



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΡΘΡΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
**Αλκαίος Καχριμάνης**

EMK ΔΕ 2022 15

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής  
Συνεπιβλέποντες: Βασίλης Μελισσιανός, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής  
Βασίλης Παπαβασιλείου, Υποψήφιος Διδάκτορας

Αθήνα, Νοέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



# Αριθμητική Προσομοίωση και Αποτίμηση Αρθρωτών Συνδέσεων Προκατασκευασμένων Χαλύβδινων Γεφυρών



Διπλωματική Εργασία  
**Αλκαίος Καχριμάνης**

EMK ΔΕ 2022 15

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής  
Συνεπιβλέποντες: Βασίλης Μελισσιανός, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής  
Βασίλης Παπαβασιλείου, Υποψήφιος Διδάκτορας

Αθήνα, Νοέμβριος 2022



Copyright © Αλκαίος Καχριμάνης 2022  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Alkaios Kachrimanis, 2022  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Αλκαίος Καχριμάνης (2022)  
Αριθμητική Προσομοίωση και Αποτίμηση Αρθρωτών Συνδέσεων Προκατασκευασμένων Χαλύβδινων  
Γεφυρών  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2022 15  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Alkaios Kachrimanis (2022)  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2022 15  
Numerical Simulation and Evaluation of Modular Joints of Prefabricated Steel Bridges  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κύριο Χάρη Γαντέ για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση του συγκεκριμένου ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την πολύτιμη συμβολή και καθοδήγηση του σε κομβικά σημεία. Οι γνώσεις που αποκόμισα μέσω της αγαστής συνεργασίας μας, συνετέλεσαν εν γένει στην βαθύτερη κατανόηση των μεταλλικών κατασκευών, και θα αποτελέσουν εφαλτήριο στην μετέπειτα πορεία μου, ως πολιτικού μηχανικού.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κύριο Βασίλη Μελισσιανό για τη σημαντική του συμβολή σε θέματα προσομοίωσης όπως και στον κύριο Βασίλη Παπαβασιλείου, για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε στο αντικείμενο των προκατασκευασμένων γεφυρών. Ο καθένας, με ξεχωριστό τρόπο, αποτέλεσαν αρωγοί στην ορθή διεκπεραίωση της εργασίας.





## Αφιέρωση

Την παρούσα εργασία την αφιερώνω στην οικογένεια μου, για την ανυστερόβουλη στήριξη που μου παρείχε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2022 15

**Αριθμητική Προσομοίωση και Αποτίμηση Αρθρωτών Συνδέσεων  
Προκατασκευασμένων Χαλύβδινων Γεφυρών**

**Αλκαίος Καχριμάνης**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής  
Συνεπιβλέποντες: Βασίλης Μελισσιανός, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής  
Βασίλης Παπαβασιλείου, Υποψήφιος Διδάκτορας

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η εύκολη και μη χρονοβόρα ανέγερση των προκατασκευασμένων γεφυρών συνετέλεσε το συγκεκριμένο είδος φορέα να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών, ειδικά σε περιπτώσεις που επιβαλλόταν η εύρεση μιας γρήγορης και συνάμα λειτουργικής λύσης. Παρόλο όμως που κατά κόρον η χρήση τους ενδείκνυται ως προσωρινές δομές, υπάρχουν παραδείγματα γεφυρών μεταξύ άλλων και το σύστημα Bailey τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία ακόμα και σήμερα. Ξέχωρα λοιπόν από την απόκριση της γέφυρας στα παλαιότερα φορτία σχεδιασμού, εγείρεται το εύλογο ερώτημα της απόκρισης και της ευστάθειας μιας τόσο παλιάς κατασκευής υπό το πρίσμα των σύγχρονων κανονισμών. Επιπλέον παρουσιάζει ενδιαφέρον η συμπεριφορά των συνδέσεων μεταξύ των μελών και δη των πλαισιακών κόμβων σε καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας. Μελετώνται φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας λόγω επαφής και σταδιακά υπεισέρχονται στις αναλύσεις η μη γραμμικότητα του υλικού, στις περιπτώσεις που οι ελαστικές αναλύσεις αδυνατούν να δώσουν επακριβή αποτελέσματα. Τέλος εξετάζεται μέσω παραμετροποίησης η επιρροή της αναπτυσσόμενης τριβής μεταξύ των μελών στην απόκριση της σύνδεσης.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2022 15

**Numerical Simulation and Evaluation of Modular Joints of Prefabricated Steel Bridges  
Alkaios Kachrimanis**

Supervisor: Charis Gantes, Professor  
Co-supervisor: Vasileios Melissianos, Postdoctoral Researcher  
Vasileios Papavasileiou, PhD Candidate

**ABSTRACT**

The easy methods of construction of prefabricated bridges made this type of carrier a useful tool in the hands of engineers, especially in cases where a functional and at the same time an effective solution was required. Although their use is usually indicated as temporary structures, there are examples of bridges including the Bailey system which are still in operation today. So apart from the response of the bridge to the older design loads, the reasonable question arises of the response and stability of such an old structure in the light of modern regulations. In addition is examined the behavior of the connections between the members and especially the frame nodes in failure and serviceability situations. Geometry non-linearity phenomena due to contact are studied and the non-linearity of the material is gradually included in the analyses, in cases where elastic analyzes are unable to give accurate results. Finally, the influence of the developing friction between the members on the response of the connection is examined through parameterization.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ .....</b>	<b>1</b>
1.1	Γενικά στοιχεία για γέφυρες .....	1
1.2	Εισαγωγή στις προκατασκευασμένες γέφυρες από χάλυβα .....	1
1.3	Αντικειμενικός στόχος της εργασίας .....	2
1.4	Δομή διπλωματικής .....	2
<b>2</b>	<b>ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ .....</b>	<b>5</b>
2.1	Εισαγωγή.....	5
2.2	Είδη προκατασκευασμένων μεταλλικών γεφυρών .....	6
2.2.1	Προσωρινές Γέφυρες/Γέφυρες εκτάκτου ανάγκης.....	6
2.2.2	Μόνιμες Γέφυρες .....	16
<b>3</b>	<b>ΓΕΦΥΡΑ BAILEY.....</b>	<b>19</b>
3.1	Εισαγωγή.....	19
3.2	Στοιχεία γέφυρας Bailey.....	20
3.2.1	Τύποι γεφυρών.....	20
3.2.2	Γεωμετρικά στοιχεία μελών γέφυρας.....	22
3.3	Υλικό κατασκευής.....	27
3.4	Μόνιμα φορτία γέφυρας .....	29
3.5	Διαδικασία κατηγοριοποίησης οχημάτων-γέφυρας.....	30
3.6	Φορτία γέφυρας κατά τον Ευρωκώδικα.....	34
3.6.1	Πρότυπο φόρτισης 1(LM1) .....	35
3.6.2	Φορτία ανέμου κατά Ευρωκώδικα .....	37
3.7	Συγκρίσεις δύο κανονισμών.....	40
<b>4</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ .....</b>	<b>43</b>
4.1	Γενικά.....	43
4.2	Συνδέσεις μελών στα ραβδωτά στοιχεία και προσομοίωσή τους.....	43
4.3	Προσομοίωση μελών γέφυρας με στοιχεία δοκού .....	49
4.4	Βαθμονόμηση ραβδωτών μοντέλων .....	52
4.5	Ελαστικές αναλύσεις για διάφορες συνθήκες κυκλοφορίας.....	56
<b>5</b>	<b>ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΟΜΒΟΥ .....</b>	<b>63</b>
5.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόμβου σύνδεσης πλαισίων .....	63
5.2	Διακριτοποίηση μελών .....	67
5.3	Ορισμός και θεωρητικά στοιχεία επαφής .....	72
5.4	Σύνδεση στοιχείων κελύφους με χωρικά στοιχεία .....	75
5.5	Μοντέλο με στοιχεία δοκού, κελύφους και χωρικά .....	80
5.6	Ελαστικές αναλύσεις μεμονωμένου προσομοιώματος κόμβου .....	83

5.7	Ελαστικές αναλύσεις αναλυτικού μοντέλου με άκαμπτους συνδέσμους σύνδεσης shell και solids στοιχείων .....	87
5.8	Μη γραμμικές αναλύσεις υλικού μεμονωμένου κόμβου.....	88
5.9	Παραμετροποίηση συντελεστή τριβής μεταξύ επιφανειών .....	104
<b>6</b>	<b>ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>107</b>
6.1	Συμπεράσματα .....	107
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>109</b>





# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

## 1.1 Γενικά στοιχεία για γέφυρες

Η προσπάθεια κωλυμάτων αποτέλεσε μείζον ζήτημα από τα πρώιμα ακόμα στάδια της ανθρωπότητας, απόρροια της ποικίλης γεωμορφολογίας καθώς και των ανθρωπίνων αναγκών για μεταφορά των ιδίων αλλά και διαφόρων αγαθών. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό πως η διευθέτηση τέτοιων προβλημάτων συνέβαλε στην δημιουργία ενός επιστημονικού κλάδου, ταχύτατα εξελισσόμενου και με ερευνητικό ενδιαφέρον, τον τομέα της γεφυροποιίας.

Ως γέφυρα ορίζεται μία αρχιτεκτονική ή τεχνική κατασκευή με την οποία επιτυγχάνεται ζεύξη δύο ή περισσότερων σημείων υπεράνω μεσολαβούντος εμποδίου (φυσικού ή τεχνητού). Τα πρώτα γεφύρια αποτελούσαν απλή παράθεση πρώτων υλών που απαιτούσαν την ελάχιστη δυνατή επεξεργασία, όπως οι ξύλινοι κορμοί και ο λίθος και έστω με κάποιες τεχνικές δυσκολίες επιτέλεσαν τον αρχικό τους στόχο που ήταν η διέλευση των ατόμων κυρίως πάνω από υδάτινες ροές. Με την πάροδο του χρόνου, αναπτύχθηκαν οι πρώτοι πολιτισμοί και ο άνθρωπος οργανώθηκε σε κοινωνικές δομές-ομάδες, επιτυγχάνοντας ένα βέλτιστο επίπεδο ζωής. Φυσικό επακόλουθο ήταν η συνεχής αύξηση του πληθυσμού των πόλεων και συνεπακόλουθα της κυκλοφορίας ατόμων και αγαθών, ορίζοντας συνεχώς τις νέες απαιτήσεις των τεχνικών έργων. Η σύζευξη πιο δύσβατων και απομακρυσμένων σημείων, συνετέλεσε στην δημιουργία ολοένα και πιο σύνθετων μορφών γεφυρώσεων καθώς και στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών. Η απλή παράθεση κορμών έδωσε τη θέση της σε λίθινες τοξωτές μορφές, ικανές να μεταφέρουν ανθρώπινο και όχι μόνο δυναμικό σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η άρρηκτη σύνδεση της εξελικτικής πορείας με την άνθηση καινοφανών τεχνολογιών στους επιστημονικούς κλάδους, δεν θα μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστη την επιστήμη της γεφυροποιίας. Ειδικότερα η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος και μετέπειτα του χάλυβα στην κατασκευή γεφυρών αποτέλεσε τη σημαντικότερη τομή του τομέα, καθώς οι βέλτιστες ιδιότητες των υλικών σε συνδυασμό και με την ανάπτυξη καινοτόμων κατασκευαστικών μεθόδων, οδήγησε στην υλοποίηση ασύλληπτων για την εποχή τεχνικών έργων. Με την εκτεταμένη εφαρμογή του χάλυβα στην υλοποίηση γεφυρών, αντικείμενο ενασχόλησης της κείμενης εργασίας, επιτεύχθηκε η σύζευξη πλέον απομακρυσμένων και δύσβατων σημείων, χάρη στο μικρό ίδιο βάρος του υλικού.

## 1.2 Εισαγωγή στις προκατασκευασμένες γέφυρες από χάλυβα

Οι εναλλακτικές λύσεις των συμβατικών κατασκευών γεφυρών από σκυρόδεμα αναζητούνται συνεχώς λόγω του μεγάλου χρόνου κατασκευής τους, την ανάγκη χρήσης βαρέως εξοπλισμού και

περίπλοκων διαδικασιών κατά την κατασκευή, την χρονοβόρα διακοπή κυκλοφορίας σε περίπτωση αλλαγής και συντήρησης, και την χαμηλή αναλογία αντοχής προς βάρος. Λόγω ανησυχιών σχετικά με το υψηλό ίδιο βάρος, ειδικά σε κινητές γέφυρες, τα ανοιχτά χαλύβδινα καταστρώματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε όλο τον κόσμο. Αυτά τα καταστρώματα, κατά μέσο όρο, ζυγίζουν λιγότερο από  $122 \text{ kg/m}^2$ , ενώ μερικά από αυτά ζυγίζουν μόλις  $68,4 \text{ kg/m}^2$ . Ωστόσο, το ανοιχτό χαλύβδινο κατάστρωμα έχει χαμηλή αντίσταση στην ολίσθηση λόγω της μειωμένης επιφάνειας είναι ευαίσθητα σε κραδασμούς. επιρρεπείς σε ζημιές από κόπωση, έχουν υψηλά επίπεδα θορύβου και είναι δαπανηρή η συντήρηση και η επισκευή τους.

Επομένως, τα προκατασκευασμένα συστήματα καταστρώματος που αναπτύσσονται με σύγχρονα υλικά είναι η ανάγκη της εποχής καθώς αυτά τα συστήματα καταστρώματος είναι ελαφριά, εύκολα στην εγκατάσταση, έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγάλη διάρκεια ζωής. Παρόλο όμως που οι τύποι ανοιχτών καταστρωμάτων παρουσιάζουν τα άνωθεν μειονεκτήματα έχουν ευρεία εφαρμογή, ειδικά σε κινητές γέφυρες, η έρευνα και ο σχεδιασμός των οποίων αποτέλεσε ακόμη και ιστορικό σημείο καμπής κατά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο. Ειδικότερα η ανάγκη υλοποίησης μια προσωρινής δομής, κατά την αντικατάσταση καταπονημένων και ευρέως φθαρμένων γεφυρών, όπως επίσης και η χρησιμότητα ενός συστήματος εύκολης και γρήγορης ανέγερσης χωρίς τη χρήση μηχανικού εξοπλισμού, αλλά κυρίως η επαναχρησιμοποίηση της και η προσαρμογή της σε διαφορετικές συνθήκες, έδωσε λύσεις σε στρατιωτικές επιχειρήσεις με θαυμαστή εφαρμογή και εξέχων παράδειγμα την γέφυρα Bailey. Η έρευνα προφανώς δεν περιορίστηκε εκεί καθώς μελετήθηκαν παραλλαγές όσον αφορά τη βελτίωση του στατικού σύστημα ή την εφαρμογή κινητών φορέα στην γεφύρωση μεγαλύτερων ανοιγμάτων με τη χρήση ελάχιστου μηχανικού εξοπλισμού για την υλοποίηση μιας συνθετότερης διαμόρφωσης δικτυωμάτων.

### **1.3 Αντικειμενικός στόχος της εργασίας**

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η προσομοίωση των αρθρωτών συνδέσεων του προκατασκευασμένου φορέα Bailey και ειδικότερα της σύνδεσης των εκατέρωθεν πλαισίων καθώς και η αποτίμηση της συμπεριφοράς τους υπό φόρτιση σύμφωνη με τις κανονιστικές διατάξεις σχεδιασμού που προβλέπει ο Αμερικάνικος. Παράλληλα διενεργείται σύγκριση με τις απαιτήσεις του ισχύοντα κανονισμού, καθώς σε πολλές περιπτώσεις τα συγκεκριμένα τεχνικά έργα βρίσκονται εν λειτουργία ακόμη και σήμερα. Δοκιμάζονται τρόποι περισσότερο ή λιγότερο αδρομερείς μοντελοποίησης κόμβων σύνδεσης και καταγράφονται αποκλίσεις. Γίνεται προσπάθεια ερμηνείας της εκάστοτε διαφοροποίησης, και προτείνονται λύσεις με γνώμονα πάντα και το αντίστοιχο υπολογιστικό κόστος. Διερευνώνται θέματα μη γραμμικής συμπεριφοράς όσον αφορά τη γεωμετρία λόγω κυρίως της επαφής πείρου άντυγας στη σύνδεση πλαισίων. Υλοποιούνται αναλυτικά προσομοιώματα με επιφανειακά και χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, με εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων προσομοίωσης της μονολιθικότητας μεταξύ τους, λόγω της ασυμβατότητας βαθμών ελευθερίας. Συντίθεται ο ολικός φορέας με συμμετρικά σημεία λεπτομερών συνδέσεων και παρατηρείται η συνολική απόκριση της κατασκευής υπό διάφορες καταστάσεις κυκλοφορίας. Γίνονται συγκρίσεις αποτελεσμάτων σε μεμονωμένο αναλυτικό προσομοίωμα κόμβου αλλά και την αναμενόμενη συμπεριφορά μέσω διάφορων τιμών(παραμετροποίηση συντελεστή τριβής).

### **1.4 Δομή διπλωματικής**

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην σημαντικότητα των γεφυρών εν γένει στην ανθρώπινη εξέλιξη.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται ιστορικά στοιχεία προκατασκευασμένων γεφυρών με έμφαση στις προσωρινές δομές.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η δομή τα μέλη και κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τη γέφυρα Bailey, το υλικό κατασκευής των διαφόρων μελών όπως επίσης και τα φορτία σχεδιασμού κατά Αμερικάνικο Κανονισμό και Ευρωκώδικα

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία προσομοίωσης συνολικά του φορέα, υλοποιούνται τα ραβδωτά μοντέλα, με διαφορετικές μη αδρομερείς προσομοιώσεις των συνδέσεων

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία διακριτοποίησης του αναλυτικού κόμβου σύνδεσης πλαισίων, δοκιμάζονται τρόποι μονολιθικής σύνδεσης χωρικών και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, μορφώνεται ο φορέας ως ολότητα, γίνονται συγκρίσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τα στοιχεία δοκού, και εν τέλει μορφώνεται μεμονωμένο προσομοίωμα του κόμβου με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες και εισάγεται μη γραμμικότητα υλικού. Εξετάζεται επίσης και η επιρροή της τριβής στην απόκριση του κόμβου.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναγράφονται τα τελικά συμπεράσματα καθώς και ζητήματα που επιδέχονται περαιτέρω έρευνα



## 2 ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Διαχρονικά πολλοί τύποι συστημάτων γεφυρών από προκατασκευασμένο χάλυβα έχουν χρησιμοποιηθεί σε έργα αποκατάστασης για την αντικατάσταση των φθαρμένων γεφυρών. Παράγοντες που ενδείκνυνται στην χρήση προκατασκευασμένων γεφυρών αποτελούν η ευκολία υλοποίησης τους σε συνδυασμό με τον αμελητέο χρόνο περάτωσης τους σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές γεφύρωσης.

Πιο συγκεκριμένα πληθώρα κατασκευαστικών εταιρειών εφαρμόζουν και υλοποιούν προκατασκευασμένες χαλύβδινες γέφυρες για τις κάτωθι χρήσεις:

- *Προσωρινές γέφυρες:* Ως εναλλακτική λύση στις δαπανηρές παρακάμψεις, τη συντήρηση της κυκλοφορίας και τον αυξημένο όγκο κυκλοφορίας, χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένες χαλύβδινες γέφυρες για την εκτροπή της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια επισκευής, αποκατάστασης, κατασκευής ή ακόμα και αντικατάστασης γέφυρας. Αυτές οι γέφυρες είναι εγκατεστημένες ως μια προσωρινή κατασκευή κατά την κατασκευή και στη συνέχεια αποσυναρμολογούνται και αποθηκεύονται μέχρι να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά με και πάλι ως προσωρινή δομή.
- *Γέφυρες έκτακτης ανάγκης:* Οι σύγχρονοι κανονισμοί κατά το σχεδιασμό λαμβάνουν, ως επί το πλείστον, υπόψη πιθανότητα βλάβης από ανθρώπινο λάθος ή έτερο εξωγενή παράγοντα μέσω κατάλληλων συντελεστών ασφαλείας και διαφόρων συνδυασμών φόρτισης. Παρ' όλα αυτά στα παλαιότερα, και όχι μόνο, τεχνικά έργα εγείρονται ερωτήματα όσον αφορά την στατικότητα και την λειτουργικότητα του δομικού έργου, στα φορτία σχεδιασμού και σε συνδυασμούς αυτών με τυχηματικές δράσεις, όπως είναι η πρόσκρουση πλοίου με κάποιο μεσόβαθρο, η πυρκαγιά, μια ισχυρή και επιβλαβής σεισμική δράση ή ενδεχόμενη τρομοκρατική ενέργεια. Για τους άνωθεν λόγους πιθανότητας εμφάνισης, φυσικής και μη, καταστροφής, αποτελεί μείζον πλεονέκτημα των προκατασκευασμένων γεφυρών η προαναφερθείσα ευκολία και ταχύτητα ανέγερσης σε σχέση με μια σκυροδετούμενη υλοποίηση.
- *Μόνιμες γέφυρες:* Η χρήση προκατασκευασμένων γεφυρών δεν περιορίζεται μόνο σε προσωρινές δομές αλλά η εφαρμογή τους επεκτείνεται και σε μόνιμες υποδομές με διάρκεια ζωής τα 75 έτη σύμφωνα με την τρίτη έκδοση του κανονισμού.

Οι κανονιστικές διατάξεις που ακολουθούνται σήμερα έχουν μεταβληθεί άρδην σε σχέση τις αντίστοιχες αρχικές που επινοήθηκαν περίπου προ εξακονταετίας. Ο σχεδιασμός επιτρέπει την πραγμάτωση μεγαλύτερων πιο στιβαρών και ανθεκτικότερων τεχνικών έργων. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματεύεται το ιστορικό ανάπτυξης και συζητά κοινές πρακτικές που χρησιμοποιούνται σήμερα καθώς

και τις καινοτομίες που υφίστανται στη βιομηχανία προκατασκευασμένων γεφυρών. Αν και κάποιοι τύποι συστημάτων είναι σχετικά δαπανηρά, η δυνατότητα ταχείας αντικατάστασης καταστρωμάτων ή ολόκληρων ανωδομών τα καθιστούν ελκυστική επιλογή. Επιπλέον, καθώς αποκτούν ευρεία διάδοση αποδοχή και χρήση, η μαζική παραγωγή των συστημάτων θα τα κάνει πιο οικονομικά.

Καινοτόμοι σχεδιαστές και κατασκευαστές γεφυρών εφευρίσκουν τρόπους προκατασκευής ολόκληρων τμημάτων της ανωδομής. Οι προκατασκευασμένες σύνθετες μονάδες περιλαμβάνουν προκατασκευασμένα στοιχεία χάλυβα με ένα σύνθετο κατάστρωμα, το οποίο μεταφέρεται στον χώρο του έργου και στη συνέχεια ανεγείρεται στην τελική του θέση. Τα προκατασκευασμένα συστήματα θα μπορούσαν επίσης να κατασκευαστούν στη δεξιά πλευρά κατά μήκος της γέφυρας και στη συνέχεια να ανυψωθούν. Η προκατασκευή σε αυτή την κλίμακα προσφέρει τα πλεονεκτήματα της ευκολότερης κατασκευασιμότητας, του μειωμένου χρόνου κατασκευής στο εργοτάξιο και συνεπώς της μειωμένης συντήρησής του, τον έλεγχο της κυκλοφορίας και τις παρακάμψεις προς το επιβατικό κοινό καθώς και τη μεταφορά εμπορευμάτων.

## 2.2 Είδη προκατασκευασμένων μεταλλικών γεφυρών

Επί της ουσίας τα πρώτα αρθρωτά προκατασκευασμένα συστήματα γεφυρών από χάλυβα αναπτύχθηκαν από την αρχή της δεκαετίας του 1930 με σκοπό να καλύψουν τις ανάγκες του βρετανικού στρατού για ταχεία μεταφορά στρατιωτικών μονάδων. Τα κύρια μέλη αποτελούνταν από δικτυώματα που σχηματίζουν πλαίσια(πάνελ), βιδωτά μεταξύ τους. Το πλάτος της γέφυρας που εκτείνεται μεταξύ των κύριων δικτυωτών δοκών υποστηρίζεται από συνδυασμό εγκάρσιων δοκών (floor beams) και μηκιδών (λειτουργία εσχάρας) ή χαλύβδινου καταστρώματος. Τα συγκεκριμένα συστήματα αναφέρονται ως γέφυρες τύπου «Πλαίσιο/Διαδοκίδα/Κατάστρωμα ή Panel/Floor Beams/Deck type στην διεθνή βιβλιογραφία

Ο δεύτερος κύριος τύπος προκατασκευασμένων συστημάτων γεφυρών από χάλυβα αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 50 ως αντικατάσταση των φθαρμένων ξύλινων γεφυρών. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν προκατασκευασμένες δοκούς από δομική χαλύβδινη πλάκα ή μέλη ζευκτών πλήρους μήκους με χαλύβδινο δάπεδο , το οποίο τοποθετείται πάνω από τα κύρια μέλη. Αυτά τα συστήματα αναφέρονται στο παρόν ως γέφυρες τύπου "Κατάστρωμα/Δοκού"(Deck/Girder type)

### 2.2.1 Προσωρινές Γέφυρες/Γέφυρες εκτάκτου ανάγκης

Η πιο ευρέως αναγνωρισμένη μορφή προκατασκευασμένης χαλύβδινης γέφυρας είναι η τύπου Πλαίσιο/Δοκός δαπέδου. Οι συγκεκριμένες γέφυρες που αποτελούνται από δύο διαμήκεις σειρές, κατακόρυφων δικτυωτών στοιχείων , επιτελώντας τον ρόλο της κύριας δοκού. Εγκαρσίως τοποθετούνται δοκάρια που προσαρτώνται στην κάτω χορδή των δικτυωμάτων και ένα κατάστρωμα που εφαρμόζεται στην κορυφή των δοκών. Η κείμενη μορφολογία έχει ρίζες που χρονολογούνται από τον 1<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.

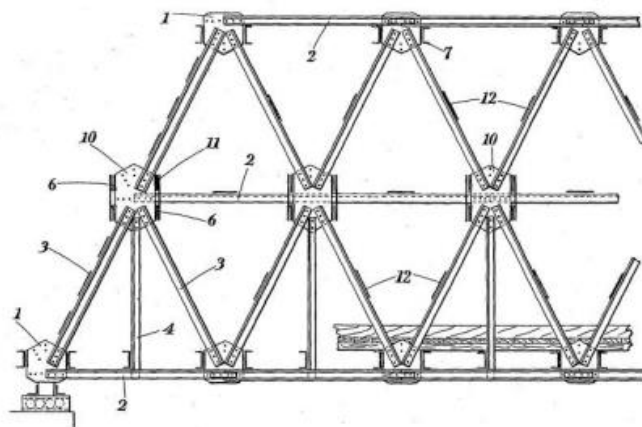
#### *Γέφυρα Callender-Hamilton*

Το σύγχρονο προκατασκευασμένο σύστημα Πλαίσιο/Δοκός δαπέδου/Κατάστρωμα κατοχυρώθηκε για πρώτη φορά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Νεοζηλανδό πολιτικό μηχανικό Archibald Milne Hamilton (1898–1972) το 1935. Η γέφυρα, εφαρμογή της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 2-1 χρησιμοποιήθηκε για γρήγορη μεταφορά αγαθών ανθρώπινου δυναμικού και οχημάτων, επιτρέποντας τη στρατιωτική πρόσβαση σε δύσβατες τοποθεσίες. Χρησιμοποιήθηκε επίσης για την αντικατάσταση κατεστραμμένων γεφυρών σε περιόδους πολεμικών συγκρούσεων.



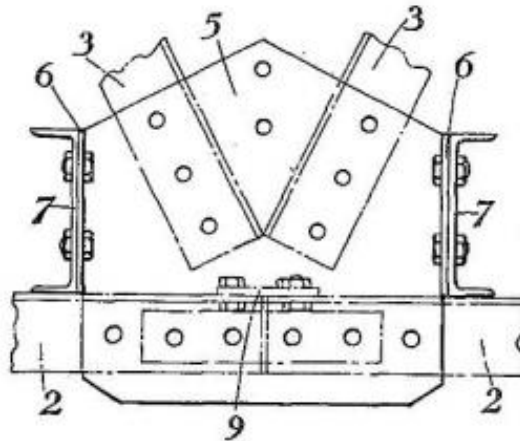
Σχήμα 2-1: Γέφυρα Callender-Hamilton στο χωριό Almen, στην Ολλανδική επαρχία Gelderland,  
(Πηγή: <https://structurae.net/en/structures/ehzerbrug>)

Αποτελούνται από δικτυωτούς φορείς τύπου Warren, κεντροβαρικά συνδεδεμένα σε μια σειρά από μετωπικές πλάκες (Gusset) που επέτρεπαν την άμεση προσάρτηση των διαμήκων, διαγωνίων, κατακόρυφων και εγκάρσιων μελών πλαισίωσης. Η συγκέντρωση των σημείων σύνδεσης αύξησε την ταχύτητα κατασκευής διότι η κατασκευή πλαισίων εκφυλίστηκε σε μια απλή σύνδεση από πανομοιότυπα μέλη ενώ έδωσε τη δυνατότητα στην επί τόπου εγκατάσταση. Το Σχήμα 2-2 καθώς και το Σχήμα 2-3 αποτελούν πρωτότυπα σχέδια όπως καταγράφονται από το Γραφείο Ευρεσιτεχνιών και Εμπορικών Σημάτων των ΗΠΑ. Αυτό το σύστημα είναι επί του παρόντος γνωστό ως σύστημα Callender-Hamilton.



Σχήμα 2-2: A.M.Hamilton πληροφορίες ευρεσιτεχνίας, σχέδιο όψης U.S. Patent #: 2, 024, 001

Πηγή: [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov)



Σχήμα 2-3: A.M.Hamilton πληροφορίες ευρεσιτεχνίας, Λεπτομέρειες σύνδεσης με μετωπική πλάκα (Gusset U.S. Patent #: 2,024, 001)

Πηγή: [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov)

Δεδομένου ότι με την πλάκα Gusset επιτεύχθηκε η άμεση προσάρτηση των κάθετων, των διαγωνίων και των χιαστί μελών, η πλευρική δυσκαμψία που φέρουν οι δοκοί δαπέδου απομονώνεται και επομένως αυξάνεται. Τα μέλη και τα σημεία σύνδεσης είναι αρθρωτά, με αποτέλεσμα την ανέγερση πανομοιότυπων στοιχείων προκειμένου να καλυφθούν διάφορες εφαρμογές. Η σύνδεση καθ' ύψος πλαισίων δοκών που στοιβάζονται σε δύο ή τρία επίπεδα υλοποιούνται με την προσάρτηση δύο προκατασκευασμένων πλακών ενδιάμεσης πλάκας, σχηματίζοντας μια κεντρική τοποθεσία για όλα τα μέλη σύνδεσης.

Ο εν λόγω σχεδιασμός αναπτύχθηκε από τον Sir Donald Bailey τη δεκαετία του 1940 ο οποίος αποτελεί τον προκάτοχο του πιο διαδεδομένου συστήματος ζευκτών που παράγεται, γνωστού ως «Γέφυρα Μπέιλι», οι λεπτομέρειες της οποίας θα αναπτυχθούν σε προσεχές κεφάλαιο.

#### *Γέφυρα Acrow*

Η Acrow Ltd. έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1973, με σχεδιασμό της να βασίζεται στον αντίστοιχο της γέφυρας Bailey. Έκτοτε, έχει ενημερωθεί και επανακατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1990, με το νέο σύστημα να είναι ισχυρότερο, ανθεκτικότερο και ευκολότερα προσαρμόσιμο στην εκάστοτε περίπτωση.



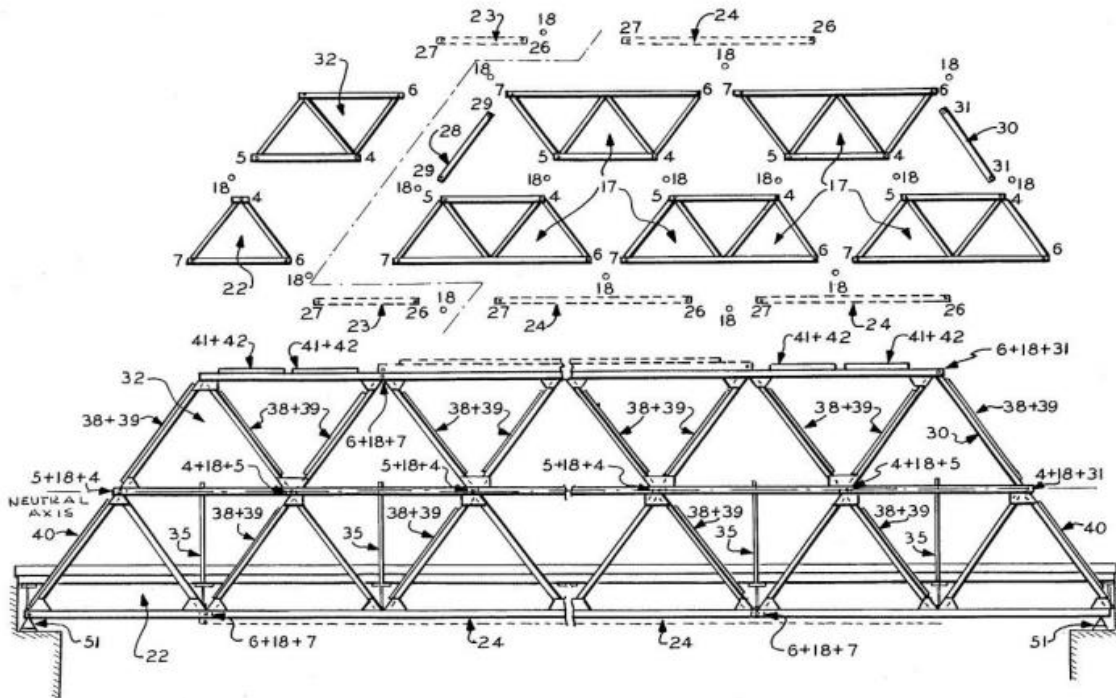


Σχήμα 2-4: Γέφυρα Acrow ανοίγματος 79,3m στην канаδική κοινότητα Kedgwick της κομητείας Restigouche, New Brunswick

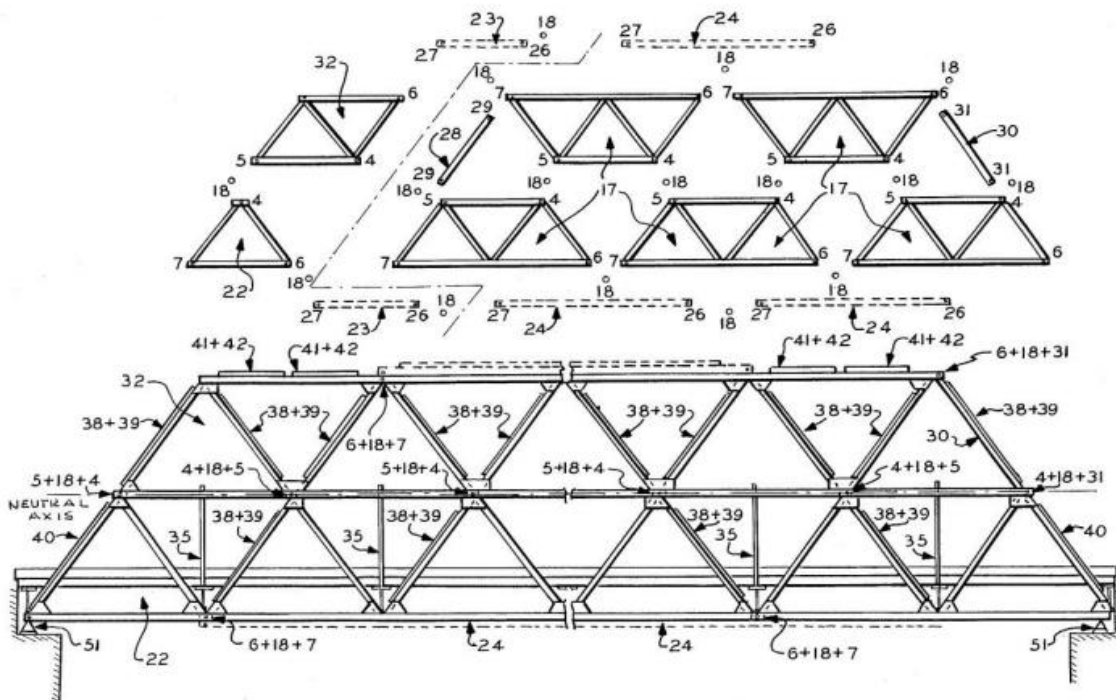
Πηγή: <https://acrow.com/case-studies/kedgwick-case-study/>

Ο τρέχων σχεδιασμός γέφυρας «3ης γενιάς» είναι ελαφρύτερος και πιο στιβαρός από τον πρωτότυπο, με τις δικτυωτές δοκούς να είναι 50% ψηλότερες, 50% ισχυρότερες στην κάμψη και 20% ισχυρότερες σε διάτμηση. Οι συγκεκριμένες βελτιώσεις επιτυγχάνονται μέσω μιας βελτιστοποίησης της πρώιμης διαμόρφωσης των πλαισίων. Τα τριγωνικά πλαίσια αποκλίνουν από το αρχικό πλέγμα σχεδίασης σύμφωνα με το οποίο τα πλαίσια τοποθετούνται και καρφώνονται για να εξαλειφθούν οι τάσεις που σχετίζονται με τις ανοχές των οπών και την ελαστική παραμόρφωση του φορέα. Για μεγαλύτερα ανοίγματα, δίνεται η δυνατότητα τα σύνδεσης των πλαισίων καθ' ύψος δημιουργώντας ένα σύστημα δύο επιπέδων με ενισχυμένη δυσκαμψία.

Σημαντικό ζήτημα, κατά την ανέγερση τέτοιου είδους διεπιπέδων φορέων, αποτελεί το αυξημένο ίδιο βάρος της κατασκευής. Ωστόσο, με την κείμενη διαμόρφωση των πλαισίων, η ποσότητα του χάλυβα ελαχιστοποιείται και ως εκ τούτου η αύξηση των μόνιμων φορτίων είναι σχετικά μικρή συγκριτικά με την προσφερόμενη ακαμψία του συνολικού φορέα. Απόρροια αυτής της βελτιστοποίησης αποτελεί η εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος να ενδείκνυται για τη γεφύρωση μεγαλύτερων αποστάσεων. Το



Σχήμα 2-5 παρουσιάζει λεπτομερώς τα σχέδια όπως απεικονίζεται στα αρχεία του Γραφείου Ευρεσιτεχνιών και Εμπορικών Σημάτων των ΗΠΑ.



Σχήμα 2-5: Πληροφορίες ευρεσιτεχνίας για πλαίσιο γέφυρας Acrow, 1990

Πηγή: [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov)

Τα τρέχοντα συστήματα Acrow και Bailey μπορούν να εκτείνονται έως και 450 πόδια (136,17m) και προσφέρουν πλάτη που φιλοξενούν έως και 3 λωρίδες κυκλοφορίας, ενώ τα πεζοδρόμια προβάλλουν εκατέρωθεν των γεφυρών. Η γέφυρα Acrow έχει χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται είτε προσωρινή είτε μόνιμη κατασκευή.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής ενός τέτοιου συστήματος παισιωτής γέφυρας αποτελεί η κατασκευή προσωρινής γέφυρας στο "Ground Zero" μετά την τρομοκρατική επίθεση της 11<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου στο

Παγκόσμιο Κέντρο Εμπορίου στο πλαίσιο της προσπάθειας ανάκαμψης της πληγείσας περιοχής. Η γέφυρα ήταν μια κατασκευή μήκους 140,2m και πλάτους 27,4m και διατηρήθηκε στη θέση του προκειμένου να απομακρυνθούν 1,8 εκατομμύρια τόνοι από συντρίμμια, ενώ παρέμεινε στη θέση της κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανοικοδόμησης. Το Σχήμα 2-6 δείχνει την κατασκευή της Acrow 700 XS με προκατασκευασμένα βάρθρα πλαισίων τύπου Acrow.



Σχήμα 2-6:Ανέγερση της γέφυρας Acrow 700XS,Νέα Υόρκη,Πηγή: [www.acrowusa.com](http://www.acrowusa.com)

#### *The Mabey Johnson Bridge*

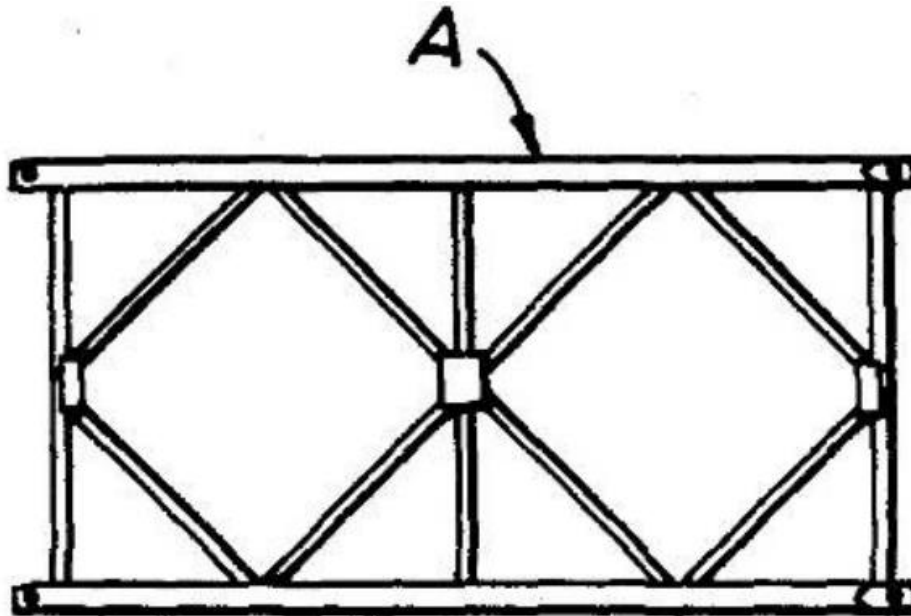
Η Mabey Johnson, Ltd., έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1987 για το σύστημά της, επίσης βασισμένο στη μορφή της Bailey. Ο σχεδιασμός τους είναι πανομοιότυπος όσον αφορά τη μόρφωση του δικτύωματος και τη δομή, ενσωματώνοντας νέα διαμορφωμένα στοιχεία στο σύστημα πάνελ.



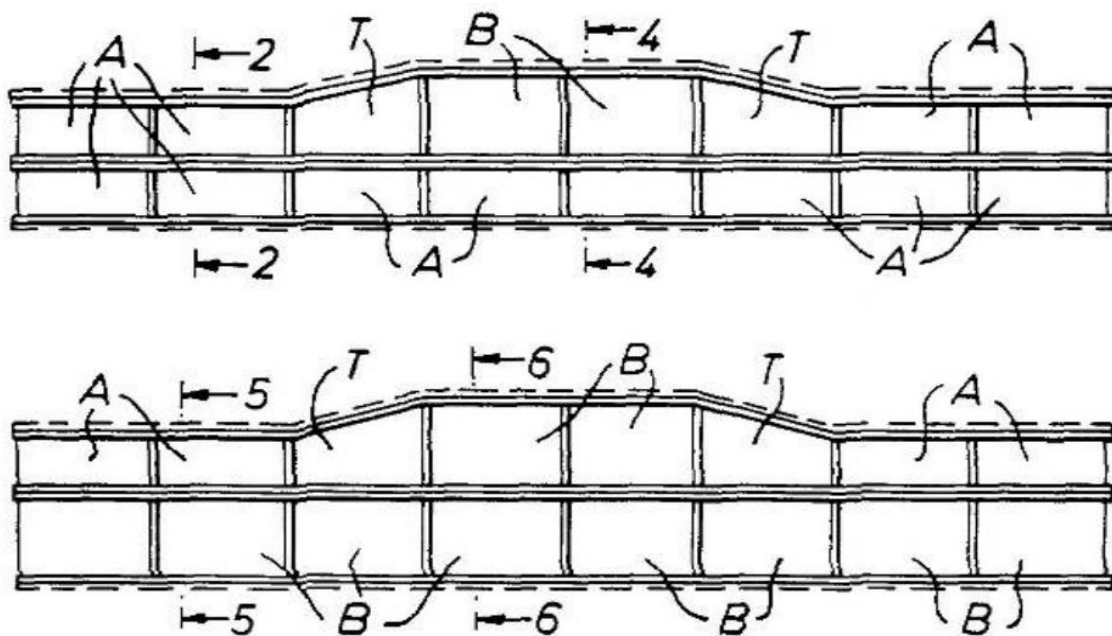
Σχήμα 2-7: Σύστημα Mabey Compact 200,Καναδάς,

Πηγή: [www.mabeybridge.com/products/bridging/mabey-compact-200-bridge](http://www.mabeybridge.com/products/bridging/mabey-compact-200-bridge)

Τα πλαίσια στην ανώτερη βαθμίδα κατασκευάζονται σε μεταβατικό σχήμα για να επιτρέπουν την εισαγωγή ενός τμηματικού δικτυώματος, συστήματος δύο επιπέδων στο κέντρο για την ενίσχυση της γέφυρας σε μεγάλα ανοίγματα. Το Σχήμα 2-9 και περιγράφουν τη καινοτόμα διάταξη των πλαισίων, η οποία επιτρέπει την ενίσχυση του φορέα στα σημεία μέγιστης καταπόνησης χωρίς την καθολική και περιττή αύξηση της ποσότητας των χαλύβδινων μελών, ενώ το Σχήμα 2-8 δείχνει την μόρφωση ενός τυπικού πλαισίου της γέφυρας.



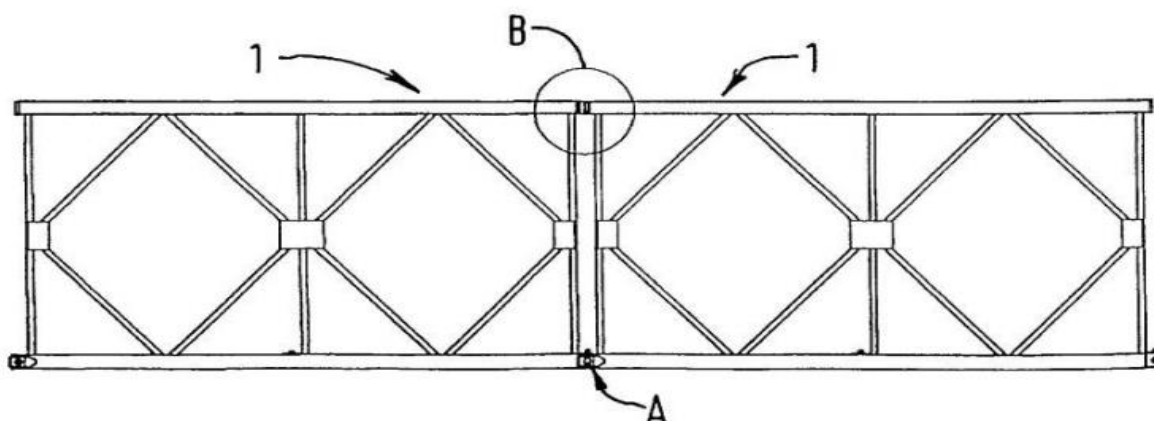
Σχήμα2-8:Μεμονωμένο πλαίσιο ζευκτών γέφυρας Mabe-Johnson,Πηγή: <https://www.uspto.gov/>



Σχήμα 2-9:Υλοποίηση διεπίπεδου συστήματος στο κέντρο με κατάλληλη διαμόρφωση των πλαισίων,  
Πηγή: [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov)

Αυτή η σχεδιαστική ιδέα αποδείχθηκε αποτελεσματική και οδήγησε στην επόμενη πατενταρισμένη Mabe-Johnson καινοτομία. Η βελτίωση του διπλώματος ευρεσιτεχνίας τους το 2003 πρόσθεσε ένα στοιχείο για τη μείωση της βύθισης των ζευκτών σε μεγάλα ανοίγματα. Σύμφωνα με τη νέα πατέντα, η κάτω χορδή είναι βιδωμένη, όπως είχε σχεδιαστεί προηγουμένως, ωστόσο, η άνω χορδή αποτελείται από μια πλάκα με όψη στην οποία μπορούν να προστεθούν αποστάτες αυξάνοντας το κενό. Συνέπεια της άνωθεν καινοτομίας αποτελεί η σταδιακή αύξηση της κυρτότητας, και επομένως μείωση των

αντιαισθητικών επιπτώσεων της βύθισης του δικτυώματος. Το Σχήμα 2-10 παρουσιάζει τη σύνδεση των πλαισίων.



Σχήμα 2-10: Όψη σύνδεσης πλαισίων Mabel Johnson, Πηγή: [www.upsto.gov](http://www.upsto.gov)

Η γέφυρα Mabel Johnson έχει επίσης αυξημένα πλαίσια σε σχέση με το σύστημα γέφυρας Bailey 10' (10 ποδιών).

Τα πλαίσια 15' είναι εξίσου διαχειρίσιμα στην ανέγερση χωρίς τη χρήση μηχανημάτων, καθώς ένα πλήρωμα πέντε ή έξι ατόμων μπορεί γενικά να κατασκευάσει και να εγκαταστήσει μια γέφυρα 100 ποδιών (30,4m) με δύο λωρίδες σε πέντε ημέρες. Επί παραδείγματι, όταν ξαφνικές πλημμύρες παρέσυραν μια γέφυρα αυτοκινητόδρομου στο Νέο Μεξικό, ο Mabel κατόρθωσε να κατασκευάσει μια αντικαταστάτρια εντός 24 ωρών χρησιμοποιώντας εξαρτήματα που είχαν αποθηκευτεί από τη Διεύθυνση Μεταφορών της πολιτείας. Η γέφυρα μήκους 100 ποδιών, δύο λωρίδων κυκλοφορίας, ανεγέρθηκε και λειτουργούσε εντός μιας εβδομάδας. Το Σχήμα 2-11 δείχνει ένα παράδειγμα από το Ηνωμένο Βασίλειο μιας τέτοιας γέφυρας, 3 λωρίδων ανοίγματος άνω των 30 μέτρων



Σχήμα 2-11: Γέφυρα Mabel Johnson στο Ηνωμένο Βασίλειο, Πηγή: [www.mabey.co.uk](http://www.mabey.co.uk)

### *The Janson Bridge*

Παρόλο που ανήκει στην κατηγορία των προσωρινών δομών, ο σχεδιασμός του εν λόγω συστήματος ικανοποιεί περαιτέρω τις απαιτήσεις ασφαλείας που τίθενται κατά την ανέγερση μιας μόνιμης γέφυρας, σε σχέση με τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Ειδικότερα οι φορείς Bailey και Acrow εισήχθησαν ως προσωρινές γέφυρες, επομένως, και κατ' επέκταση η κόπωση δεν ήταν σχεδιαστικό κριτήριο. Ωστόσο,

αξίζει να αναφερθεί πως αυτοί οι τύποι γεφυρών περιέχουν λεπτομέρειες ευαίσθητες στην κόπωση και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περίπτωση χρήσης τους για μεγαλύτερο από το αρχικά προβλεπόμενο διάστημα. Εν αντιθέσει η γέφυρα Janson υλοποιήθηκε μη αμελώντας μελετητικά την επίδραση αυτού του φαινομένου στις καταστάσεις αστοχίας. Ειδικότερα ο φορέας κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής, το σύστημα ανωδομής (Heavy Panel Bridge, HBP) έχει μεγαλύτερη αντοχή στην κόπωση και συνεπώς μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το HBP έχει 3,81m μήκος και ο σχεδιασμός του επιτρέπει την ανάληψη φορτίου από βαριές κατασκευές ή 2 λωρίδων φόρτωσης HS20-44. Με τη χρήση μάλιστα χαλύβδινου καταστρώματος, η δομή είναι συγκρίσιμη με μια παραδοσιακή γέφυρα όσον αφορά τη μονιμότητα.

Το Σχήμα 2-12 δείχνει ένα Janson HBP κατά τη διάρκεια της ανέγερσης.

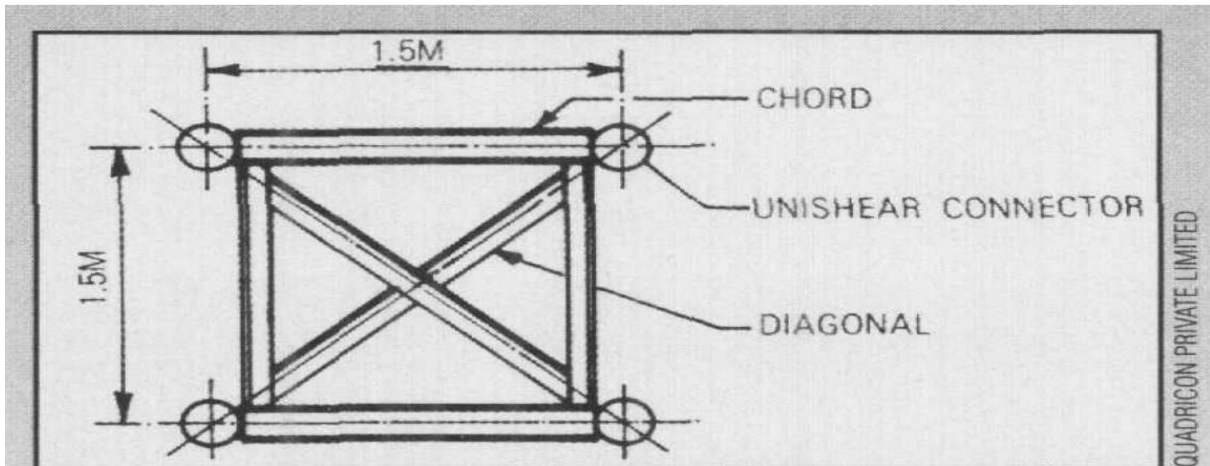


Σχήμα 2-12: HBP κατά τη διάρκεια της ανέγερσης, Πηγή: [www.jansonbridging.com](http://www.jansonbridging.com)

### *The Quadricon Bridge*

Το σύστημα Quadricon Modular Bridge (QMBS) είναι παρόμοιο με της γέφυρας Bailey αλλά με κάποιες νέες σχεδιαστικές καινοτομίες. Το QMBS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα για κατασκευή προκατασκευασμένων μεταλλικών ανωδομών από τυποποιημένα, αρθρωτά, μαζικής παραγωγής χαλύβδινα εξαρτήματα. Το σύστημα είναι μια προσπάθεια υλοποίησης μιας πιο μόνιμης προσέγγισης στο σχεδιασμό προκατασκευασμένου χάλυβα. Ο αναμενόμενος κύκλος ζωής για το QMBS είναι 75 χρόνια. Επί του παρόντος, γέφυρες Quadricon έχουν κατασκευαστεί στην Ασία τα τελευταία 30 χρόνια και καμία εξ αυτών δεν χρήζουν ουσιαστικής αποκατάστασης.

Το σύστημα αποτελείται από προκατασκευασμένα, αρθρωτά, τριγωνικά χαλύβδινα μέλη που ενώνονται με ένα αναφερόμενο στοιχείο ως "Unishear Connector" σε κάθε γωνία για να σχηματίσουν το δικτύωμα. Το τελικό ζευκτό επιδέχεται διαφόρων σχημάτων και διαμορφώσεων με διαφορετικές απαιτήσεις φορτίου που εκχωρούνται ανά εφαρμογή. Τα ανοίγματα μπορεί να κυμαίνονται από λιγότερο από 100 πόδια(30,48m) έως και περισσότερα από 500 πόδια(152,4m). Το Σχήμα 2-13 δείχνει γενικές λεπτομέρειες του συστήματος Quadricon.



Σχήμα 2-13: Γεωμετρία αρθρωτού συστήματος Quadricon, Πηγή: Civil Engineering, April 1999

Σημαντικά ζητήματα όπως η ανθεκτικότητα των συνδετήρων Unishear, η επίδραση της κόπωσης στην αστοχία, η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις που ορίζει η Αμερικανική Ένωση Εθνικών Οδών και Μεταφορών, καθώς και η ύπαρξη ρηγματώσεων σε μέλη κρίσιμα για την στατικότητα του φορέα, θα πρέπει να διερευνηθούν προτού ο φορέας καθοριστεί για μόνιμη χρήση στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Το Σχήμα 2-14 είναι ενδεικτικό της σύνδεσης των μελών και της μορφοποίησης του χαλύβδινου σκελετού της κατασκευής, ενώ το Σχήμα 2-15 δείχνει ένα αξιοθαύμαστο παράδειγμα εφαρμογής του συγκεκριμένου τύπου γέφυρας.



Σχήμα 2-14: Σχήμα 2 14: Διαμόρφωση δικτυώματος γέφυρας Quadricon ,Πηγή:[17]





Σχήμα 2-15: Γέφυρα Quadricion στην Ασία, Πηγή[17]

Αν και τα προαναφερθέντα συστήματα προσωρινής γέφυρας χρησιμοποιούνται ευρέως παντού σε Ευρώπη και Ασία ως αποδεκτή λύση για μόνιμη αντικατάσταση γεφυρών, τα ευρήματα από αυτό το έργο δείχνουν ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες άργησαν να υιοθετήσουν αυτά τα σχέδια για μόνιμες γέφυρες δεδομένου που μπορεί να αποδοθεί στην έλλειψη καθιερωμένων κριτηρίων κόπωσης και την εκτεταμένη προσπάθεια που απαιτείται για τη συντήρηση αυτών των γεφυρών.

### 2.2.2 Μόνιμες Γέφυρες

Για ιστορικούς κυρίως λόγους θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε δύο παραδείγματα μόνιμων προκατασκευασμένων γεφυρών οι οποίες αποτελούσαν κατά κόρον σύμμεικτους φορείς. Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στην αντίστοιχη βιβλιογραφία [17]

#### *Συμβατικά συστήματα χαλύβδινων ολόσωμων δοκών και καταστρωμάτων από σκυρόδεμα*

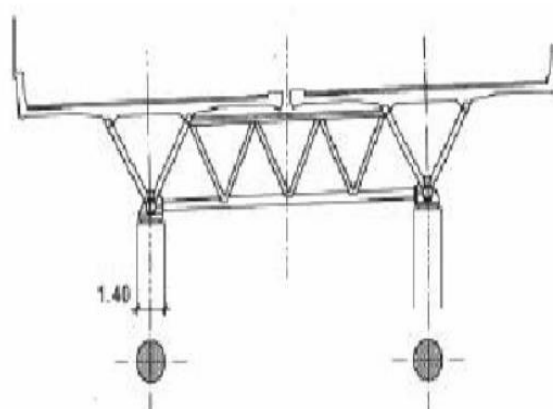
Κατά τη δεκαετία του 1950, διαμορφώθηκε η βιομηχανία προκατασκευασμένου σκυροδέματος και έβαλε στόχο να εισέλθει στην αγορά της γέφυρας με γρήγορους ρυθμούς. Γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι ένα προκατασκευασμένο κατάστρωμα από σκυρόδεμα θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε χαλύβδινες διαμήκεις δοκούς για να αντικαταστήσει τις παλιές ξύλινες γέφυρες σε όλη τη χώρα. Τα προκατασκευασμένα συστήματα με κύριες δοκούς και πλάκα καταστρώματος από σκυρόδεμα μπορούν να παρέχουν ένα γρήγορο μέσο αντικατάστασης σε κατεστραμμένες ή φθαρμένες γέφυρες. Αυτές οι μονάδες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση μεμονωμένων ανοιγμάτων σε μεγαλύτερες κατασκευές. Ένα καλό παράδειγμα αυτού του τύπου εφαρμογής είναι η αποκατάσταση της γέφυρας I-95 πάνω από τον ποταμό Τζέιμς στο Ρίτσμοντ της Βιρτζίνια. Σε αυτό το έργο 45 από τα 50 υπάρχοντα ανοίγματα γεφυρών αντικαταστάθηκαν με εντελώς νέα ανοίγματα, καθώς σε αυτά παρατηρήθηκε εκτεταμένη φθορά που απαιτούσε άμεση αντικατάσταση.

### Σύνθετα χωρικά δικτυώματα

Τα χωρικά δικτυώματα χρησιμοποιούνται συνήθως για την υποστήριξη της οροφής σε μεγάλα ανοίγματα όπως είναι τα αθλητικά κέντρα, όμως έχουν βρεθεί μελέτες και εφαρμογές στην κατασκευή της ανωδομής γεφυρών. Η δομική αξιοπιστία όσον αφορά τις υψηλές αναλογίες ακαμψίας/βάρους, υψηλές αναλογίες αντοχής/βάρους και η διαθεσιμότητα πολλών εναλλακτικών διαδρομών φορτίου αποδεικνύεται εξίσου αποτελεσματική στο σχεδιασμό γεφυρών. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα σύνθετου χωρικού δικτυώματος αποτελείται από μέλη κυλινδρικού χαλύβδινου σωλήνα, κατασκευασμένο σε ισόπλευρα τρίγωνα (Σχήμα 2-16) που σχηματίζουν ένα τριγωνικό ζευκτό με προκατασκευασμένο κατάστρωμα. Αν και ο κείμενος σχεδιασμός έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως στην Ευρώπη ως προσωρινή γέφυρα, εκτεταμένες έρευνες έχουν δημιουργήσει μορφοποιήσεις του στατικού συστήματος έτσι ώστε να δύναται να εφαρμοστούν και ως μόνιμες δομές(). Το αρχικό κόστος είναι ένα μειονέκτημα σε αυτόν τον τύπο δομής, ωστόσο, η τυποποίηση των στοιχείων και των μεθόδων δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί- ερευνηθεί. Ως εκ τούτου, η γέφυρα χωρικών ζευκτών, αν και εφικτή σε προκατασκευή, δεν έχει ακόμη πλήρως διαμορφωθεί για να επιταχύνει την κατασκευή.



α)



β)

Σχήμα 2-16: α) Συνδέσεις κοίλων κυκλικής διατομής δικτυωμάτων β) διαμόρφωση δικτυωμάτων, στηριζόμενα σε βάθρα, Πηγή[17]



Σχήμα 2-17: The Lully Viaduct bridge, παράδειγμα εφαρμογής χωρικού δικτυώματος σε ανωδομή γέφυρας μόνιμης δομής,

Πηγή: <http://www.dic-ing.ch/php/pdf/publ1998.2.pdf>



## 3 ΓΕΦΥΡΑ BAILEY

### 3.1 Εισαγωγή

Για τη γεφυροποιία ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος αποτέλεσε το εφαλτήριο της εξέλιξης των προκατασκευασμένων μεταλλικών γεφυρών. Οι συνεχείς επιθέσεις σε συνδυασμό με την άμεση ανάγκη για γρήγορη μεταφορά στρατιωτών και οχημάτων σε δύσβατα και απομακρυσμένα σημεία κατά κάποιο τρόπο επέβαλαν στις Συμμαχικές δυνάμεις και στις Δυνάμεις του Άξονα να αναζητήσουν καινοτόμα συστήματα γεφύρωσης, εύκολα υλοποιήσιμων, γρήγορων στην ανέγερση, άμεσα διαθέσιμων για κυκλοφορία πεζών και οχημάτων και χωρίς την ανάγκη πρόσθετου κατασκευαστικού εξοπλισμού. Οι απόπειρες ήταν αρκετές και από τις δύο πλευρές και αρκετές από αυτές στέφθηκαν με επιτυχία, όμως από όλους τους τύπους προκατασκευασμένων γεφυρών το πιο λειτουργικό και ευρέως γνωστό είναι το σύστημα Bailey.



Σχήμα 3-1:Γέφυρα Bailey στον ποταμό Μέρτ στη Γαλλία, Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bailey\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Bailey_bridge)

Η γέφυρα Bailey εφευρέθηκε από τον Donald Coleman Bailey(1901-1985), Άγγλο πολιτικό μηχανικό. Το 1941, ο Bailey έδωσε το πρώτο του σκίτσο του φορέα στο Βρετανικό Πολεμικό Γραφείο το οποίο του απέδωσε ένα χρηματικό ποσό που ισοδυναμούσε με 48000 \$ σε αμερικανικό νόμισμα του 1985. Η γέφυρα Bailey που χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ήταν σχεδιασμένη για

μετακίνηση, ανακατασκευή ή αντικατάσταση, ακόμη και κάτω από εχθρικά πυρά. Εφαρμόστηκε ευρέως από τους συμμαχικούς στρατούς στην Ιταλία και βορειοδυτική Ευρώπη, την περίοδο 1943-45. Χαρακτηριστική για την επίδραση του καινοφανούς αυτού σχεδιασμού αποτελεί η δήλωση του Βρετανού Στρατάρχη Λόρδου Μπέρναρντ Λο Μοντγκόμερυ, ο οποίος ανέφερε μεταξύ άλλων πως χωρίς τη γέφυρα Bailey, δεν θα είχαμε κερδίσει τον πόλεμο. Ο Ντόναλντ Μπέιλι χρίστηκε ιππότης το 1946 για τη συνεισφορά του στη Συμμαχική νίκη στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

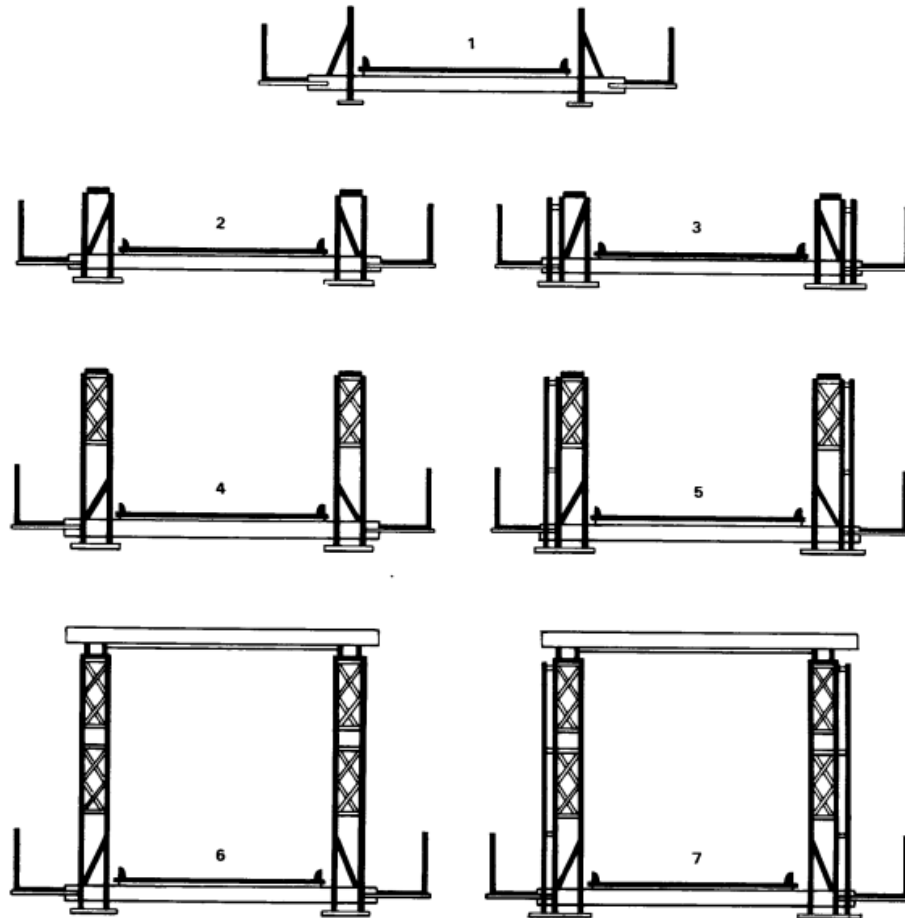
Αρχικά, υιοθετήθηκε το σχέδιο για την Βρετανική προκατασκευασμένη γέφυρα Bailey, με την αμερικάνικη ονοματολογία M1. Η μετέπειτα τροποποίηση του σχεδίου, με τη διεύρυνση του πλάτους οδοστρώματος (μετρημένο σε πόδια) κατά 12% ονομάστηκε πλαισιωτή γέφυρα, Bailey M2, και τύπος αυτής αποτελεί το αντικείμενο της εργασίας. Οι Βρετανοί στη συνέχεια τροποποίησαν την αμερικανική έκδοση με τη διεύρυνση της γέφυρας ξανά, παράγοντας έτσι την εξαιρετικά φαρδιά Bailey M3. Η γέφυρα Bailey όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια αποτελεί μια διαμπερή γέφυρα δικτυωμάτων, με ξύλινο κατάστρωμα το οποίο υποστηρίζεται μέσω μηκίδων και διαδοκίδων κατά σειρά στήριξης, τα οποία με τη σειρά τους μεταφέρουν τις συγκεντρωμένες δυνάμεις στα δικτυωτά πλαίσια.

Ορισμένες γέφυρες τέτοιου τύπου σώζονται και σήμερα σε πολλές χώρες. Υπολογίζεται πως στον ελλαδικό χώρο ο αριθμός των φορέων Bailey είναι 96, με αρκετές από αυτές να βρίσκονται σε λειτουργία, πάρα τον αρχικό σχεδιασμό της προσωρινής χρήσης τους.

## **3.2 Στοιχεία γέφυρας Bailey**

### **3.2.1 Τύποι γεφυρών**

Παρόμοια με το σύστημα Callender-Hamilton, τα πλαίσια δικτυωμάτων δύναται να τοποθετηθούν δίπλα-δίπλα σχηματίζοντας επιμήκη δικτυώματα ικανά να καλύψουν μεγαλύτερα ανοίγματα ενώ μπορούν να βιδωθούν κάθετα όταν αυξημένα φορτία απαιτούν κατασκευή διεπίπεδων πολλαπλών δικτυωτών δοκών για τη δημιουργία μεγαλύτερου στατικού ύψους. Τα παραπάνω στοιχεία κάνουν το σύστημα προσαρμόσιμο στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Επιπλέον πέρα από την καθ' ύψος προσαρμογή, υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης και σύνδεσης πλαισίων κατά πλάτος. Το Σχήμα 3-2 παρουσιάζει λεπτομερώς τις επτά διαμορφώσεις που μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση των τυπικών στοιχείων του περί ου ο λόγος συστήματος ενώ παρουσιάζει την αντίστοιχη ονοματολογία της κάθε διαμόρφωσης. Επεξηγηματικά αναφέρεται πως το πρώτο γράμμα συμβολίζει τον τύπο του δικτυώματος ως απλό, διπλό, τριπλό κατά πλάτος (Simple, Double, Triple κατά αντιστοιχία), ενώ το δεύτερο αναφέρεται στα επίπεδα του πλαισίου, δηλαδή στην πιθανή καθ' ύψος συναρμογή.



Σχήμα 3-2: Τύποι συστήματος Bailey, Πηγή [11]

TYPE		USUAL	
TRUSS	STORY	NOMENCLATURE	ABBREVIATION
Single	Single	Single-single	SS
Double	Single	Double-single	DS
Triple	Single	Triple-single	TS
Double	Double	Double-double	DD
Triple	Double	Triple-double	TD
Double	Triple	Double-triple	DT
Triple	Triple	Triple-triple	TT

Σχήμα 3-3: Ονοματολογία διαμόρφωσης συστήματος Bailey, Πηγή: Field Manual: Bailey Bridge; FM 5-277; Headquarters Department of the Army: Washington, DC, USA, 1986. Available online: <http://www.bits.de/NRANEU/others/amd-us-archive/fm5-277%2886%29.pdf>

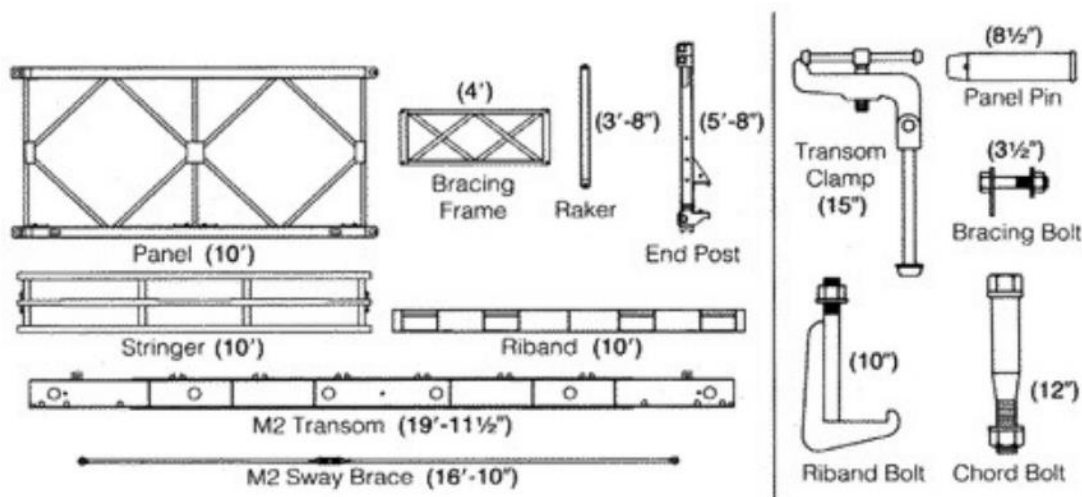
### 3.2.2 Γεωμετρικά στοιχεία μελών γέφυρας

Οι εγκάρσιες δοκοί δαπέδου (διαδοκίδες), δεσμεύονται με σφικτήρες στις κάτω χορδές των ζευκτών στηρίζοντας συστήματα εσχάρας δοκών(μηκίδες), οι οποίες με τη σειρά τους υποστηρίζουν το ξύλινο κατάστρωμα. Στα δικτυώματα παρέχεται πλευρική εξασφάλιση έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μέσω αντηρίδων. Ειδικότερα η αντηρίδα συνδέει την άνω χορδή του πλαισίου με την διαδοκίδα αρθρωτά

Το σύστημα της Bailey διατήρησε τον ίδιο βασικό σχεδιασμό, υιοθετώντας παράλληλα κάποιες καινοτομίες τόσο στη μέθοδο κατασκευής όσο και στο σύστημα σύνδεσης πλαισίων. Πιο συγκεκριμένα ο αρχικός σχεδιασμός απαιτούσε τα εξής ακόλουθα:

- Τα βασικά εξαρτήματα έπρεπε να είναι τυποποιημένα και πλήρως εναλλάξιμα.
- Τα επιμέρους εξαρτήματα έπρεπε να μπορούν να μεταφερθούν από μια ομάδα το πολύ έξι ανδρών.
- Τα εξαρτήματα έπρεπε να μπορούν να μεταφερθούν σε στρατιωτικό φορτηγό τριών τόνων.
- Μια γέφυρα έπρεπε να είναι ικανή για γρήγορη ανέγερση και άμεση κυκλοφορία
- Τα εξαρτήματα έπρεπε να εξασφαλίζουν την πραγμάτωση πολλαπλών διαμορφώσεων, έτσι ώστε το σύστημα γεφύρωσης να είναι ικανό να επιτύχει σύζευξη κοντινότερων ή πιο απομακρυσμένων σημείων, καθώς και στην ανάληψη ενός σημαντικού εύρους και φορτίων

Ο συγκεκριμένος τύπος γέφυρας αποτελείται από κύριες φέρουσες πλευρικές δοκούς δικτυωμάτων κατασκευασμένες από προκατασκευασμένα, αρθρωτά, ορθογώνια πλαίσια (3,048m μήκος και ύψος 1,448m κεντροβαρικά μετρημένο από τις οπές των συνδέσεων). Τα πλαίσια συνδέονται με πείρους από άκρο σε άκρο στην άνω και κάτω χορδή σχηματίζοντας ένα ζευκτό του απαιτούμενου μήκους για τη γεφύρωση κωλύματος. Στο Σχήμα 3-4 φαίνονται αδρομερώς όλα τα εξαρτήματα που περιλάμβανε το σύστημα γέφυρας Bailey, καθώς και οι διαστάσεις τους πόδια και ίντσες



Σχήμα 3-4: Μέλη γέφυρας Bailey, Πηγή [11]

Η μέθοδος κατασκευής της γέφυρας Bailey είναι επιτακτική για την πρακτικότητά της. Η γέφυρα μπορεί να ανεγερθεί με δύο τρόπους:

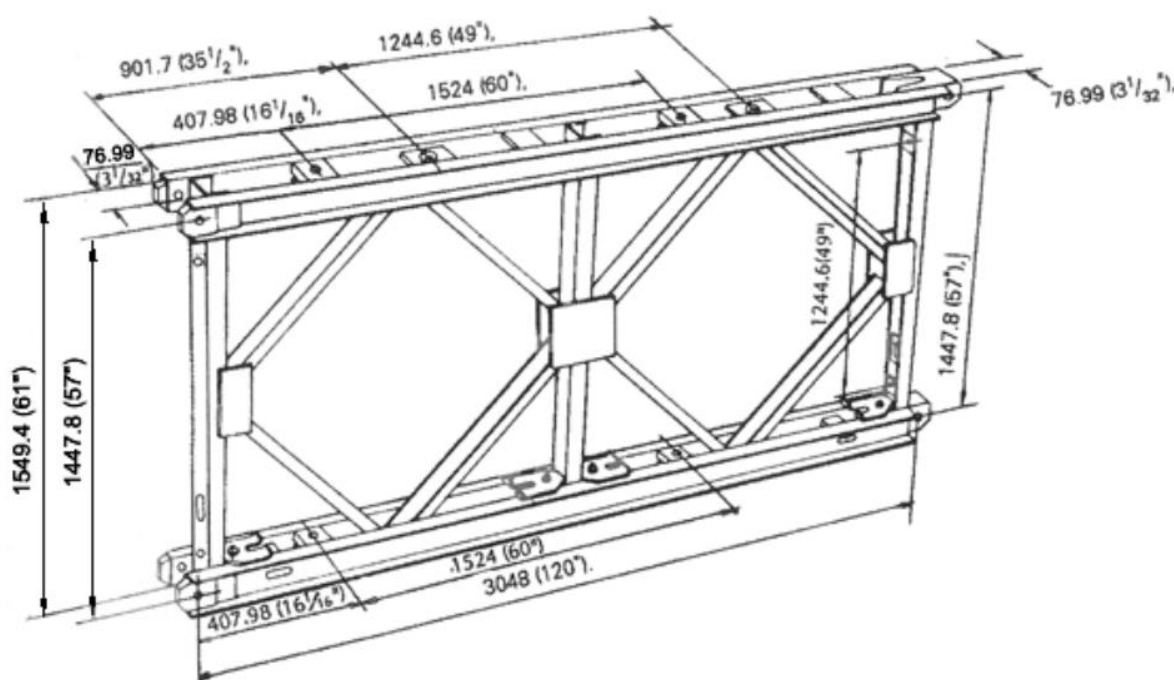
1. Προώθηση της γέφυρας (προοδευτικός πρόβολος) από το ένα άκρο στο άλλο (Εικόνα 2.5).
2. Ανύψωση στη θέση του με γερανό.

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα τα σημαντικότερα μέλη της γέφυρας



### Πλαίσια

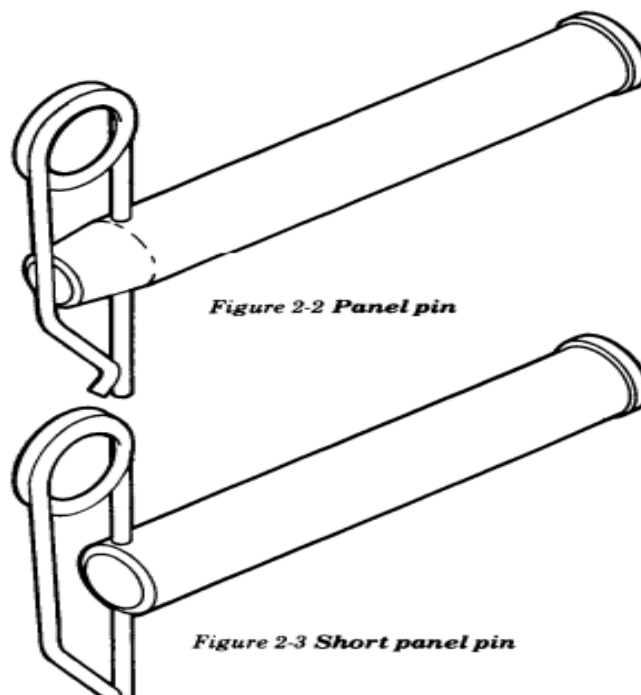
Το πλαίσιο (πάνελ) είναι το βασικό μέλος της γέφυρα. Αποτελείται από συγκολλητά μέλη χάλυβα υψηλής αντοχής, με το κάθε τμήμα ζευκτού να εκτείνεται σε μήκος 10 πόδια (3,05 m), με ύψος 1,45 m και 16,5 εκατοστά πλάτος. Ζυγίζει 577 λίβρες (262 κιλά) και δύναται να μεταφερθεί από έξι στρατιώτες χρησιμοποιώντας ράβδους μεταφοράς. Τα οριζόντια μέλη του πλαισίου λέγονται χορδές. Και οι δύο έχουν στις απολήξεις τους, αρσενικές και θηλυκές προεξοχές. Τα πλαίσια ενώνονται από άκρη σε άκρη δεσμεύοντας οπές των άκρων, τοποθετώντας πείρους υψηλής αντοχής. Στην άνω παρειά του κάτω μέλους του πλαισίου υπάρχουν 4 καβίλιες-υποδοχείς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5, στις οποίες θα στερεωθούν τα εγκάρσια δοκάρια (transoms) που υποστηρίζουν το κατάστρωμα της γέφυρας. Η δέσμευση των διαδοκίδων μεταφορικός υλοποιείται με τη χρήση σφικτήρα(σφικτήρας διαδοκίδας ή transom clamp), και συντελείται στα άκρα του κάθε πλαισίου εσωτερικά του τελευταίου ορθοστάτη, όπως επίσης και εκατέρωθεν ή μονόπλευρα (αναλόγως το άνοιγμα και την απαιτούμενη κατηγοριοποίηση) στο μεσαίο κατακόρυφο μέλος



Σχήμα 3-5: Τυπική μορφή πλαισίου Bailey, Πηγή:[11]

### Πείρος πλαισίου

Ο πείρος σύνδεσης των πλαισίων(Σχήμα 3-6) είναι μήκους 8 και 5/16 ίντσες (21.1 cm), διαμέτρου 1 και 7/8 ίντσες (4,8 εκατοστά) σε διάμετρο και ζυγίζει 6 λίβρες (2,7 κιλά). Έχει μια κωνική άκρη με μια μικρή τρύπα για την τοποθέτηση ενός μεταλλικού πείρου ασφαλείας. Ένα διαμετρικό αυλάκι χαράσσεται στην κεφαλή του πείρου των πλαισίων παράλληλα με την οπή σύνδεσης. Οι πείροι πρέπει να εισάγονται με τέτοιο τρόπο ώστε το εν λόγω αυλάκι να είναι σε οριζόντια θέση, προκειμένου να διευκολύνεται η τοποθέτηση του μεταλλικού πείρου ασφαλείας, καθώς σε αντίθετη περίπτωση τα πέλματα των πλαισίων δυσχεραίνουν την τοποθέτηση. Με πανομοιότυπο τρόπο συνδέονται τα μεσαία και ακριανά δικτυώματα σε μια τριπλή γέφυρα με τον αντίστοιχο πείρο (short panel pin) να είναι κατά τι μικρότερος σε μήκος(19,2cm).



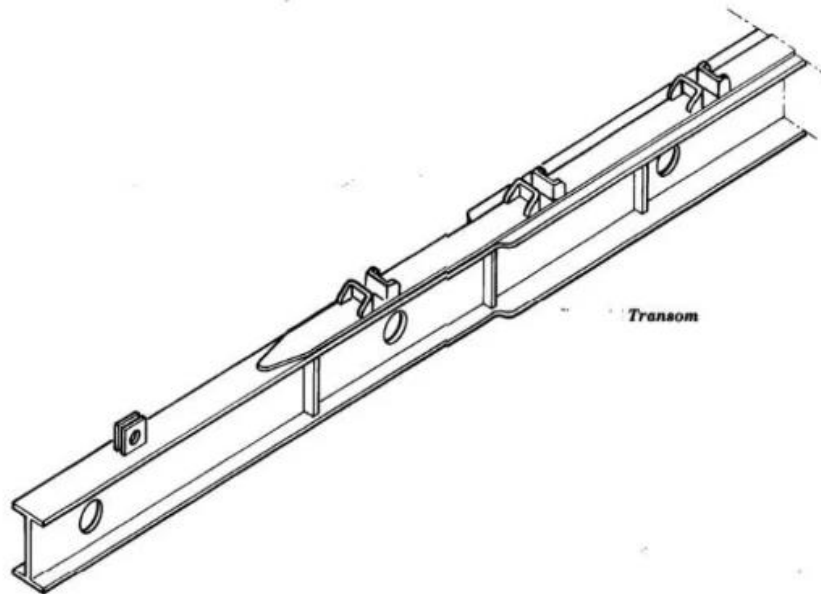
Σχήμα 3-6: Πείρος σύνδεσης πλαισίων

#### *Διαδοκίδα(transom)*

Η διαδοκίδα(Σχήμα 3-7) είναι μια χαλύβδινη δοκός η οποία υποστηρίζει το ξύλινο κατάστρωμα. Έχει ύψος 25,4cm και εκτείνεται σε μήκος 6,1 m. Τα πέλματα της έχουν πλάτος 11,4cm, ενώ φέρουν πλάκα ενίσχυσης σε κάθε πέλμα των 0,8 εκατοστών. Η διαδοκίδα ζυγίζει 618 λίβρες (280 κιλά), ενώ μπορεί να μεταφερθεί από οκτώ άτομα, χρησιμοποιώντας λαβίδες μεταφοράς σφιγμένες στο επάνω μέρος του πέλματος ή με ράβδους μεταφοράς οι οποίες τοποθετούνται στις οπές του κορμού. Η κάτω πλευρά της δοκού έχει έξι τρύπες στις οποίες ταιριάζουν οι πείροι του πλαισίου. Η διαδοκίδα στηρίζεται στην κάτω χορδή του πλαισίου και συγκρατείται στη θέση του με σφιγκτήρα. Η επάνω πλευρά της διαδοκίδας έχει έξι οπές με μία επιπλέον οπή κοντά σε κάθε άκρο, για τη σύνδεση των μηκίδων και των αντηρίδων σε αυτή

Οι διαδοκίδες έχουν συνήθως απόσταση 5 πόδια (1,5μέτρα) μεταξύ τους. Για την υποστήριξη οχημάτων κλάσεως 70 και πάνω(εξηγείται παρακάτω), απαιτούνται τέσσερις διαδοκίδες ανά τμήμα ,μία στη μέση

και μία σε κάθε άκρο του πλαισίου, ενώ σε αντίθετη περίπτωση επαρκούν δύο με τη μία να τοποθετείται στο τέλος του πλαισίου και την άλλη προφανώς στο μέσον.



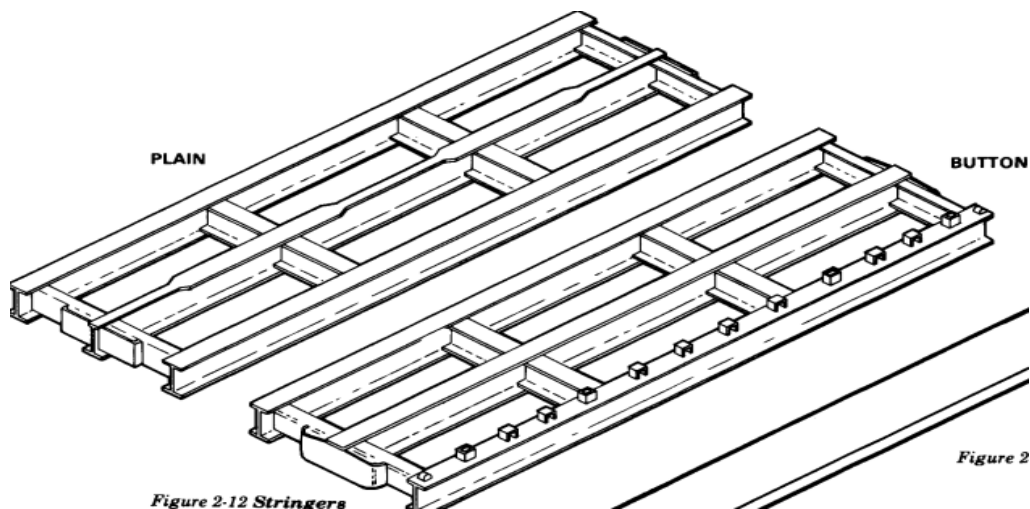
Σχήμα 3-7: Διαδοκίδα κατά μήκος

#### Μηκίδες(stringers)

Οι μηκίδες(Σχήμα 3-8) υποστηρίζουν άμεσα το κατάστρωμα. Κάθε μηκίδα αποτελεί επί της ουσίας μια εσχάρα τριών χαλύβδινων δοκών ύψους 4 ιντσών(10,2cm), μήκους 3 μέτρων, οι οποίες ενώνονται με συγκολλητά ελάσματα. Υπάρχουν δύο τύποι:

- Οι μεσαιές (plain) μηκίδες βάρους 260 λιβρών (118 κιλά)
- Οι ακριανές (button) μηκίδες βάρους λίβρες (122 κιλά).

Είναι πανομοιότυπες με τη μόνη διαφορά να έγκειται στο ότι οι τελευταίες έχουν δώδεκα υποδοχείς για να συγκρατούν το ξύλινο κατάστρωμα στην άκρη. Κάθε τμήμα της γέφυρας έχει έξι μηκίδες, δύο ακριανές και τέσσερις μεσαιές. Στερεώνονται στις υποδοχές του άνω πέλματος της διαδοκίδας.



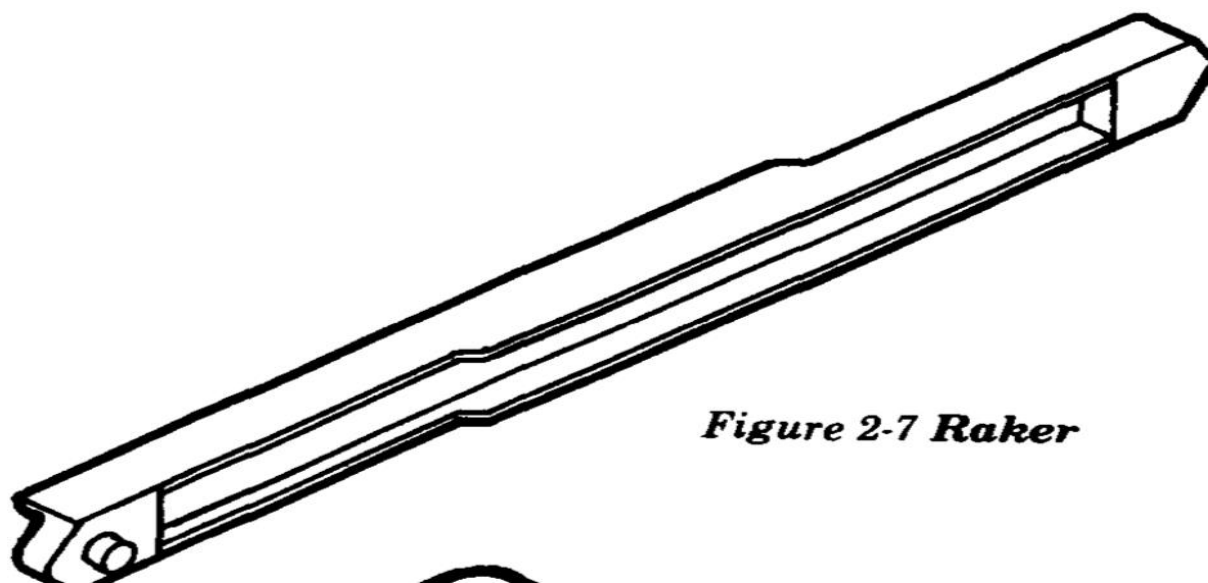
Σχήμα 3-8: Ακριανές(button) και μεσαιές(plain) μηκίδες

*Δίπλακες(chess)*

Οι δίπλακες αποτελούν ξύλινες πλάκες-δοκούς, οι οποίοι σχηματίζουν το οδόστρωμα της γέφυρας. Ένα κομμάτι έχει διαστάσεις 2 ιντσών (5,1 εκατοστά) σε πάχος, 8 3/4 ίντσες (22,2 εκατοστά) σε πλάτος και 13 πόδια και 10 ίντσες (4,2 μέτρα) σε μήκος. Ζυγίζει 65 λίβρες (29,5 κιλά) και έχει εγκοπή στα άκρα για να θηλυκώνει στις υποδοχές της μηκίδας. Στις πλάγιες παρειές συγκρατείται από την επιζυγίδα

*Αντηρίδες(raker)*

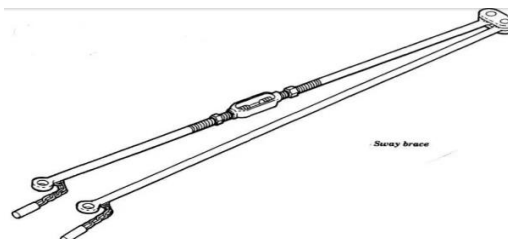
Οι αντηρίδες(Σχήμα 3-9) είναι χαλύβδινες δοκοί 3 ιντσών (7,6 εκατοστών ) με πέλματα πλάτους 2 3/8 ιντσών (6,0 εκατοστών). Έχουν 1.11 μέτρα μήκος και βάρος 22 λίβρες (10,0κιλά). Συνδέουν τα άκρα της διαδοκίδας στην κορυφή του ενός άκρου κάθε πλαισίου στο εσωτερικό ζευκτό(ο όρος εσωτερικό αναφέρεται σε γέφυρες διπλού ή τριπλού δικτυώματος κατά την έννοια του πλάτους), εξασφαλίζοντας πλευρικά τα πλαίσια έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, ενώ ένα πρόσθετο μέλος χρησιμοποιείται στο κάθε άκρο της γέφυρας. Και τα δύο άκρα της αντηρίδας έχουν κοίλες καβίλιες για τα μπουλόνια στήριξης(bracing bolt). Οι καβίλιες εφαρμόζουν μέσω μιας οπής στο πλαίσιο και μια οπής στη διαδοκίδα.



Σχήμα 3-9: Αντηρίδα διαμήκως

*Σύνδεσμοι δυσκαμψίας(sway braces)*

Οι αντιανέμιοι σύνδεσμοι(Σχήμα 3-10) δυσκαμψίας είναι χαλύβδινες ράβδοι διαμέτρου 29 mm και ζυγίζουν 68 λίβρες (30,8 κιλά). Δύο σύνδεσμοι δυσκαμψίας απαιτούνται στην κάτω χορδή κάθε τμήματος της γέφυρας, εκτός από το πρώτο τμήμα της μύτης προώθησης, και σε κάθε τμήμα της πλευρικής εξασφάλισης ανώτερου επιπέδου.



Σχήμα 3-10: Αντιανέμιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας

### 3.3 Υλικό κατασκευής

Τα περισσότερα μέλη της γέφυρας όπως οι διαδοκίδες και τα πλαίσια, είναι κατασκευασμένα από ένα κράμα χάλυβα υψηλής αντοχής, το BS968. Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα απαντάται σε τρεις κατηγορίες αναλόγως της ιστορικής περιόδου παραγωγής του.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [13] η αρχική του παραγωγή έγινε το έτος 1941 με χαρακτηριστικά και σύνθεση όπως παρακάτω( Πίνακας 3-1)

Πίνακας 3-1: Πίνακας σύνθεσης και χαρακτηριστικών του BS968 1941

Chemical Properties			
index	Component	Content in %	Remarks
1	Carbon	0,23	
2	Silicon	0,35	
3	Manganese	1,00	
4	Chromium (optional)	1,00	Manganese plus Chromium not more than 2%
5	Nickel (optional)	0,50	
6	Sulphur	0,06	
7	Phosphorus	0,06	
8	Copper	0,60	
Mechanical Properties			
9	Yield Strength		
	ThickNess		Value
	inches	mm	tons/sq.in
	t ≤ 1 ¼	t ≤ 31,75	23
	1 ¼ < t ≤ 1 ¾	31,75 < t ≤ 44,45	22
	1 ¾ < t ≤ 2 ¼	44,45 < t ≤ 57,15	21
	2 ¼ < t ≤ 2 ¾	57,15 < t ≤ 69,85	20
	t > 2 ¾	t > 69,85	19
			MPa
			317,4
			303,6
			289,8
			276
			262,2
10	Ultimate Tensile Strength (UTS)		
	37 ≤ UTS ≤ 43 510,6 ≤ UTS ≤ 593,4		

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μερικές τροποποιήσεις το 1943 με ισχνές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά και στη σύνθεση (Πίνακας 3-2), ενώ το 1962 έγινε η αντικατάσταση του BS 968 1943 το οποίο και αυτό αντικαταστάθηκε από το BS 4360 του 1968. Τα χαρακτηριστικά του BS 968 1962 είναι εκείνα που έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μεγάλος αριθμός προκατασκευασμένων τμημάτων παρήχθη την περίοδο εκείνη με αυτά τα χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα(Πίνακας 3-2)

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά και σύνθεση του BS 968 1943 και BS 968 1962

<b>Chemical Properties Class (a),(b) BS 968 1943</b>				
index	Component	Content in %		Remarks
		Class (a)	Class (b)	
1	Carbon	0,23	0,23	Because Chromium was in short supply the Class (b) steel only to be called up in exceptional circumstances
2	Silicon	0,35	0,35	
3	Manganese	1,80	0,80	
4	Nickel (optional)	0,50	0,50	
5	Chromium (optional)	0,35	0,80	
6	Sulphur	0,06	0,06	
7	Phosphorus	0,06	0,06	
8	Copper	0,60	0,60	
<b>Mechanical Properties</b>				
9	<b>Ultimate Tensile Strength (UTS)</b>			
	Thickness		Value	
	inches	mm	tons/sq.in	MPa
	$t \leq \frac{3}{4}$	$t \leq 19,05$	34 to 41	469,2 to 565,8
	$t > \frac{3}{4}$	$t > 44,45$	33 to 39	455,4 to 538,2
10	<b>Yield Strength</b>			
	ThickNess		Value	
	inches	mm	tons/sq.in	MPa
	$t \leq \frac{3}{4}$	$t \leq 19,05$	21	289,8
	$t > \frac{3}{4}$	$t > 44,45$	19	262,2
<b>Chemical Properties BS 968 1962</b>				
index	Component	Content in %		Remarks
1	Carbon	0,20-0,22 (over 5/8")		
2	Silicon	0,35		Increased to 0,50 in 1965
3	Manganese	1,50		Total not to exceed 1,6
4	Chromium (optional)	0,50		
5	Sulphur	0,05		
6	Phosphorus	0,05		
<b>Mechanical Properties</b>				
9	<b>Yield Strength</b>			
	ThickNess		Value	
	inches	mm	tons/sq.in	MPa
	$t \leq 5/8$	$t \leq 15,88$	23	317,4
	$5/8 < t \leq 1 \frac{1}{4}$	$15,88 < t \leq 31,75$	22,5	310,5
	$1 \frac{1}{4} < t \leq 2$	$44,45 < t \leq 50,8$	22	303,6
	Mechanical Properties were as BS 548			

2 &lt; t

10

**Ultimate Tensile Strength (UTS)(MPa)**

32≤UTS≤39 441,6≤UTS≤538,2

Ο χάλυβας BS 4360 το έτος 1968 και έγιναν έκτοτε 4 τροποποιήσεις;

- Amendment Slip No 1 to BS 4360 1968
- BS 4360 Part 2 1969 Metric Units
- BS 4360 1972 Weldable Structural Steels
- BS 4360 1979 Weldable Structural Steels

Στην περίπτωση του χάλυβα BS 968 ο οποίος χρησιμοποιείται στη Bailey από το 1941 με τροποποιήσεις έως το πρότυπο BS 4360 του 1968, μελέτες έχουν εκπονηθεί σε υλικό της ίδιας περιόδου [4]. Στην αναφορά της μελέτης [4] διαπιστώθηκε ότι ο χάλυβας μετά την συλλογή δειγμάτων ανάλυσης (test coupons) προσεγγίζει σε συμπεριφορά τον αντίστοιχο ASTM χάλυβα ASTM A 242 ή ASTM A572 ή ASTM A588. Επικρατέστερος από πλευράς ανάλυσης είναι ο χάλυβας ASTM A 242 .

Συνεπώς για τον BS 968 λήφθηκαν υπόψη τα εξής χαρακτηριστικά

Λόγος Poisson  $\nu = 0,3$

$E = 206,84 \text{ GPa} = 206840 \text{ N/mm}^2$

Πυκνότητα  $= 7,8057 \text{ g/cm}^3 = 7,8057 \cdot 10^{-5} \text{ N/mm}^3 = 7805,7 \text{ Kg/m}^3$

Όριο διαρροής  $= 344,74 \text{ MPa} = 344,74 \text{ N/mm}^2$  (23tons/inch<sup>2</sup>)

Όριο θραύσης  $= 482,63 \text{ MPa} = 482,63 \text{ N/mm}^2$  (35-43 tons/inch<sup>2</sup>)

$\epsilon_y = 0,3\%$  (τροπή διαρροής)

$\epsilon_u = 18\%$  (τροπή θραύσης)

$H = 779,04 \text{ MPa}$  (κράτυνση)

Για τα υπόλοιπα μέλη της Γέφυρας Bailey χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας BS 15. Με αρχική παραγωγή χάλυβα BS15 από το έτος 1906 και τελική τροποποίηση το 1948 με μόνη διαφοροποίηση του άνω ορίου θραύσεως κατά 13,8 MPa τα γενικά του χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- $386,4 < \text{UTS} < 455,4 \text{ (MPa)}$

Για τους πείρους χρησιμοποιήθηκε κράμα χάλυβα μαγγάνιου-μολυβδαινίου ανθεκτικότερο και από τα δύο προαναφερθέντα υλικά με όριο διαρροής ίσο με  $65 \text{ tons/sq.in} = 897 \text{ MPa}$

### 3.4 Μόνιμα φορτία γέφυρας

Τα ίδια βάρη του φορέα λήφθηκαν υπόψη απλοποιητικά ως κατανεμημένα φορτία στο επίπεδο του καταστρώματος, καθώς η επιβολή φορτίου ως mass proportional [18], οδηγούσε σε μη ομαλά αποτελέσματα και σε αδυναμία σύγκλισης. Αρχικά υπολογίστηκε το βάρος του κάθε μέλους και συνολικά όλου του φορέα, ακόμη και των μελών που δεν επιλέχθηκε να προσομοιωθούν, όπως οι μηκίδες, το κατάστρωμα και οι επιζυγίδες. Συνεπώς έχοντας τα ίδια βάρη των μελών στην παράγραφο 3.2.2 έγιναν οι εξής υπολογισμοί που φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 3-3)

Πίνακας 3-3: Υπολογισμός ίδιου βάρους γέφυρας

Ι.β διαδοκίδας Αριθμός μελών: 11 Βάρος μέλους: 280 kg Συνολικό φορτίο: 30214,8 N	Ι.β αντηρίδων Βάρος μέλους: 10 kg Αριθμός μελών: 10 Συνολικό φορτίο: 1177,2 N	Ι.β αντιανεμιών Βάρος μέλους: 30,8 kg Αριθμός μελών: 10 Συνολικό φορτίο: 3021,48 N	Πείρος σύνδεσης πλαισίου Βάρος: 2,7 kg Αριθμός πείρων: 8 Συνολικό φορτίο: 211,9 N
Ι.β πλαισίου Αριθμός πλαισίων: 10 Βάρος πλαισίου: 262 kg Συνολικό φορτίο: 25702,2 N	Ι.β δίπλακων Βάρος δίπλακας: 29,5 kg Αριθμός δίπλακων: 65 Συνολικό φορτίο: 18810,68 N	Σφικτήρας διαδοκίδας Βάρος: 3,7 kg Αριθμός μελών: 22 Συνολικό φορτίο: 798,53 N	Πείρος επιζυγίδας Βάρος: 2 kg Αριθμός: 40 Συνολικό φορτίο: 784,8 N
Ι.β μηκίδων Βάρος ακριανής μηκίδας: 122 kg Αριθμός ακριανών μηκίδων: 10 Βάρος μεσαίας μηκίδας: 118 kg Αριθμός μεσαίων μηκίδων: 20 Συνολικό φορτίο: 35119,8 N	Ι.β ακραίων ορθοστατών Αριθμός θηλυκών: 2 Βάρος θηλυκών: 59 kg Αριθμός αρσενικών: 2 Βάρος αρσενικών: 54,9 kg Συνολικό φορτίο: 2234,72 N	Επιζυγίδα Βάρος μέλους: 73,5 kg Αριθμός μελών: 10 Συνολικό φορτίο: 7210,35 N	Πείρος σύνδεσης αντηρίδας Βάρος: 0,5 kg Αριθμός: 24 Συνολικό φορτίο: 117,72 N
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΟΝΙΜΑ ΙΔΙΑ ΒΑΡΗ</b>			<b>125404,18 N</b>

Ο Αμερικάνικος Κανονισμός από την άλλη καθορίζει το βάρος του κάθε κομματιού της γέφυρας σύμφωνα το οποίο ζυγίζει 2,76 τόνους δηλαδή 27,076 KN. Για τη συγκεκριμένη γέφυρα που αποτελείται από 5 κομμάτια το συνολικό βάρος ανέρχεται στα 135,378 KN και είναι αυτό που εν τέλει θα ληφθεί υπόψη όντας μεγαλύτερο από το συνολικό φορτίο που υπολογίστηκε στο χέρι. Το φορτίο αυτό κατανέμεται σε 121 κόμβους συνεπώς έχω 1118,826 N/κόμβο. Για λόγους ασφαλείας στην κατάσταση σχεδιασμού, όπου λαμβάνονται υπόψη τα μέγιστα κινητά φορτία, το μόνιμο βάρος θα ληφθεί υπόψη με βάση ένα συντελεστή ασφαλείας 1,35, όπως ορίζουν και οι σύγχρονες κανονιστικές διατάξεις.

### 3.5 Διαδικασία κατηγοριοποίησης οχημάτων-γέφυρας

Τα κινητά φορτία που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό στρατιωτικών γεφυρών βασίζονται σε υπηρεσιακά οχήματα. Στα στρατιωτικά οχήματα όπως τα άρματα μάχης, στο μπροστινό μέρος αναγράφεται ένας αριθμός ταξινόμησης, ο οποίος αντιστοιχεί χονδρικά στο συνολικό τους βάρος, και ονομάζεται κλάση οχήματος. Το εύρος των κατηγοριών φορτίου εκτείνεται από 5 έως 70, με οκτώ ενδιάμεσες τάξεις. Το όχημα το οποίο αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία, είναι υβριδικό, αλλά καλύπτει όλα τα γνωστά οχήματα σε αυτό κατηγορίας και είναι το φορτίο που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της γέφυρας. Έτσι και ο φορέας έχει μια κατηγορία φορτίου που εμφανίζεται σε μια πινακίδα στην είσοδο της γέφυρας, και το σύστημα είναι τέτοιο ώστε ένα όχημα να μπορεί να διασχίσει οποιαδήποτε γέφυρα με σήμα κατηγορίας φορτίου ίσο ή μεγαλύτερο από την κλάση του.



Η εύρεση της κλάσης της γέφυρας Bailey δύναται να καθοριστεί μελετώντας τον Πίνακα A-6 του Παραρτήματος Α του Αμερικάνικου Κανονισμού, με βάση τον τύπο δικτυώματος(απλό, διπλό, τριπλό) καθώς και το μήκος ανοίγματος. Η ταξινόμηση της γέφυρας γίνεται για διάφορες καταστάσεις φόρτισης και τύπους διέλευσης οχημάτων οι οποίοι είναι:

1. Κανονική κυκλοφορία(normal)
2. Μετα προσοχής κυκλοφορία(caution)
3. Επικίνδυνη κυκλοφορία(risk)

Οι τρεις καταστάσεις περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα(Πίνακας 3-4)

Πίνακας 3-4: Καταστάσεις κυκλοφορίας στη γέφυρα Bailey

	<b>Normal</b>	<b>Caution</b>	<b>Risk</b>
<b>Θέση οχήματος</b>	Οπουδήποτε στο κατάστρωμα	Κεντροβαρικά του καταστρώματος	Κεντροβαρικά του καταστρώματος
<b>Μέγιστη ταχύτητα(km/h)</b>	40,2	12,9	4,8
<b>Περιγραφή συνθήκης</b>	Χωρίς απότομες αλλαγές ταχύτητας(ακινητοποίηση ή επιτάχυνση οχήματος)	Όχι ακινητοποίηση ή επιτάχυνση οχήματος ή αλλαγή ταχυτήτων	Όχι ακινητοποίηση ή επιτάχυνση οχήματος ή αλλαγή ταχυτήτων: τα τανκς κατευθύνονται μόνο με συμπλέκτη
<b>Ελάχιστη απόσταση οχημάτων</b>	27,4 m απόσταση στρατιωτικής συνοδείας μετρημένη από το πρώτο στο τελευταίο όχημα	45,7 m	Διέλευση ενός οχήματος τη φορά

Αξίζει να επισημανθεί πως η μετα προσοχής κυκλοφορία ορίστηκε με δοκιμές και είναι συνήθως 25 τοις εκατό μεγαλύτερη από την κανονική. Τα φορτία κινδύνου (risk) πιθανότατα να οδηγήσουν ορισμένα μέλη σε υπέρβαση του ορίου διαρροής και να προκαλέσουν μόνιμη παραμόρφωση στη γέφυρα, ενώ αλληπάλληλες φορτίσεις τέτοιου βεληνεκούς μπορούν να οδηγήσουν τον φορέα σε αστοχία. Επομένως, ο υπεύθυνος ρύθμισης της κυκλοφορίας πρέπει να ελέγχει διεξοδικά την κατάσταση του συστήματος πριν και μετά από μια τέτοια διέλευση, εντοπίζοντας και εκτιμώντας πιθανές βλάβες στα φέροντα μέλη. Διεξοδικός έλεγχος κατά την διαδικασία κατηγοριοποίησης της γέφυρας πρέπει να συντελείται μεταξύ άλλων και στα βάθρα της γέφυρας (μεσόβαθρα αν έχει και ακρόβαθρα) και αναλόγως της καταστάσεως στην οποία έχουν περιέλθει, καλείται ο αρμόδιος να διατηρήσει να μειώσει την τάξη της γέφυρας, ενώ μια αντίστοιχη διερεύνηση οφείλει να γίνεται και στο υφιστάμενο έδαφος θεμελίωσης. Στο Σχήμα 3-11 που αποτυπώνεται ο πίνακας A-7 του Αμερικάνικου Κανονισμού φαίνεται η ταξινόμηση των γεφυρών για διάφορα ανοίγματα, τύπους δικτυωμάτων καθώς και καταστάσεις κυκλοφορίας

Table A-7 Classes of Bailey bridge M2 (by type of construction and type of crossing)

TYPE OF CONSTRUCTION	RATING	SPAN (ft)																			
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	
SS	N	30	24	24	20	20	16	12	8												
	C	30	36	33	30	24	20	16	12												
	R	42	37	34	31	29															
	N	47	40	36	33	30	24	19	14												
DS	N	42	38	35	32	30															
	C	75	75	60	50	40	30	20	16	12	8										
	R	70	65	60	55	45	30	30	23	18	14										
	N	83	77	68	60	50	37	30	23	18	14										
TS	C	76	73	69	60	50	39	32													
	R	88	85	78	66	55	42	34	27	21	17										
	N	84	79	75	64	55	44	36	30												
	C	85	65	50	35	30	20	16	12	8	4										
DD	C	80	65	55	40	35	40	35													
	R	95	74	57	47	38	31	24	18	15	10										
	N	90	75	60	49	41	33	27	21	17	13										
	C	100*	82	64	52	43	35	29	22	17	13										
TD	R	90*	82	66	54	45	38	31													
	N	80	65	45	35	30	24	16	12	8											
	C	80	70	55	45	35															
	R	86	72	57	47	39	32	25	19	15											
DT	C	90	76	61	50	42	35	30	24	18											
	R	96	80	64	53	44	36	30	24	18											
	N	90	83	68	56	48	40	33	20	16	12										
	C	90*	80	60	55	45	35														
TT	C	100*	83	65	57	47	37	31	24	18											
	R	90*	90*	72	62	51	41	34													
	N	100*	91	74	64	54	45	37	29	22											
	C	90*	90*	80	70	58	48	40	32												
TT	R	70	70	60	55	45	35	30	20	16											
	N	80	70	60	55	50	45	35													
	C	80	80	77	69	57	48	39	32	25											
	R	90*	90*	85	78	64	58	43	36	31											
TT	C	90	88	85	80	64	55	46	38	31											
	R	90*	90*	89	74	60	51	43	35												
	N	80	70	55	45	35	30	20	16	12											
	C	75	70	60	55	40															
TT	R	100	80	66	59	48	38														
	N	90*	90*	75	66	52	43														
	C	100*	90*	77	68	55	46														
	R	90*	90*	87	77	62	51														

Note:  
 N=Normal  
 C=Caution  
 R=Risk  
 1 Upper figure represents wheeled-load class  
 2 Lower figure represents tracked-load class

Σχήμα 3-11: Κατηγοριοποίηση γεφυρών Bailey με κριτήριο το άνοιγμα σε πόδια και τον τύπο ζευκτού, Πηγή[11]

Η αναλυτική κατηγοριοποίηση είναι μια επίπονη διαδικασία, καθώς απαιτούνται χρονοβόρες επαναληπτικές διαδικασίες (επίλυση πολλαπλών συστημάτων με τροχοφόρα και ερπυστριοφόρα για διάφορα ανοίγματα, εύρεση περιβάλλουσας εντατικών μεγεθών και σύγκριση με κανονιστικές καμπύλες), όπως επίσης και αρκετές παραδοχές (τύπος εδάφους, θεμελίωσης κλπ.). Για περισσότερες πληροφορίες υπάρχει η σχετική βιβλιογραφική αναφορά[9-11]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος Expedient, υπέρ της ασφαλείας.

Σε κάθε τάξη αντιστοιχούν δύο υποθετικά οχήματα, ένα ερπυστριοφόρο το βάρος του οποίου σε short tons καθορίζει την τάξη της κατηγορίας και ένα τροχοφόρο το οποίο εντείνει όμοια τον φορέα για δεδομένο άνοιγμα. Με λίγα λόγια η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζει κάποιιο συντελεστής για την μετατροπή του βάρους των οχημάτων σε κλάση. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και συντελεστής(STANAG Factors) ένας από αυτούς είναι και ο 1.25, αυτό που προτείνεται προσφάτως από το NATO είναι 1.15(εν γένει συντελεστής μεγαλύτερη της μονάδας). Επομένως στην προκειμένη για κανονική διέλευση οχημάτων η κλάση της γέφυρας είναι 24, συνεπώς πολλαπλασιάζοντας με 1.15 υπολογίζεται το βάρος του οχήματος που μπορεί να περάσει από τη γέφυρα στρογγυλοποιώντας προς τα πάνω και το οποίο κατανέμεται στους άξονες όπως υποδεικνύει στο Σχήμα 3-12

CLASS	TRACKED VEHICLES	WHEELED VEHICLES					
		AXLE LOAD AND SPACING	MAX SINGLE AXLE	MINIMUM WHEEL SPACING AND TIRE SIZES OF CRITICAL AXLES		CRITICAL TIRE LOAD AND TIRE SIZE	
4		4.5 Tons 		Single Axle 7.50 x 20 72" Bogie Axle 7.50 x 20	Single Axle 6.00 x 20 72" Bogie Axle 6.00 x 16	Note: Spacing between center tires: x' equals tire width 2.500# on 7.50 x 20	
8		9 Tons 		Single Axle 12.00 x 20 82" Bogie Axle 9.00 x 20	Single Axle 8.25 x 20 82" Bogie Axle 7.50 x 20	5.500# on 12.00 x 20	
12		15 Tons 		Single Axle 14.00 x 20 84" Bogie Axle 9.00 x 20	Single Axle 10.00 x 20 84" Bogie Axle 7.50 x 20	8.000# on 14.00 x 20	
16		18.5 Tons 		Single Axle 16.00 x 24 90" Bogie Axle 14.00 x 20	Single Axle 12.00 x 20 90" Bogie Axle 9.00 x 20	Single Axle 12.00 x 20 90" Bogie Axle 9.00 x 20	10.000# on 16.00 x 24
20		24 Tons 		Single Axle 18.00 x 24 96" Bogie Axle 14.00 x 24	Single Axle 12.00 x 20 96" Bogie Axle 12.00 x 20	Single Axle 12.00 x 20 96" Bogie Axle 12.00 x 20	11.000# on 18.00 x 24
24		28 Tons 		Single Axle 18.00 x 24 96" Bogie Axle 16.00 x 24	Single Axle 14.00 x 20 96" Bogie Axle 12.00 x 20	Single Axle 14.00 x 20 96" Bogie Axle 12.00 x 20	12.000# on 18.00 x 24
30		34 Tons 		Single Axle 18.00 x 24 96" Bogie Axle 16.00 x 24	Single Axle 14.00 x 20 96" Bogie Axle 12.00 x 20	Single Axle 14.00 x 20 96" Bogie Axle 12.00 x 20	13.500# on 18.00 x 24
40		47 Tons 		Single Axle 21.00 x 24 100" Bogie Axle 18.00 x 24	Single Axle 14.00 x 24 100" Bogie Axle 14.00 x 20	Single Axle 14.00 x 24 100" Bogie Axle 14.00 x 20	17.000# on 21.00 x 24

Σχήμα 3-12: Κλάσεις οχημάτων και κατανομή βάρους σε άξονες, Πηγή[11]

Στην παρούσα φάση που μελετάται γέφυρα απλή-απλή μήκους 50 πόδια (περίπου 15 m) τα οχήματα που θα συμπεριληφθούν στα κατακόρυφα κινητά είναι τα εξής:

1. Για Normal κλάση οχήματος 24
2. Για Caution κλάση οχήματος 31 για ερπυστριοφόρα και 33 για τροχοφόρα
3. Για Risk κλάση οχήματος 35 για ερπυστριοφόρα και 36 για τροχοφόρα

Παρατηρούμε πως ενώ στην κατάσταση Normal το βάρος του τροχοφόρου για κατάσταση Normal προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ερπυστριοφόρου επί 1,15 στις υπόλοιπες καταστάσεις κυκλοφορίας ο συντελεστής διαφέρει. Επομένως για αυτές τις καταστάσεις σχεδιασμού λήφθηκε υπόψη το βάρος του ισοδύναμου τροχοφόρου οχήματος που καθορίζεται από τον α-7 με κατανομή ανάλογη με το βάρος του τροχοφόρου της κλάσης 30(34 τόνοι). Επίσης υπολογίστηκε η θέση του οχήματος για τη μέγιστη καταπόνηση (καμπτική), του αναλυτικού κόμβου.

Όσον αφορά την επίδραση λόγω φορτίων ανέμου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε μοντέλο στο εθνικό εργαστήριο πρότυπων μετρήσεων του Ηνωμένου Βασιλείου, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία[16]. Σε αυτές, το προσομοίωμα ήταν περίπου 8% του κανονικού μεγέθους και ισοδυναμούσε με τρία ανοίγματα 20 ποδιών(6,1 m), ενώ είχε τοποθετηθεί σε μια αεροδυναμική σήραγγα. Παρατηρήθηκε και καταγράφηκε η επίδραση των πλευρικών δυνάμεων σε όλα τα μέλη της γέφυρας μεμονωμένα(πλαίσιο, κατάστρωμα κλπ.) αλλά και συνολικά στην κατασκευή. Έγιναν μετρήσεις με το μοντέλο σε διαφορετικές γωνίες ως προς την κατεύθυνση του ανέμου και τα αποτελέσματα δόθηκαν με τη μορφή συντελεστών με βάση την επιφάνεια πρόσπτωσης και το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου σε μίλια ανά ώρα, έτσι ώστε το τα αποτελέσματα να μπορούν να μεταφερθούν εύκολα στη γέφυρα πλήρους κλίμακας. Βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη κανονική δύναμη σημειώθηκε με τον άνεμο περίπου υπό γωνία 70 μοιρών. Παρακάτω(Πίνακας 3-5) φαίνονται οι τιμές της δύναμης του ανέμου ανά τμήμα της γέφυρας για ταχύτητα 60 mph(96,6 Km/h)

Πίνακας 3-5: Δύναμη ανέμου ανά τμήμα στα διάφορα συστήματα

Τύπος γέφυρας	Απλή-Απλή	Διπλή-Απλή	Τριπλή-Απλή	Διπλή-Διπλή	Τριπλή-Διπλή	Διπλή-Τριπλή	Τριπλή-Τριπλή
Δύναμη ανέμου (σε ΚΝ/τμήμα)	1,67	2	2,1	3,47	3,74	5,15	5,42

Επομένως έχω συνολική δύναμη  $1670 \times 5 = 8350$  N. Στην προκειμένη τα φορτία του ανέμου επιβλήθηκαν ως επικόμβιες δυνάμεις στα πλαίσια (14N/κόμβο).

### 3.6 Φορτία γέφυρας κατά τον Ευρωκώδικα

Όπως έχει αναφερθεί οι γέφυρες Bailey παρόλο που είχαν σχεδιαστεί για προσωρινή χρήση και για κανονιστικά κινητά φορτία λόγω στρατιωτικών οχημάτων, ακόμα και σήμερα βρίσκονται σε λειτουργία. Συνεπώς παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύγκριση των διατάξεων του Αμερικάνικου Κανονισμού και του Ευρωκώδικα [2-3], όσον αφορά τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την λειτουργικότητα. Με μια πρώτη ανάγνωση γίνεται κατανοητό πως ο σύγχρονος κανονισμός καλύπτει ένα ευρύτερο φάσμα δράσεων επί της κατασκευής έναντι της τότε νομοθεσίας, και ένα εξέχον παράδειγμα αποτελεί η κατάσταση αστοχίας που αφορά την κόπωση της κατασκευής, φαινόμενο άξιο αναφοράς και μελέτης, αν αναλογιστεί κανείς το χρόνο ζωής ενός τέτοιου φορέα. Στην προκειμένη περίπτωση θα δοθεί βάση κυρίως στις φορτίσεις λόγω οχημάτων κυκλοφορίας.

Ο Ευρωκώδικας 1 (EN 1991-2): Δράσεις επί των κατασκευών, και ειδικότερα το Μέρος 2 αυτού (Φορτία Κυκλοφορίας επί των Γεφυρών) περιέχει έναν μεγάλο όγκο διατάξεων – πληροφοριών που αφορούν τα φορτία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη λόγω της κίνησης οχημάτων πάσης φύσεως αλλά και ανθρώπων. Πιο συγκεκριμένα, τα φορτία κυκλοφορίας σε οδοφόρες γέφυρες (δηλαδή αυτοκίνητα, φορτηγά καθώς και άλλα ειδικά οχήματα, όπως π.χ. βιομηχανικών μεταφορών) έχουν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη κατακόρυφων και οριζόντιων δυνάμεων, τόσο στατικών όσο και δυναμικών. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων αυτών, κατά πρώτον το συνολικό πλάτος κυκλοφορίας  $w$  (μετρούμενο μεταξύ ακραίων στηθαίων ή κρασπέδων) διαιρείται σε ενδεικτικές λωρίδες (notional lanes). Το πλάτος κάθε λωρίδας  $w_1$  καθώς και ο μέγιστος δυνατός ακεραίος αριθμός τέτοιων λωρίδων  $n_1$  καθορίζονται ακολούθως (Πίνακας 3-6)

Πίνακας 3-6: Αρίθμηση και πλάτος ενδεικτικών λωρίδων κατά Ευρωκώδικα

Πλάτος κυκλοφορίας $w$	Αριθμός λωρίδων	Πλάτος λωρίδας ( $w_1$ )	Πλάτος που απομένει
$w < 5,4$ m	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4 \text{ m} \leq w < 6$ m	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}(\frac{w}{3})$	3 m	$w - 3 \times n_1$ m

Το πλάτος του καταστρώματος<sup>1</sup> της γέφυρας είναι 4,521 m, επομένως υπάρχει μόνο μία λωρίδα κυκλοφορίας πλάτους 3 m και εναπομένουσα 1,52 m. Το μοντέλο φόρτισης που επιλέχθηκε, τοποθετείται στις λωρίδες κυκλοφορίας, στην απομένουσα επιφάνεια και στα πεζοδρόμια, έτσι ώστε να προκαλούν το πλέον δυσμενές αποτέλεσμα για τον κάθε επιμέρους έλεγχο. Αυτό σημαίνει ότι οι γραμμές επιρροής των μεγεθών που αναζητούνται, είναι αυτές που προσδιορίζουν την τελική μορφή φόρτισης και τα τμήματα όπου τοποθετούνται τα αντίστοιχα κινητά φορτία.

### 3.6.1 Πρότυπο φόρτισης 1(LM1)

Το LM1 περιλαμβάνει φορτίσεις λόγω συγκεντρωμένων και ομοιόμορφα φορτίων, καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα των επιδράσεων της κυκλοφορίας επιβατικών και φορτηγών αυτοκινήτων στην απόκριση του φορέα, ενώ παράλληλα χρησιμεύει για γενικούς και τοπικούς ελέγχους. Όπως και στον Αμερικάνικο Κανονισμό τα φορτία λόγω αξόνων υπολογίζονται από θεωρητικά μοντέλα και όχι από υλοποίησιμα οχήματα. Απαρτίζεται από δύο επιμέρους συστήματα:

α. Τα συγκεντρωμένα φορτία δύο αξόνων (διαξονικό όχημα - tandem system-TS), όπου ο κάθε άξονας έχει βάρος ίσο με  $\alpha_{qi}Q_{ik}$  με το  $\alpha_{qi}$  να αποτελεί συντελεστή προσαρμογής και το  $Q_{ik}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου ενός άξονα ανάλογα με τον αριθμό  $i$  της λωρίδας. Το αντίστοιχο βάρος του κάθε τροχού για διενέργεια τοπικών ελέγχων είναι  $\alpha_{qi}Q_{ik} / 2$ , ενώ η επιφάνεια επαφής του τροχού λαμβάνεται ίση με  $0,40 \times 0,40 \text{ m}^2$ .

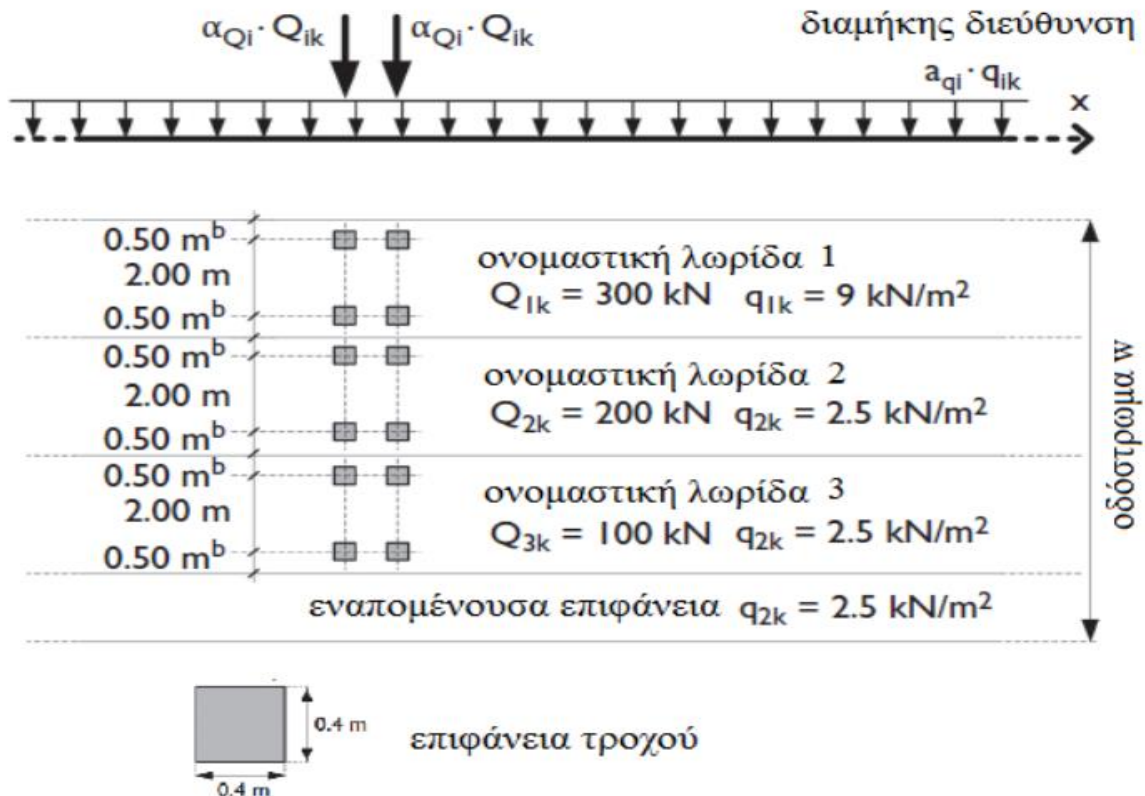
β. Ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο (UDL) σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας, ίσο με  $\alpha_{qi}q_{ik}$  όπου:  $\alpha_{qi}$  είναι συντελεστής προσαρμογής και το  $q_{ik}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του ομοιόμορφου φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας, όπως αντίστοιχα και στην εναπομένουσα επιφάνεια ( $\alpha_{qr}q_{rk}$ )

Στην καθμία λωρίδα κυκλοφορίας επιτρέπεται να τοποθετείται μόνο ένα διαξονικό όχημα με την πλήρη του μορφή, στην πλέον δυσμενή θέση, διαμήκως και εγκάρσιως. Τα ίδια ισχύουν και στο φορτίο UDL, το οποίο πρέπει να τίθεται μόνο στα τμήματα εκείνα των επιφανειών επιρροής, τα οποία επαυξάνουν τις δυσμενείς επιπτώσεις λόγω κινητών φορτίων. Ακολουθώς φαίνονται οι βασικές τιμές των συγκεντρωμένων και ομοιόμορφα κατανεμημένων φορτίων (Πίνακας 3-7) για κάθε λωρίδα, αλλά και για την εναπομένουσα επιφάνεια, ενώ το Σχήμα 3-13 δείχνει την γεωμετρία των θεωρητικών οχημάτων.

Πίνακας 3-7: Χαρακτηριστικές τιμές LM1

Θέση	Σύστημα TS Φορτίο άξονα $Q_{ik}$ [kN]	Σύστημα UDL $q_{ik}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Λωρίδα αριθμός 1	300	9
Λωρίδα αριθμός 2	200	2,5
Λωρίδα αριθμός 3	100	2,5
Λοιπές λωρίδες	0	2,5
Απομένουσα επιφάνεια	0	2,5
Συντελεστές προσαρμογής	$\alpha_{qi}=0,9$	$\alpha_{qi}=1,0$

<sup>1</sup> Υπέρ της ασφαλείας λαμβάνεται ότι τα οχήματα μπορούν να κινηθούν σε όλο το πλάτος της γέφυρας και όχι μόνο μεταξύ των επιζυγίδων (καθαρό πλάτος καταστρώματος).



Σχήμα 3-13: Τοπολογία φόρτισης LM1, αποστάσεις αξόνων οχημάτων, επιφάνεια τροχών

Τα επιφανειακά φορτία θα αναχθούν σε γραμμικά πολλαπλασιάζοντας το πλάτος επιρροής της κάθε διαδοκίδας, όπως αντίστοιχα και τα συγκεντρωμένα φορτία τροχών θα τοποθετηθούν ως επικόμβιες δυνάμεις στα δοκάρια ανάλογα τη θέση του οχήματος και τις αποστάσεις των τροχών.

Οι αποστάσεις των διαδοκίδων διαφέρουν αναλόγως αν γίνεται λόγος για απόσταση διαδοχικών δοκαριών εντός ενός πλαισίου (1,449 m) ή για αποστάσεις σε διαφορετικά διαδοχικά πλαίσια (1,599 m).

Σε κάθε περίπτωση το πλάτος επιρροής υπολογίζεται:

$$\text{Για τις ακριανές διαδοκίδες: } \frac{1,449}{2} = 0,725 \text{ m}$$

$$\text{Για όλες τις υπόλοιπες διαδοκίδες: } \frac{1,449}{2} + \frac{1,599}{2} = 1,524 \text{ m}$$

Επομένως τα  $9 \text{ kN/m}^2$  της κύριας λωρίδας καθώς και τα  $2,5 \text{ kN/m}^2$  θα αναχθούν σε γραμμικά ως εξής:

- Για τις ακριανές διαδοκίδες:  $(9 + 2,5) \times 0,725 = 8,338 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- Για τις μεσαίες διαδοκίδες:  $(9 + 2,5) \times 1,524 = 17,526 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Το κατανομημένο φορτίο ανάγεται στη συνέχεια σε επικόμβιο ανάλογα την τοποθέτηση της κύριας λωρίδας και της εναπομένουσας επιφάνειας. Δυσμενέστερο σενάριο αποτελεί η κύρια λωρίδα να εκτείνεται 1,5 m εκατέρωθεν των κεντρικών κόμβων της διαδοκίδας και η εναπομένουσα επιφάνεια να ισομοιράζεται στις δυο άκρες του καταστρώματος εγκαρσίως, όμως δεν είναι σαφές αν ο Ευρωκώδικας επιτρέπει αυτή την διαμόρφωση. Συνεπώς επιλέγεται η εναπομένουσα επιφάνεια να τοποθετηθεί ενιαία στο ένα άκρο. Αναγόμενο το φορτίο σε επικόμβιο (απόσταση κόμβων 0,45211 m) (για λόγους σύγκρισης αρχικά) έχω για τις ακριανές διαδοκίδες:

$$8 \text{ κόμβοι εντός του πλάτους της κύριας λωρίδας, } \text{UDL} = 9000 \times 0,725 \times 0,45211 = 2950,02 \frac{\text{N}}{\text{κόμβο}}$$

$$3 \text{ κόμβοι εντός του πλάτους της εναπομένουσας επιφάνειας, } \text{UDL} = 2500 \times 0,725 \times 0,45211 = 819,45 \frac{\text{N}}{\text{κόμβο}}$$

Για τις μεσαίες διαδοκίδες αντίστοιχα έχω:

$$8 \text{ κόμβοι εντός του πλάτους της κύριας λωρίδας, } UDL = 9000 \times 1,524 \times 0,45211 = 6201,14 \frac{N}{\text{κόμβο}}$$

$$3 \text{ κόμβοι εντός του πλάτους της εναπομένουσας επιφάνειας, } UDL = 2500 \times 1,524 \times 0,45211 = 1722,54 \frac{N}{\text{κόμβο}}$$

### 3.6.2 Φορτία ανέμου κατά Ευρωκώδικα

Η πίεση του ανέμου η οποία δρα στις εξωτερικές προσβαλλόμενες επιφάνειες μιας κατασκευής, προκύπτει από την παρακάτω ισότητα(Εξ.(3-1):

$$W_e = q_{ref} \times C_e(z_e) \times C_{pe} \quad (3-1)$$

Όπου:

- $q_{ref}$  είναι η πίεση αναφοράς που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα αναφοράς του ανέμου
- $C_e(z_e)$  είναι ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την επιρροή της τραχύτητας του περιβάλλοντος εδάφους, της τοπογραφίας και του ύψους  $z_e$  πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, επί της μέσης ταχύτητας του ανέμου
- $C_{pe}$  είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης.

Η πίεση αναφοράς ορίζεται μέσω της Εξ.(3-2):

$$q_{ref} = 0,5 \times \rho \times v_b^2 \quad (3-2)$$

Όπου:

- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα, ίση με  $1,25 \text{ Kg/m}^3$
- $v_b$  είναι η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου σε  $\text{m/s}$ . Για την Ελλάδα, στο Πληροφοριακό Παράρτημα Α του Μέρους 2.4 ορίζεται ο παρακάτω πίνακας()

	Περιοχή	$v_b$ [m/sec]
Αφόρτιστη γέφυρα	Νησιά και παράκτιες περιοχές σε απόσταση < 10 km από τη θάλασσα	33
	Περιοχές σε απόσταση > 10 km από τη θάλασσα	27
Φορτισμένη γέφυρα	Οδική	23
	Σιδηροδρομική	25

Σχήμα 3-14: Ταχύτητα αναφοράς ανέμου ανάλογα της τοπολογίας, του τύπου της γέφυρας και της κατάστασης φόρτισης της

Για φορτισμένη οδική γέφυρα καθώς ο άνεμος θα ληφθεί υπόψη σε συνδυασμό με τα κινητά φορτία στην δυσμενέστερη θέση, λαμβάνω  $v_b = 23 \text{ m/sec}$

Επομένως αντικαθιστώντας τις άνωθεν τιμές στην Εξ.(3-2) έχουμε:

$$q_{ref} = 0,5 \times 1,25 \times 23^2 = 330,625 \text{ N/m}^2$$

Η συνολική δύναμη του ανέμου  $F_w$  η οποία επενεργεί επί μιας κατασκευής ή επί ενός επιμέρους στοιχείου της, με την προϋπόθεση ότι η κατασκευή δεν είναι ευαίσθητη σε δυναμική καταπόνηση (δηλαδή όταν  $C_d < 1,2$ ), υπολογίζεται ως το άθροισμα των πιέσεων επί όλων των επιφανειών της, και είναι ίση με(Εξ.(3-3)):

$$F_w = q_{ref} \times C_e(z_e) \times C_d \times C_f \times A_{ref} \quad (3-3)$$

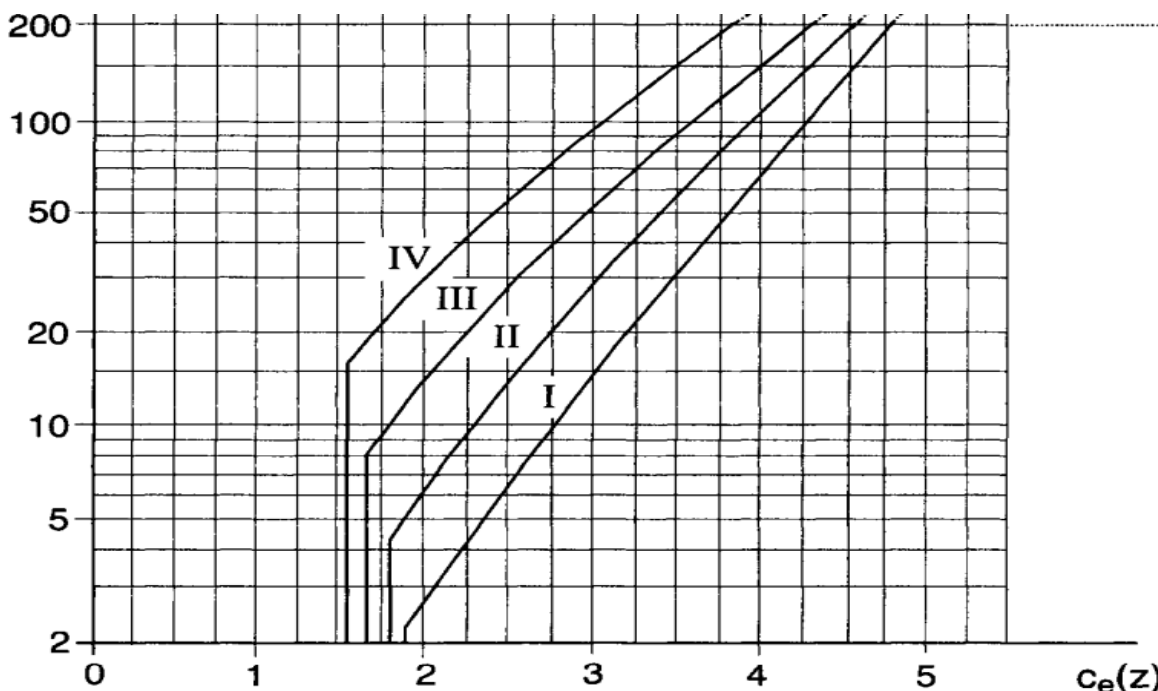
Όπου:

- $C_d$  είναι ο δυναμικός συντελεστής
- $C_f$  είναι ο συντελεστής δύναμης
- $A_{ref}$  είναι η επιφάνεια αναφοράς, μετρούμενη ως η προβολή της προσπίπτουσας επιφάνειας σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση του ανέμου.

Στην συγκεκριμένη εργασία για λόγους σύγκρισης των κανονιστικών διατάξεων μεταξύ Αμερικάνικου και σύγχρονου Ευρωπαϊκού προτύπου, θα ληφθούν υπόψη μόνο οι πλευρικές δυνάμεις λόγω ανέμου στα ζευκτά του φορέα.

Ο συντελεστής έκθεσης( $C_e(z_e)$ ) υπολογίζεται με βάση αναλυτικές εκφράσεις (Μέρος 2.4). Επειδή η μελέτη δεν στηρίζεται σε υφιστάμενο μοντέλο θα ληφθούν οι παρακάτω παραδοχές:

Ο φορέας βρίσκεται σε επίπεδη επιφάνεια(κοιλάδα) προκειμένου ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης( $c_t$ ), μέσω του οποίου εκτιμάται η αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου πάνω από μεμονωμένους λόφους και εξάρσεις, μπορεί να λαμβάνεται ίσος με την 1. Για επίπεδες επιφάνειες εδάφους, όπου είναι  $c_t=1$ , ο συντελεστής έκθεσης  $c_e(z_e)$  μπορεί να υπολογιστεί από το ακόλουθο διάγραμμα(Σχήμα 3-15), ανάλογα με την κατηγορία εδάφους.

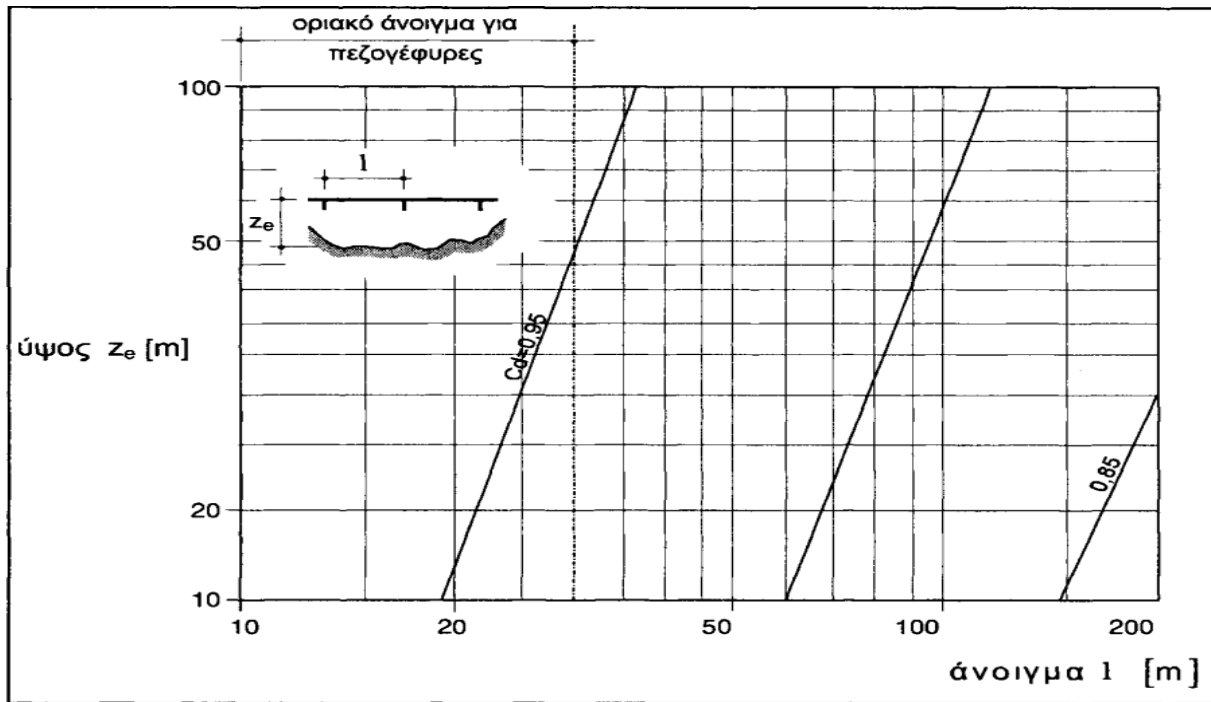


Σχήμα 3-15: Διάγραμμα εύρεση συντελεστή  $C_e$  συναρτήσει του ύψους  $z$  του φορέα και για διάφορες κατηγορίες εδαφών

Στην προκειμένη λαμβάνω κατηγορία εδάφους I(υπέρ της ασφαλείας) και  $z = 100$  m και βρίσκω από το διάγραμμα  $c_e(z) = 4,2$

Ο δυναμικός συντελεστής  $c_d$  υπολογίζεται μέσω του ακόλουθου διαγράμματος(Σχήμα 3-16).

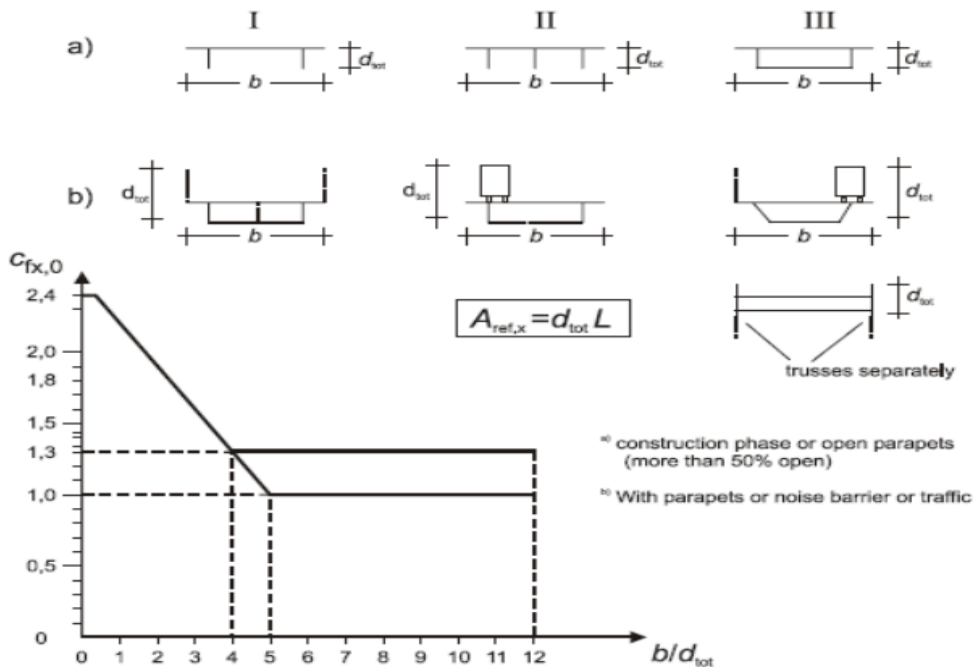




Σχήμα 3-16: Διάγραμμα υπολογισμού δυναμικού συντελεστή  $c_d$

Συνεπώς για άνοιγμα γέφυρας στα 15,24 m και για ύψος εδάφους 100 m η τιμή του  $c_d$  είναι μεταξύ του 0,95 και του 1. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα ληφθεί  $1 < 1,2$  οπότε ο φορέας δεν είναι ευαίσθητος σε δυναμική καταπόνηση. Όσον αφορά τον συντελεστή δύναμης  $c_f$  υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης()

Ο συντελεστής  $c_{fx,0}$  υποδεικνύεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3-17) ανάλογα με τον τύπο της γέφυρας και το λόγο ύψους της προσπίπτουσας επιφάνειας με το πλάτος του καταστρώματος



Σχήμα 3-17: Διάγραμμα εύρεσης συντελεστή δύναμης  $c_f$ , συσχέτιση με λόγο ύψους πλάτους και τύπο φορέα

Το ύψος του πλαισίου επί το οποίο προσπίπτει ο άνεμος είναι  $d_{tot}=1,549$  m ενώ το πλάτος του καταστρώματος είναι  $b=4,521$  m, συνεπώς ο λόγος  $b/d_{tot}$  ισούται με 2,92. Επομένως για τις παραπάνω τιμές και για δοκό δικτυώματος έχω  $c_{fx,0}=1,6$ .

Η επιφάνεια πρόσπτωσης υπολογίζεται από τους ορθοστάτες τα διαγώνια και τις χορδές των πλαισίων, σύμφωνα με τον προσανατολισμό της διατομής σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου. Υπολογίζεται ίση με  $7,89 \text{ m}^2$  Συνεπώς η συνολική πλευρική δύναμη λόγω ανέμου είναι:

$$F_{w,y} = 330,625 \times 4,2 \times 1 \times 1,6 \times 7,89 = 17530,002 \text{ N} = 29,39 \text{ N/κόμβο}$$

Να επισημανθεί πως η τοποθέτηση των κινητών φορτίων έγινε με γνώμονα το δυσμενέστερο σενάριο για το κόμβο σύνδεσης πλαισίων.

### 3.7 Συγκρίσεις δύο κανονισμών

Έχοντας δεδομένα και για τους δύο κανονισμούς φαίνεται πως υπάρχουν αρκετές μεγάλες αποκλίσεις, όσον αφορά το είδος και το μέγεθος των κινητών φορτίων. Ειδικότερα όσον αφορά τον άνεμο ο Ευρωκώδικας προβλέπει συνολικό φορτίο ανέμου ίσο με  $17350,002 \text{ N}$  ενώ ο Αμερικάνικος ίσο με  $8350 \text{ N}$ . Επομένως χωρίς να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής που λαμβάνεται κατά την αστοχία στον Ευρωκώδικα (αντίστοιχα δεν υπάρχουν ενδείξεις για αντίστοιχο συντελεστή στον Αμερικάνικο, οπότε λαμβάνεται ίσος με 1) η πλευρική φόρτιση είναι 2,09 φορές μεγαλύτερο (+107,78 %), από την τότε προβλεπόμενη τιμή. Αναφορικά με τα κινητά φορτία των οχημάτων η γέφυρα σχεδιάστηκε για μέγιστο κανονιστικό όχημα (κατάσταση κυκλοφορίας Risk)  $353,16 \text{ kN}$  σε τέσσερις άξονες. Αντίθετα αν ο σχεδιασμός γινόταν επί του παρόντος το μέγιστο φορτίο οχήματος θα ήταν ,με συντελεστή μονάδα, 1,5 φορά πιο βαρύ και αν συνυπολογιστεί και ο συντελεστής 1,35 τότε διπλασιάζεται. Όπως είναι λογικό ο παλιός κανονισμός και μάλιστα για φορείς προσωρινής δομής, δεν κάλυπτε μεγάλο φάσμα καταστάσεων φόρτισης και λειτουργίας. Επομένως δεν προβλέπεται η επιβολή κατανεμημένου κινητού φορτίου, εν αντιθέσει με τον ισχύοντα που προβλέπει  $9 \text{ kN/m}^2$  στην κύρια λωρίδα και  $2,5 \text{ kN/m}^2$  στην εναπομένουσα επιφάνεια. Εν τέλει μετατρέποντας το κατακόρυφο κινητό φορτίο σε συγκεντρωμένο και για τους δύο κανονισμούς, υπολογίζεται υπερεκτίμηση του από τον Ευρωκώδικα κατά 286 %. Προφανώς οι παραμορφώσεις του φορέα και εν γένει η καταπόνηση του αναμένεται να είναι κατά πολύ μεγαλύτερες λαμβάνοντας υπόψη τους συνδυασμούς του Ευρωκώδικα. Οι συνδυασμοί φόρτισης που θα ληφθούν υπόψη στις αναλύσεις στη συνέχεια είναι οι ακόλουθοι:

- $1,35 \times G_{I.B} + 1,35 \times (TS + UDL) + 1,5 \times 0,6W$ -Ευρωκώδικας
- $1,35 \times G_{I.B} + 1 \times RISK + 1 \times W$
- $1,35 \times G_{I.B} + 1 \times CAUTION$
- $1,35 \times G_{I.B} + 1 \times NORMAL$





## 4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

### 4.1 Γενικά

Στα πλαίσια της κείμενης εργασίας επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μια αμφιέριστη γέφυρα Bailey ανοίγματος και πλάτους 15,24 m 4,521 m, τύπου απλή-απλή. Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στη σύνδεση πλαισίου-πλαισίου όπου επιλέχθηκε ένα αναλυτικό προσομοίωμα με επιφανειακά στοιχεία (στοιχεία κελύφους) και τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements), εκτενέστερη αναφορά του οποίου θα γίνει στο προσεχές κεφάλαιο. Σε πρώτη φάση επιλέχθηκαν ραβδωτά μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία δοκού με κατάλληλες προσαρμογές και ελευθερώσεις στα σημεία σύνδεσης, προκειμένου να ελεγχθεί εποπτικά ευκολότερα η λειτουργία της γέφυρας υπό κατακόρυφες φορτίσεις. Μελετήθηκαν από βιβλιογραφία και από υφιστάμενες κατασκευές οι συνδέσεις μελών προκειμένου να επιλεγεί η μονολιθική ή αρθρωτή προσομοίωση της σύνδεσης τους και εν τέλει πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις αποτελεσμάτων του φορέα σε τρία στατικά προγράμματα υπό τα ίδια βάρη του φορέα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν φορτίσεις με τα κανονιστικά οχήματα του Αμερικάνικου Κανονισμού και του Ευρωκώδικα και παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του φορέα σε καταστάσεις λειτουργικότητας και αστοχίας.

### 4.2 Συνδέσεις μελών στα ραβδωτά στοιχεία και προσομοίωσή τους

Οι συνδέσεις των διαφόρων μελών της γέφυρας αποτελεί το κύριο ζήτημα της εργασίας. Η αναλυτική προσομοίωση όλων των συνδέσεων θα ήταν ανέφικτη υπολογιστικά συνεπώς προτιμήθηκε ραβδωτή προσομοίωση αυτών πλην των δύο αναλυτικών κόμβων σύνδεσης πλαισίου που πραγματεύεται το κεφάλαιο 5. Οι κυριότερες συνδέσεις οι οποίες αναλύονται και στη συνέχεια είναι:

1. Σύνδεση διαδοκίδας με ορθοστάτη και κάτω πέλμα πλαισίου
2. Σύνδεση αντηρίδας με πλαίσιο και διαδοκίδα
3. Σύνδεση πλαισίων στα ραβδωτά μέλη
4. Σύνδεση διαγωνίων με ορθοστάτες και χορδές πλαισίου

Ένα ιδιαίτερο ζήτημα που χρήζει διερεύνησης αποτελεί κατά πόσο οι μη συγκολλητές συνδέσεις ,1-3, μπορούν να θεωρηθούν ως συνδέσεις πλήρους μεταφοράς ροπής, σύμφωνα με την αρχική εκτίμηση και κατά πόσο πιθανές ελευθερώσεις επηρεάζουν την συμπεριφορά του φορέα

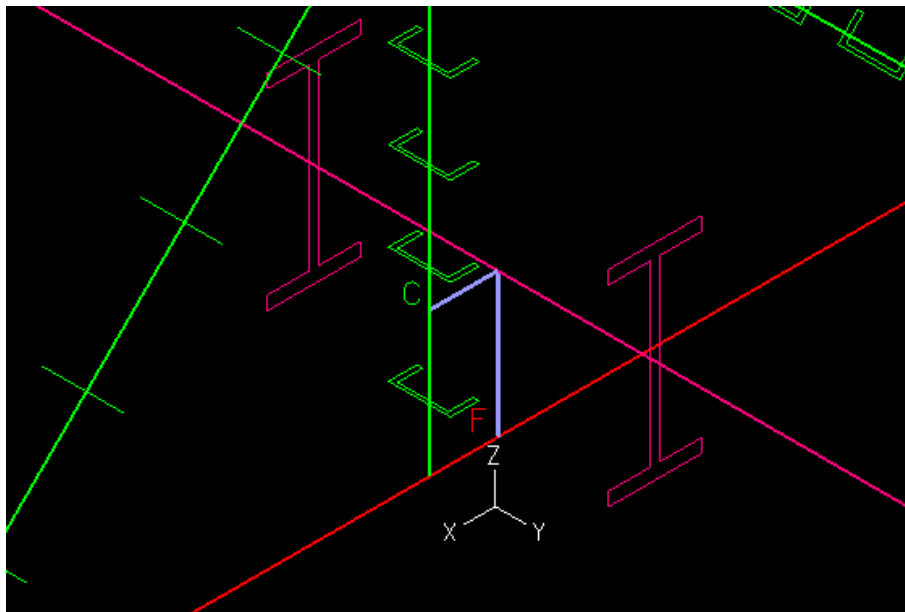
*Σύνδεση διαδοκίδας με ορθοστάτη και κάτω πέλμα πλαισίου*



Σχήμα 4-1: Λεπτομέρεια σύνδεσης διαδοκίδας με ορθοστάτη και κάτω πέλμα πλαισίου με τη χρήση σφιγκτήρα

Η σύνδεση διαδοκίδας με ορθοστάτη και κάτω πέλμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1 γίνεται μέσω του σφιγκτήρα (transom clamp) ο οποίος βιδώνει και δεσμεύει τους μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας της διαδοκίδας στα αντίστοιχα μέλη. Πιο συγκεκριμένα σφίγγει την διαδοκίδα στο κάτω πέλμα δεσμεύοντας την βύθιση της ενώ το βλήτρο που θηλυκώνει στη συμβολή κορμού-πέλματος δείχνει πως στο μέλος του πλαισίου μεταφέρεται και η δύναμη κατά το πλάτος της γέφυρας(διαμήκης άξονας διαδοκίδας). Όπως βλέπουμε ο σφιγκτήρας καταλήγει στον ορθοστάτη μεταφέροντας τις όποιες πλευρικές (κατά τον ασθενή άξονα) εκτροπές προκαλούνται στη διαδοκίδα(πχ λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού), μεταφέροντας και τις αντίστοιχες δυνάμεις. Η σύνδεση λοιπόν μοιάζει με αρθρωτή χωρίς μεταφορά ροπών και έτσι μοντελοποιήθηκε. Η δέσμευση της στρέψης της διαδοκίδας στον ορθοστάτη έγινε περισσότερο με γνώμονα την αποφυγή μηχανισμού και όχι τόσο από πλευράς υλοποίησης της σύνδεσης στο πεδίο (εικόνα). Συνεπώς στο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτοι κόμβοι (rigid links) με αντίστοιχες δεσμεύσεις στα αντίστοιχα μέλη(Σχήμα 4-2),όπου:

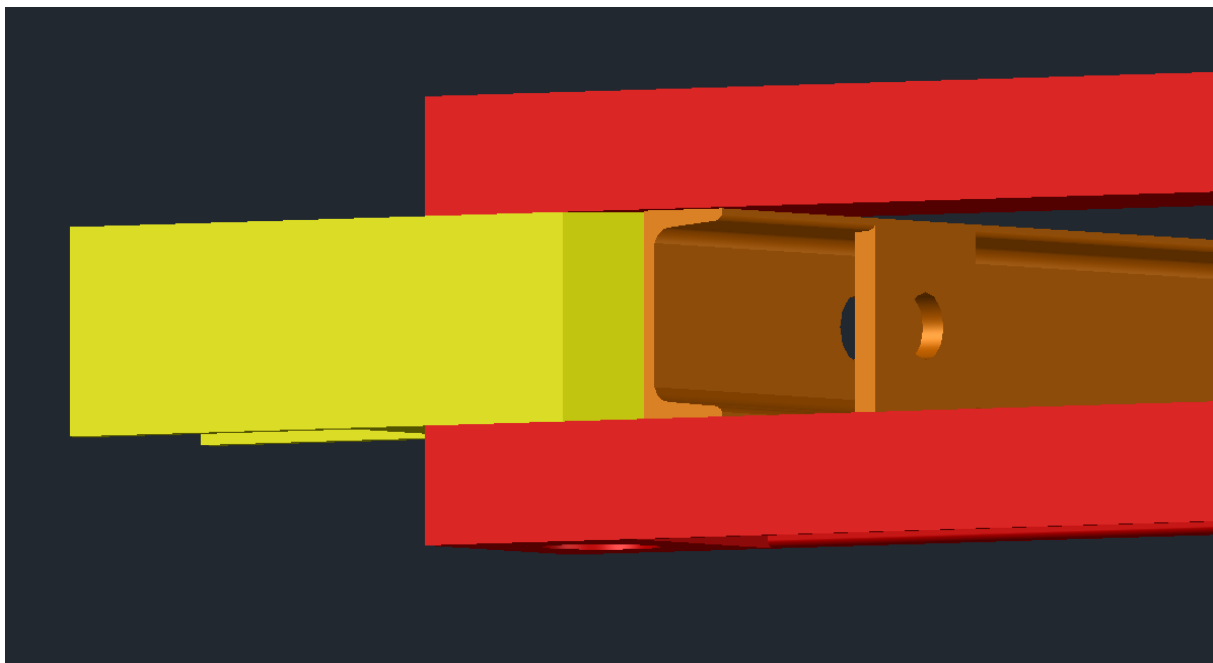
- C, δέσμευση μεταφορικών β.ε z,y
- F, δέσμευση μεταφορικού β.ε χ και στροφής περί τον γ



Σχήμα 4-2: Προσομοίωση σύνδεση διαδοκίδας με ορθοστάτη, C και F συνοριακές συνθήκες των άκαμπτων κόμβων στη διαδοκίδα

#### *Σύνδεση αντηρίδων με πλαίσιο και διαδοκίδα*

Η σύνδεση αντηρίδας με το πλαίσιο υλοποιείται στον ορθοστάτη ο οποίος με τη σειρά του συγκολλάται στο άνω πέλαμα του πλαισίου (συγκολλητή σύνδεση πελμάτων ορθοστάτη με κορμό μέλους). Ο ορθοστάτης έχει ένα ειδικό τέμαχος στο σημείο αυτό (Σχήμα 4-3) στον οποίο θηλυκώνει η καβίλια-πείρος της αντηρίδας(εικόνα).



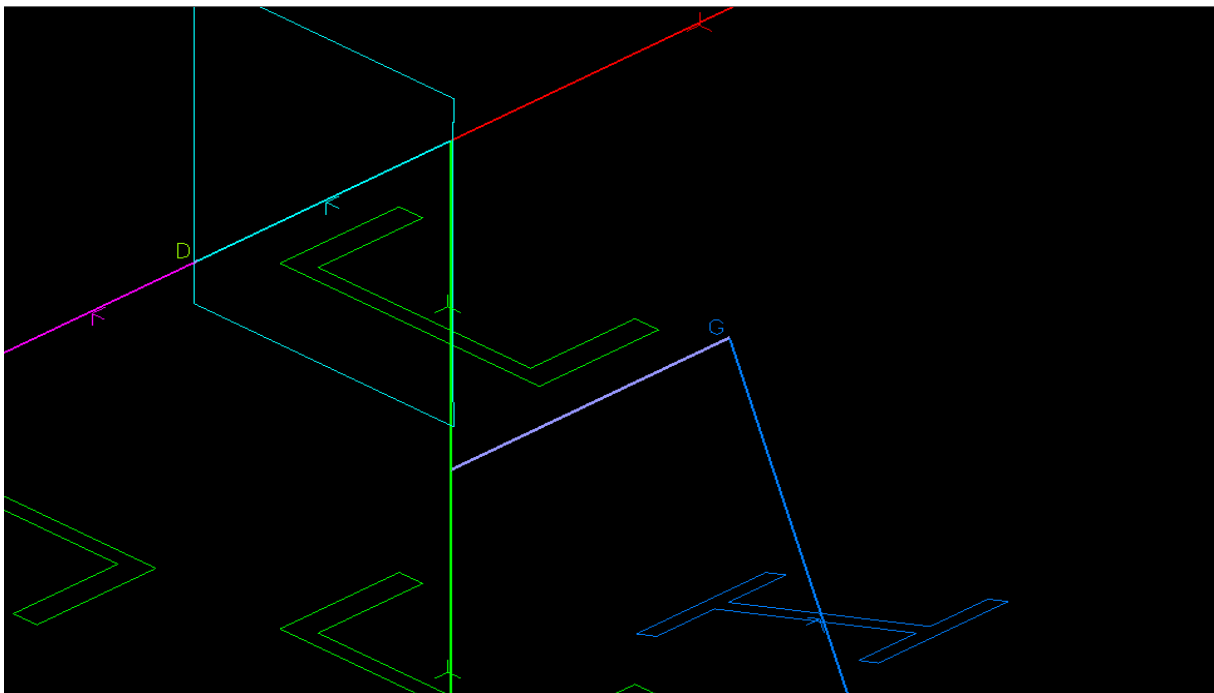
Σχήμα 4-3: Τέμαχος σύνδεσης ορθοστάτη με αντηρίδα

Με πανομοιότυπο τρόπο γίνεται και η σύνδεση της αντηρίδας με την διαδοκίδα(Σχήμα 4-3)



Σχήμα 4-4: Σύνδεση αντηρίδας με διαδοκίδα

Συνεπώς η μοντελοποίηση έγινε με μεταφορά μόνο δύναμης κατά  $x,y,z$  με άκαμπτους κόμβους όπως φαίνεται στην εικόνα, όπου με G συμβολίζεται η δέσμευση των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας της αντηρίδας



Σχήμα 4-5: Σύνδεση αντηρίδας με ορθοστάτη πλαισίου, προσομοίωση με άκαμπτο σύνδεσμο μεταφοράς δυνάμεων



### Σύνδεση πλαισίων στα ραβδωτά μέλη

Η σύνδεση των πλαισίων (Σχήμα 4-7) στα ραβδωτά μέλη υλοποιήθηκε αρχικά μονολιθικά με απλή ελευθέρωση καμπτικής ροπής περί τον ισχυρό άξονα του πέλματος, θεωρώντας πως η τριβή μεταξύ θηλυκών και αρσενικού τεμάχους κατά την σχετική στροφή τους είναι αρκετά μικρή (άρθρωση). Για την ακριβέστερη προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών στα άκρα του πλαισίου, θέλοντας να συμπεριληφθεί και η ανοχή οπής-πείρου, ορίστηκαν μη γραμμικά ελατήρια πολύ εύκαμπτα έως το κλείσιμο των κενών και πολύ μεγάλη δυσκαμψία για μεγαλύτερη παραμόρφωση (Σχήμα 4-6), προσομοιώνοντας ουσιαστικά συνθήκες μη ενδοτικότητας μεταξύ των επιφανειών επαφής. Όσον αφορά την στρέψη των μελών ως προς τον διαμήκη άξονα του πείρου, μοντελοποιήθηκε με μη γραμμικό ελατήριο μικρής δυσκαμψίας, για να προσεγγιστεί η τριβή μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή και να είναι εύκολη η όποια παραμετροποίηση τους ταυτόχρονα με τον αναλυτικό κόμβο. Οι δυσκαμψίες που δόθηκαν στα ελατήρια των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας ήταν κατάλληλες έτσι ώστε η περαιτέρω αύξηση τους να μην αποτελεί αιτία διαφορετικών αποτελεσμάτων στον φορέα

Define Nonlinear Spring Property

Add... Delete Copy... Save Discard OK Cancel

Property Number: 1 Type: Stiffness

Allow Rupture (ignored for 6-DOF spring)

Auto... Import... Export... Clear Del Row Ins Row

	Relative Displacement	Force
1	-10	-1.00000000e+012
2	-0.5	-5
3	0	0
4	0.5	5
5	10	1.00000000e+012
6		
7		
8		
9		
10		

a)

Define Nonlinear Spring Property

Add... Delete Copy... Save Discard OK Cancel

Property Number: 2 Type: Stiffness

Allow Rupture (ignored for 6-DOF spring)

Auto... Import... Export... Clear Del Row Ins Row

	Relative Displacement	Force
1	-1	-2
2	0	0
3	1	2
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

β)

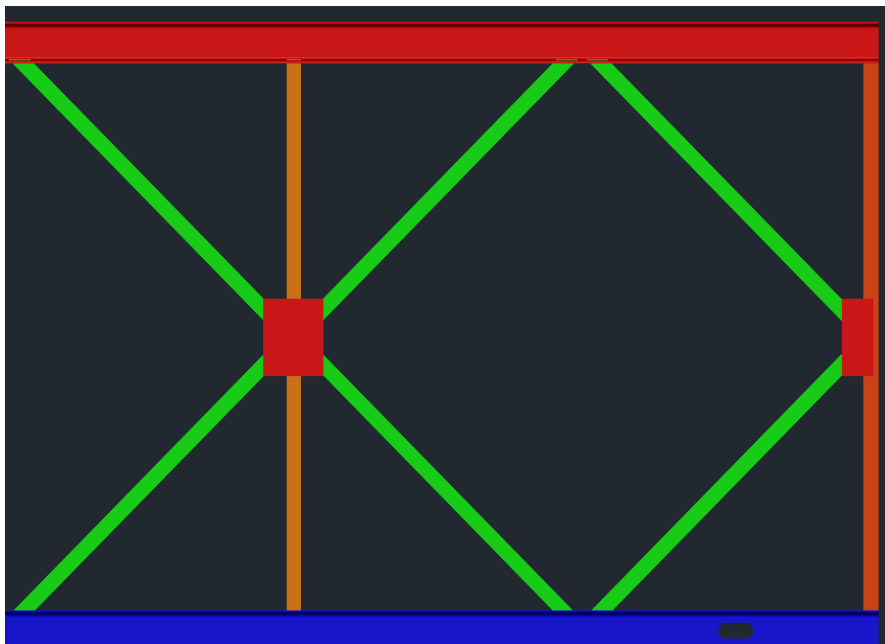
Σχήμα 4-6: Ορισμός μη γραμμικών ελατηρίων για την προσομοίωση της σύνδεσης πλαισίων στα στοιχεία δοκού  
α)για τους μεταφορικούς β.ε x,z β)για την στροφή περί τον άξονα του πείρου



Σχήμα 4-7: Σύνδεση πλαισίων σε κάτοψη

*Σύνδεση διαγωνίων με ορθοστάτες και χορδές πλαισίου*

Τα διαγώνια στοιχεία των ζευκτών συνδέονται με τους ορθοστάτες συγκολλητά μέσω ενός ελάσματος (Σχήμα 4-8) το οποίο μεταφέρει τάσεις και παραμορφώσεις από τα πέλματα των διαγωνίων στα πέλματα των ορθοστατών. Με πανομοιότυπο τρόπο χωρίς τη χρήση ελάσματος υλοποιείται και η αντίστοιχη σύνδεση με τα οριζόντια μέλη(συγκόλληση κορμού χορδής δικτυώματος με πέλμα διαγωνίου).



Σχήμα 4-8: Σύνδεση διαγωνίων σε ορθοστάτες και πέλματα

Υποθέτοντας την επάρκεια των εκάστοτε συγκολλήσεων, οι παραπάνω συνδέσεις θεωρούνται μονολιθικές και υλοποιούνται με κοινούς κόμβους.

### 4.3 Προσομοίωση μελών γέφυρας με στοιχεία δοκού

Όσον αφορά την μόνωση των διατομών υπάρχουν δύο πρότυπα

1. Το αμερικάνικο
2. Το βρετανικό

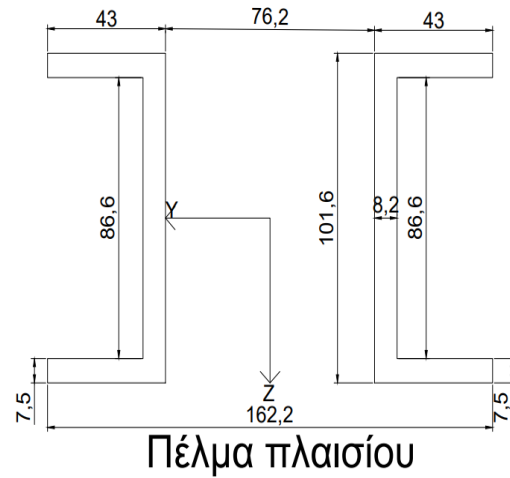
#### *Διατομή άνω και κάτω χορδής πλαισίου*

Στη περίπτωση της γέφυρας Bailey είναι χαρακτηριστικό ότι λόγω της καθορισμένης διαδικασίας παραγωγής των διαφόρων τμημάτων κατασκευάστηκε από πολλούς διαφορετικούς αναδόχους. Τα οριζόντια μέλη των πλαισίων αποτελούν μια ανοιχτή διατομή διπλού [ (channel) με τις διαστάσεις πέλματων και κορμού να διαφέρουν σε πολλές περιπτώσεις και από το Αμερικάνικο καθώς και από το Βρετανικό πρότυπο, σύμφωνα με διάφορες παχυμετρήσεις στο πεδίο.

Όσον αφορά τα ραβδωτά μέλη περίπτωση λήφθηκε υπόψη απλοποιητικά η ακόλουθη γεωμετρία διπλού channel. Για το πέλμα χρησιμοποιούνται δύο διατομές για καθαρά πρακτικούς λόγους καθώς επί των δοκών έχουν συγκολληθεί τεμάχια που απαιτούνται για τις συνδέσεις καθ' ύψος. Με τη χρήση των δύο διατομών σε απόσταση μεταξύ τους 76,2 mm επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη συγκόλληση των ορθοστατών και των χιαστί ενισχύσεων δημιουργώντας ταυτόχρονα άκαμπτους κόμβους δικτύματος.

- $H=101,6 \text{ mm}$
- $B=43 \text{ mm}$
- $A=2710,24 \text{ mm}^4$
- $t_w=8,2 \text{ mm}$
- $t_f=7,5 \text{ mm}$
- $I_{yy}=3749321 \text{ mm}^4$
- $I_{zz}=7318232 \text{ mm}^4$

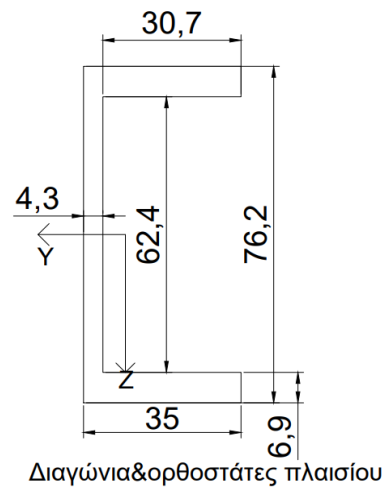
- $W_{el,y}=73805,53 \text{ mm}^3$
- $W_{el,z}=90237,14 \text{ mm}^3$



#### Διατομή ορθοστάτη και διαγώνιων μελών πλαισίου

Οι ορθοστάτες και τα διαγώνια μέλη αποτελούνται από μια ανοιχτή διατομή τύπου [ (channel) με τα ακόλουθα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά:

- $H=76,2 \text{ mm}$
- $B=35 \text{ mm}$
- $A(\text{εμβαδόν διατομής})=751,32 \text{ mm}^2$
- $t_w=4,3 \text{ mm}$
- $t_f=6,9 \text{ mm}$
- $I_{yy}=790108,4061 \text{ mm}^4$
- $I_{zz}=90363,2693 \text{ mm}^4$
- $W_{el,y}=20737,75 \text{ mm}^3$
- $W_{el,z}=5163,615 \text{ mm}^3$

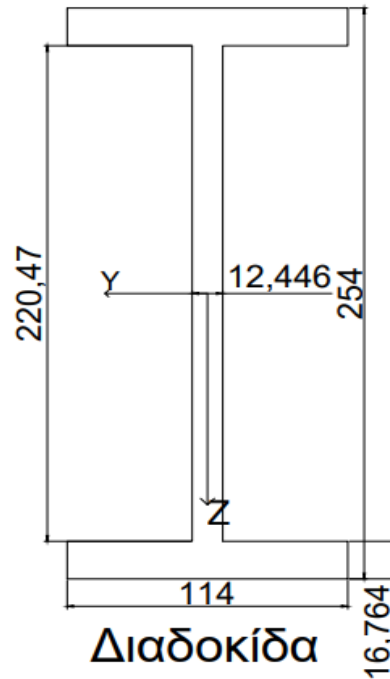


#### Διατομή διαδοκίδας

Η διατομή διαδοκίδας είναι τύπου I με την ακόλουθη γεωμετρία:

- $H=254 \text{ mm}$
- $B=114 \text{ mm}$

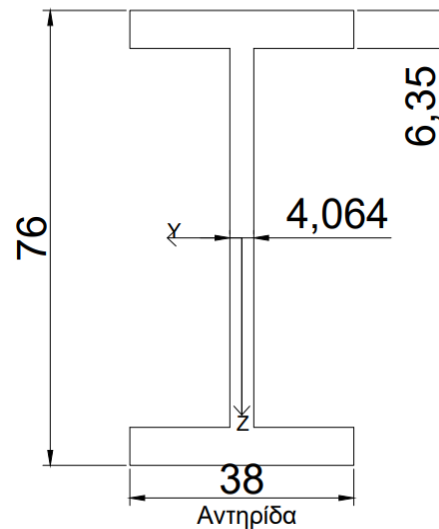
- $A=6566,187 \text{ mm}^2$
- $t_f=16,764 \text{ mm}$
- $t_w=12,446 \text{ mm}$
- $I_{yy}= 64983618 \text{ mm}^4$
- $I_{zz}= 4174855 \text{ mm}^4$
- $W_{el,y}=511682 \text{ mm}^3$
- $W_{el,z}=73243,07 \text{ mm}^3$



#### Διατομή αντηρίδας

Η πλευρική εξασφάλιση των πλαισίων συντελείται από ένα μέλος μήκους 1,11m τύπου I με ενισχύσεις στα άκρα όπου συνδέεται με την διαδοκίδα και με το πλαίσιο.

- $H=76 \text{ mm}$
- $B=38 \text{ mm}$
- $A=739,8512 \text{ mm}^2$
- $t_f=6,35 \text{ mm}$
- $t_w=4,064 \text{ mm}$
- $I_{yy}=672807,7 \text{ mm}^4$
- $I_{zz}=58426,93 \text{ mm}^4$
- $W_{el,y}=17705,47 \text{ mm}^3$
- $W_{el,z}=3075,102 \text{ mm}^3$



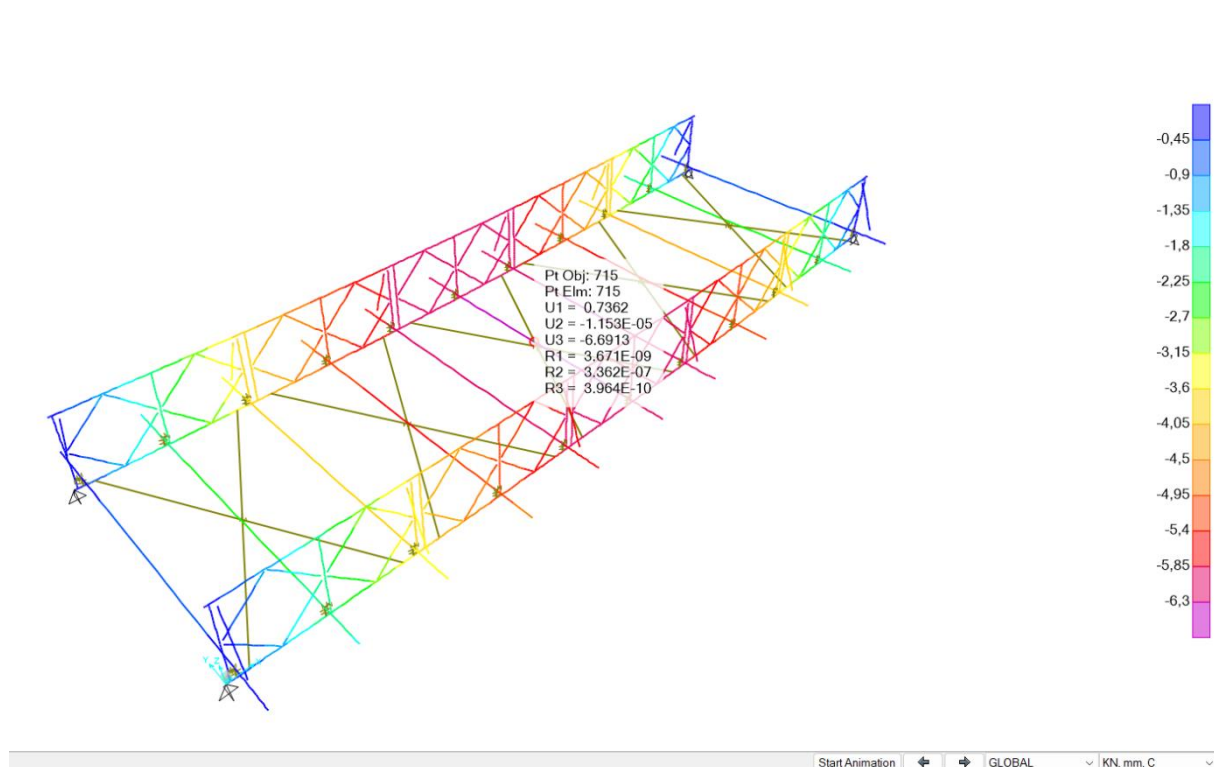
#### Διατομή αντιανεμίου

Η ανάληψη πλευρικών δυνάμεων λόγω ανέμου γίνεται από ένα χιαστί στοιχείο δικτυώματος κυκλικής διατομής διαμέτρου 29 mm το οποίο συνδέεται στο κάτω πέλμα του πλαισίου.

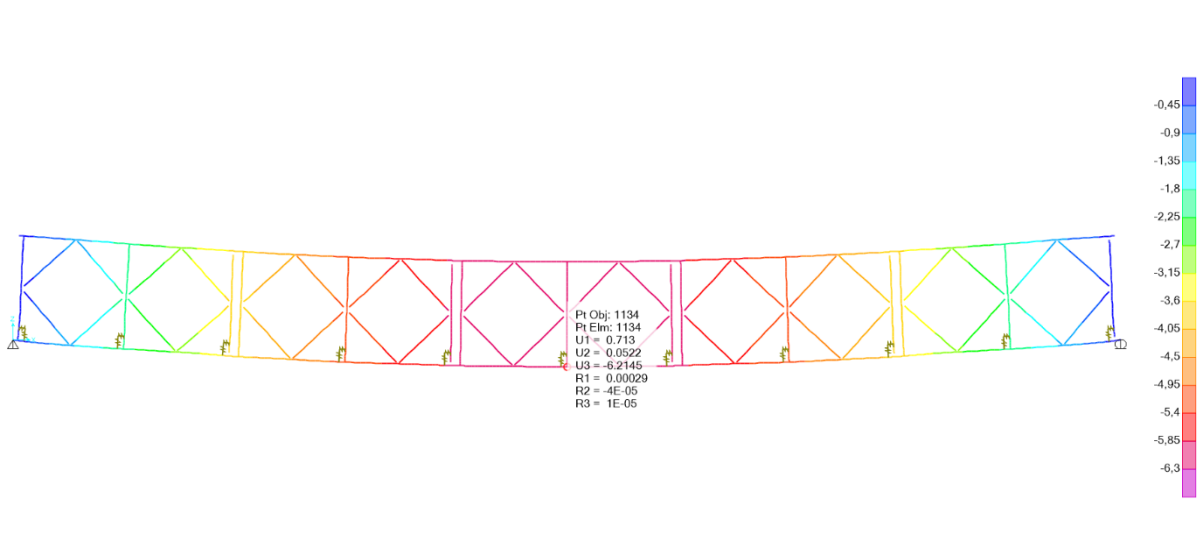
Ο Αμερικάνικος Κανονισμός δίνει πλήρεις πληροφορίες σχετικά με τα γεωμετρικά στοιχεία και την τελική μορφοποίηση της γέφυρας. Τα κύρια μέρη των πλαισίων, οι διαδοκίδες οι αντηρίδες οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας καθώς και οι θηλυκοί και οι αρσενικοί υποδοχείς που αποτελούν τον κόμβο σύνδεσης πλαισίων εισήχθησαν γεωμετρικά όπως ακριβώς προέβλεπαν οι κανονιστικές διατάξεις ενώ για λόγους υπολογιστικού φόρτου όλα τα υπόλοιπα μέλη όπως οι μηκίδες και το κατάστρωμα λήφθηκαν υπόψη ως μόνιμα φορτία της κατασκευής. Το κατάστρωμα άλλωστε σε καμία των περιπτώσεων όντας ξύλινο δεν μπορεί να επιτελέσει ρόλο διαφράγματος, όπως αντίστοιχα μια πλάκα σκυροδέματος. Οι άνω και κάτω χορδές των πλαισίων μοντελοποιήθηκαν με τα αδρανειακά τους χαρακτηριστικά ως general section.

#### **4.4 Βαθμονόμηση ραβδωτών μοντέλων**

Σε αρχικό στάδιο ο ραβδωτός φορέας επιλύθηκε με τη βοήθεια του στατικού προγράμματος SAP 2000 με αρχική φόρτιση το ι.β όλων των μελών που τον απαρτίζουν, σύμφωνα πάντα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό. Για να ληφθούν υπόψη τα μέλη που δεν έχουν εισαχθεί κατά την προσομοίωση, όπως οι μηκίδες και το ξύλινο κατάστρωμα, επαυξήθηκε με συντελεστές ο υπολογισμός του ι.β των υπόλοιπων μελών. Ο ίδιος κάρναβος με κάποιες τροποποιήσεις σε περιβάλλον Autocad όσον αφορά τις εκκεντρότητες των μελών, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε και στα υπόλοιπα προγράμματα. Σε αρχικό στάδιο όλες οι συνδέσεις των διαγωνίων, ορθοστατών, αντηρίδων και διαδοκίδων μεταξύ τους μοντελοποιήθηκαν ως συνδέσεις ροπής. Η σύνδεση πλαισίων υλοποιήθηκε και αυτή μονολιθικά με ελευθέρωση ροπής μόνο περί τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας. Για την βαθμονόμηση των τελικών μοντέλων, και κυρίως την πρόληψη σφαλμάτων κατά την μεταφορά του μοντέλου, καταγράφηκε η εικόνα παραμόρφωσης και η οποία έδειχνε μια βύθιση των πλαισίων κατά 6,21 mm (Σχήμα 4-9) ενώ η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρήθηκε στο μέσον της μεσαίας διαδοκίδας κατά τι μεγαλύτερη όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-10(6,69 mm).

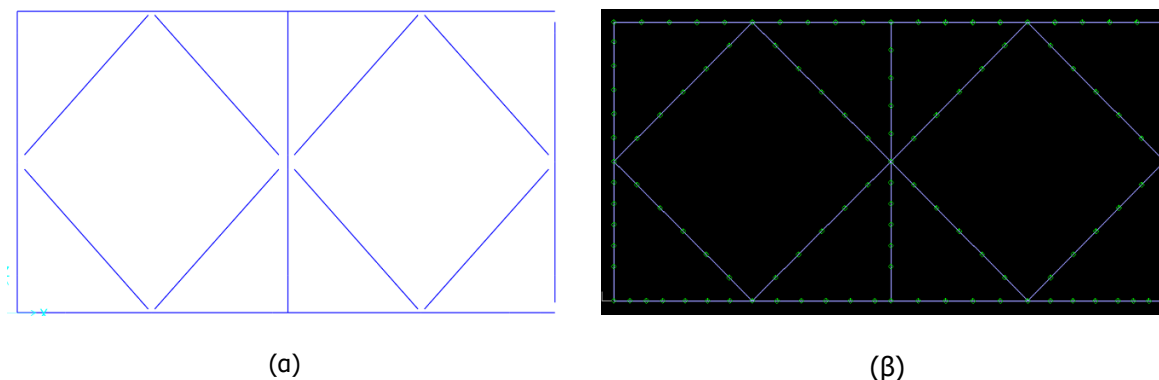


Σχήμα 4-9: Μοντέλο Sap, μέγιστη βύθιση φορέα υπό μόνιμα φορτία



Σχήμα 4-10: Μοντέλο Sap, μέγιστη βύθιση πλαισίων υπό μόνιμα φορτία

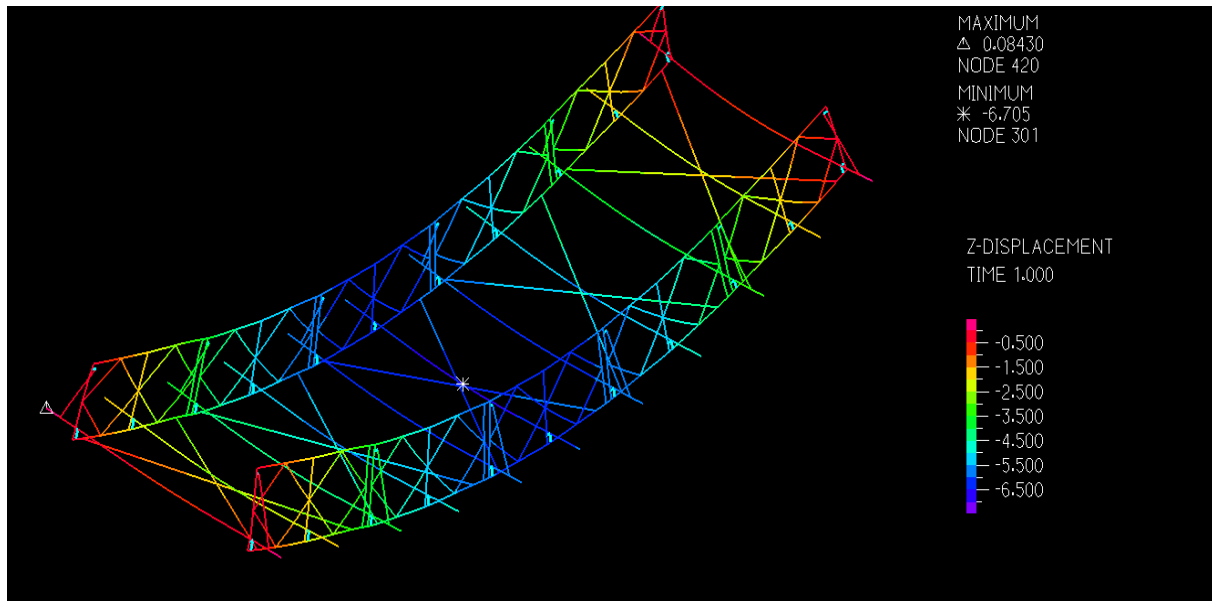
Επιλέχθηκε για λόγους υπολογιστικού κόστους τα διαγώνια μέλη των πλαισίων να συνδέονται κεντρικά με κοινούς κόμβους τις άνω και κάτω χορδές και όχι έκκεντρα με body constraints, όπως παρουσιάζει , και ο διαφοροποιημένος φορέας διακριτοποιήθηκε στο πρόγραμμα femap με ραβδωτά στοιχεία δοκού, εξαιρουμένων των αντανεμιών, για την προσομοίωση των οποίων προτιμήθηκε το στοιχείο δικτυώματος(Σχήμα 4-11).



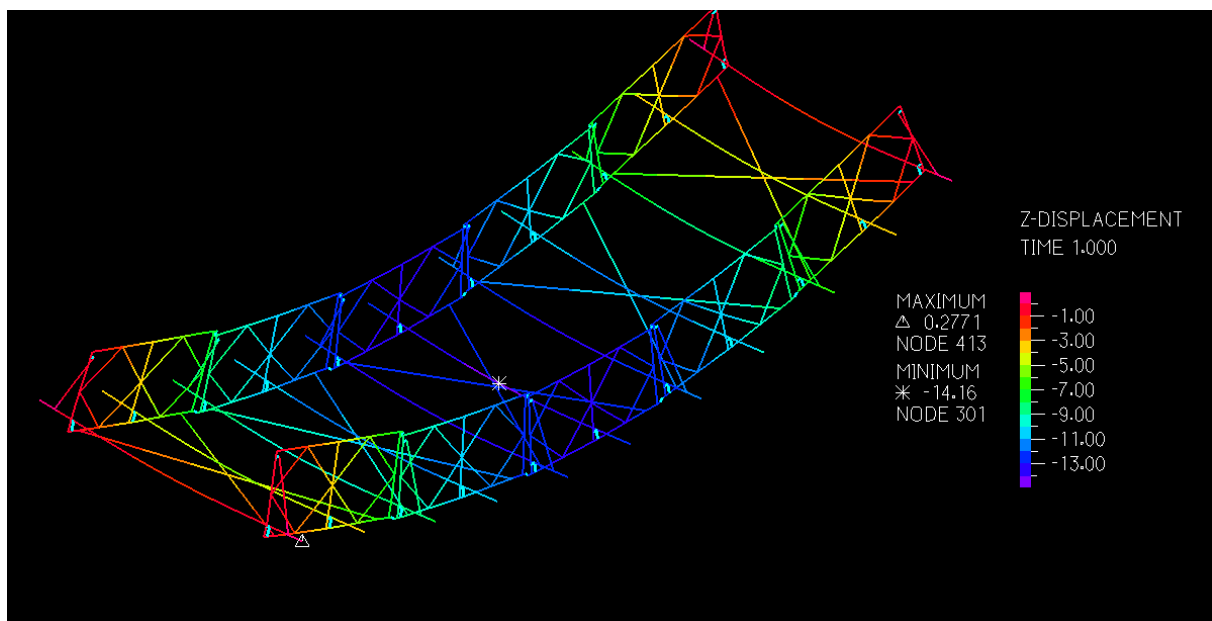
Σχήμα 4-11: α) Εκκεντρότητα μελών πλαισίου στο μοντέλο του Sap, β)κεντροβαρικά συνδεδεμένα μέλη στο adina

Στο πρόγραμμα στο οποίο έγιναν οι τελικές αναλύσεις (adina) μορφοποιήθηκαν δύο μοντέλα με διαφοροποιήσεις στη σύνδεση πλαισίου-πλαisiού. Στο ένα όπως και στο μοντέλο του SAP σε κάθε άκρο πλαισίου, ελευθερώθηκε η καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα ενώ στο άλλο μοντέλο όπως έχει προαναφερθεί εισήχθησαν μη γραμμικά ελατήρια για να προσομοιωθεί η ανοχή. Ενδεικτικά να σημειωθεί πως ο λόγος που επιλέχθηκε μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση της σύνδεσης και κυρίως της ανοχής μεταξύ άντυγας πείρου στα ραβδωτά μέλη αναδεικνύεται σε προσεχές κεφάλαιο. Το μοντέλο με την ελευθέρωση έδωσε και αυτό 6,2 mm βύθιση πλαισίου και μέγιστη παραμόρφωση 6,705 mm στη μεσαία διαδοκίδα(Σχήμα 4-12) ενώ το άλλο με την αναλυτικότερη σύνδεση πλαισίων έβγαλε υπερδιπλάσιες παραμορφώσεις καθώς η μέγιστη βύθιση του πλαισίου καταγράφηκε στα 13,15 mm ενώ συνολικά του φορέα στα 14,16 mm(Σχήμα 4-13). Οι διαφορές που παρατηρούνται λόγω της προσομοίωσης της ανοχής επηρεάζουν άρδην τα συνολικά μεγέθη παραμόρφωσης του φορέα, ενώ δεν παρατηρείται ιδιαίτερη επίδραση της παραδοχής συνδέσεων πλήρους μεταφοράς εντατικών μεγεθών σε όλα τα μέλη, εξαιρουμένων των πλαισίων μεταξύ τους(μοντέλο sap), σε σχέση με την πιθανότατα ρεαλιστικότερη προσομοίωση με κατάλληλες ελευθερώσεις όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2



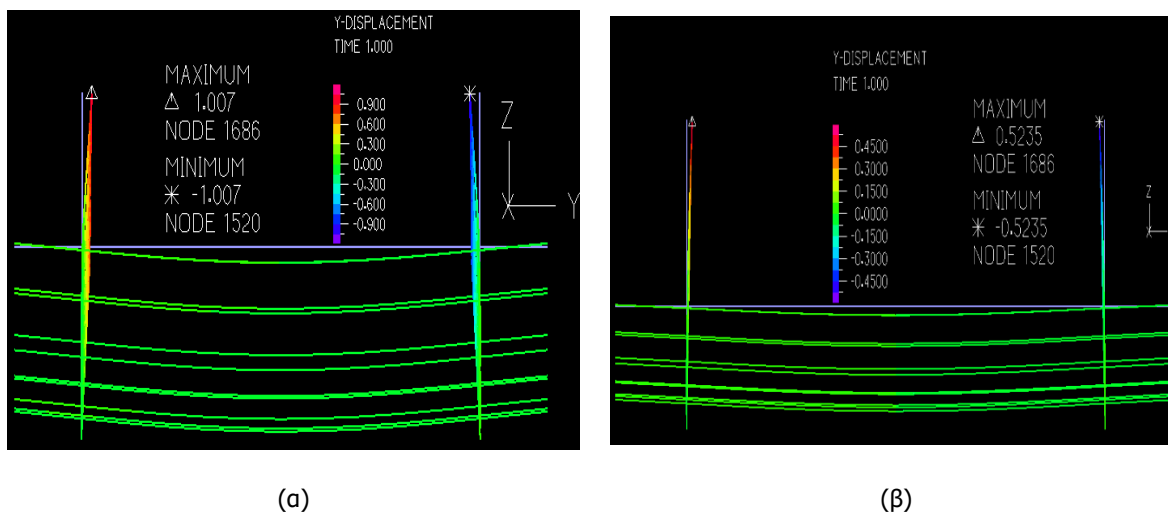


Σχήμα 4-12: Βύθιση φορέα με ελευθέρωση ροπής στη σύνδεση πλαισίων υπό το ίδιο βάρος της κατασκευής



Σχήμα 4-13: Βύθιση φορέα με μη γραμμικά ελατήρια στη σύνδεση πλαισίων υπό το ίδιο βάρος της κατασκευής

Στα πιο ευπαθή μέλη σε καθολικό λυγισμό όπως είναι οι κύριες δικτυωτοί δοκοί δεν παρατηρείται σημαντική πλευρική μετακίνηση καθολικά υπό τη δράση των μόνιμων φορτίων καθώς στο πλαίσιο η εκτροπή είναι της τάξης του 1,007 mm στο μοντέλο με τα ελατήρια ενώ υποδιπλάσια ( 0,5235 )mm στο μοντέλο με την ελευθέρωση ροπής(Σχήμα 4-14).



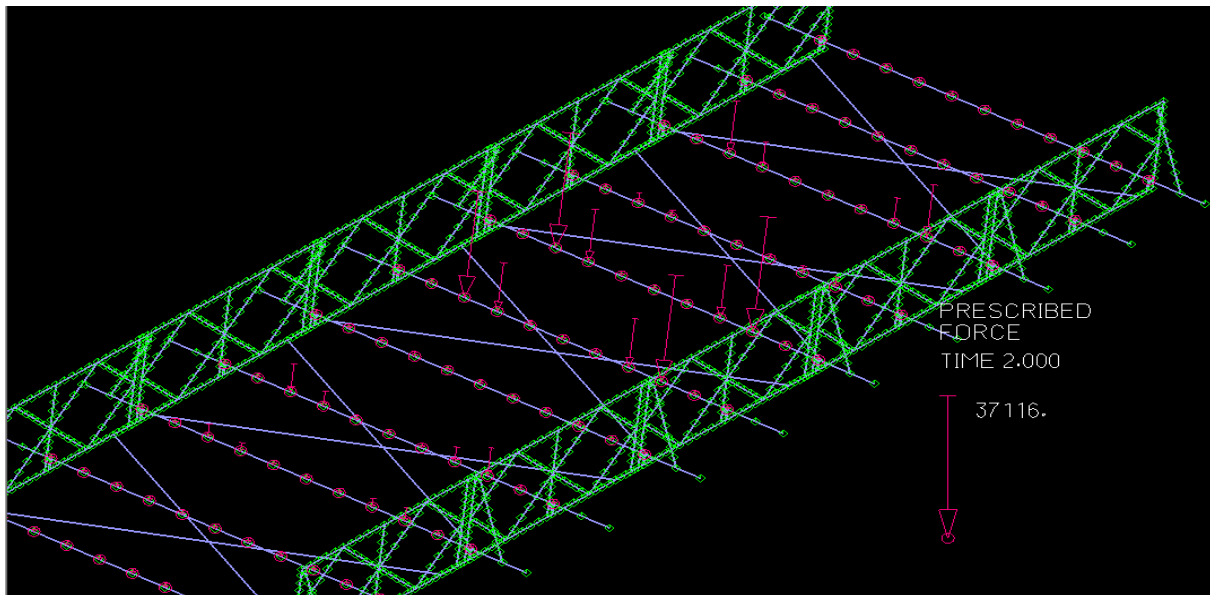
Σχήμα 4-14:α) Πλευρική εκτροπή πλαισίου σε εγκάρσια όψη γέφυρας υπό το ίδιο βάρος α)μοντέλο με ελατήρια β)μοντέλο με ελευθέρωση ροπής(με γαλάζιο φαίνεται ο αρχικός अपαραμόρφωτος φορέας)

Στη συνέχεια ο φορέας φορτίστηκε με τα κινητά φορτία που προβλέπει ο Αμερικάνικος Κανονισμός και πραγματοποιήθηκαν ελαστικές αναλύσεις μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Το μοντέλο δεν εμφάνιζε λίστες αριθμητικών αποτελεσμάτων στα ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία συνεπώς υπολογίστηκαν για τις διάφορες συνθήκες φόρτισης οι ορθές τάσεις και συγκρίθηκαν με το όριο διαρροής.

#### 4.5 Ελαστικές αναλύσεις για διάφορες συνθήκες κυκλοφορίας

*Έλεγχος ορθών τάσεων για κατάσταση κυκλοφορίας normal(συνδυασμός  $1,35 \times G_{i,B} + 1 \times NORMAL$ ) σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό*

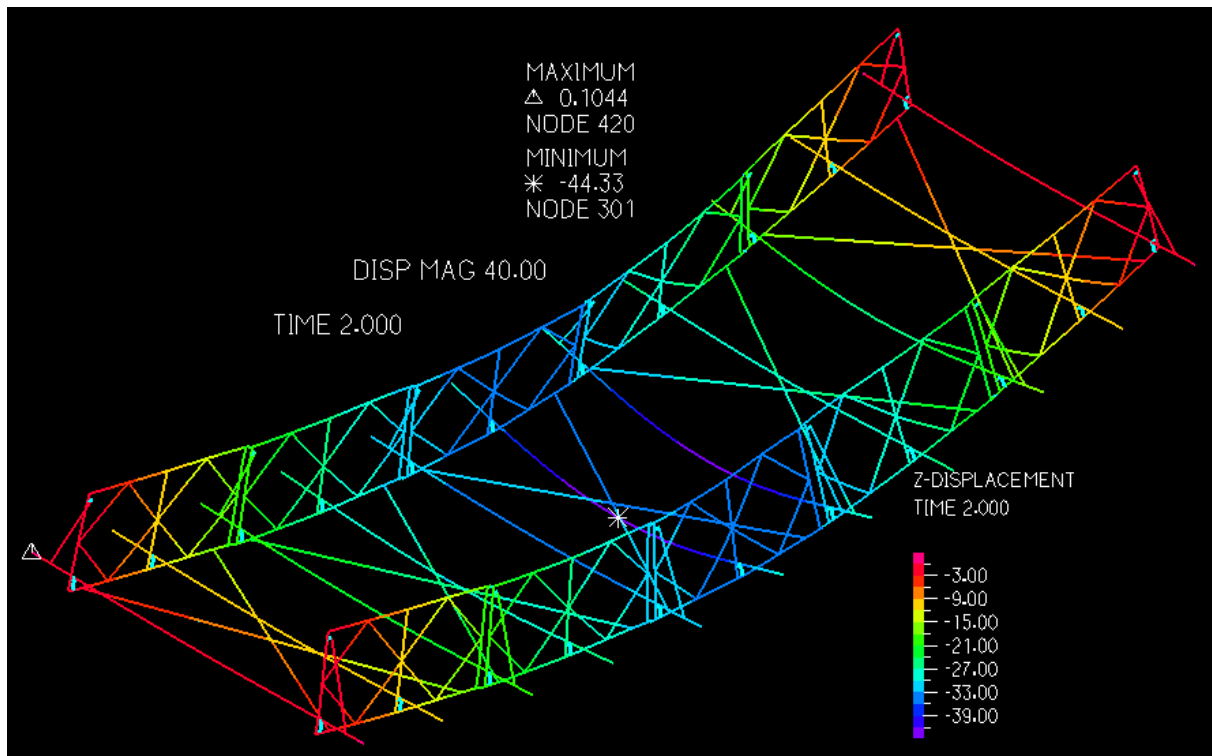
Εφαρμόστηκε το όχημα της κατηγορίας 24,βάρους 28 τόνων, που προβλέπεται(Σχήμα 3-12) για την συγκεκριμένη συνθήκη κυκλοφορίας με γνώμονα ο ένας εκ των τεσσάρων αξόνων, και συγκεκριμένα εκείνος που φέρει το μεγαλύτερο βάρος του οχήματος, να βρίσκεται στη διαδοκίδα που συνδέεται με τον ορθοστάτη, στον οποίο στη συνέχεια θα ενσωματωθεί το αναλυτικό μοντέλο. Κατά τον διαμήκη άξονα του φορέα υπολογίστηκαν οι ζώνες επιρροής των δοκαριών και το ποσοστό ανάληψης φορτίου του καθένα, ανάλογα τις αποστάσεις των τεσσάρων αξόνων. Ομοίως εγκαρσίως οι δυνάμεις αναλύθηκαν με βάση τις αποστάσεις των τροχών σε επικόμβιες ανάλογα με τις αποστάσεις των σημείων εφαρμογής στην πραγματική κατασκευή με τους μοντελικούς κόμβους. Ειδικότερα το όχημα κλάσης 24 των τεσσάρων τοποθετήθηκε με γνώμονα ο άξονας με το μέγιστο βάρος (10t) να βρίσκεται σε απόσταση 0,157 m από την πλησιέστερη διαδοκίδα στον κόμβο (μεταξύ 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> διαδοκίδας), σύμφωνα με την διαμήκη ανάλυση. Η απόσταση των δοκαριών είναι 1,599 m και ο τροχός του κάθε άξονα έγκειται μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κόμβου από το σημείο σύνδεσης με τον ορθοστάτη. Το κάθε δοκάρι καταπονείται από ποσοστά του βάρους των αξόνων (πχ η 5<sup>η</sup> διαδοκίδα αναλαμβάνει  $10t \times \frac{1,599-0,157}{1,599} = 9,018 t$ ) και ο κάθε κόμβος από τους 4 συνολικά ανά διαδοκίδα αναλαμβάνει ένα μέρος του τροχού. Συνολικά οι διαδοκίδες που εντείνονται από τα οχήματα γενικά της κάθε συνθήκης κυκλοφορίας είναι 6 (5<sup>η</sup>, 6<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 8<sup>η</sup>, 9<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> κατά φθίνουσα σειρά ποσοστού ανάληψης) Το Σχήμα 4-15 δείχνει ενδεικτικά την φόρτιση της γέφυρας σε κατάσταση normal. Η ίδια λογική ακολουθήθηκε και σε όλες τις καταστάσεις φόρτισης. Ο υπολογισμός των τάσεων έγινε μέσω του τύπου  $\sigma=N/A+M/W_{el}$ .



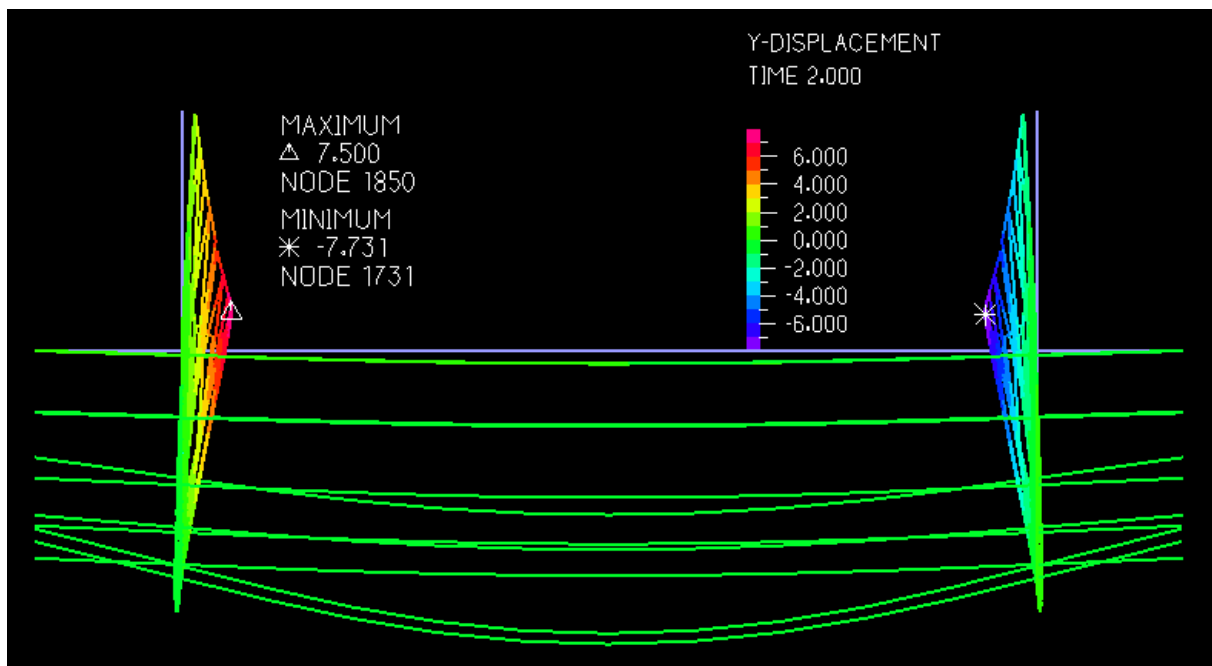
Σχήμα 4-15: Φόρτιση γέφυρας σε δύο στάδια σε κανονική συνθήκη κυκλοφορίας

- Αντηρίδα→23,17 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), ποσοστό επί του ορίου διαρροής→6,72 %
- Διαδοκίδα→115,97 MPa , ποσοστό επί του ορίου διαρροής→33,64 %
- Αρσενικός υποδοχέας →59,42 MPa(κάμψη περί τον ισχυρό), 69,76 MPa(κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής→17,24 % και 20,24 % αντίστοιχα
- Θηλυκός υποδοχέας→55,59 MPa(κάμψη περί τον ισχυρό), 54,57 MPa(κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής→16,13 % και 15,83 % αντίστοιχα
- Χορδές πλαισίου→214,06 MPa(κάμψη περί τον ισχυρό), 162,78 MPa(κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής→62,09 % και 47,22 % αντίστοιχα
- Ορθοστάτες και διαγώνια μέλη πλαισίου→166,5 MPa(κάμψη περί τον ισχυρό), 187,65 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής→48,3 % και 54,43 % αντίστοιχα

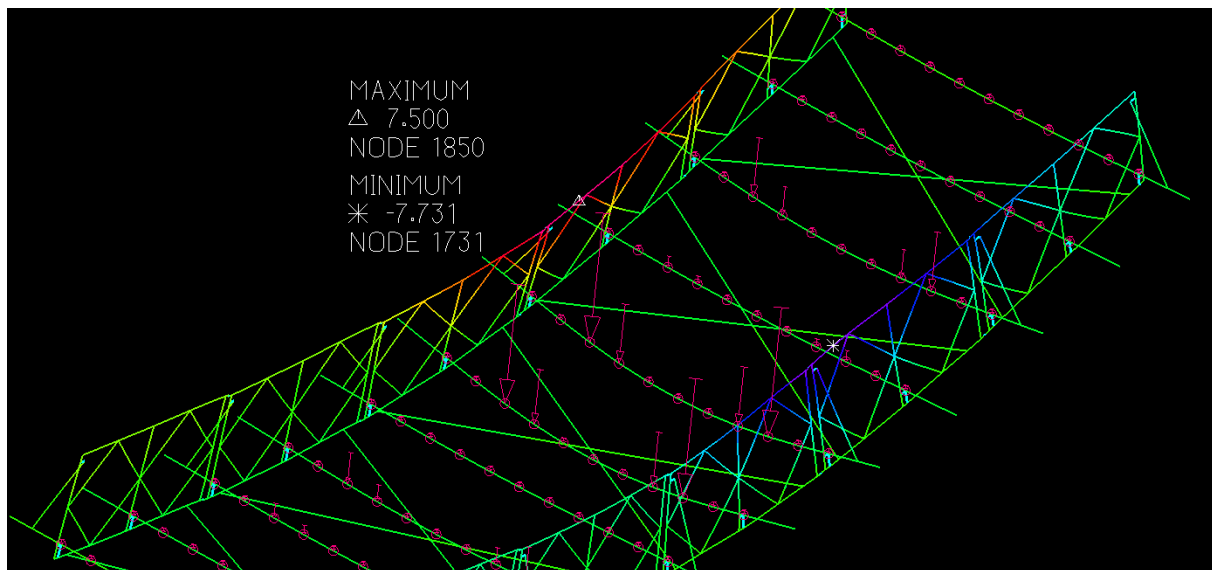
Παρακάτω φαίνεται ο εντονότερος πλευρικός καθολικός λυγισμός της άνω χορδής του πλαισίου(Σχήμα 4-17), καθώς και η μέγιστη βύθιση του φορέα υπό τον κείμενο συνδυασμό(Σχήμα 4-16). Η μέγιστη τιμή του, η οποία συναντάται σε κόμβο του φατνώματος όπου η αντίστοιχη διαδοκίδα καταπονείται από τον άξονα μέγιστου βάρους(Σχήμα 4-18), ανέρχεται σε επταπλάσια αυτής της φόρτισης μόνο του ι.β του φορέας



Σχήμα 4-16: Παραμόρφωση ραβδωτού φορέα υπό το συνδυασμό  $1,35 \times G + 1 \times \text{Normal}$



Σχήμα 4-17: Καθολικός λυγισμός άνω χορδής πλαισίου σε εγκάρσια όψη



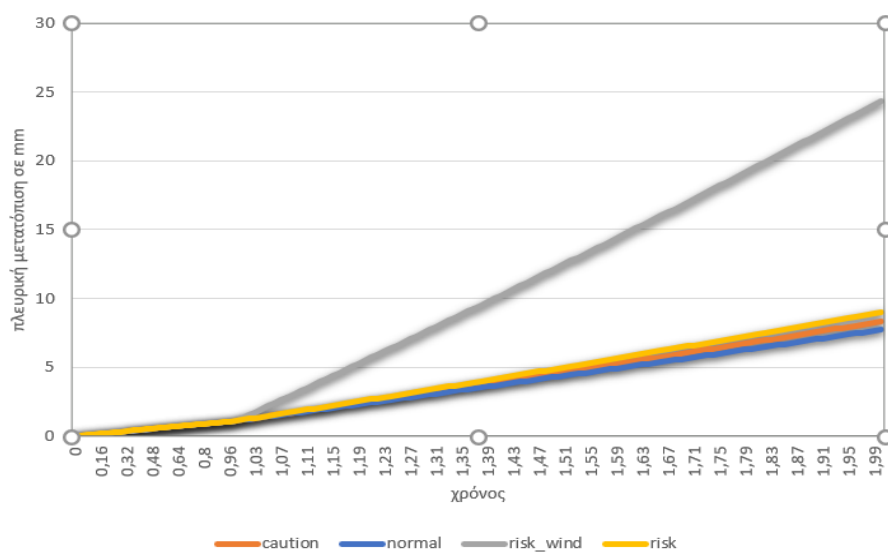
Σχήμα 4-18: Σημεία μέγιστης πλευρικής εκτροπής πλησίον μέγιστου αξονικού φορτίου

*Έλεγχος ορθών τάσεων για κατάσταση κυκλοφορίας caution ( $1,35 \times G_{L,B} + 1 \times CAUTION$ ) σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό:*

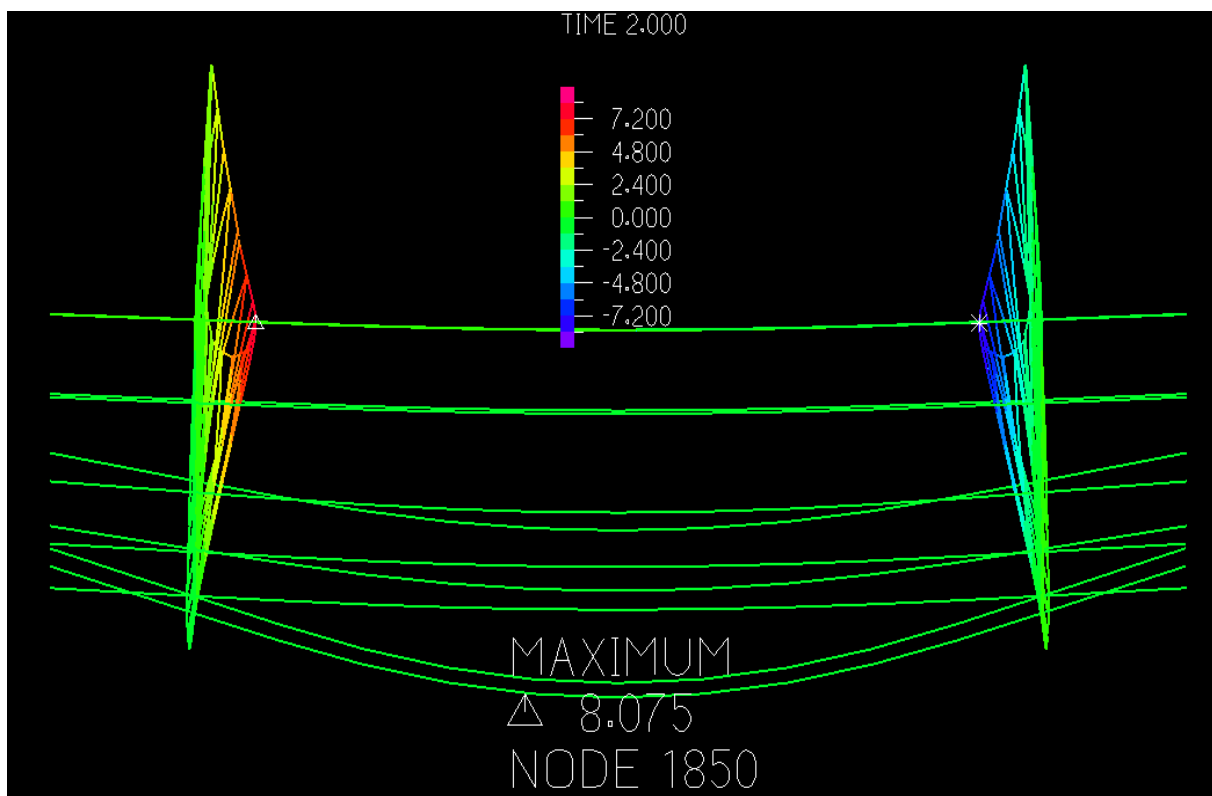
Με όμοιο τρόπο επιβλήθηκε το όχημα της συνθήκης κυκλοφορίας caution σε επικόμεβιες δυνάμεις, σύμφωνα με την κατανομή των τροχών στο Σχήμα 3-12

- Αντηρίδα → 30,41 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 8,82 %
- Διαδοκίδα → 122,96 MPa, ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 35,67 %
- Αρσενικός υποδοχέας → 64,62 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 75,54 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 18,74 % και **21,91 %** αντίστοιχα
- Θηλυκός υποδοχέας → 60,71 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 59,56 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 17,61 % και 17,28 % αντίστοιχα
- Χορδές πλαισίου → 233,94 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 177,37 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 67,86 % και 51,45 % αντίστοιχα
- Ορθοστάτες και διαγώνια μέλη πλαισίου → 181,45 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 204,3 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 52,64 % και 59,26 % αντίστοιχα

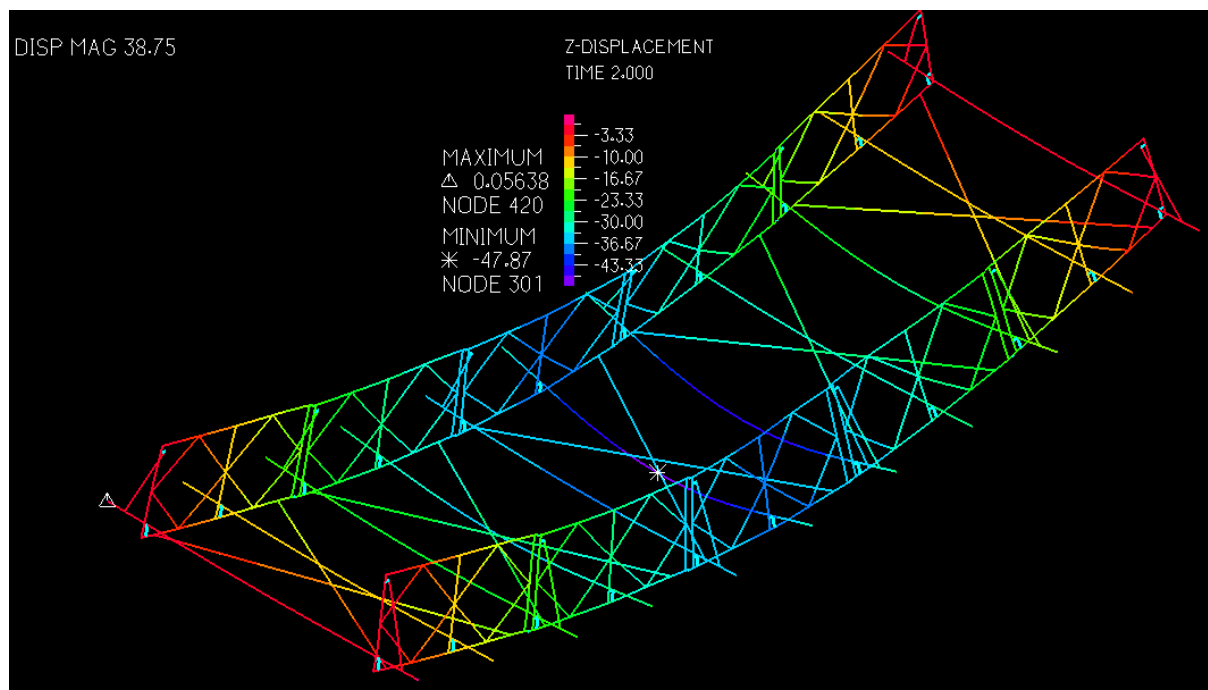
Παρακάτω φαίνεται ο πιο έντονος πλευρικός καθολικός λυγισμός της άνω χορδής του πλαισίου (Σχήμα 4-20) καθώς και η μεγαλύτερη βύθιση του (Σχήμα 4-21). Η μέγιστη τιμή του (8,075mm), η οποία συναντάται σε κόμβο του φανώματος όπου η αντίστοιχη διαδοκίδα καταπονείται από τον άξονα μέγιστου βάρους, παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 7,67 %, ενώ η μέγιστη μετατόπιση κατά τον κατακόρυφο άξονα αυξάνεται κατά 7,99 %. Στο Σχήμα 4-19 φαίνονται οι συγκρίσεις όσον αφορά την εκτροπή του πλαισίου υπό διάφορα φορτία.



Σχήμα 4-19: Συγκρίσεις πλευρικής εκτροπής πλαισίου για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό



Σχήμα 4-20: Πλευρική εκτροπή πλαισίου στον συνδυασμό 1,35xG+1xCAUTION



Σχήμα 4-21: Μέγιστη βύθιση ραβδωτού φορέα για τον συνδυασμό  $1,35 \times G + 1 \times CAUTION$

*Έλεγχος ορθών τάσεων για κατάσταση κυκλοφορίας caution ( $1,35 \times G_{I,B} + 1 \times RISK$ ) σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό:*

- Αντηρίδα → 24,8 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 6,59 MPa (κάμψη περί τον ασθενή άξονα), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 7,2 % και 1,9 % αντίστοιχα
- Διαδοκίδα → 128,33 MPa, ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 37,23 %
- Αρσενικός υποδοχέας → 62,54 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 77,65 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 18,14 % και 22,52 % αντίστοιχα
- Θηλυκός υποδοχέας → 60,51 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 60,3 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 17,55 % και 19,14 % αντίστοιχα
- Χορδές πλαισίου → 189,98 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 175,32 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 73,3 % και 56,88 % αντίστοιχα
- Ορθοστάτες και διαγώνια μέλη πλαισίου → 174,18 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 171,76 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 50,53 % και 63, % αντίστοιχα

*Έλεγχος ορθών τάσεων για κατάσταση κυκλοφορίας caution ( $1,35 \times G_{I,B} + 1 \times RISK + 1 \times WIND$ ) σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό:*

- Αντηρίδα → 39,58 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 14,89 MPa (κάμψη περί τον ασθενή άξονα), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 11,48 % και 4,32 % αντίστοιχα
- Διαδοκίδα → 133,68 MPa, ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 38,78 %
- Αρσενικός υποδοχέας → 70,13 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 49,53 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 20,34 % και 14,37 % αντίστοιχα
- Θηλυκός υποδοχέας → 65,83 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 65,97 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 19,09 και 19,14 % αντίστοιχα
- Χορδές πλαισίου → 252,7 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 196,1 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 73,3 % και 56,88 % αντίστοιχα
- Ορθοστάτες και διαγώνια μέλη πλαισίου → 197,98 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 217,98 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 57,43 % και 63,23 % αντίστοιχα

Όσον αφορά την φόρτιση με τον συνδυασμό σε ΟΚΑ του Ευρωκώδικα σταματάει στο 83% τοις εκατό της φόρτισης καθώς έχω έντονους λυγισμούς στις διαδοκίδες και στα πλαίσια). Σε επόμενο κεφάλαιο θα δοκιμαστεί να επιβληθεί το ίδιο φορτίο υπό κατανομή και όχι συγκεντρωμένο στις αντίστοιχες διαδοκίδες,



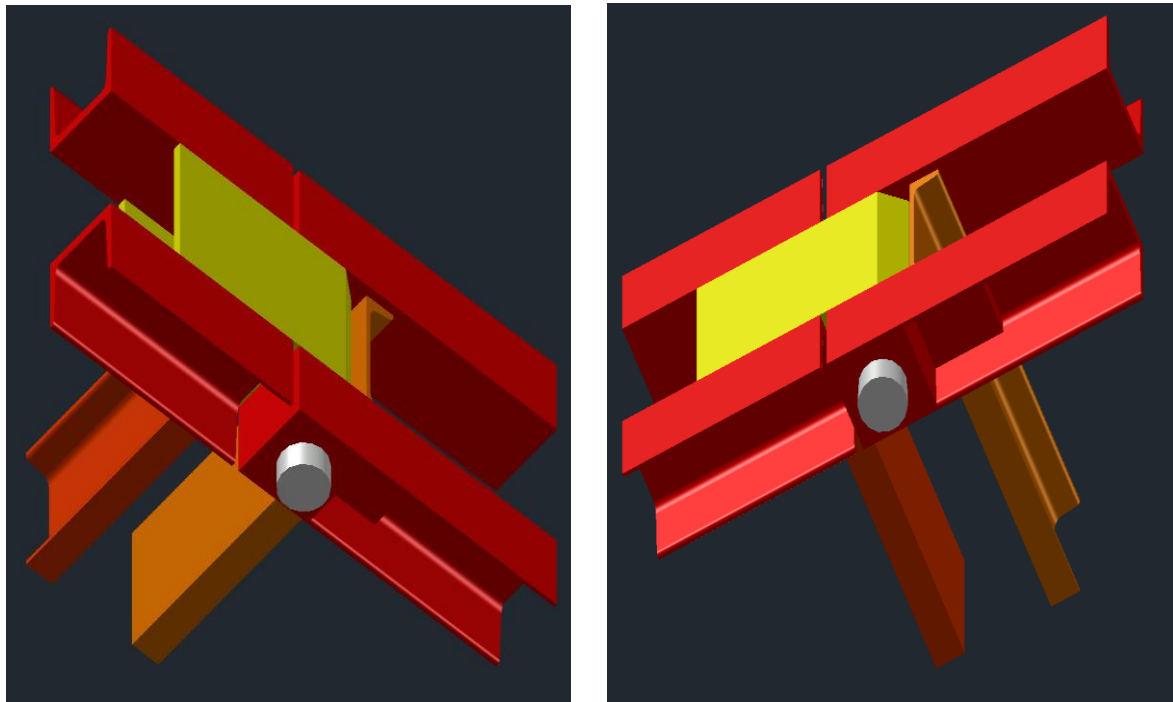
## 5 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΟΜΒΟΥ

### 5.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόμβου σύνδεσης πλαισίων

Όπως προαναφέρθηκε η σύνδεση των πλαισίων γίνεται μέσω μιας αρθρωτής σύνδεσης(Σχήμα 5-1) που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων:

1. Έναν αρσενικό υποδοχέα με οριζόντια μέλη ενίσχυσης
2. Δύο θηλυκούς υποδοχείς
3. Έναν πείρο σύνδεσης(panel pin)

Επισημαίνεται εκ νέου ότι στα άνωθεν μέλη συμπεριλήφθηκε για την μοντελοποίηση και τα εκατέρωθεν τμήματα των οριζόντιων και κατακόρυφων μελών σε μήκος 300mm. Ο ορθοστάτης του μέλους από την πλευρά του αρσενικού υποδοχέα(Σχήμα 5-2), συγκολλάται στην κάτω πλευρά του, ενώ ο άλλος ορθοστάτης με μεγαλύτερο μήκος συνεχίζει και συγκολλάται στον κορμό του πέλματος. Οι υποδοχείς μεταξύ τους απλά έρχονται σε επαφή με την τοποθέτηση του πείρου. Οι οριζόντιες ενισχύσεις του αρσενικού τεμάχους, εφόσον διακριτοποιήθηκαν με στοιχεία κελύφους συνδέονται συγκολλητά με το υπόλοιπο μέρος του υποδοχέα.



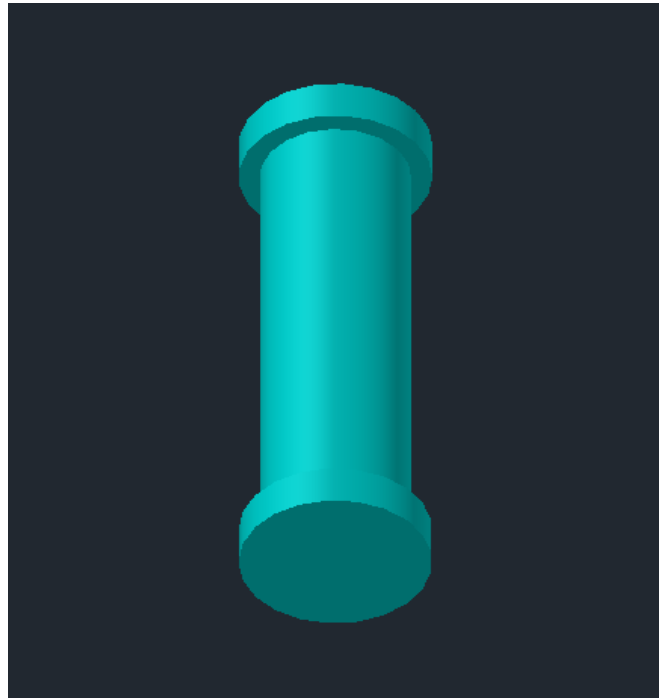
Σχήμα 5-1: Γεωμετρία κόμβου σύνδεσης πλαισίων



Σχήμα 5-2: Γεωμετρία σύνδεσης ορθοστάτη στον αρσενικό υποδοχέα(κίτρινο χρώμα)

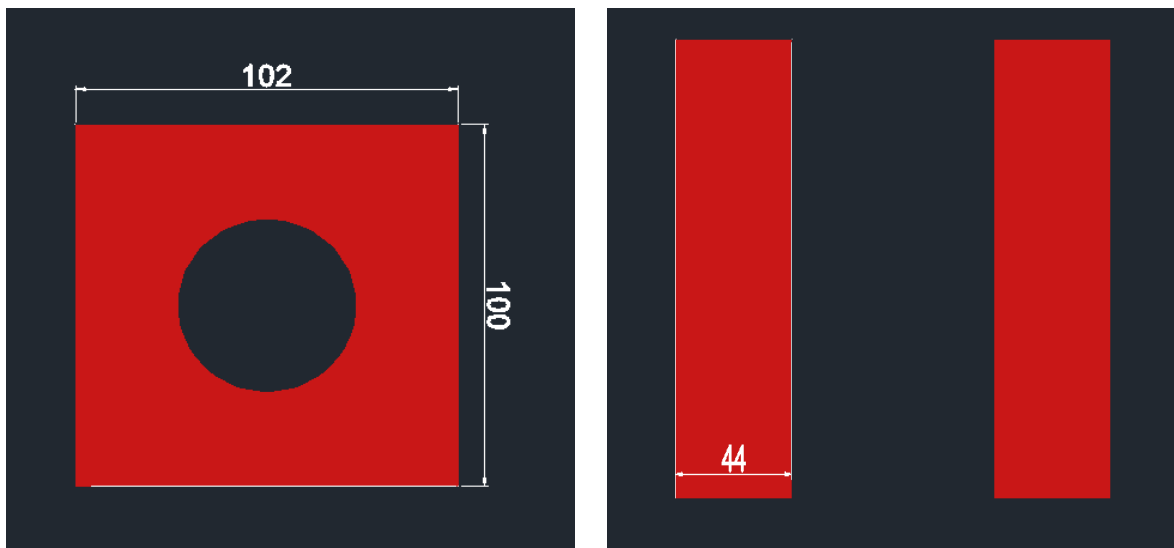
Απλοποιητικά ο πείρος μορφοποιήθηκε χωρίς εγκοπή και σύρμα όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.2.2 με παξιμάδι με τα αναγραφόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά

- Διάμετρος  $D=47$  mm
- Μήκος  $L=211$  mm
- Διάμετρος παξιμαδιού  $D_n=60$  mm



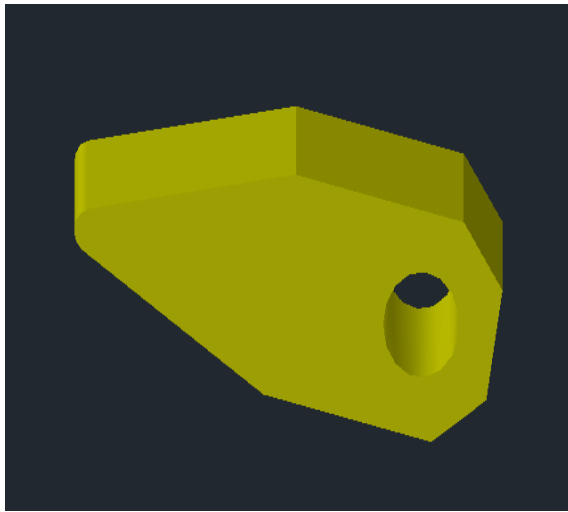
Σχήμα 5-3: Σχεδίαση πείρου σύνδεσης πλαισίων

Τα θηλυκά τεμάχια(Σχήμα 5-4) στα οποία απολήγουν στο ένα από τα δύο άκρα τα πέλματα του πλαισίου διαμορφώθηκαν με οπές κατά τι μεγαλύτερες από τη διάμετρο του πείρου( προφανώς κοινή η γεωμετρία της οπής και στο αρσενικό), με ανοχή της τάξης των 0,5 mm. Είναι ορθογωνικά με διαστάσεις 100×102×44 mm

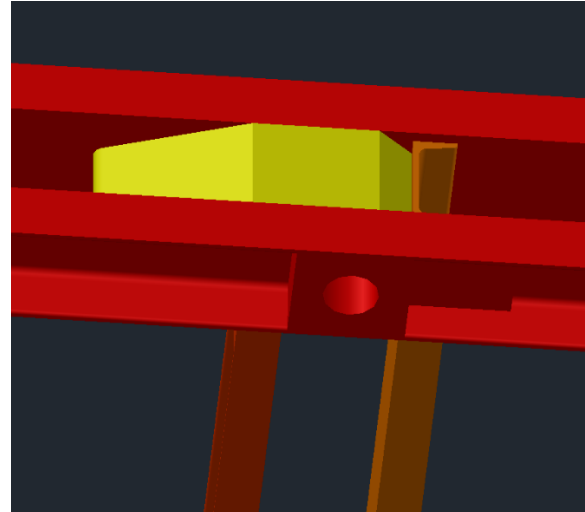


Σχήμα 5-4: Γεωμετρία θηλυκού τεμάχους

Όσον αφορά τον αρσενικό υποδοχέα η αρχική του μορφή ήταν η ακόλουθη(Σχήμα 5-5)

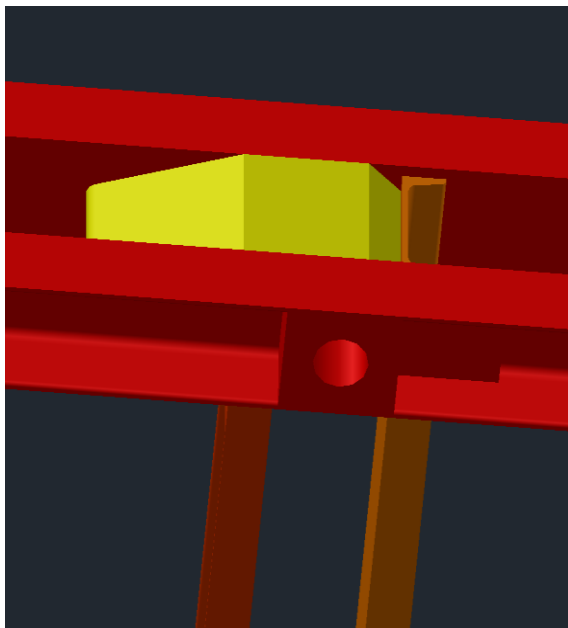


Σχήμα 5-5: α) Αρχική γεωμετρία αρσενικού υποδοχέα

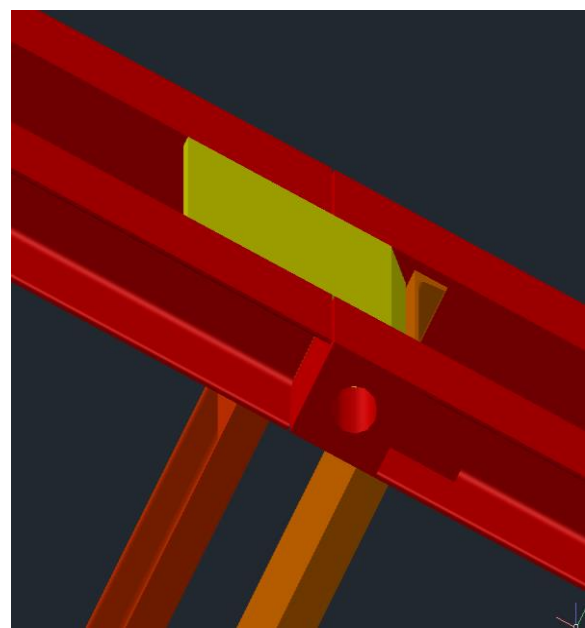


β) Αρχική γεωμετρία κόμβου

Οι πλάγιες αποτμήσεις οι οποίες παίζουν το ρόλο ενίσχυσης λόγω και της συμβολής του ορθοστάτη, αποφασίστηκε να μορφοποιηθούν σε οριζόντια μέλη σταθερού πάχους και ίδιου μήκους σε οριζόντια προβολή με τις συναρμογές, προκειμένου να μοντελοποιηθούν με στοιχεία κελύφους για λόγους υπολογιστικού κόστους. Εν τέλει η γεωμετρία που υλοποιήθηκε στην μοντελοποίηση παρουσιάζεται παρακάτω σε σύγκριση με την αρχική (Σχήμα 5-6)

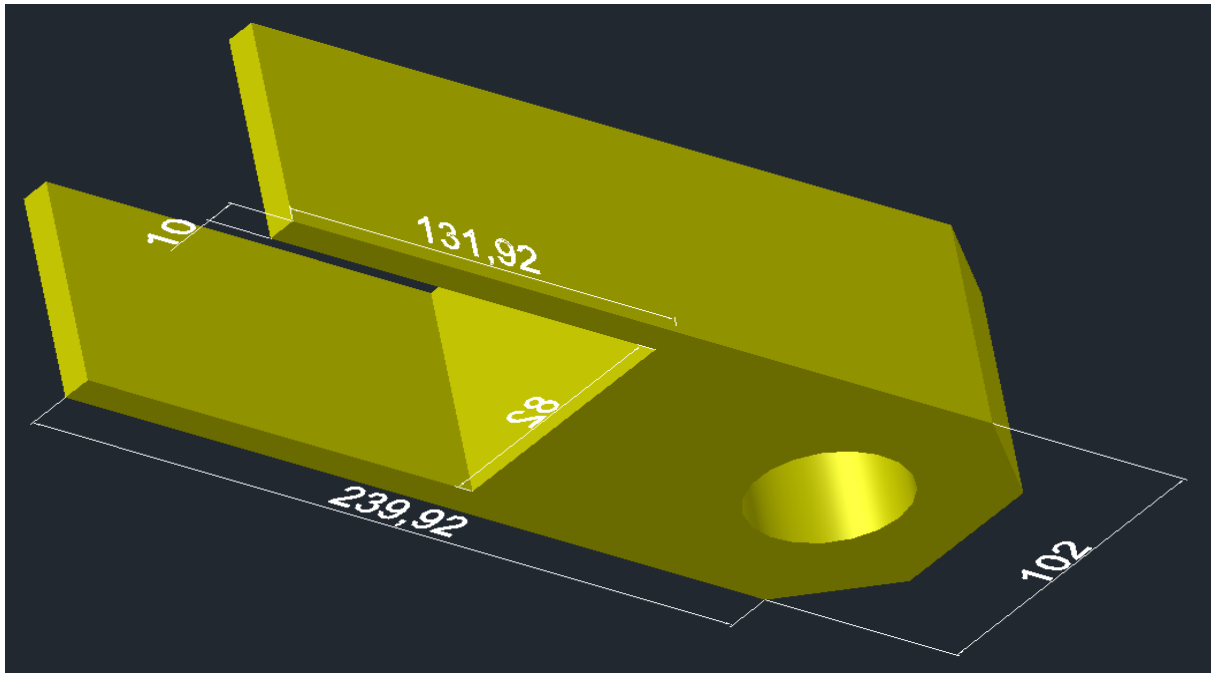


Σχήμα 5-6: α) Αρχική γεωμετρία κόμβου



β) Τελική γεωμετρία κόμβου

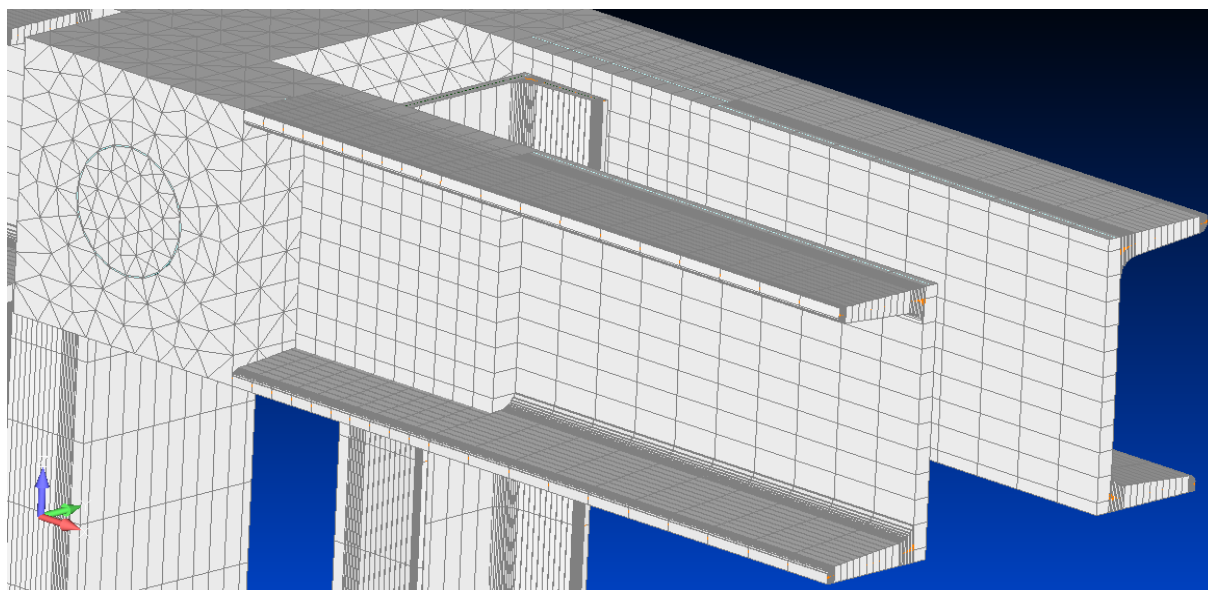
Η γεωμετρία αντίστοιχα του αρσενικού τεμάχου φαίνεται παρακάτω (διαστάσεις σε mm-Σχήμα 5-7)



Σχήμα 5-7: Τελική γεωμετρία αρσενικού τεμάχους

## 5.2 Διακριτοποίηση μελών

Στη συνέχεια υλοποιήθηκε το αναλυτικό μεμονωμένο προσομοίωμα του κόμβου με τα μη μονοδιάστατα στοιχεία με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Η αναλυτικότητα προσομοίωσης περιορίστηκε σε μια περιοχή πέριξ των τεμαχών, προκειμένου να μελετηθεί και η επίδραση των κατακόρυφων και οριζόντιων μελών στα αποτελέσματα. Για τους υποδοχείς καθώς και για τον πείρο επιλέχθηκαν τρισδιάστατα στοιχεία, ενώ οι ορθοστάτες και τα οριζόντια μέλη που συντρέχουν, όντας λεπτότοιχες διατομές, με στοιχεία κελύφους, λόγω της ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελεσμάτων και του μικρού σχετικά υπολογιστικού κόστους. Αξίζει να αναφερθεί πως αρχικά στην μόρφωση του αναλυτικού κόμβου επιτελέστηκε προσπάθεια τα οριζόντια μέλη του πλαισίου (όπως και οι ορθοστάτες) να μοντελοποιηθούν επακριβώς με μεταβλητές διατομές και με συναρμογές, ακριβώς όπως όριζαν οι διατάξεις, (Σχήμα 5-8) όμως ο υπολογιστικός φόρτος ήταν δυσβάσταχτος δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα σημεία απαιτούσαν πυκνότερο πλέγμα στοιχείων προκειμένου να ακολουθηθεί η ακριβής γεωμετρία, και να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα αυξήθηκε κατά τι το πάχος του κορμού από το προβλεπόμενο προκειμένου να ληφθεί με έναν ενιαίο τρόπο η ενίσχυση



Σχήμα 5-8: Αρχική μοντελοποίηση πέλματος χορδής με συναρμογές και μεταβλητά πάχη

Η εγγενής μη γραμμικότητα του προβλήματος λόγω του φαινομένου της επαφής του πείρου και συνεπώς της μεταβλητότητας των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος, καθώς και απαιτήσεις ορθής μεταφορά εντατικών μεγεθών στην διεπιφάνεια επιφανειακών και τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, συνετέλεσε εν τέλει στην διάσπαση του παραπάνω ζητήματος σε δύο μέρη.

Πρωταρχικά μοντελοποιήθηκε καταλλήλως η περιοχή των solids, ενώ δόθηκαν συμβατές συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις με τη φύση του προβλήματος και την αναμενόμενη συμπεριφορά του κόμβου στον τελικό φορέα. Επιβλήθηκε κατακόρυφη φόρτιση κατανεμημένη στον αρσενικό υποδοχέα ενώ οι αντιδιαμετρικές επιφάνειες και των τριών τεμάτων πακτώθηκαν με σκοπό το κλείσιμο της ανοχής μεταξύ οπής και πείρου και την ανάπτυξη έντασης στις επιφάνειες επαφής. Για την απαλοιφή των σχετικών στροφικών μετακινήσεων λόγω γεωμετρικής εκκεντρότητας, δεσμευτήκαν και οι στροφικοί βαθμοί ελευθερίας των κατακόρυφων αποτμήσεων των υποδοχέων, για ευκολότερη εποπτεία της παραμόρφωσης του πείρου. Η αναμενόμενη ημιτονοειδής βύθιση του (ομοιάζει με βύθιση αμφίπακτης δοκού υπό κατανεμημένο φορτίο), και ο έλεγχος πιθανής ανεπιθύμητης διείσδυσης κόμβων μεταξύ πείρου και υποδοχέων, συνετέλεσε στην διενέργεια της δεύτερης φάσης του σχεδιασμού του αναλυτικού κόμβου.

Στη συνέχεια εισήχθησαν τα συγκολλητά οριζόντια μέλη και οι ορθοστάτες μοντελοποιημένα από στοιχεία κελύφους, τα οποία με τη σειρά τους συνδέθηκαν με τρεις διαφορετικούς τρόπους

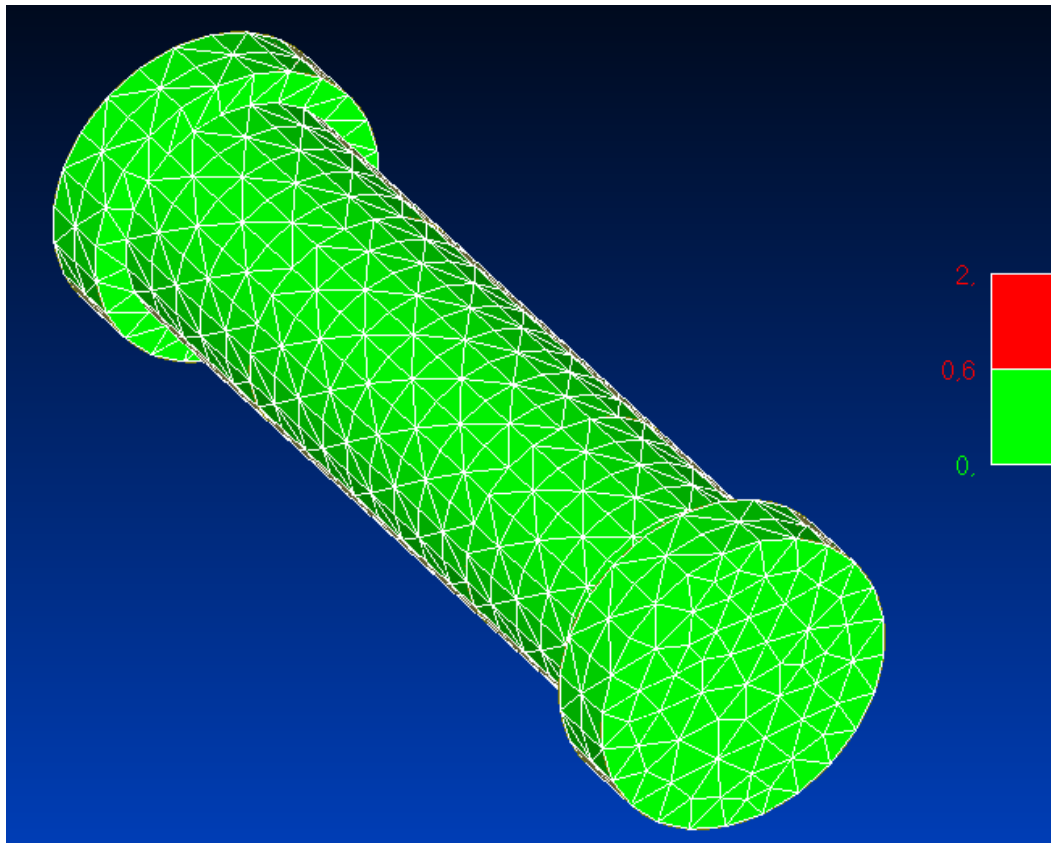
1. άκαμπτους συνδέσμους (rigid links) μεταξύ κοντινών κόμβων των δύο στοιχείων
2. Δημιουργία αλληλεπικάλυψης μεταξύ κελύφων και χωρικών και ενοποίηση κοινών κόμβων
3. Διαμόρφωση τ-στοιχείων κελύφους στη διεπιφάνεια και ενοποίηση κοινών κόμβων

Μελετήθηκε εκ νέου ο κόμβος δίνοντας έμφαση στην μεταφορά καμπτικής έντασης λόγω μονολιθικότητας σύνδεσης των δύο ειδών πεπερασμένων, τα οποία προσομοιώνουν μια συγκολλητή σύνδεση. Η ικανοποιητική συμπεριφορά των μεμονωμένων μελών του αναλυτικού κόμβου οδήγησε εν τέλει στην ολική μόρφωση της γέφυρας με ένα και στη συνέχεια με δύο αναλυτικούς κόμβους.

Ο κόμβος όπως και η υπόλοιπη γέφυρα σχεδιάστηκαν στο Autocad και εισήχθησαν στο Femap για την διακριτοποίησή τους. Ο αρσενικός (Σχήμα 5-11) και οι θηλυκοί υποδοχείς (Σχήμα 5-10), διακριτοποιήθηκαν με τετράεδρα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία όγκου, με κόμβους και στο μέσον της κάθε ακμής για την καλύτερη γεωμετρική αποτύπωση της οπής. Επίσης διαμορφώθηκαν μεταξύ άλλων καταλλήλως και οι περιοχές κοντά στην οπή (με τη χρήση washer) για την ομαλοποίηση της

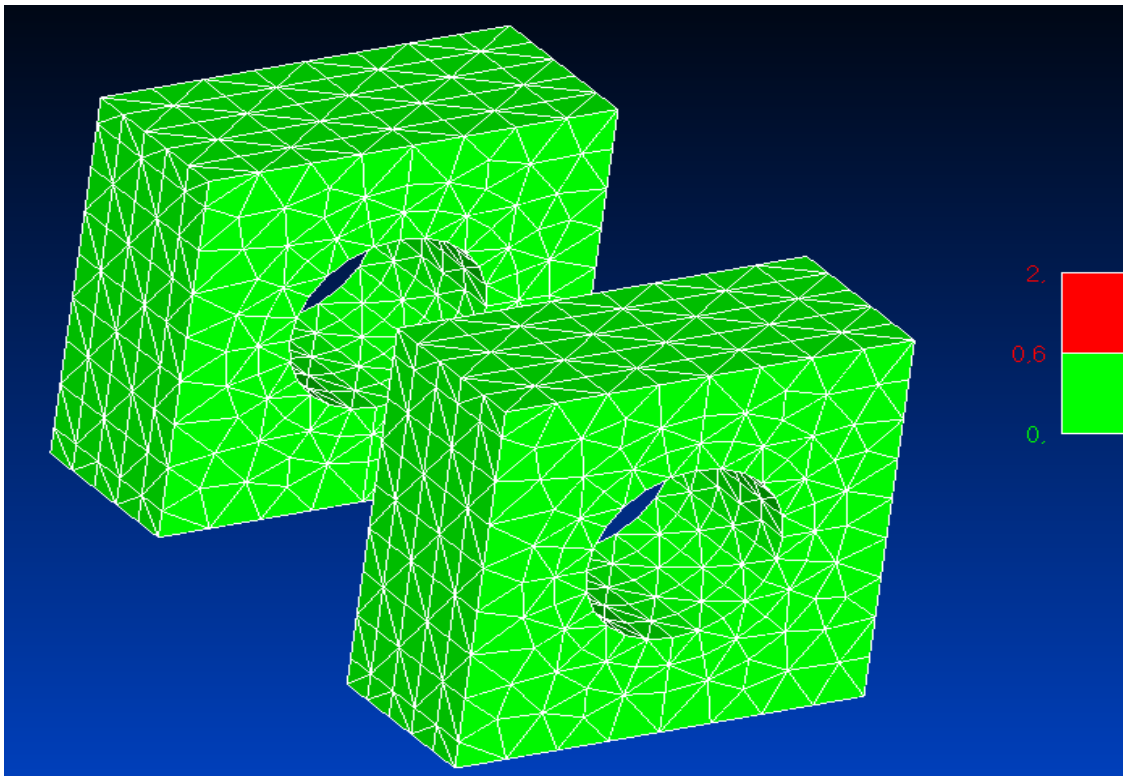
διακριτοποίησης καθώς και για διευκόλυνση του ορισμού της επαφής με το παξιμάδι. Για τον πείρο Σχήμα 5-9 χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα ίδια πεπερασμένα στοιχεία όμως προτού διακριτοποιηθεί επιλέχθηκε να διασπαστεί σε τρία μέρη(όσα και οι άντυγες) προκειμένου να οριστούν επιφάνειες επαφής στη συνέχεια με αντικριστά στοιχεία για ταχύτερη σύγκλιση και σωστότερα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση εποπτικά σε αρχικό στάδιο και μέσω του προγράμματος ελέγχθηκε η ποιότητα του πλέγματος χωρικών στοιχείων. Οπτικά δόθηκε έμφαση τα πεπερασμένα στοιχεία να έχουν ένα επαρκές ύψος καθώς πολύ οξείες και αντίστοιχα αμβλείες γωνίες στις κορυφές των στοιχείων δημιουργούν χρονοβόρες επαναληπτικές διαδικασίες στην επίλυση των πινάκων ή και σε λανθασμένα αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο πριν δημιουργηθεί το πλέγμα μέσω του automesh tool του προγράμματος, μορφοποιήθηκε η γεωμετρία και διασπάστηκε σε επιμέρους επιφάνειες, προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα προβληματικά στοιχεία. Στην εικόνα φαίνεται οι επιλογές για το automesh tool ενώ στην εικόνα ο έλεγχος ποιότητας των χωρικών πεπερασμένων στοιχείων με γνώμονα την ποιότητα του Ιακωβιανού πίνακα<sup>2</sup> (Jacobian matrix)

Τα πέλματα όπως και οι ορθοστάτες πέριξ του κόμβου διακριτοποιήθηκαν με στοιχεία κελύφους με τη δημιουργία αντίστοιχων element groups διαφορετικού πάχους. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην μορφοποίηση ενός κατάλληλου πλέγματος όσον αφορά τη θέση του κάθε πεπερασμένου στοιχείου καθώς και στην πυκνότητα έτσι ώστε να διευκολυνθεί όπου είναι εφικτό η ενοποίηση κοινών κόμβων ίδιων πεπερασμένων στοιχείων, ή να αποφευχθούν αχρείαστες εκκεντρότητες

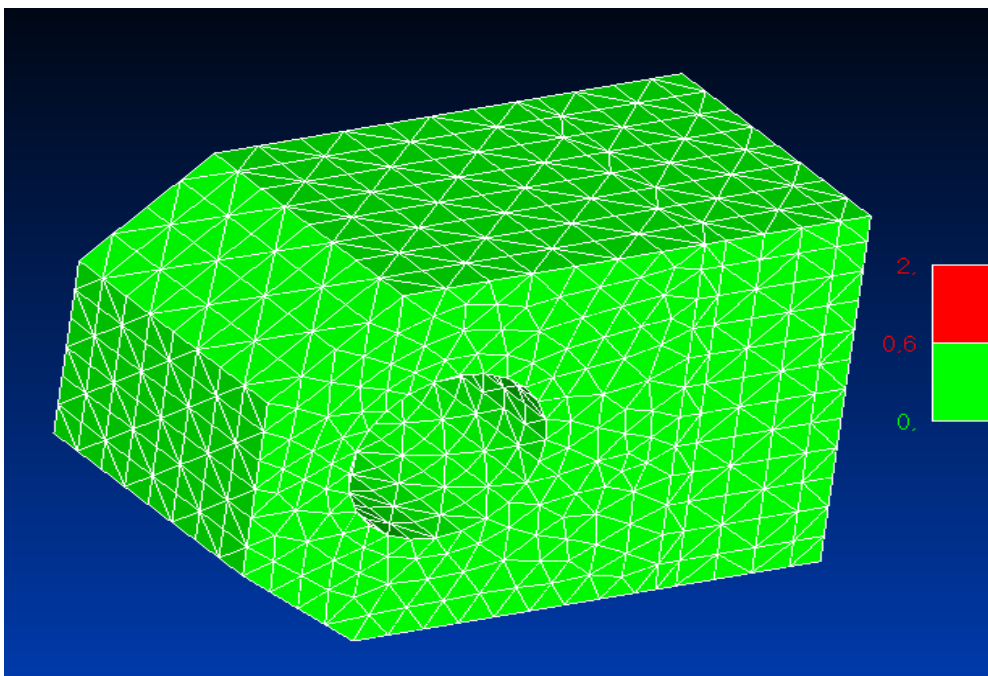


Σχήμα 5-9: Διακριτοποίηση πείρου με τετράεδρα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, ποιότητα πεπερασμένων με βάση την Ιακωβιανή(τιμές από 0,6-2→προβληματικά στοιχεία)

<sup>2</sup> Το Ιακωβιανό μητρώο είναι η θεμελιώδης ποσότητα που περιγράφει όλες τις ιδιότητες ενδιαφέροντος σε ένα πλέγμα (μήκος, εμβαδά και γωνίες)

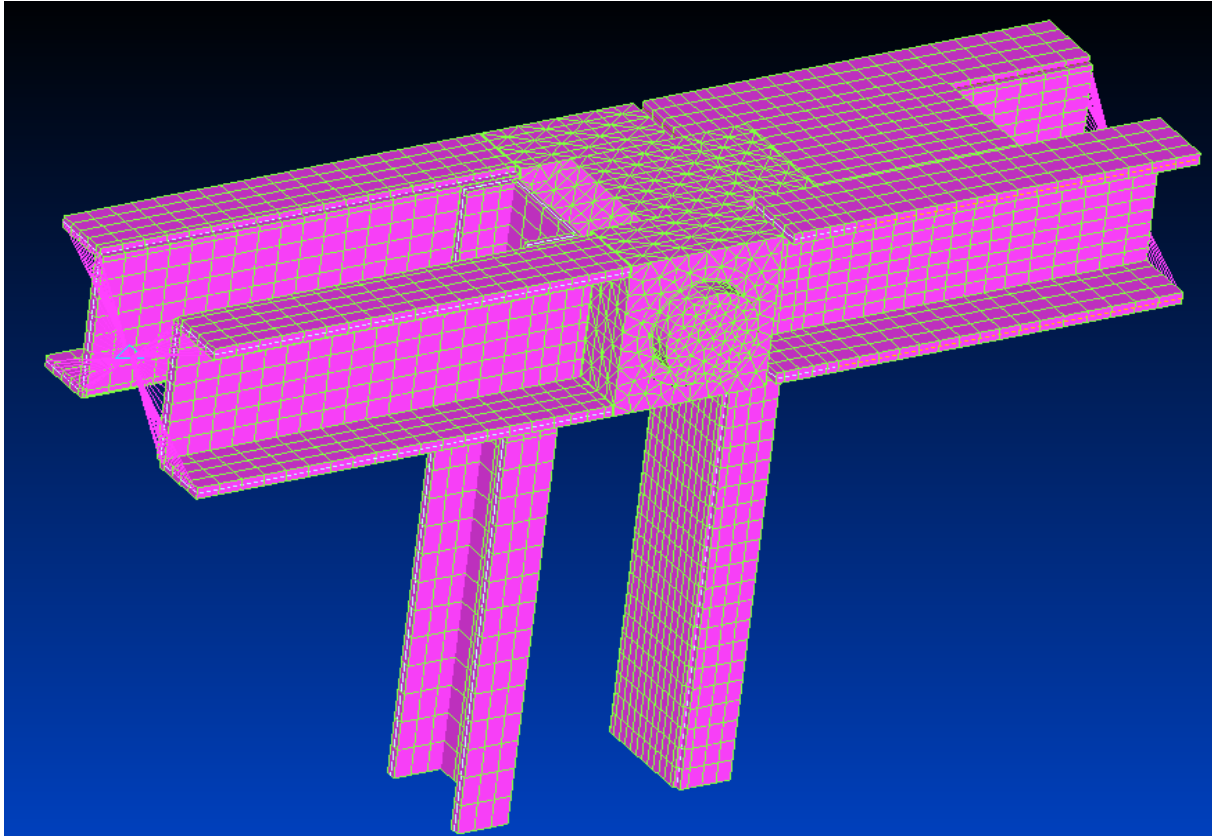


Σχήμα 5-10: Διακριτοποίηση θηλυκού υποδοχέα με τετράεδρα χωρικά στοιχεία, ποιότητα πεπερασμένων με βάση την Ιακωβιανή(τιμές από 0,6-2→προβληματικά στοιχεία)

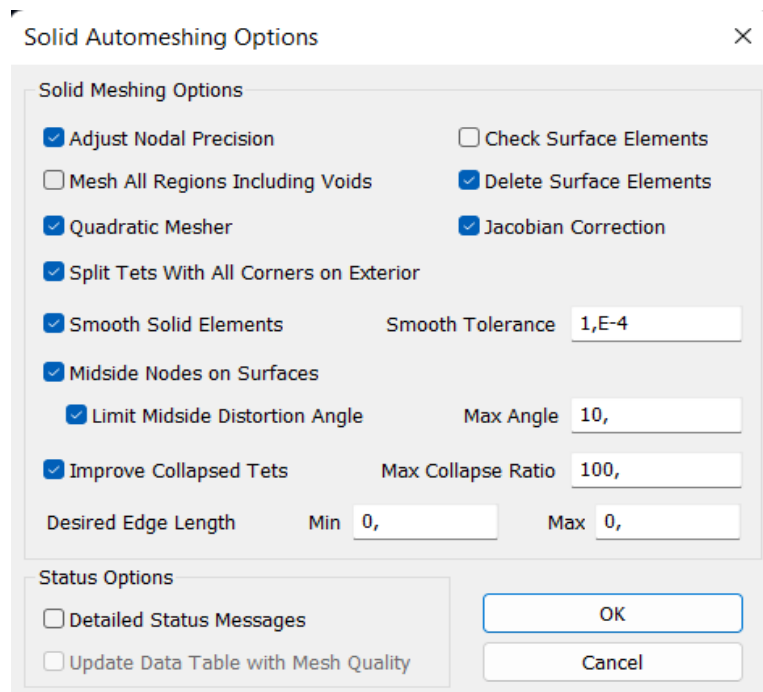


Σχήμα 5-11: Διακριτοποίηση αρσενικού τεμάχου με τετράεδρα χωρικά στοιχεία, ποιότητα πεπερασμένων με βάση την Ιακωβιανή(τιμές από 0,6-2→προβληματικά στοιχεία)





Σχήμα 5-12: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για τον κόμβο συνολικά



Σχήμα 5-13: Επιλογές για αυτόματη διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε χωρικά στοιχεία

### 5.3 Ορισμός και θεωρητικά στοιχεία επαφής

Η επαφή αποτελεί ένα μείζον ζήτημα, το οποίο υπάγεται στα προβλήματα μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Η εγγενής μη γραμμικότητα του προβλήματος υπάγεται μέσω της μεταβλητότητας των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος, οι οποίες είναι άγνωστες στην αρχή της ανάλυσης. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το φαινόμενο της επαφής αναγράφονται στην βιβλιογραφία[8], όπως οι διάφορες μαθηματικές σχέσεις που αντικατοπτρίζουν τις συνοριακές συνθήκες επαφής μεταξύ ευκαμπτου-άκαμπτου και εύκαμπτου-εύκαμπτου μέλους, τις συνθήκες κολλήματος ή ολίσθησης των σημείων επαφής (με ή χωρίς τριβή), με την εισαγωγή κατάλληλων μεταβλητών, πως αντιμετωπίζονται οι μεγάλες σχετικές κινήσεις μεταξύ των σωμάτων, καθώς και η αντιμετώπιση της επαναλαμβανόμενη επαφή κατά τον διαχωρισμό-σύγκλιση μεταξύ των σωμάτων. Πολλοί τύποι επαναληπτικών αλγορίθμων έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων με αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο.

Οι γενικές, ιδεατές συνθήκες που διέπουν την επαφή μεταξύ επιφανειών, με κάποιες πιθανές τροποποιήσεις και διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων αλγορίθμων εκφράζονται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$g \geq 0; \lambda \geq 0; g\lambda = 0 \quad 5-1$$

όπου  $g$  είναι το κενό μεταξύ επιφανειών και το  $\lambda$  είναι η δύναμη επαφής κάθετη στην επιφάνεια. Για την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των επιφανειών εισάγεται ένας αδιάστατος όρος ( $\tau$ ), που εκφράζεται μέσω της εξ. 5-2

$$\tau = F_T / \mu \lambda \quad 5-2$$

Όπου  $F_T$  είναι η εφαπτομενική δύναμη. Η συνοριακή συνθήκη τριβής κατά Coulomb εκφράζεται από την εξής συνθήκη 5-3

$$|\tau| \leq 1$$

$$\text{αν} \quad |\tau| < 1, \text{ τότε } u = 0 \quad 5-3$$

$$\text{Όσο} \quad |\tau| = 1, \text{ sign}(u) = \text{sign}(\tau)$$

, όπου  $u$  ορίζεται η ταχύτητα ολίσθησης. Ένας αρκετά αποτελεσματικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα στην πληθώρα των προβλημάτων επαφής είναι η μέθοδος constraint function η οποία διαφοροποιεί τις συνοριακές συνθήκες που περιέγραφαν οι ανισότητες 5-1 μέσω της ακόλουθης ισότητας

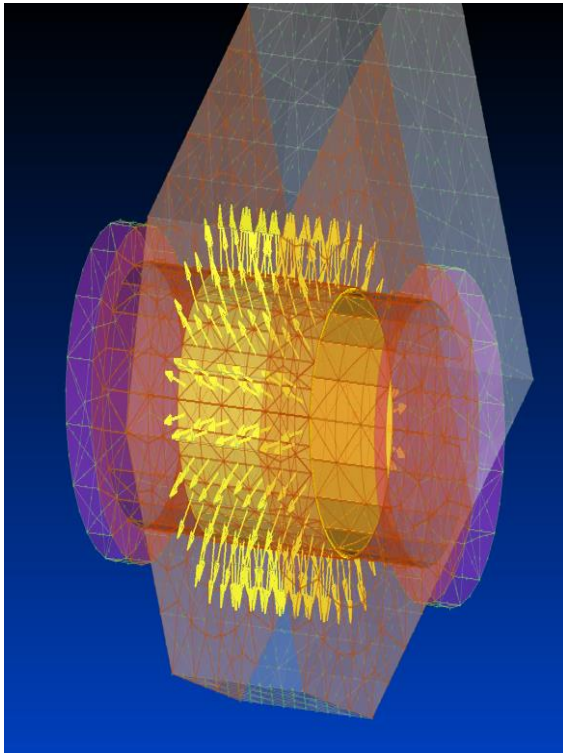
$$w(g, \lambda) = \frac{g + \lambda}{2} - \sqrt{\left(\frac{g - \lambda}{2}\right)^2 + \varepsilon n} \quad 5-4$$

όπου το  $\varepsilon n$  είναι μια μικρή παράμετρος που ορίζεται από το χρήστη. Η εξ. 5-4 είναι ομαλή και διαφοροποιήσιμη και διευκολύνει τις επαναληπτικές μεθόδους Newton-Raphson ή την αντίστοιχη Modified να συγκλίνουν σε μια ακριβή λύση με το μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Η παράμετρος  $\varepsilon n$  ρυθμίζεται μέσω της μεταβλητής EPSN στο Adina. Η προεπιλεγμένη τιμή  $1 \times 10^{-12}$  είναι κατάλληλη για τις περισσότερες εφαρμογές και σπάνια πρέπει να τροποποιείται. Γενικά χρειάζονται δοκιμές όσον αφορά τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων, όπως  $\nu$  για την εξάλειψη ταλαντώσεων μεταξύ κόμβων που έρχονται σε επαφή (NSUPPRESS), ή την επιβολή ενός ρεαλιστικού ορίου πάνω από το οποίο ο κόμβος φαίνεται να ολισθαίνει. Προτείνεται η χρήση του low speed dynamics σε συνδυασμό με την μέθοδο επιβολής σε βήματα μέσω της Automatic Stepping αλλά και εκεί θα πρέπει να δοθούν οι κατάλληλες παράμετροι προκειμένου το βήμα επιβολής να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα λόγω δυναμικών φαινομένων (το φορτίο πρέπει να μένει σταθερό για ένα χρονικό διάστημα που ορίζεται στην [18]). Γενικά χρειάζεται διερεύνηση στις αλλαγές που θα επιλέξει κανείς να εφαρμόσει καθώς ορισμένες μπορεί να οδηγήσουν σε ευκολότερη σύγκλιση αλλά σε λάθος αποτελέσματα.

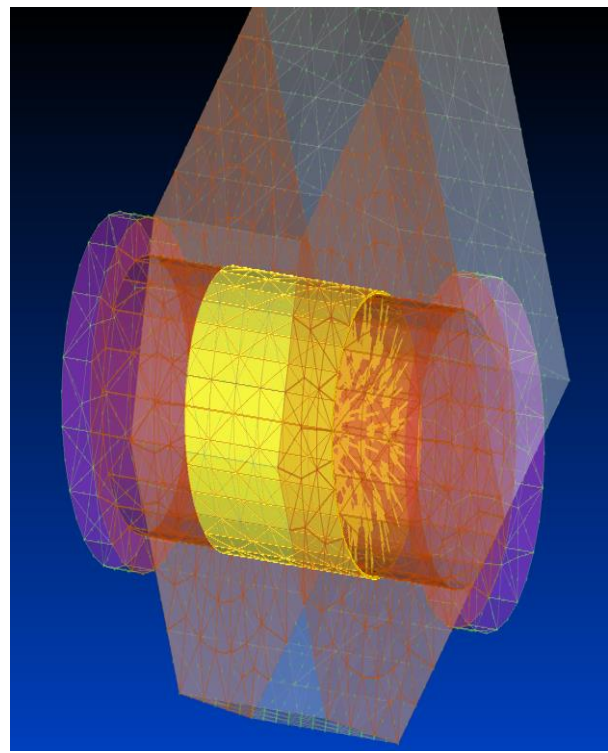
Η επαφή των επιφανειών ορίστηκε στο πρόγραμμα Femap. Ειδικότερα οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή είναι συνολικά 14 και περιγράφονται παρακάτω:

- 4 επιφάνειες μεταξύ πείρου και άντυγας των δύο θηλυκών υποδοχέων (Σχήμα 5-15)
- 2 επιφάνειες μεταξύ πείρου και άντυγας αρσενικού υποδοχέα (Σχήμα 5-14)
- 2 επιφάνειες μεταξύ παξιμαδιού του πείρου και της εξωτερικής επιφάνειας των θηλυκών υποδοχέων (Σχήμα 5-16)
- 4 επιφάνειες μεταξύ των υποδοχέων (δύο στον αρσενικό και δύο στους θηλυκούς-Σχήμα 5-17)

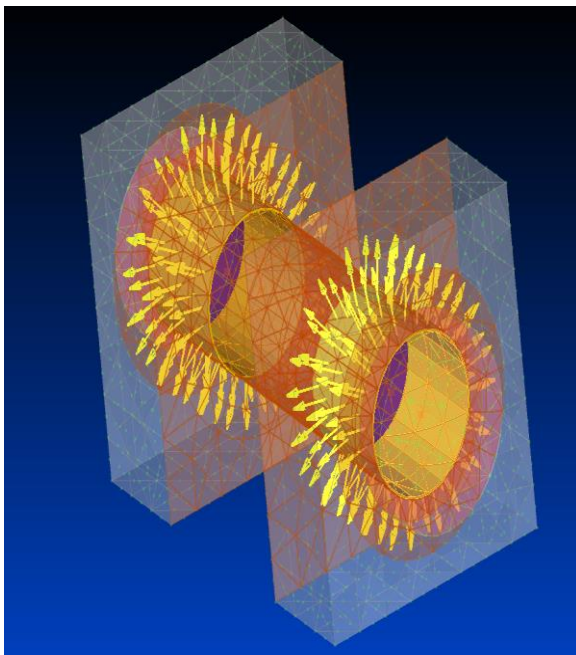
Η επαφή συντελείται μεταξύ των στοιχείων όγκου που διακριτοποιήθηκαν τα ειδικά τεμάχια και ο πείρος σύνδεσης των πλαισίων. Δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα στον σωστό προσανατολισμό των επιφανειών προκειμένου να επιτευχθεί σύγκλιση. Τα κίτρινα βέλη στις παρακάτω εικόνες υποδεικνύουν την «κατεύθυνση» των στοιχείων με γνώμονα δηλαδή προς τα που θα κινηθεί το μέλος για να έρθει σε επαφή με τις παρακείμενες επιφάνειες. Παρακάτω φαίνονται οι επιφάνειες επαφής



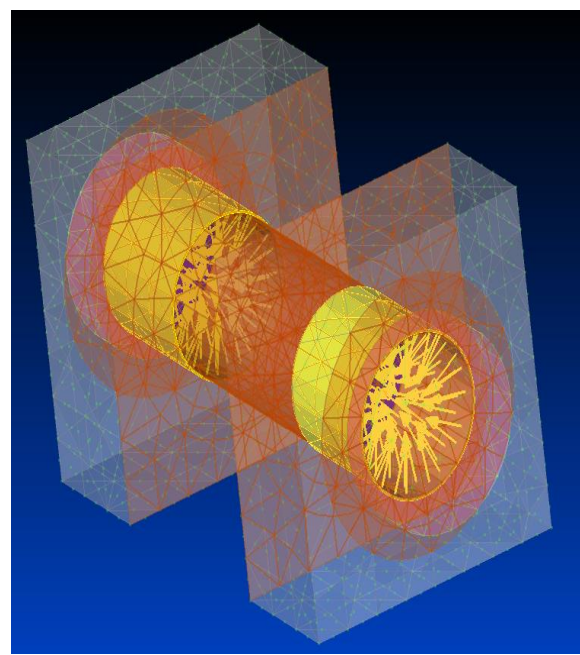
Σχήμα 5-14:α)Επιφάνεια επαφής πείρου με αρσενικό



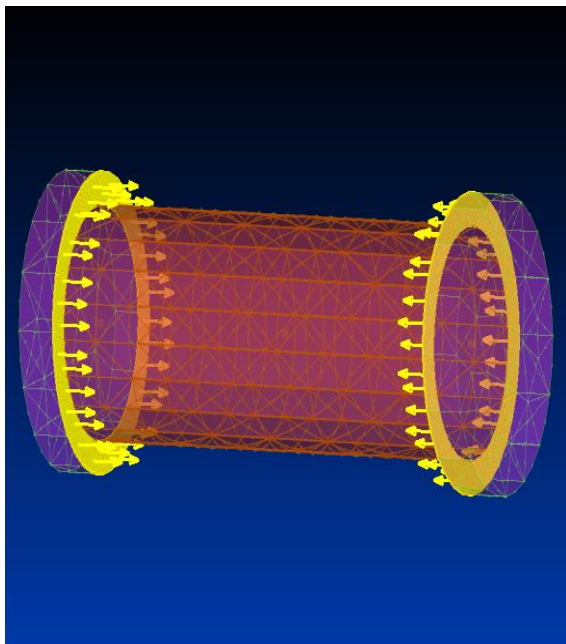
β)επιφάνεια επαφής αρσενικού με πείρο



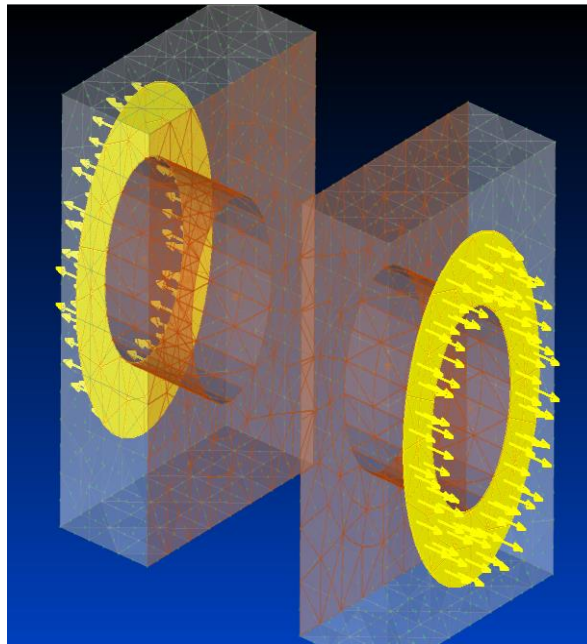
Σχήμα 5-15:α)επιφάνεια επαφής πείρου με θηλυκό



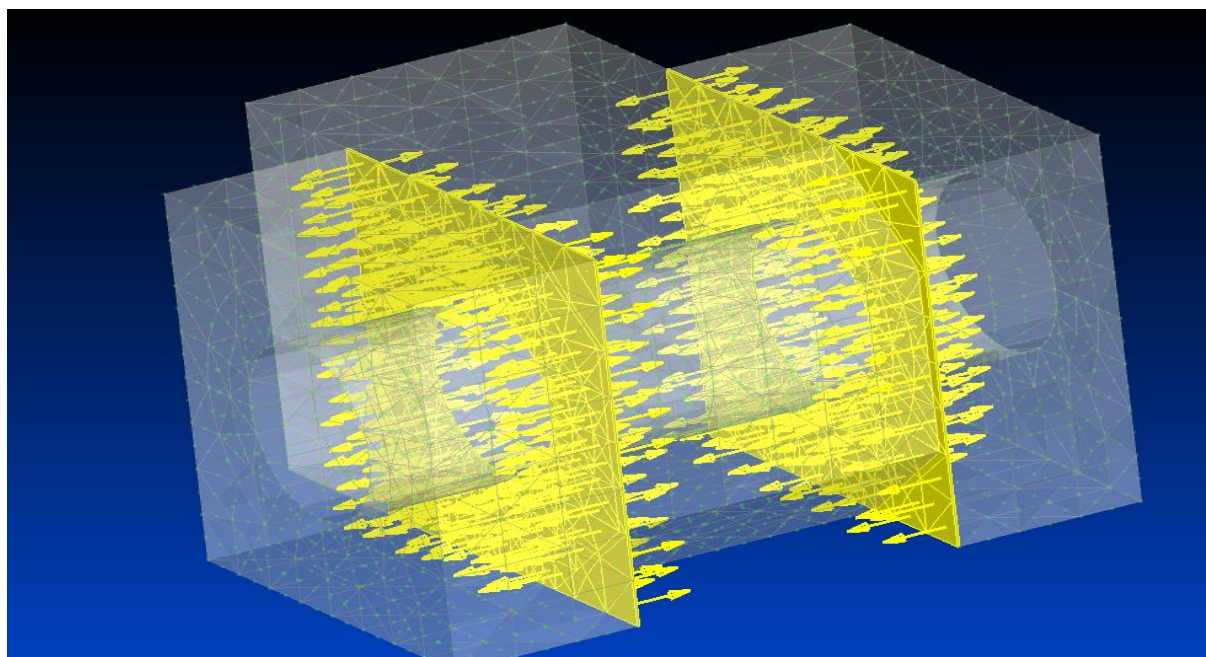
β)επιφάνεια επαφής θηλυκού με πείρο



Σχήμα 5-16:α) Επαφή παξιμαδιού με θηλυκό



β) Επαφή θηλυκού με παξιμάδι



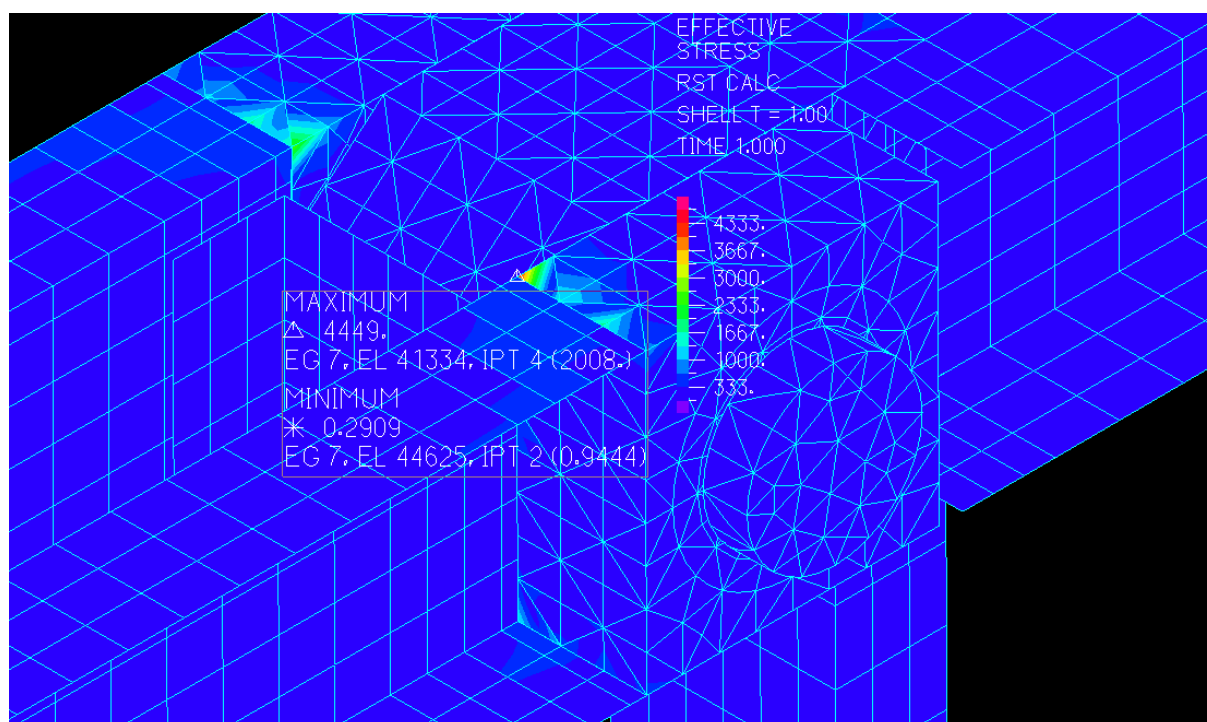
Σχήμα 5-17: Επιφάνειες επαφών μεταξύ αρσενικού και θηλυκού υποδοχέα

#### 5.4 Σύνδεση στοιχείων κελύφους με χωρικά στοιχεία

Τα τρισδιάστατα στοιχεία εμπεριέχουν μόνο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας καθώς η στροφικότητα του στοιχείου εκφράζεται μέσω διαφορετικών μετατοπίσεων στους κόμβους. Εν αντιθέσει τα στοιχεία κελύφους εμπεριέχουν και στροφικούς βαθμούς ελευθερίας στον κάθε κόμβο. Συνεπώς η μη συμβατότητα στους β.ε των δύο πεπερασμένων δημιουργεί ένα ζήτημα στη μεταφορά ροπών (καμπτικών και στροφικών) όταν επιζητείται η μονολιθική σύνδεση των δύο μελών καθώς η δημιουργία κοινού

πλέγματος και η ενοποίηση κοινών κόμβων μεταβιβάζει μόνο δυνάμεις οδηγώντας σε αρθρωτή σύνδεση. Δοκιμάστηκαν αρκετοί τρόποι σύνδεσης των δύο πεπερασμένων στοιχείων με γνώμονα πάντα την ύπαρξη μονολιθικότητας μεταξύ των μελών, καθώς και της σωστής μεταφοράς τάσεων από μέλος σε μέλος (εξάλειψη πιθανών ασυνεχειών τάσεων στην διεπιφάνεια των στοιχείων).

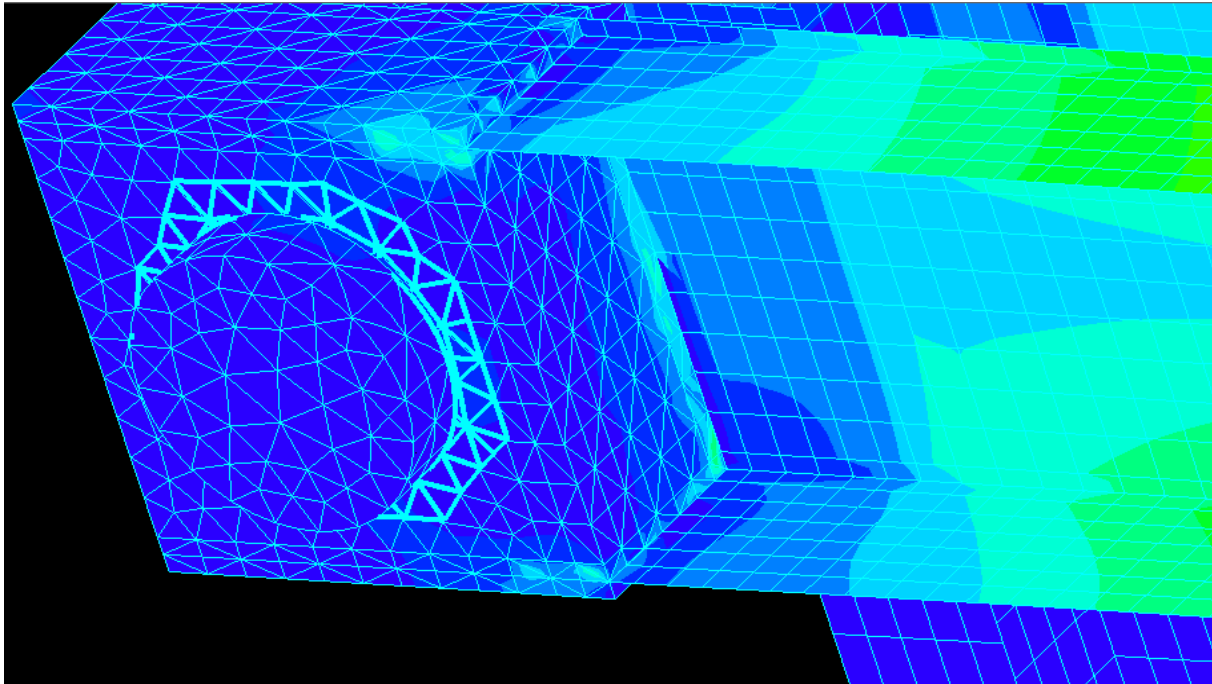
Αρχικά έγινε μια προσπάθεια σύνδεσης κόμβων, διπλών η ταυτιζόμενων τοπολογικά με άκαμπτους συνδέσμους (rigid links) με σύνδεση των μεταφορικών βαθμών των κόμβων των χωρικών τετραέδρων πεπερασμένων με τους βαθμούς ελευθερίας των στοιχείων κελύφους. Αξίζει να επισημάνουμε πως ο ορισμός δέσμευσης ξεχωριστών βαθμών ελευθερίας, τρεις μεταφορικοί για τα χωρικά και πέντε ή έξι για τα επιφανειακά οδηγούν σε ίδια αποτελέσματα ακόμα και αν οριστούν εκ περιδρομής δεσμεύσεις και στους «έξι» βαθμούς ελευθερίας των solid. Οι αναλύσεις του μεμονωμένου κόμβου έδειξαν κάποιες ασυνέχειες καθώς και σημαντικές συγκεντρώσεις τάσεων στα σημεία συνδέσεως,. Ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης των δύο στοιχείων πιθανότατα να έδινε καλύτερα αποτελέσματα αν γινόταν μια διαφορετική μορφοποίηση στα τρισδιάστατα στοιχεία των μελών σύμφωνα με την ακόλουθη βιβλιογραφία[10], έτσι ώστε τα εντατικά μεγέθη των δισδιάστατων στοιχείων να μεταφέρονταν σε ένα πλήθος κοντινών κόμβων, αναλογικά με τις αποστάσεις τους.



Σχήμα 5-18: Αιχμές τάσεων στην διεπιφάνεια σύνδεσης τρισδιάστατων και επίπεδων πεπερασμένων στοιχείων μεταξύ χορδής και θηλυκού υποδοχέα

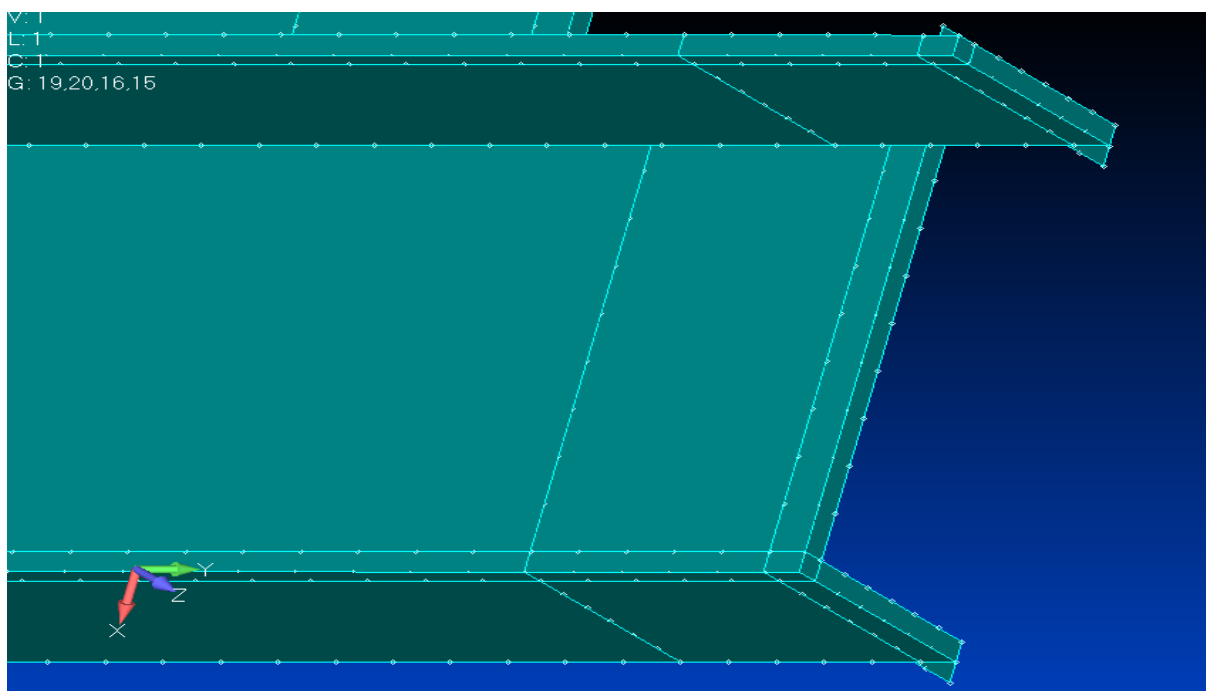
Εφόσον τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά στη συνέχεια έγινε προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα κοινό πλέγμα στις διεπιφάνειες το οποίο θα εκτείνεται και σε κάποιο μήκος L εντός των συμπαγών μελών. Στη συνέχεια τα οριζόντια-κατακόρυφα μέλη με τα επιφανειακά στοιχεία εκτάθηκαν στο ίδιο μήκος L, «εισχωρώντας» στους αρσενικούς και θηλυκούς υποδοχείς αντίστοιχα, ακολουθώντας την διαμόρφωση του κοινού πλέγματος. Υλοποιείται τοιούτοτρόπως μια αλληλοεπικάλυψη καθιστώντας την ενοποίηση κοινών κόμβων στην προκειμένη περίπτωση ικανή να μεταφέρει ροπές και στα δύο μέλη, καθώς το μήκος αυτής λειτουργεί ως μοχλοβραχίονας. Με αυτή την προσέγγιση η εικόνα τάσεων είναι ικανοποιητικότερη από την προηγούμενη λύση καθώς δεν εμφανίζονται αιχμές στα σημεία σύνδεσης, ενώ κάποιες μικρές ασυνέχειες μπορούν πιθανότατα να διορθωθούν εποπτικά με την αύξηση της

δυσκαμψίας των επιφανειακών στοιχείων εντός των συμπαγών μελών, ή με την περαιτέρω αύξηση του μήκους αλληλοεπικάλυψης, προκειμένου να αποδοθεί μια καλύτερη προσέγγιση της μονολιθικότητας.



Σχήμα 5-19: Τάσεις στη μονολιθική σύνδεση χορδής και θηλυκού τεμάχου, ομαλοποίηση της μεταφοράς τάσεων από στοιχεία κελύφους στα χωρικά τετράεδρα

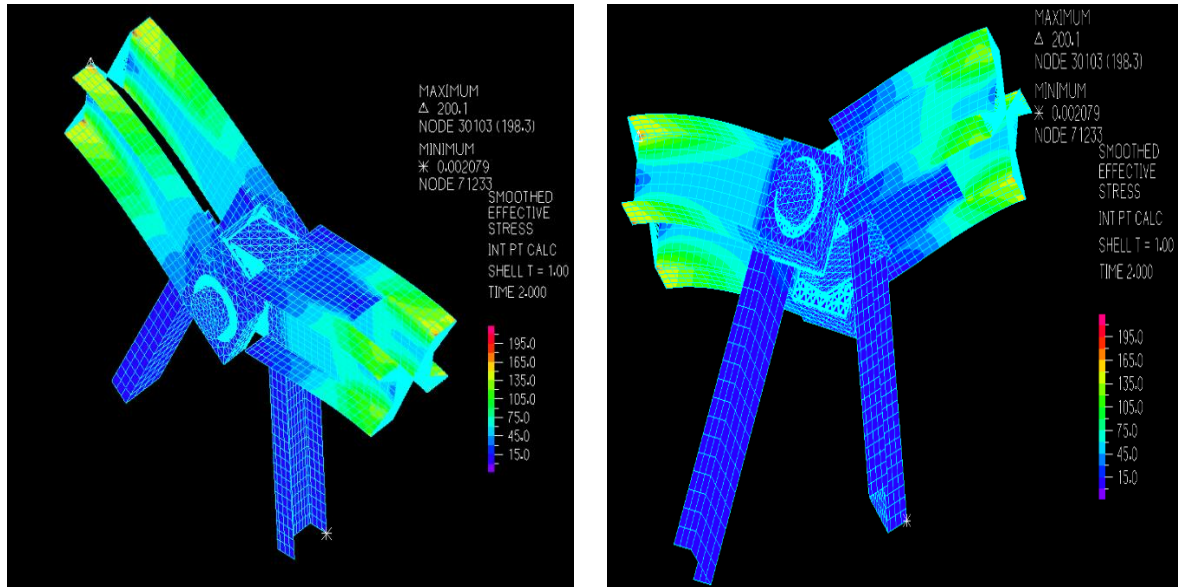
Για λόγους πληρότητας έγιναν δοκιμές και με έναν τρίτο τρόπο, πανομοιότυπο με τον δεύτερο. Ειδικότερα στα άκρα κάθε συνδεόμενου μέλους ανοιχτής διατομής καθώς και στην οριζόντια ενίσχυση πίσω από το αρσενικό υποδοχέα μορφοποιήθηκαν κάθετες επιφάνειες όπως δείχνει ενδεικτικά και η παρακάτω εικόνα στις χορδές του πλαισίου



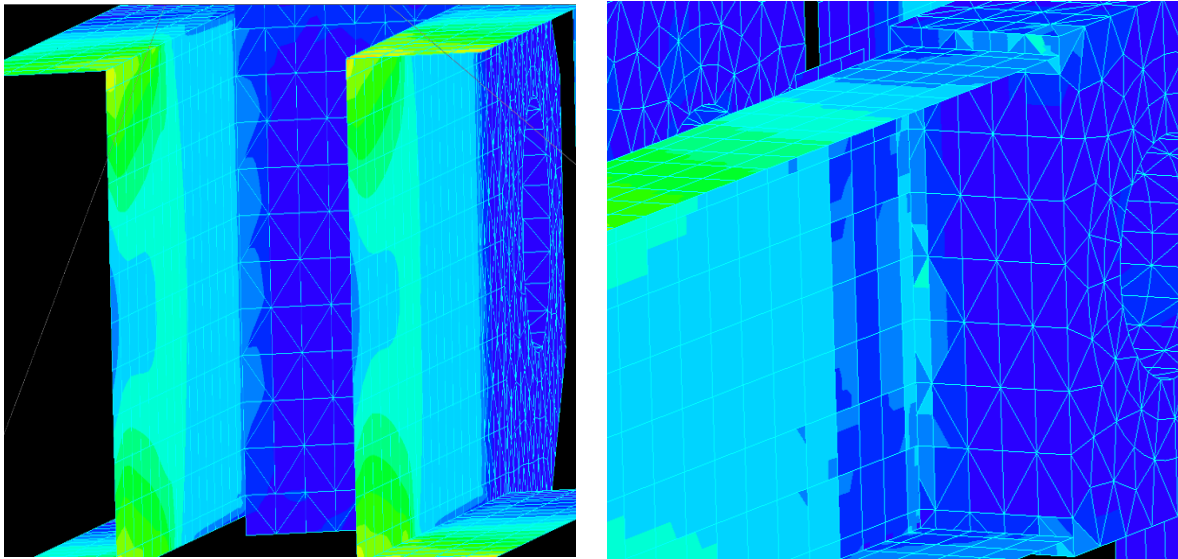
Σχήμα 5-20: Γεωμετρία μορφής T για προσομοίωση σύνδεσης συγκόλλησης μεταξύ οριζοντίων μελών και υποδοχέα

Οι επιφάνειες αυτές διακριτοποιήθηκαν με μεταβατικά στοιχεία κελύφους αυθαίρετου πάχους (1mm) , έχοντας κοινούς κόμβους με την κεντροβαρική επιφάνεια των shell elements του, ενώ κόμβοι δημιουργήθηκαν και στις εκατέρωθεν γραμμές της επιφάνειας, προκειμένου να συνδεθούν με αντίστοιχους ταυτόσημους κόμβους των τρισδιάστατων στοιχείων. Έπειτα ελέγχθηκε η επάρκεια του μεμονωμένου κόμβου, όπως έχει προαναφερθεί στο 4.1, όσον αφορά την αναμενόμενη παραμόρφωση και την επαφή των μελών μεταξύ τους υπό ένα δοκιμαστικό φορτίο στο άνω μέρος του αρσενικού τεμάχους μαζί με το ι.β του κόμβου, με την φόρτιση να πραγματοποιείται σε δύο φάσεις(πρώτα το ίδιο βάρος και έπειτα το δοκιμαστικό φορτίο). Οι εικόνες παραμόρφωσης δείχνουν πως υπάρχει μονολιθικότητα στις συνδέσεις των μελών μεταξύ τους, ενώ ενεργές είναι και οι επαφές μεταξύ των μελών. Επιπρόσθετα δόθηκε προσοχή σε τυχόν ασυνέχειες τάσεων όσον αφορά την σύνδεση των στοιχείων κελύφους με τα τρισδιάστατα στοιχεία, οι οποίες δεν παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο μοντέλο ιδιαίτερα(Σχήμα 5-21,Σχήμα 5-22,Σχήμα 5-23). Ενδεικτικά πέρα από τον συνολικό κόμβο και την παραμόρφωση του δείχνονται οι τάσεις στην διεπιφάνεια της σύνδεσης των οριζοντίων μελών με τους θηλυκούς υποδοχείς και τον αρσενικό υποδοχέα καθώς και των οριζοντίων ενισχύσεων με το μεσαίο τέμαχος.

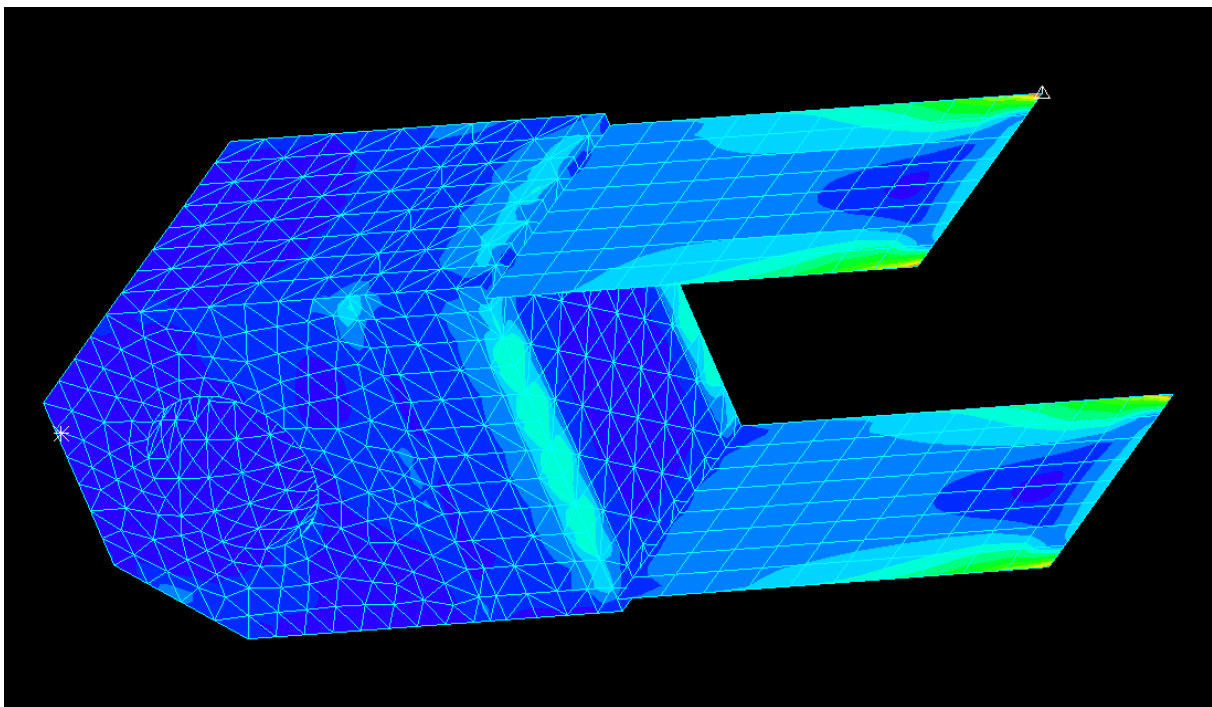




Σχήμα 5-21: Εικόνες τάσεων Von Mises για δοκιμαστικό κατανεμημένο φορτίο στην άνω παρειά του αρσενικού υποδοχέα



Σχήμα 5-22: Συνέχεια τάσεων στη σύνδεση στοιχείων κελύφους με τρισδιάστατα πεπερασμένα



Σχήμα 5-23: Συνέχεια τάσεων στα σημεία σύνδεσης αρσενικού και οριζόντιας ενίσχυσης

### 5.5 Μοντέλο με στοιχεία δοκού, κελύφους και χωρικά

Εφόσον τα αποτελέσματα τόσο στον αναλυτικό κόμβο μεμονωμένα όσο και στα ραβδωτά μοντέλα ήταν ικανοποιητικά, κρίθηκε σκόπιμο πλέον να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του συνολικού φορέα. Η σύνδεση του κόμβου με τα στοιχεία δοκού συντελέστηκε με άκαμπτους συνδέσμους, οι οποίοι δέσμευσαν μεταφορικούς και στρωφικούς βαθμούς ελευθερίας των δύο στοιχείων, για την πλήρη μεταφορά των εντατικών μεγεθών. Αξίζει να σημειωθεί πως τα στοιχεία δοκού στους ακραίους κόμβους εμφανίζουν 6 βαθμούς ελευθερίας, ενώ τα στοιχεία κελύφους από προεπιλογή συνήθως παρουσιάζουν έναν λιγότερο, καθώς παραλείπεται η στρόφη περί τον άξονα του πάχους τους. Συνεπώς προτείνεται και στην [18], οι

ακραίοι κόμβοι των κελύφων που θα συνδεθούν με τα μονοδιάστατα στοιχεία να έχουν και τους έξι βαθμούς ελευθερίας ενεργούς. Αρχικά προσαρτήθηκε ένα αναλυτικό προσομοίωμα όμως στη συνέχεια εισήχθη ένα δεύτερο στην ίδια θέση διαμήκως για λόγους τήρησης της συμμετρίας.

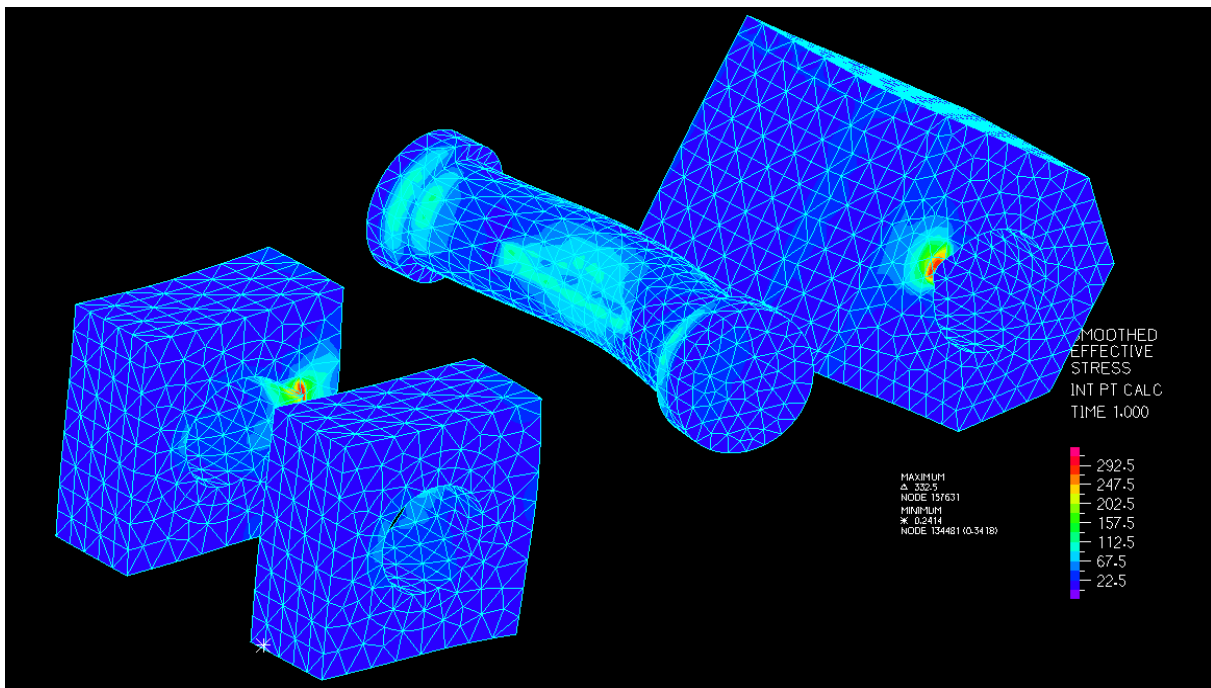
Σε αρχικό στάδιο φορτίστηκε ο φορέας με τα μόνιμα βάρη ως κατανεμημένα σε επικόμβιες δυνάμεις στο κατάστρωμα της γέφυρας και έγινε ελαστική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας λόγω επαφής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κρίθηκαν με γνώμονα την αναμενόμενη παραμόρφωση του φορέα, όπως είχε προκύψει από τα αντίστοιχα ραβδωτά, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον έλεγχο τυχόν αλληλοεπικαλύψεων μεταξύ των επιφανειών. Από την συνολική συμπεριφορά της γέφυρας θα καθοριστεί και κατά πόσο η δοκιμαστική φόρτιση στο μεμονωμένο αναλυτικό προσομοίωμα του κόμβου, ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Πίνακας 5-1: Συγκρίσεις παραμορφώσεων στο ραβδωτό και στο αναλυτικό μοντέλο

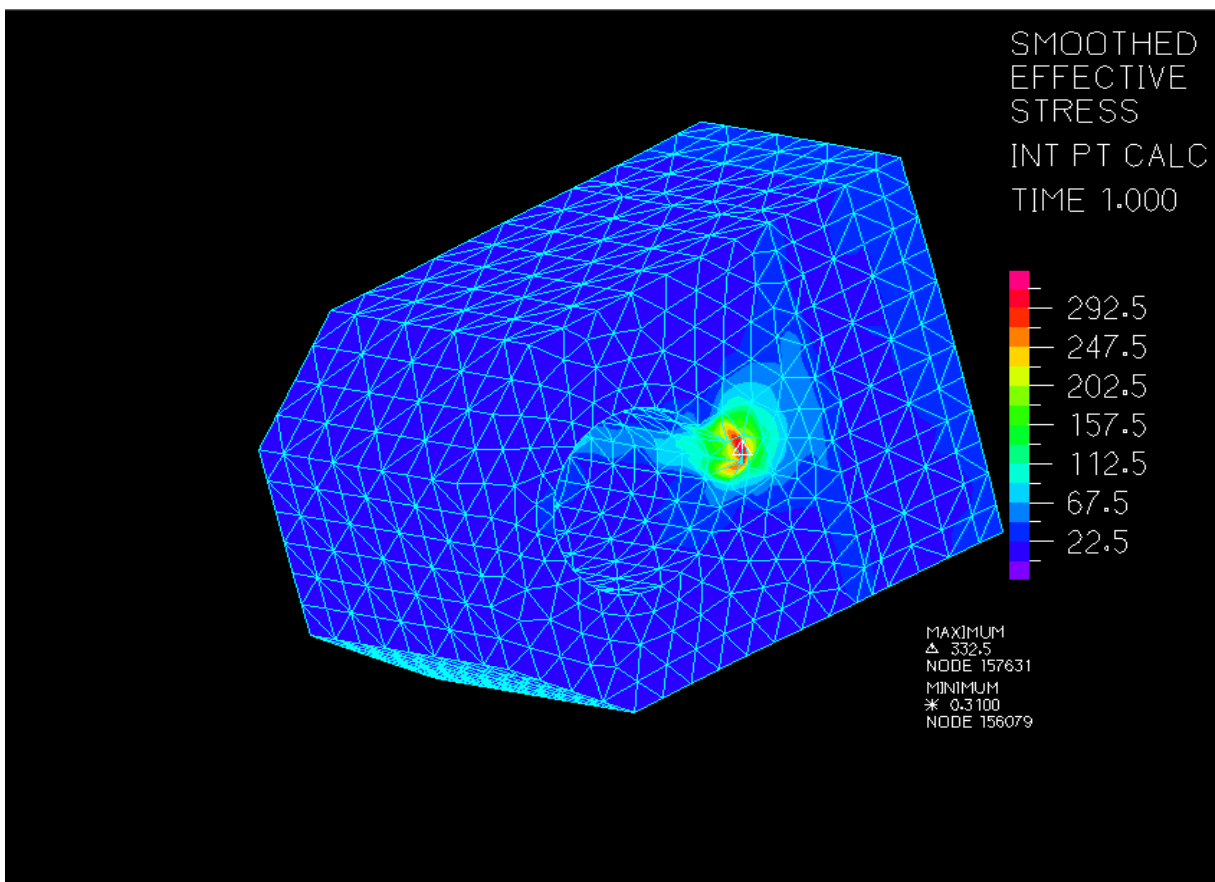
Ραβδωτό μοντέλο(ελατήρια)	Ραβδωτό μοντέλο(ελευθέρωση ροπής)	Αναλυτικό μοντέλο
Μέγιστη βύθιση πλαισίου 13,16 mm	Μέγιστη βύθιση πλαισίου 6,2mm	Μέγιστη βύθιση πλαισίου 15,03 mm
Μέγιστη βύθιση φορέα 14,16 mm	Μέγιστη βύθιση φορέα 6,705 mm	Μέγιστη βύθιση φορέα 16,05 mm

Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τις αποκλίσεις. Παρατηρούμε μια αύξηση της τάξεως του 14,2 % στη παραμόρφωση του πλαισίου και μια αντίστοιχη (13,35 %) στην συνολική. Η τάξη μεγέθους της αύξησης δεν είναι μεγάλη και μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της κάμψης του πείρου αλλά και των παραμορφώσεων των μελών στις διάφορες διευθύνσεις, ενδοτικότητα η οποία δεν έχει προσομοιωθεί στα αντίστοιχα ραβδωτά μέλη. Σε αντίθεση παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικού μοντέλου και του μοντέλου με τις ελευθερώσεις οπής καθώς οι αποκλίσεις στην μέγιστη παραμόρφωση του πλαισίου και συνολικά του φορέα είναι της τάξης του 142,42 % και 139,37 % αντίστοιχα.

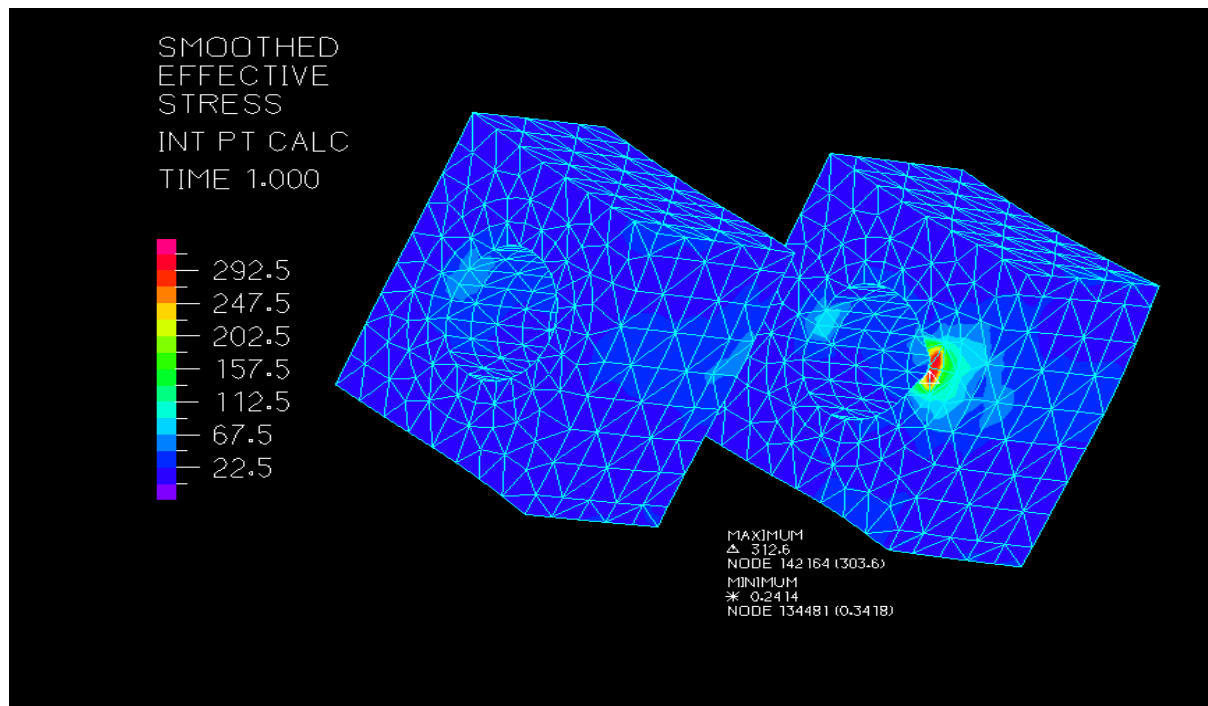
Οι τάσεις Von Mises όπως και η παραμορφωμένη εικόνα πείρου και υποδοχέων δείχνουν κλείσιμο της οπής μεταξύ πείρου και αρσενικού υποδοχέα κατά την διαμήκη διεύθυνση του φορέα καθώς εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές τάσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα. Το πλαίσιο υπό την επιβολή κατακόρυφων φορτίων κάμπτεται με την εικόνα παραμόρφωσης να ομοιάζει με την αντίστοιχη της αμφιέριστης δοκού. Συνεπώς η θλίψη του άνω πέλματος του πλαισίου οδηγεί τους υποδοχείς στο να πλησιάσουν ο ένας με τον άλλον και να έρθουν σε επαφή με τον πείρο. Τα θηλυκά τεμάχια εμφανίζουν τοπικά τάσεις στα εσωτερικά σημεία της κυλινδρικής επιφάνειας της άντυγας (από την πλευρά του αρσενικού μέλους δηλαδή), καθώς ορισμένοι κόμβοι του πείρου έρχονται σε επαφή. Οι υψηλότερες τιμές τάσεων του κριτηρίου αστοχίας, οι οποίες, σημειωτέον, δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής, παρατηρούνται στους ακραίους κόμβους της άντυγας του αρσενικού(Σχήμα 5-25), λογικό αποτέλεσμα καθώς στο σημείο επαλληλίζονται και οι τάσεις λόγω επαφής των παρακείμενων υποδοχέων, γεγονός που εξηγεί και τις χαμηλότερες τιμές στα αντίστοιχα σημεία του πείρου. Αντίστοιχες υψηλές τιμές εμφανίζονται και στα θηλυκά τεμάχια, όπως δείχνει το Σχήμα 5-26. Οι τάσεις στα σημεία επαφής τείνουν σε ένα ισόρροπο σύστημα με μικροδιαφορές να παρατηρούνται στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων λόγω απεικόνισης αποτελεσμάτων σε διαφορετικά σημεία ολοκλήρωσης στα τρισδιάστατα στοιχεία. Πιθανότατα η παρατηρούμενη υψηλή στάθμη των τάσεων να οφείλεται στην παραδοχή πλήρως ελαστικού υλικού.



Σχήμα 5-24: Παραμόρφωση των υποδοχέων και του πείρου σε μεγέθυνση, τάσεις Von Mises σε MPa



Σχήμα 5-25: Μέγιστη τάση Von Mises στη συμβολή άντυγας και επιφάνειας επαφής με θηλυκά τεμάχια



Σχήμα 5-26: Μέγιστες τιμές τάσεων σε αντίστοιχα σημεία στα θηλυκά τεμάχια

## 5.6 Ελαστικές αναλύσεις μεμονωμένου προσομοιώματος κόμβου

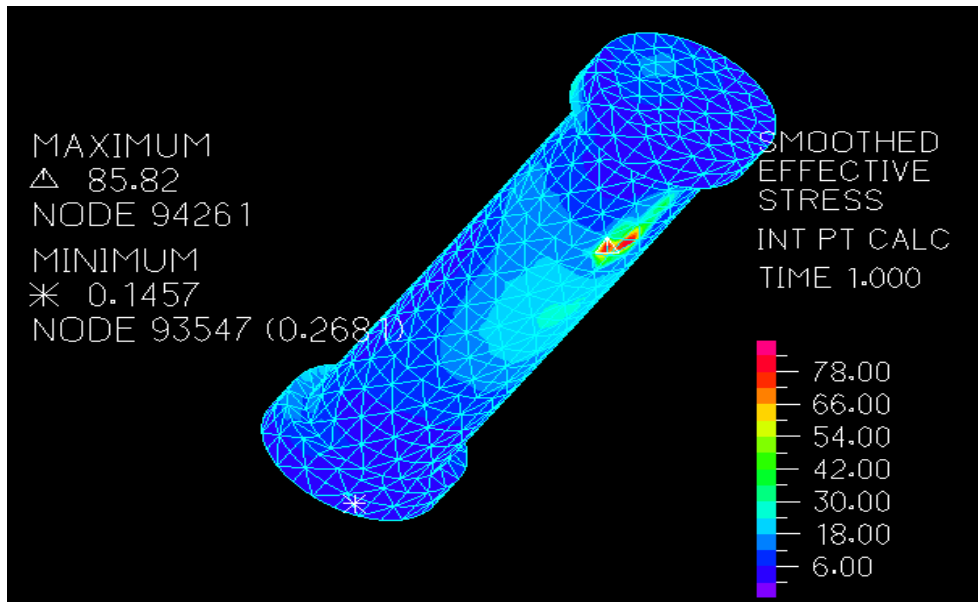
Το τελικό μοντέλο της γέφυρας με τους δύο αναλυτικούς κόμβους εμφάνιζε κάποιες αδυναμίες στη σύγκλιση, όσον αφορά την επιβολή των κινητών φορτίων, όπως επίσης δεν γινόταν να εισαχθεί μη γραμμικός καταστατικός νόμος του υλικού. Συνεπώς επιλέχθηκε να απομονωθεί σε πρώτη φάση το αναλυτικό προσομοίωμα της σύνδεσης πλαισίων. Οι συνοριακές συνθήκες στην προκειμένη καθορίστηκαν με την εξαγωγή εντατικών μεγεθών και μετακινήσεων από δύο μοντέλα:

- παλαιότερη προσομοίωση αναλυτικού μοντέλου, με διαφορετική σύνδεση shell και solid στοιχείων (υλοποιήθηκαν με άκαμπτους συνδέσμους που όπως προαναφέρθηκε δεν είναι ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος).
- Μοντέλο μόνο με στοιχεία δοκού (μοντέλο 2)

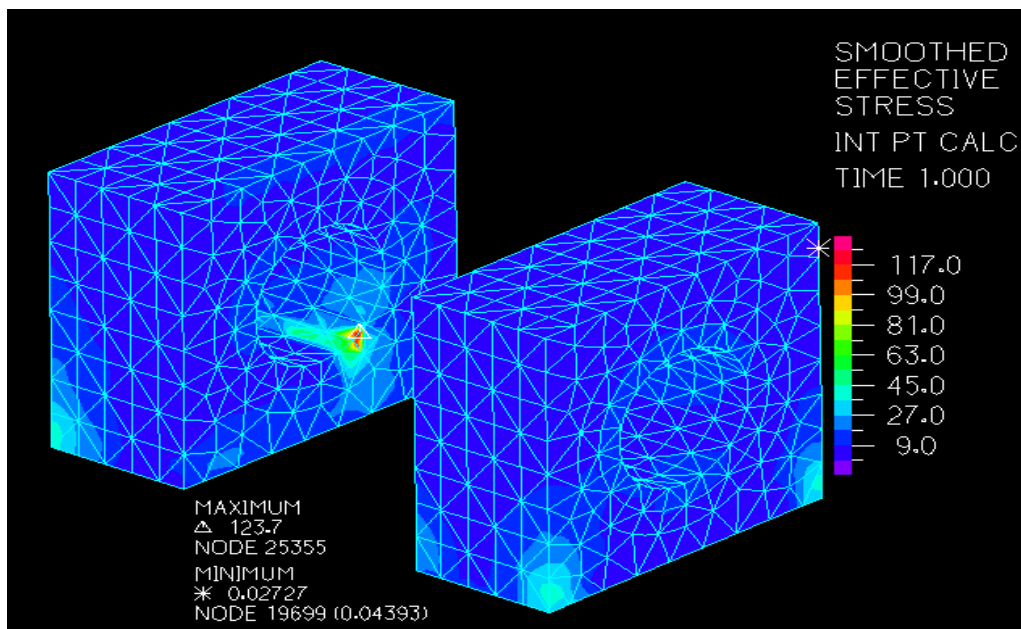
Οι μετακινήσεις του ολικού φορέα επιβλήθηκαν στα άκρα του κόμβου και στο σημείο σύνδεσης αντηρίδας και ορθοστάτη, όπως αντίστοιχα εισήχθησαν ελατήρια στα αντίστοιχα σημεία προκειμένου στα άκρα του κόμβου να υφίστανται τα ίδια εντατικά μεγέθη, όταν όλη η κατασκευή φορτίζεται με κινητά και μόνιμα φορτία.

Σε πρώτη φάση το υλικό επιλέχθηκε να είναι γραμμικό πλήρως ελαστικό και τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα για τον δυσμενέστερο όχημα που προβλέπει ο Αμερικάνικος Κανονισμός (1,35×GI.B +1×RISK). Παρατηρούμε πως όταν γίνεται χρήση των μεγεθών του ραβδωτού (μοντέλου 2) ο πείρος (Σχήμα 5-27) και η άντυγα (Σχήμα 5-28, Σχήμα 5-29) δεν εμφανίζουν υψηλές τάσεις καθώς η επαφή συντελείται τοπικά σε συγκεκριμένα σημεία. Τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι τόσο συμβατά με την πραγματική και αναμενόμενη συμπεριφορά του κόμβου, καθώς τα στοιχεία δοκού στο σημείο σύνδεσης των ζευκτών δεσμεύονται με μη γραμμικά ελατήρια τα οποία παρουσιάζουν πολύ μικρή δυσκαμψία όσο υφίσταται η αρχική ανοχή πείρου-οπής, ενώ πρακτικά εμφανίζουν άπειρη δυσκαμψία όταν κλείνει το κενό, θέλοντας να προσομοιώσουν τις συνθήκες μη ενδοτικότητας μεταξύ των επιφανειών σε επαφή. Στον αντίποδα όμως δεν λαμβάνεται υπόψη η κάμψη του πείρου και οι παραμορφώσεις των μελών, με αποτέλεσμα οι μετακινήσεις και τα εντατικά μεγέθη να «παγώνουν» με το που υπάρξει επαφή πείρου-άντυγας μην επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη σημαντικών δυνάμεων επαφής στον μεμονωμένο κόμβο. Συνεπώς για τις αναλύσεις επιλέχθηκαν τα εντατικά μεγέθη του

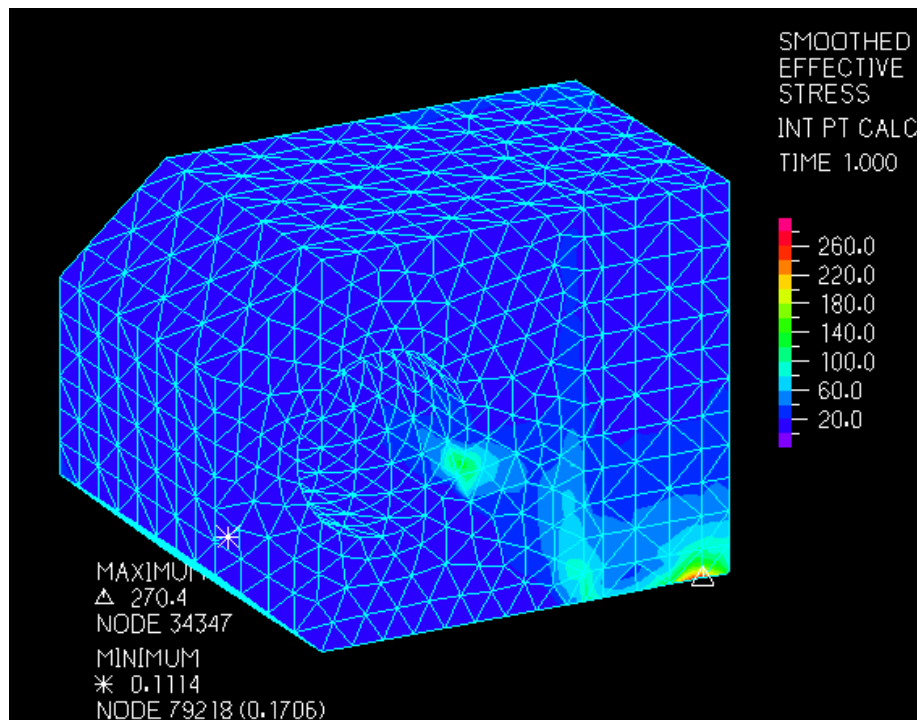
αναλυτικού μοντέλου. Παρενθετικά και εκτός πλαισίων της εργασίας να αναφερθεί πως παρουσιάζει ενδιαφέρον ερευνητικά η συσχέτιση των δυσκαμψιών ελατηρίου με τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβών σε συνδυασμό με την στιβαρότητα πείρου και υποδοχέων. Έτσι θα υπήρχε η ευχέρεια της δημιουργίας ενός ρεαλιστικότερου μοντέλου, μορφωμένου αποκλειστικά με στοιχεία δοκού, όπου με μικρό υπολογιστικό κόστος θα μπορούσε να υπολογιστεί η συμπεριφορά του φορέα και η αντοχή του σε διάφορες καταστάσεις φόρτισης.



Σχήμα 5-27: Τάσεις Von Mises στον πείρο με επιβολή εντατικών μεγεθών στα άκρα από το ραβδωτό μοντέλο

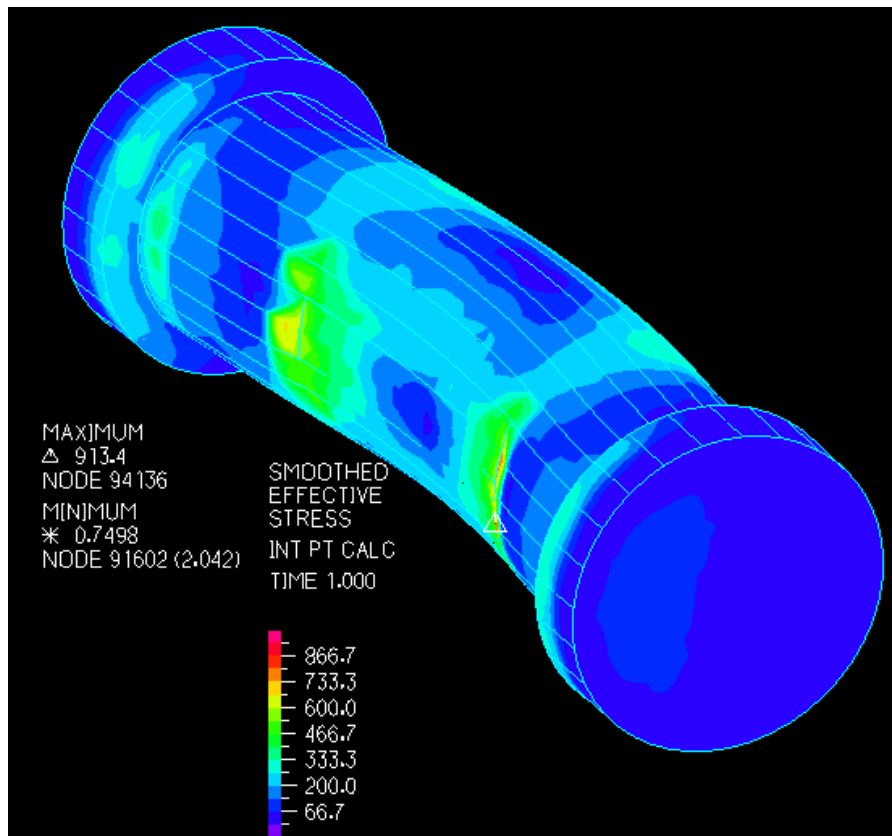


Σχήμα 5-28: Τάσεις Von Mises στα θηλυκά τεμάχια με επιβολή εντατικών μεγεθών στα άκρα από το ραβδωτό μοντέλο

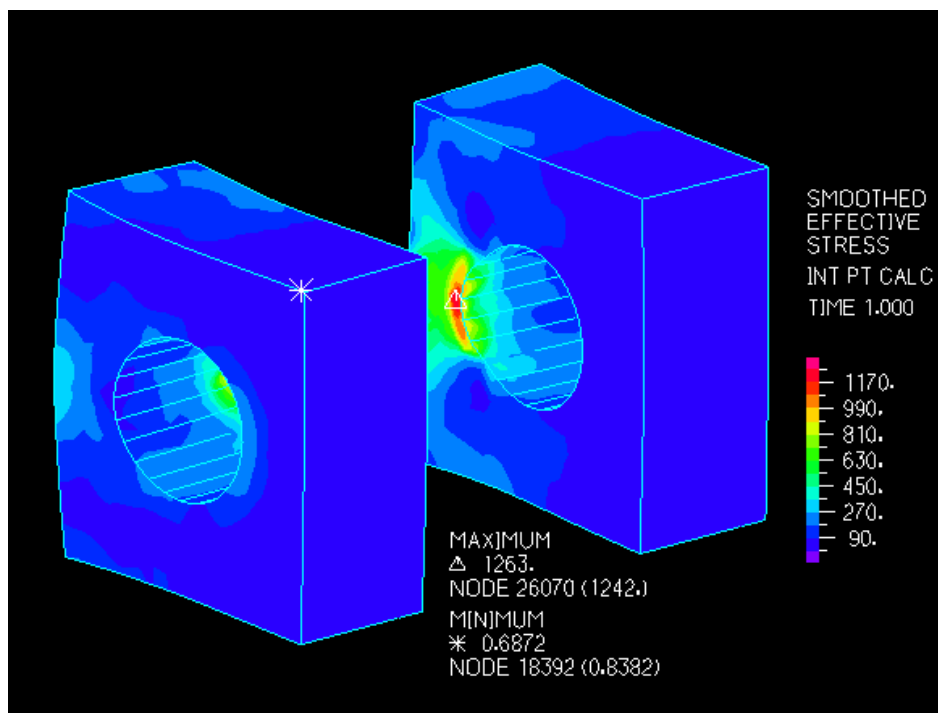


Σχήμα 5-29: Τάσεις Von Mises στον αρσενικό υποδοχέα με επιβολή εντατικών μεγεθών στα άκρα από το ραβδωτό μοντέλο

Αντίθετα για την ίδια φόρτιση η επιβολή των εντατικών μεγεθών του αναλυτικού μοντέλου αποδίδει μια πιο ρεαλιστική συμπεριφορά. Ο πείρος και οι υποδοχείς έρχονται σε επαφή και συνεχίζουν να παραμορφώνονται υπό τις καινούριες συνοριακές συνθήκες, εμφανίζοντας μεγαλύτερες τιμές από την προηγούμενη ανάλυση και όχι τόσο τοπικά. Η παραδοχή πλήρως ελαστικού υλικού οδήγησε στη συσσώρευση τάσεων με υψηλότερες τιμές (Σχήμα 5-30, Σχήμα 5-31, Σχήμα 5-32) κυρίως στις περιοχές της άντυγας, και συγκεκριμένα στα σημεία όπου επαφίονται τα μέλη μεταξύ τους, σημεία ανάλογα με τις προηγούμενες αναλύσεις. Γίνεται αντιληπτό πως για το μέγιστο όχημα που προβλέπεται από τον Αμερικάνικο Κανονισμό, τα μέλη του κόμβου πλαστικοποιούνται. Το φαινόμενο της δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων αναφέρεται στον κανονισμό ως πιθανό ενδεχόμενο κατά την μετα προσοχής κυκλοφορία (risk), όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.5. Επομένως επιβάλλεται να προσδοθεί στο μοντέλο μη γραμμικότητα υλικού προκειμένου να παρατηρηθούν πιθανά σημεία αστοχίας καθώς και για να έχουμε μια ρεαλιστικότερη εικόνα τάσεων.

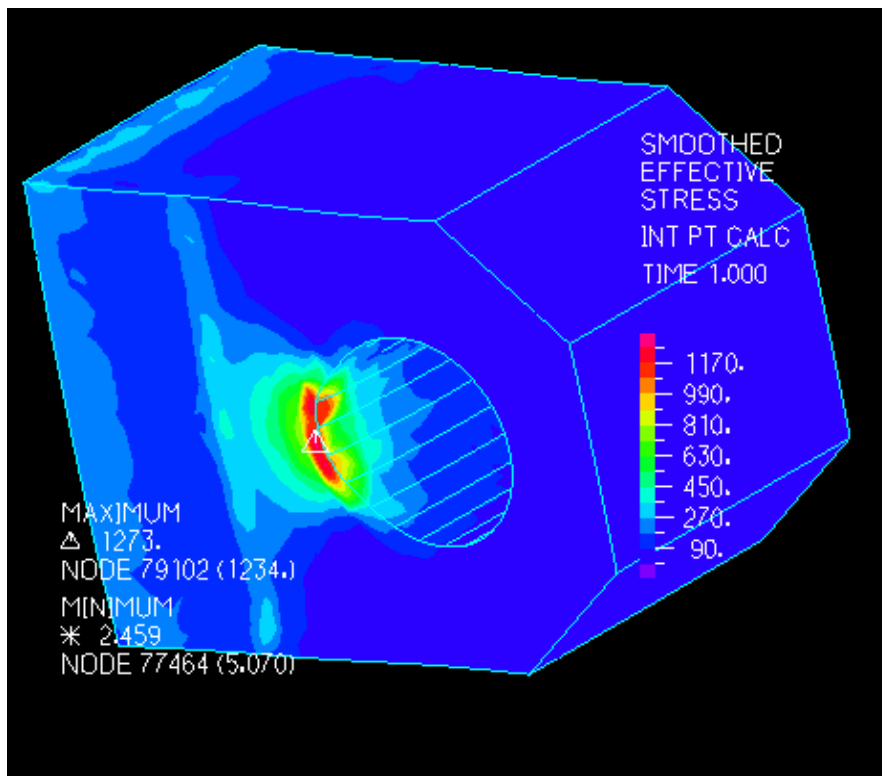


Σχήμα 5-30: Τάσεις Von Mises στον πείρο για ελαστική ανάλυση με εντατικά μεγέθη αναλυτικού μοντέλου



Σχήμα 5-31: Τάσεις Von Mises στον πείρο για ελαστική ανάλυση με εντατικά μεγέθη αναλυτικού μοντέλου





Σχήμα 5-32: Τάσεις Von Mises στον αρσενικό υποδοχέα για ελαστική ανάλυση με εντατικά μεγέθη αναλυτικού μοντέλου

## 5.7 Ελαστικές αναλύσεις αναλυτικού μοντέλου με άκαμπτους συνδέσμους σύνδεσης shell και solids στοιχείων

Όπως προαναφέρθηκε έγιναν αναλύσεις για τον ολικό φορέα με αναλυτικά συμμετρικά προσομοιώματα με σύνδεση shell και solid να επιτυγχάνεται με άκαμπτους συνδέσμους. Παρακάτω γίνεται έλεγχος των ορθών τάσεων συγκρίνοντας το με το όριο διαρροής μέσω του τύπου  $\sigma = N/A + M/W_{el}$ , προκειμένου να παρατηρηθεί προσεγγιστικά αν είναι έντονο το φαινόμενο της πλαστικοποίησης.

*Έλεγχος ορθών τάσεων για κατάσταση κυκλοφορίας RISK (συνδυασμός  $1,35 \times G_{I.B} + 1 \times RISK + 1 \times WIND$ ) σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό:*

- Αντηρίδα → 62,642 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 87,706 MPa (κάμψη περί τον ασθενή άξονα), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 18,171 % και 25,44 % αντίστοιχα
- Διαδοκίδα → 125,47 MPa, ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 36,4 %
- Αρσενικός υποδοχέας → 91,742 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 82,018 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 26,61 % και 23,79 % αντίστοιχα
- Θηλυκός υποδοχέας → 86,129 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 79,836 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 24,98 % και 23,16 % αντίστοιχα
- Χορδές πλαισίου → 313,823 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 242,554 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 91,03 % και 70,36 % αντίστοιχα
- Ορθοστάτες και διαγώνια μέλη πλαισίου → 251,411 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 281,643 MPa (κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 72,93 % και 81,7 % αντίστοιχα

*Έλεγχος ορθών τάσεων για συνδυασμό αστοχίας κατά Ευρωκώδικα ( $1,35 \times G_{I.B} + 1,5 \times Q + 1,5 \times 0,9 \times WIND$ )*

- Αντηρίδα → 100,21 MPa (κάμψη περί τον ισχυρό), 54,35 MPa (κάμψη περί τον ασθενή άξονα), ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 18,171 % και 25,44 % αντίστοιχα
- Διαδοκίδα → 132,14 MPa, ποσοστό επί του ορίου διαρροής → 38,33 %

- Αρσενικός υποδοχέας →153,84 MPa(κάμψη περί τον ισχυρό), 148,77 MPa(κάμψη περί τον ασθενή) , ποσοστό επί του ορίου διαρροής→26,61 % και 23,79 % αντίστοιχα
- Θηλυκός υποδοχέας→144,87 MPa(κάμψη περί τον ισχυρό), 133,98 MPa(κάμψη περί τον ασθενή), ποσοστό επί του ορίου διαρροής→42,02 % και 33,86 % αντίστοιχα
- Χορδές πλαισίου→υπέρβαση του ορίου διαρροής σε σημαντικό αριθμό δομικών στοιχείων τόσο περί την κάμψη περί τον ισχυρό(11,29 % των διακριτοποιηθέντων στοιχείων δοκού χορδής), όσο και περί τον ασθενή(7,78 %)
- Ορθοστάτες και διαγώνια μέλη πλαισίου→ υπέρβαση του ορίου διαρροής σε αριθμό δομικών στοιχείων(συνολικά μικρότερος αριθμός από τις χορδές) τόσο περί την κάμψη περί τον ισχυρό(0,97 % των διακριτοποιηθέντων στοιχείων), όσο και περί τον ασθενή(2,16 %)

Συνεπώς για φορτία Ευρωκώδικα τα οποία απλοποιητικά λήφθηκαν υπόψη ως κατανεμημένα στις αντίστοιχες διαδοκίδες και όχι συγκεντρωμένα, γίνεται αντιληπτό πως σημαντικό ρόλο παίζει και η μη γραμμικότητα υλικού στην απόκριση του φορέα.

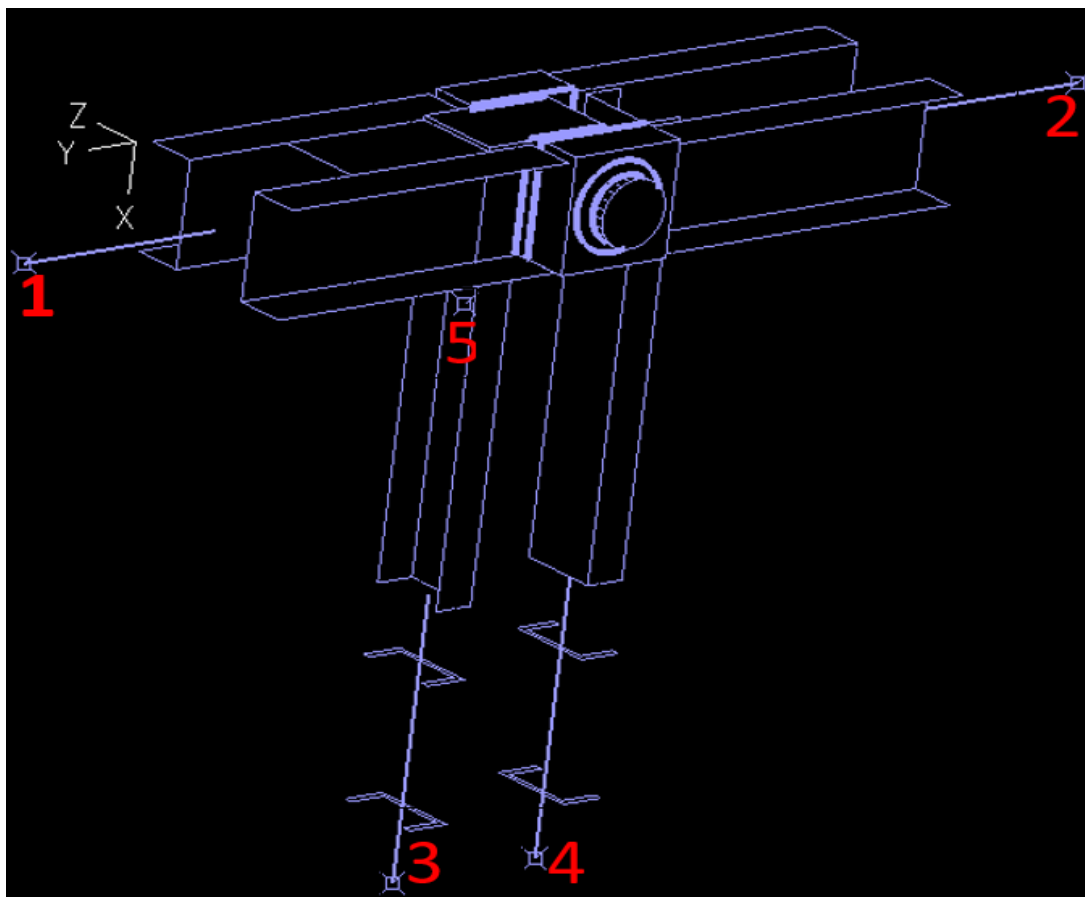
## 5.8 Μη γραμμικές αναλύσεις υλικού μεμονωμένου κόμβου

Για τις μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού του κόμβου εισήχθησαν δυο στοιχεία δοκού εκατέρωθεν του κόμβου, οριζοντίως και κατακόρυφως, τα οποία αποτελούσαν τις προεκτάσεις των χορδών του πλαισίου και των ορθοστατών αντίστοιχα, ενώ το πλάγιο μέλος της αντηρίδας παραλείφθηκε, μεταφέροντας φυσικά τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη της αρθρωτής σύνδεσης της στον ορθοστάτη. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα μέλη του αναλυτικού κόμβου είναι ελαστικά πλήρως πλαστικά χωρίς κράτυνση με μόνη διαφορά στο όριο διαρροής (344,74 MPa για τους υποδοχείς, 897 MPa για τον πείρο).

*Φόρτιση κόμβου υπό συνδυασμό  $1,35 \times G_{\beta} + 1 \times Risk$*

Σε πρώτη φάση επιλέχθηκε να εξαχθούν από τον ολικό φορέα τα προκύπτοντα εντατικά μεγέθη και οι μετακινήσεις στα ακραία σημεία του μοντέλου(σημεία 1-5, Σχήμα 5-33), υπό το μέγιστο κανονιστικό όχημα που προβλέπει ο Αμερικάνικος Κανονισμός, και με εφαρμογή μητρώου περιστροφής, ανήχθησαν από το τοπικό σύστημα δοκού στο καθολικό σύστημα του κόμβου. Η ανάλυση συντελέστηκε με την επιβολή των μετακινήσεων σε επαρκή αριθμό βημάτων και σε συνδυασμό με ελατήρια υπολογισμένης δυσκαμψίας προέκυψαν και τα αντίστοιχα ακραία εντατικά μεγέθη του κόμβου, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα και στο σχήμα

Η παραμόρφωση του προσομοιώματος στο τέλος της ανάλυσης (Σχήμα 5-34) υποδεικνύει πως ο πείρος κάμπτεται κυρίως περί τον κατακόρυφο άξονα της γέφυρας καθώς τα εκατέρωθεν dupn του πλαισίου συγκλίνουν διαμήκως λόγω της αναπτυσσόμενης θλιπτικής έντασης, ενώ αμελητέες είναι οι διαφορές των μετακινήσεων στα μέλη όσον αφορά την κατακόρυφη διεύθυνση. Επομένως από την εικόνα παραμόρφωσης συνολικά του κόμβου και μεμονωμένα του πείρου, αναμένεται οι δυνάμεις επαφής και κατά συνέπεια και οι αναπτυσσόμενες τάσεις να είναι πολύ υψηλότερες σε ορισμένα σημεία της άντυγας, όπου τα αντίστοιχα σημεία του πείρου αναγκάζονται σε διαφορικές μετακινήσεις και στροφές οδηγώντας στην κάμψη του μέλους, παρά στις επιφάνειες που απλά έρχονται σε επαφή και μετακινούνται ενιαία σαν στερεό σώμα.



Σχήμα 5-33: Αρίθμηση άκρων κόμβου

Πίνακας 5-2: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα της χορδής(σημείο 1 Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	49,3	74,2	1,51
γ(άξονας//χορδές)	-8,48	-613887	72354,28
z(άξονας πείρου)	-5,22	-6181	1184,96
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,0011	-2119288	1918063915
Y	-0,00307	-5833	1898540,54
Z	0,005479	1447473	264195262

Πίνακας 5-3: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στο άκρο του κόμβου (σημείο 2, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	51,43	721,2	14,02
γ(άξονας//χορδές)	-6,34	-613506	96691,71

z(άξονας πείρου)	-4,28	-8049	1879,85
	<b>Στροφές(rad)</b>	<b>Ροπές(Nmm)</b>	<b>Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)</b>
x	-0,00153	-4034584	2643410121
y	-0,00373	-9128	2444829,95
z	0,001087	68300	62832908,6

Πίνακας 5-4: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στο άκρο του κόμβου(σημείο 3, Σχήμα 5-33)

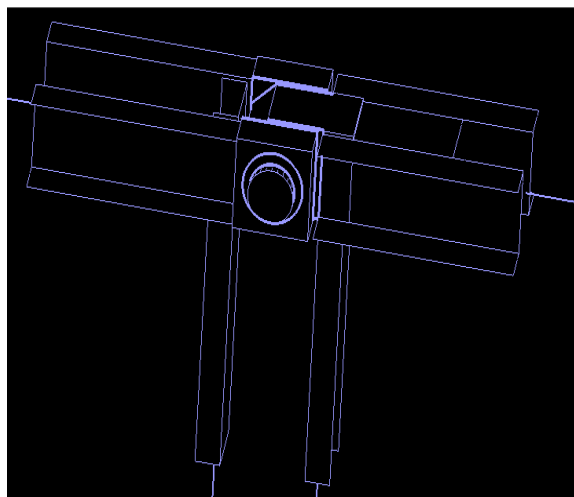
	<b>Μετακινήσεις(mm)</b>	<b>Φορτία(N)</b>	<b>Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)</b>
χ(κατακόρυφος)	50,51	31671	626,98
γ(άξονας//χορδές)	-6,46	-1403	217,22
z(άξονας πείρου)	-3,79	-535,6	141,35
	<b>Στροφές(rad)</b>	<b>Ροπές(Nmm)</b>	<b>Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)</b>
x	-0,00255	-7390	2893081,269
y	-0,0037	-282720	76075666,66
z	0,0034	278874	82606325,94

Πίνακας 5-5: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρο του κόμβου(σημείο 4, Σχήμα 5-33)

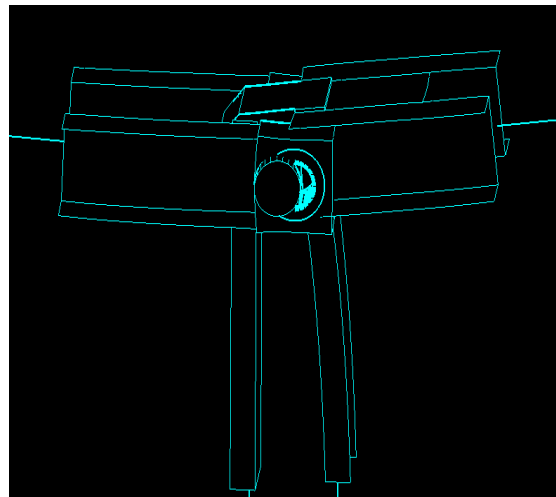
	<b>Μετακινήσεις(mm)</b>	<b>Φορτία(N)</b>	<b>Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)</b>
χ(κατακόρυφος)	51,06	7058	626,98
γ(άξονας//χορδές)	-6,37	-1231	217,22
z(άξονας πείρου)	-3,52	-475	141,35
	<b>Στροφές(rad)</b>	<b>Ροπές(Nmm)</b>	<b>Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)</b>
x	-0,0026	-7390	2893081,27
y	-0,00367	-282720	76075666,66
z	0,00215	278874	82606325,94

Πίνακας 5-6: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου(σημείο 5, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	50,55	20021,26	396,06
γ(άξονας//χορδές)	-7,59	-127,9	16,85
ζ(άξονας πείρου)	-4,67	-7201,18	1543,39

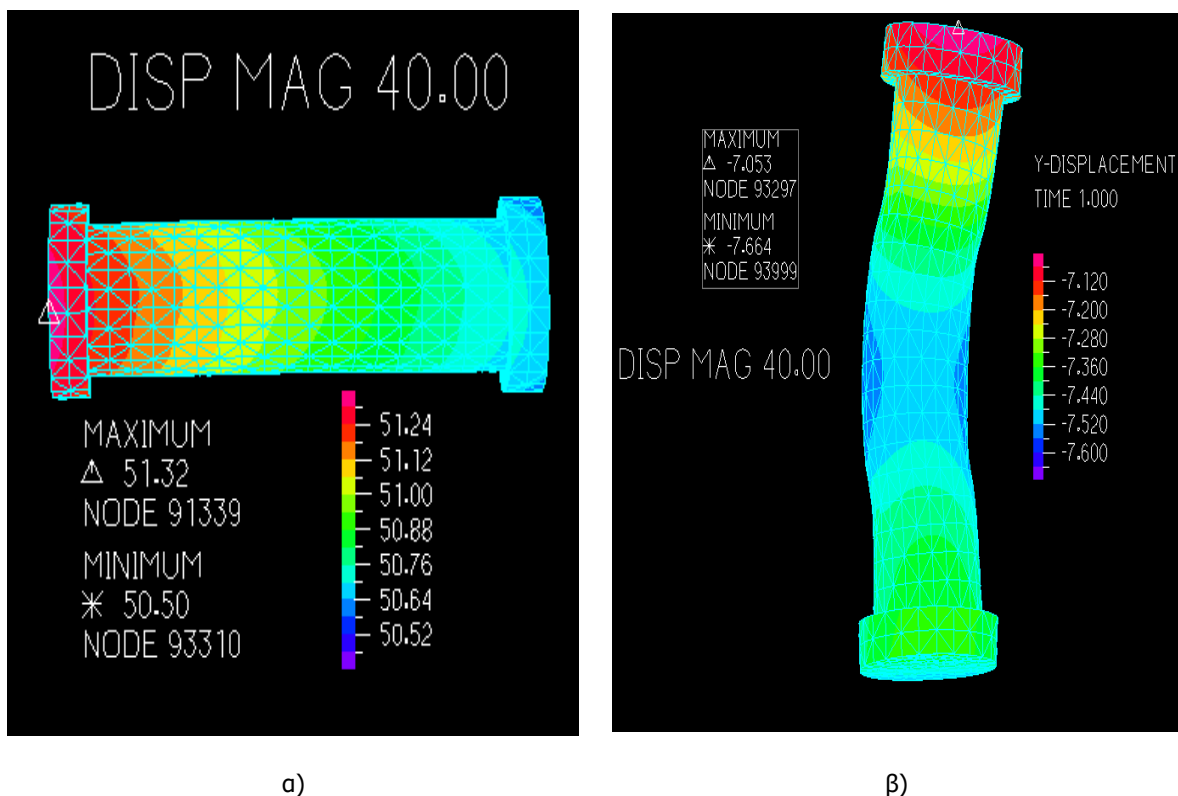


α)



β)

Σχήμα 5-34: α) Απαραμόρφωτος κόμβος ,β) Τελική παραμόρφωση κόμβου-αρίθμηση κόμβων άκρων

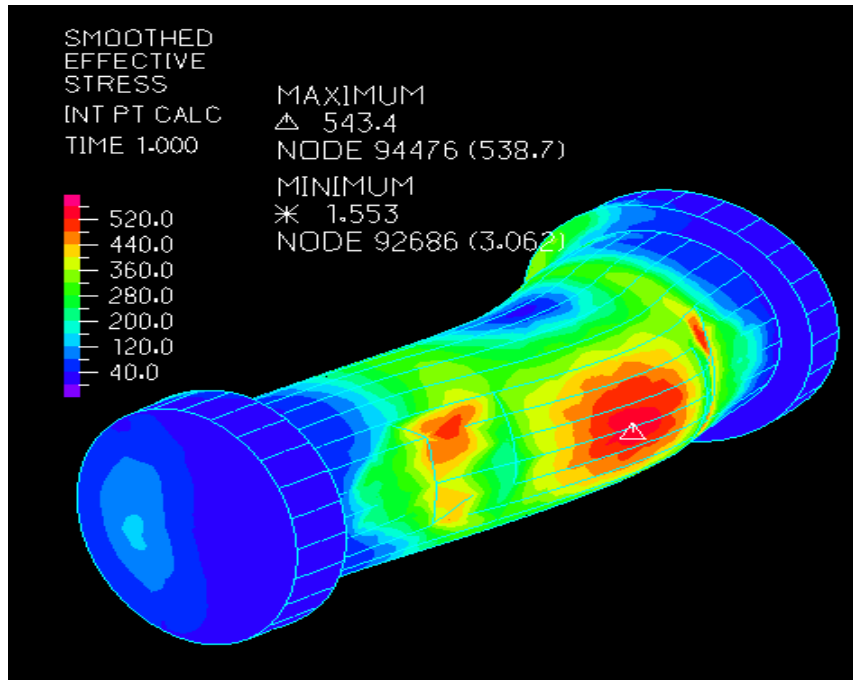


Σχήμα 5-35: α)εικόνα παραμόρφωσης πείρου σε πλάγια όψη, β)εικόνα παραμόρφωσης-κάμψης πείρου σε κάτοψη

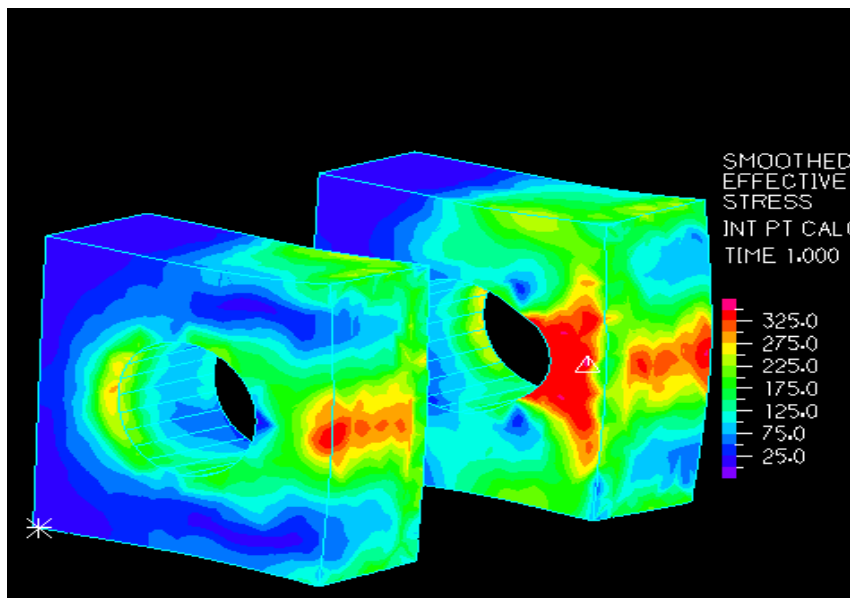
Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε πλαστικοποίηση σε ορισμένα μεμονωμένα σημεία στα οριζόντια μέλη(σημεία με έντονο κόκκινο χρώμα). Η μέγιστη τιμή των τάσεων Von Mises , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-36 είναι τα 543,4 MPa (χωρίς την εφαρμογή κάποιου smooth φτάνουν έως τα 625 MPa) σε στοιχείο του πείρου. Επομένως συμπεραίνουμε πως ο πείρος των πλαισίων λειτουργεί ελαστικά υπό το μέγιστο κινητό φορτίο του Αμερικάνικου Κανονισμού.

Όσον αφορά τους υποδοχείς με έντονο κόκκινο χρώμα φαίνονται οι περιοχές που έχουν υπερβεί το όριο διαρροής και έχουν αρχίσει να αναλαμβάνουν πλαστικές παραμορφώσεις. Οι θηλυκοί υποδοχείς(Σχήμα 5-37) πλαστικοποιούνται σε μια περιοχή πέριξ της οπής από την πλευρά που έρχεται σε επαφή με το μεσαίο τέμαχος, ενώ υψηλές τιμές εμφανίζονται και στη μονολιθική σύνδεση με την οριζόντια χορδή του πλαισίου. Αναμενόμενα και το τέμαχος με την απότμηση(Σχήμα 5-38) πλαστικοποιείται σε ανάλογη περιοχή με τα θηλυκά. Σημαντικές τιμές τάσεων παρατηρούνται και στην κάτω παρειά του μέλους, δηλαδή στο σημείο συγκολλητής σύνδεσης με τα πέλματα και τον κορμό του ορθοστάτη που συντρέχει, ενώ στην ελαστική περιοχή βρίσκεται η πλευρά όπου συμβάλλουν οι οριζόντιες νευρώσεις(Σχήμα 5-39). Αξίζει να σημειωθεί πως η έντονη θλιπτική δράση των οριζοντίων μελών φαίνεται στην παραμόρφωση αλλά και στις τάσεις του κατακόρυφου επιπέδου στο θηλυκό τέμαχος. Ειδικότερα παρατηρούμε μια καμπύλωση της ακραίας διατομής του υποδοχέα λόγω της έντονης θλιπτικής δύναμης που μεταφέρουν τα πέλματα, αλλά και ο κορμός. Θα περιμέναμε αν ήταν έντονη η μεταφορά καμπτικής εντάσεως δεδομένου ότι υφίσταται συγκολλητή σύνδεση να υπήρχαν μεγαλύτερες τιμές τάσεων στην περιοχή των πελμάτων και η ακραία διατομή με τα solid στοιχεία να έστριβε ενιαία σαν επίπεδη επιφάνεια περί το

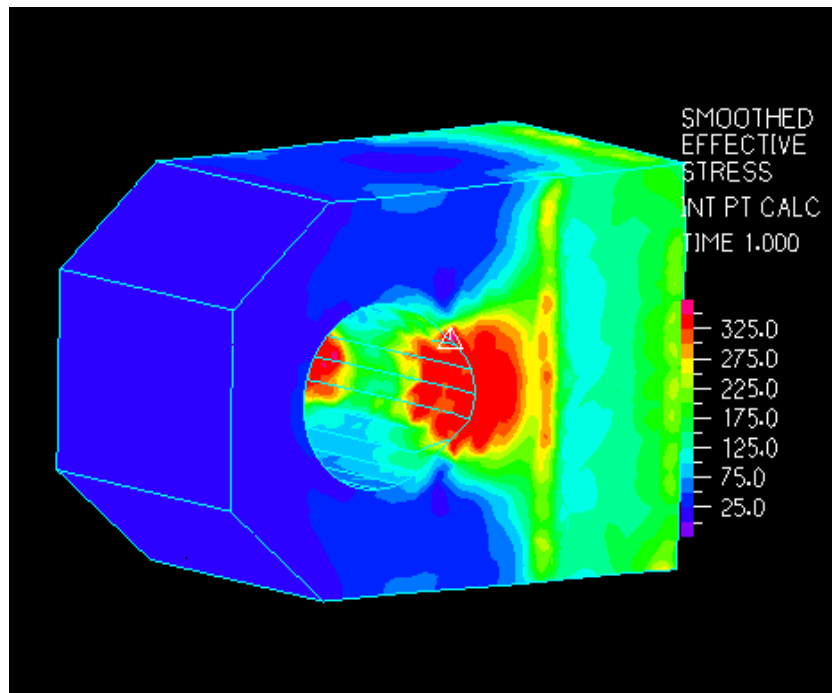
κέντρο βάρους, όπως ορίζει η παραδοχή του Euler-Bernouli. Υπό το πρίσμα της απλοποιητικής θεώρησης πως η διατομή με τα solids αποτελεί μια απλά στηριζόμενη δοκό με μεταφορά συγκεντρωμένων δυνάμεων, είναι αναμενόμενο οι μέγιστες τάσεις να εμφανίζονται στο μέσον της επιφάνειας του υποδοχέα. Επίσης εύλογο αποτελεί ο κορμός του duph να καταπονείται περισσότερο από τα πέλαμα λόγω μεγαλύτερου εμβαδού ( $710,12 \text{ mm}^2$  έναντι  $322,5 \text{ mm}^2$ )



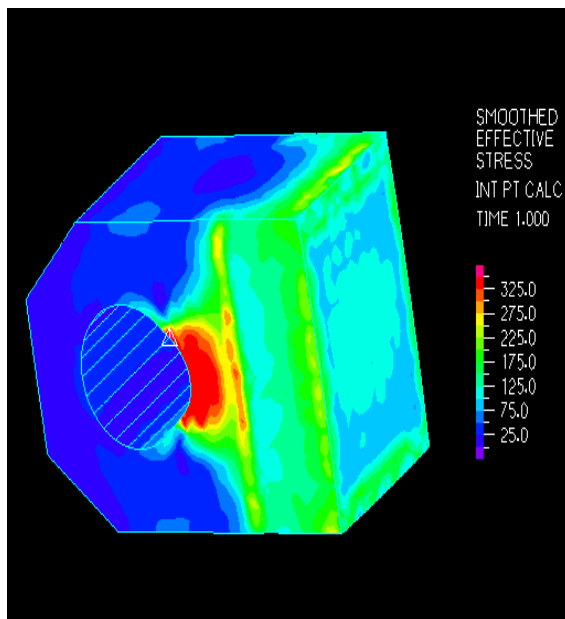
Σχήμα 5-36: Τάσεις Von Mises για πείρο με υλικό ελαστικό πλήρως ελαστικό ( $f_{yd}=897 \text{ MPa}$ )



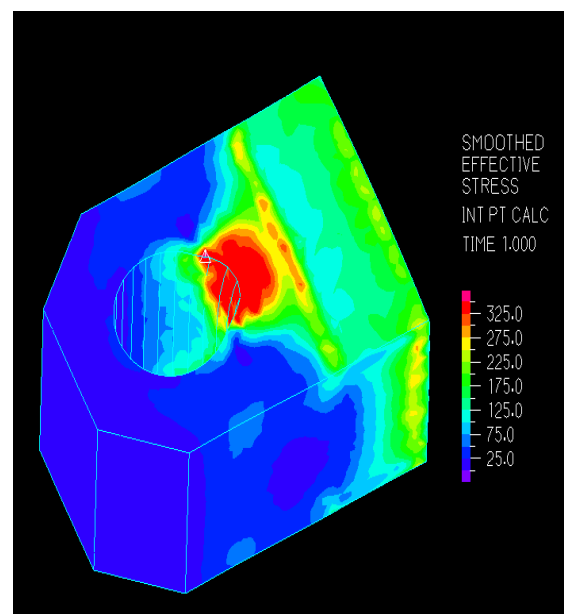
Σχήμα 5-37: Τάσεις Von Mises για θηλυκούς υποδοχείς με υλικό ελαστικό-πλήρως ελαστικό ( $f_{yd}=344,74 \text{ MPa}$ )



Σχήμα 5-38: Περιοχή μεγίστων τάσεων Von Mises περίξ της οπής για ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό ( $f_{yd}=344,74$  MPa)



Σχήμα 5-39: α)Ελαστική περιοχή στην σύνδεση νευρώσεων και χορδών πλαισίου



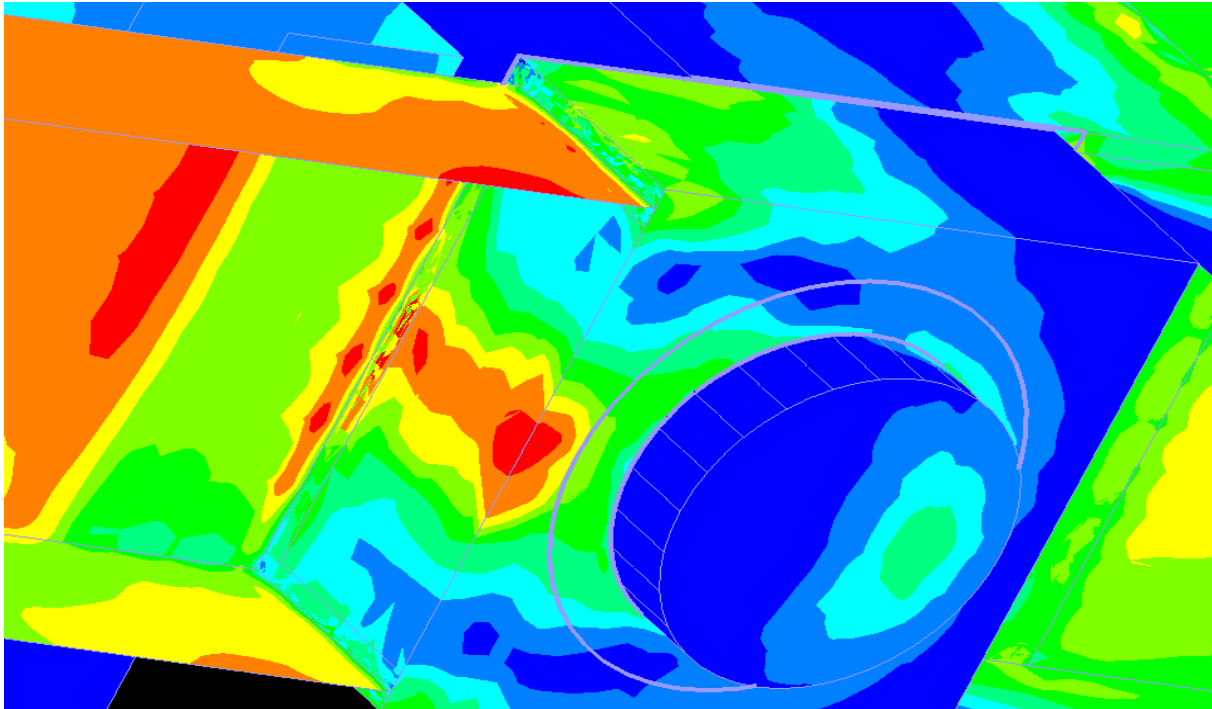
β)ελαστική περιοχή τάσεων στη σύνδεση ορθοστάτη

Συνολικά ο κόμβος(Σχήμα 5-41) πέρα από τις προαναφερθείσες περιοχές των τρισδιάστατων πεπερασμένων, παρουσιάζει υψηλές τιμές τάσεων στα πέλματα των χορδών κυρίως στα άκρα σύνδεσης με τα γραμμικά στοιχεία αλλά και σε άλλα σημεία, όπως:

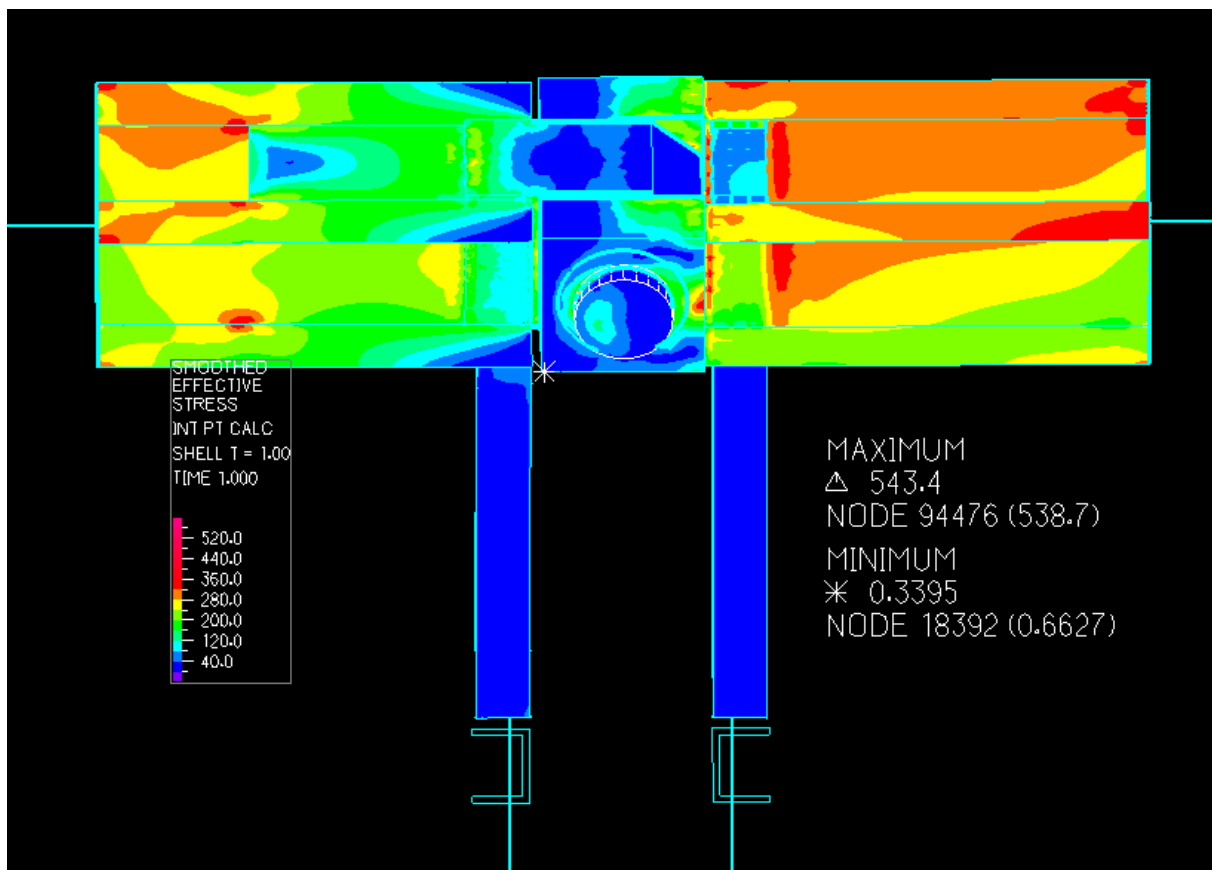
- στον κορμό του  $d_{μρ}$  λίγο πριν τη σύνδεση με τον ορθοστάτη



- σε μεμονωμένα σημεία κοντά στη σύνδεση πέλματος χορδής με οριζόντια ενίσχυση
- στα σημεία σύνδεσης χορδής με θηλυκό υποδοχέα(Σχήμα 5-40)



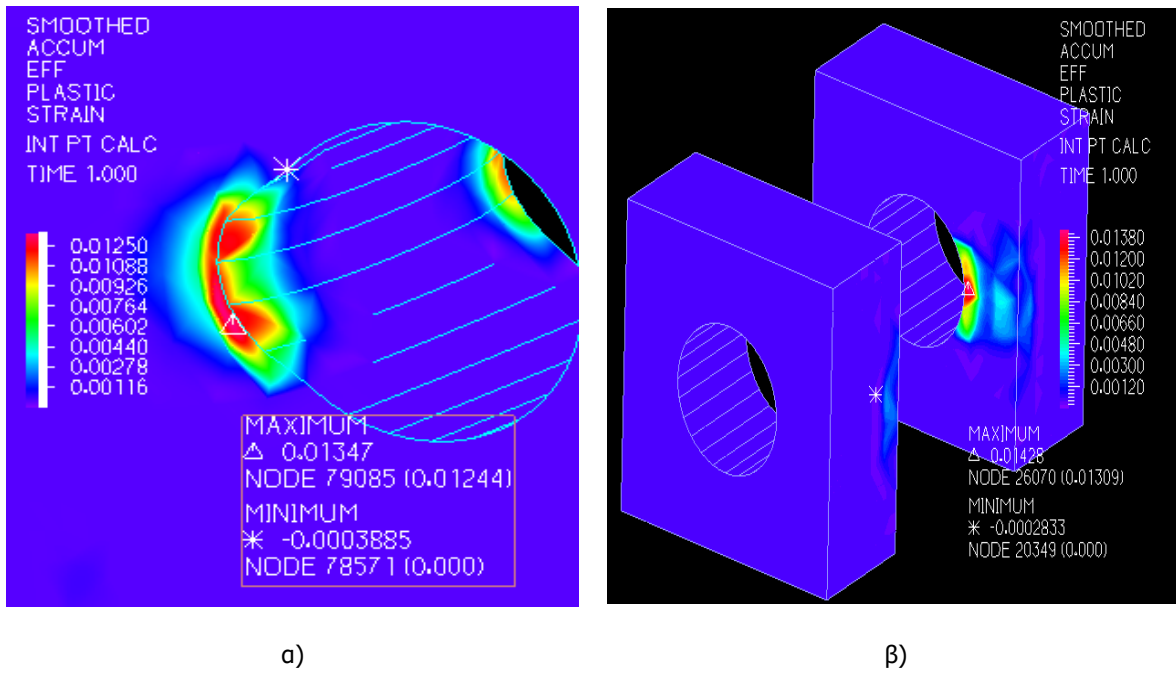
Σχήμα 5-40: Συγκέντρωση τάσεων και διαρροή περιοχής κορμού λόγω της σύνδεσης με υποδοχέα



Σχήμα 5-41: Τάσεις Von Mises στον κόμβο συνολικά, με έντονο κόκκινο συμβολίζεται η διαρροή

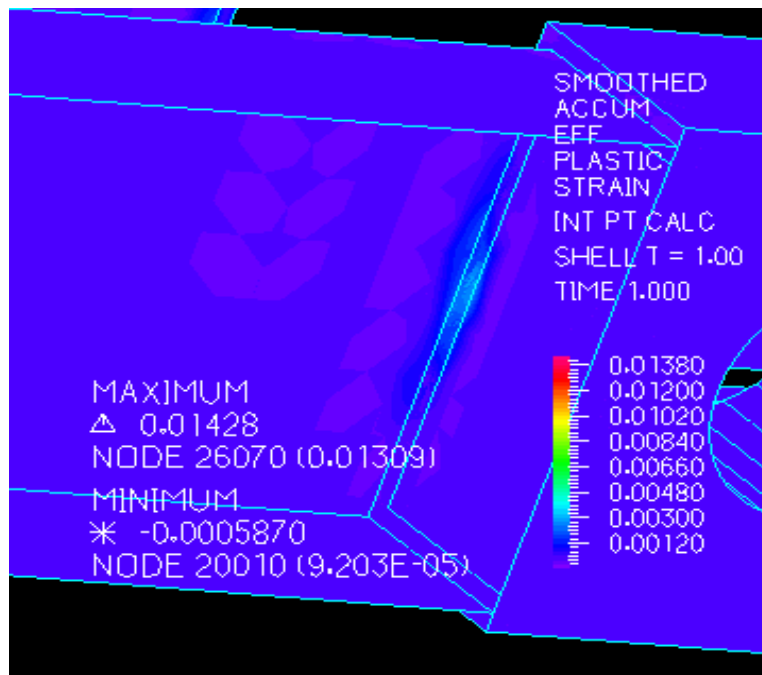
Η θεώρηση μηδενικής κράτυνσης είναι υπέρ της ασφαλείας καθώς στην πραγματικότητα στο υλικό των μελών του κόμβου πλην του πείρου, αστοχεί σε τάση μεγαλύτερη του ορίου διαρροής και συγκεκριμένα όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.3 υπό τάση 35-43 tons/inch<sup>2</sup>. Λαμβάνοντας την μικρότερη τιμή του παραπάνω εύρους έχω  $f_u = 482,63 \text{ N/mm}^2$  (MPa). Επομένως ο χάλυβας παρουσιάζει κράτυνση ( $H = 779,04 \text{ MPa}$ ) της τάξης του 3,8 ‰ του μέτρου ελαστικότητας, και τροπή θραύσης  $\epsilon_u = 18 \%$ . Επομένως για να αποτιμηθεί η αστοχία η μη του κόμβου θα πρέπει να συγκριθούν οι ανηγμένες παραμορφώσεις όλων των μελών με την οριακή.

Οι μεγαλύτερες τιμές ανοιγμένων παραμορφώσεων παρατηρούνται στα σημεία πλαστικοποίησης της άντυγας στο αρσενικό και θηλυκό υποδοχέα, όμως σε κανένα στοιχείο σε αυτές τις περιοχές δεν υπερβαίνει το όριο θραύσης. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η μέγιστη τιμή είναι τα 0,01428 και αποτελεί το 8 % της οριακής τροπής. Οι παραμορφώσεις στα πεπερασμένα του θηλυκού (Σχήμα 5-42) προεκτείνονται έως την κατακόρυφη παρειά, λόγω και της μεταφοράς εντατικών μεγεθών από τη χορδή.



Σχήμα 5-42: Ανηγμένες παραμορφώσεις στην α)άντιστα αρσενικού και β)στην άντιστα του θηλικού

Εξετάζοντας τα στοιχεία κελύφους παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων στη σύνδεση χορδής υποδοχέα(Σχήμα 5-43) και είναι της τάξης του 1,7 % της οριακής. Επομένως συνολικά ο κόμβος παρόλο που πλαστικοποιείται σε ορισμένες περιοχές με εξέχοντα παραδείγματα τα σημεία επαφής οπής και πείρου, βρίσκεται αρκετά μακριά από τα όρια αστοχίας.



Σχήμα 5-43: Μέγιστες τροπές στα στοιχεία κελύφους στη σύνδεση με θηλικό υποδοχέα, τα μωβ σημεία προκύπτουν από τη συγκόλληση του ορθοστάτη

Φόρτιση κόμβου υπό συνδυασμό  $1,35 \times G_{\beta} + 1 \times Risk + 1 \times Wind$

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε για τον συνδυασμό φόρτισης που προβλέπει και την επιβολή πλευρικής δύναμης ανέμου. Στους πίνακες φαίνονται οι μετακινήσεις και τα ελατήρια στο κάθε άκρο.

Πίνακας 5-7: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα της χορδής (σημείο 1, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	48,26	18,64	0,39
γ(άξονας//χορδές)	-8,67	-613848	70674,87
z(άξονας πείρου)	-5,37	-9256	1724,93
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,00073	-5514821,24	757266005
Y	-0,00358	-12920	3607225,62
Z	0,00580	140579	250015340

Πίνακας 5-8: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα της χορδής(σημείο 2, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	51,52	719,2	13,96
γ(άξονας//χορδές)	-6,14	-613456	99855,6181
z(άξονας πείρου)	-4	-11235	2809,41
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,00153	-2088997,75	1369295851
Y	-0,00333	-8916	2675260,14
Z	0,000217	65401	301134532

Πίνακας 5-9: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου(σημείο 3, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	50,46	31670	627,62
γ(άξονας//χορδές)	-6,02	-1425	236,52
z(άξονας πείρου)	-2,77	-543	195,99
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,0008	-7285	9105487,415

Y	-0,0041	-147916,65	36023109,18
Z	0,00145	73664,25	50856593,51

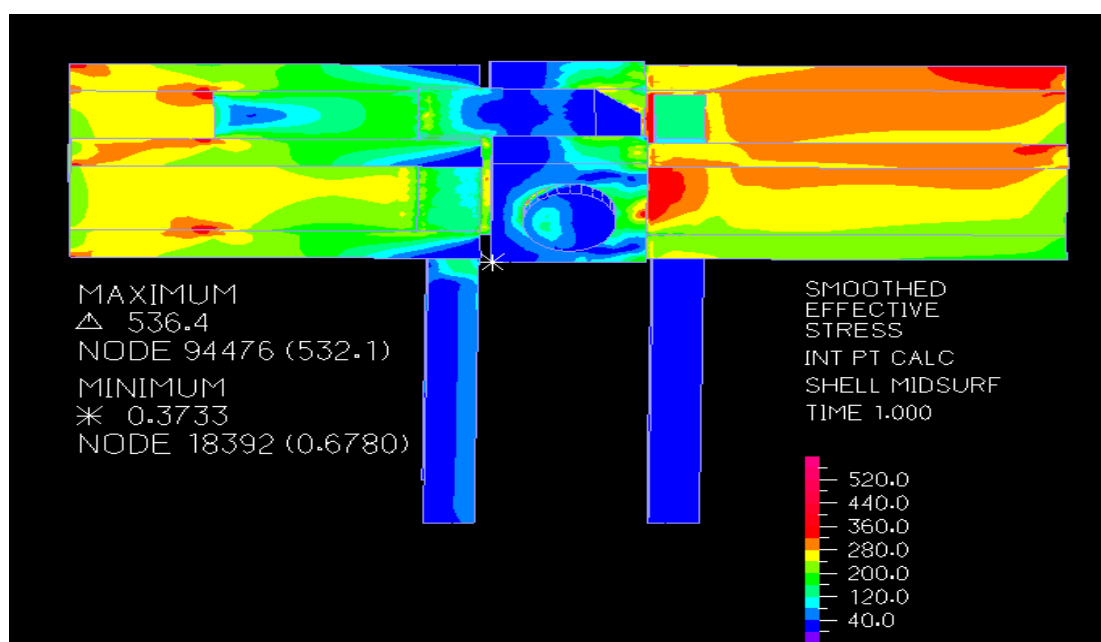
Πίνακας 5-10: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου(σημείο 4, Σχήμα 5-33 )

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	51,05	7057	138,26
γ(άξονας//χορδές)	-5,36	-1239	231,26
z(άξονας πείρου)	-2,6	-475,3	183,08
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,000945	-10881	11518503,07
Y	-0,00376	-8843,09	2353524,264
Z	0,0033	3735,45	1123615,953

Πίνακας 5-11: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου(σημείο 5, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	50,7198	22910,9163	451,7154
γ(άξονας//χορδές)	-7,53994	-11,28	1,496033
z(άξονας πείρου)	6,25262	8099,345849	1295,352

Παρακάτω φαίνεται η εικόνα τάσεων και παρατηρείται πως ο άνεμος έχει επουσιώδη επιρροή στην ανάπτυξη επιπρόσθετης έντασης στα μέλη του κόμβου(Σχήμα 5-44), αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς η κύρια καταπόνηση συντελείται κατά την σύγκλιση των μελών η οποία γίνεται σε διεύθυνση κάθετη με την αντίστοιχη του ανέμου



Σχήμα 5-44: Τάσεις Von Mises για φόρτιση υπό συνδυασμό 1,35G+1RISK+1WIND

#### Φόρτιση κόμβου υπό συνδυασμό Ευρωκώδικα 1,35G+1,35Q+0,9W

Στη συνέχεια για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της απόκρισης του κόμβου εξάγονται και τροποποιούνται όπως και προηγούμενα τα εντατικά μεγέθη και οι μετακινήσεις από το αναλυτικό μοντέλο για τη κατάσταση αστοχίας που προβλέπει ο Ευρωκώδικας. Οι παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5-12-Πίνακας 5-16) δείχνουν τα εντατικά μεγέθη που επιβλήθηκαν στα άκρα, τα οποία αποτελούν τα μέγιστα επιβαλλόμενα στο προσομοίωμα

Πίνακας 5-12: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου (σημείο 1, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	76,3141	3574	46,8327609
γ(άξονας//χορδές)	-12,7344	-1053575	82734,5615
z(άξονας πείρου)	10,3926	9425	906,895291
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	0,002491	731520	293638082
Y	-0,00161	-21287	13260449,8
Z	0,008856	1128272	127405019

Πίνακας 5-13: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου (σημείο 2, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	82,036	2049	24,9768394
γ(άξονας//χορδές)	-9,2215	-989407	107293,499
z(άξονας πείρου)	9,84254	17373	1765,09316
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,00226	-4062491	1796004682
Y	-0,00261	-1276	488381,795
Z	0,000954	4968525	5210506036

Πίνακας 5-14: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου (σημείο 3, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	79,7926	73000	914,8718052
γ(άξονας//χορδές)	-8,21201	-5898	718,2163685
z(άξονας πείρου)	10,209	628,3	61,54373592
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	0,00192514	11021	5724778,458
Y	-0,0062595	-273665	43720018,85
Z	-0,00241296	-192237	79668573,04

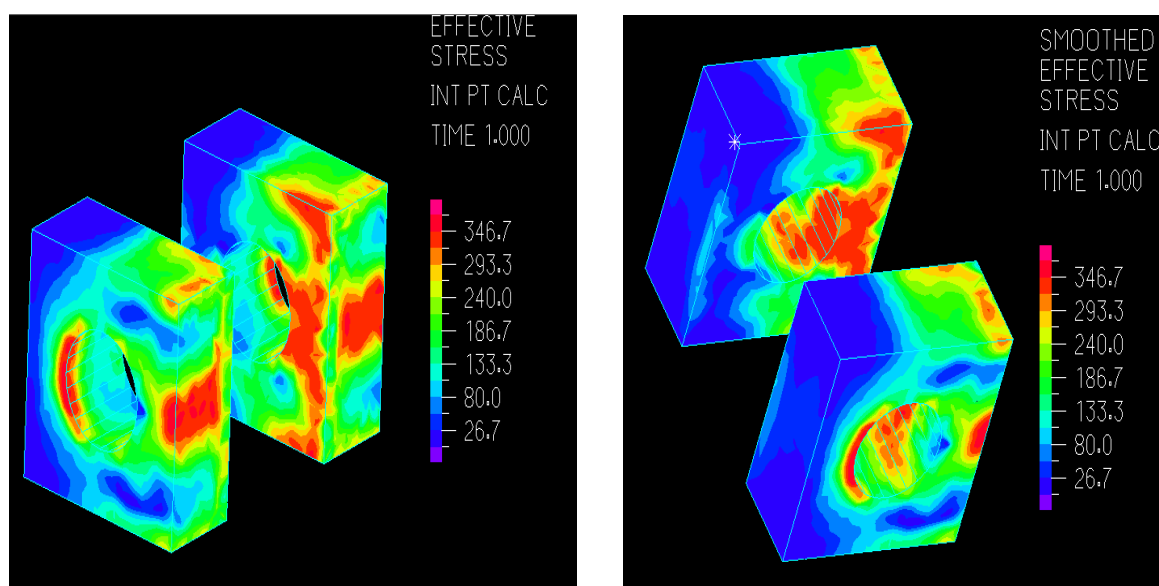
Πίνακας 5-15: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου(σημείο 4, Σχήμα 5-33)

	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	80,9944	3396	41,92882471
γ(άξονας//χορδές)	-7,9203	-138,2	17,44883401
z(άξονας πείρου)	10,2179	426,7	41,76004854
	Στροφές(rad)	Ροπές(Nmm)	Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων(Nmm/rad)
X	-0,0015054	-13101	8702670,387
Y	-0,00122063	-150544	123333414,1
Z	0,00258209	45930	17787915,99

Πίνακας 5-16: Μετακινήσεις, φορτία και δυσκαμψίες ελατηρίων στα άκρα του κόμβου(σημείο 5, Σχήμα 5-33)

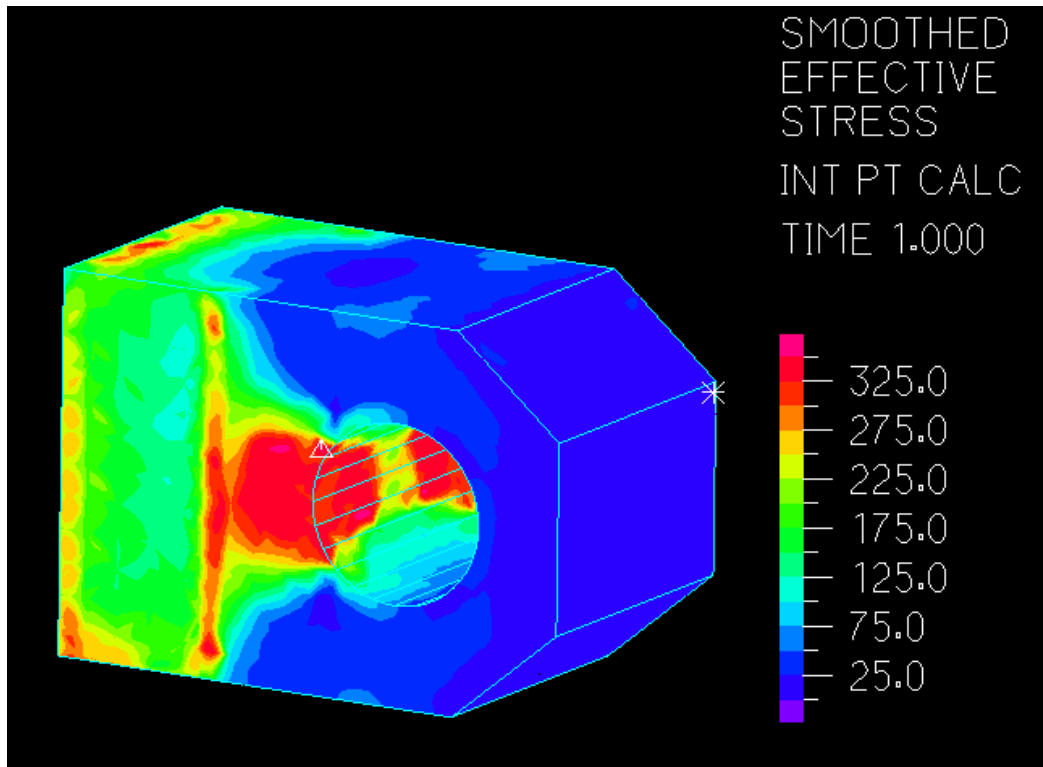
	Μετακινήσεις(mm)	Φορτία(N)	Μεταφορικές δυσκαμψίες ελατηρίων(N/mm)
χ(κατακόρυφος)	80,9944	3396	41,92882471
γ(άξονας//χορδές)	-7,9203	-138,2	17,44883401
z(άξονας πείρου)	10,2179	426,7	41,76004854

Για το συγκεκριμένο φορτίο αστοχίας έχω πολύ υψηλότερη πλαστικοποίηση και παραμορφωσιμότητα του κόμβου. Η πλαστικοποίηση πλέον έχει επεκταθεί σε όλη σχεδόν την επιφάνεια των χορδών(Σχήμα 5-47), πέρα από τα μεμονωμένα σημεία που είχαν ξεπεράσει τη διαρροή στο μέγιστο φορτίο του Αμερικάνικου Κανονισμού. Πλέον πλαστικοποίηση εμφανίζεται και στην επαφή παξιμαδιού και θηλυκού καθώς ο πείρος κάμπτεται εντονότερα από τις προηγούμενες περιπτώσεις με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες δυνάμεις επαφής στην περιοχή, όπως επίσης η διαρροή έχει επεκταθεί και κατά μήκος της άντυγας, αφήνοντας μόνο ένα πολύ μικρό κομμάτι με ελαστικές παραμορφώσεις(Σχήμα 5-45). Φυσικό επακόλουθο είναι η αύξηση της μέγιστης τάσης κατά 28,9 % η οποία εμφανίζεται σε σημείο του πείρου. Αναλογικά ευρύτερες πλαστικές περιοχές εντοπίζονται και στο αρσενικό τέμαχος κυρίως στην περιοχή εσωτερικά της άντυγας, και στην πλευρά επαφής με το θηλυκό(Σχήμα 5-46). Ο κόμβος εν τέλει δεν αστοχεί καθώς δεν έχουμε και εδώ υπέρβαση του ορίου θραύσης(Σχήμα 5-47)

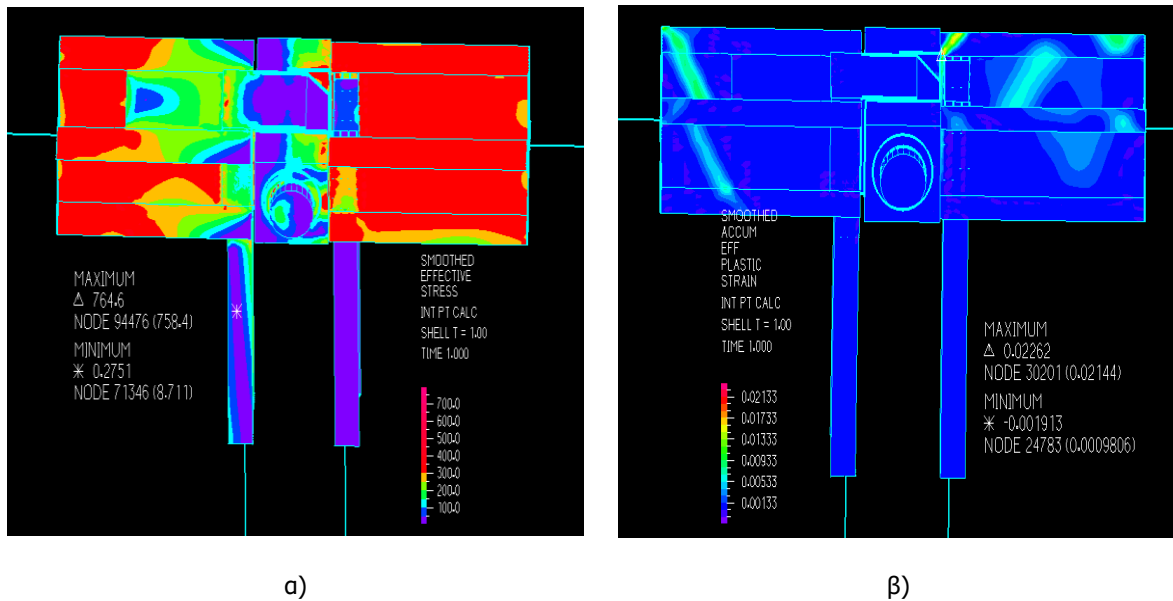


Σχήμα 5-45: Τάσεις Von Mises στο θηλυκό υποδοχέα (με κόκκινο συμβολίζεται η πλαστικότητα)



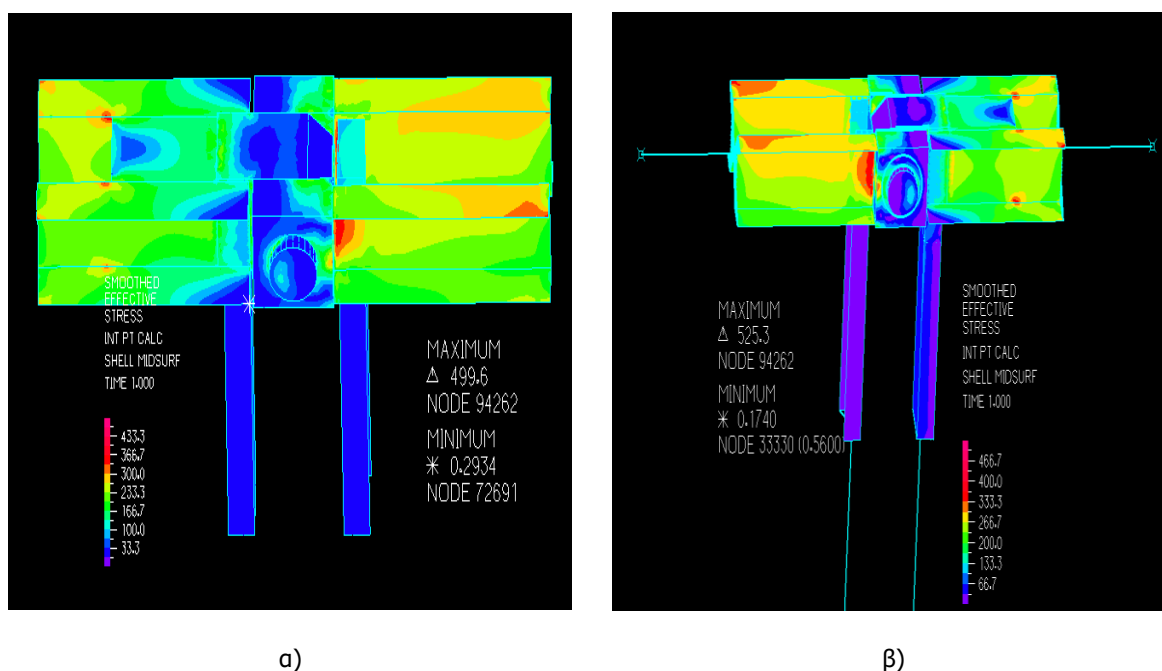


Σχήμα 5-46: Τάσεις Von Mises στον αρσενικό υποδοχέα (με κόκκινο συμβολίζονται οι πλαστικές περιοχές)



Σχήμα 5-47: α) Τάσεις σε όλα τα μέλη του κόμβου, β) τροπές

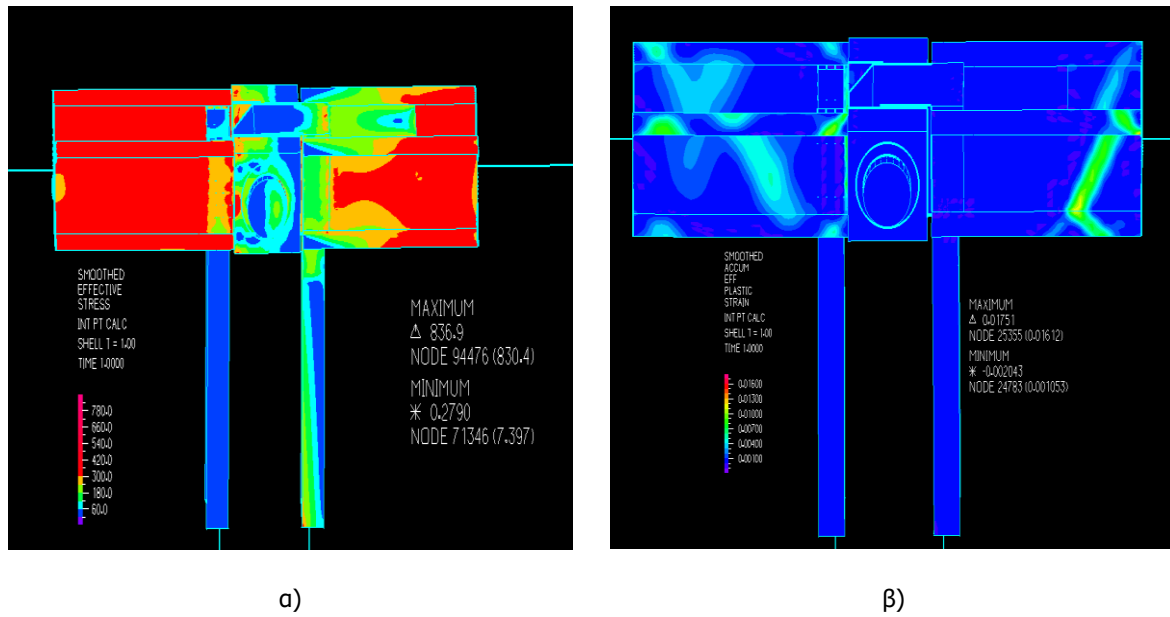
Ενδεικτικά θα δειχθούν και οι συνολικές εικόνες τάσεων και στις χαμηλότερες στάθμες φόρτισης του Αμερικάνικου κανονισμού ( Normal, Caution), που όπως είναι φυσικό δεν πλαστικοποιούνται σε τέτοιο βαθμό (Σχήμα 5-48).



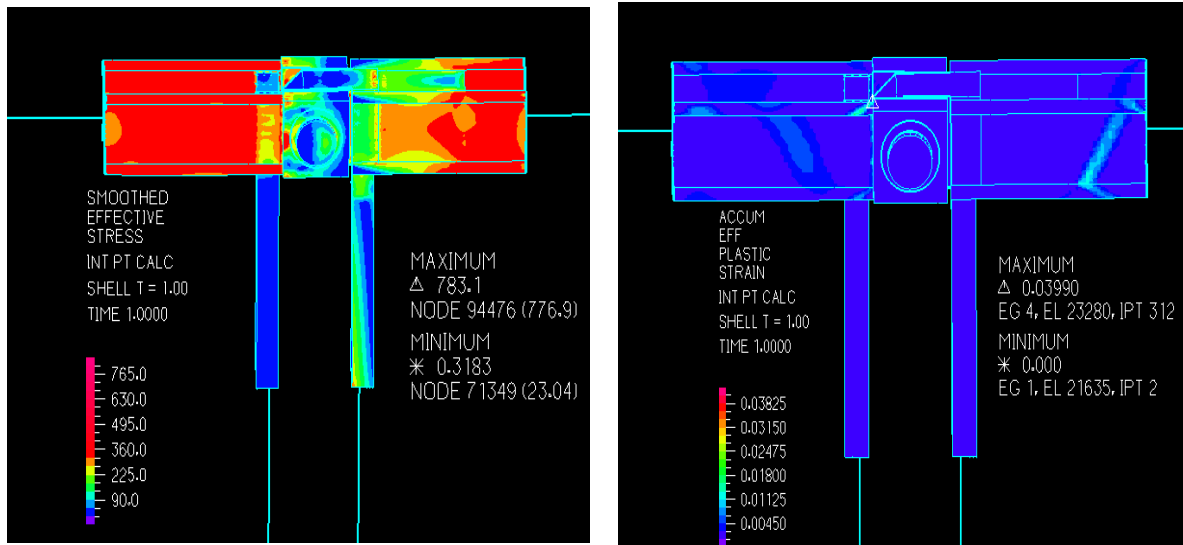
Σχήμα 5-48: Τάσεις Von Mises στον κόμβο για α)κατάσταση κυκλοφορίας Normal , β)κατάσταση κυκλοφορίας Caution

## 5.9 Παραμετροποίηση συντελεστή τριβής μεταξύ επιφανειών

Γεννάται το ερώτημα κατά πόσο επιδρά ο συντελεστής τριβής στην απόκριση του κόμβου στις καταστάσεις κυκλοφορίας της γέφυρας. Από όσο παρατηρήθηκε ο πιο ασφαλής σχεδιασμός της γέφυρας συνιστάται αν ληφθεί υπόψη ο Ευρωκώδικας λόγω δυσμενέστερων καταστάσεων φόρτισης και κάλυψης μεγαλύτερου φάσματος συνθηκών κυκλοφορίας επί του φορέα. Συνεπώς για αυτό το λόγο δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής(από 0,2-0,4) προκειμένου να παρατηρηθούν τυχόν διαφορές σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εκπορεύτηκαν με βάση τις σύγχρονες κανονιστικές διατάξεις. Από τις παρακάτω εικόνες (,Σχήμα 5-50,Σχήμα 5-51,Σχήμα 5-51) παρατηρούμε αύξηση της μέγιστης τάσης του πείρου για μείωση της τριβής κατά 0,1. Ειδικότερα οι μέγιστες τάσεις στον πείρο αυξάνονται κατά 9,46 % για τριβή υποδιπλάσια της αρχικής ενώ για μείωση τριβής κατά 33,3 % εντοπίζεται αύξηση μέγιστης τάσης κατά 6,87 %. Θεωρείται αναμενόμενο εφόσον ο πείρος λειτουργεί ελαστικά να αυξάνεται η καταπόνηση του, καθώς όσο τα μέλη είναι «πιο ελεύθερα» να μετακινηθούν σχετικώς μεταξύ τους τόσο μεγαλώνουν οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις επαφής. Όπως είναι φυσικό δεν φαίνεται κάποια φανερή επιρροή της τριβής στην εντατική κατάσταση των υπολοίπων μελών, επομένως δεν έχω και αστοχία του κόμβου.



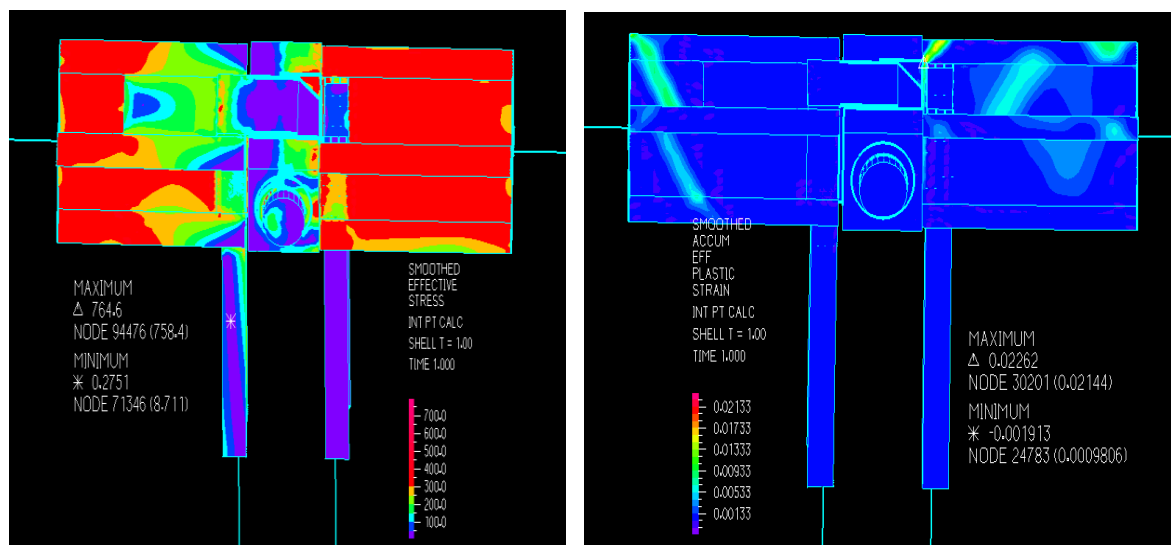
Σχήμα 5-49: α) τάσεις Von Mises για  $\sigma/\tau$  τριβής 0,2 (πλαστικές περιοχές με κόκκινο), β) αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις



α)

β)

Σχήμα 5-50: α) τάσεις Von Mises για  $\sigma/\tau$  τριβής 0,3 (πλαστικές περιοχές με κόκκινο), β) αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις



α)

β)

Σχήμα 5-51: α) τάσεις Von Mises για  $\sigma/\tau$  τριβής 0,3 (πλαστικές περιοχές με κόκκινο), β) αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις

## 6 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω αναλύσεις και τα διάφορα προσομοιώματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Έχουμε πλαστικοποίηση μεμονωμένου κόμβου υπό μέγιστα κανονιστικά φορτία και κυρίως υπό το συνδυασμό  $1,35 \times G + 1,35 \times Q + 0,9 \times W$ . Σε αυτό το συνδυασμό η πλαστική περιοχή του κόμβου επεκτείνεται σχεδόν σε όλο το μήκος των χορδών (πέλματα και κορμός), παρόλα αυτά ο κόμβος δεν υπερβαίνει το όριο θραύσης όσον αφορά την ανηγμένη παραμόρφωση. Στις φορτίσεις του παλαιότερου κανονισμού εμφανίζονται μόνο μεμονωμένα σημεία υπέρβασης του ορίου διαρροής. Σε κάθε περίπτωση οι υψηλότερες τιμές τάσεων εμφανίζονται αφενός στον πείρο(ελαστική συμπεριφορά) και αφετέρου σε αντίστοιχα σημεία της άντυγα ή οποία πλαστικοποιείται στο σημείο επαφής πείρου-άντυγας και υποδοχέων αναλογικά με την κατάσταση λειτουργίας(normal, caution, risk).
- Παρατηρείται αστοχία της κατασκευής σε φορτία Ευρωκώδικα όσον αφορά τα ραβδωτά μέλη και συγκεκριμένα στο 83 % της φόρτισης το πλαίσιο εμφανίζει αστάθεια λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού
- Παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις του αναλυτικού μοντέλου σε σχέση με το ραβδωτό, όταν κόμβος σύνδεσης πλαισίων μοντελοποιείται ως μια απλή ελευθέρωση ροπής(ενδεικτική αποτελεί η απόκλιση για βύθιση υπό το  $\lambda$ , η οποία ανέρχεται στο 142,42 %). Εν αντιθέσει αποδεκτές είναι οι αποκλίσεις ραβδωτού μοντέλου με ελατήρια συγκριτικά με το αναλυτικό( $\approx 1/10$  από τις αντίστοιχες με την απλή ελευθέρωση).
- Σημαντική επιρροή της προσομοίωσης σύνδεσης των πλαισίων σε μοντέλα στοιχείων δοκού. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για φόρτιση με το ίδιο βάρος της κατασκευής έχω υπερδιπλάσιες παραμορφώσεις στην προσομοίωση ανοχής πείρου με μη γραμμικά ελατήρια σε σχέση με την μοντελοποίηση της σύνδεσης με απλή ελευθέρωση ροπής.
- Επιρροή της προσομοίωσης αναλυτικών κόμβων στην απόκριση του φορέα καθώς το μοντέλο με τα ελατήρια θεωρεί τα μέλη που έρχονται σε επαφή ως απαραμόρφωτα στερεά άπειρης δυσκαμψίας και δυστένειας, με αποτέλεσμα να υποεκτιμούνται οι τελικές παραμορφώσεις του φορέα περίπου κατά 14 %
- Σημαντική επιρροή του συντελεστή τριβής στην απόκριση των μελών του κόμβου. Ειδικότερα η παραμετροποίηση της έδειξε πως όσο ελαττώνεται η τιμή της, τόσο αυξάνονται οι μέγιστες τιμές τάσεων. Ο πείρος λόγω κατασκευής από ισχυρότερο κράμα χάλυβα από τα άλλα μέλη, και

παραμένοντας στην ελαστική περιοχή αναπτύσσει την μέγιστη ένταση. Επομένως τα αποτελέσματα είναι φυσιολογικά καθώς με χαμηλότερο συντελεστή τριβής και υπό το ίδιο φορτίο, τα μέλη παρουσιάζουν μεγαλύτερη κινητικότητα, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της επαφής να είναι πιο έντονο. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για τριβή υποδιπλάσια της αρχικής παρατηρείται αύξηση μέγιστης τάσης της τάξης του 9,46 % ενώ μείωση τριβής κατά 33,3 % αντιστοιχεί σε αύξηση μέγιστης τάσης κατά 6,87 %. Να αναφερθεί πως ούτε σε αυτές τις αναλύσεις παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου αστοχίας με τις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων να κυμαίνονται από 22 % του ορίου θραύσης για συντελεστή 0,04 και 0,3 και 10 % για συντελεστή 0,2.

- Αμελητέα επιρροή της εκκεντρότητας των διαγώνιων στοιχείων στην απόκριση της κατασκευής όσον αφορά τις τελικές παραμορφώσεις και την δυσκαμψία του ολικού φορέα, όπως υπέδειξαν ελαστικές αναλύσεις στα στατικά προγράμματα *sar* και *adina*. Επομένως παραλείποντας τις έκκεντρες συνδέσεις των συγκεκριμένων μελών μεταξύ τους αλλά και με τα οριζόντια μέλη του πλαισίου, δίνεται η δυνατότητα απλοποίησης του προβλήματος, αν και εφόσον ο αυτοσκοπός παραμένει η συνολική συμπεριφορά του φορέα και όχι οι τοπικοί έλεγχοι των μελών που συντρέχουν στην περιοχή.
- Μη ρεαλιστική απόκριση κόμβου όσον αφορά την επαφή για εντατικά μεγέθη από ραβδωτό μοντέλο με, καθώς η άπειρη δυσκαμψία των ελατηρίων από το κλείσιμο της ανοχής δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική δυσκαμψία του πείρου και τη συμπεριφορά της κατασκευής τοπικά. Συνεπώς οι μετακινήσεις που εξάγονται από το ραβδωτό μοντέλο έχουν «παγώσει» από το κλείσιμο της ανοχής και έπειτα, κυρίως κατά τη διαμήκη διεύθυνση της γέφυρας όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες διαφορικές μετακινήσεις των πείρων και των υποδοχέων, μη μπορώντας να αποδώσουν ρεαλιστικές συνοριακές συνθήκες και φορτία άκρων στον αναλυτικό κόμβο. Αντιθέτως για τους ίδιους λόγους είναι πιο ρεαλιστική απόκριση κόμβου όσον αφορά την επαφή για εξαγόμενα εντατικά μεγέθη από αναλυτικό μοντέλο.

Οι γέφυρες Bailey παρουσιάζουν έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν εγείρονται ερωτήματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Πιο συγκεκριμένα η συμβατότητα που έδειξε η απλή μοντελοποίηση των ελατηρίων με το αναλυτικό προσομοίωμα του φορέα οδηγεί στην σκέψη αν υπάρχει τρόπος μέσω πειραματικών δεδομένων να προσομοιωθεί η τριβή μεταξύ των επιφανειών και προσομοίωση με κατάλληλα μη γραμμικά ελατήρια με παρόμοια αποτελέσματα στην απόκριση του φορέα σε καταστάσεις φόρτισης (πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος αν ο στόχος είναι η απόκριση συνολικά της γέφυρας υπό διάφορες καταστάσεις φόρτισης). Το ίδιο ισχύει και για τον πείρο καθώς πειραματικά δεδομένα της κάμψης τριών σημείων θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε υπολογισμό αντοχής και δυσκαμψίας αντίστοιχων ελατηρίων. Τέλος εφόσον υπάρχουν παραδείγματα γεφυρών μέχρι και σήμερα σε λειτουργία, παρόλο που ο σχεδιασμός τους δεν ήταν για μόνιμες αλλά προσωρινές δομές και γνωρίζοντας πως ο κανονισμός της εποχής δεν προέβλεπε διάταξη για κύκλους φόρτισης, μείζον ζήτημα αποτελεί η αποτίμηση της κατασκευής υπό καταπόνηση σε κόπωση και η μελέτη ενίσχυσης της έναντι αυτής.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Β. Μελισσιανός, Σ. Βερνάρδος, Η. Θανασούλας, "Οδηγίες Χρήσης Λογισμικού ADINA", Απρίλιος 2016
2. Ευρωκώδικας Μέρος 2 (EN 1991-2:2003): Φορτία κυκλοφορίας σε γέφυρες
3. EN 1993-2:2006 Χαλύβδινες γέφυρες
4. Associated Consulting Engineers L.T.D, EVALUATION OF BAILEY BRIDGE AT ARUNDU, Lahore, Pakistan FINAL REPORT (PHASE-1), PROJECT REPORT/DOCUMENT VOL.III, September 1990
5. A.Thierry John The Bailey Bridge article
6. A.L Eterovic and K.J Bathe "On the treatment of inequality constraints arising from contact conditions in finite element analysis" Vol. 40, No. 2, pp. 203-209, 1991,USA  
US ARMY BRIDGE MANUAL Appendix B
7. Bates. W., "Historical Structural Steelwork Handbook", British Constructional Steelwork Association Limited, 1991
8. Bathe, K.J. and Chaudhary, A., "A Solution Method for Planar and Axisymmetric Contact Problems," Int. J. Num. Meth. in Eng., Vol. 21, pp. 65-88, 1985.
9. Brian K. Hornbeck Expedient Military Load Classification (MLC) Analysis for STANAG  
2021 ed. 6.5 Meeting Review
10. Denis J. Feld, Jean G. Soudry "Modeling the interface between shell and solid elements"
11. Field Manual 5-277: Bailey Bridge Headquarters Department of the Army: Washington, DC, USA, 1986. Available online: <http://www.bits.de/NRANEU/others/amd-us-archive/fm5-277%2886%29.pdf>
12. Jozef Prokop ,Jaroslav Odrobi , Matúš Farbák 1 and Vladimír Novotný "Load-Carrying Capacity of Bailey Bridge in Civil Applications
13. Jonathan Richard Shewchuk "What Is a Good Linear Finite Element? Interpolation, Conditioning, Anisotropy, and Quality Measures",31 December 2012
14. K.J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
15. Robberts L.D, "The Bailey:The Amazing, All-Purpose Bridge", London
16. Sir Donald Coleman Bailey, Robert Arthur Foulkes and Rodman Digby Smith "The Bailey Bridge and its Developments"
17. Structure Design and Rehabilitation, Inc. FINAL REPORT PREFABRICATED STEEL BRIDGE SYSTEMS FHWA SOLICITATION NO. DTFH61-03-R-00113,September 2005
18. Theory and Modeling Guide Volume I: Adina Report ARD 12-8, December 2012

19. W.Bates, Historical Structural Steelwork Handbook

20. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%AD%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1%20>  
(3/11/22)

21. [https://en.wikipedia.org/wiki/A. M. Hamilton%20](https://en.wikipedia.org/wiki/A._M._Hamilton%20)(3/11/22)

22. [https://en.wikipedia.org/wiki/Callender-Hamilton bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Callender-Hamilton_bridge)(3/11/22)