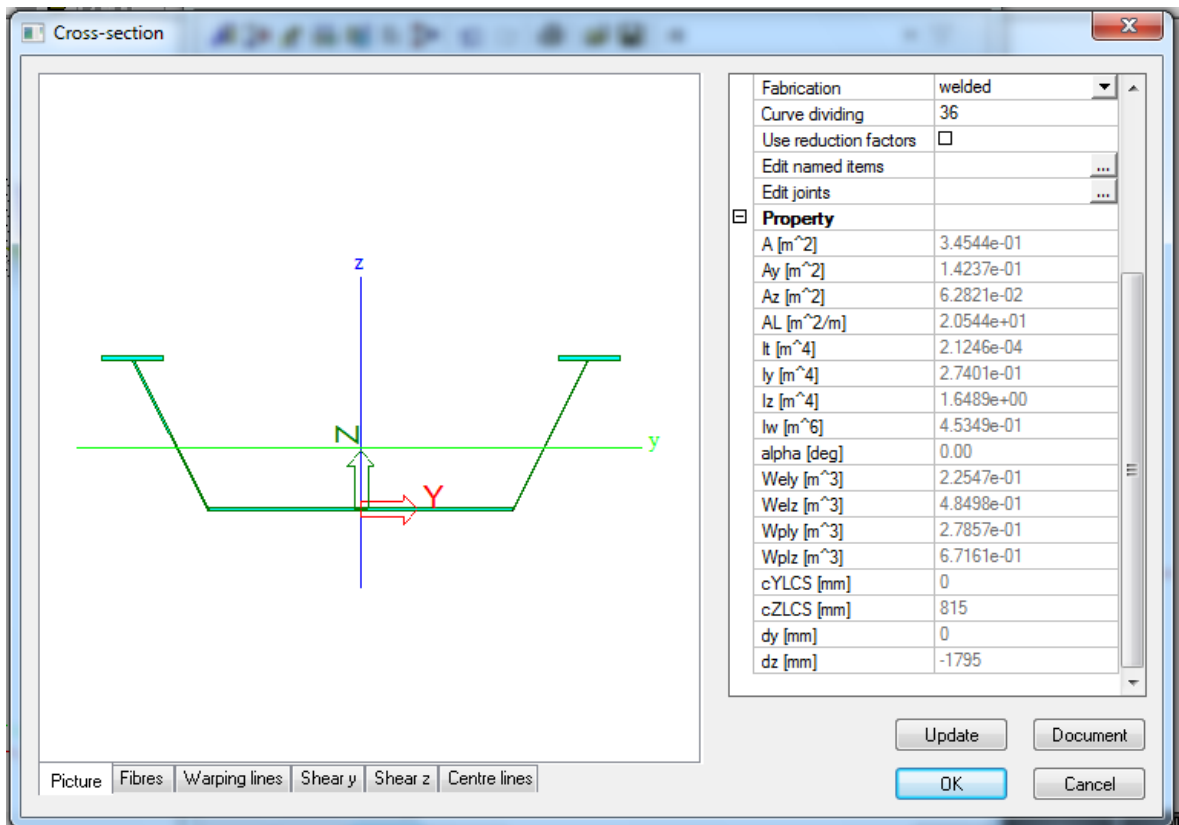


Εικόνα 3.3.6: Χαλυβδόφυλλα και άνω οπλισμός σκυροδέματος

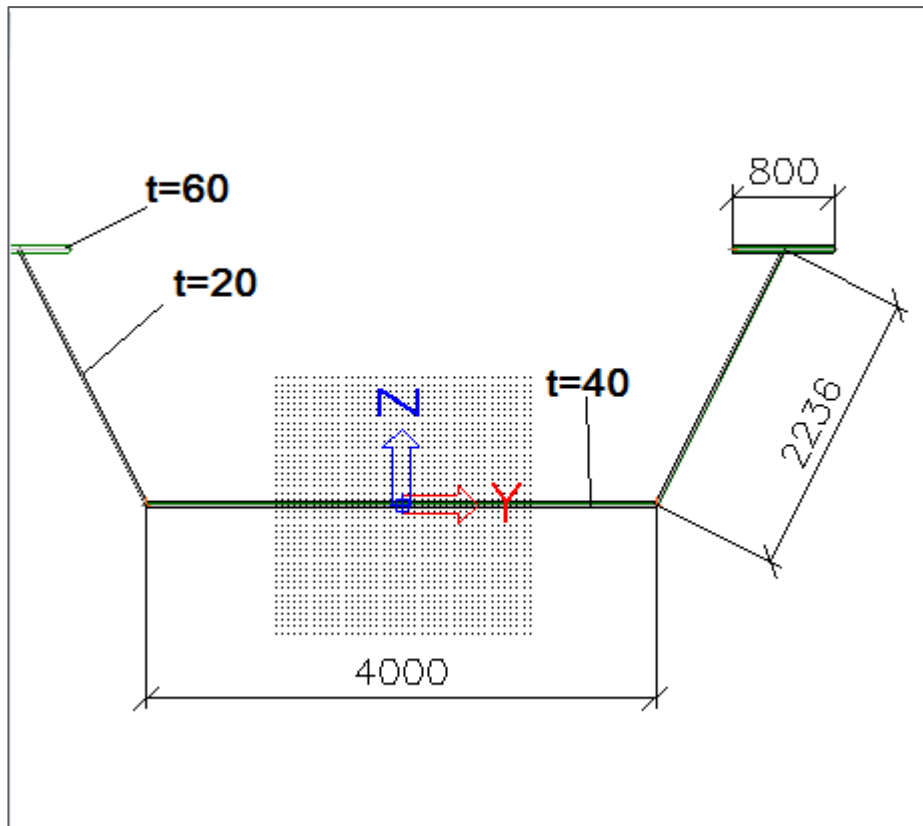
Στις παρακάτω Εικόνες (3.3.7., 3.3.8.,3.3.9.) φαίνονται τα στοιχεία και οι διαστάσεις της συγκολλητής διατομής από χάλυβα, καθώς και μια σχηματική κατά μήκος τομή της γέφυρας με τα ανοίγματά της.



Εικόνα 3.3.7: Σχηματική κατά μήκος τομή της γέφυρας

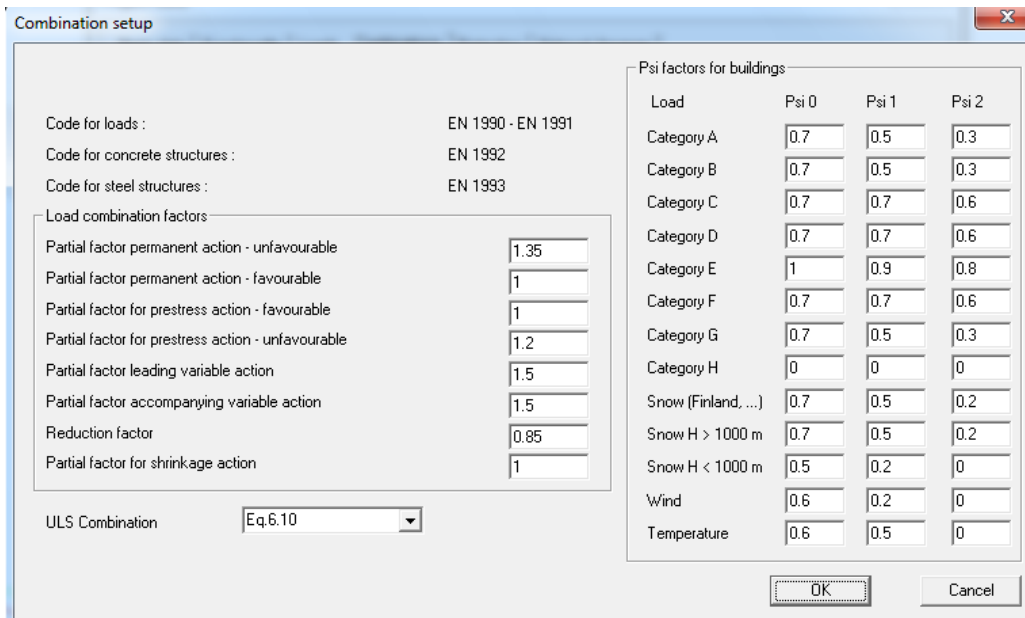


Εικόνα 3.3.8: Εικόνα και στοιχεία διατομής

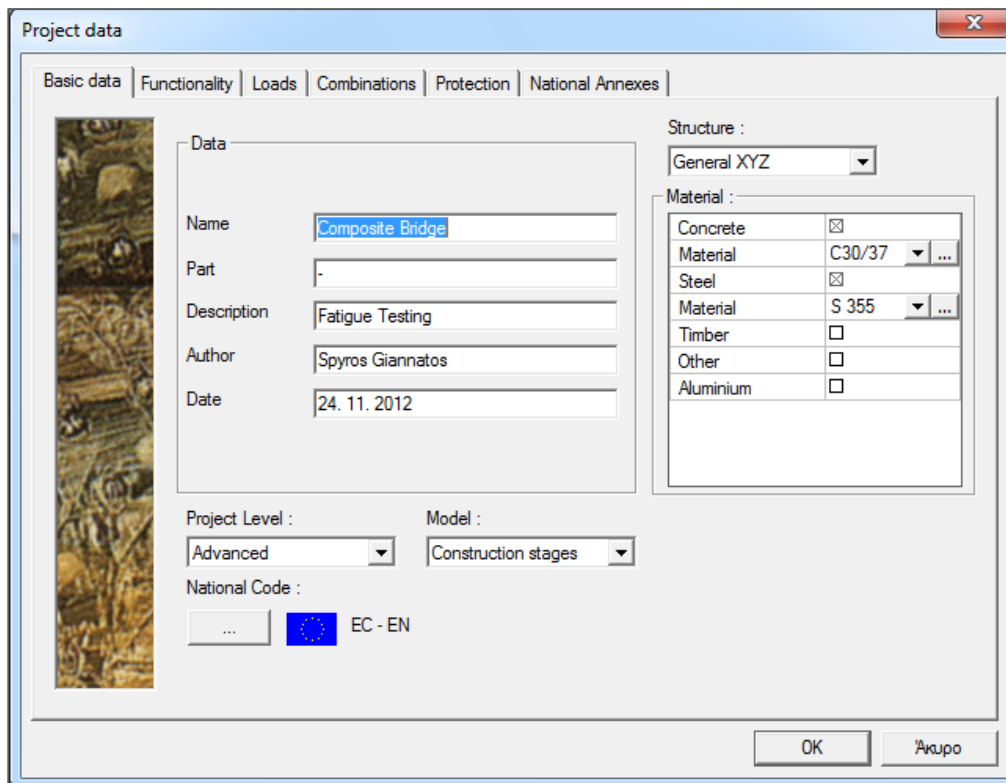


Εικόνα 3.3.9: Γεωμετρικά στοιχεία της διατομής (σε mm)

Στην Εικόνα 3.3.11. φαίνονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στην Εικόνα 3.3.10. οι συντελεστές που μπήκαν στην ανάλυση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.

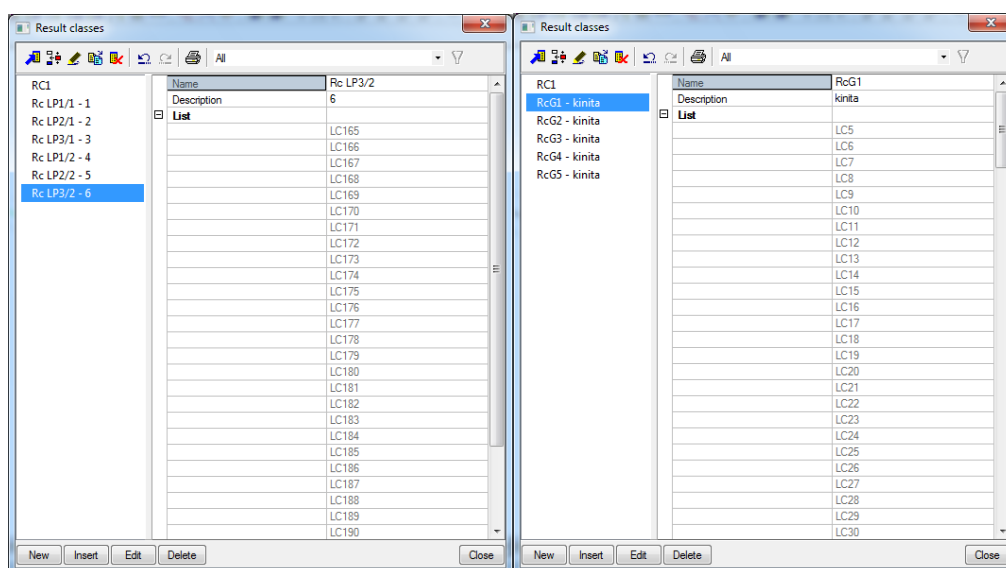


Εικόνα 3.3.10: Συντελεστές



Εικόνα 3.3.11: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (C30/37, S355)

Στις παρακάτω Εικόνες (3.3.12., 3.3.13.) φαίνονται οι δυο μορφές κατηγοριών αποτελεσμάτων. Μια για την απλοποιημένη μέθοδο (Παράγραφος 3.4.1, Εικόνα 3.12), όπου το τυποποιημένο όχημα (Εικόνα 3.3.15) τοποθετείται ανά 5m στο κατάστρωμα της γέφυρας (Εδώ υπάρχουν 6 διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης της λωρίδας βραδείας κυκλοφορίας – Αναλυτικά στο Παράρτημα Δ), και μια για τη γενική μέθοδο (Παράγραφος 3.4.2, Εικόνα 3.3.13), όπου τα φορτηγά τοποθετούνται στη μέση του καταστρώματος ανά 1m.



Εικόνα 3.3.12: Κατηγορία Αποτελεσμάτων για την απλοποιημένη (αριστερά) την γενική (δεξιά) μέθοδο

3.4 Εφαρμογή Ελέγχου Κόπωσης

3.4.1 Έλεγχος έναντι κόπωσης με την απλοποιημένη μέθοδο του Ευρωκώδικα

Από την ανάλυση του προγράμματος SCIA και τη συγκέντρωση των αποτελεσμάτων στο Excel, προέκυψε η παρακάτω εικόνα:

Point	Stress Component	Value
1 (Top flange)	Θέση στη διατομή: κάτω πέλμα (down fl) 1	
	Σημείο κατά μήκος της δοκού: Γ' δοκός / x = 100m / dx = +25m / Fatigue2	
	5 ορθή τάση (σ) max:	2.24
	6 διατμητική τάση (τ) :	2.45
	7 ορθή τάση (σ) min:	-6.9
	9 Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	10 κάτω πέλμα (down fl)	
2 (Web)	Θέση στη διατομή: κορμός (web)	
	Σημείο κατά μήκος της δοκού: Γ' δοκός / x = 100m / dx = +25m / Fatigue2	
	5 ορθή τάση (σ) :	9.76
	6 διατμητική τάση (τ) :	4.27
	7 ορθή τάση (σ) min:	-3.17
	9 Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	10 κάτω πέλμα (down fl)	
3 (Bottom flange)	Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	Σημείο κατά μήκος της δοκού: Β' δοκός / x = 65m / dx = +25m / Fatigue1	
	13 ορθή τάση (σ) :	4.29
	14 διατμητική τάση (τ) :	1.74
	15 ορθή τάση (σ) min:	-1.54
	9 Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	10 κάτω πέλμα (down fl)	
4 (Web)	Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	Σημείο κατά μήκος της δοκού: Β' δοκός / x = 65m / dx = +25m / Fatigue1	
	13 ορθή τάση (σ) :	2.18
	14 διατμητική τάση (τ) :	3.04
	15 ορθή τάση (σ) min:	-6.07
	9 Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	10 κάτω πέλμα (down fl)	
5 (Bottom flange)	Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	Σημείο κατά μήκος της δοκού: Β' δοκός / x = 65m / dx = +25m / Fatigue1	
	13 ορθή τάση (σ) :	2.25
	14 διατμητική τάση (τ) :	0
	15 ορθή τάση (σ) min:	-6.24
	9 Θέση στη διατομή: άνω πέλμα (fla-sla)	
	10 κάτω πέλμα (down fl)	

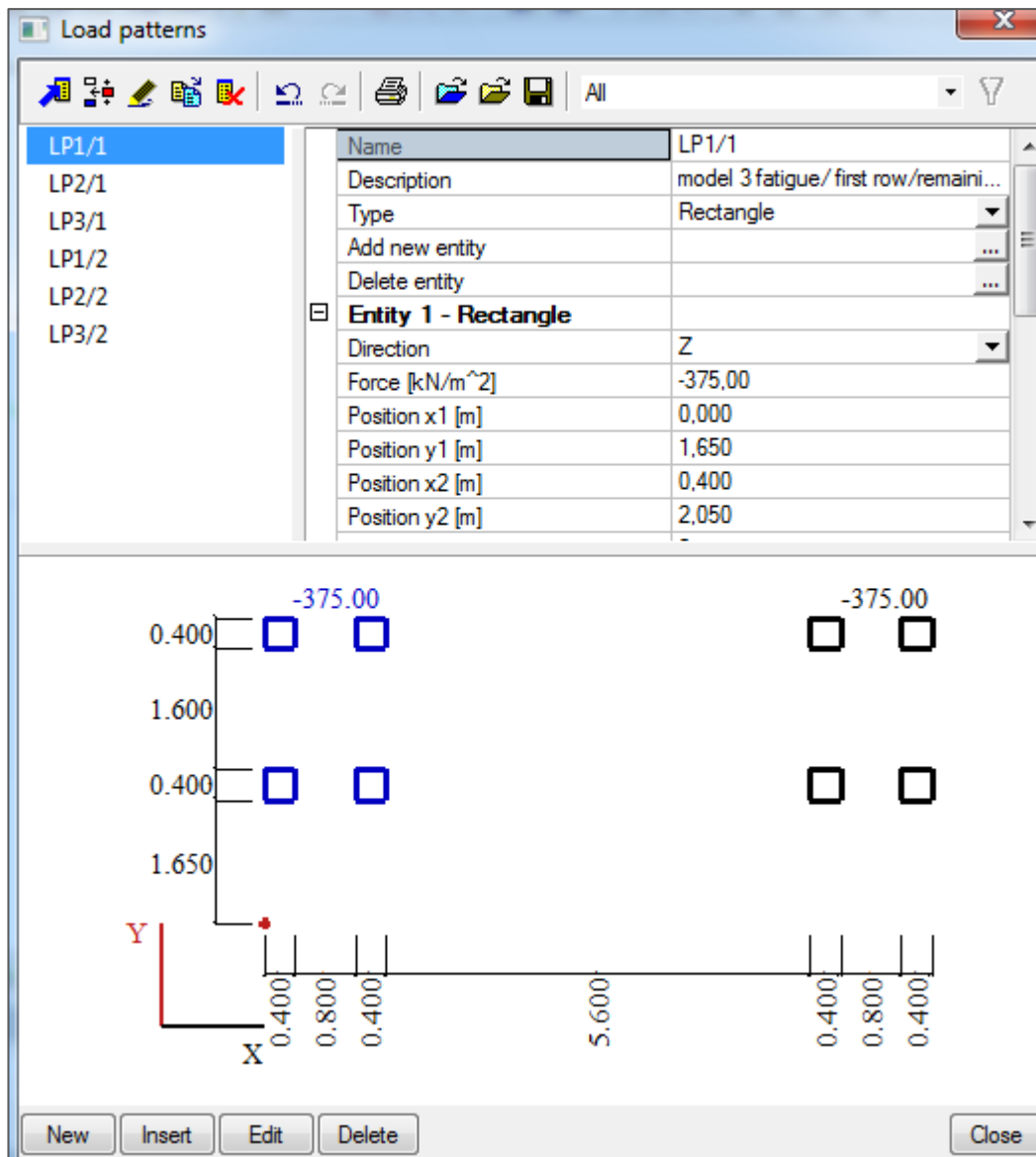
Εικόνα 3.3.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων στα υπό εξέταση σημεία της διατομής με την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου φόρτισης

Στην Εικόνα 3.3.13 φαίνεται η συγκεντρωτική εικόνα των αποτελεσμάτων (μέγιστων και ελαχίστων τάσεων) στα υπό εξέταση σημεία της διατομής για το μοντέλο φόρτισης 3 του Ευρωκώδικα σε διάφορα σημεία του φορέα.

Η φόρτιση ήταν το παρακάτω όχημα (Εικόνα 3.3.14). Ο Κανονισμός, σε περίπτωση που τα ανοίγματα δεν ξεπερνούν τα 80m όπως εδώ, προτείνει το μοντέλο φόρτισης 3, που αναφέρει 120 KN ανά άξονα. Στην παρούσα ανάλυση, το φορτίο μοιράστηκε στις δύο ρόδες του κάθε άξονα, δηλαδή 60KN, που με τη σειρά τους μετατράπηκαν σε καταναμημένο φορτίο στις ρόδες, δηλαδή στα $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$. Έτσι, το τελικό φορτίο επιβολής στην κάθε ρόδα έγινε $60 / (0,4 \times 0,4) = 375 \text{ KN/m}^2$.

Όπως αναφέρει ο Κανονισμός, λόγω του ότι το μήκος της γέφυρα (155m) ήταν μεγαλύτερο από 40m, το φορτίο εφαρμόστηκε δυο φορές σε απόσταση 40m μήκος.

Το επίπεδο αναφοράς (σημείο 0 στην Εικόνα 3.3.14) είναι η άκρη της γέφυρας.



Εικόνα 3.3.14: Μοντέλο φόρτισης 3. Η δύναμη στον κάθε άξονα έχει εφαρμοστεί ως κατανομημένη στις ρόδες.

Έγιναν έξι διαφορετικές φορτίσεις σε κάθε μια από τις λωρίδες κυκλοφορίας² για δύο περιπτώσεις κατανομής λωρίδων:

- Μια για απομένουσα επιφάνεια στο τέλος των τριών λωρίδων
- Και μια για απομένουσα επιφάνεια στην αρχή, πριν τις λωρίδες

Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές τάσεων που προέκυψαν από αυτές τις φορτίσεις, για κάθε υπό εξέταση σημείο της διατομής, σε καθένα από τα δύο υπό εξέταση σημεία κατά μήκος της δοκού είναι:

² Όπως προαναφέρθηκε, εδώ υπάρχουν 6 διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης της λωρίδας βραδείας κυκλοφορίας – Αναλυτικά στο Παράρτημα Δ, στο τέλος της διπλωματικής.

Πίνακας 3.4: Μέγιστες και ελάχιστες τάσεις στο σημείο +65m της γέφυρας

Θέση στη διατομή (MPa)	Μέγιστη ορθή τάση (MPa)	Ελάχιστη ορθή τάση (MPa)	Μέγιστη διατμητική τάση (MPa)	Ελάχιστη διατμητική τάση (MPa)
Κάτω πέλμα	4,69	-1,54	-	-
Κορμός	2,18	-6,07	3,04	0
Άνω πέλμα	2,25	-6,24	-	-

Πίνακας 3.5: Μέγιστες και ελάχιστες τάσεις στο σημείο +100m της γέφυρας

Θέση στη διατομή (MPa)	Μέγιστη ορθή τάση (MPa)	Ελάχιστη ορθή τάση (MPa)	Μέγιστη διατμητική τάση (MPa)	Ελάχιστη διατμητική τάση (MPa)
Κάτω πέλμα	2,24	-6,9	-	-
Κορμός	9,76	-3,17	4,27	0
Άνω πέλμα	10,04	-3,26	-	-

3.4.1.1 Έλεγχος³ σημείο +65m κατά μήκος της γέφυρας

Το σημείο αυτό βρίσκεται στο δεύτερο άνοιγμα της γέφυρας, μήκους 35m, στο σημείο +25m του ανοίγματος. Χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του Πίνακα 3.4.

Στοιχεία που ισχύουν για όλα τα σημεία της διατομής:

$$L=35\text{m (άνοιγμα-μήκος ανοίγματος)} \xrightarrow{\text{Συντελεστής } \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = 2,55 - 0,7 \frac{35 - 10}{70} = 2,3$$

$$\left. \begin{array}{l} N_0=0,5 \times 10^6 \\ Q_0=480\text{KN} \\ Q_i=4 \times 120=480\text{KN} \\ \Sigma n_i=1 \\ N_{\text{obs}}=2,0 \times 10^6 \text{ (επιλέγεται κατηγορία κυκλοφορίας 1)} \end{array} \right\} Q_{m1} = \left(\frac{1 \cdot 480^5}{1} \right)^{1/5} = 480\text{KN} \rightarrow$$

$$\lambda_2 = \frac{480}{480} \left(\frac{2 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 10^6} \right)^{1/5} = 1,3195$$

³ Υπενθυμίζεται ότι στα δύο σημεία πέλματος εξετάζονται μόνο οι ορθές τάσεις λόγω κόπωσης, ενώ στο σημείο κορμού-σύνδεσης με άνω πέλμα εξετάζονται και οι διατμητικές.

Συντελεστής λ_3
 $t_{LD}=50$ έτη (επιλέχθηκε διάρκεια ζωής σχεδιασμού γέφυρας 50 έτη) \rightarrow
 $\lambda_3 = \left(\frac{50}{100}\right)^{1/5} = 0,87055$

Συντελεστής λ_4
 $\lambda_4 = \left(1 + \frac{0}{1}\right)^{1/5} = 1$

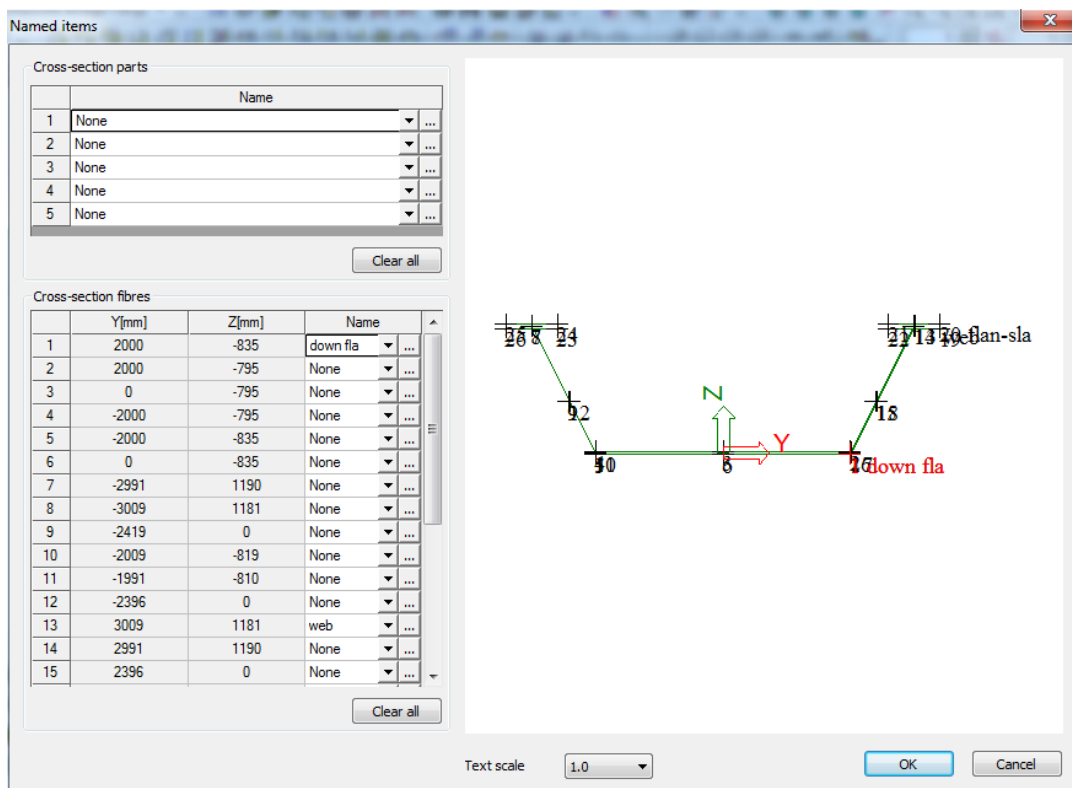
Συντελεστής λ_{max}
 $L=35m$ (άνοιγμα-μήκος ανοίγματος) \rightarrow
 $\lambda_{max} = 2,0$

Συντελεστής λ
 $\lambda = 2,3 * 1,3195 * 0,87055 * 1 = 2,642 > 2,0 = \lambda_{max}$

Άρα:

$$\lambda = \lambda_{max}$$

- Κάτω πέλμα (σημείο 1 / down fla) : Στην Εικόνα 3.3.15 φαίνεται η θέση του στη διατομή.



Εικόνα 3.3.15: Σημείο down fla καθ' ύψος της διατομής

Κατηγορία διατομής:

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις
112	<p>Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<p><u>Άνευ υποθέματος στη ρίζα:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες και ελάσματα. 2) Επεκτάσεις κορμών και πελάτων σε δοκούς προ της συναρμολόγησης. 3) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές χωρίς σπές συναρμογής. 4) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες ή ελάσματα μεταβλητού πλάτους ή πάχους, με κλίση $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Όλες οι ραφές με έγκausη ρίζας παράλληλα στη διεύθυνση του βέλους. - Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκausη ρίζας στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων. - Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους. <p><u>Λεπτομέρεια 3):</u> Μόνο για ενώσεις ελατών διατομών, κοπή και επανασυγκόλληση.</p>

Από τον ως άνω πίνακα (μέρος του Παραρτήματος Α.3.) προκύπτει ότι το σημείο της διατομής down fla, στο σημείο αποκατάστασης κατά μήκος, αντιστοιχεί στην περιγραφή 3) και άρα κατηγορία διατομής 112.

100		<p>7) Χειροποίητες ή αυτόματες εσωραφές ή εξωραφές για κατηγορίες 1) έως 6).</p>	<p>7) Η αρχική κατηγορία μπορεί να αποκατασταθεί με λείανση από ειδικό για την εξάλειψη όλων των εμφανών ατελειών και επαρκή έλεγχο.</p>
-----	--	--	--

Από τον άνω πίνακα (μέρος του Παραρτήματος Α.2.) όμως προκύπτει ότι επειδή πρόκειται για διατομή συγκολλητή με διαμήκεις εσωραφές, αντιστοιχεί στην κατηγορία 100.

Έτσι, παίρνουμε τη δυσμενέστερη περίπτωση που είναι η κατηγορία 100.

$$\begin{aligned} & \text{Εύρος ορθής τάσης } \Delta\sigma_E \\ \Delta\sigma_E &= 2,0 * |4,69 - (-1,54)| = 12,46\text{MPa} \end{aligned}$$

Ανισότητα ελέγχου

$\Delta\sigma_c = 100\text{MPa}$ (για $N = 2 \times 10^6$ κυκλους)

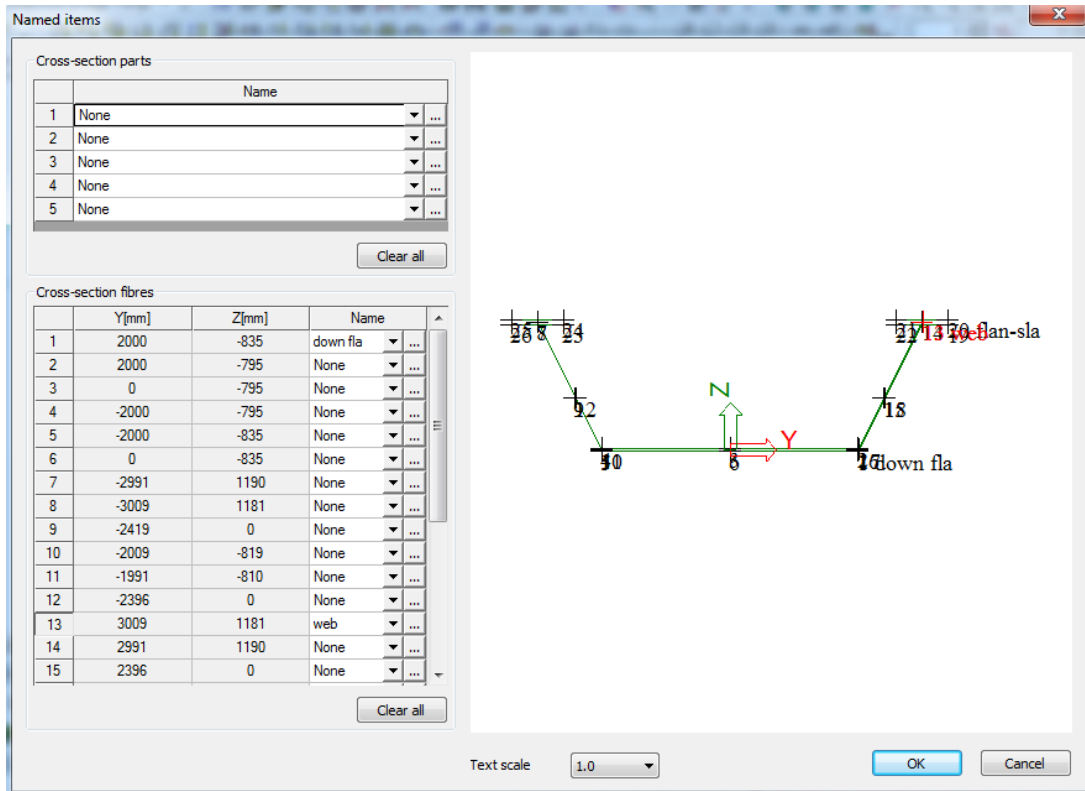
Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία $\gamma_{Mf} = 1,15$

Άρα:

$$1 * 12,46 < \frac{100}{1,15} = 86,96$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

- Κορμός (σημείο 13 / web) : Στην Εικόνα 3.3.16 φαίνεται η θέση του στη διατομή.



Εικόνα 3.3.16: Σημείο web καθ' ύψος της διατομής

Κατηγορία διατομής:

71		<p>9) Διαμήκειες εσωραφές, εξωραφές ή διακοπόμενες ραφές με σπή συναρμογής ύψους όχι μεγαλύτερου από 60mm. Για σπές συναρμογής με ύψος > 60 mm βλ. λεπτ. 1) στον Πίνακα 8.4</p>	<p>9) Η Δσ βασίζεται στην ορθή τάση του πέλματος.</p>
----	--	--	---

Από την παραπάνω εικόνα (μέρος του Παραρτήματος Α.2.) προκύπτει κατηγορία διατομής 71 για την ορθή τάση και 80 για τη διατμητική.

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις
112	<p>Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<p><u>Άνευ υποθέματος στη ρίζα:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες και ελάσματα. 2) Επεκτάσεις κορμών και πελάτων σε δοκούς προ της συναρμολόγησης. 3) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές χωρίς σπές συναρμογής. 4) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες ή ελάσματα μεταβλητού πλάτους ή πάχους, με κλίση $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Όλες οι ραφές με έγκαιρη ρίζα παράλληλα στη διεύθυνση του βέλους. - Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκαιρη ρίζα στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων. - Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους. <p><u>Λεπτομέρεια 3):</u> Μόνο για ενώσεις ελατών διατομών, κοπή και επανασυγκόλληση.</p>

Από τη θέση αποκατάστασης συνέχειας (μέρος του Παραρτήματος Α.3.) όμως η κατηγορία διατομής γίνεται 112.

Η δυσμενέστερη περίπτωση είναι: κατηγορία 71 για ορθή τάση και κατηγορία 80 για διατμητική.

$$\begin{aligned} & \text{Εύρος ορθής τάσης } \Delta\sigma_E \\ \Delta\sigma_E &= 2,0 * |2,18 - (-6,07)| = 16,5\text{MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Εύρος διατμητικής τάσης } \Delta\tau_E \\ \Delta\tau_E &= 2,0 * |3,04 - 0| = 6,08\text{MPa} \end{aligned}$$

Ανισότητα ελέγχου

$\Delta\sigma_C = 71\text{MPa}$ (για $N = 2 \times 10^6$ κυκλους)

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία $\gamma_{Mf} = 1,15$

$\Delta\tau_C = 80\text{MPa}$ (για $N = 2 \times 10^6$ κυκλους)

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία $\gamma_{Mf} = 1,15$

Άρα:

$$\begin{aligned} & \text{Ορθή τάση} \\ 1 * 16,5 & < \frac{71}{1,15} = 61,74 \end{aligned}$$

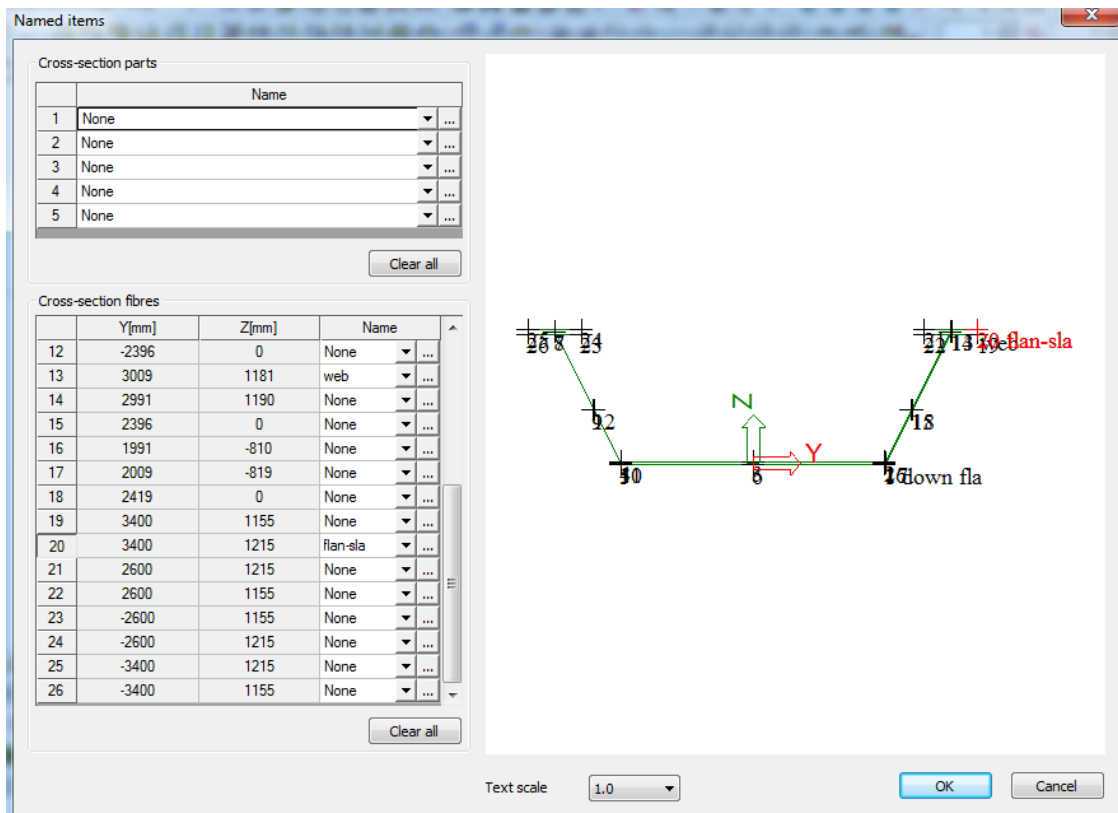
Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

Διατμητική τάση

$$1 * 6,08 < \frac{80}{1,15} = 69,57$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

- Άνω πέλμα-σύνδεση με πλάκα (σημείο 20 / fla-sla) : Στην Εικόνα 3.3.17 φαίνεται η θέση του στη διατομή.



Εικόνα 3.3.17: Σημείο fla-sla καθ' ύψος της διατομής

Κατηγορία διατομής:

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις
112		<p><u>Άνευ υποθέματος στη ρίζα:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες και ελάσματα. 2) Επεκτάσεις κορμών και πελμάτων σε δοκούς προ της συναρμολόγησης. 3) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές χωρίς οπές συναρμογής. 4) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες ή ελάσματα μεταβλητού πλάτους ή πάχους, με κλίση $\leq 1/4$. 	<p>- Όλες οι ραφές με έγκανση ρίζας παράλληλα στη διεύθυνση του βέλους.</p> <p>- Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκανση ρίζας στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων.</p> <p>- Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους.</p> <p><u>Λεπτομέρεια 3):</u> Μόνο για ενώσεις ελατών διατομών, κοπή και επανασυγκόλληση.</p>

Από τη θέση αποκατάστασης συνέχειας (μέρος του Παραρτήματος Α.3.) η κατηγορία διατομής γίνεται 112.

Επειδή το σημείο της διατομής είναι το σημείο σύνδεσης με την πλάκα δεν χρειάζεται περαιτέρω απομείωση λόγω συγκόλλησης.

Άρα κατηγορία διατομής: 112

$$\text{Εύρος ορθής τάσης } \Delta\sigma_E \\ \Delta\sigma_E = 2,0 * |2,25 - (-6,24)| = 16,98\text{MPa}$$

Ανισότητα ελέγχου

$\Delta\sigma_C=112\text{MPa}$ (για $N=2 \times 10^6$ κυκλούς)

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία $\gamma_{Mf} = 1,15$

Άρα:

$$1 * 16,98 < \frac{112}{1,15} = 97,39$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

3.4.1.2 Έλεγχος σημείο +100m κατά μήκος της γέφυρας

Το σημείο αυτό βρίσκεται στο τρίτο άνοιγμα της γέφυρας, μήκους 30m, στο σημείο +25m του ανοίγματος. Χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του Πίνακα 4.2.

Στοιχεία που ισχύουν για όλα τα σημεία της διατομής:

Συντελεστής λ_1

$L=30\text{m}$ (άνοιγμα-μήκος ανοίγματος) \rightarrow

$$\lambda_1 = 2,55 - 0,7 \frac{30 - 10}{70} = 2,35$$

Συντελεστής λ_2

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

$Q_0=480\text{KN}$

$Q_i=4 \times 120=480\text{KN}$ } $Q_{m1} = \left(\frac{1 * 480^5}{1} \right)^{1/5} = 480\text{KN}$

$\Sigma n_i=1$

$N_{\text{obs}}=2,0 \times 10^6$ (επιλέγεται κατηγορία κυκλοφορίας 1)

} \rightarrow

$$\lambda_2 = \frac{480}{480} \left(\frac{2 * 10^6}{0,5 * 10^6} \right)^{1/5} = 1,3195$$

Συντελεστής λ_3

$t_{LD}=50$ έτη (επιλέχθηκε διάρκεια ζωής σχεδιασμού γέφυρας 50 έτη) \rightarrow

$$\lambda_3 = \left(\frac{50}{100} \right)^{1/5} = 0,87055$$

Συντελεστής λ_4

$$\lambda_4 = \left(1 + \frac{0}{1} \right)^{1/5} = 1$$

Συντελεστής λ_{max}

$L=35\text{m}$ (άνοιγμα-μήκος ανοίγματος) \rightarrow

$$\lambda_{\text{max}} = 2,0$$

Συντελεστής λ

$$\lambda = 2,35 * 1,3195 * 0,87055 * 1 = 2,699 > 2,0 = \lambda_{\text{max}}$$

Άρα:

$$\lambda = \lambda_{\max}$$

- Κάτω πέλμα (σημείο 1 / down flange) : Στην Εικόνα 3.3.15 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

$$\begin{aligned} & \text{Εύρος ορθής τάσης } \Delta\sigma_E \\ \Delta\sigma_E &= 2,0 * |2,24 - (-6,9)| = 18,28\text{MPa} \end{aligned}$$

Ανισότητα ελέγχου

$$\Delta\sigma_C = 100\text{MPa (για } N = 2 \times 10^6 \text{ κυκλους)}$$

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία

$$\gamma_{Mf} = 1,15$$

Άρα:

$$1 * 18,28 < \frac{100}{1,15} = 86,96$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

- Κορμός (σημείο 13 / web) : Στην Εικόνα 3.3.16 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

$$\begin{aligned} & \text{Εύρος ορθής τάσης } \Delta\sigma_E \\ \Delta\sigma_E &= 2,0 * |9,76 - (-3,17)| = 25,86\text{MPa} \end{aligned}$$

Εύρος διατμητικής τάσης } \Delta\tau_E

$$\Delta\tau_E = 2,0 * |4,27 - 0| = 8,54\text{MPa}$$

Ανισότητα ελέγχου

$$\Delta\sigma_C = 71\text{MPa (για } N = 2 \times 10^6 \text{ κυκλους)}$$

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία

$$\gamma_{Mf} = 1,15$$

$$\Delta\tau_C = 80\text{MPa (για } N = 2 \times 10^6 \text{ κυκλους)}$$

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία

$$\gamma_{Mf} = 1,15$$

Άρα:

$$\begin{aligned} & \text{Ορθή τάση} \\ 1 * 25,86 &< \frac{71}{1,15} = 61,74 \end{aligned}$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

Διατμητική τάση

$$1 * 8,54 < \frac{80}{1,15} = 69,57$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

- Άνω πέλιμα-σύνδεση με πλάκα (σημείο 20 / fl-a-sla) : Στην Εικόνα 3.3.17 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

$$\Delta\sigma_E = 2,0 * |10,04 - (-3,26)| = 26,6\text{MPa}$$

Ανισότητα ελέγχου

$$\Delta\sigma_C = 112\text{MPa (για } N=2 \times 10^6 \text{ κυκλούς)}$$

Επιπτώσεις αστοχίας: Υψηλές (κύρια στοιχεία), επισκέψιμα στοιχεία

$$\gamma_{Mf} = 1,15$$

Άρα:

$$1 * 26,6 < \frac{112}{1,15} = 97,39$$

Ο έλεγχος σε κόπωση ικανοποιείται

3.4.2 Έλεγχος έναντι κόπωσης με τη γενική μέθοδο (μοντέλο φόρτισης 4)

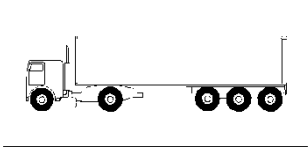
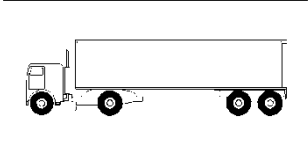
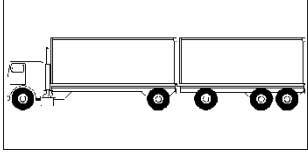
Στο μοντέλο φόρτισης 4 ορίζεται μια σειρά παρόμοιων σε μορφή φορτηγών, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.6. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται και τα ποσοστά των φορτηγών για μια ροή κυκλοφορίας. Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων ανά έτος ΣN_{obs} για όλο το οδόστρωμα λαμβάνεται από τον Πίνακα 3.3 (σελ. 48). Κάθε τυποποιημένο φορτηγό θα θεωρείται ότι διασχίζει τη γέφυρα μόνο του χωρίς την ταυτόχρονη παρουσία οποιουδήποτε άλλου οχήματος.

Η μέθοδος της δεξαμενής εφαρμόστηκε στα υπό εξέταση σημεία της διατομής για κάθε ένα από τα 5 φορτηγά επιβολής φόρτισης του μοντέλου 4. Τα στοιχεία θεωρούνται ότι πάθησαν σε διάστημα 6 ωρών (Ερμόπουλος, 2008).

Το μοντέλο φόρτισης 4 φαίνεται στον Πίνακα :

Πίνακας 3.6: Μοντέλο φόρτισης 4

ΤΥΠΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΥΠΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ				
1	2	3	4	5	6	7	8
			Μεγάλη απόσταση	Μέτρια απόσταση	Τοπική κυκλοφορία		Αριθμός διελεύσεων N
ΒΑΡΥ ΟΧΗΜΑ	Απόσταση αξόνων (m)	Ισοδύναμα αξονικά φορτία (kN)	Ποσοστό βαρέων οχημάτων	Ποσοστό βαρέων οχημάτων	Ποσοστό βαρέων οχημάτων	Τύπος τροχού	
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A B	4E06
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	10,0	5,0	A B B	1E05

	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90	50,0	30,0	5,0	A B C C C	1E06
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15,0	15,0	5,0	A B B B	3E05
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	5,0	5,0	A B C C C	2E05
Παρατήρηση	«Μεγάλη απόσταση» σημαίνει εκατοντάδες χιλιόμετρα «Μεσαία απόσταση» σημαίνει 50 έως 100 χιλιόμετρα «Μικρή απόσταση» σημαίνει μικρότερη από 50 χιλιόμετρα						

Για δυσμενέστερη περίπτωση, επιλέχθηκε τύπος κυκλοφορίας «Μεγάλη απόσταση» η οποία δίνει το μεγαλύτερο ποσοστό στο πιο βαρύ -το τρίτο- φορτηγό (το G3).

Σημειώνεται ότι, κατά την ανάλυση, τα φορτία των αξόνων πάρθηκαν ως σημειακά και άρα η στήλη του πίνακα «τύπος τροχού» δεν χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος, σε όποια περίπτωση η διαφορά τάσης ($\Delta\sigma$) είναι μικρότερη από το $\Delta\sigma_L (= 0,407\Delta\sigma_C)$, δεν λήφθηκε υπόψη στον έλεγχο και στην αντίστοιχη στήλη μπήκε το σύμβολο -.

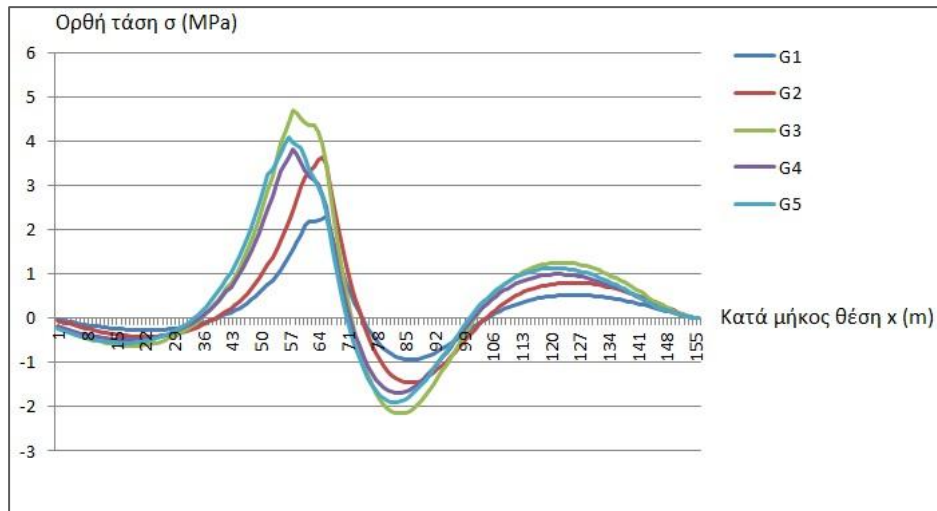
Και έδωσαν τα εξής αποτελέσματα:

(Οι εικόνες για κάθε ένα φορτηγό σε κάθε ένα εξεταζόμενο σημείο της κάθε μίας από τις δύο εξεταζόμενες διατομές παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ)

3.4.2.1 Έλεγχος σημείο +65m κατά μήκος της γέφυρας

- Κάτω πέλμα (σημείο 1 / down fl) : Στην Εικόνα 3.3.15 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

Στην Εικόνα 3.3.18 φαίνονται τα διαγράμματα και των πέντε φορτηγών στο υπό εξέταση σημείο, ενώ στον Πίνακα τα αποτελέσματα των ιστογραμμάτων μετά την εφαρμογή της μεθόδου της δεξαμενής.



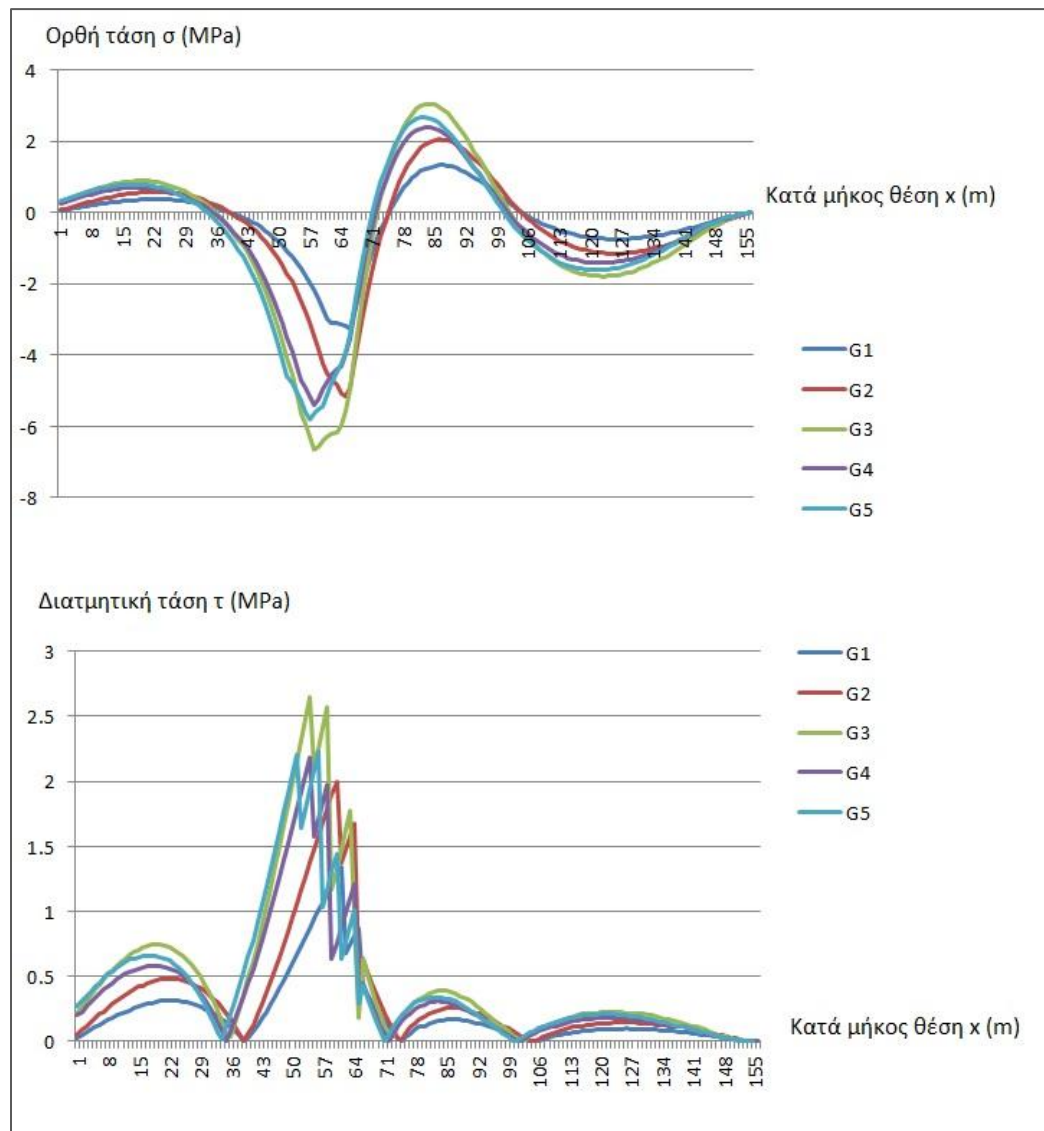
Εικόνα 3.3.18: Διαγράμματα τάσεων λόγω των φορτηγών στο σημείο 1 (κάτω πέλμα) της διατομής. (Εικόνα από το Excel)

Φορτηγό	G1		G2		G3		G4		G5	
$\Delta\sigma$	3,23	1,46	5,09	2,26	6,86	3,41	5,51	2,69	5,99	3,03
$\Delta\sigma_L$ σημείου διατομής	40 (κατηγορία 100)									
αριθμός διελεύσεων N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ποσοστό φορτηγού	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$n_i =$ (αριθμός διελεύσεων N) * (ποσοστό)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N_i (από τις καμπύλες αντοχής σε κόπωση)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$D_i = n_i / N_i$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Όλα τα φορτηγά προκαλούν $\Delta\sigma$ μικρότερα από το $\Delta\sigma_L$, άρα δεν λογίζονται στον έλεγχο.

- Κορμός (σημείο 13 / web) : Στην Εικόνα 3.3.16 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

Στην Εικόνα 3.3.19 φαίνονται τα διαγράμματα και των πέντε φορτηγών στο υπό εξέταση σημείο, ενώ στον Πίνακα τα αποτελέσματα των ιστογραμμάτων μετά την εφαρμογή της μεθόδου της δεξαμενής.



Εικόνα 3.3.19: Διαγράμματα τάσεων λόγω των φορτηγών στο σημείο 13 (κορμός) της διατομής. (Εικόνα από το Excel)

Ορθή τάση

Φορτηγό	G1		G2		G3		G4		G5	
$\Delta\sigma$	4,58	3,63	7,21	5,74	9,71	7,54	7,8	6,11	8,46	6,58
$\Delta\sigma_L$ σημείου διατομής	29 (κατηγορία 71)									

Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή όλα τα $\Delta\sigma$ είναι μικρότερα από το $\Delta\sigma_L$.

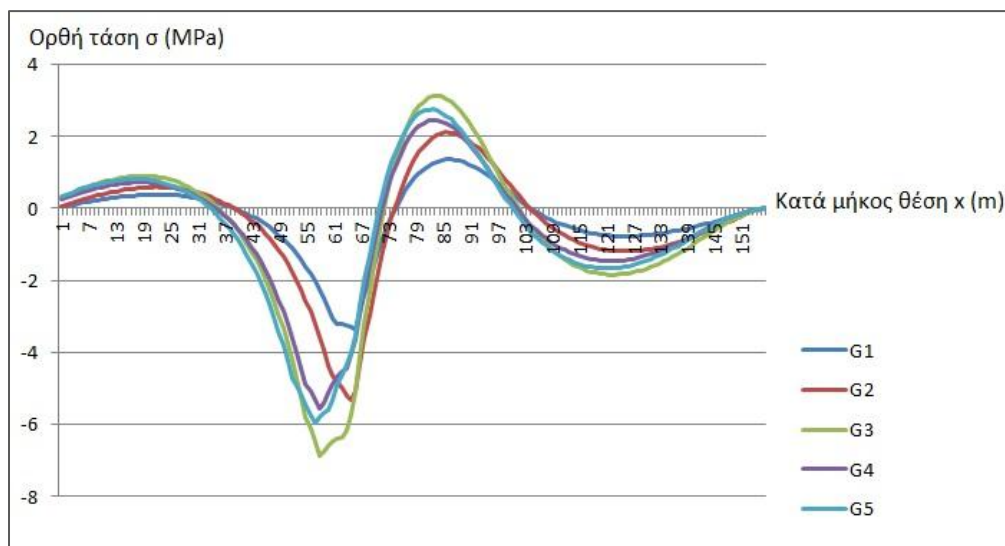
Διατμητική τάση

Φορτηγό	G1						G2					
Δτ	1,34	0,86	0,3	0,19	0,16	0,1	2	0,48	0,29	0,24	0,14	0,11
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)											
Φορτηγό	G3											
Δτ	2,65	0,7	0,6	0,48	0,45	0,37	0,23					
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)											
Φορτηγό	G4											
Δτ	2,18	0,58	0,57	0,39	0,3	0,17	0,07					
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)											
Φορτηγό	G5											
Δτ	2,23	1,18	0,64	0,57	0,41	0,37	0,33	0,2	0,15			
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)											

Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή όλα τα Δτ είναι μικρότερα από το Δτ_L.

- Άνω πέλμα-σύνδεση με πλάκα (σημείο 20 / fla-sla) : Στην Εικόνα 3.3.17 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

Στην Εικόνα 3.3.20 φαίνονται τα διαγράμματα και των πέντε φορτηγών στο υπό εξέταση σημείο, ενώ στον Πίνακα τα αποτελέσματα των ιστογραμμάτων μετά την εφαρμογή της μεθόδου της δεξαμενής.



Εικόνα 3.3.20: Διαγράμματα τάσεων λόγω των φορτηγών στο σημείο 20 (άνω πέλμα) της διατομής. (Εικόνα από το Excel)

Φορτηγό	G1		G2		G3		G4		G5	
$\Delta\sigma$	4,71	3,73	7,42	5,91	10	7,77	8,03	6,29	8,71	6,78
$\Delta\sigma_L$ σημείου διατομής	45 (κατηγορία 112)									

Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή όλα τα $\Delta\sigma$ είναι μικρότερα από το $\Delta\sigma_L$.

3.4.2.2 Έλεγχος σημείο +100m κατά μήκος της γέφυρας

Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή όλα τα $\Delta\sigma$ είναι μικρότερα από το $\Delta\sigma_L$. Για την ευχερέστερη ανάγνωση της διπλωματικής εργασίας, τα στοιχεία για το σημείο +100m παρατίθενται στο Παράρτημα Β στο τέλος της διπλωματικής.

4 Συμπεράσματα

Η ενασχόληση με το αντικείμενο της κόπωσης των μετάλλων, και ειδικότερα των δομικών στοιχείων μεταλλικών και σύμμικτων γεφυρών, που γίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποδεικνύει περαιτέρω τη αναγκαιότητα του ελέγχου των σιδηρών κατασκευών σε κόπωση.

Από την ανάλυση που έγινε, όσον αφορά τον έλεγχο σε κόπωση στη γέφυρα που χρησιμοποιήθηκε, προέκυψε ότι η προβλεπόμενη από τον κανονισμό διαδικασία είναι υπέρ της ασφαλείας. Στο παράδειγμα καλύπτει κατά πολύ την εναλλακτική, και ακριβέστερη, μέθοδο των φορητών. Μάλιστα, η τελευταία στη συγκεκριμένη γέφυρα δεν έχει πρακτικά πεδίο εφαρμογής, υπό την έννοια ότι όλες οι τάσεις που προέκυψαν λόγω της φόρτισης των φορητών είναι κάτω από το όριο ($\Delta\sigma_L$) από το οποίο λαμβάνονται υπόψη στην καταγραφή ζημιάς, σύμφωνα με την υπόθεση γραμμικής βλάβης Palmgren-Miner.

Τη μεγαλύτερη καταπόνηση (αλλά και πάλι ικανοποιεί τον έλεγχο), από τα δύο εξεταζόμενα κατά μήκος σημεία της γέφυρας, υφίσταται το σημείο +100 m στο τρίτο άνοιγμα.

Από τα σημεία της διατομής υπάρχει σχεδόν ομοιόμορφη η ικανοποίηση των ανισώσεων ελέγχου, με ίσως μεγαλύτερη καταπόνηση στο σημείο του άνω πέλματος, όπου και πραγματοποιείται η σύνδεση με την πλάκα.

Πάντως, παρά τη μη χρησιμοποίησή τους σε έλεγχο τελικά, λόγω της μικρής τιμής τους, τα αποτελέσματα της φόρτισης με φορητά σύμφωνα με τη γενική μέθοδο έδωσαν ένα ενδιαφέρον στοιχείο. Μετά την επίλυσή του φορέα και τη δημιουργία των καμπυλών τάσεων-χρόνου (υπό μορφή μονάδων μήκους m – γραμμής επιρροής) και την ακολουθεί εφαρμογή της μεθόδου της δεξαμενής, παρατηρήθηκε ότι το διάγραμμα με τις περισσότερες διαφορές τάσεων ήταν αυτό της διατμητικής τάσης του κορμού (θέση σύνδεσης κορμού – πέλματος, θέση συγκόλλησης). Αυτό μας δείχνει ότι σε συνήθεις γέφυρες με περίπου όμοιο σχήμα (μορφής U) ή ακόμα και σε γενικότερες περιπτώσεις συγκολλητών διατομών, αρκετά κρίσιμο για μελέτη είναι το σημείο καθ' ύψος της διατομής όπου γίνεται η συγκόλληση του κορμού με το άνω πέλμα.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται καθαρότερα στον Πίνακα 4.1, όπου γίνει συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων στις δύο μεθόδους.

Όπως αναφέρθηκε, παρατηρούμε πολύ μικρότερα $\Delta\sigma$ και Δt στη γενική μέθοδο. Βλέπουμε επίσης την διακύμανση των τιμών $\Delta\sigma$ και Δt στα διάφορα εξεταζόμενα σημεία της διατομής.

Πίνακας 4.1: Συγκριτικά στοιχεία των δύο μεθόδων

	Απλοποιημένη Μέθοδος		Γενική Μέθοδος	
	Μέγιστες Διαφορές Τάσεων (MPa)		Μέγιστες Διαφορές Τάσεων (MPa)	
Διατομή $x = +65$ m κατά μήκος				
Σημεία της διατομής	$\Delta\sigma$		$\Delta\sigma$	
Κάτω πέλμα	12,46		6,86	
Άνω πέλμα – σύνδεση με πλάκα	16,98		10	
	$\Delta\sigma$	$\Delta\tau$	$\Delta\sigma$	$\Delta\tau$
Κορμός	16,5	6,08	9,71	2,65
Διατομή $x = +100$ m κατά μήκος				
Σημεία της διατομής	$\Delta\sigma$		$\Delta\sigma$	
Κάτω πέλμα	18,28		14,06	
Άνω πέλμα – σύνδεση με πλάκα	26,6		9,66	
	$\Delta\sigma$	$\Delta\tau$	$\Delta\sigma$	$\Delta\tau$
Κορμός	25,86	8,54	12,02	2,57

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι σε όλες τα σημεία της $x = +65$ m διατομής, στη γενική μέθοδο, δυσμενέστερο ήταν το τρίτο και βαρύτερο φορτηγό. Αντίθετα στην $x = +100$ m διατομή, στον κορμό, και για $\Delta\sigma$ και για $\Delta\tau$, δυσμενέστερο ήταν το πέμπτο φορτηγό. Αυτό δείχνει ότι, παρά τη λογική μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω του βαρύτερου τρίτου φορτηγού που ισχύει κατά κανόνα, ενδέχεται κάποιο από τα άλλα φορτηγά να προκαλέσει, σε συγκεκριμένα σημεία της διατομής και σε συγκεκριμένες διατομές κατά μήκος της γέφυρας, μεγαλύτερη καταπόνηση. Υπάρχει, δηλαδή, μια ανισοκατανομή της επιρροής των φορτηγών σε σχέση με το βάρος τους. Δεν υπάρχει κάποιος «κανόνας» που να υποδεικνύει, σε όλα τα σημεία της διατομής και της γέφυρας, μεγαλύτερη καταπόνηση από το βαρύτερο φορτηγό.

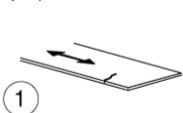
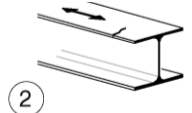
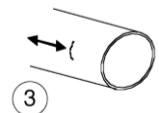
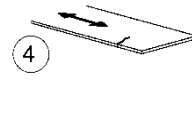

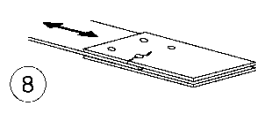
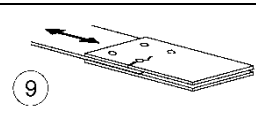
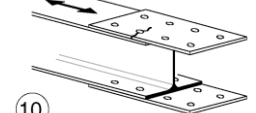
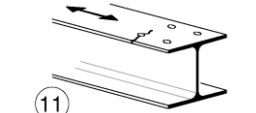
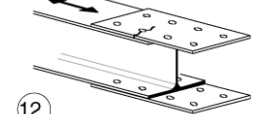
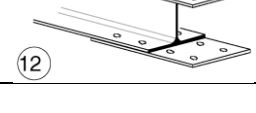
5 Βιβλιογραφία

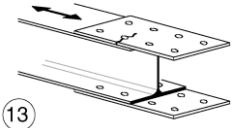
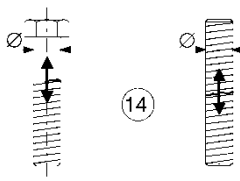
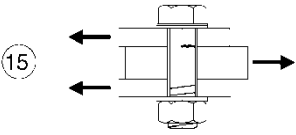
1. Βάγιας Ι. Κ. (2010). «Σύμμικτες Κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα». 3^η έκδοση. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι. Κ. (2012). «Κόπωση». Σημειώσεις
3. Ερμόπουλος Ι. Χ. (2008) «Σιδηρές και Σύμμικτες Γέφυρες, Ανάλυση και διαστασιολόγηση σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 1 έως 8». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. Adams C. F. (1879) «Notes on Railroad Accidents»
5. Bignell V., Fortune J. (1984) «Understanding Systems Failures » Chapter 5
6. Braithwaite F. (1854). «On the fatigue and consequent fracture of metals».(πηγή: Institution of Civil Engineers – ICE. Minutes of Proceedings. Pages 463–474)
7. Collins J. A. (1993) «Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention»
8. Darling K. (2001) «De Havilland Comet. North Branch, Minnesota: Specialty Press» Pages 28-30
9. Faith N. (1996) «Black Box: Why Air Safety is no Accident, The Book Every Air Traveller Should Read». London. Boxtree. Page 66
10. Juvinall R.C., Marshek K.M. (2011) «Fundamentals of Machine Component Design» (πηγή: Conry M. www.acronymchile.com)
11. Keith R.A. (1997) «Bush Pilot with a Briefcase: The Incredible Story of Aviation Pioneer Grant McConachie.». Vancouver. Douglas & McIntyre Ltd. First edition: 1992
12. Matsuishi M., Endo T. (1968) «Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress» (πηγή: Japan Society of Mechanical Engineers. Jukvoka, Japan)
13. Morin A. (1853) «Leçons de Mécanique Pratique - Résistance des matériaux [Studies in Practical Mechanics – Strength of Materials]» .Librairie de L. Hachette et Cie, Paris. (πηγή: George Sendeckiyj (2006) "Early Railroad Accidents and the Origins of research on fatigue of metals". Page 479)
14. Nallaa R.K., Kruzica J.J., Kinneyb J.H., Ritchie R.O. (May 2005). «Biomaterials» Volume 26, Issue 14, Pages 2183–2195 (“Aspects of in vitro fatigue in human cortical bone: time and cycle dependent crack growth”)
15. Merah N. (2003). « Journal of Quality in Maintenance Engineering» Volume 9 Issue 2, Pages 160 - 175 ("Detecting and measuring flaws using electric potential techniques", image Wei and Brazil, 1980)
16. Paris P. C., Gomez M. P., Anderson W. E. (1961). «A rational analytic theory of fatigue. The Trend in Engineering» Chapter 13, Pages 9-14
17. Petroski H. (1994) «Design Paradigms: Case Histories of Error and Judgement in Engineering»
18. Pfeil M. S., Battista R. C., Mergulhão A. J. R. (2005) « Journal of Constructional Steel Research» (“Stress concentration in steel bridge orthotropic decks”) Volume 61. Issue 8. Pages 1172–1184
19. Rankine W.J.M. (1842) «On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles, and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction» (πηγή: Institution of Civil Engineers - ICE. Minutes of Proceedings. Pages 105-108)

20. Rawson R. (1865) «Memoir of Eaton Hodgkinson» (πηγή: Manchester Literary and Philosophical Society – Manchester Lit and Phil)
21. Schutz W. (1996) «A history of fatigue. Engineering Fracture Mechanics» Pages 263-300
22. Sendeci G. (2006) «Early Railroad Accidents and the Origins of research on fatigue of metals». Appendix A of Theodore Nicholas (2006). “High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective.”
23. Shigley J.E., Mischke C.R., Budynas R.G. (2004) «Mechanical Engineering Design» (πηγή: Conry M. www.acronymchile.com)
24. Stewart S. (1986/89) «Air Disasters»
25. Timoshenko S. P. (1953) «History of Strength of Materials»
26. Withey P. A. (1997) « Fatigue Failure of the de Havilland Comet I.». Engineering Failure Analysis 4. Pages 147-154
27. Μηχανική Θραύσης, TEI Αθήνας (3 Νοεμβρίου 2012). (Σελίδες Χρηστών TEI Αθήνας, users.teiath.gr)
28. BBC internet homepage
(http://news.bbc.co.uk/onthisday/hi/dates/stories/january/10/newsid_2709000/2709957.stm)
29. Flight Magazine (15 January 1954). « B.O.A.C. Comet Lost: Services Suspended.» Page 58
30. International Journal of Damage Mechanics. (January 2006) «Fatigue Life Prediction under Random Loading Conditions in 7475-T7351 Aluminum Alloy using the RMS Model» Issue 15 Pages 89-102
31. Laboratory of Materials Technology, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (www.cheng.auth.gr)
32. Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region. (May 2000) «Gulf of Mexico Deepwater Operations and Activities. Environment»
33. National Geographic Channel *Seconds From Disaster* (15 November 2006). TV documentary "Comet Air Crash" ("Crash of the Comet")
34. Norwegian petroleum Directorate (14 September 2012) (www.npd.no/en/publications/facts/facts-2012/chapter-10/ekofisk/)
35. Report of a Norwegian public commission (appointed by royal decree of 28 March 1980, presented to the Ministry of Justice and Police March 1981) «The Alexander L. Kielland accident»
36. Report of the Commissioners Appointed to Enquire into the Application of Iron to Railway Structures (1849)
37. Roymech (http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Fatigue/Stress_levels.html)
38. Weibull.com (October 2010). Issue 116 (ReliaSoft Corporation, Accelerated Life Testing Reference, Tucson, AZ: ReliaSoft Publishing, 2007)
39. West Coast Industries – WCI (<http://coldwork.com/services/material-testing>)

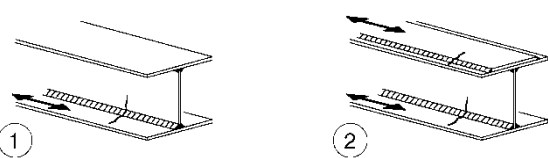
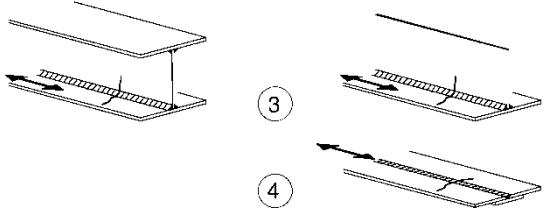

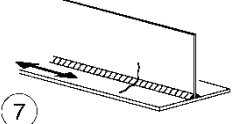
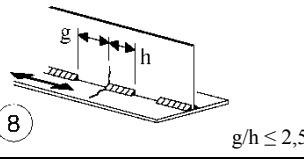
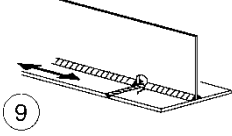

Παράρτημα Α. Κατηγορίες λεπτομερειών

Πίνακας Α.1.: Επίπεδα μέλη και κοχλιωτές συνδέσεις

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις	
160	<p>ΣΗΜΕΙΩΣΗ Η καμπύλη αντοχής σε κόπωση που αντιστοιχεί στην κατηγορία 160 είναι η υψηλότερη. Καμιά λεπτομέρεια δεν μπορεί να επιτύχει καλύτερη αντοχή κόπωσης για οποιοδήποτε αριθμό κύκλων.</p>   	<p><u>Ελατά και πρεσαριστά προϊόντα:</u></p> <p>1) Ελάσματα και λάμες 2) Ελατές διατομές 3) Μη συγκολλητές ορθογωνικές ή κυκλικές κοίλες διατομές.</p>	<p><u>Λεπτομέρειες 1) έως 3):</u></p> <p>Αιχμηρές ακμές, επιφανειακά ελαττώματα και σφάλματα έλασης πρέπει να αφαιρούνται με λείανση μέχρις απομακρύνσεως και ομαλής μετάβασης.</p>	
140		<p><u>Ελάσματα που κόβονται με ψαλιδισμό ή φλόγα:</u></p> <p>4) Μηχανική κοπή υλικού με ρηχές και κανονικές εγκοπές και ακόλουθος καθαρισμός.</p> <p>5) Υλικό που κόβεται μηχανικά με φλόγα και με χείλη κοπής με ρηχές και κανονικές εγκοπές ή χειρωνακτική κοπή με φλόγα, και ακόλουθη επεξεργασία για την εξάλειψη ατελειών κοπής.</p> <p>Μηχανική κοπή υλικού με φλόγα κατά τις προδιαγραφές EN 1090.</p>	<p>4) Όλες οι ορατές εγκοπές στα άκρα θα εξαλειφθούν. Οι περιοχές κοπής θα κατεργάζονται ή θα λειάνονται και θα αφαιρούνται όλα τα γρέζια. Όλες οι μηχανικές εγκοπές π.χ. από λείανση, θα πρέπει να είναι παράλληλες στις τάσεις.</p> <p><u>Λεπτομέρειες 4) και 5):</u></p> <p>- Εισέχουσες γωνίες θα λειάνονται (κλίση $\leq 1/4$) ή θα υπολογίζονται με κατάλληλους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων.</p> <p>- Όχι επιδιόρθωση με επανα-συγκόλληση.</p>	
125		<p>6) και 7) Ελατά και πρεσαριστά προϊόντα όπως στις λεπτομ. 1), 2), 3)</p>	<p><u>Λεπτομέρειες 6) και 7):</u></p> <p>Η Δτ υπολογίζεται από:</p> $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$	
<p>Για τις λεπτομέρειες 1 – 5 από αντιδιαβρωτικό χάλυβα να χρησιμοποιείται η αμέσως χαμηλότερη κατηγορία.</p>				
112		<p>8) Συμμετρική δίτημητη σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες υψηλής αντοχής.</p> <p>8) Συμμετρική δίτημητη σύνδεση με κανονικούς κοχλίες.</p>	<p>8) Η Δσ να υπολογίζεται για την πλήρη διατομή.</p> <p>8) ... πλήρη διατομή.</p>	<p><u>Για κοχλιωτές συνδέσεις (Λεπτομ. 8) έως 13)) γενικά:</u></p>
90		<p>9) Δίτημητη σύνδεση με εφαρμοσμένους κοχλίες.</p> <p>9) Δίτημητη σύνδεση με μη προεντεταμένους ψεκασμένους κοχλίες.</p>	<p>9) ... καθαρή διατομή.</p> <p>9) ... καθαρή διατομή.</p>	<p>Απόσταση από άκρο: $e_1 \geq 1,5 d$</p> <p>Απόσταση από παρειά: $e_2 \geq 1,5 d$</p>
		<p>10) Μονότημητη σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες υψηλής αντοχής.</p>	<p>10) ... πλήρη διατομή.</p>	<p>Απόσταση: $p_1 \geq 2,5 d$</p>
		<p>10) Μονότημητη σύνδεση με κανονικούς κοχλίες.</p> <p>11) Δομικό στοιχείο με οπές υπό κάμψη και αξονική δύναμη</p>	<p>10) ... πλήρη διατομή.</p> <p>11) ... καθαρή διατομή.</p>	<p>Απόσταση: $p_2 \geq 2,5 d$</p>
80		<p>12) Μονότημητη σύνδεση με εφαρμοσμένους κοχλίες.</p>	<p>12) ... καθαρή διατομή.</p>	<p>Διαμόρφωση σύμφωνα με EN 1993-1-8, Σχήμα 3.1</p>
		<p>12) Μονότημητη σύνδεση με μη προεντεταμένους ψεκασμένους κοχλίες.</p>	<p>12) ... καθαρή διατομή.</p>	

50		13) Μονόμητη ή δίμητη συμμετρική σύνδεση με μη προεντεταμένους κοχλίες σε κανονικές οπές. Όχι ανακύκλιση φορτίων.	13) ... καθαρή διατομή.	
50	Επίδραση πάχους για $t > 30\text{mm}$: $k_s = (30/t)^{0.25}$		14) Κοχλίες και ράβδοι υπό εφελκυσμό με σπειρώμα από έλαση ή κοπή. Για μεγάλες διαμέτρους (αγκύρια) η επίδραση πάχους λαμβάνεται υπόψη με τον k_s .	14) Η Δσ υπολογίζεται με την εφελκυσμένη διατομή του κοχλία. Εφελκυσμός και κάμψη λόγω δυνάμεων μοχλού ή κάμψη από άλλες αιτίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Για προεντεταμένους κοχλίες, η απομείωση του εύρους τάσεων μπορεί να λαμβάνεται υπόψη.
100 m=5		<u>Μονόμητοι ή δίμητοι κοχλίες</u> Σπειρώμα όχι στην επιφ. διάτμ. 15) - Εφηρμοσμένοι κοχλίες - Κανονικοί κοχλίες χωρίς ανακύκλιση φορτίων (ποιότητα 5.6, 8.8 ή 10.9)	15) Η Δτ υπολογίζεται με τη διατομή κορμού του κοχλία.	

Πίνακας Α.2.: Συγκολλητές διατομές

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις
125		<u>Συνεχείς διαμήκειες ραφές:</u> 1) Αυτόματες αμφίπλευρες εσωραφές. 2) Αυτόματες εξωραφές. Έλεγχος αρμοκαλύπτρων βάσει λεπτομ. 6) ή 7) του Πίνακα 8.5.	<u>Λεπτομέρειες 1) και 2):</u> Απαγορεύεται θέση αρχής/τέλους εκτός εάν η επισκευή γίνεται από ειδικό και ακολουθεί έλεγχος καλής εκτέλεσης της επισκευής.
112		3) Αυτόματες αμφίπλευρες εσωραφές ή εξωραφές με ενδιάμεσες στάσεις. 4) Αυτόματες μονόπλευρες εσωραφές, με συνεχές υπόθεμα, αλλά χωρίς ενδιάμεσες στάσεις.	4) Όταν η λεπτομέρεια αυτή έχει ενδιάμεσες στάσεις να χρησιμοποιείται η κατηγορία 100.
100		5) Χειροποίητες εσωραφές ή εξωραφές. 6) Χειροποίητες ή αυτόματες μονόπλευρες εσωραφές, ειδικά για κλειστές διατομές	5), 6) Απαιτείται τέλεια συναρμογή πέλματος-κορμού. Προετοιμασία ακμής κορμού ώστε να φαίνεται και να πληρώνεται επαρκώς η ρίζα για την αποφυγή τοπικής αστοχίας.
100		7) Χειροποίητες ή αυτόματες εσωραφές ή εξωραφές για κατηγορίες 1) έως 6).	7) Η αρχική κατηγορία μπορεί να αποκατασταθεί με λείανση από ειδικό για την εξάλειψη όλων των εμφανών ατελειών και επαρκή έλεγχο.
80		8) Διακοπτόμενες διαμήκειες εξωραφές.	8) Η Δσ βασίζεται στην ορθή τάση του πέλματος.
71		9) Διαμήκειες εσωραφές, εξωραφές ή διακοπτόμενες ραφές με οπή συναρμογής ύψους όχι μεγαλύτερου από 60mm. Για οπές συναρμογής με ύψος > 60 mm βλ. λεπτ. 1) στον Πίνακα 8.4	9) Η Δσ βασίζεται στην ορθή τάση του πέλματος.
125		10) Διαμήκειες εσωραφές, αμφίπλευρη έγκαιση ρίζας παράλληλα στο φορτίο, 100% NDT	

112		10) Χωρίς λείανση και ενδιάμεσες στάσεις	
90		10) με ενδιάμεσες στάσεις	
140		11) Διαμήκειες αυτόματες εξωραφές με ή χωρίς ενδιάμεσες στάσεις σε κοίλες διατομές	11) Ελεύθερες ατελειών πέραν των ανοχών της EN 1090. Πάχος τοιχώματος $t \leq 12,5$ mm.
125		11) Διαμήκειες αυτόματες εξωραφές με ή χωρίς ενδιάμεσες στάσεις σε κοίλες διατομές	11) Πάχος τοιχώματος $t > 12,5$ mm.
90		11) με ενδιάμεσες στάσεις	
Για τις λεπτομέρειες 1 έως 11 με πλήρως μηχανική μόρφωση ραφών ισχύουν τα ανάλογα των κατηγοριών με αυτόματη μόρφωση ραφών.			

Πίνακας Α.3.: Εγκάρσιες εσωραφές

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις
112	<p>Επιρροή κλίμακας για $t > 25$mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<p><u>Άνευ υποθέματος στη ρίζα:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες και ελάσματα. 2) Επεκτάσεις κορμών και πελμάτων σε δοκούς προ της συναρμολόγησης. 3) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές χωρίς οπές συναρμογής. 4) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες ή ελάσματα μεταβλητού πλάτους ή πάχους, με κλίση $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Όλες οι ραφές με έγκαιση ρίζας παράλληλα στη διεύθυνση του βέλους. - Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκαιση ρίζας στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων. - Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους. <p><u>Λεπτομέρεια 3):</u> Μόνο για ενώσεις ελατών διατομών, κοπή και επανασυγκόλληση.</p>
90	<p>Επιρροή κλίμακας για $t > 25$mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 5) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες ή ελάσματα. 6) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές χωρίς οπές συναρμογής. 7) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες ή ελάσματα μεταβλητού πλάτους ή πάχους, με κλίση $\leq 1/4$. Επεξεργασία ραφών ώστε να είναι ελεύθερες εγχοπών. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ύψος κοιλότητας ραφής όχι μεγαλύτερο από το 10% του πλάτους, με ομαλή συναρμογή στην επιφάνεια ελάσματος. - Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκαιση ρίζας στις ακμές ελκατά τη διεύθυνση των τάσεων. - Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους. <p><u>Λεπτομέρειες 5 και 7:</u> Συγκόλληση σε επίπεδη θέση.</p>
90		8) Ως εις λεπτομέρεια 3) αλλά με οπές συναρμογής.	<ul style="list-style-type: none"> - Όλες οι ραφές με έγκαιση ρίζας παράλληλα στη διεύθυνση του βέλους. - Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκαιση ρίζας στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων. - Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους. - Ελατές διατομές των αυτών διαστάσεων, χωρίς ατέλειες συναρμογής

80	Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>9) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε συγκολλητές δοκούς άνευ οπών συναρμογής.</p> <p>10) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές και με οπές συναρμογής.</p> <p>11) Εγκάρσιες επεκτάσεις σε λεπίδες, ελάσματα, ελατές ή συγκολλητές διατομές.</p>	<p>- Ύψος κοιλότητας ραφής όχι μεγαλύτερο από το 20% του πλάτους, με ομαλή συναρμογή στην επιφάνεια ελάσματος.</p> <p>- Όχι έγκausη ρίζας</p> <p>- Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκausη ρίζας στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων.</p> <p>- Αμφίπλευρη συγκόλληση; έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδους.</p> <p><u>Λεπτομέρεια 10:</u> Ύψος κοιλότητας ραφής όχι μεγαλύτερο από το 10% του πλάτους, με ομαλή συναρμογή στην επιφάνεια ελάσματος.</p>
63			<p>12) Πλήρης αποκατάσταση ελατών διατομών με εσωραφές χωρίς οπές συναρμογής.</p>	<p>- Χρήση και στη συνέχεια αφαίρεση υποθέματος, έγκausη ρίζας στις ακμές κατά τη διεύθυνση των τάσεων.</p> <p>- Αμφίπλευρη συγκόλληση.</p>
36			<p>13) Μονόπλευρες εσωραφές.</p>	<p>13) Άνευ υποθέματος.</p>
71	Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>13) Μονόπλευρες εσωραφές όπου η πλήρης διεύθυνση ελέγχεται με μη καταστροφικές μεθόδους.</p>	
71	Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p><u>Με υπόθεμα:</u></p> <p>14) Εγκάρσια ένωση.</p> <p>15) Εγκάρσιες εσωραφές μεταβλητού πλάτους ή πάχους, με κλίση $\leq 1/4$. Ισχύει επίσης για καμπύλες λεπίδες.</p>	<p><u>Λεπτομέρειες 14) και 15):</u> Οι εξωραφές υποθέματος θα σταματούν $\geq 10\text{mm}$ από τις ακμές του εντεινόμενου ελάσματος. Ραφές σταθεροποίησης εντός του περικλειόμενου σχήματος εσωραφών.</p>
50	Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>16) Εγκάρσιες εσωραφές σε μόνιμο υπόθεμα μεταβλητού πάχους ή πλάτους με κλίση $\leq 1/4$. Ομοίως για καμπύλες λεπίδες.</p>	<p>16) Όταν οι εξωραφές του υποθέματος σταματούν $< 10\text{mm}$ από τις ακμές, ή εάν εξασφαλίζεται ομαλή συναρμογή</p>
71	Επιρροή κλίμακας για $t > 25\text{mm}$ με/ή θεώρηση εκκεντρότητας: $k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.2} \left/ \left(1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1.5}}{t_1^{1.5} + t_2^{1.5}}\right)\right.$ $t_2 \geq t_1$		<p>17) Εγκάρσιες εσωραφές, διαφορετικά πάχη χωρίς μετάβαση, αξονική ευθυγράμμιση.</p>	
Ως εις Λεπτομ. 1) στον Πίνακα 8.5			<p>18) Εγκάρσιες εσωραφές σε διασταυρούμενα πέλματα.</p>	<p><u>Λεπτομέρειες 18) και 19)</u> Η αντοχή σε κόπωση του συνεχούς στοιχείου πρέπει να ελεγχθεί σύμφωνα με Πίνακα 8.4, λεπτομ. 4) ή λεπτομ. 5).</p>
Ως εις Λεπτομ. 4) στον Πίνακα 8.4			<p>19) Με ακτίνα συναρμογής ως εις Πίνακα 8.4, λεπτομέρεια 4)</p>	

Πίνακας Α.4.: Προσαρτήματα ραφών και ενισχύσεις

Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια	Περιγραφή	Απαιτήσεις
80	$L \leq 50\text{mm}$	<p><u>Διαμήκη προσαρτήματα:</u></p> <p>1) Η κατηγορία λεπτομέρειας μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος L του προσαρτήματος.</p>	<p>Το πάχος του προσαρτήματος πρέπει να είναι μικρότερο από το μήκος του. Σε αντίθετη περίπτωση βλέπε Πίνακα 8.5, λεπτομέρειες 5) ή 6).</p>
71	$50 < L \leq 80\text{mm}$		
63	$80 < L \leq 100\text{mm}$		

56	$L > 100\text{mm}$			
71	$L > 100\text{mm}$ $\alpha < 45^\circ$		2) Διαμήκη προσαρτήματα σε ελάσματα ή σωλήνες.	
80	$r > 150\text{mm}$		3) Προσαρτήματα με διαμήκη εξωραφή και ακτίνα συναρμογής; ενισχυμένο άκρο ραφής (πλήρης διείδυση); μήκος ενίσχυσης ραφής $> r$.	<u>Λεπτομέρειες 3) και 4):</u> Ομαλή ακτίνα συναρμογής r αρχικά μηχανική κοπή ή κοπή με φλόγα του ελάσματος πριν τη συγκόλληση, κατόπιν λείανση της επιφάνειας ραφής παράλληλα στη διεύθυνση του βέλους ώστε η εγκάρσια ραφή να εξαλειφεται πλήρως.
90	$\frac{r}{L} \geq \frac{1}{3}$ ή $r > 150\text{mm}$		4) Προσαρτούμενα ελάσματα, συγκολλούμενα στην άκρη ελάσματος ή πέλματος.	
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{L} \leq \frac{1}{3}$			
50	$\frac{r}{L} < \frac{1}{6}$			
40			5) Όπως τα συγκολλητά, χωρίς ακτίνα συναρμογής.	
80	$\ell \leq 50\text{mm}$		6) Συγκολλούμενα σε έλασμα.	<u>Λεπτομέρειες 6) και 7):</u> Τα άκρα της ραφής θα πρέπει να λειαίνονται προσεκτικά για την εξάλειψη κάθε πιθανής εγκοπής. 7) Η Δσ θα υπολογίζεται βάσει των κυρίων τάσεων αν η ενίσχυση σταματά μονόπλευρα στον κορμό, βλ. σχήμα αριστερά.
71	$50 < \ell \leq 80\text{mm}$		7) Κατακόρυφες ενισχύσεις συγκολλούμενες σε ελατή ή συγκολλητή δοκό.	
			8) Διαφράγματα συγκολλούμενα σε πέλματα ή κορμούς. Πιθανόν να μην εφαρμόζεται σε μικρές κοίλες διατομές.	
			9) Επίδραση διατμητικών ήλων στο βασικό υλικό.	

Πίνακας Α.5.: Φέρουσες συγκολλητές συνδέσεις

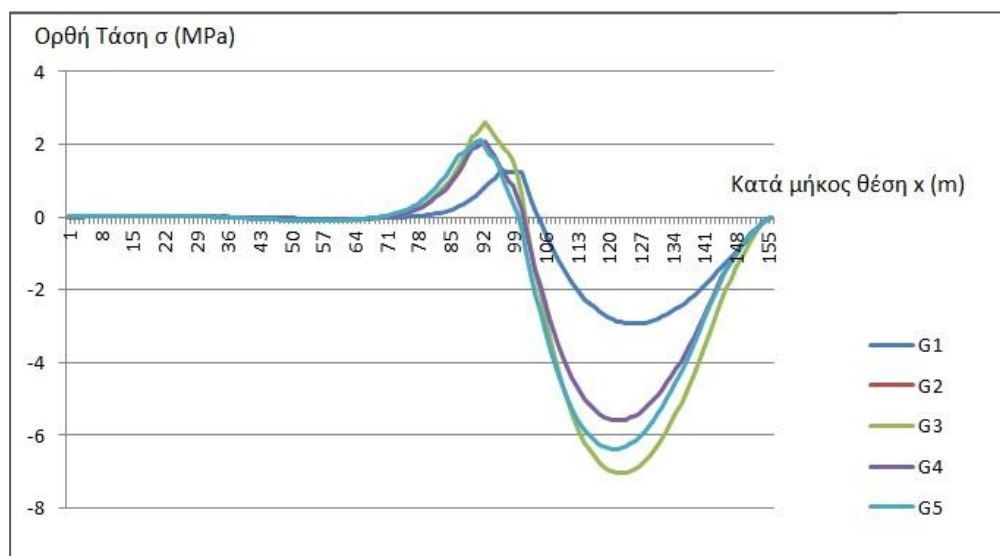
Κατηγορία λεπτομερ.	Κατασκευαστική λεπτομέρεια		Περιγραφή	Απαιτήσεις
80	$\ell < 50\text{ mm}$	όλα τα t		1) Πιστοποιημένη ότι είναι ελεύθερη ασυνεχειών ή κατόπιν ελέγχου με ευθυγραμμία πέραν των ανοχών της EN 1090. 2) Για το υπολογισμό της Δσ, να λαμβάνεται η τροποποιημένη ονομαστική τάση. 3) Σε ενώσεις μερικής διείδωσης απαιτούνται 2 έλεγχοι κόπωσης. Πρώτα, υπολογίζεται ρηγμάτωση ρίζας με τι τάσεις της Παρ. 5, με κατηγορία 36* για Δσ _w και κατηγορία 80 για Δτ _w . Κατόπιν, ελέγχεται ρηγμάτωση ποδός προσδιορίζοντας την Δσ στο φέρον έλασμα.
71	$50 < \ell \leq 80$	όλα τα t		
63	$80 < \ell \leq 100$	όλα τα t		
56	$100 < \ell \leq 120$	όλα τα t		
56	$\ell > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < \ell \leq 200$ $\ell > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$		
45	$200 < \ell \leq 300$ $\ell > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$		
40	$\ell > 300$	$t > 50$		
Ως εις Λεπτομ. 1) στον Πίνακα 8.5			2) Αστοχία ποδός από την ακμή του προσαρτήματος, με υψηλές τάσεις στα άκρα ραφής λόγω τοπικής παραμόρφωσης του ελάσματος.	

36*		3) Αστοχία ρίζας σε μερικής διείσδυσης ραφές ή εξωραφές και σε εσωραφές πλήρους διείσδυσεως ενώσεων Ταυ.	<u>Λεπτομέρειες 1) έως 3):</u> Η μη ευθυγραμμία των φερόντων ελασμάτων να μην υπερβαίνει το 15 % του πάχους του ενδιάμεσου ελάσματος.												
Ως εις Λεπτομ. 1) στον Πίνακα 8.5		<u>Υπερκαλυπτόμενες συγκολλητές ενώσεις:</u> 4) με εξωραφή.	4) Η Δσ στο βασικό έλασμα υπολογίζεται βάσει της διατομής του σχήματος. 5) Η Δσ υπολογίζεται στα υπερκαλυπτόμενα ελάσματα.												
45*		<u>Υπερκάλυψη:</u> 5) με εξωραφή.	<u>Λεπτομέρειες 4) και 5):</u> - Τέλος ραφών πλέον των 10 mm από την ακμή του ελάσματος. - Αστοχία ραφής σε διάτμηση θα ελέγχεται βάσει λεπτομ. 8).												
		<u>Ελάσματα ενίσχυσης ελατών και συγκολλητών διατομών:</u> 6) Ζώνες άκρων απλών ή πολλαπλών ενισχυτικών ελασμάτων, με ή χωρίς εγκάρσιες ραφές συγκόλλησης στα άκρα.	6) Για έλασμα ενίσχυσης πλατύτερο του πέλματος, απαιτείται εγκάρσια ραφή στα άκρα. Η ραφή θα εφαρμόζεται προσεκτικά για την απομάκρυνση του υποθέματος. Ελάχιστο μήκος ελάσματος ενίσχυσης 300 mm. Για επιρροή κλίμακας βραχύτερου ελάσματος βλέπε Λεπτομ 1).												
	<table border="1"> <tr> <td>$t_c < t$</td> <td>$t_c \geq t$</td> </tr> <tr> <td>$t \leq 20$</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>$20 < t \leq 30$</td> <td>$t \leq 20$</td> </tr> <tr> <td>$30 < t \leq 50$</td> <td>$20 < t \leq 30$</td> </tr> <tr> <td>$t > 50$</td> <td>$30 < t \leq 50$</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>$t > 50$</td> </tr> </table>	$t_c < t$	$t_c \geq t$	$t \leq 20$	-	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$	$t > 50$	$30 < t \leq 50$	36	$t > 50$		7) Ελάσματα ενίσχυσης ελατών και συγκολλητών διατομών. 7) Εγκάρσιο άκρο ραφής με έκταση ρίζας. Επιπλέον, εάν $t_c > 20\text{mm}$, μέτωπο άκρου ελάσματος με κλίση $< 1/4$.
$t_c < t$	$t_c \geq t$														
$t \leq 20$	-														
$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$														
$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$														
$t > 50$	$30 < t \leq 50$														
36	$t > 50$														
56		7) Ελάσματα ενίσχυσης ελατών και συγκολλητών διατομών. 5t _c ελάχιστο μήκος ενίσχυσης της ραφής.	7) Εγκάρσιο άκρο ραφής με έκταση ρίζας. Επιπλέον, εάν $t_c > 20\text{mm}$, μέτωπο άκρου ελάσματος με κλίση $< 1/4$.												
80 m=5		8) Συνεχείς εξωραφές μεταφέρουσες διατμητική ροή, όπως ραφές κορμού-πέλματος σε συγκολλητές διατομές. 9) Ένωση υπερκάλυψης με εξωραφές.	8) Η Δτ υπολογίζεται με το πάχος λαίμου της ραφής. 9) Η Δτ υπολογίζεται από το πάχος λαίμου της ραφής και το συνολικό μήκος της. Τέλος ραφών πλέον των 10 mm από την ακμή ελάσματος, βλ. επίσης 4) και 5) παραπάνω.												
βλ. EN 1994-2 (90 m=8)		<u>Συγκολλητοί διατμητικοί ήλοι:</u> 10) Για σύμμικτες εφαρμογές	10) Η Δτ υπολογίζεται βάσει της ονομαστικής διαμέτρου του ήλου.												
71		11) Σύνδεση πέλματος-σωλήνα με 80% της πλήρους διείσδυσης εσωραφές.	11) Πόδας ραφής. Η Δσ υπολογίζεται στον σωλήνα.												
40		12) Σύνδεση πέλματος-σωλήνα με εξωραφές.	12) Η Δσ υπολογίζεται στον σωλήνα.												

Παράρτημα Β. Επίλυση με τη γενική μέθοδο των φορτηγών του σημείου +100m της γέφυρας

- Κάτω πέλμα (σημείο 1 / down fla) : Στην Εικόνα 3.3.15 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

Στην Εικόνα Β.1 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων λόγω των φορτηγών στο υπό εξέταση σημείο, ενώ στον Πίνακα Β.1 τα αποτελέσματα της μεθόδου της δεξαμενής.



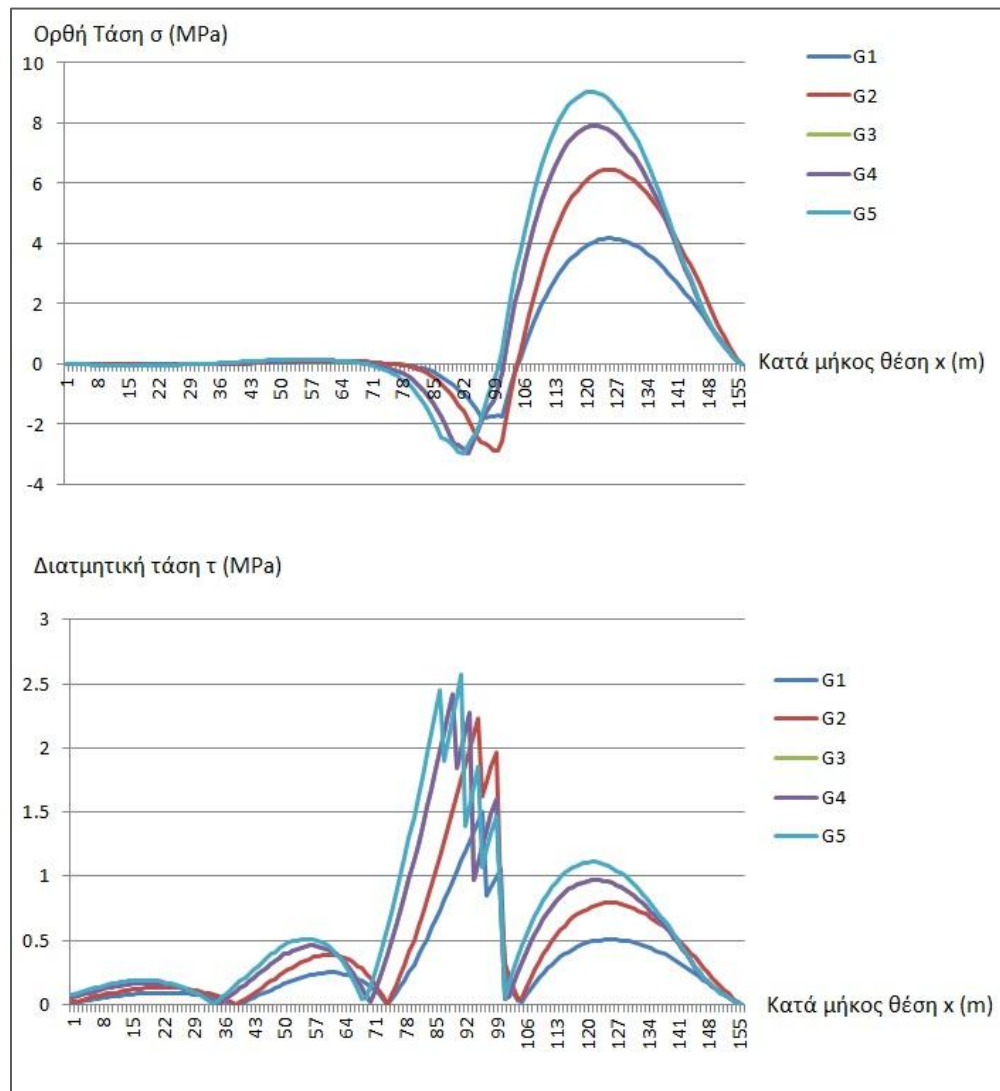
Εικόνα Β.5.1: Διαγράμματα τάσεων λόγω των φορτηγών στο σημείο 1 (κάτω πέλμα) της διατομής. (Εικόνα από το Excel)

Πίνακας Β.1: Αποτελέσματα μεθόδου δεξαμενής για όλα τα φορτηγά στο υπό εξέταση σημείο

Φορτηγό	G1			G2		G3		G4		G5	
Δσ	6,15	1,94	0,02	9,61	3,08	14,06	3,94	11,21	3,19	12,38	3,21
Δσ _L σημείου διατομής	29 (κατηγορία 71)										

- Κορμός (σημείο 13 / web) : Στην Εικόνα 3.3.16 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

Στην Εικόνα Β.2 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων λόγω των φορτηγών στο υπό εξέταση σημείο, ενώ στον Πίνακα Β.2 τα αποτελέσματα της μεθόδου της δεξαμενής.



Εικόνα Β.5.2: Διαγράμματα τάσεων λόγω των φορτηγών στο σημείο 13 (κορμός) της διατομής. (Εικόνα από το Excel)

Ορθή τάση

Πίνακας Β.2: Αποτελέσματα μεθόδου δεξαμενής για όλα τα φορτηγά στο υπό εξέταση σημείο (Ορθές τάσεις)

Φορτηγό	G1			G2		G3		G4		G5	
Δσ	5,98	1,89	0,02	9,34	2,99	10,89	3,09	10,89	3,09	12,02	3,12
Δσ _L σημείου διατομής	29 (κατηγορία 71)										

Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο (βλέπε Παράγραφο 3.4.2.1.), δηλαδή όλα τα Δσ είναι μικρότερα από το Δσ_L.

Διατμητική τάση

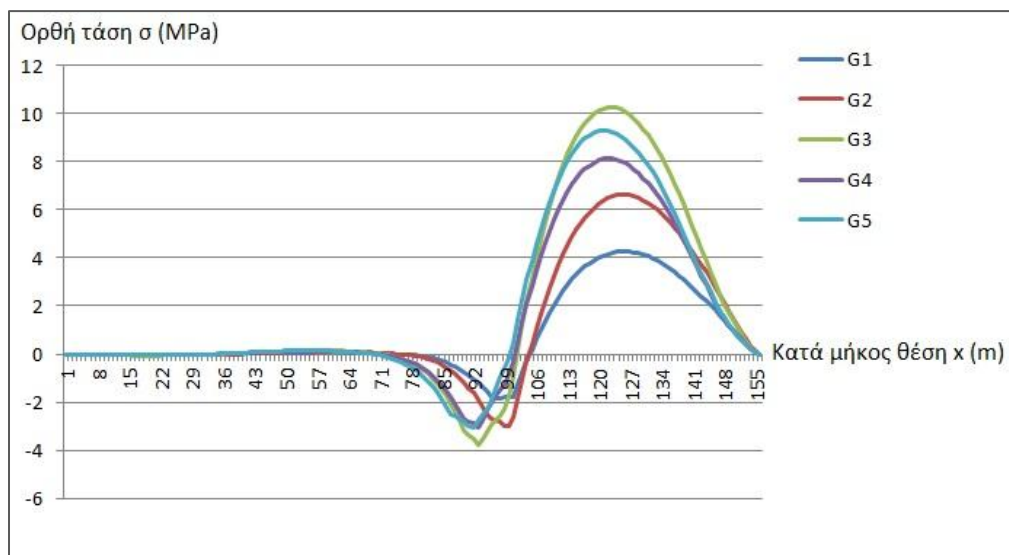
Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα μεθόδου δεξαμενής για όλα τα φορτηγά στο υπό εξέταση σημείο (Διατμητικές τάσεις)

Φορτηγό	G1					G2				
Δτ	1,5	0,49	0,25	0,21	0,09	2,23	0,75	0,38	0,34	0,13
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)									
Φορτηγό	G3									
Δτ	2,42		0,93		0,63		0,44		0,16	
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)									
Φορτηγό	G4									
Δτ	2,42		0,93		0,63		0,44		0,16	
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)									
Φορτηγό	G5									
Δτ	2,57	1,06	0,55	0,47	0,46	0,4	0,17			
Δτ _L σημείου διατομής	32 (κατηγορία 80)									

Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή όλα τα Δτ είναι μικρότερα από το Δτ_L.

- Άνω πέλμα-σύνδεση με πλάκα (σημείο 20 / fla-sla) : Στην Εικόνα 3.3.17 φαίνεται η θέση του στη διατομή.

Στην Εικόνα Β.3 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων λόγω των φορτηγών στο υπό εξέταση σημείο, ενώ στον Πίνακα Β.3 τα αποτελέσματα της μεθόδου της δεξαμενής.



Εικόνα Β.5.3: Διαγράμματα τάσεων λόγω των φορτηγών στο σημείο 20 (άνω πέλμα) της διατομής. (Εικόνα από το Excel)

Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα μεθόδου δεξαμενής για όλα τα φορτηγά στο υπό εξέταση σημείο

Φορτηγό	G1					G2			G3		
Δσ	4,23	2,94	1,29	0,07	0,01	6,6	4,56	0,1	9,66	7,06	0,15
Δσ _L σημείου διατομής	45 (κατηγορία 112)										
Φορτηγό	G4					G5					
Δσ	7,7	5,6	0,12			8,5			6,39		0,14
Δσ _L σημείου διατομής	45 (κατηγορία 112)										

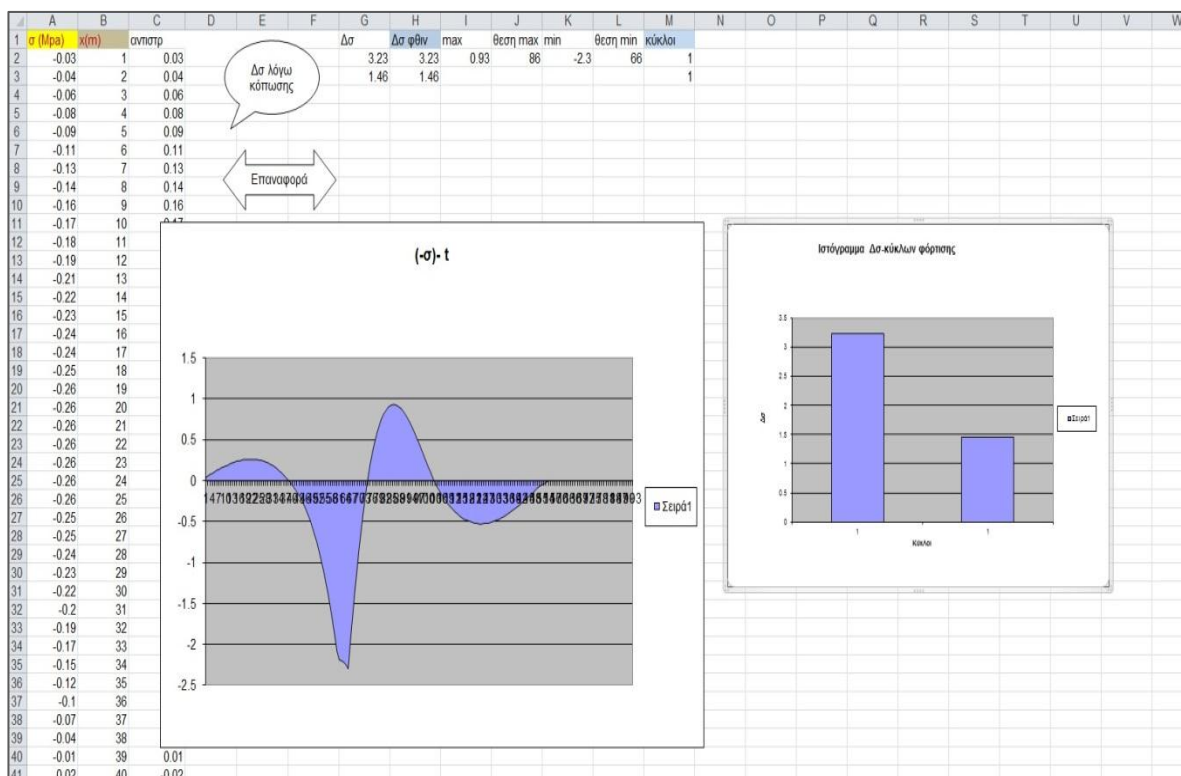
Και εδώ παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή όλα τα Δσ είναι μικρότερα από το Δσ_L.

Παράρτημα Γ. Εικόνες Μεθόδου Δεξαμενής – Διαγράμματα και Ιστογράμματα

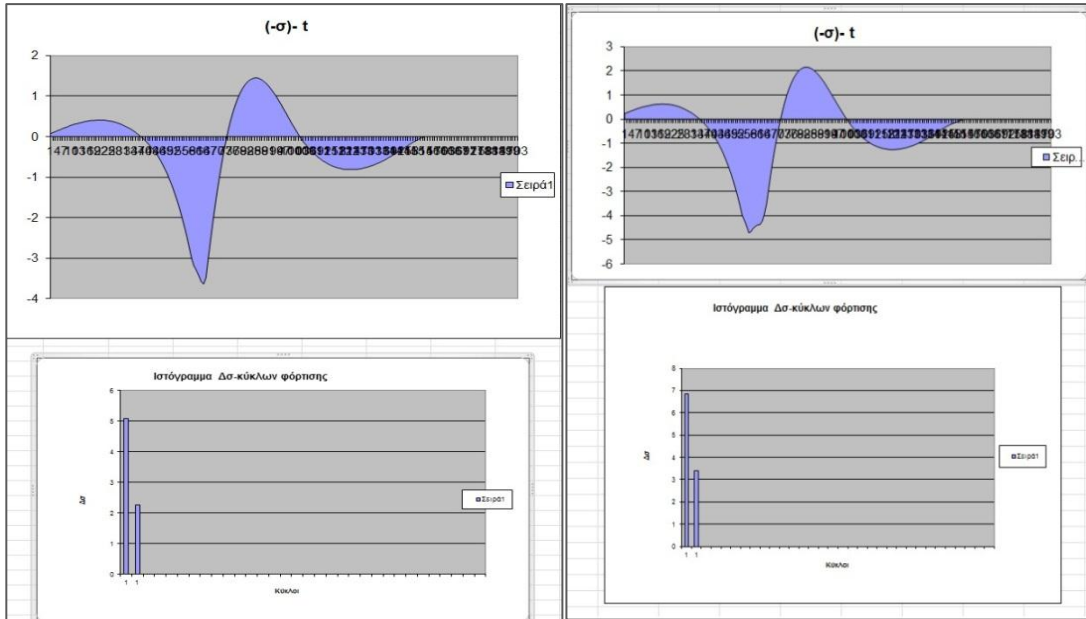
Διατομή $x = +65 \text{ m}$

Κάτω Πέλμα (σημείο 1 / down fla)

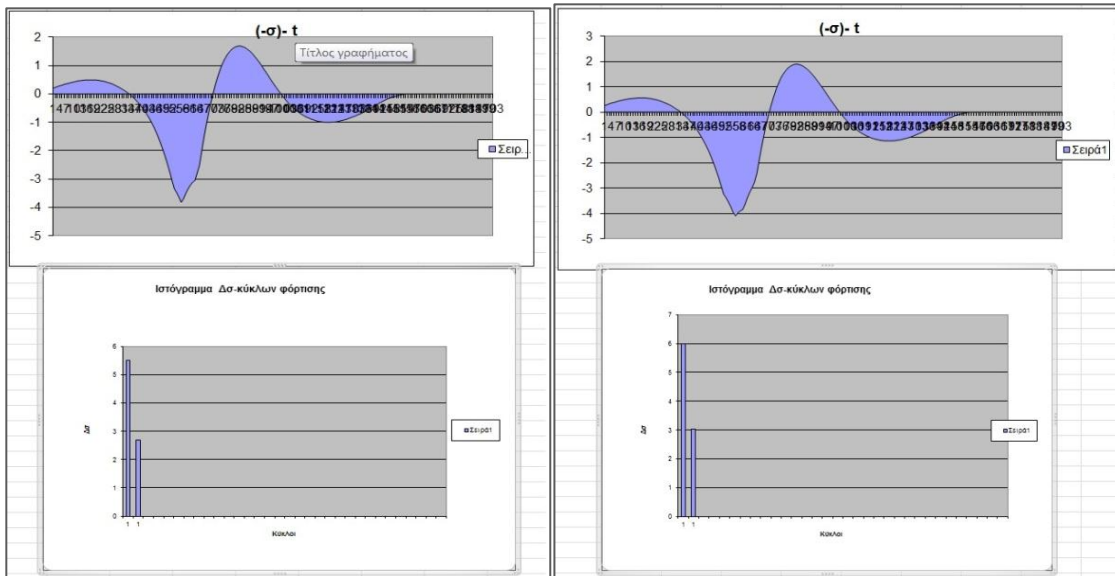
Στην Εικόνα Γ.1 φαίνεται το αποτέλεσμα της φόρτισης του φορτηγού G1 και του ιστογράμματος που προκύπτει από τη μέθοδο της δεξαμενής. Στις επόμενες Εικόνες φαίνονται οι φορτίσεις και τα ιστογράμματα και των άλλων φορτηγών. Όλα τα διαγράμματα έχουν τετημημένη τη θέση $x \text{ (m)}$ πάνω στη γέφυρα (το t φαίνεται απλά δείχνει τη μεταβλητότητα του σ στο χρόνο κατά τη διέλευση των φορτηγών στα διάφορα σημεία της γέφυρας – δεν είναι μονάδες χρόνου) και τεταγμένη την τάση $-\sigma \text{ (MPa)}$ εδώ, και $\tau \text{ (MPa)}$ στον κορμό- υπό μορφή αντιθέτου (για την ευκολία της μεθόδου – προτιμάται να δεχθεί το αντίθετο διάγραμμα γιατί σ' αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος).



Εικόνα Γ.1: Εικόνα στο Excel της φόρτισης του φορτηγού G1



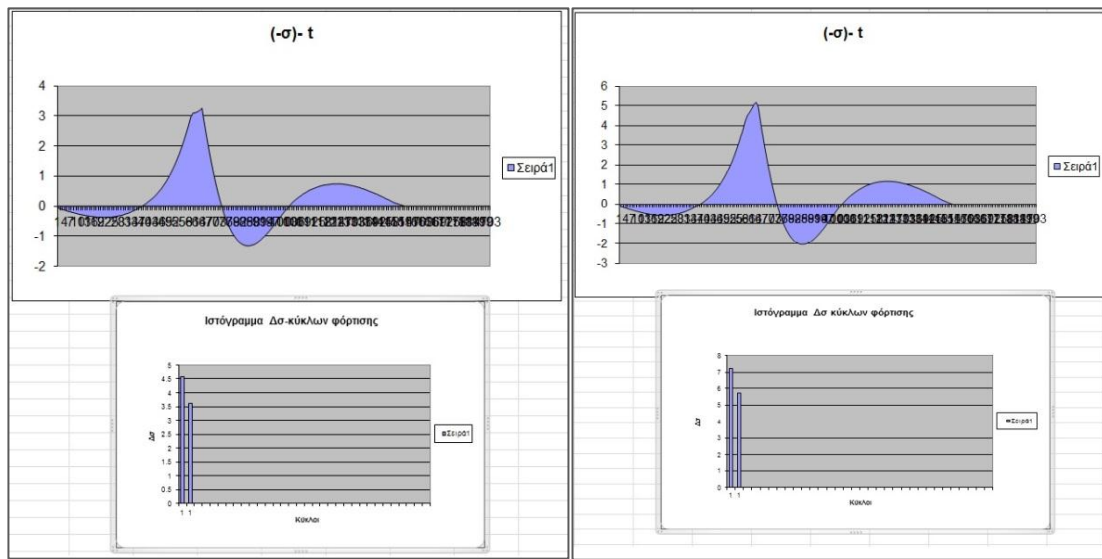
Εικόνα Γ.2: Φορτίσεις φορητών G2 (αριστερά) και G3 (δεξιά)



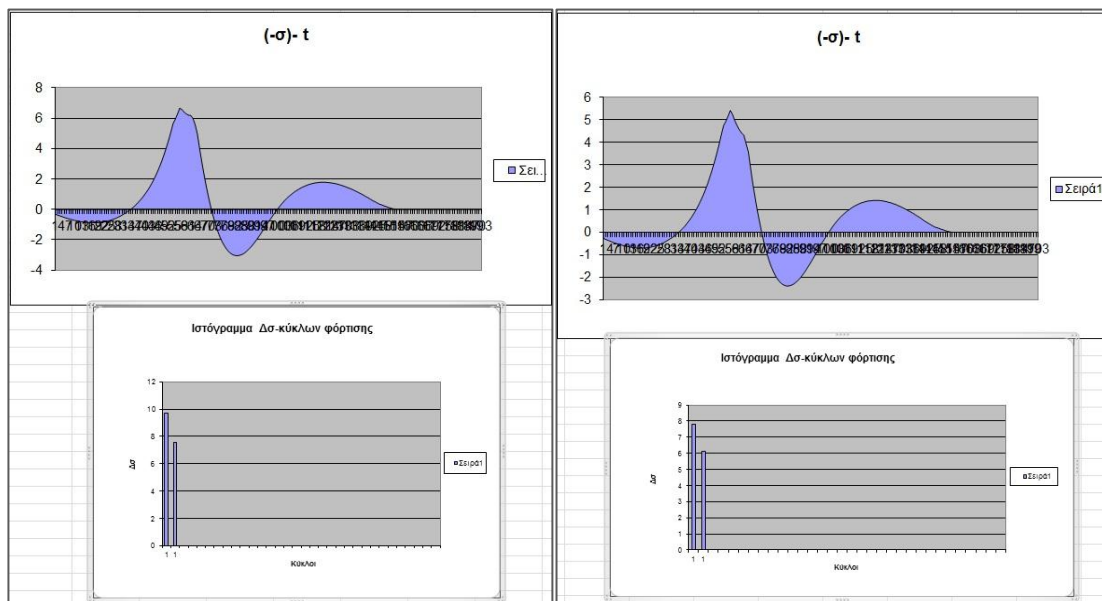
Εικόνα Γ.2: Φορτίσεις φορητών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται τα παραπάνω για όλα τα εξεταζόμενα σημεία για όλα τα φορητά και στις δύο διατομές εξέτασης.

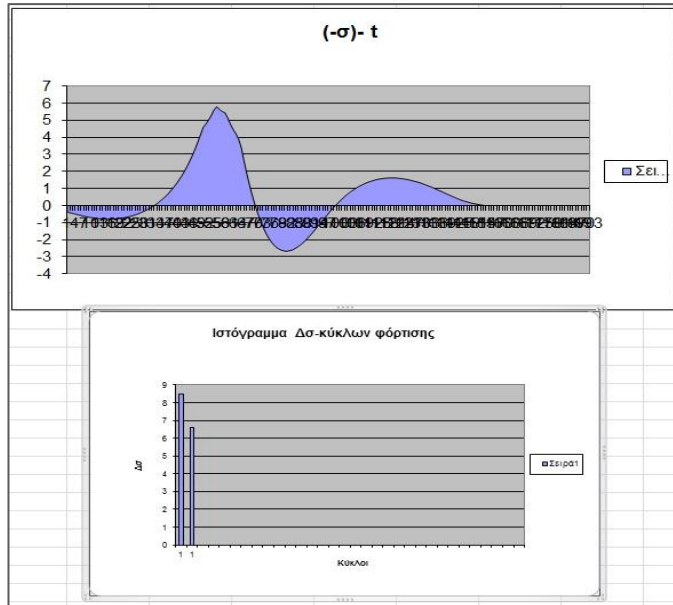
Ορθές Τάσεις



Εικόνα Γ.3: Φορτίσεις φορτηγών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)

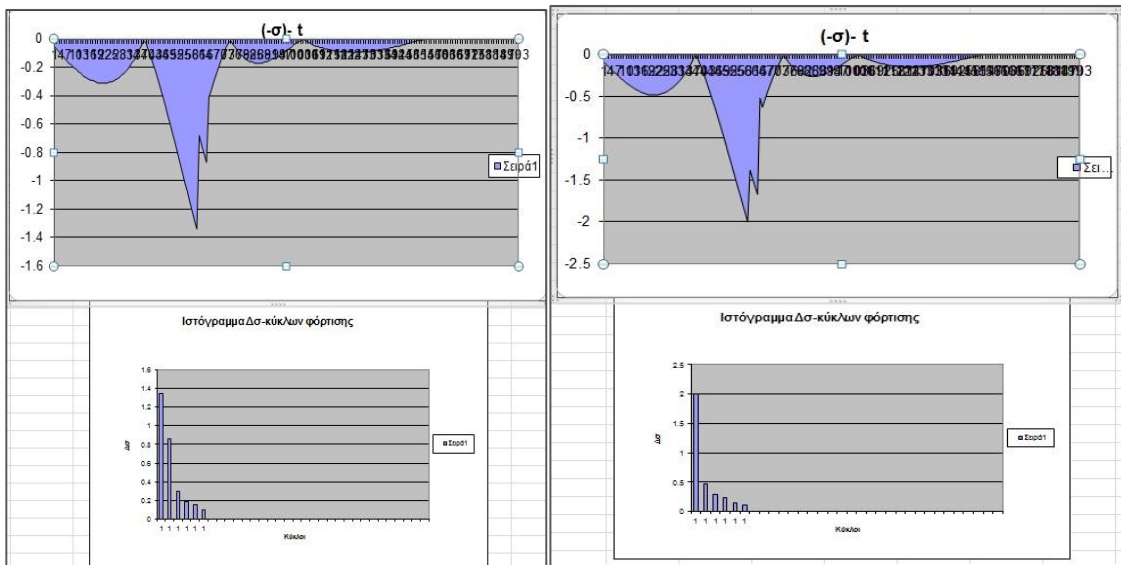


Εικόνα Γ.4: Φορτίσεις φορτηγών G3 (αριστερά) και G4 (δεξιά)

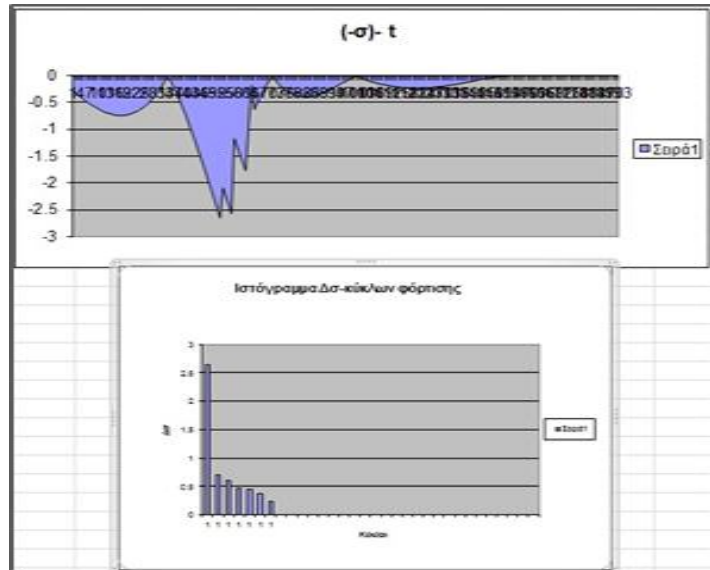


Εικόνα Γ.5: Φόρτιση φορτηγού G5

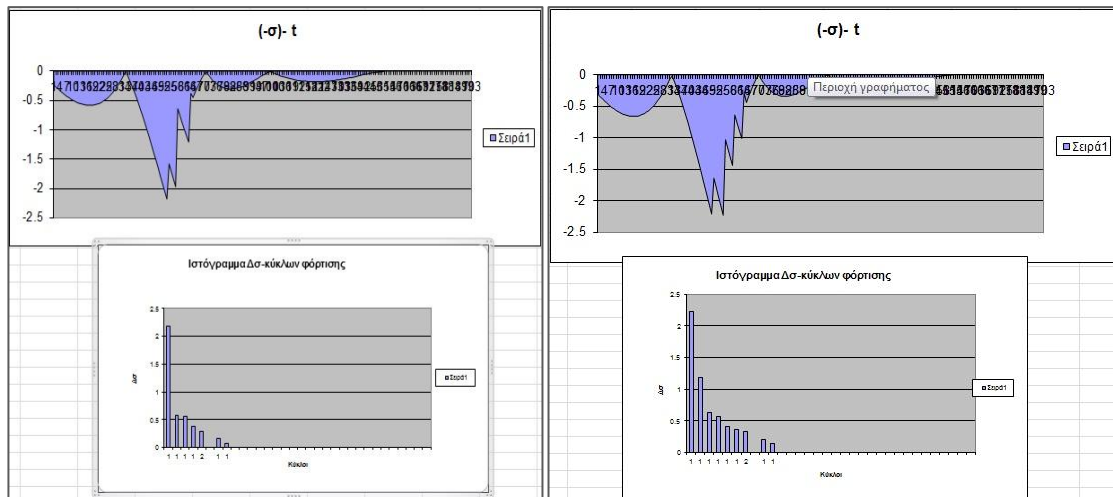
Διατμητικές Τάσεις



Εικόνα Γ.6: Φορτίσεις φορτηγών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)

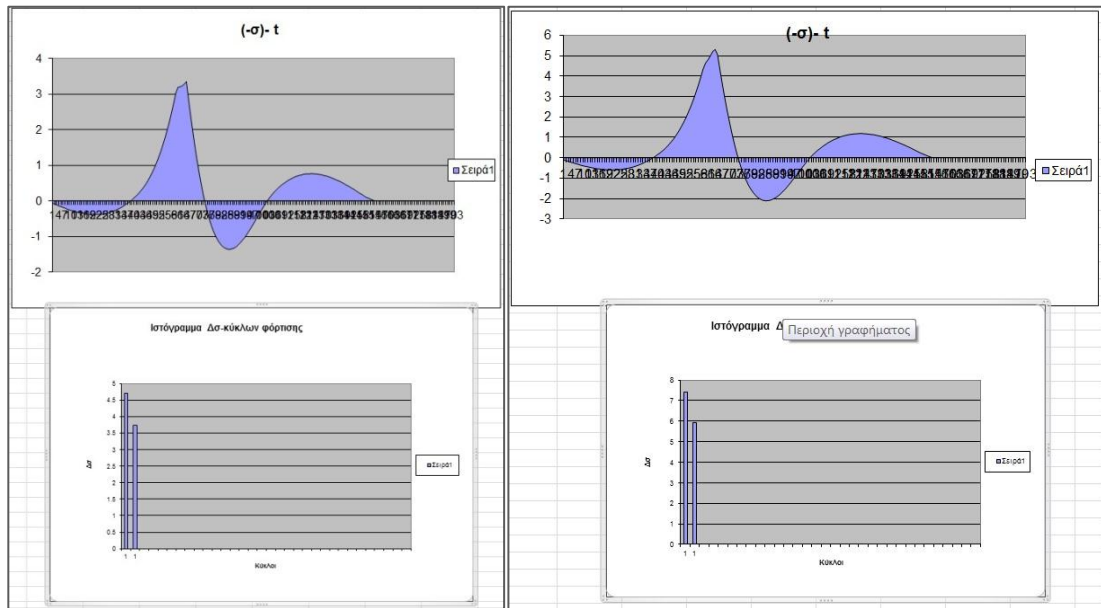


Εικόνα Γ.7: Φόρτιση φορτηγού G3

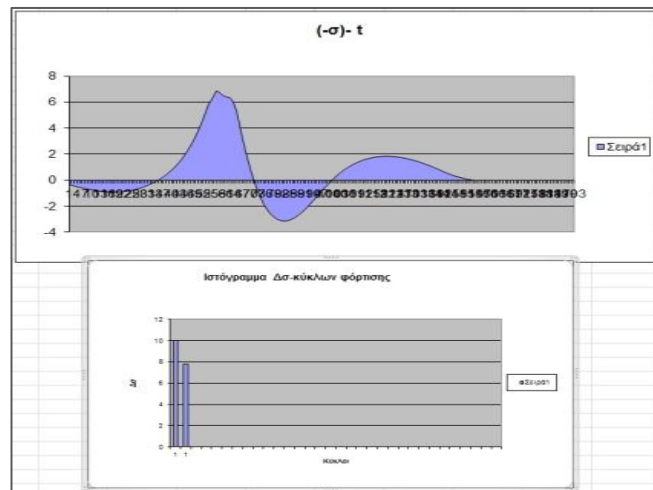


Εικόνα Γ.8: Φορτίσεις φορτηγών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

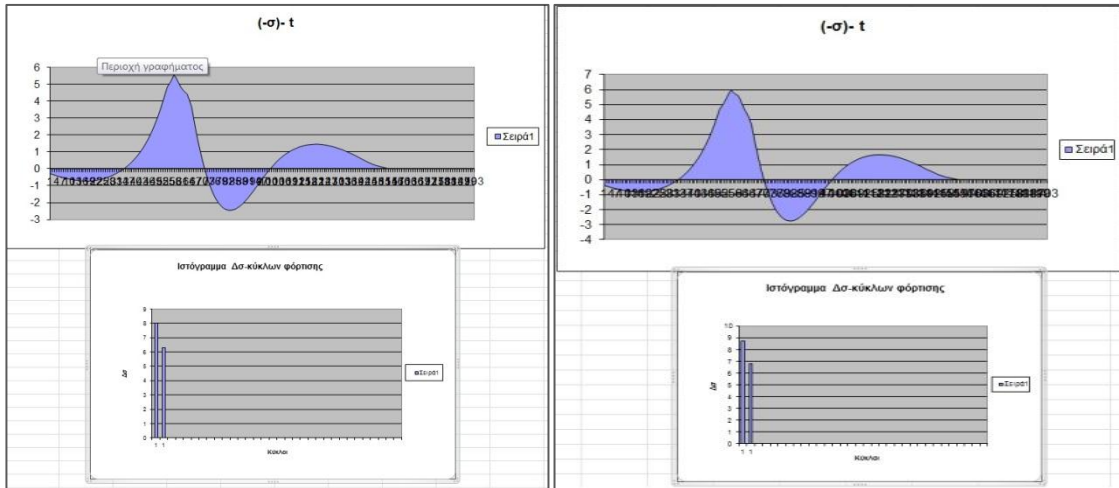
Άνω Πέλημα (σημείο 20 / fla sla)



Εικόνα Γ.9: Φορτίσεις φορητών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)



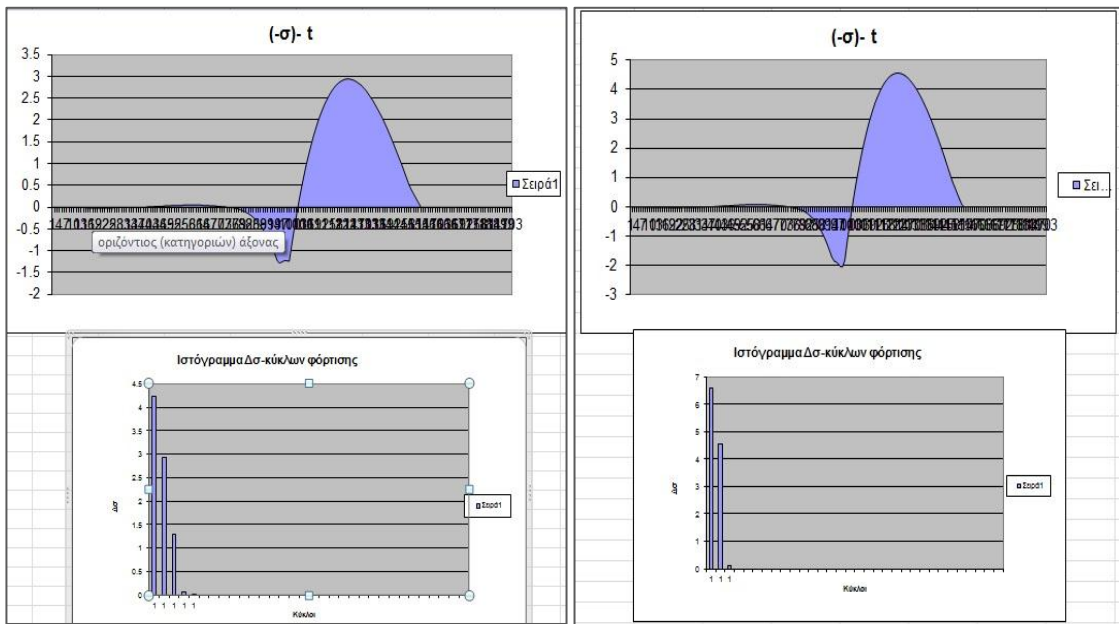
Εικόνα Γ.10: Φόρτιση φορητού G3



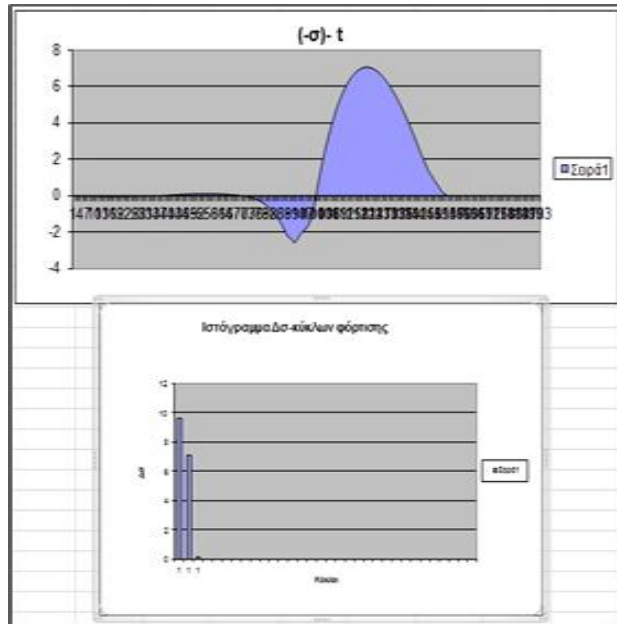
Εικόνα Γ.11: Φορτίσεις φορτηγών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

Διατομή $x = +100 \text{ m}$

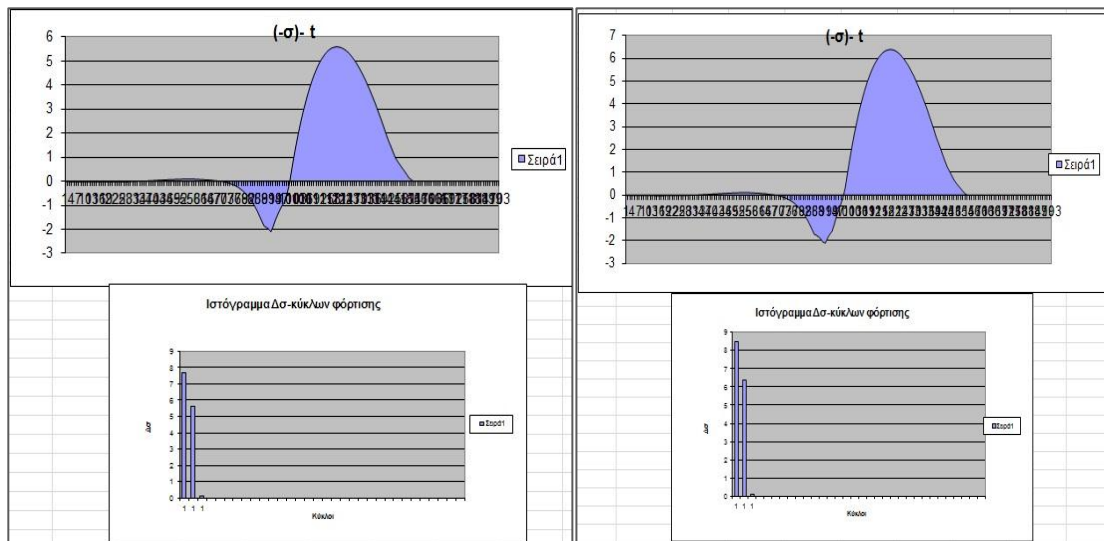
Κάτω Πέλμα (σημείο 1 / down fla)



Εικόνα Γ.12: Φορτίσεις φορτηγών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)



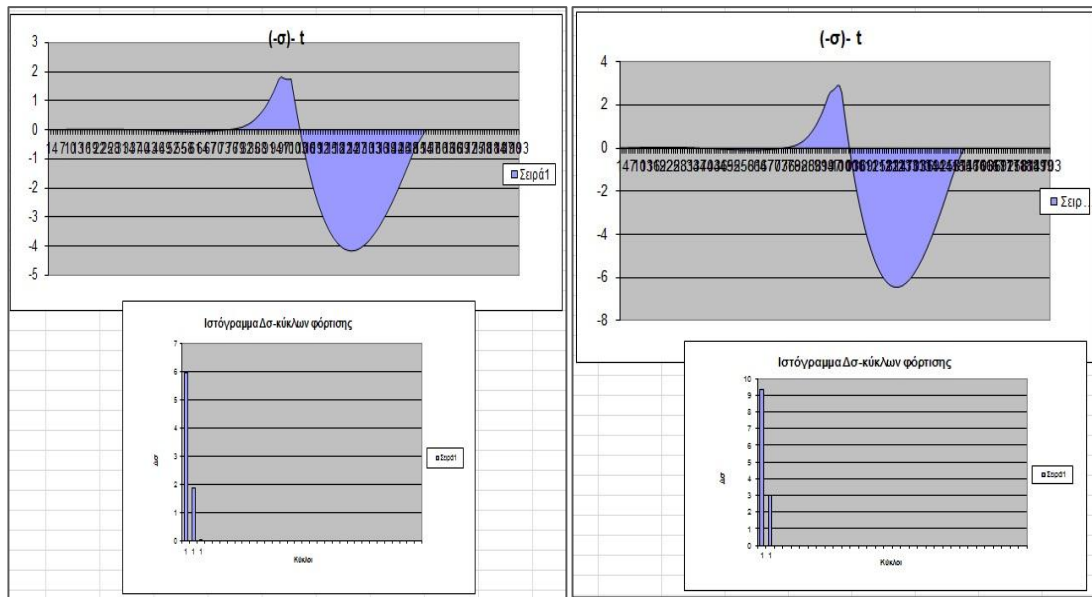
Εικόνα Γ.13: Φόρτιση G3



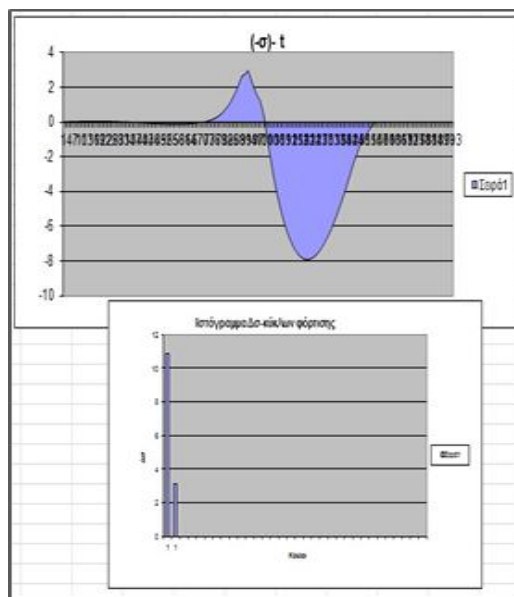
Εικόνα Γ.14: Φορτίσεις φορτηγών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

Κορμός (σημείο 13 / web)

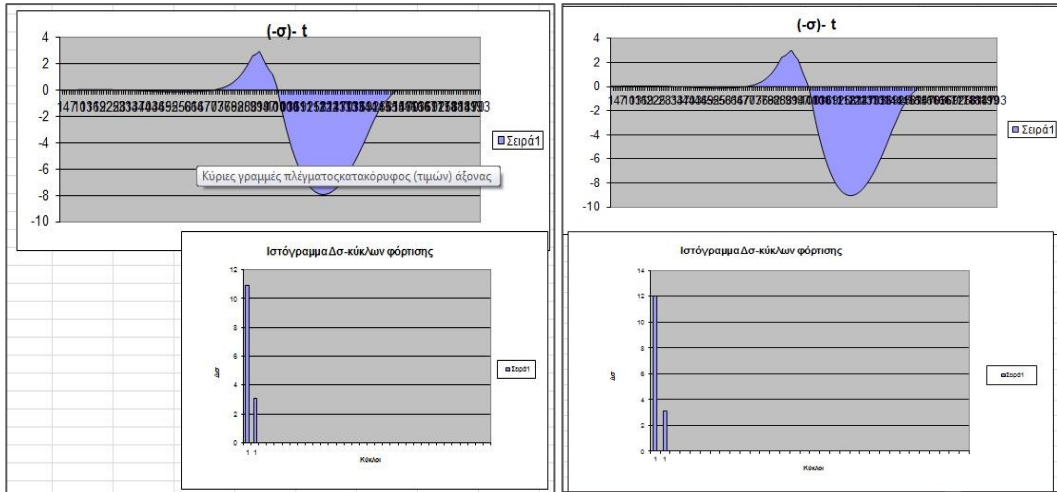
Ορθές Τάσεις



Εικόνα Γ.15: Φορτίσεις φορητών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)

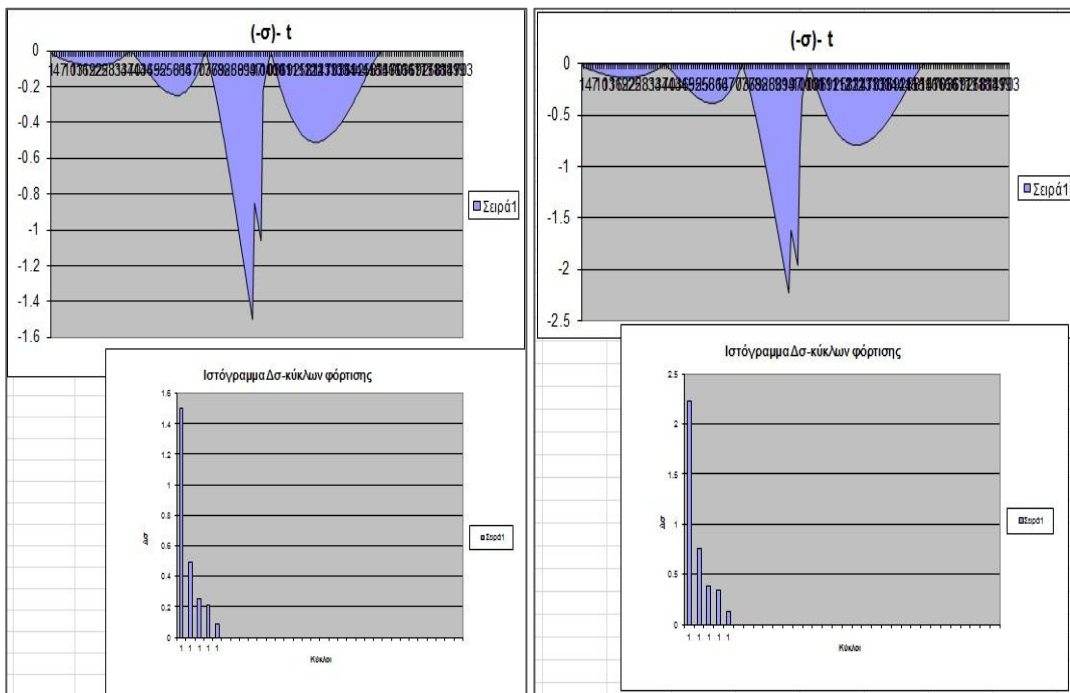


Εικόνα Γ.16: Φόρτιση G3

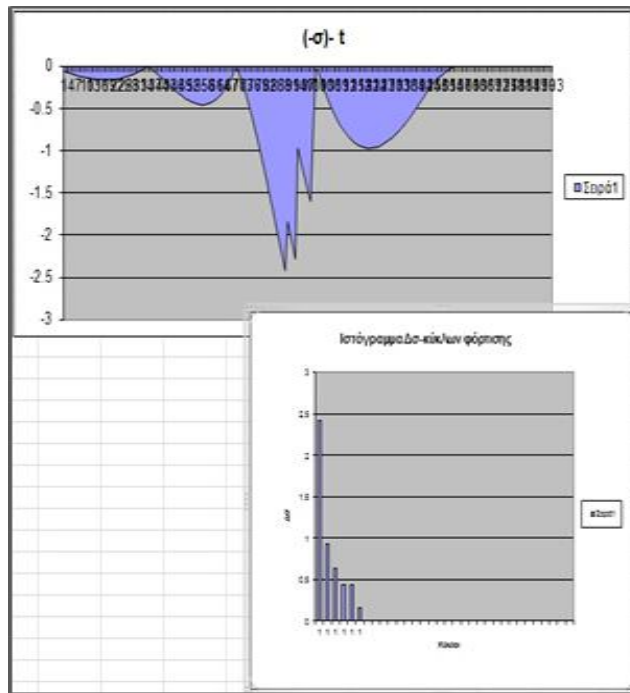


Εικόνα Γ.17: Φορτίσεις φορητών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

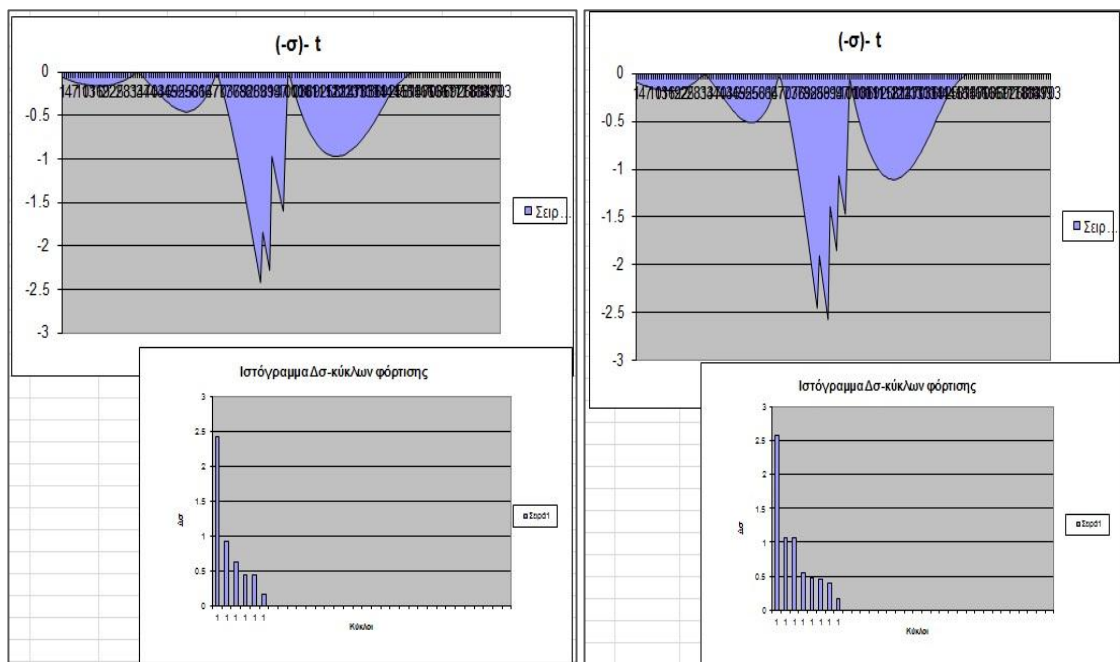
Διαμητικές Τάσεις



Εικόνα Γ.18: Φορτίσεις φορητών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)

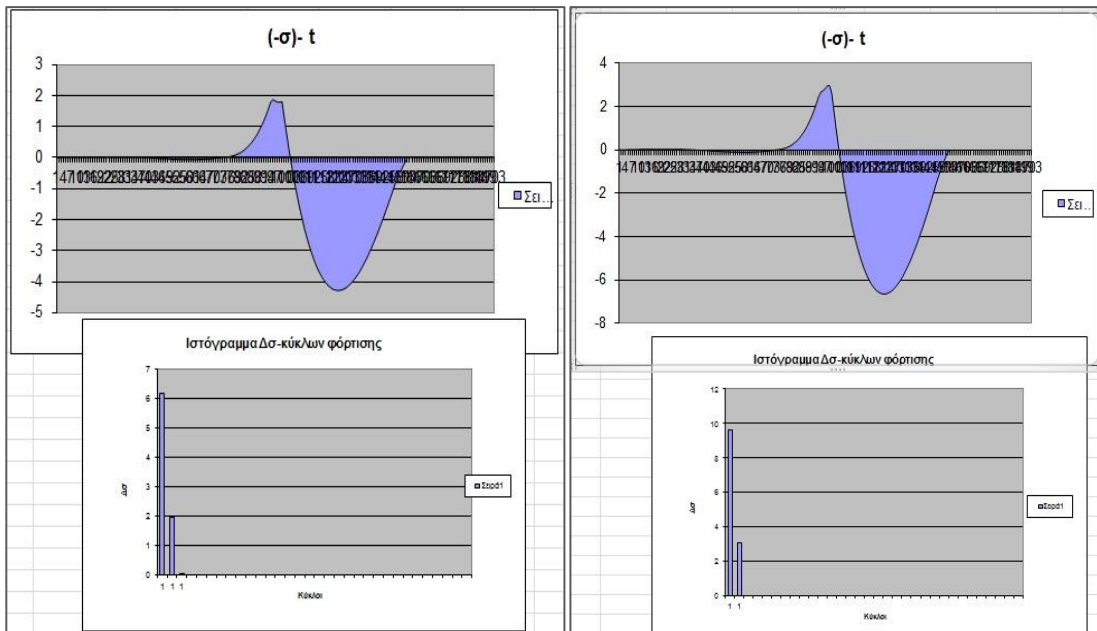


Εικόνα Γ.19: Φόρτιση G3

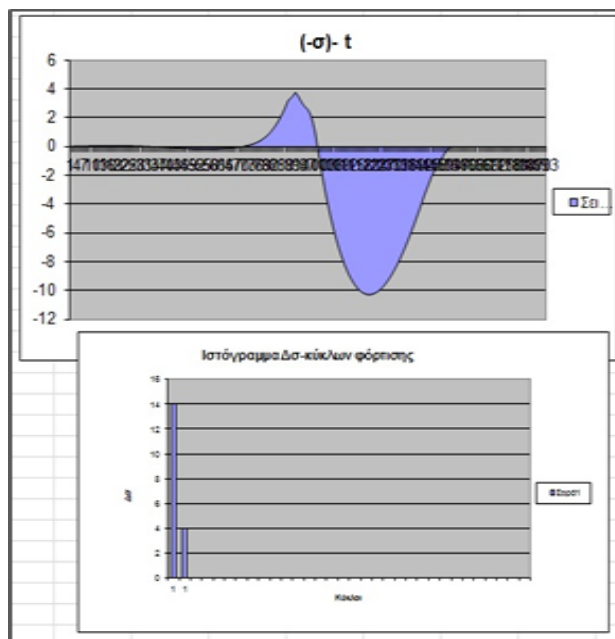


Εικόνα Γ.20: Φορτίσεις φορητών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

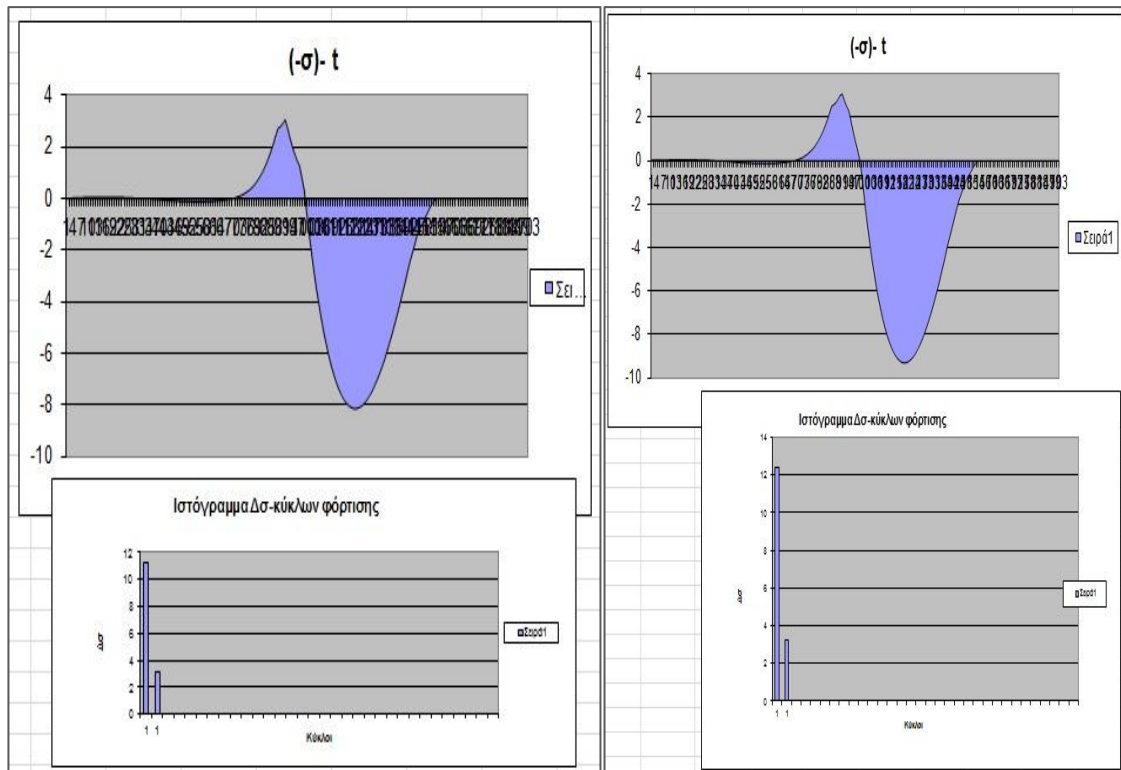
Άνω Πέλμα (σημείο 20 / fla sla)



Εικόνα Γ.21: Φορτίσεις φορτηγών G1 (αριστερά) και G2 (δεξιά)



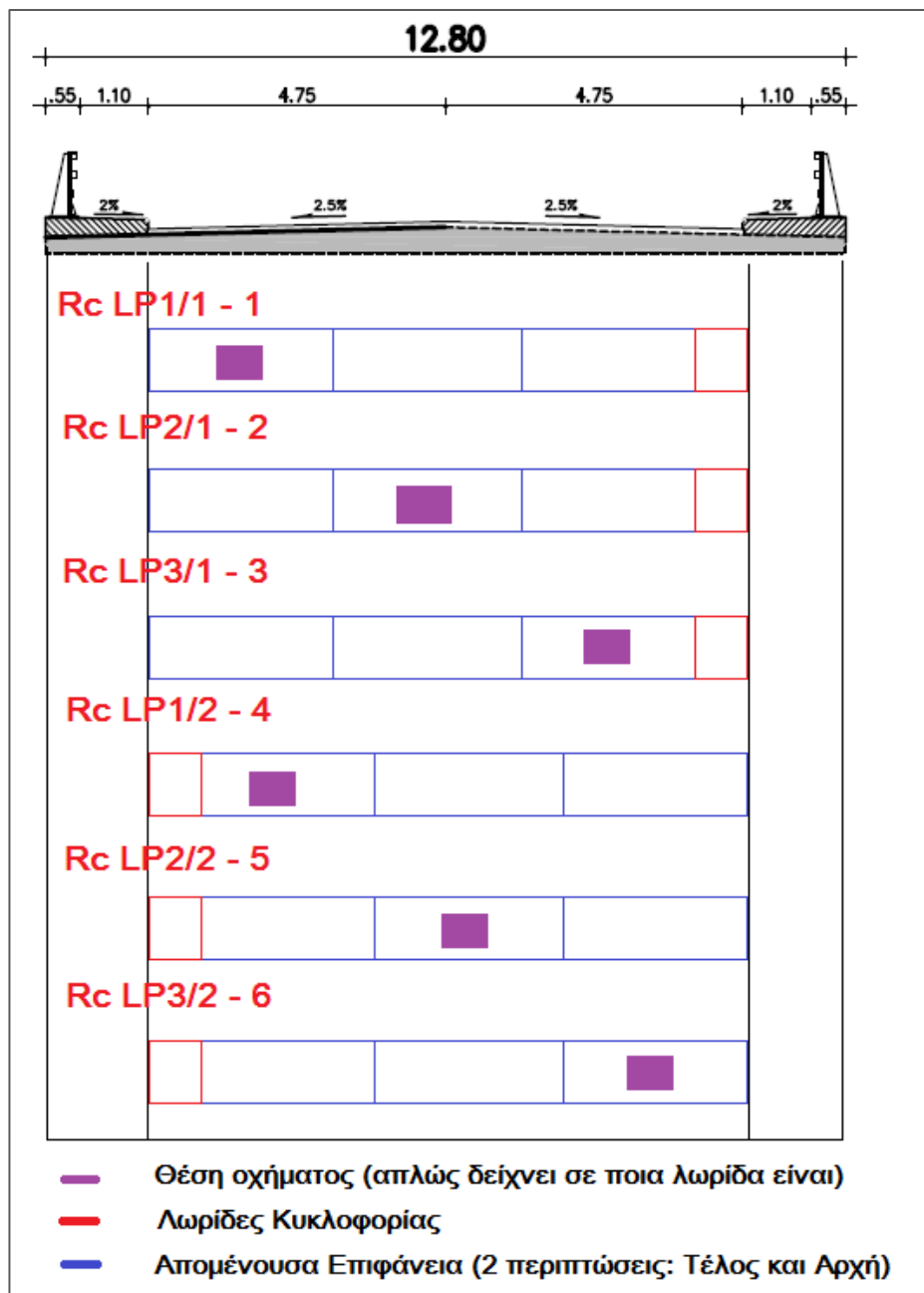
Εικόνα Γ.22: Φόρτιση G3



Εικόνα Γ.23: Φορτίσεις φορηγών G4 (αριστερά) και G5 (δεξιά)

Παράρτημα Δ. Λωρίδες Κυκλοφορίας – Περιπτώσεις

Στο παρόν Παράρτημα παρουσιάζονται οι περιπτώσεις τοποθέτησης του τυποποιημένου οχήματος στην απλοποιημένη μέθοδο του Ευρωκώδικα κατά πλάτος της γέφυρας προκειμένου να βρεθούν τα μέγιστα και ελάχιστα. Επιλέγονται δύο περιπτώσεις τοποθέτησης της απομένουσας επιφάνειας. Μία στο τέλος (Rc LP1/1 – 1, Rc LP2/1 – 2, Rc LP3/1 – 3) και μία στην αρχή (Rc LP1/2 – 4, Rc LP2/2 – 5, Rc LP3/2 – 6). Στο Σχήμα Γ.1 φαίνονται τα παραπάνω:



Σχήμα Γ.5.1: Περιπτώσεις τοποθέτησης τυποποιημένου οχήματος ανά λωρίδα