



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Διαφορές κατά το σχεδιασμό καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπεργούνη Ε. Παρασκευή

Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ιωάννης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012/23

Μπεργούνη Ε.Π. (2012)
Διαφορές κατά το σχεδιασμό καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/23
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Bergouni E.P. (2012)
Differences that arise when designing cable-stayed bridges and suspension bridges
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2012/23
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας καθώς και για την υπομονή και την κατανόηση με την οποία με αντιμετώπισε όλο αυτό το διάστημα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δημήτρη και στους φίλους μου!

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που στηρίζει τις προσπάθειές μου καθ' όλη τη διάρκεια των μαθητικών αλλά και των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Μπεργούνη Παρασκευή

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Τύποι γεφυρών.....	1
1.2.1 Τοξωτή γέφυρα:.....	1
1.2.2 Γέφυρα δοκού:.....	1
1.2.3 Κρεμαστή γέφυρα (suspension bridge) :.....	2
1.2.4 Καλωδιωτή γέφυρα (cable-stayed bridge):.....	3
1.3 Καλωδιωτές γέφυρες.....	4
1.3.1 Διάταξη καλωδίωσης κατά την διαμήκη έννοια.....	5
1.3.2 Διάταξη καλωδίων κατά την εγκάρσια έννοια.....	6
1.3.3 Διαμήκης απόσταση καλωδίων στον φορέα.....	7
1.3.4 Τύποι καλωδίων.....	7
1.3.5 Αγκυρώσεις.....	9
1.3.6 Σύνδεση πυλώνα – καταστρώματος.....	10
1.4 Κρεμαστές γέφυρες.....	11
1.4.1 Είδη κρεμαστών γεφυρών.....	11
1.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι άλλων γεφυρών:.....	12
1.4.3 Καλώδια.....	12
1.4.4 Αναρτήρες.....	14
1.5 Κατάστρωμα.....	15
1.5.1 Τύποι καταστρωμάτων.....	15
1.5.2 Μόρφωση καταστρώματος.....	16
1.5.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα σύμμικτων γεφυρών.....	18
1.6 Πυλώνες.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Γενική περιγραφή μοντέλων ανάλυσης.....	20
2.1 Γενική περιγραφή μοντέλου ανάλυσης καλωδιωτής γέφυρας.....	20
2.2 Γενική περιγραφή μοντέλου ανάλυσης κρεμαστής γέφυρας.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Φορτίσεις.....	24
3.1 Επεξήρηση φορτίσεων.....	24
3.1.1 Μεμονωμένες φορτίσεις.....	24
3.1.2 Συνδυασμοί δράσεων.....	26
3.2 Τάσεις.....	30
3.2.1 Τάσεις καλωδιωτής.....	30
3.2.2 Τάσεις κρεμαστής.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Ιδιομορφές.....	58
4.1 Ιδιομορφές καλωδιωτής.....	58
4.2 Ιδιομορφές κρεμαστής.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Αποτελέσματα ανάλυσης από συνδυασμό φορτίσεων.....	62
5.1 Αντιδράσεις στήριξης.....	62
5.1.1 Αντιδράσεις στήριξης στην καλωδιωτή.....	62
5.1.2 Αντιδράσεις στήριξης στην κρεμαστή.....	62

5.2 Τάσεις Von Mises	63
5.2.1 Ορισμός	63
5.2.2 Εικόνες.....	63
5.2.2.1 Καλωδιωτή γέφυρα – τάσεις Von Mises.....	64
5.2.2.2 Κρεμαστή γέφυρα – τάσεις Von Mises.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Συμπεράσματα.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101

Διαφορές κατά το σχεδιασμό καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών

Μπεργούνη Ε.Π. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή των διαφορών ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών καθώς και οι διαφορές που προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό σύμμικτης καλωδιωτής και κρεμαστής γέφυρας ίδιων χαρακτηριστικών, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της σειράς προγραμμάτων SOFISTIK, το οποίο είναι ένα δυναμικό και αξιόπιστο πακέτο ανάλυσης.

Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους γεφυρών και στη συνέχεια περιγράφονται πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα δύο μοντέλα ανάλυσης καθώς και οι όψεις των φορέων.

Στο τρίτο μέρος περιλαμβάνονται οι φορτίσεις που επιβάλλονται στο φορέα και οι συνδυασμοί αυτών. Επίσης παρατίθενται οι τάσεις λόγω των μεμονωμένων φορτίων, όπως αυτές προέκυψαν μετά την ανάλυση.

Στο τέταρτο μέρος φαίνονται κάποιες βασικές ιδιομορφές των δύο γεφυρών.

Στο πέμπτο μέρος δίνονται οι αντιδράσεις στήριξης και οι τάσεις max von Mises που προκύπτουν από συνδυασμούς φορτίσεων.

Τέλος παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα, από τα οποία φαίνεται πως η καλωδιωτή γέφυρα συμπεριφέρεται καλύτερα.

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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2012/23

Differences that arise when designing cable-stayed bridges and suspension bridges

Bergouni E.P. (supervised by Raftogiannis I.)

Abstract

Purpose of this diploma thesis is to describe the differences between the characteristics of cable-stayed and suspension bridges as well as differences that arise when designing a composite cable-stayed and suspension bridge with the same features, using the finite element method. The comparison was made with the help of the series of programs SOFISTIK, which is a dynamic and reliable analysis package.

The first part refers to the different types of bridges and then describes in detail the characteristics of cable-stayed and suspension bridges.

In the second part the analysis models are presented and facades of the bridges bodies are shown.

The third part includes the loads imposed on the body of the two bridges and combinations of these loads. It also includes the stresses due to individual loads resulting from the analysis.

In the fourth part some basic Eigen modes of the two bridges are shown.

In the fifth part the support reactions and the max. Von Mises stresses are presented as resulting from combinations of loads.

Finally some conclusions are given, from which it appears that the cable-stayed bridge gives better results than the suspension bridge.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

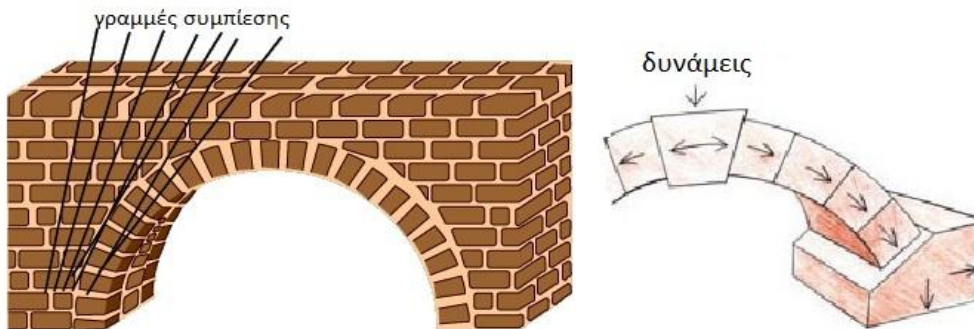
Η γέφυρα είναι μία αρχιτεκτονική ή τεχνική κατασκευή με την οποία επιτυγχάνεται ζεύξη δύο ή περισσότερων σημείων υπεράνω μεσολαβούντος εμποδίου (φυσικού ή τεχνητού), με σκοπό την αποκατάσταση της συνέχειας μιας συγκοινωνιακής αρτηρίας ή ενός αγωγού.

Οι γέφυρες γενικά θεωρούνται από τις πλέον εντυπωσιακές κατασκευές μεταξύ των έργων πολιτικού μηχανικού, έχουν όμως παράλληλα και πολλές ιδιομορφίες και πολλά λεπτά σημεία στην ανάλυση, τη διαστασιολόγηση και την ανέγερσή τους.

1.2 Τύποι γεφυρών

1.2.1 Τοξωτή γέφυρα:

Είναι ο πιο παλιός τύπος γέφυρας. Το τόξο μορφώνεται ως θόλος κατά την καμπύλη των πιέσεων των φορτίων λόγω ιδίου βάρους, το οποίο σε συνδυασμό με το επιπλέον φορτίο μεταφέρονται στις δυο βάσεις δεξιά και αριστερά (Σχήμα 1.1). Αυτού του είδους οι γέφυρες αποτελούν το καλύτερο είδος φορέα για συμπαγή δομικά υλικά με υψηλή θλιπτική αντοχή, εφόσον το έδαφος θεμελίωσης είναι στέρεο και μπορεί να παραλάβει την ώθηση του τόξου με φθηνή θεμελίωση. Αν θέλουμε να γεφυρώσουμε μεγαλύτερες αποστάσεις πρέπει να σχεδιάσουμε περισσότερα τόξα. Τα σύμμικτα καταστρώματα έχουν και σε αυτό το στατικό σύστημα εφαρμογή.

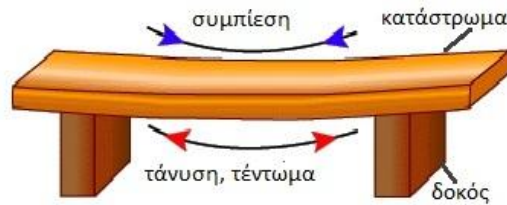


Σχήμα 1.1: Τοξωτή γέφυρα

1.2.2 Γέφυρα δοκού:

Είναι ο πιο απλός τύπος γέφυρας. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν όλες οι γέφυρες με κατάστρωμα που λειτουργεί είτε ως αμφιέριστο δοκάρι (ή πολλά αμφιέριστα δοκάρια στη σειρά) είτε ως συνεχής δοκός είτε, σπανιότερα πλέον, ως δοκός Gerber. Σχεδόν όλες οι σύμμικτες γέφυρες είναι αυτού του τύπου είτε με δοκούς μορφής διπλού ταυ είτε με δοκούς κιβωτοειδούς διατομής. Στο σύστημα με αμφιέριστα δοκάρια οι στηρίξεις είναι αρθρωτές και η γέφυρα έχει ένα ή

περισσότερα ανοίγματα σε σειρά. Στο σύστημα με συνεχή δοκό η στατική αοριστία αυξάνει την ασφάλεια και δεν επέρχεται κατάρρευση εάν αστοχήσει μια διατομή της δοκού. Επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα των συνεχών δοκών είναι η αποφυγή των αρμών διαστολής. Στα συνεχή συστήματα, εφόσον είναι δυνατόν, το άνοιγμα του ακραίου φαντώματος συνίσταται να εκλέγεται περίπου 20% μικρότερο από το άνοιγμα των εσωτερικών ώστε να εξισωθούν οι ροπές ανοιγμάτων.



Σχήμα 1.2: Γέφυρα δοκού

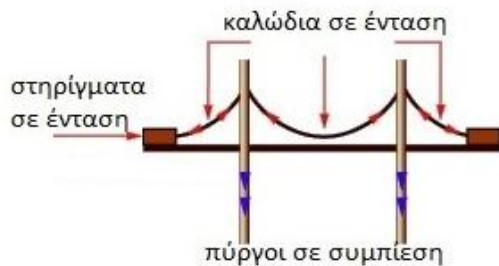
Για να ενισχύσουμε αυτό τον τύπο γέφυρας κατασκευάζουμε στο κατάστρωμα δικτυωτά πλαίσια (Σχήμα 1.3)



Σχήμα 1.3: Τοξωτή γέφυρα με δικτυωτά πλαίσια

1.2.3 Κρεμαστή γέφυρα (suspension bridge) :

Αυτές οι γέφυρες διαθέτουν ένα κύριο καλώδιο παραβολικής μορφής και ένα πλήθος ευθύγραμμων καλωδίων, τα οποία αναρτώνται από αυτό συνδέοντάς το με το κατάστρωμα. Τα κύρια καλώδια διατρέχουν όλο το μήκος της γέφυρας και είναι σταθερά στερεωμένα στις δυο άκρες. Όλο το βάρος της γέφυρας μεταφέρεται στα καλώδια, μετά στους πύργους και εντέλει στη γη, όπου οι πύργοι είναι σταθερά θεμελιωμένοι όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα. Συνήθως αυτή η λύση επιλέγεται για πολύ μεγάλα ανοίγματα.



Σχήμα 1.4: Μεταφορά δυνάμεων στην κρεμαστή γέφυρα

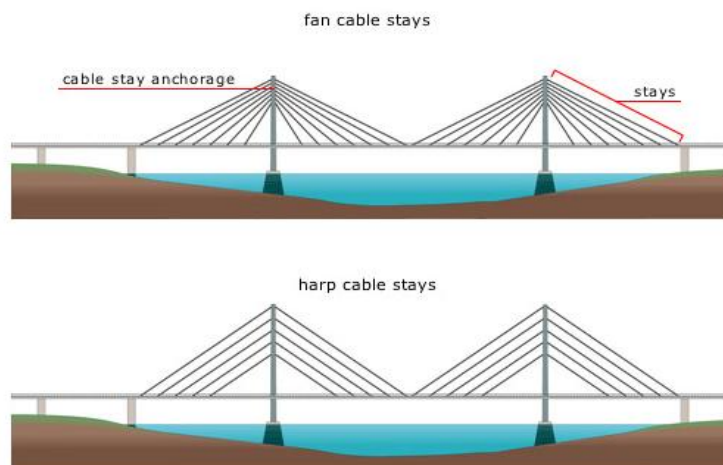
Επίσης όλες σχεδόν οι γέφυρες αυτού του τύπου έχουν ένα υποστηρικτικό πλαίσιο κάτω από το οδόστρωμα το οποίο δυναμώνει την κατασκευή και εμποδίζει την κίνηση της γέφυρας από του ανέμους (Σχήμα 1.5)



Σχήμα 1.5: Υποστηρικτικό πλαίσιο κάτω από το οδόστρωμα

1.2.4 Καλωδιωτή γέφυρα (cable-stayed bridge):

Σε αυτόν τον τύπο γέφυρας το κατάστρωμα αναρτάται με λοξά καλώδια από τους πύργους, τα οποία μπορεί να είναι διατεταγμένα είτε σε ακτινική μορφή είτε παράλληλα μεταξύ τους (Σχήμα 1.6). Οι δυνάμεις και το βάρος του καταστρώματος μεταφέρονται μέσω των καλωδίων στους πύργους και στη συνέχεια στη γη. Επίσης και αυτή η λύση προσφέρεται για μεγάλα ανοίγματα, ωστόσο για τη γεφύρωση πολύ μεγάλων ανοιγμάτων (πάνω από 1km) πιο οικονομική και ελκυστική φαίνεται να είναι η λύση των κρεμαστών γεφυρών. Σε αυτού του είδους τα συστήματα απαντώνται πλέον πολύ συχνά σύμμικτα καταστρώματα.



Σχήμα 1.6: Δύο τύποι καλωδιωτών γεφυρών

Η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στους παραπάνω τέσσερις τύπους γεφυρών έχει σχέση με την απόσταση που μπορούν να γεφυρώσουν και τα ανοίγματα που πρέπει να κατασκευασθούν. Έτσι, στους δυο πρώτους τύπους για να καλύψουμε μεγάλα διαστήματα πρέπει να κατασκευάσουμε πολλά τόξα ή πολλές δοκούς με μικρά ανοίγματα, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ναυσιπλοΐα. Αντίθετα στους δυο τελευταίους τα ανοίγματα που θα προκύψουν είναι πολύ μεγάλα και αυτό τους δίνει σημαντικό πλεονέκτημα με αποτέλεσμα οι πιο πολλές γέφυρες που κατασκευάζονται στη σύγχρονη εποχή να είναι αυτών των τύπων.

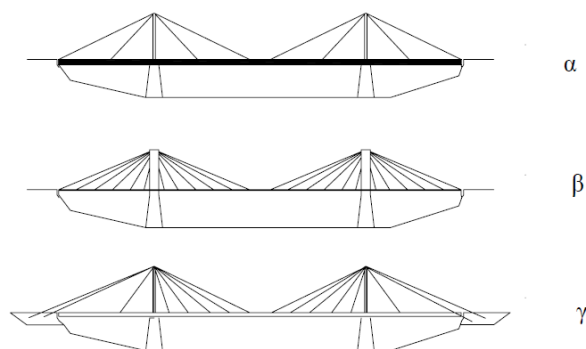
1.3 Καλωδιωτές γέφυρες

Η κατασκευή καλωδιωτών γεφυρών δεν αποτελεί σύγχρονη σύλληψη. Εδώ και αιώνες ο άνθρωπος ορμώμενος από την πρακτική γνώση του ιδιαίτερου στατικού συστήματος του αναρτώμενου φορέα, έδινε λύσεις χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα μέσα (σχοινιά, κορμούς δέντρων κτλ). Η διάδοση της χρήσης του χάλυβα στις κατασκευές, ήταν αυτή που πριν από ένα περίπου αιώνα έδωσε την ώθηση στην κατασκευή καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών.

Οι καλωδιωτές γέφυρες έρχονται ουσιαστικά να καλύψουν το κενό μεταξύ των κρεμαστών γεφυρών και των συμβατικά κατασκευασμένων γεφυρών. Η οικονομικότητα της κατασκευής μεγιστοποιείται για ανοίγματα της τάξης των 150 - 700 m. Από εκεί και πάνω επιλέγεται συνήθως κρεμαστός φορέας. Το στατικό σύστημα παίζει πρωταρχικό ρόλο. Εδώ οι εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών είναι ο κρίσιμος παράγοντας επιλογής.

Τα βασικά στατικά συστήματα στις αναρτημένες από ευθύγραμμο καλώδια γέφυρες είναι ουσιαστικά τρία:

- i. Κατάστρωμα μεγάλης ακαμψίας αναρτώμενο από λίγα καλώδια σε συνδυασμό με μικρών διαστάσεων λυγηρούς πυλώνες (Σχήμα 1.7α)
- ii. Πυλώνες μεγάλης ακαμψίας που δύνανται να αναλάβουν μεγάλες ροπές σε συνδυασμό με ελαφρύ κατάστρωμα, στηριζόμενο από πολλά καλώδια (Σχήμα 1.7β)
- iii. Αγκυρωμένα σε ακρόβαθρα καλώδια τα οποία διέρχονται από την κορυφή των (εύκαμπτων) πυλώνων και αναρτούν το κατάστρωμα (Σχήμα 1.7γ)



Σχήμα 1.7: Τύποι συστημάτων ανάρτησης

Στην πράξη οι τύποι αυτοί μόρφωσης του βασικού στατικού συστήματος κάθε άλλο παρά δεσμευτικοί είναι για τον μελετητή. Κάθε γέφυρα τέτοιας τάξης μεγέθους αντιμετωπίζεται ξεχωριστά, οπότε ο παραπάνω διαχωρισμός έχει έννοια μόνο ως παράδειγμα της ποικιλίας των λύσεων που προκύπτουν από την επιλογή της μόρφωσης του φορέα ως καλωδιωτού.

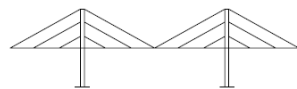
Στην συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται εκτενής αναφορά στα βασικά δομικά στοιχεία και συστήματα των αναρτημένων από ευθύγραμμα καλώδια γεφυρών .

1.3.1 Διάταξη καλωδίωσης κατά την διαμήκη έννοια

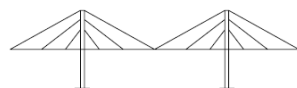
Στις καλωδιωτές γέφυρες η επιλογή της διάταξης των καλωδίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η επιλογή των μελετητών επηρεάζει τόσο την στατική λειτουργία του φορέα, την οικονομικότητα, τη μέθοδο κατασκευής όσο και την αισθητική. Κατά την διαμήκη έννοια, η σύνδεση πυλώνων – καταστρώματος επιτυγχάνεται μέσω της καλωδίωσης η οποία συνήθως έχει τη μορφή μιας από τις παρακάτω διατάξεις:



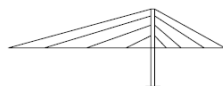
α. Ακτινωτή διάταξη (radial- fan)



β. Παράλληλη διάταξη (harp)



γ. Ημισακτινωτή διάταξη (semi-harp)



δ. Ασύμμετρη διάταξη (assymetric pattern)

Σχήμα 1.8: Συστήματα διάταξης καλωδίων κατά την διαμήκη έννοια

Ακτινωτή διάταξη (radial – fan) (Σχήμα 1.8α)

Ο τύπος αυτός καλωδίωσης προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν οι οριζόντιες δυνάμεις που εισάγονται στο κατάστρωμα είναι σαφώς μικρότερες σε σχέση με τους άλλους τύπους, αφού αυξάνεται η μέση γωνία καταστρώματος - καλωδίου . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται μικρότερες διατομές καλωδίων και κατά συνέπεια περισσότερη οικονομία στο ακριβότερο υλικό κατασκευής. Επίσης, η ακτινωτή διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι υποβάλλει τους πυλώνες σε μέτρια κάμψη κατά την οριζόντια διεύθυνση αφού (συνήθως) η διάταξη των καλωδίων είναι συμμετρική.

Στον αντίποδα πρέπει να αναφερθεί ότι αισθητικά το ακτινωτό σύστημα υπολείπεται κατά γενική ομολογία της παράλληλης διάταξης καλωδίων. Ταυτόχρονα,

ένα σημαντικό κατασκευαστικό πρόβλημα που προκύπτει αφορά στην περιοχή της αγκύρωσης των καλωδίων στην κορυφή του πυλώνα. Οι τάσεις που δημιουργούνται απαιτούν την χρήση ειδικών διατάξεων αγκύρωσης. Η προσομοίωση και μόνο τέτοιων διατάξεων είναι δύσκολη, πόσο μάλλον η κατασκευή τους, ωστόσο το οικονομικό όφελος των μικρότερων καλωδίων πιθανότατα υπερβαίνει αυτή τη δυσχέρεια.

Παράλληλη Διάταξη (Harp) (Σχήμα 1.8β)

Το αισθητικό αποτέλεσμα είναι το κύριο πλεονέκτημα της διάταξης αυτής. Η μικρή κλίση των καλωδίων έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό ποσοστό της δύναμης να «χάνεται» στην οριζόντια διεύθυνση και έτσι απαιτούνται μεγαλύτερες διατομές καλωδίων. Άλλωστε η μεγάλη θλίψη που εισάγεται στις κύριες δοκούς από ένα σημείο και πέρα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για την αντοχή τους.

Κατασκευαστικά το βασικό πλεονέκτημα είναι η κατανομή καθ' ύψος των καλωδίων στον πυλώνα που δημιουργεί μια καλύτερη κατανομή των τάσεων (μειωμένες διαστάσεις πυλώνων, ευκολότερη αγκύρωση καλωδίων)

Ημιακτινωτή διάταξη (semi-harp) (Σχήμα 1.8γ)

Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω τύπων κατά μήκος καλωδίωσης. Η καθ' ύψος αγκύρωση των καλωδίων στους πυλώνες και η αυξημένη μέση γωνία καλωδίου καταστρώματος δημιουργεί πολλά πλεονεκτήματα. Η ευκολία στην κατασκευή των αγκυρώσεων και η μικρότερη θλίψη στο κατάστρωμα σε συνδυασμό με την αισθητική αρτιότητα κάνουν την ημιακτινωτή διάταξη την συνηθέστερη επιλογή στις σύγχρονες καλωδιωτές γέφυρες.

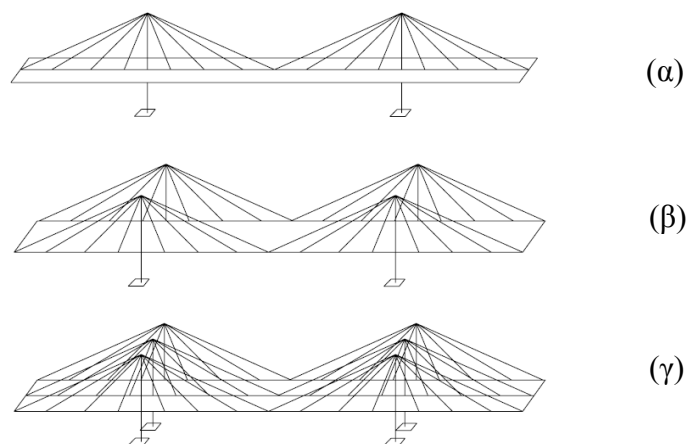
Ασύμμετρη διάταξη (asymmetrical pattern) (Σχήμα 1.8 δ)

Η ασύμμετρη διάταξη εφαρμόζεται συνήθως σε γέφυρες με ένα πυλώνα. Συνήθως τα καλώδια από τη μία πλευρά αγκυρώνονται σε block από σκυρόδεμα. Μια μέση γωνία καλωδίων της τάξης των 45° δίνει τα πλέον οικονομικά αποτελέσματα. Γενικά η τάση της μείωσης του ίδιου βάρους (λόγω χρήσης σύμμικτων καταστρώματων κτλ) έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα γεφύρωσης μεγαλύτερων ανοιγμάτων με αυτή τη διάταξη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάταξη αυτή είναι συνηθής σε πεζογέφυρες, όπου μάλιστα συνδυάζεται με την διάταξη καλωδίων σε ένα μόνο επίπεδο κατά την εγκάρσια έννοια.

1.3.2 Διάταξη καλωδίων κατά την εγκάρσια έννοια

Κατά την εγκάρσια διεύθυνση η καλωδίωση γίνεται σε ένα, δύο ή και τρία επίπεδα, κατακόρυφα ή υπό γωνία. Όταν η ανάρτηση του καταστρώματος γίνεται σε ένα επίπεδο (Σχήμα 1.9α), τότε μειώνεται η στρωφική δυσκαμψία της κατασκευής στην εγκάρσια διεύθυνση και γι αυτό λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα. Συνήθως σε πεζογέφυρες προτιμάται αυτός ο τύπος καλωδίωσης. Στις περισσότερες οδικές καλωδιωτές γέφυρες τα καλώδια διατάσσονται σε δύο επίπεδα (Σχήμα 1.9β). Επιτυγχάνεται έτσι, αφενός μεγαλύτερη ευστάθεια του φορέα έναντι εγκάρσιων φορτίσεων (ανεμοπίεση) και αφετέρου η καλύτερη διανομή των τάσεων στα καλώδια. Διάταξη σε τρία επίπεδα (Σχήμα 1.9γ) έχει εφαρμοστεί σε ελάχιστες περιπτώσεις. Σχετικά με την κλίση των καλωδίων στο κατακόρυφο επίπεδο, αυτή υπαγορεύεται καταρχήν από τον τύπο των πυλώνων. Όταν τα καλώδια βρίσκονται υπό κλίση προφανώς δημιουργούνται επιπλέον εντάσεις τόσο στους πυλώνες όσο και στο κατάστρωμα η παραλαβή των οποίων δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ειδικά στις

γέφυρες με σύμμικτο κατάστρωμα μπορεί η κλίση αυτή να λειτουργήσει ευνοϊκά, προσφέροντας θλίψη κατά την εγκάρσια διεύθυνση (όταν οι διαδοκίδες είναι σύμμικτες)



Σχήμα 1.9: Διάταξη καλωδίωσης σε ένα, δύο ή τρία επίπεδα

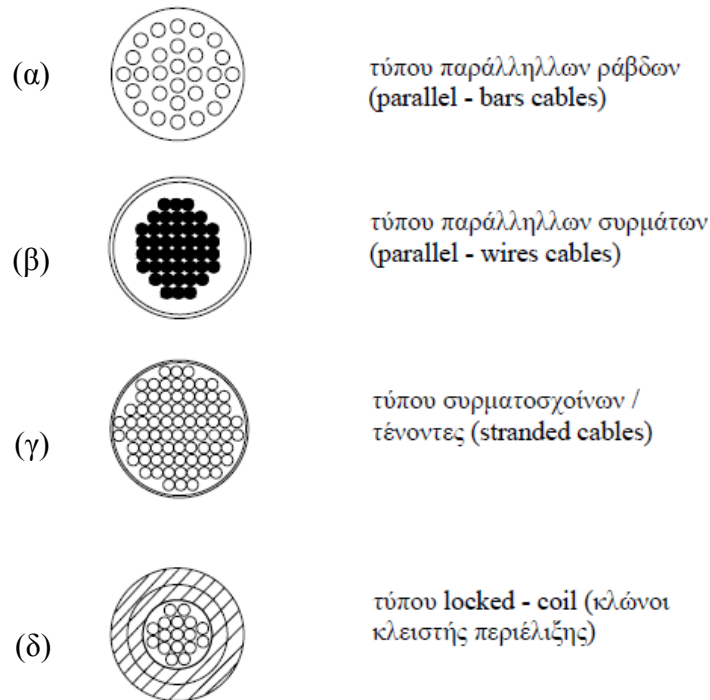
1.3.3 Διαμήκης απόσταση καλωδίων στον φορέα

Η τακτική που ακολουθούσαν οι μελετητές σε παλαιότερες γέφυρες ήταν η τοποθέτηση όσο το δυνατόν λιγότερων καλωδίων στο φορέα. Έτσι προέκυπταν αναγκαστικά μεγάλες διατομές κυρίων δοκών για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακαμψία. Η σύγχρονη θεώρηση του προβλήματος είναι η διάταξη περισσότερων καλωδίων στο κατάστρωμα, ώστε να προκύπτουν μικρότερα ανοίγματα. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες διατομές και ευκολότερη αγκύρωση. Ταυτόχρονα είναι δυνατή η αντικατάσταση των καλωδίων (ο φορέας μπορεί να ανακατανεύσει τα εντατικά μεγέθη όταν εδράζεται σε πολλές ελαστικές στηρίξεις – καλώδια) και η καλύτερη προστασία τους από διάβρωση σε σχέση με τα καλώδια μεγάλης διαμέτρου.

Η συνήθης απόσταση των αγκυρώσεων στο κατάστρωμα είναι 15 – 25 m. Το υλικό κατασκευής των κυρίων δοκών επηρεάζει κατά πολύ βέβαια (καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτούν πιο πυκνή διάταξη καλωδίων εκτός και αν εφαρμόζεται ισχυρή προένταση). Επίσης ο τρόπος κατασκευής του φορέα είναι καθοριστικός για την επιλογή του μήκους των ανοιγμάτων. Στην περίπτωση που η κατασκευή γίνεται με προβολοδόμηση πρέπει να είναι δυνατή η ανύψωση και η αποκατάσταση της συνέχειας των νέων τμημάτων του καταστρώματος. Αντίθετα όταν ο φορέας κατασκευάζεται παραπλεύρως της θέσης τοποθέτησης και προωθείται στην τελική του θέση μέσω προσωρινών στηρίξεων, είναι δυνατή μια πιο αραιή διάταξη καλωδίωσης.

1.3.4 Τύποι καλωδίων

Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι καλωδίων στις καλωδιωτές γέφυρες. Οι συνήθεις τύποι που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο Σχήμα 1.10:



Σχήμα 1.10: Τύποι καλωδίων

Καλώδια παράλληλων ράβδων (Σχήμα 1.10 α)

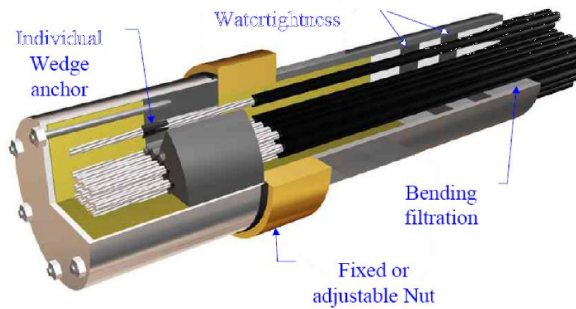
Μορφώνονται από ευθύγραμμες χαλύβδινες ράβδους που τοποθετούνται εντός μεταλλικών σωλήνων. Οι ράβδοι έχουν μήκος 15 -20 m οπότε είναι αναγκαία η τοποθέτηση παρεμβλημάτων για την ένωσή τους κατά μήκος, πράγμα που κάνει αυτόν τον τύπο καλωδίων ευπαθή σε αστοχία λόγω κόπωσης. Η συνήθης διάμετρος των ράβδων είναι 16 mm. Το κενό μεταξύ του εξωτερικού σωλήνα και των ράβδων γεμίζεται με ένεμα (πολυαιθυλένιο). Η χρήση των καλωδίων παράλληλων ράβδων είναι αποδοτική κυρίως σε φορείς όπου ο λόγος των μόνιμων φορτίων προς τα κινητά είναι μεγάλος.

Καλώδια παράλληλων συρμάτων (Σχήμα 1.10 β)

Χαλύβδινα σύρματα τοποθετούνται σε σωλήνες πολυαιθυλενίου και το εσωτερικό γεμίζεται με ένεμα σκυροδέματος το οποίο κρατά τα σύρματα στη θέση τους. Η αντοχή των καλωδίων αυτών είναι ικανοποιητική σε κόπωση. Τα καλώδια που μορφώνονται με αυτόν τον τρόπο έχουν εφελκυστική αντοχή από 1300 -9000 KN. Η συνήθης διάμετρος των συρμάτων είναι 7 mm.

Καλώδια με τένοντες (Σχήμα 1.10 γ)

Η ευρέως διαδεδομένη χρήση αυτού του τύπου καλωδίων (χρησιμοποιείται σε προεντεταμένους φορείς) τα καθιστά την πλέον οικονομική αλλά και αξιόπιστη επιλογή. Το καλώδιο αποτελείται από έναν αριθμό τενόντων (ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή τους). Η πλέον διαδεδομένοι τένοντες αποτελούνται από επτά πλεγμένα σύρματα των 0.5 ή 0.7 in (12.7 – 17.78 mm). Τα διάφορα προβλήματα που παρουσιάζει αυτός ο τύπος καλωδίων (αυξημένος κίνδυνος κόπωσης, διάβρωση) έχουν πλέον αντιμετωπιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό με κατάλληλα μέτρα προστασίας.



Σχήμα 1.11: Αγκύρωση καλωδίων τύπου τενόντων

Καλώδια τύπου *locked – coil* (κλώνοι κλειστής περιέλιξης) (Σχήμα 1.10 δ)

Τα καλώδια αυτά αρχικά είχαν εφαρμογή στις κρεμαστές γέφυρες και συγκεκριμένα στους αναρτήρες. Στον πυρήνα τους τοποθετούνται κυκλικής διατομής σύρματα, ενώ περιμετρικά αυτού του πυρήνα διατάσσονται «στρώσεις» συρμάτων τραπεζοειδούς διατομής και διατομής S. Μπορούν να φέρουν ιδιαίτερα υψηλά αξονικά φορτία και παράλληλα η κατασκευή τους τα κάνει ανθεκτικά στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την προένταση. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η εύκολη τοποθέτησή τους, το γεγονός ότι δεν απαιτείται ένεμα μετά την προένταση και ο περιορισμένος χώρος που απαιτείται για την αγκύρωσή τους.

Για την προστασία των καλωδίων από την διάβρωση χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Γίνεται χρήση ειδικών καλυμμάτων ή σωλήνων μέσα στους οποίους τοποθετούνται τα καλώδια. Παράλληλα, διαδεδομένη τακτική για την προστασία των καλωδίων είναι ο γαλβανισμός. Ο εμποτισμός δηλαδή των συρμάτων σε διάλυμα ψευδαργύρου. Εκτός της διάβρωσης, κατάλληλα μέτρα λαμβάνονται και για την προστασία από κεραυνούς. Τοποθετούνται αλεξικέραυνα στην κορυφή των πυλώνων, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος θραύσης του καλωδίου. Σε κάθε περίπτωση, είναι αναγκαίο να προβλέπεται η δυνατότητα αντικατάστασης ενός καλωδίου που έχει φθαρεί, λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα κατά την μελέτη (δυνατότητα ανακατανομής της έντασης ενός καλωδίου στα γειτονικά του χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η στατικότητα του φορέα).

1.3.5 Αγκυρώσεις

Η σύνδεση των βασικών δομικών στοιχείων μιας καλωδιωτής γέφυρας, δηλαδή των καλωδίων, με τους πυλώνες και το κατάστρωμα επιτυγχάνεται μέσω των αγκυρώσεων.

Σύνδεση καλωδίων με κατάστρωμα (Σχήμα 1.12): Στο κατάστρωμα η αγκύρωση γίνεται στις διαδοκίδες ή τις κύριες δοκούς. Για διάταξη καλωδίων σε δύο επίπεδα οι αγκυρώσεις γίνονται στο πλάτος του πεζοδρομίου και σε απόσταση τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν το περιτύπωμα του οδοστρώματος. Προκειμένου να γίνει η αγκύρωση μιας ομάδας συρματοσχοινών, τα οποία σχηματίζουν ένα καλώδιο, τα συρματοσχοίνα στη θέση της σύνδεσης απομακρύνονται μεταξύ τους και στη συνέχεια στερεώνονται. Το κολάρο κατασκευάζεται από δύο χυτοσιδηρά τεμάχια τα οποία συνδέονται με κοχλίες. Η σύνδεση αυτή είναι άμεση ή έμμεση, πρέπει δε να γίνεται λεπτομερής έλεγχος επάρκειας όλων των στοιχείων που μεσολαβού προκειμένου να μεταβιβαστούν τα φορτία από την κύρια δοκό στο καλώδιο. Στην

Άμεση σύνδεση συνήθως τοποθετούνται μικρά εγκάρσια διαφράγματα για τη μεταφορά των φορτίων αυτών, ενώ στην έμμεση χρειάζεται να προστεθούν εγκάρσια ή και διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά, ιδιαίτερα όταν η σύνδεση γίνεται μακριά από την κύρια δοκό. Σε πολλές περιπτώσεις τα ακραία καλώδια αγκυρώνονται στο έδαφος προσδίδοντας επιπλέον ακαμψία στους πυλώνες (βλ. κρεμαστές γέφυρες).



Σχήμα 1.12: Σύνδεση καλωδίων με κατάστρωμα

Σύνδεση καλωδίων με πυλώνες (Σχήμα 1.13) : Η προένταση στα καλώδια επιβάλλεται μόνο από την αγκύρωση στους πυλώνες και όχι από το κατάστρωμα, όπου οι αγκυρώσεις είναι σταθερές. Όπως είναι φυσικό, ανάλογα με τον τύπο καλωδίου που χρησιμοποιείται, η διάταξη της αγκύρωσης είναι διαφορετική. Στους πυλώνες, η δυσκολία που παρουσιάζεται είναι η διάταξη των αγκυρώσεων αφού αφ' ενός ο χώρος είναι περιορισμένος και αφ' ετέρου οι τάσεις που δημιουργούνται ιδιαίτερα



υψηλές. Η διάταξη των αγκυρώσεων καθ' ύψος μπορεί σαφώς να αποτελέσει λύση σε αυτό το πρόβλημα. Επίσης, η τοποθέτηση ειδικά κατασκευασμένων για την κάθε περίπτωση μεταλλικών «υποδοχών» αγκυρώσεων οι οποίες προσαρτώνται στην κορυφή των πυλώνων είναι συνηθισμένη τακτική.

Σχήμα 1.13: Σύνδεση καλωδίων με πυλώνα

1.3.6 Σύνδεση πυλώνα – καταστρώματος

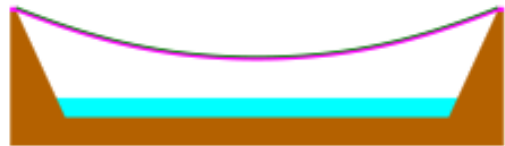
Η απόζευξη της κίνησης του καταστρώματος από αυτή των πυλώνων υπό την επίδραση δυναμικών φορτίσεων είναι βασικό χαρακτηριστικό των καλωδιωτών γεφυρών. Σε πολλές καλωδιωτές γέφυρες υιοθετείται η λύση της ακλόνητης σύνδεσης των δομικών αυτών στοιχείων η οποία όμως έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση των εντατικών μεγεθών τόσο στους πυλώνες όσο και στις δοκούς του καταστρώματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται αναγκαία μια τύπου ελατηρίου σύνδεση μεταξύ του πυλώνα και του καταστρώματος είτε για την απόσβεση αεροδυναμικών ταλαντώσεων που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο των φορέα, είτε για

τον περιορισμό του εύρους των ταλαντώσεων αυτών από κάποιο όριο και πάνω ώστε να αποφευχθεί σύγκρουση του καταστρώματος με τους πυλώνες κατά την εγκάρσια έννοια. Σε ορισμένες καλωδιωτές γέφυρες έχουν τεθεί ειδικά στοιχεία σύνδεσης τα οποία εμποδίζουν τη μετατόπιση του καταστρώματος από κάποιο σημείο και πέρα. Για παράδειγμα στην γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου τέθηκαν ειδικοί αποσβεστήρες με τη μορφή εμβόλων οι οποίοι αφήνουν ελεύθερη την εγκάρσια κίνηση του καταστρώματος σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του φορέα, αρχίζουν και αποσβένουν όμως την ταλάντωση κατά την διάρκεια σεισμικής διέγερσης ή ισχυρών ανέμων που προκαλούν διαφορικές μετατοπίσεις στα στοιχεία του φορέα.

1.4 Κρεμαστές γέφυρες

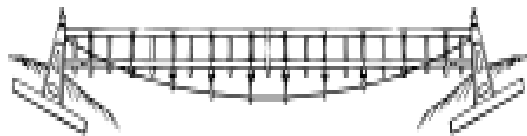
1.4.1 Είδη κρεμαστών γεφυρών

Simple suspension bridge (Σχήμα 1.14): Η παλαιότερη μορφή κρεμαστής γέφυρας (συνήθως πεζογέφυρα). Το κατάστρωμα είναι ελαστικό και στηρίζεται πάνω σε κύρια καλώδια, τα οποία είναι αγκυρωμένα στη γη.



Σχήμα 1.14: Simple suspension bridge

Underspanned suspension bridge (Σχήμα 1.15): Απόγονος της απλής κρεμαστής γέφυρας στις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Το κύριο καλώδιο κρέμεται εξ' ολοκλήρου κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας, αλλά αγκυρώνεται στο έδαφος, όπως και στον συμβατικό τύπο.



Σχήμα 1.15: Underspanned suspension bridge

Stressed ribbon bridge: (Σχήμα 1.16): Ένας μοντέρνος απόγονος της απλής κρεμαστής γέφυρας. Τα καλώδια ανάρτησης, τα οποία είναι προεντεταμένα, είναι ενσωματωμένα στο κατάστρωμα, που ακολουθεί ένα αλυσοειδές τόξο μεταξύ των στηριγμάτων. Ο συνδυασμός αυτός των προεντεταμένων καλωδίων και του σκυροδέματος δημιουργεί τελικά μια άκαμπτη κατασκευή, η οποία αντέχει και μεγάλα φορτία.



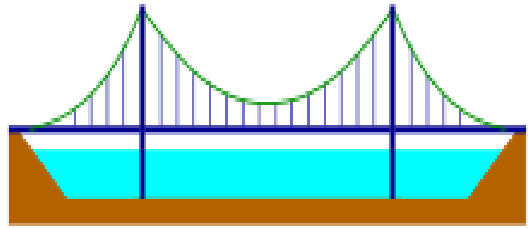
Σχήμα 1.16: Stressed ribbon bridge

Suspension bridge (Σχήμα 1.17): Ο πιο συνηθισμένος τύπος κρεμαστών γεφυρών. Αυτός ο τύπος κρεμαστής γέφυρας είναι κατάλληλος για βαρέα οχήματα και ελαφρά σιδηροδρομικά δίκτυα. Τα κύρια καλώδια είναι αγκυρωμένα στο έδαφος, ενώ το κατάστρωμα, το οποίο είναι άκαμπτο, αναρτάται μέσω αυτών από κατακόρυφα καλώδια.



Σχήμα 1.17: Suspension bridge

Self-anchored suspension bridge (Σχήμα 1.18): Μεταγενέστερη του προηγούμενου τύπου, με τη διαφορά ότι τα κύρια καλώδια αγκυρώνονται στα άκρα του καταστρώματος.



Σχήμα 1.18: Self-anchored suspension bridge

1.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι άλλων γεφυρών:

Πλεονεκτήματα:

- i. Είναι εφικτή η κατασκευή μεγαλύτερων κύριων ανοιγμάτων σε σχέση με άλλα είδη γεφυρών.
- ii. Εκτός από την εγκατάσταση των προσωρινών καλωδίων, χρειάζεται ελάχιστη ή καθόλου πρόσβαση στο κάτω μέρος της κατασκευής κατά τη διάρκεια των εργασιών, γεγονός που επιτρέπει για παράδειγμα τη συνέχιση της ναυσιπλοΐας κατά τη διάρκεια της ανέγερσης.
- iii. Αναμένεται καλύτερη απόκριση σε περίπτωση σεισμού σε σχέση με άλλες βαρύτερες ή πιο άκαμπτες γέφυρες.

Μειονεκτήματα:

- i. Χαρακτηριστική ιδιότητα των κρεμαστών γεφυρών είναι η εμφάνιση σημαντικών παραμορφώσεων εκ των κινητών φορτίων, ως και ταλαντώσεων από τη δυναμική επιβάρυνση και τη φόρτιση του ανέμου. Η ιδιότητα αυτή τις καθιστά πλέον ευαίσθητες των υπολοίπων φορέων της γεφυροποιίας.
- ii. Το σχετικά μικρής ακαμψίας κατάστρωμα δυσχεραίνει την ανάληψη βαρέων σιδηροδρομικών μεταφορών λόγω των οποίων προκύπτουν μεγάλα συγκεντρωμένα κινητά φορτία.

1.4.3 Καλώδια

Το κύριο στοιχείο μιας κρεμαστής γέφυρας είναι ένα καμπύλο καλώδιο ανάρτησης παραβολικής μορφής, σχηματισμένο και στηριγμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει το σύνολο των φορτίων στους πυλώνες και στα βάθρα αγκύρωσης. Σε παλαιότερες γέφυρες αυτού του τύπου, η ανάρτηση του καταστρώματος γινόταν με αλυσίδες, αλλά στις πιο σύγχρονες κατασκευές χρησιμοποιούνται πλέγματα καλωδίων. Αυτό προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή, καθώς μερικά ελαττωματικά καλώδια του πλέγματος αποτελούν πολύ μικρότερο κίνδυνο σε σχέση με ένα χαλασμένο κρίκο αλυσίδας. Ένας άλλος λόγος που προτιμάται η χρήση των καλωδίων είναι ότι καθώς τα ανοίγματα αυξήθηκαν, οι μηχανικοί δυσκολεύονταν να μεταφέρουν και να τοποθετήσουν μεγαλύτερες αλυσίδες στις κατάλληλες θέσεις, ενώ τα καλώδια μπορούν να παρασκευαστούν σε μεγάλο βαθμό επιτόπου.

Το καλώδιο είναι κατασκευασμένο συνήθως από συρματόσχοινα μεγάλου μήκους και υψηλής αντοχής. Η γεωμετρία του προσδιορίζεται θεωρώντας ότι η κύρια δοκός και οι πυλώνες δεν καταπονούνται σε κάμψη. Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται σύνδεση του κυρίου καλωδίου με την κύρια δοκό στο μέσον του ανοίγματος μέσω ειδικού συνδέσμου, οπότε αλλάζει η στατική συμπεριφορά του φορέα.

Οι μέθοδοι κατασκευής του καλωδίου αυτού είναι δύο:

- i. Μέθοδος περιέλιξης συρμάτων: Σε αυτή τη μέθοδο όλη η διατομή του καλωδίου (μέχρι και 30000 σύρματα με διάμετρο 5mm), κατασκευάζεται επί τόπου από μεμονωμένα σύρματα, τα οποία σύρονται με έλξη από το ένα άκρο της γέφυρας στο άλλο (από αγκύρωση σε αγκύρωση), περνώντας πάνω από τα «σαμάρια» των πυλώνων. Μετά την περιέλιξη όλων των συρμάτων, το καλώδιο στεραιώνεται περιμετρικά σε κυκλική μορφή, με τη βοήθεια υδραυλικής συσκευής, και περιβάλλεται στη συνέχεια με ανοπτημένο γαλβανισμένο χαλύβδινο σύρμα, το οποίο βρίσκεται υπό εφελκυσμό.
- ii. Μέθοδος παράλληλων συρματοσχοινων: Σε αυτή τη μέθοδο, προκατασκευασμένα συρματοσχοίνα με παράλληλα σύρματα τοποθετούνται το ένα μετά το άλλο, μειώνοντας την απαιτούμενη επί τόπου εργασία, τον απαιτούμενο χρόνο, αλλά και την ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες. Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι στην πρώτη χρησιμοποιούνται σύρματα ενώ στη δεύτερη συρματοσχοίνα. Περιοριστικός παράγοντας για την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου είναι το βάρος του συρματοσχοίνου, το οποίο πρέπει να κατασκευαστεί ενιαίο σε όλο το μήκος του (από αγκύρωση σε αγκύρωση). Εάν η προσπέλαση προς τη θέση ανέγερσης είναι δυνατόν να γίνει από τη θάλασσα, μπορεί να μεταφερθούν μεγαλύτερες και βαρύτερες μομπίνες από αυτές που μπορούν να μεταφερθούν μέσω ξηράς.

Σκωρίαση

Σημαντικός παράγοντας ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η σκωρίαση, επειδή εάν διεισδύσει ακόμη και σε μικρή ποσότητα, μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της αντοχής. Επιπλέον, υπάρχει αντικειμενική αδυναμία επισκεψιμότητας και συντήρησης όλων των συρμάτων στο τελειωμένο καλώδιο, ενώ οι κοιλότητες μεταξύ των συρμάτων δημιουργούν πρόσθετο παράγοντα συγκέντρωσης υγρασίας. Για ένα απλό σύρμα η πλέον αποτελεσματική προστασία από σκωρίαση επιτυγχάνεται με γαλβανισμό. Π.χ. για σύρμα διαμέτρου 5mm, ο γαλβανισμός αυτός ισοδυναμεί περίπου σε 0,05 N/m ή 3,5% του βάρους του σύρματος. Η προστασία αυτή χρησιμοποιείται στα κύρια καλώδια των κρεμαστών γεφυρών ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατασκευής του καλωδίου. Μετά την ολοκλήρωση κατασκευής του καλωδίου, προκειμένου να αυξηθεί περισσότερο η προστασία από σκωρίαση, γίνεται επάλειψη με ψευδαργυρικό υλικό και κατόπιν περιτύλιξη με ανοπτημένο γαλβανισμένο σύρμα. Αυτή η τελευταία περιτύλιξη μπορεί να αντικατασταθεί και με πλαστική επικάλυψη.

Αγκυρώσεις και λοιπές συνδέσεις

Οι θέσεις των εδράσεων των συρματοσχοινων επί των πυλώνων είναι διαμορφωμένες ούτως ώστε να μπορούν αυτά να κυλιούνται ελεύθερα κατά την οριζόντια διαμήκη διεύθυνση (διεύθυνση της κυκλοφορίας της γέφυρας), ενώ αποκλείεται οποιαδήποτε άλλη κίνησή τους. Η σύνδεση καλωδίου - πυλώνα γίνεται μέσω ειδικών εφεδράνων μορφής «σαμαριού», το οποίο έχει τη δυνατότητα μετατόπισης μέσω των κυλίνδρων έδρασής του. Η λύση αυτή συναντάται συχνά στη φάση ανέγερσης, οπότε απαιτούνται σχετικές ρυθμίσεις προκειμένου να αποφευχθεί ανεπιθύμητη καμπτική παραμόρφωση του πυλώνα.

Η αγκύρωση των καλωδίων στα άκρα μιας κρεμαστής γέφυρας γίνεται συνήθως στο έδαφος μέσω ογκολίθων από σκυρόδεμα (σπανιότερα στις κύριες δοκούς του

καταστρώματος). Σε αυτή την περίπτωση η συνολική δύναμη του κύριου καλωδίου μεταφέρεται στο έδαφος μέσω των βάθρων (ή μπλοκ) αγκύρωσης, τα οποία κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το καλώδιο διαχωρίζεται στα επιμέρους συρματόσχοινα μέσω ειδικών σαμαριών και στη συνέχεια τα συρματόσχοινα αυτά, διασκορπισμένα σε επαρκείς αποστάσεις μεταξύ τους, αγκυρώνονται στο πίσω μέρος του βάθρου αγκύρωσης. Η μεταφορά των δυνάμεων από το βάθρο αγκύρωσης στο έδαφος επηρεάζεται σημαντικά από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Ο πλέον κοινός τύπος βάθρου αγκύρωσης είναι αυτός που μεταφέρει τα φορτία στο έδαφος μέσω βαρύτητας. Στον τύπο αυτό απαιτείται μεγάλο νεκρό φορτίο, το οποίο αφενός θα εξουδετερώσει την κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης του καλωδίου κι αφετέρου θα εξασφαλίσει την απαιτούμενη με το έδαφος τριβή για την παραλαβή της οριζόντιας συνιστώσας της δύναμης του καλωδίου. Λόγω των μεγάλων φορτίων που πρέπει να μεταφερθούν, οι διαστάσεις του βάθρου αγκύρωσης είναι πολύ μεγάλες. Μια άλλη λύση σε περίπτωση που το έδαφος είναι βραχώδες, είναι η αγκύρωση των συρματόσχοινων μέσα στο βράχο.

1.4.4 Αναρτήρες

Το κατάστρωμα είναι αναρτημένο από τα κύρια καλώδια μέσω κατακόρυφων ή κεκλιμένων (σπανιότερα) καλωδίων (αναρτήρες) υψηλής αντοχής, κατασκευασμένα και αυτά από πλεγμένα σύρματα. Οι αναρτήρες θεωρούνται αξονικώς απαραμόρφωτοι (μη εκτατοί αναρτήρες) και είναι τόσο πυκνά τοποθετημένοι σε σχέση με το μήκος της γέφυρας (ανά αποστάσεις που κυμαίνονται από 10 έως 20 m), ώστε η επιρροή τους μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχούς φορτίου. Η σύνδεση των αναρτήρων με το κύριο καλώδιο επιτυγχάνεται με ένα δακτύλιο, ο οποίος συσφίγγεται περί το κύριο καλώδιο, έχει δε κατάλληλη μορφή η οποία επιτρέπει τη στερέωση των αναρτήρων. Ο δακτύλιος αποτελείται από δύο ημικυλινδρικά τεμάχια, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοχλιών υψηλής αντοχής, προκειμένου να αναπτυχθεί η απαιτούμενη τριβή. Η τριβή αυτή εξαρτάται από την κλίση του καλωδίου, απαιτείται δε μεγαλύτερη όσο η σύνδεση γίνεται πλησιέστερα προς τον πυλώνα.

Η χρήση υψηλής αντοχής εφελκόμενου χάλυβα, κατά βάση στα κύρια καλώδια και δευτερευόντως στους αναρτήρες, οδηγεί σε μια οικονομική κατασκευή, ειδικά εάν το ίδιο βάρος της γέφυρας είναι αρκετά μεγάλο, πράγμα που συμβαίνει στις γέφυρες με μεγάλα ανοίγματα. Οι κρεμαστές γέφυρες θεωρούνται ασυναγώνιστες οικονομικά για ανοίγματα μεγαλύτερα των 450m, ενώ από 700m και άνω αποτελούν τη μοναδική λύση. Σήμερα ανοίγματα 1.300 έως 1.500 m θεωρούνται συνήθη.



Σχήμα 1.19: Κύρια καλώδια και αναρτήρες

1.5 Κατάστρωμα

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο τύπος καταστρώματος που επιλέγεται (εύκαμπτο – άκαμπτο, βαρύ –ελαφρύ) παίζει σημαντικό ρόλο στο στατικό σύστημα του φορέα, οπότε και στην επιλογή των λοιπών δομικών στοιχείων. Στις καλωδιωτές και στις κρεμαστές γέφυρες χρησιμοποιούνται καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, αμιγώς μεταλλικά αλλά και σύμμικτα. Κάθε τύπος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Γενικά η ακαμψία του καταστρώματος καθορίζει σε σημαντικό βαθμό και τα εντατικά μεγέθη στους πυλώνες. Μέσω παραμετρικών αναλύσεων έχει αποδειχτεί ότι όσο πιο εύκαμπτο είναι ένα κατάστρωμα, τόσο μειώνονται οι ροπές (κατά τη διεύθυνση της γέφυρας) στους πυλώνες.

Από στατικής άποψης ο φορέας του καταστρώματος ανεξάρτητα από το υλικό και την μόρφωση του, αποτελεί μια συνεχή δοκό επί ελαστικών στηρίξεων. Στην περίπτωση που στις διατομές των πυλώνων και στα άκρα του καταστρώματος υπάρχει πρόβλεψη για άκαμπτη σύνδεση – έδραση, τότε οι αντίστοιχες στηρίξεις θεωρούνται ακλόνητες. Οι ελαστικές στηρίξεις έχουν δυσκαμψία ανάλογη του μήκους και της κλίσης του αναρτήρα.

1.5.1 Τύποι καταστρωμάτων

Μεταλλικά καταστρώματα

Η μόρφωση του καταστρώματος από χαλύβδινες κύριες δοκούς (διατομής I ή κιβωτίου) και η χρήση ορθότροπων χαλύβδινων καταστρωμάτων αποτέλεσε την πρώτη επιλογή για δεκαετίες, καθώς με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρό ι.β. καταστρώματος και κατ' επέκταση μικρό συνολικό μόνιμο φορτίο. Οι ορθότροπες πλάκες (πλάκες με διαφορετικές ακαμψίες κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις) παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ιδιαίτερα στις γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων (>50m). Έχουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα, όπως το ιδιαίτερα υψηλό κόστος, χαμηλή θερμοχωρητικότητα και είναι ιδιαίτερα ευπαθείς στην κόπωση.

Καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα

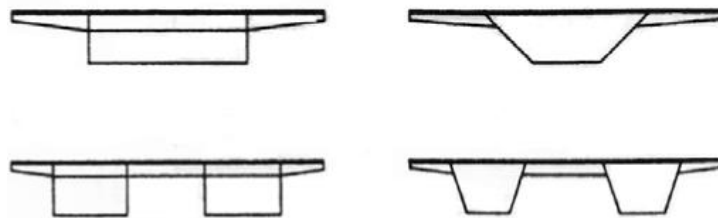
Σε σύγκριση με τα χαλύβδινα καταστρώματα, τα καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν αρκετά υψηλότερο ίδιο βάρος (10 -15 KN/m²). Συνήθως οι δοκοί μορφώνονται ως κιβωτιοειδείς διατομές. Το μέσο πάχος των τοιχωμάτων των κιβωτίων κυμαίνεται γύρω στα 50 cm. Ο λόγος μόνιμων προς κινητών φορτίων είναι βέβαια υψηλότερος απ' ό,τι στην περίπτωση της χρήσης του χάλυβα. Οι διατομές είναι δυνατό να προκατασκευαστούν στο εργοτάξιο και να αποκατασταθεί η συνέχειά τους με προένταση αμέσως μετά την σύνδεση με το προηγούμενο μέλος του καταστρώματος. Λόγω του υψηλού ίδιου βάρους του καταστρώματος, η αεροδυναμική συμπεριφορά του φορέα είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με τα ελαφρύτερα χαλύβδινα καταστρώματα.

Σύμμικτα καταστρώματα

Η χρήση σύμμικτων διατομών καταστρωμάτων αποτελεί κατά πολλούς την χρυσή τομή μεταξύ των δύο παραπάνω τύπων καταστρωμάτων. Αν και ήδη έχουν κατασκευαστεί πολλές σύμμικτες γέφυρες ανά τον κόσμο τα πλεονεκτήματά της

ταυτόχρονης χρήσης χάλυβα και σκυροδέματος για τη μόρφωση του κύριου φορέα δεν έχουν πλήρως διερευνηθεί.

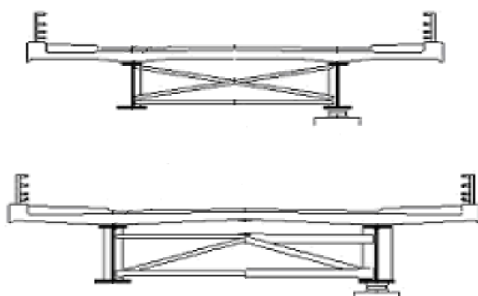
Η βασική διαφορά των σύμμικτων από τις σιδηρές γέφυρες έγκειται στον διαφορετικό τύπο πλάκας καταστρώματος. Στις σύμμικτες γέφυρες η πλάκα μορφώνεται από σπλισμένο σκυρόδεμα και συνεργάζεται με τις σιδηροδοκούς. Τα δύο υλικά συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς συνδέσμους με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η συνεργασία τους (ενιαία παραμόρφωση) κατά τη φόρτισή τους. Οι σύνδεσμοι αυτοί ονομάζονται διατμητικοί σύνδεσμοι επειδή καταπονούνται κυρίως από διατμητικές τάσεις, η δε επιφάνεια επαφής των δύο αυτών υλικών ονομάζεται διεπιφάνεια. Εκτός από τη μεταφορά των φορτίων, το σύμμικτο κατάστρωμα συνεισφέρει στην αντοχή του φορέα παραλαμβάνοντας τόσο καμπτικές ροπές, όσο και αξονικές δυνάμεις (οι οποίες στην περίπτωση του καλωδιωτού φορέα είναι σημαντικές). Η οικονομικότητα της χρήσης σύμμικτου καταστρώματος μπορεί εύκολα να αποδειχτεί. Για την παραλαβή των ίδιων φορτίων, μια αμιγώς σιδηρά διατομή πρέπει να έχει πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με την αντίστοιχη σύμμικτη (δεδομένου ότι ο χάλυβας είναι πολύ πιο ακριβό υλικό από το σκυρόδεμα).



Σχήμα 1.20: Μορφές διατομής σύμμικτων καταστρώματων

1.5.2 Μόρφωση καταστρώματος

Η μόρφωση του καταστρώματος μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Τα εντατικά μεγέθη και τα ανοίγματα κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση καθορίζουν τον τύπο που θα χρησιμοποιηθεί. Οι συνήθεις μορφές είναι οι ανοικτές με χρήση διατομών διπλού ταν και οι κιβωτιοειδείς. . Στις σύμμικτες κατασκευές δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιείται σκυρόδεμα κατηγορίας μικρότερης από C30/37 και μεγαλύτερης από C50/60.



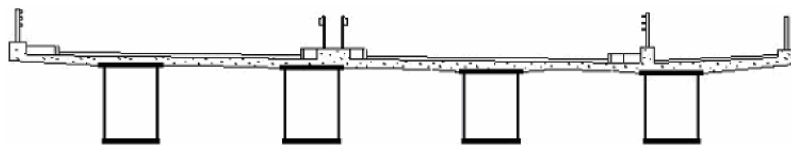
Ως εσχάρα δοκών(με χρήση διατομών διπλού T)

Κατά την διαμήκη έννοια τοποθετούνται δύο ή περισσότερες κύριες δοκοί οι οποίες εγκάρσια ενώνονται με διαδοκίδες (οι οποίες και αυτές συνεργάζονται με την πλάκα σκυροδέματος).

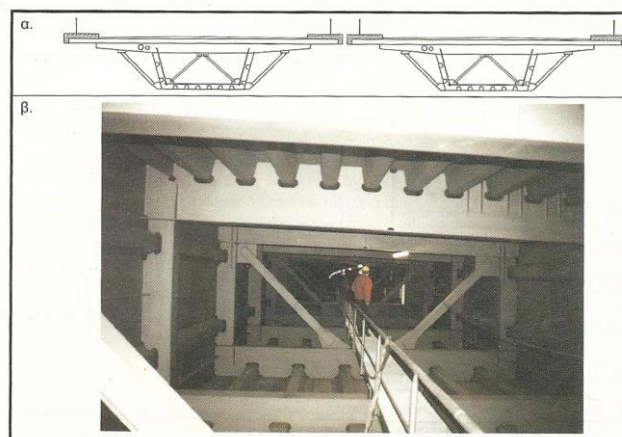
Σχήμα 1.21: Καταστρώματα με δύο κύριες δοκούς τύπου I

Κιβωτιοειδείς διατομές

Οι κιβωτιοειδείς διατομές έχουν ορθογωνικό ή τραπεζοειδές σχήμα και συνδέονται διατμητικά με την πλάκα σκυροδέματος με ήλους που τοποθετούνται στα ανώτερο τοίχωμά τους. Διακρίνονται σε αεροστεγή μικροκιβώτια (Σχήμα 1.22) και επισκέψιμα κιβώτια (Σχήμα 1.23). Τα μικροκιβώτια έχουν ορθογωνική διατομή και κλείνουν αεροστεγώς με συγκολλητά διαφράγματα στα άκρα, ώστε να μη χρειάζονται αντιδιαβρωτική προστασία (βαφή) στο εσωτερικό τους. Γι' αυτό το λόγο δεν είναι επισκέψιμα. Τα επισκέψιμα κιβώτια πλεονεκτούν από στατική άποψη καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυστρεψία (καλύτερη παραλαβή των έκκεντρων φορτίων κυκλοφορίας) και καλή συμπεριφορά σε αεροδυναμικά φαινόμενα. Προτιμώνται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλων καμπυλοτήτων και κάπως μεγαλύτερων ανοιγμάτων (>50m). Έχουν όμως το μεγάλο πλεονέκτημα της απλότητας στην κατασκευή σε σχέση με τις ανοιχτές δοκούς. Επίσης, οι εσωτερικές επιφάνειες δεν είναι εκτεθειμένες στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, οπότε μειώνεται το κόστος τόσο της αρχικής προστασίας όσο και της συντήρησης. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι έχουν μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος



Σχήμα 1.22: Σύμμικτο κατάστρωμα με κλειστά κιβώτια



Σχήμα 1.23: Γέφυρες διατομής επισκέψιμου κιβωτίου

1.5.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα σύμμικτων γεφυρών

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύμμικτων γεφυρών απορρέουν από τις ιδιότητες του χάλυβα που είναι τα ακόλουθα:

- i. Υψηλή αντοχή (λεπτές διατομές, μικρό βάρος, οικονομία υλικού και χώρου)
- ii. Ολκιμότητα (εκτεταμένη παραμόρφωση χωρίς αστοχία)
- iii. Ομοιομορφία υλικού
- iv. Μεγάλη διάρκεια ζωής
- v. Ταχύτητα ανέγερσης
- vi. Ευκολία προκατασκευής

- vii. Δυνατότητα ζεύξης μεγάλων ανοιγμάτων
- viii. Άριστα αποτελέσματα

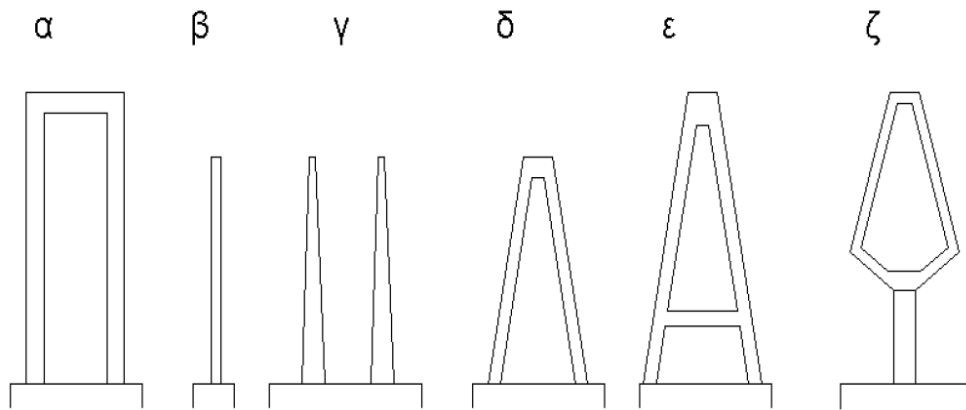
Ως κυριότερο μειονέκτημα αναφέρεται η σκωρίαση, η οποία συνεπάγεται αύξηση του κόστους συντήρησης της γέφυρας.

1.6 Πυλώνες

Οι πυλώνες (ή πύργοι), ανάλογα με τη διευθέτηση των καλωδίων, τις απαιτήσεις της ανάλυσης, τις συνθήκες της περιοχής, την αισθητική και την οικονομία, εμφανίζονται με μεγάλη ποικιλία μορφών (Σχήμα 1.24). Η στήριξή τους στη θεμελίωση γίνεται μέσω πάκτωσης ή άρθρωσης, ανάλογα με τη σχέση μεταξύ οριζόντιων και κατακόρυφων δυνάμεων που δρουν στους πυλώνες, αλλά και με την ποιότητα του εδάφους. Η πάκτωση συνεπάγεται μεγάλες καμπτικές ροπές στη βάση του πυλώνα, ενώ η άρθρωση όχι, από την άλλη μεριά όμως η προσδιδόμενη ακαμψία στην κατασκευή λόγω της πάκτωσης είναι ένα πλεονέκτημα το οποίο συνεκτιμάται στην τελική επιλογή της συνθήκης στήριξης. Εξάλλου από κατασκευαστική άποψη η πάκτωση υλοποιείται πιο εύκολα και κοστίζει λιγότερο από την αντίστοιχη άρθρωση, η οποία επιπλέον προϋποθέτει και προσωρινή στήριξη του πυλώνα κατά τη φάση της ανέγερσης, μέχρι να συνδεθεί με τα καλώδια. Οι πυλώνες συνήθως κατασκευάζονται με κυψελωτές διατομές από χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα (παλαιότερα και από τοιχοποιία). Τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει η χρήση κυψελοειδών διατομών οπλισμένου σκυροδέματος. Η επιλογή του υλικού των πυλώνων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως: συνθήκες εδάφους, ταχύτητα ανέγερσης, ευστάθεια κατά το στάδιο ανέγερσης κλπ. Το ύψος τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως: κυρίως άνοιγμα της γέφυρας, ελεύθερο ύψος κάτω από τη γέφυρα, τύπος καλωδίωσης και ελάχιστη κλίση καλωδίων (συνήθως κυμαίνεται από 0,3 έως 0,5), αισθητικές απαιτήσεις κλπ.

Σχετικά με τις συνθήκες στήριξης των πυλώνων κατά τη διαμήκη έννοια της γέφυρας, είναι δυνατή η μόρφωση άρθρωσης (μέσω περιστροφής περί άξονα) ή πάκτωσης (στο επίπεδο της θεμελίωσης ή του καταστρώματος). Η λύση της αρθρωτής στήριξης κατά τη διαμήκη έννοια επιλέγεται κυρίως όταν υπάρχουν κακές εδαφικές συνθήκες, προκειμένου να μειωθούν οι καμπτικές ροπές που θα αναπτυχθούν στη θεμελίωση.

Η επιλογή του μελετητή είναι οικονομοτεχνική, αφού ο συνδυασμός του πυλώνα με την καλωδίωση και τον τύπο καταστρώματος είναι το κρίσιμο στοιχείο. Για παράδειγμα η απαίτηση για ακαμψία στους πυλώνες αναπόφευκτα οδηγεί σε μεγάλες διατομές. Ωστόσο μια τέτοια επιλογή επηρεάζει και τον τύπο του καταστρώματος, ο οποίος μπορεί να μορφωθεί πολύ πιο λυγηρός (άρα και οικονομικός). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι κάθε επιλογή σε κάποιο δομικό στοιχείο επηρεάζει ολόκληρη την κατασκευή και με αυτό το κριτήριο πρέπει να γίνεται ο σχεδιασμός.



Σχήμα 1.24: Μερικές μορφές πυλώνων: α) μορφής Π, β) πρόβολος, γ) δύο πρόβολοι, δ) μορφής Λ, ε) μορφής Α, ζ) μορφής ρόμβου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Γενική περιγραφή μοντέλων ανάλυσης

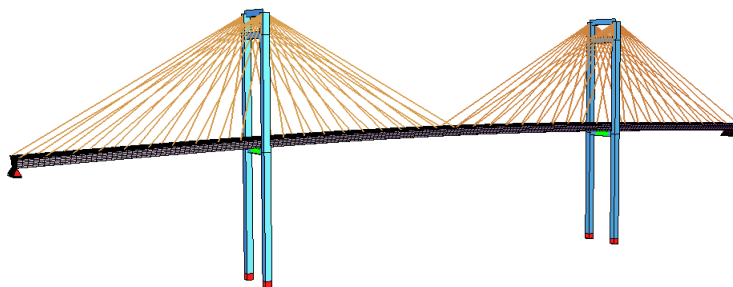
2.1 Γενική περιγραφή μοντέλου ανάλυσης καλωδιωτής γέφυρας

Σε αυτό το σημείο γίνεται η ανάλυση μιας οδικής σύμμικτης καλωδιωτής γέφυρας διπλού κλάδου αυτοκινητοδρόμου με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων SOFISTIK. Η γέφυρα, συνολικού μήκους $L=400\text{m}$, αποτελείται από φορέα τριών ανοιγμάτων, εκ των οποίων τα δύο ακραία έχουν μήκος 100m , ενώ το κεντρικό έχει μήκος 200m . Το οδόστρωμα υποδιαιρείται σε δύο τμήματα με μόνιμη νησίδα ασφαλείας πλάτους 1m . Κατά τον άξονα x οι κόμβοι του φορέα έχουν τοποθετηθεί σύμφωνα με τη συνάρτηση $f(x)=-5\sin\pi x/L$. Το σκυρόδεμα είναι ποιότητας C30/37, ο δομικός χάλυβας S275, ενώ ο χάλυβας οπλισμού B500C. Αντί για κύριες δοκούς κρίθηκε καλύτερη επιλογή η τοποθέτηση κιβωτιοειδούς κύριας δοκού τραπεζοειδούς μορφής με δύο προβόλους για τη στήριξη των πεζοδρομίων, με τις εξής διαστάσεις: άνω πέλμα 13m , κάτω πέλμα 8m , ύψος 4m και πρόβολοι $1,5\text{m}$. Το ύψος της πλάκας είναι 25cm , ενώ η τραπεζοειδής διατομή έχει στο κάτω πέλμα πάχος 4cm και στα πλαϊνά $2,5\text{cm}$. Εσωτερικά της κιβωτιοειδούς διατομής έχουν τοποθετηθεί χαλύβδινα διαφράγματα ανά 10m και πάχους 2cm , τα οποία είναι αεροστεγώς συγκολλημένα στη διατομή. Η διατμητική σύνδεση γίνεται με τη βοήθεια διατμητικών ήλων, συγκολλημένων εργοστασιακά επί του άνω πέλματος της κιβωτιοειδούς δοκού.

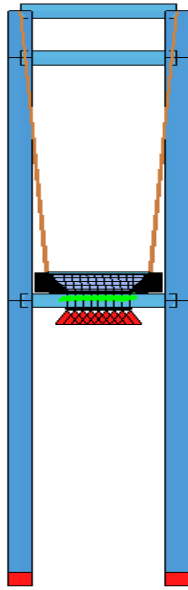
Η στήριξη του φορέα επιτυγχάνεται μέσω καλωδίων, τα οποία αναρτώνται από δύο πυλώνες οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση 100m από τα άκρα της γέφυρας. Τοποθετήθηκαν 20 καλώδια ανά κορυφή πυλώνα, με διάμετρο 40cm , κατά τον διαμήκη άξονα συνδεδεμένα με το κατάστρωμα ανά 10m , ενώ κατά την εγκάρσια διεύθυνση διατεταγμένα σε δύο επίπεδα. Εφαρμόστηκε προένταση σε όλα τα καλώδια σύμφωνα με τον τύπο $P=A*F_u*1\%=754\text{ KN}$ (ανά καλώδιο). Οι πυλώνες έχουν διαστάσεις διατομής $3\text{m} \times 3\text{m}$ και ύψος 120m , ενώ συνδέονται μεταξύ τους με δύο δοκούς διαστάσεων διατομής $3\text{m} \times 1,5\text{m}$ και μήκος 13m . Η μία από τις δύο συνδετήριες δοκούς βρίσκεται σε ύψος 60m από τη στάθμη θεμελίωσης, ενώ η άλλη 10m κάτω από τις κορυφές των πυλώνων.

Η έδραση του φορέα στο έδαφος επιτυγχάνεται μέσω πακτώσεων στο κάτω μέρος των πυλώνων και κυλίσεων (κατά τον διαμήκη άξονα) στα άκρα του καταστρώματος.

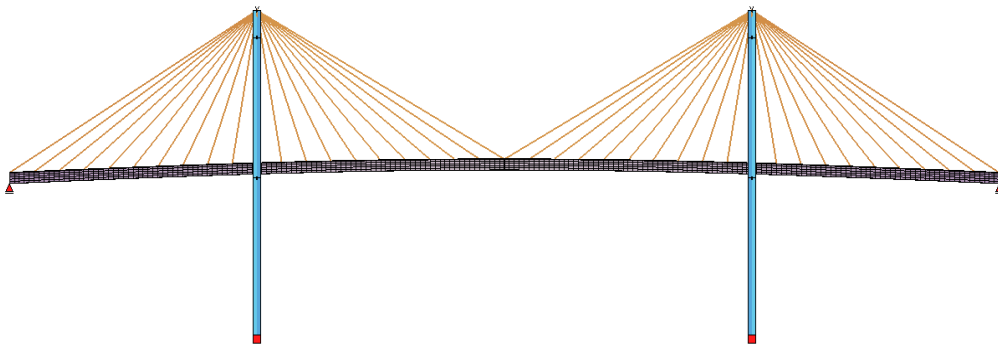
Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



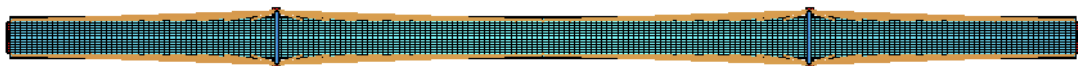
Σχήμα 2.1: Προοπτική όψη



Σχήμα 2.2: Όψη άξονα x



Σχήμα 2.3: Όψη άξονα y

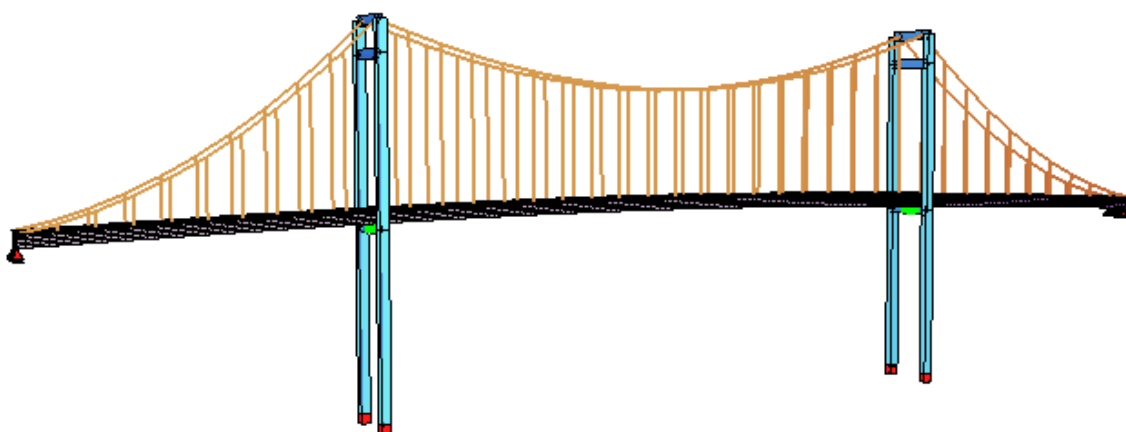


Σχήμα 2.4: Κάτοψη

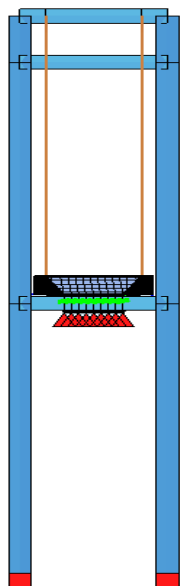
2.2 Γενική περιγραφή μοντέλου ανάλυσης κρεμαστής γέφυρας

Η ανάλυση της οδικής σύμμικτης κρεμαστής γέφυρας διπλού κλάδου αυτοκινητοδρόμου γίνεται όπως και της καλωδιωτής, με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων SOFISTIK. Το μοντέλο ανάλυσης έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το μοντέλο της καλωδιωτής γέφυρας, με τη μόνη διαφορά να παρουσιάζεται στη στήριξη του φορέα. Σε αυτό το μοντέλο η στήριξη του φορέα επιτυγχάνεται μέσω δύο κύριων καλωδίων παραβολικής μορφής (κεντρικό άνοιγμα $y=0,002x^2$, ακραία ανοίγματα $y=0,004x^2+0,2x$), με διάμετρο 50cm το καθένα, στα οποία εφαρμόστηκε προένταση σύμφωνα με τον τύπο $P=A \cdot F_u \cdot 1\% = 1180 \text{ KN}$. Για την ανάρτηση του καταστρώματος από αυτό το κύριο καλώδιο τοποθετήθηκαν κατακόρυφοι αναρτήρες διαμέτρου 20cm, ανά 10m κατά τον διαμήκη άξονα.

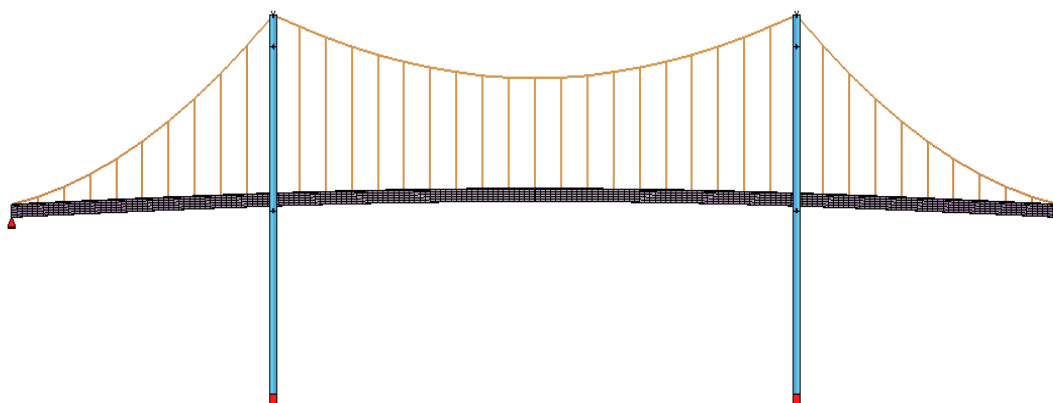
Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



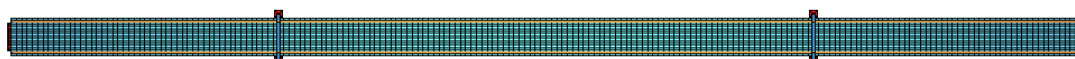
Σχήμα 2.5: Προοπτική όψη



Σχήμα 2.6: Όψη άξονα x



Σχήμα 2.7: Όψη άξονα y



Σχήμα 2.8: Κάτοψη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Φορτίσεις

3.1 Επεξήγηση φορτίσεων

Εκτός των φορτίων κυκλοφορίας, τα οποία αποτελούν τη βασική φόρτιση των γεφυρών, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση και όλες οι υπόλοιπες φορτίσεις, οι οποίες με οποιοδήποτε τρόπο μπορούν να επηρεάσουν την ένταση του φορέα (ίδιο βάρος, άνεμος, χιόνι, σεισμός κτλ). Οι φορτίσεις αυτές θα πρέπει να συνδυάζονται μεταξύ τους καθώς και με τα φορτία κυκλοφορίας.

Οι φορτίσεις που επιβάλλονται στα δύο μοντέλα είναι σύμφωνα με το DIN 1075 (1988), την εγκύκλιο Ε39/99 καθώς και τον ΕΑΚ 2000.

3.1.1 Μεμονωμένες φορτίσεις

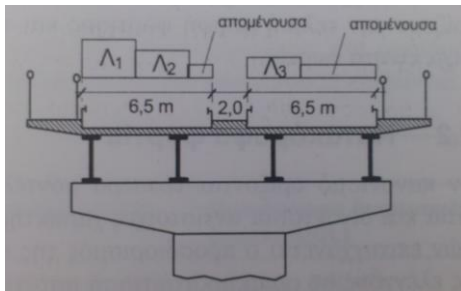
Loadcase 1: Ίδιο βάρος και λοιπά μόνιμα

Το ίδιο βάρος του φορέα λαμβάνεται αυτόματα από το πρόγραμμα, όπου για χάλυβα S275 θεωρείται $\gamma_s=78,5 \text{ KN/m}^3$. Ποιότητα σκυροδέματος C30/35 με $\gamma_c=25 \text{ KN/m}^3$. Ίδιο βάρος ασφαλτοτάπητα 22 KN/m^3 .

Για τα πεζοδρόμια θεωρείται πάχος πλάκας σκυροδέματος $t=20\text{cm}$, ενώ για τον ασφαλτοτάπητα θεωρείται πάχος $t=8\text{cm}$.

Loadcase 2: Ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο (μοντέλο φόρτισης 1)

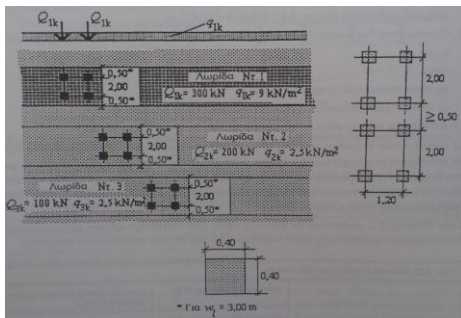
Για την κύρια λωρίδα κυκλοφορίας (Λ_1) λαμβάνονται 9 KN/m^2 σε όλο το μήκος της γέφυρας, ενώ για τις δευτερεύουσες λωρίδες καθώς και για τις απομένουσες λαμβάνεται $2,5 \text{ KN/m}^2$. Ως κινητό φορτίο πεζοδρομίων λαμβάνεται 5 KN/m^2 .



Σχήμα 3.1: Περίπτωση γέφυρας με οδόστρωμα χωριζόμενο με μόνιμη νησίδα ασφαλείας

Loadcases 3-6: Συγκεντρωμένα φορτία διαξονικών οχημάτων (μοντέλο φόρτισης 1)

Τα φορτία οχημάτων λαμβάνονται κατά EC1 ως εξής: Τα φορτία λαμβάνονται ως 4-τροχα, με φορτίο άξονα 300kN, 200kN, 100kN στις λωρίδες 1, 2, 3 αντίστοιχα, ενώ στην λωρίδα 4 0kN. Η κατανομή κάθε τροχού γίνεται βάσει κανονισμού σε μία επιφάνεια $0,40 \times 0,40\text{m}$. Το φορτίο του οχήματος τοποθετείται σε 4 διαφορετικές θέσεις πάνω στο φορέα, ώστε να προκύψουν τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη για τα διάφορα στοιχεία της γέφυρας.



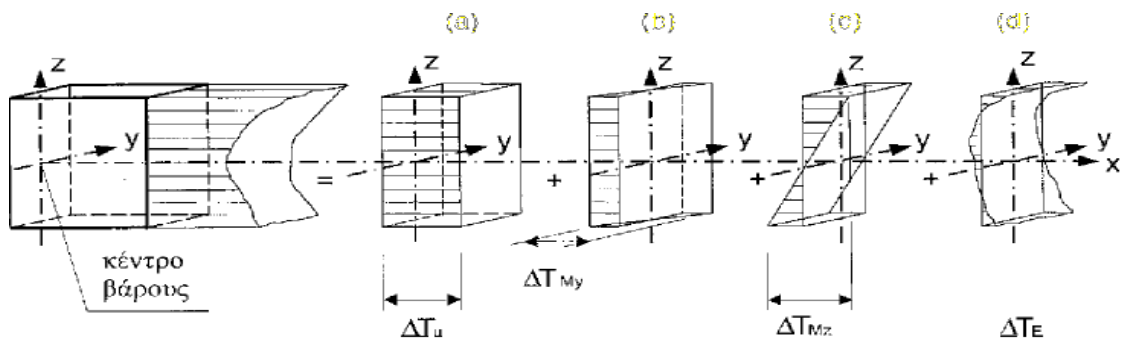
Σχήμα 3.2: Μοντέλο φόρτισης 1

Συγκεκριμένα οι θέσεις είναι οι εξής:

- i. Στο μέσον του μεγάλου ανοίγματος ($x=200\text{m}$)
- ii. Στο άκρο της γέφυρας ($x=0\text{m}$)
- iii. Στο μέσον του μικρού ανοίγματος ($x=50\text{m}$)
- iv. Στον πυλώνα ($x=100\text{m}$)

Loadcase 7: Ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή $\Delta T \pm 35^\circ\text{C}$ (Σχήμα 2.9 a)

Loadcase 8: Γραμμική θερμοκρασιακή κατανομή $\Delta T +18/-13^\circ\text{C}$ (Σχήμα 2.9 b & c)



Σχήμα 3.3: Συνιστώσες θερμοκρασιακής κατανομής σε διατομή [(a) ομοιόμορφη, (b) γραμμική περί τον z-z, (c) γραμμική περί τον y-y, (d) μη γραμμική]

Loadcase 9: Χιόνι

Loadcase 10: Άνεμος

Τα φορτία ανέμου κατατάσσονται στις τυχηματικές δράσεις.

Η ανεμοπίεση υπολογίζεται αναλυτικά ως εξής:

$$W = q_{\text{ref}} * c_e(z) * c_d * \psi_\lambda * c_{f_x,0}$$

$$q_{\text{ref}} = 0,81 \text{ KN/m}^2$$

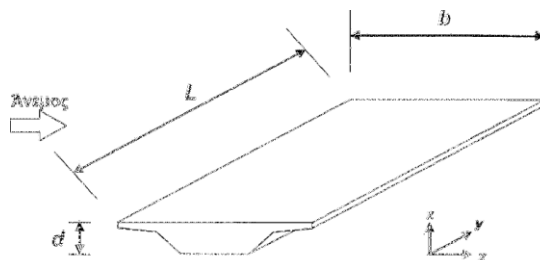
$$c_e(z) = 2,8 \text{ (περιοχή II)}$$

$$c_d = 0,95$$

$$\psi_\lambda = 0,70$$

$$c_{f_x,0} = 1,0$$

και άρα $W = 0,81 * 2,8 * 0,95 * 0,7 * 1,0 = 1,51 \text{ KN/m}^2$ που δρα εγκάρσια στη γέφυρα, με ζώνη επιρροής την προβολή της προσβαλλόμενης επιφάνειας, δηλαδή $d = 4\text{m}$.



Σχήμα 3.4: Διευθύνσεις των δράσεων ανέμου στις γέφυρες

Loadcase 11: Εκκίνηση – τροχοπέδηση

Η δύναμη τροχοπέδησης λαμβάνεται ως διαμήκης, ασκούμενη στο επίπεδο επιφάνειας του οδοστρώματος. Η χαρακτηριστική τιμή του περιορίζεται στα 900KN για το πλάτος της κύριας λωρίδας μιας γέφυρας 400m όπως η υπό μελέτη. Το κατανεμημένο φορτίο που αντιστοιχεί σε μια λωρίδα πλάτους 3m δίνεται από τον τύπο $Q=900/(3*400)=0.75 \text{ KN/m}^2$.

Η δύναμη αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως ασκούμενη κατά μήκος του άξονα οποιασδήποτε λωρίδας. Ωστόσο, αν τα εντατικά μεγέθη λόγω εκκεντρότητας δεν είναι σημαντικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η δύναμη ασκείται μόνο κατά μήκος του άξονα του οδοστρώματος, ομοιόμορφα κατανεμημένη επί του φορτιζόμενου μήκους. Οι δυνάμεις εκκίνησης (επιτάχυνσης) θεωρούνται ίδιου μεγέθους με τις δυνάμεις τροχοπέδησης, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Loadcases 31-33: Σεισμοί

Ο σεισμός σχεδιασμού καθορίζεται από τον ΕΑΚ.

Σεισμική ζώνη I ($\alpha=0,16$), κατηγορία εδάφους B ($T_1=0,15\text{sec}$ και $T_2=0,60\text{sec}$) συντελεστής σπουδαιότητας $\gamma=1$, συντελεστής απόσβεσης $\eta=1,08$, συντελεστής θεμελίωσης $\theta=1$, συντελεστής μεγέθυνσης $\beta_0=2,5$ και συντελεστής μεταλαστικής συμπεριφοράς $q=1$ (ελαστοπλαστικά εφάδρανα). Εφαρμόζω ισοδύναμη στατική ανάλυση για τις σεισμικές φορτίσεις, με συντελεστή $\varepsilon=\gamma\eta\theta\beta_0/q=1*1,08*1*2,5*0,16/1=0,432$

Εξετάζεται σεισμός κατά τις 3 διευθύνσεις.

3.1.2 Συνδυασμοί δράσεων*Οριακή κατάσταση αστοχίας*

Συγκεκριμένα ελέγχονται οι συνδυασμοί:

$$1,35 G + 1,35 Q + 1,5*\psi*\Delta T$$

όπου G =μόνιμα, Q =κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα) και ΔT =ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή, με $\psi=0,6$

$$1,35 G + 1,35 Q + 1,5*\psi*DT$$

όπου G =μόνιμα, Q =κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα) και DT =γραμμική θερμοκρασιακή κατανομή, με $\psi=0,6$

$$1,35 G + 1,35 Q + 0,9*W_{\chi\omicron\iota\omicron\upsilon\upsilon}$$

όπου G =μόνιμα, Q =κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα)

$$1,35 G + 1,35 Q + 0,9*W_{\text{ανέμου}}$$

όπου G =μόνιμα, Q =κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα)

$$1,35 G + 1,35 Q + 0,9*W_{\text{εκκίνησης-τροχοπέδησης}}$$

όπου G =μόνιμα, Q =κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα)

Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Συγκεκριμένα ελέγχονται οι συνδυασμοί:

$$1,35 G + 1,35 Q$$

όπου G=μόνιμα, Q=κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα)

Σεισμικοί συνδυασμοί

Συγκεκριμένα ελέγχονται οι συνδυασμοί:

$$1,00G + 0,5Q +/- E_x +/- 0,30E_y +/- 0,30E_z$$

$$1,00G + 0,5Q +/- E_y +/- 0,30E_x +/- 0,30E_z$$

$$1,00G + 0,5Q +/- 0,70E_z +/- 0,30E_y +/- 0,30E_x$$

Όπου G=μόνιμα, Q=κινητά όπου G=μόνιμα, Q=κινητά (ομοιόμορφα & συγκεντρωμένα) και E=σεισμός

Παρακάτω (πίνακας 3.1) παρατίθενται τα δεδομένα των φορτίσεων όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SOFISTIK.

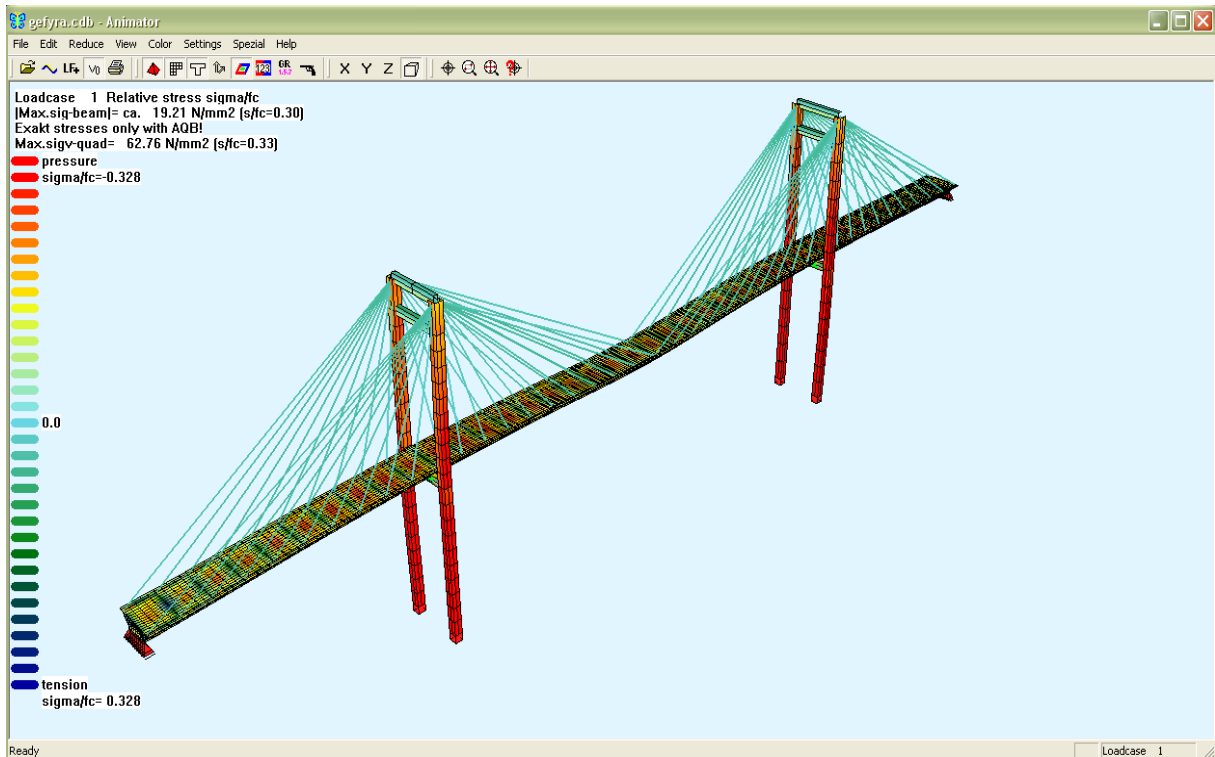
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

LOADCASE 1	LOADCASE 2
HEAD Ίδιο βάρος & λοιπά μόνιμα LC 1 DLZ 1.0 ELLO 1 6966 35 PZ .2*25 ELLO 2 6967 35 PZ .2*25 ELLO 3 6968 35 PZ .08*22 ELLO 4 6969 35 PZ .08*22 ELLO 5 6970 35 PZ .08*22 ELLO 6 6971 35 PZ .08*22 ELLO 7 6972 35 PZ .08*22 ELLO 8 6973 35 PZ .08*22 ELLO 9 6974 35 PZ .08*22 ELLO 10 6975 35 PZ .08*22 ELLO 11 6976 35 PZ .08*22 ELLO 12 6977 35 PZ .08*22 ELLO 13 6978 35 PZ .08*22 ELLO 14 6979 35 PZ .08*22 ELLO 15 6980 35 PZ .08*22 ELLO 16 6981 35 PZ .2*25 ELLO 17 6982 35 PZ .2*25 END	HEAD Ομοιόμορφα κυκλοφορίας LC 2 ELLO 1 6966 35 PZ 5 ELLO 2 6967 35 PZ 5 ELLO 3 6968 35 PZ 9 ELLO 4 6969 35 PZ 9 ELLO 5 6970 35 PZ 9 ELLO 6 6971 35 PZ 2.5 ELLO 7 6972 35 PZ 2.5 ELLO 8 6973 35 PZ 2.5 ELLO 9 6974 35 PZ 2.5 ELLO 10 6975 35 PZ 2.5 ELLO 11 6976 35 PZ 2.5 ELLO 12 6977 35 PZ 2.5 ELLO 13 6978 35 PZ 2.5 ELLO 14 6979 35 PZ 2.5 ELLO 15 6980 35 PZ 2.5 ELLO 16 6981 35 PZ 5 ELLO 17 6982 35 PZ 5 END
LOADCASE 3	LOADCASE 4
HEAD Συγκεντρωμένα – Μέσο κεντρικού ανοίγματος LC 3 nl 3504 pz 150 nl 3506 pz 150 nl 3539 pz 150 nl 3541 pz 150 nl 3507 pz 100 nl 3509 pz 100 nl 3542 pz 100 nl 3544 pz 100 nl 3511 pz 50 nl 3513 pz 50 nl 3546 pz 50 nl 3548 pz 50 END	HEAD Συγκεντρωμένα στο άκρο LC 4 nl 4 pz 150 nl 6 pz 150 nl 39 pz 150 nl 41 pz 150 nl 7 pz 100 nl 9 pz 100 nl 42 pz 100 nl 44 pz 100 nl 11 pz 50 nl 13 pz 50 nl 46 pz 50 nl 48 pz 50 END
LOADCASE 5	LOADCASE 6
HEAD Συγκεντρωμένα – Μέσο ακραίου ανοίγμ. LC 5 nl 879 pz 150 nl 881 pz 150 nl 914 pz 150 nl 916 pz 150 nl 882 pz 100 nl 884 pz 100 nl 917 pz 100 nl 919 pz 100 nl 886 pz 50 nl 888 pz 50 nl 921 pz 50 nl 923 pz 50 END	HEAD Συγκεντρωμένα στον πωλώνα LC 6 nl 1754 pz 150 nl 1756 pz 150 nl 1789 pz 150 nl 1791 pz 150 nl 1757 pz 100 nl 1759 pz 100 nl 1792 pz 100 nl 1794 pz 100 nl 1761 pz 50 nl 1763 pz 50 nl 1796 pz 50 nl 1798 pz 50 END

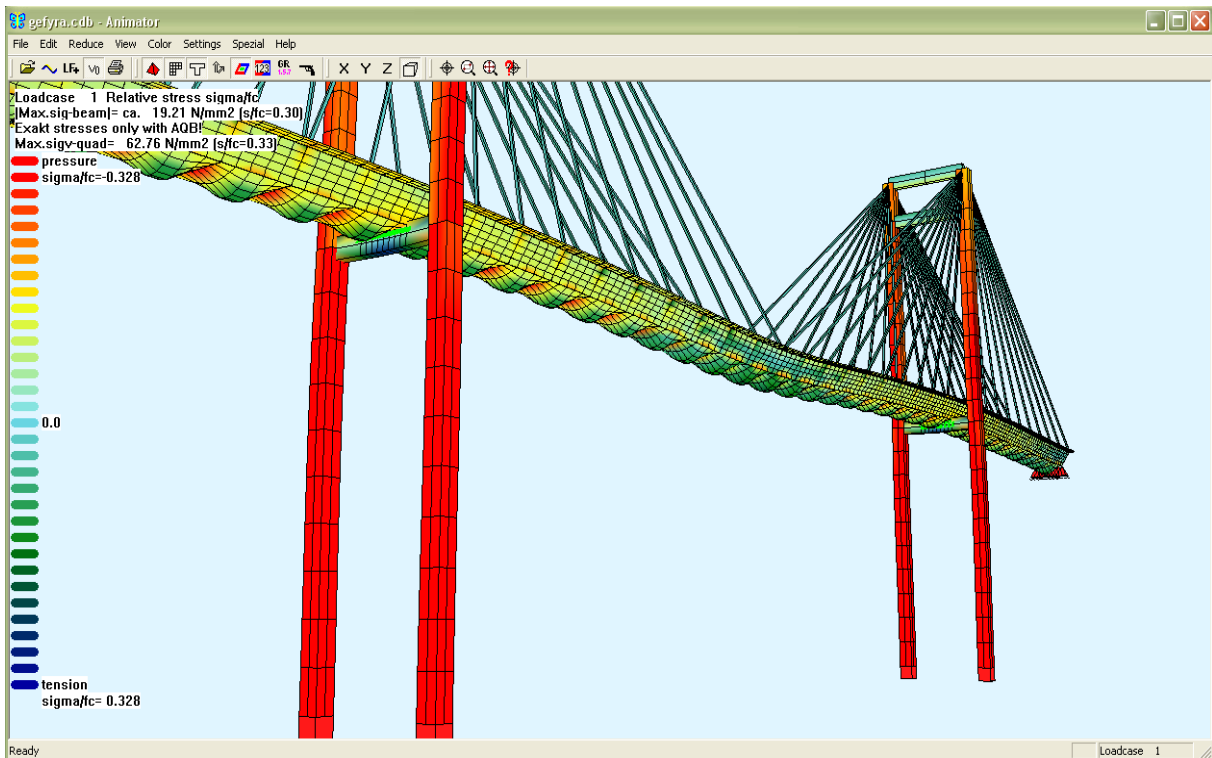
LOADCASE 7					LOADCASE 8						
HEAD Θερμοκρασιακή μεταβολή (+/- 35 C) LC 7					HEAD Θερμοκρασιακή διαφορά (+18 / -13 C) LC 8						
ELLO	1	7000	1	temp	35	ELLO	1	6966	35	temp	18
ELLO	2					ELLO	2	6967	35	temp	18
ELLO	3					ELLO	3	6968	35	temp	18
ELLO	4					ELLO	4	6969	35	temp	18
ELLO	5					ELLO	5	6970	35	temp	18
ELLO	6					ELLO	6	6971	35	temp	18
ELLO	7					ELLO	7	6972	35	temp	18
ELLO	8					ELLO	8	6973	35	temp	18
ELLO	9					ELLO	9	6974	35	temp	18
ELLO	10					ELLO	10	6975	35	temp	18
ELLO	11					ELLO	11	6976	35	temp	18
ELLO	12					ELLO	12	6977	35	temp	18
ELLO	13					ELLO	13	6978	35	temp	18
ELLO	14					ELLO	14	6979	35	temp	18
ELLO	15					ELLO	15	6980	35	temp	18
ELLO	16					ELLO	16	6981	35	temp	18
ELLO	17					ELLO	17	6982	35	temp	18
ELLO	18					ELLO	18	6983	35	temp	13
ELLO	19					ELLO	19	6984	35	temp	8
ELLO	20					ELLO	20	6985	35	temp	3
ELLO	21					ELLO	21	6986	35	temp	-2
ELLO	22					ELLO	22	6987	35	temp	-7
ELLO	23					ELLO	23	6988	35	temp	-13
ELLO	24					ELLO	24	6989	35	temp	-13
ELLO	25					ELLO	25	6990	35	temp	-13
ELLO	26					ELLO	26	6991	35	temp	-13
ELLO	27					ELLO	27	6992	35	temp	-13
ELLO	28					ELLO	28	6993	35	temp	-13
ELLO	29					ELLO	29	6994	35	temp	-13
ELLO	30					ELLO	30	6995	35	temp	-13
ELLO	31					ELLO	31	6996	35	temp	-7
ELLO	32					ELLO	32	6997	35	temp	-2
ELLO	33					ELLO	33	6998	35	temp	3
ELLO	34					ELLO	34	6999	35	temp	8
ELLO	35					ELLO	35	7000	35	temp	13
END					END						
LOADCASE 9					LOADCASE 10						
HEAD Χιόνι LC 9					HEAD Άνεμος LC 10						
ELLO	1	6966	35	pz	.8	ELLO	18	6983	35	PY	1.51
ELLO	2	6967	35	pz	.8	ELLO	19	6984	35	PY	1.51
ELLO	3	6968	35	pz	.8	ELLO	20	6985	35	PY	1.51
ELLO	4	6969	35	pz	.8	ELLO	21	6986	35	PY	1.51
ELLO	5	6970	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	6	6971	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	7	6972	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	8	6973	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	9	6974	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	10	6975	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	11	6976	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	12	6977	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	13	6978	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	14	6979	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	15	6980	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	16	6981	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
ELLO	17	6982	35	pz	.8	ELLO	22	6987	35	PY	1.51
END					END						
LOADCASE 11					LOADCASE 31						
HEAD Εκκίνηση - Τροχοπέδηση LC 11					HEAD Σεισμός X (e=0.432) LC 31 DLX 0.432						
ELLO	3	6968	35	px	0.75	ELLO	18	6983	35	PY	1.51
ELLO	4	6969	35	px	0.75	ELLO	19	6984	35	PY	1.51
ELLO	5	6970	35	px	0.75	ELLO	20	6985	35	PY	1.51
END					END						
LOADCASE 32					LOADCASE 33						
HEAD Σεισμός Y (e=0.432) LC 32 DLY 0.432					HEAD Σεισμός Z (e=0.432) LC 33 DLZ 0.432*0.7						
END					END						

3.2 Τάσεις

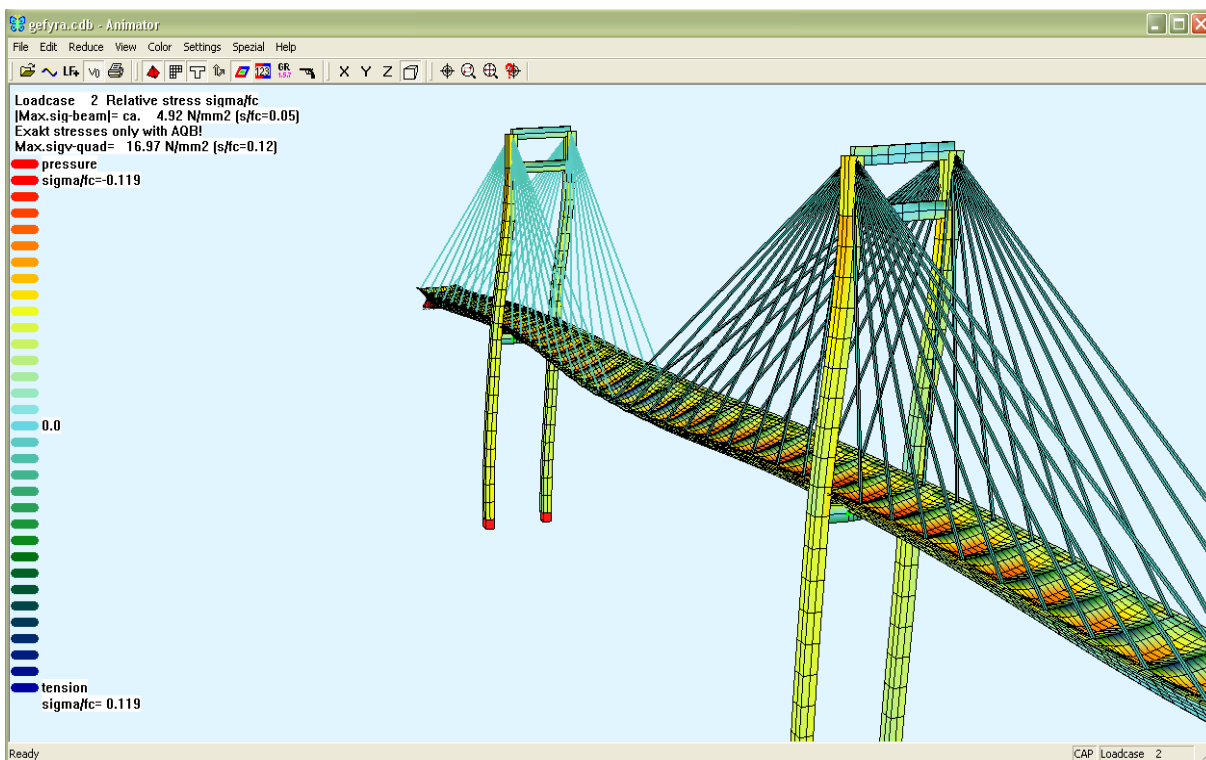
3.2.1 Τάσεις καλωδιωτής



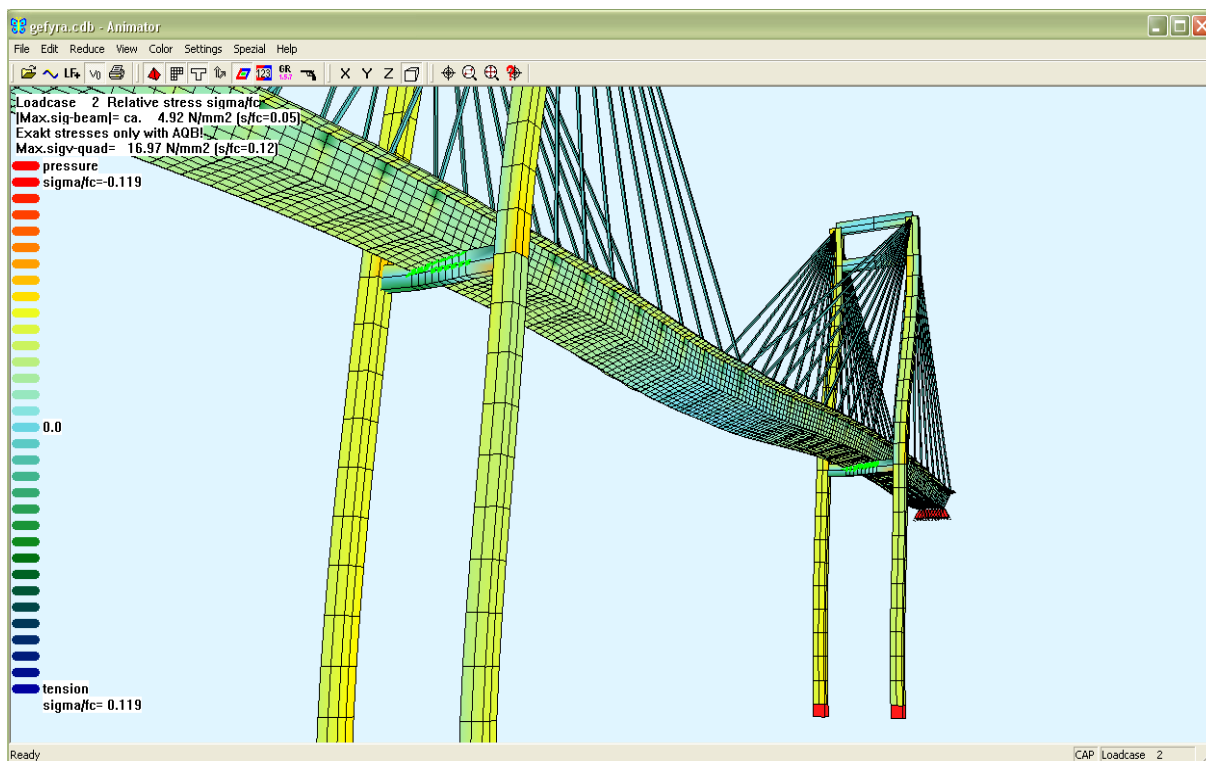
Σχήμα 3.5: LC1 τάσεις άνω



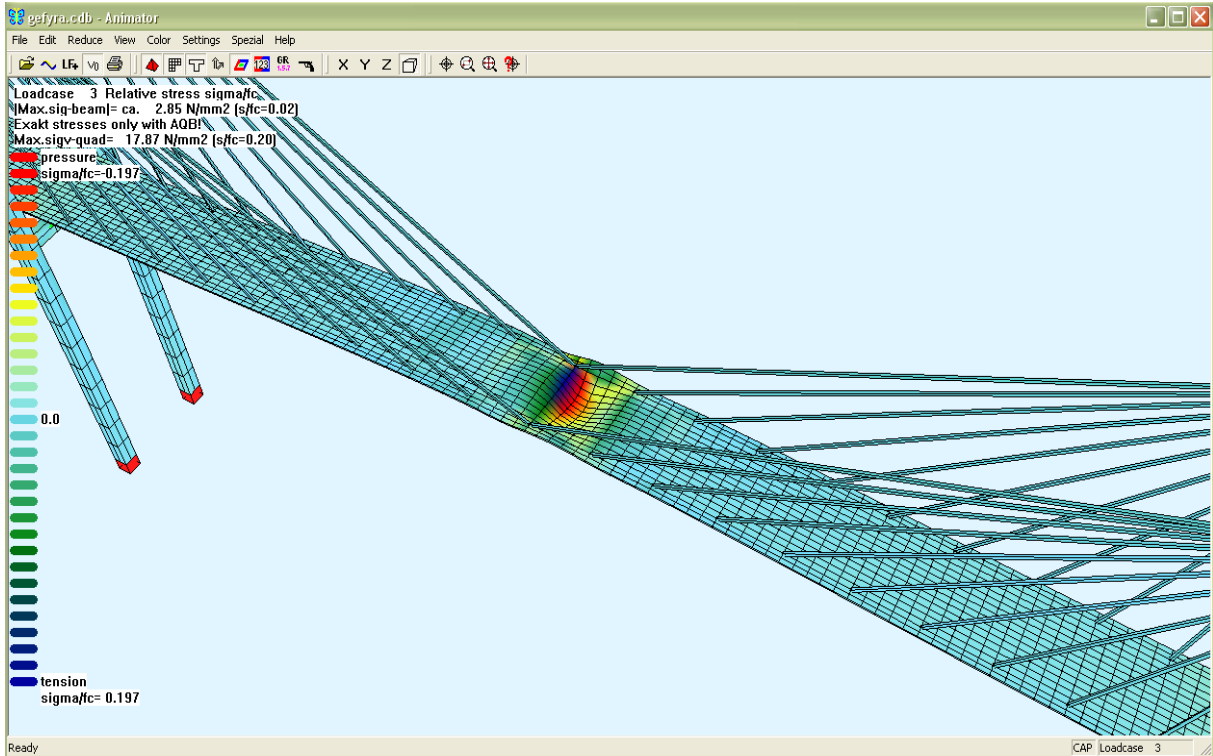
Σχήμα 3.6: LC1 τάσεις κατω



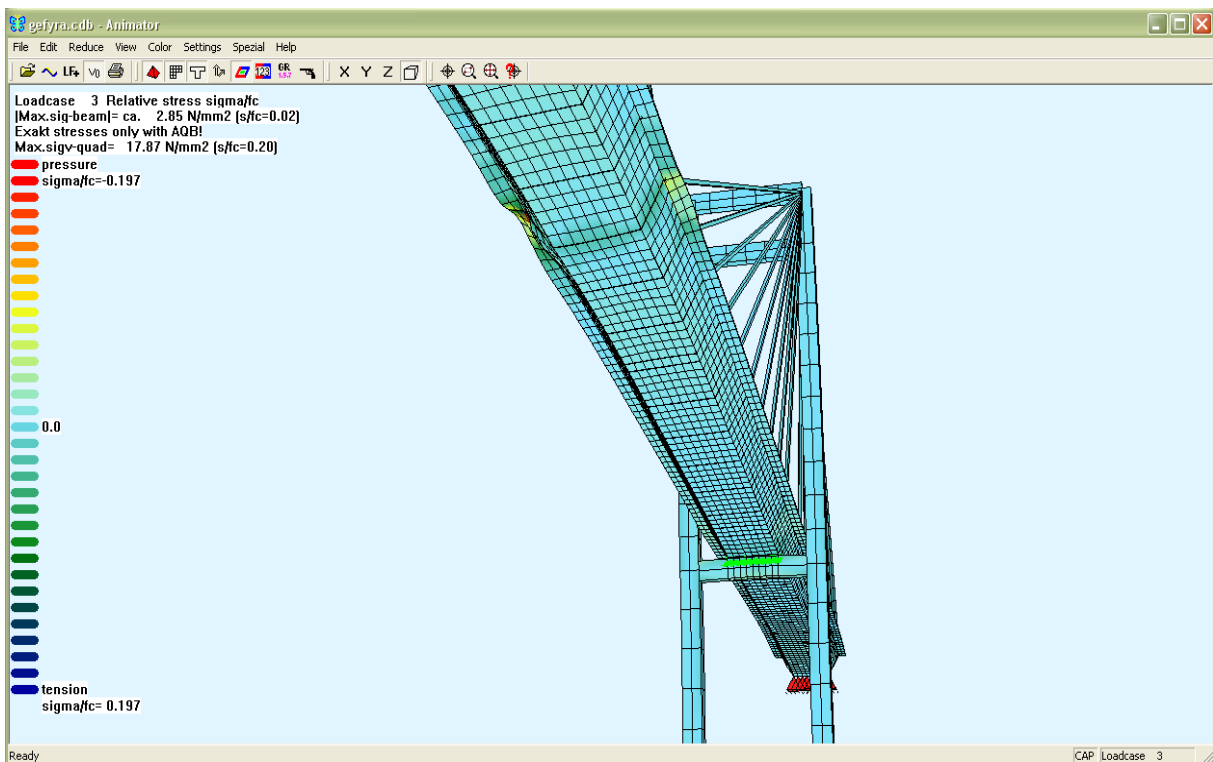
Σχήμα 3.7: LC2 τάσεις άνω



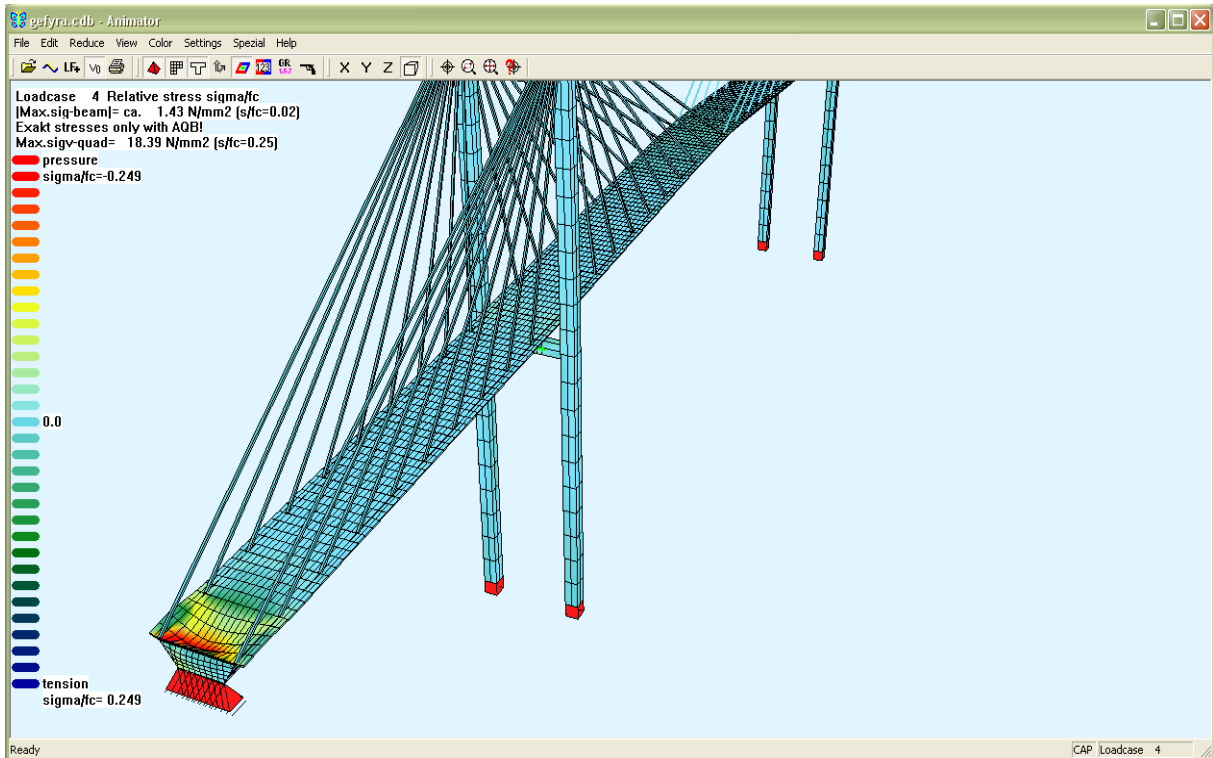
Σχήμα 3.8: LC2 τάσεις κάτω



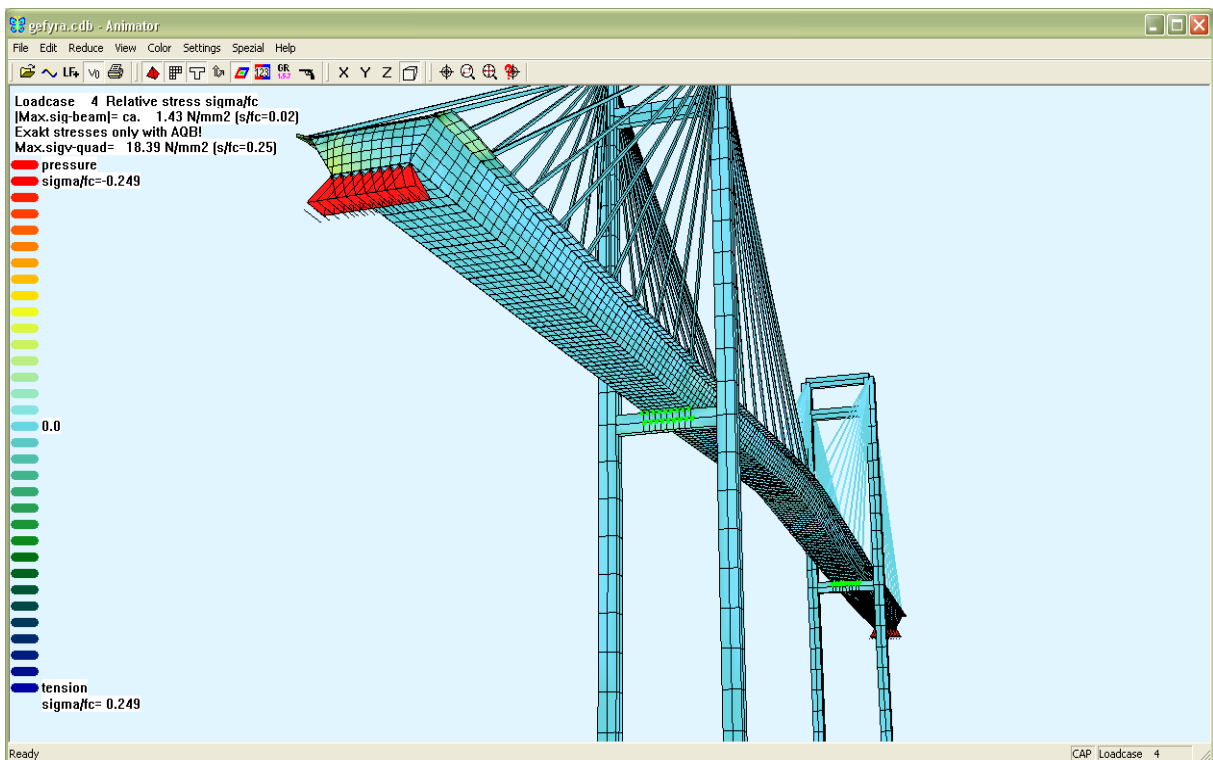
Σχήμα 3.9: LC 3 τάσεις άνω



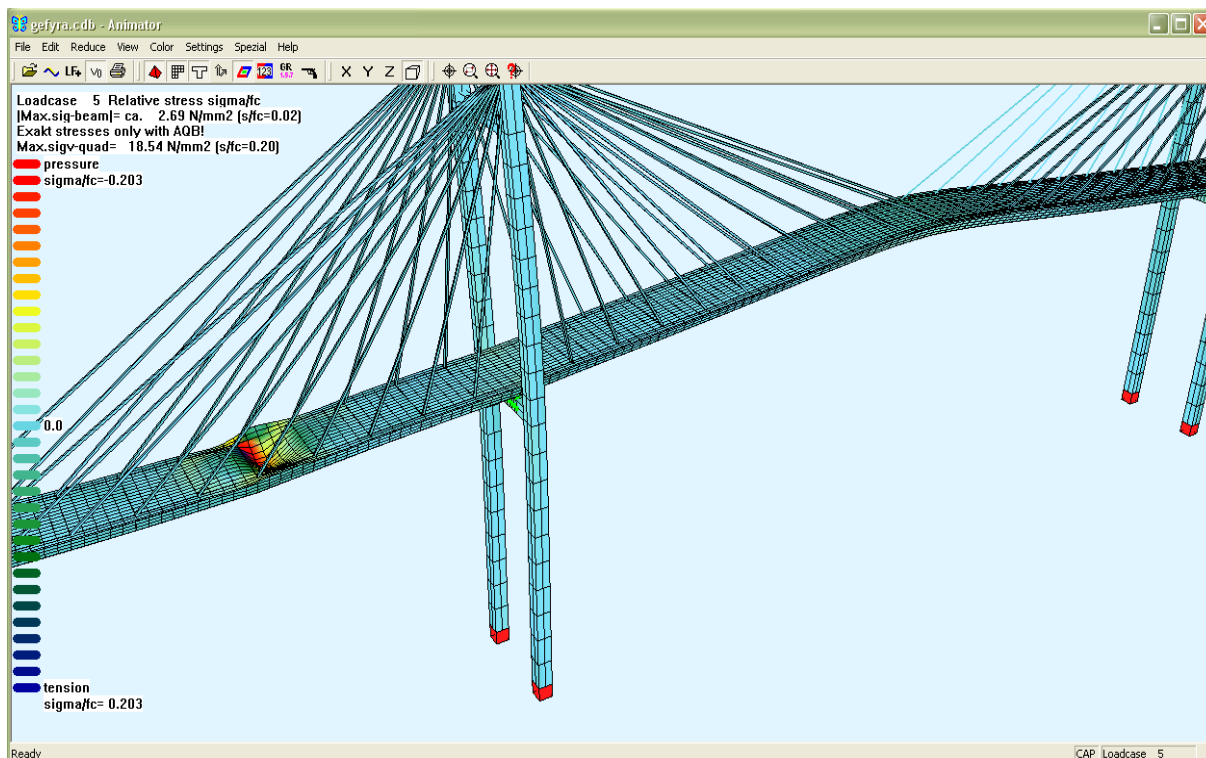
Σχήμα 3.10: LC 3 τάσεις κάτω



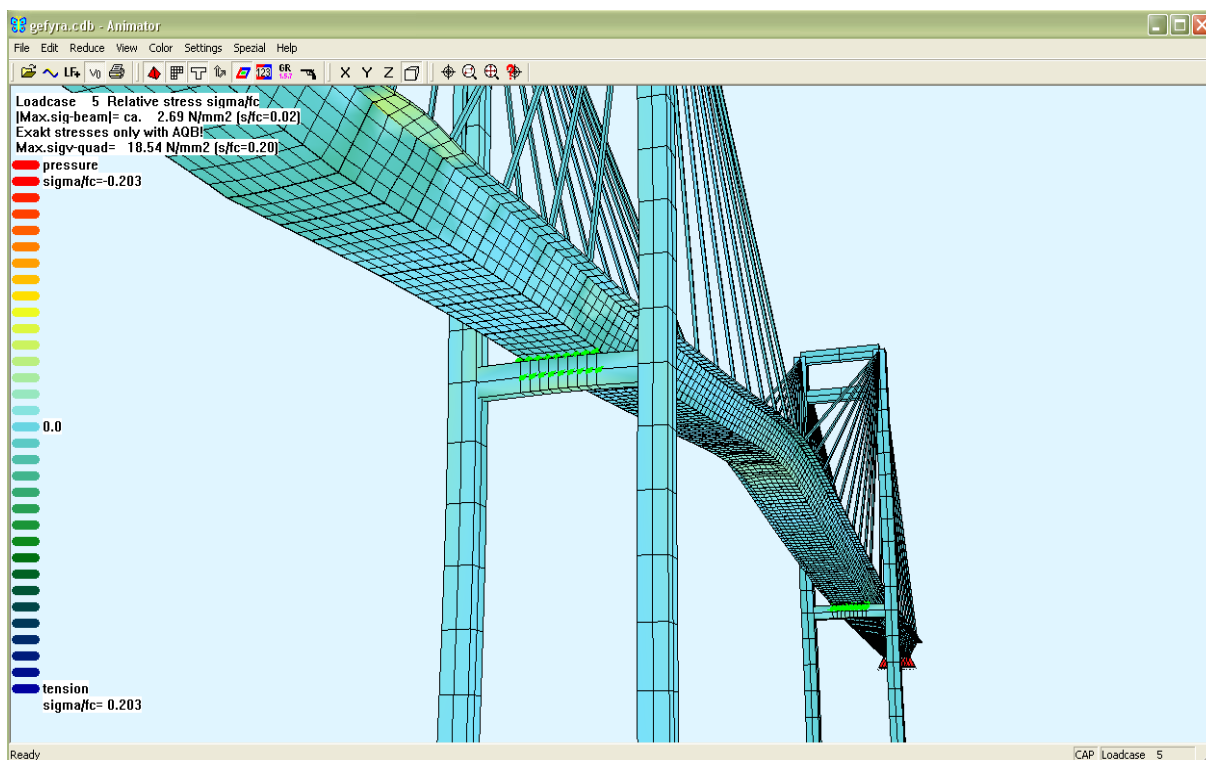
Σχήμα 3.11: LC 4 τάσεις άνω



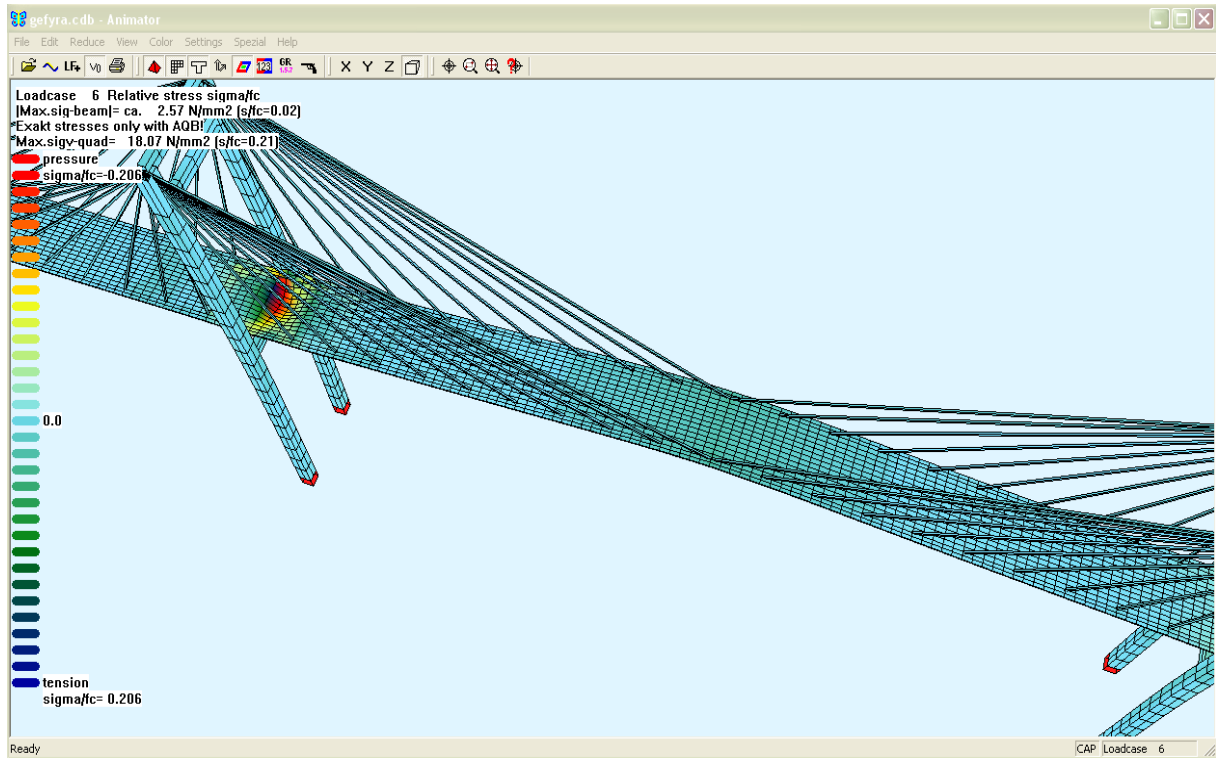
Σχήμα 3.12: LC 4 τάσεις κάτω



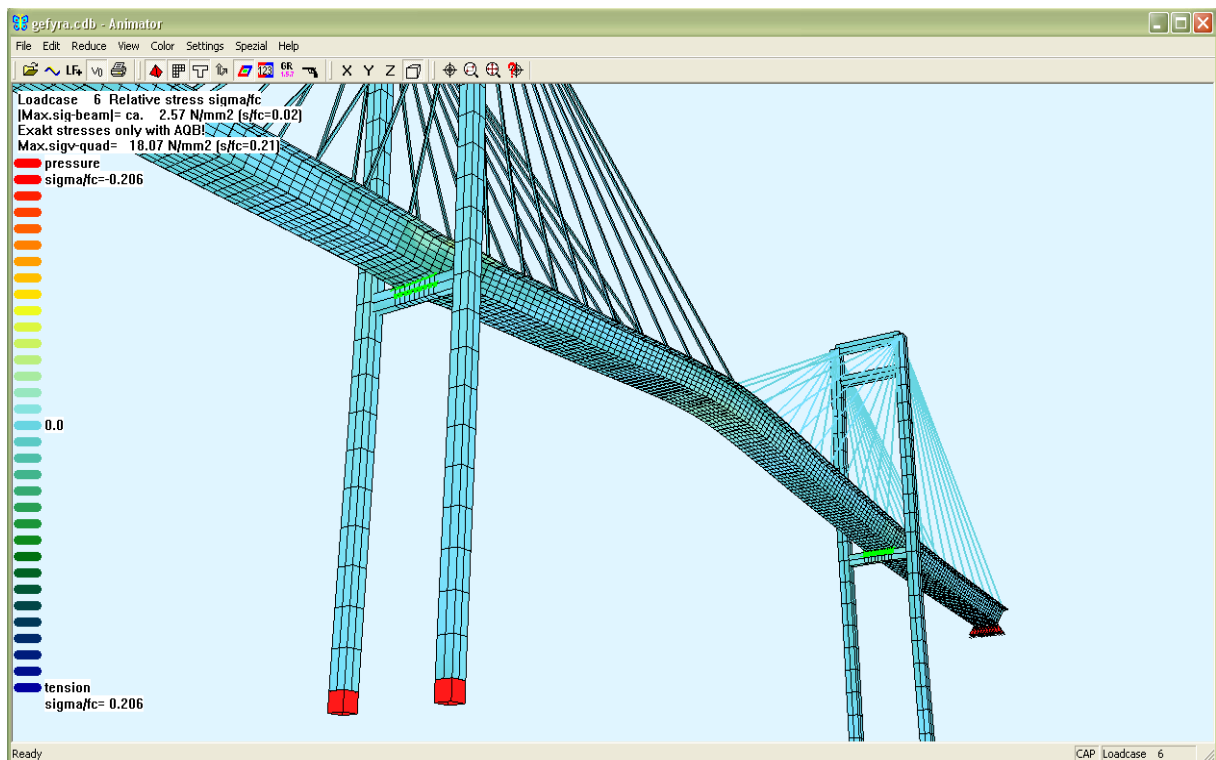
Σχήμα 3.13: LC 5 τάσεις άνω



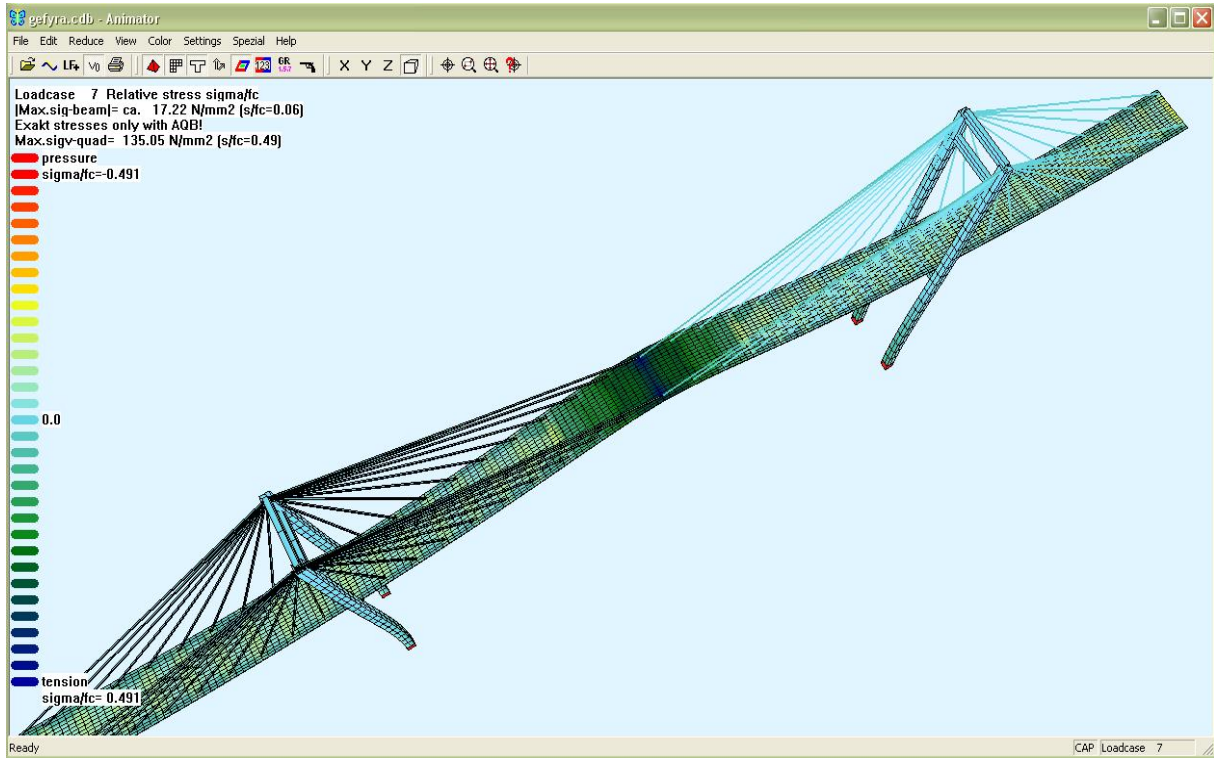
Σχήμα 3.14: LC 5 τάσεις κάτω



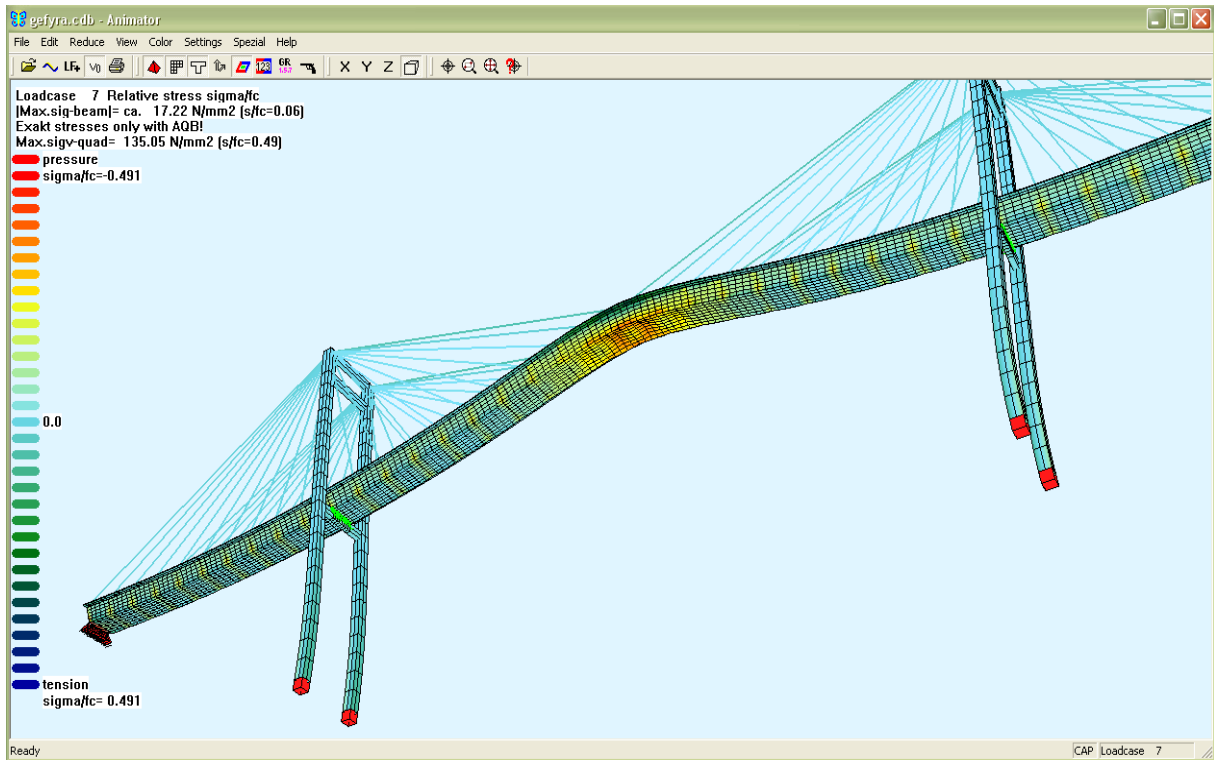
Σχήμα 3.15: LC 6 τάσεις άνω



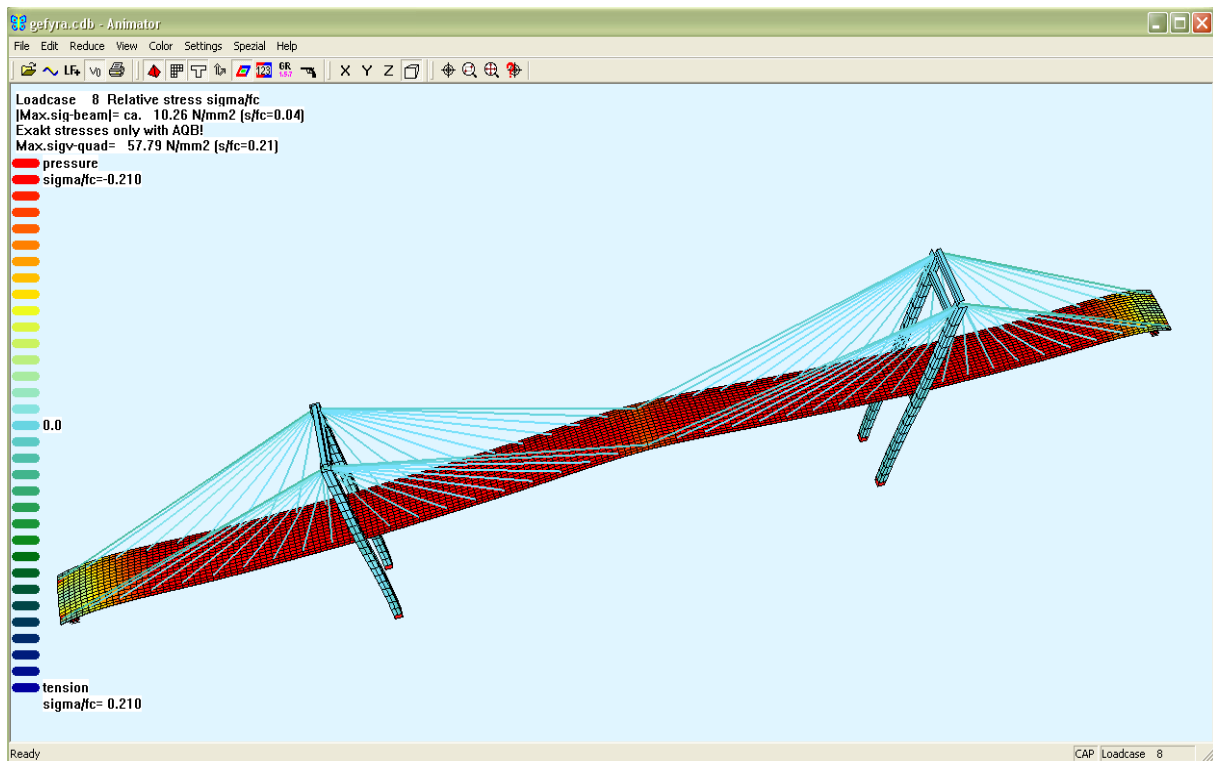
Σχήμα 3.16: LC 6 τάσεις κάτω



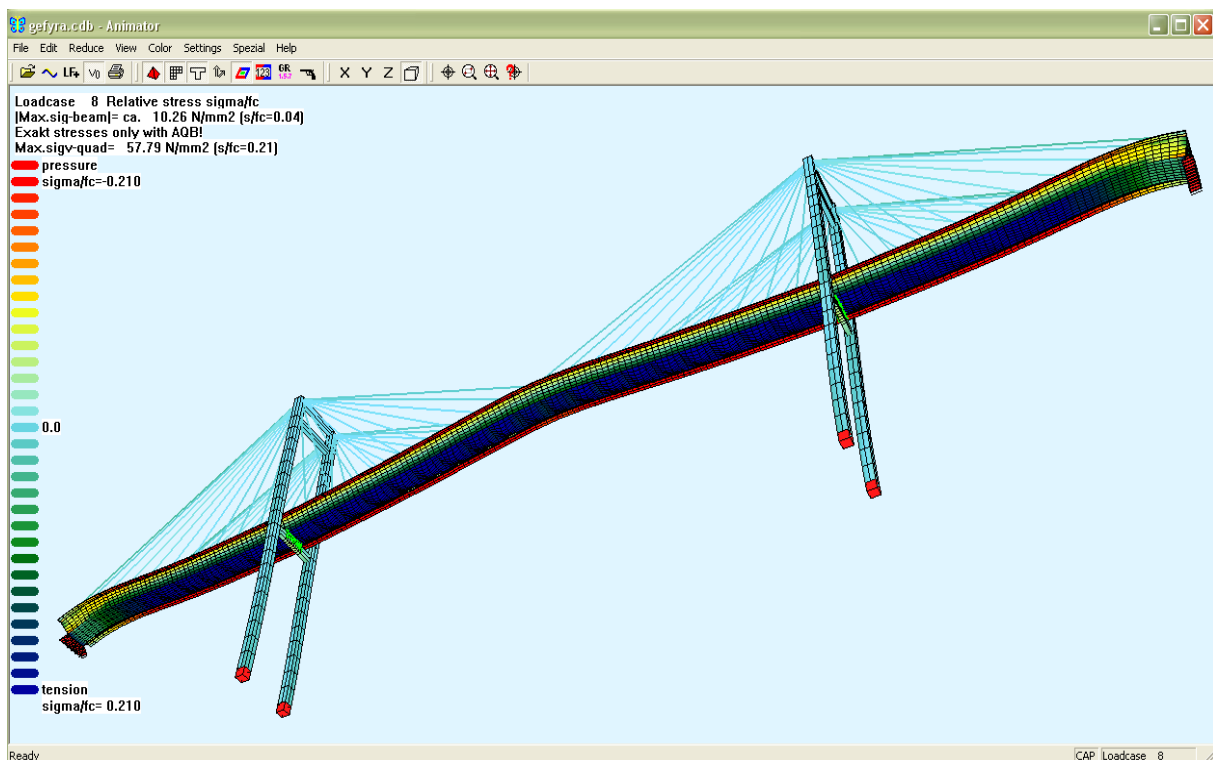
Σχήμα 3.17: LC 7 τάσεις άνω



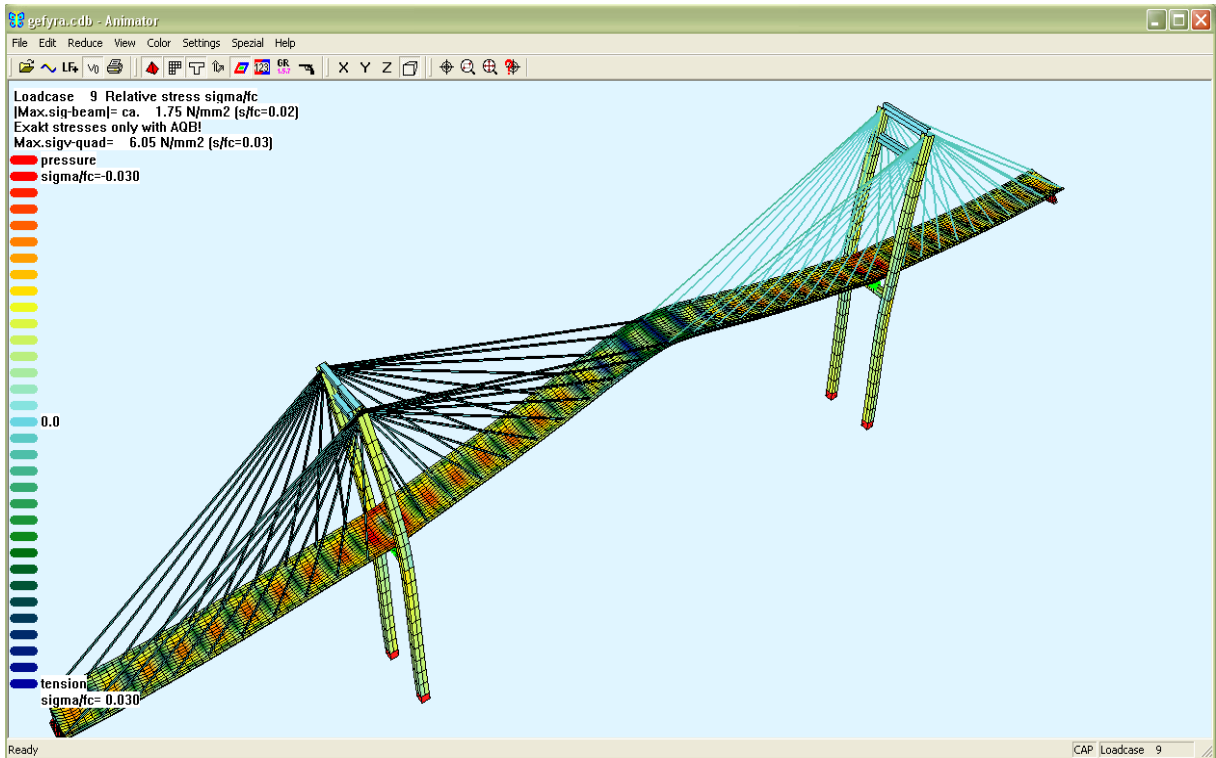
Σχήμα 3.18: LC 7 τάσεις κάτω



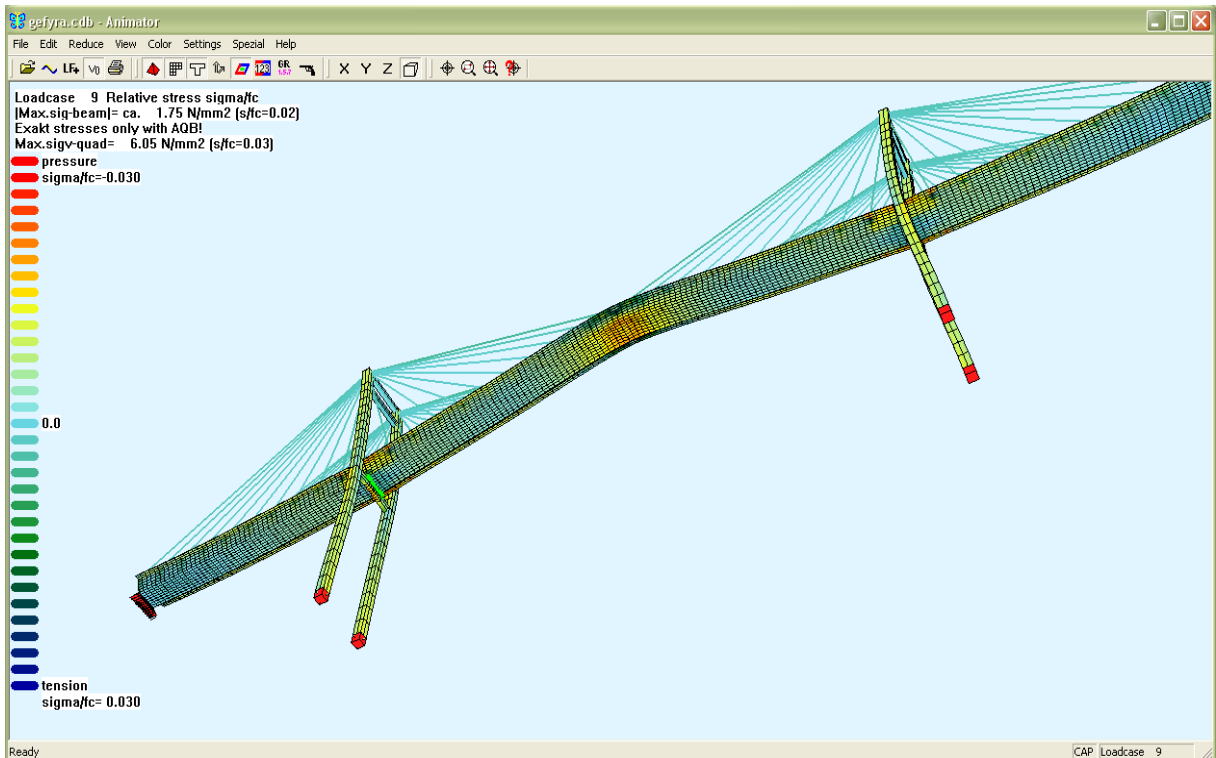
Σχήμα 3.19: LC 8 τάσεις άνω



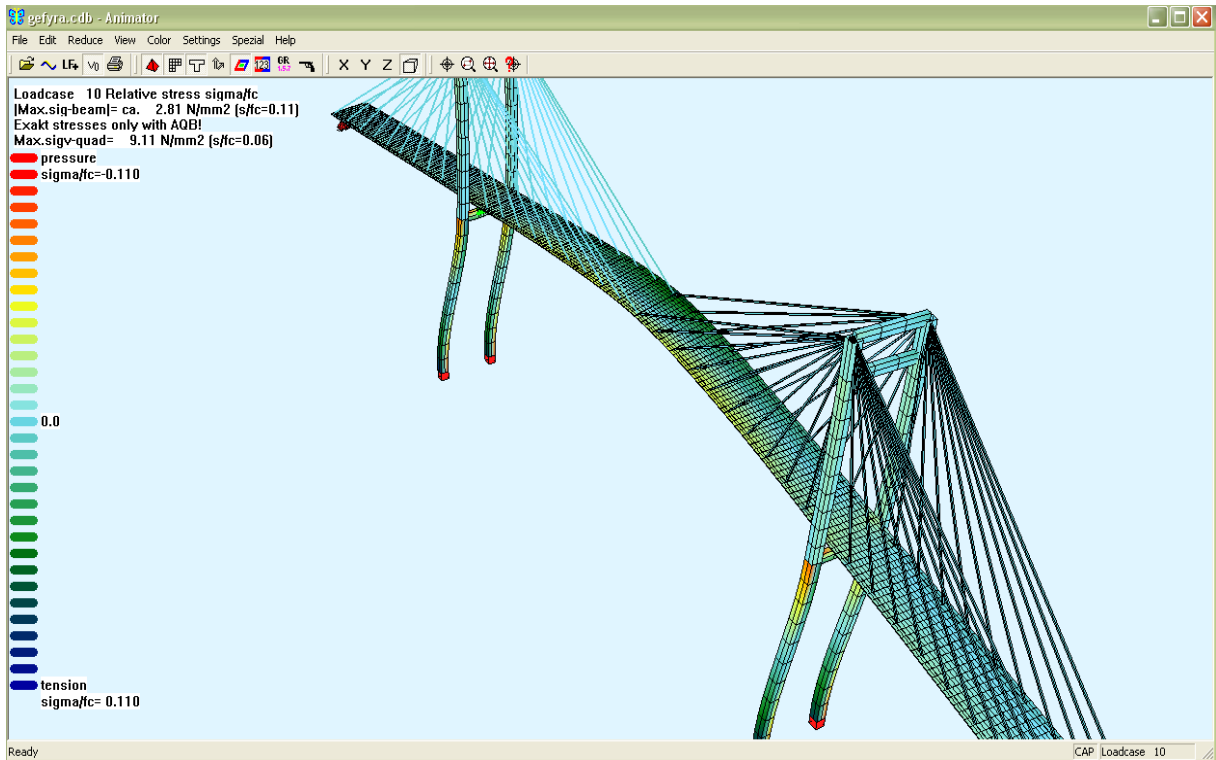
Σχήμα 3.20: LC 8 τάσεις κάτω



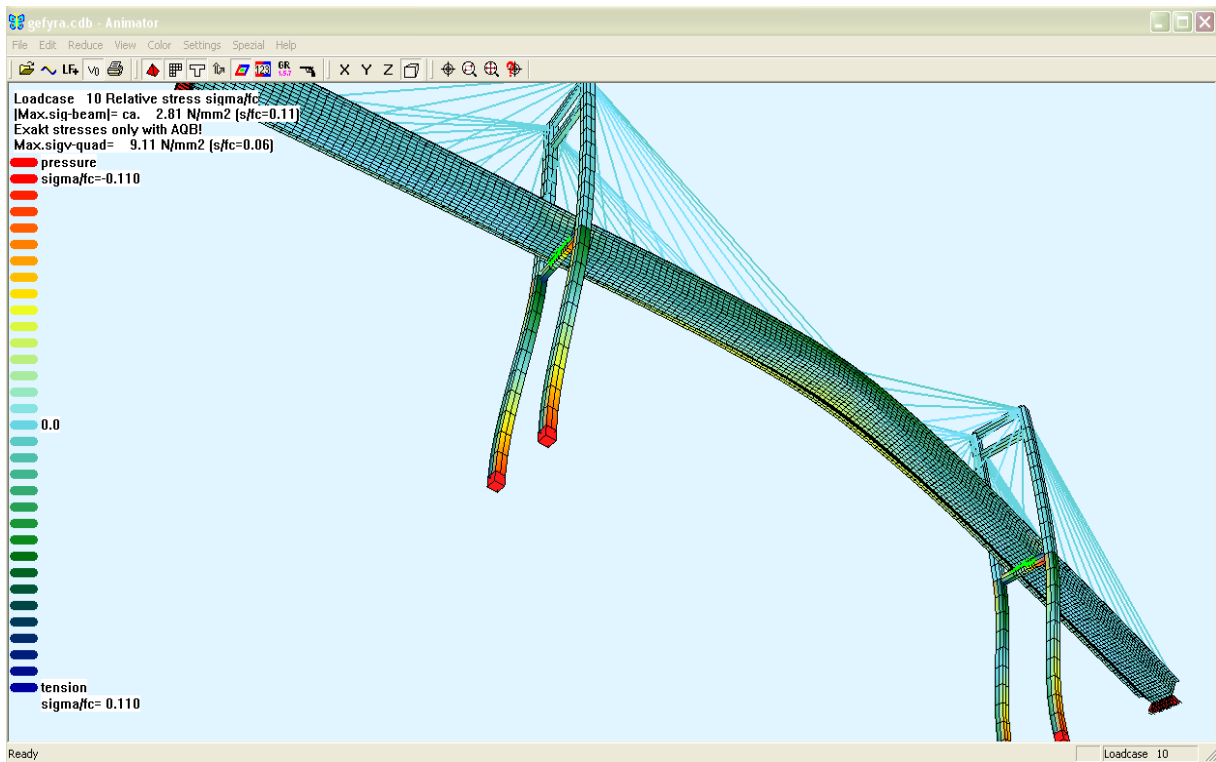
Σχήμα 3.21: LC 9 τάσεις άνω



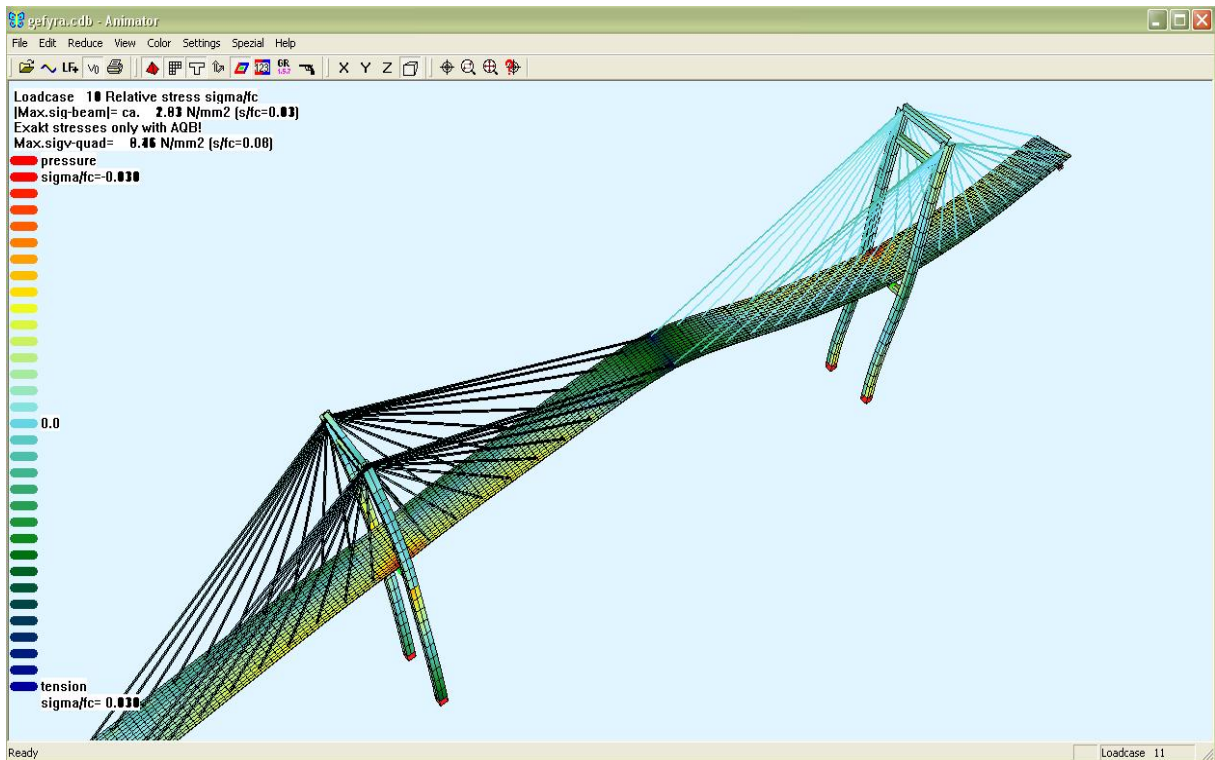
Σχήμα 3.22: LC 9 τάσεις κάτω



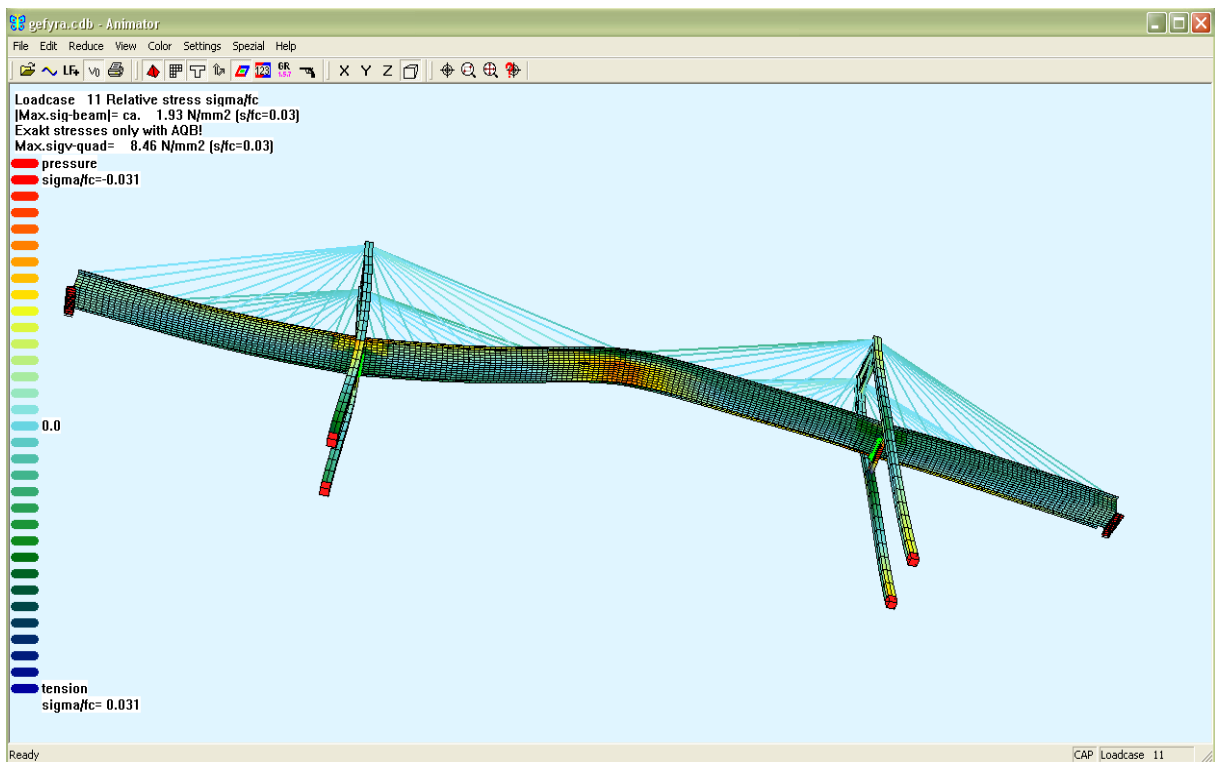
Σχήμα 3.23: LC 10 τάσεις άνω



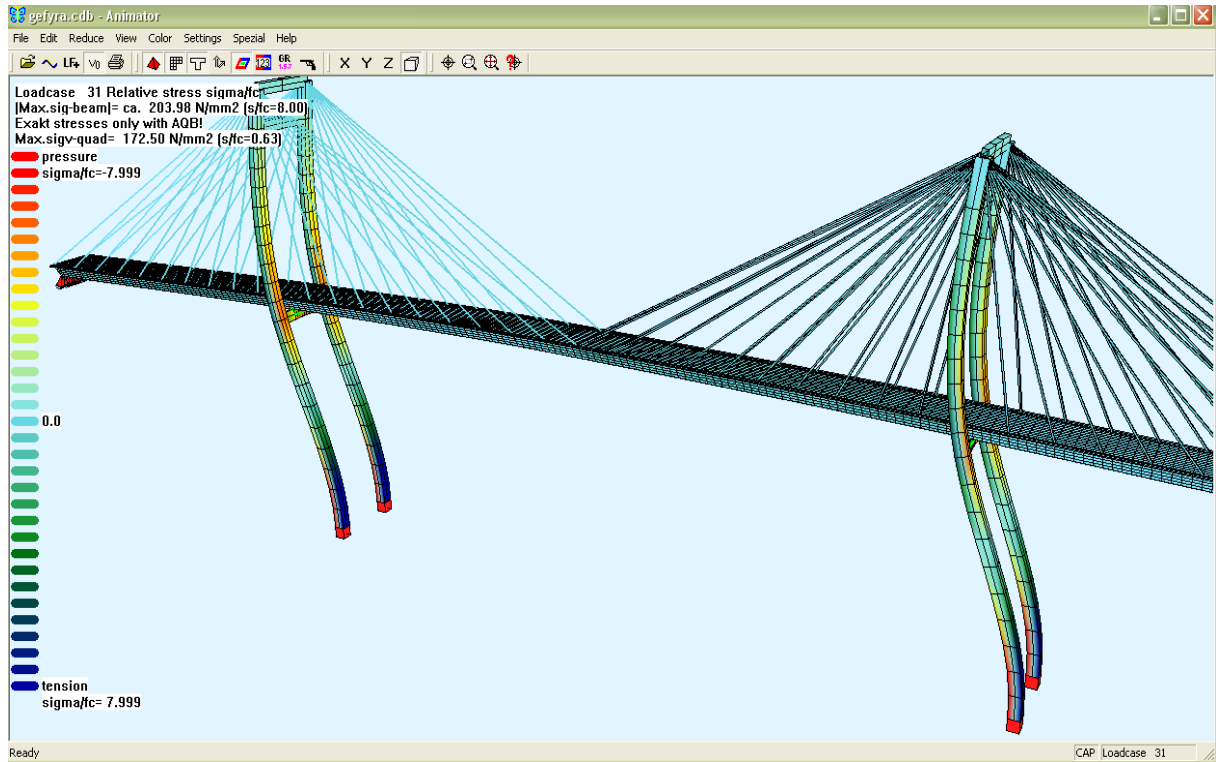
Σχήμα 3.24: LC 10 τάσεις κάτω



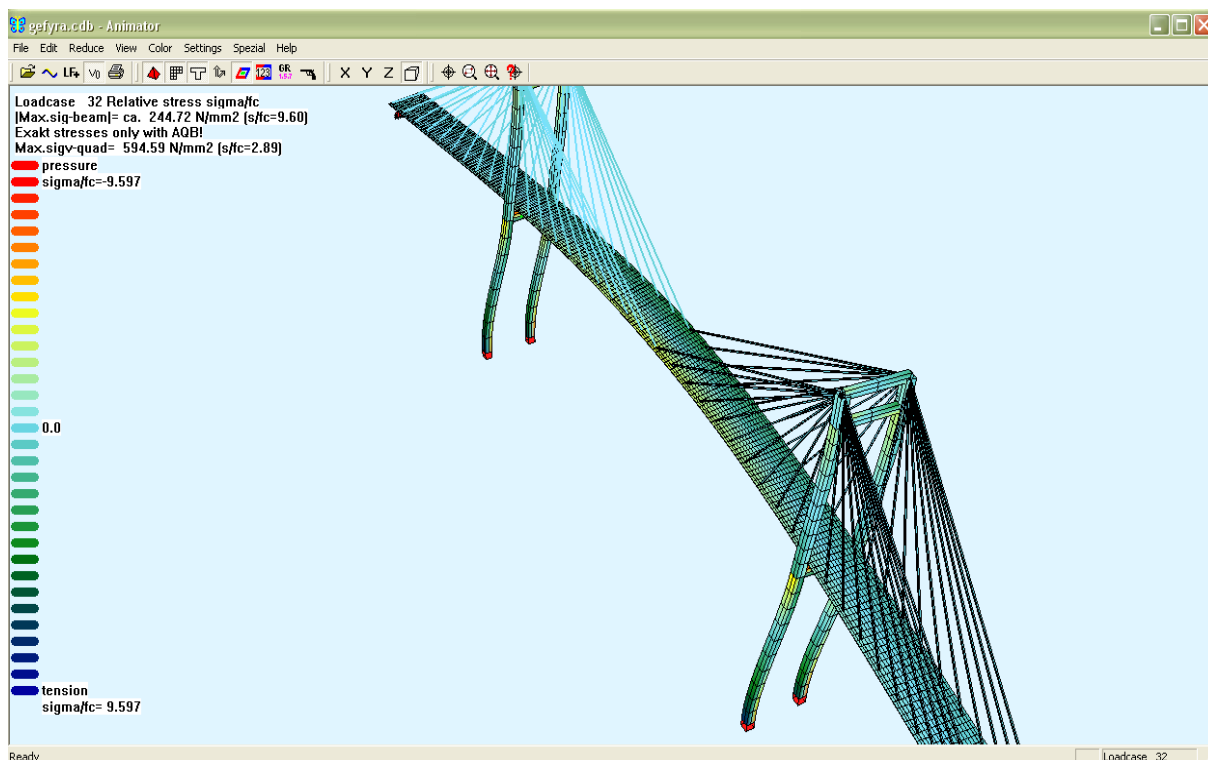
Σχήμα 3.25: LC 11 τάσεις άνω



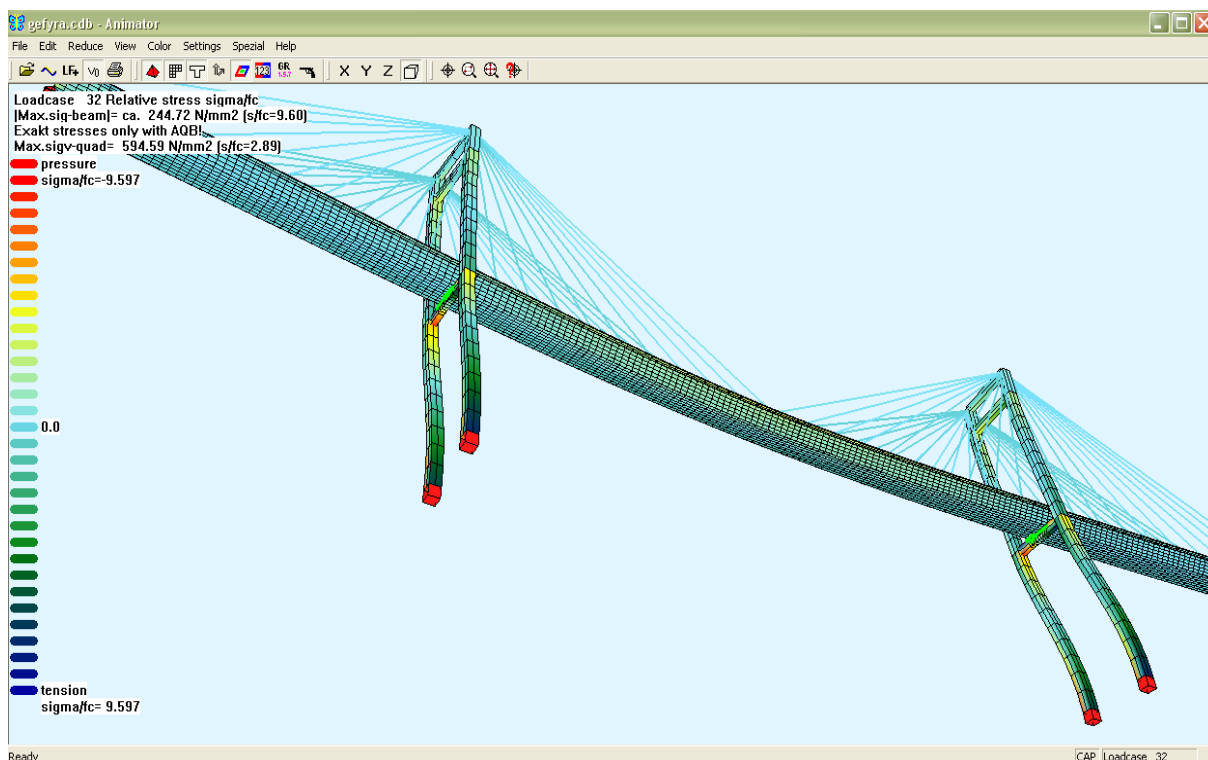
Σχήμα 3.26: LC 11 τάσεις κάτω



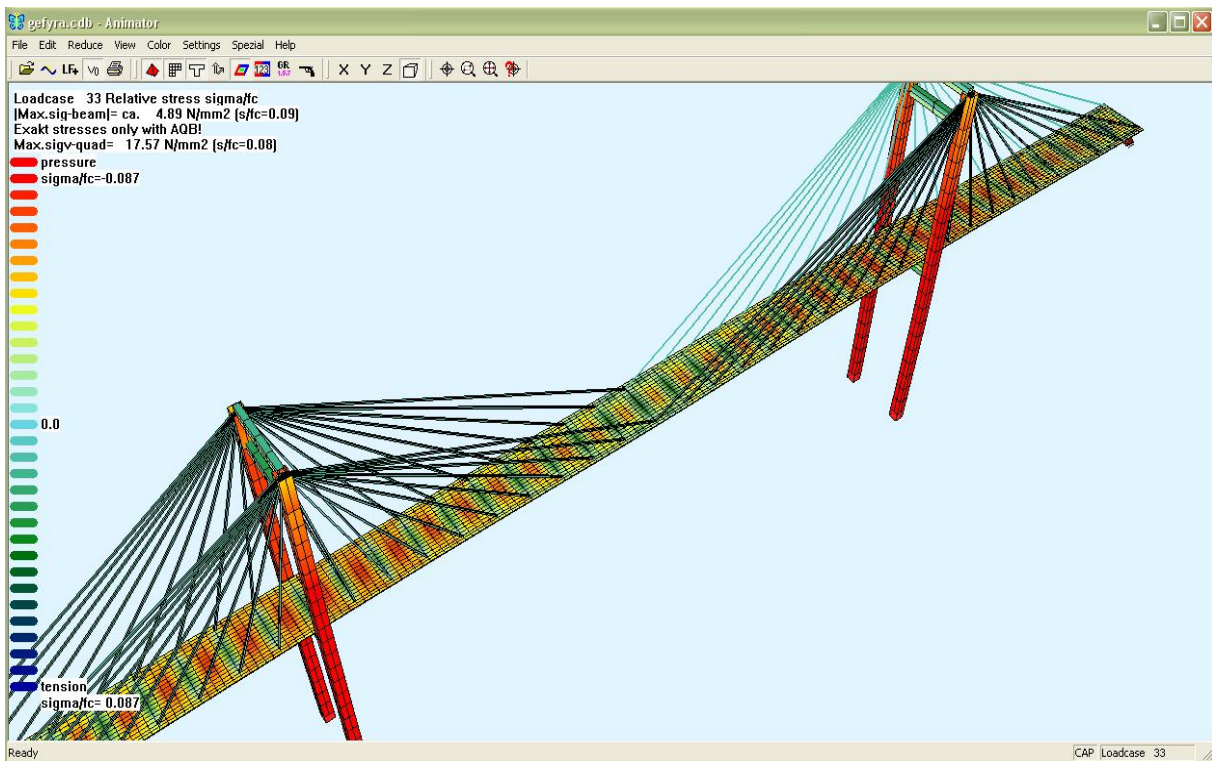
Σχήμα 3.27: LC 31 τάσεις άνω



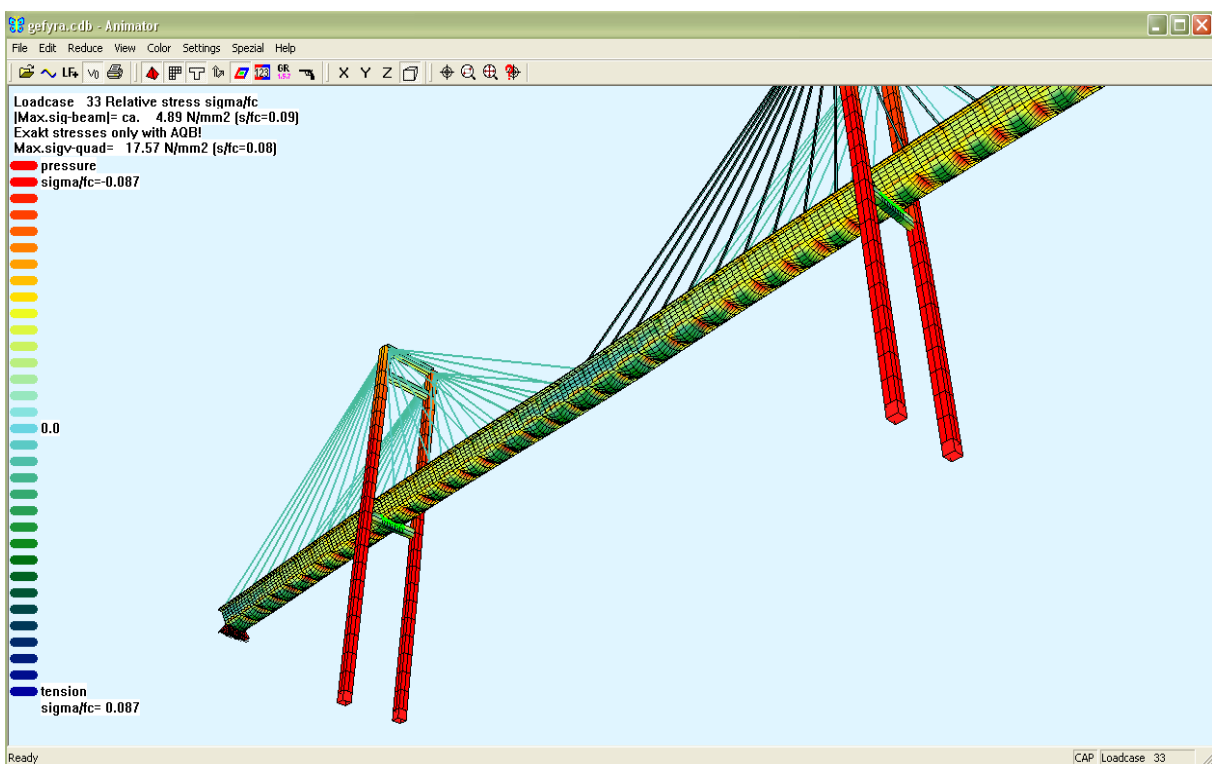
Σχήμα 3.28: LC 32 τάσεις άνω



Σχήμα 3.29: LC 32 τάσεις κάτω

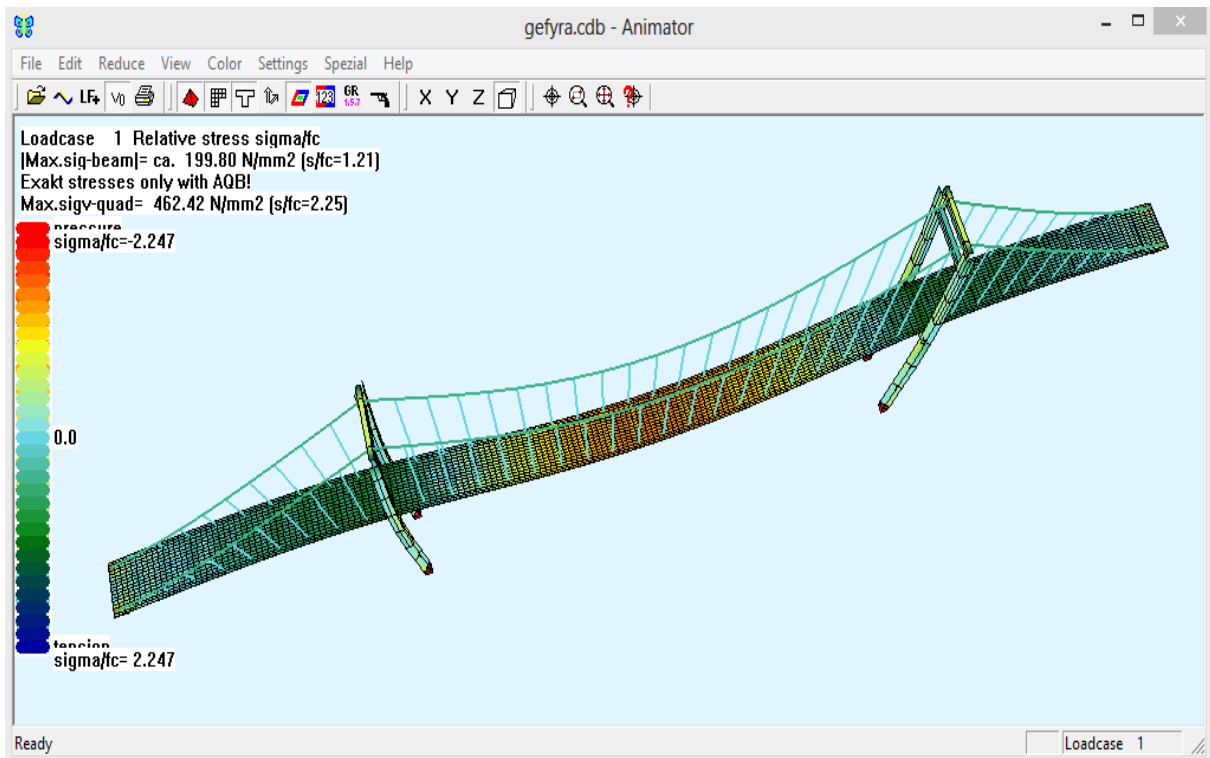


Σχήμα 3.30: LC 33 τάσεις άνω

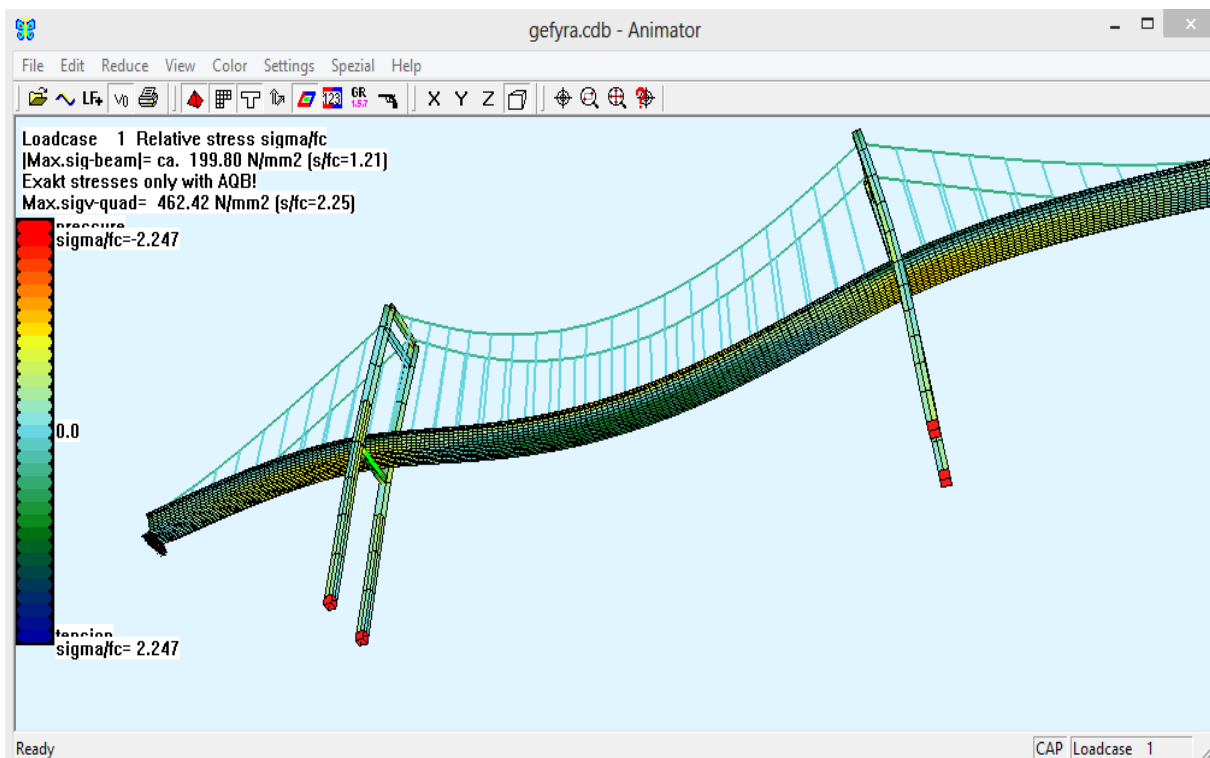


Σχήμα 3.31: LC 33 τάσεις κάτω

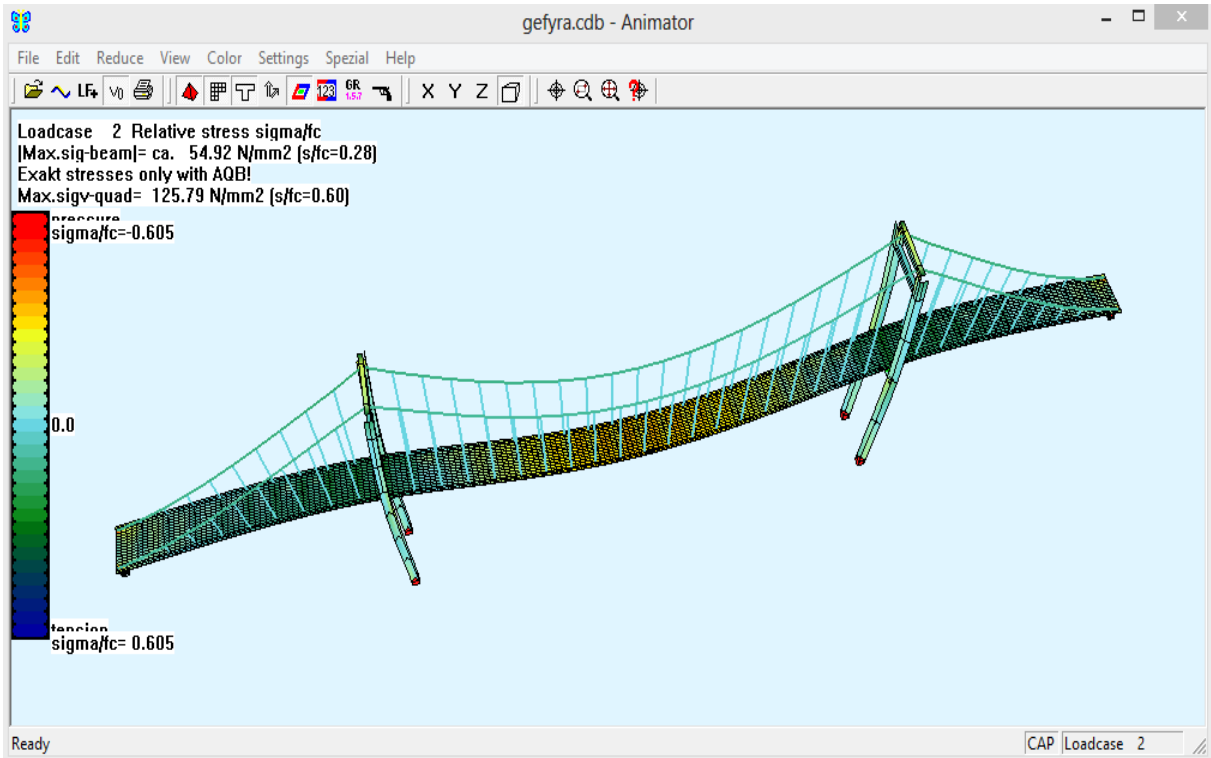
3.2.2 Τάσεις κρεμαστής



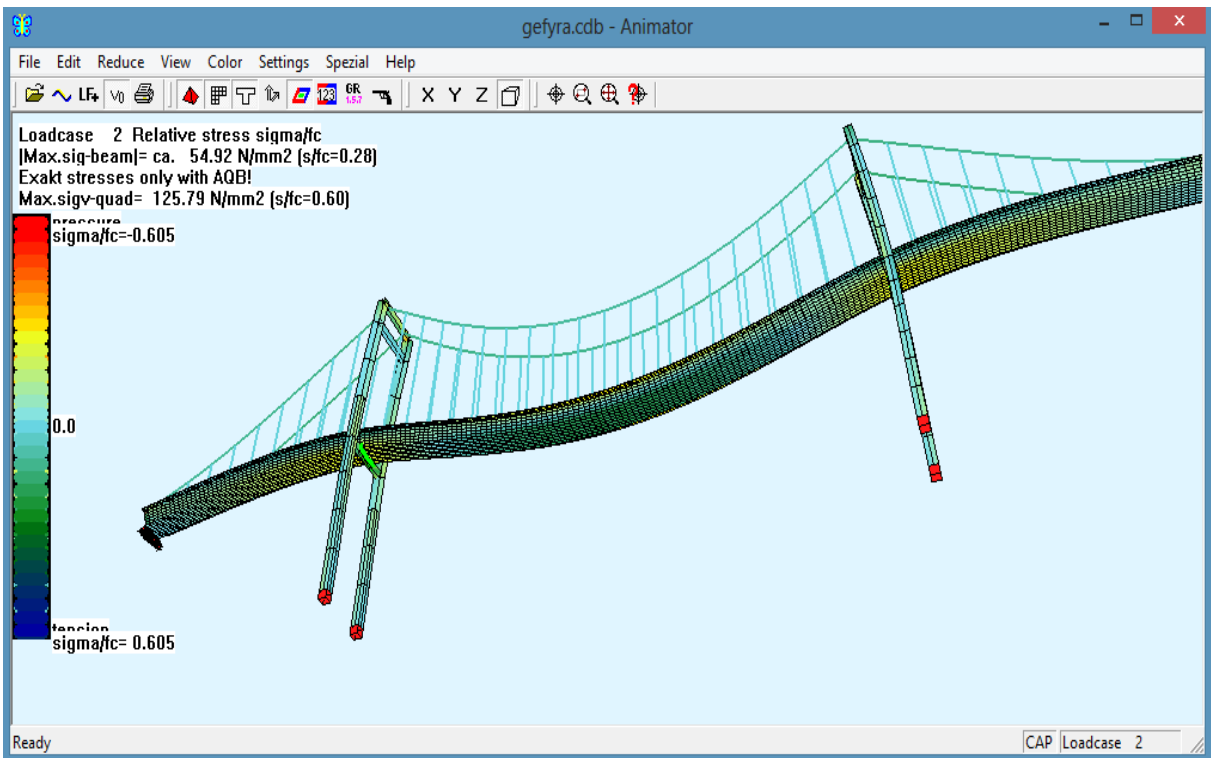
Σχήμα 3.32: LC 1 τάσεις άνω



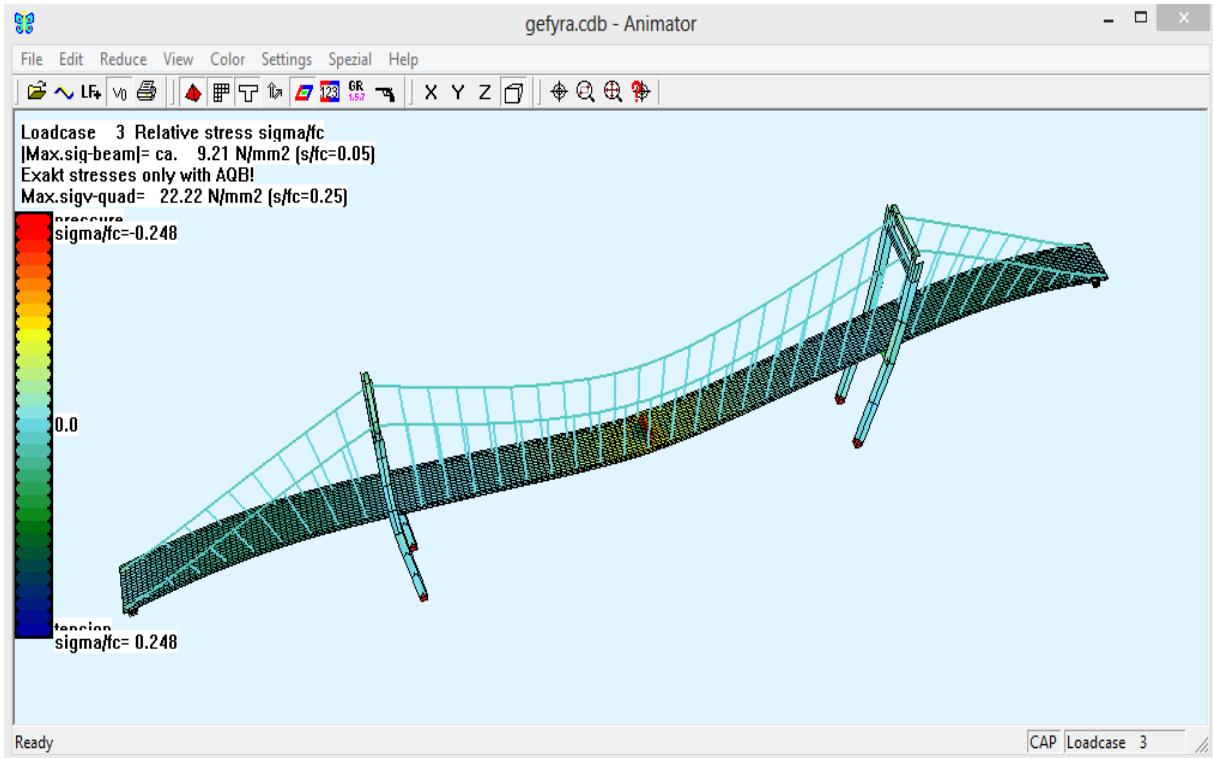
Σχήμα 3.33: LC 1 τάσεις κάτω



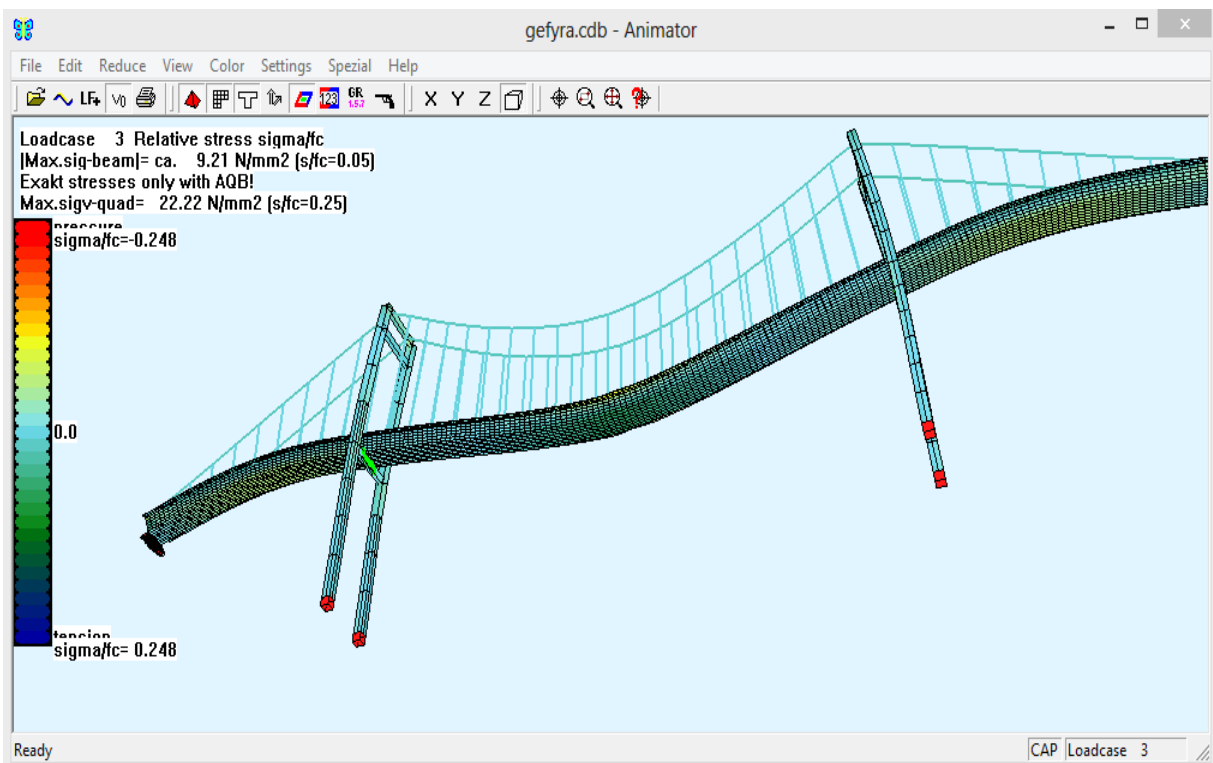
Σχήμα 3.34: LC 2 τάσεις άνω



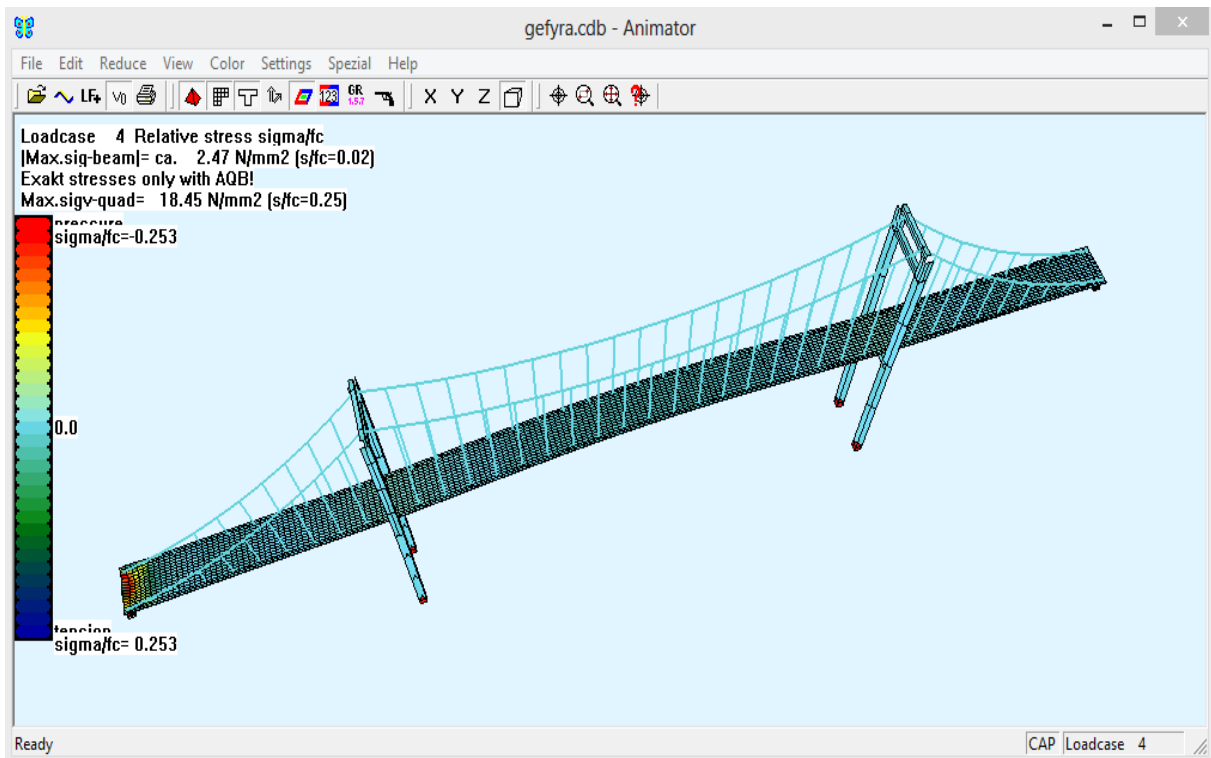
Σχήμα 3.35: LC 2 τάσεις κάτω



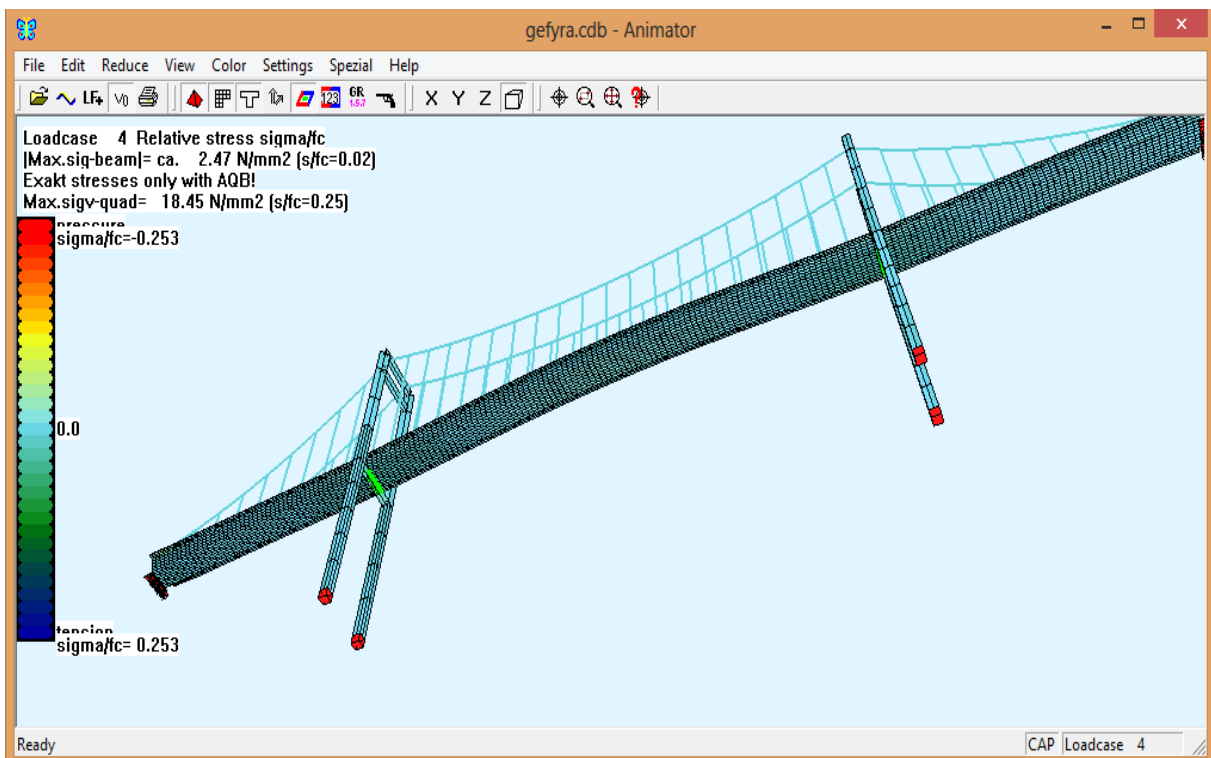
Σχήμα 3.36: LC 3 τάσεις άνω



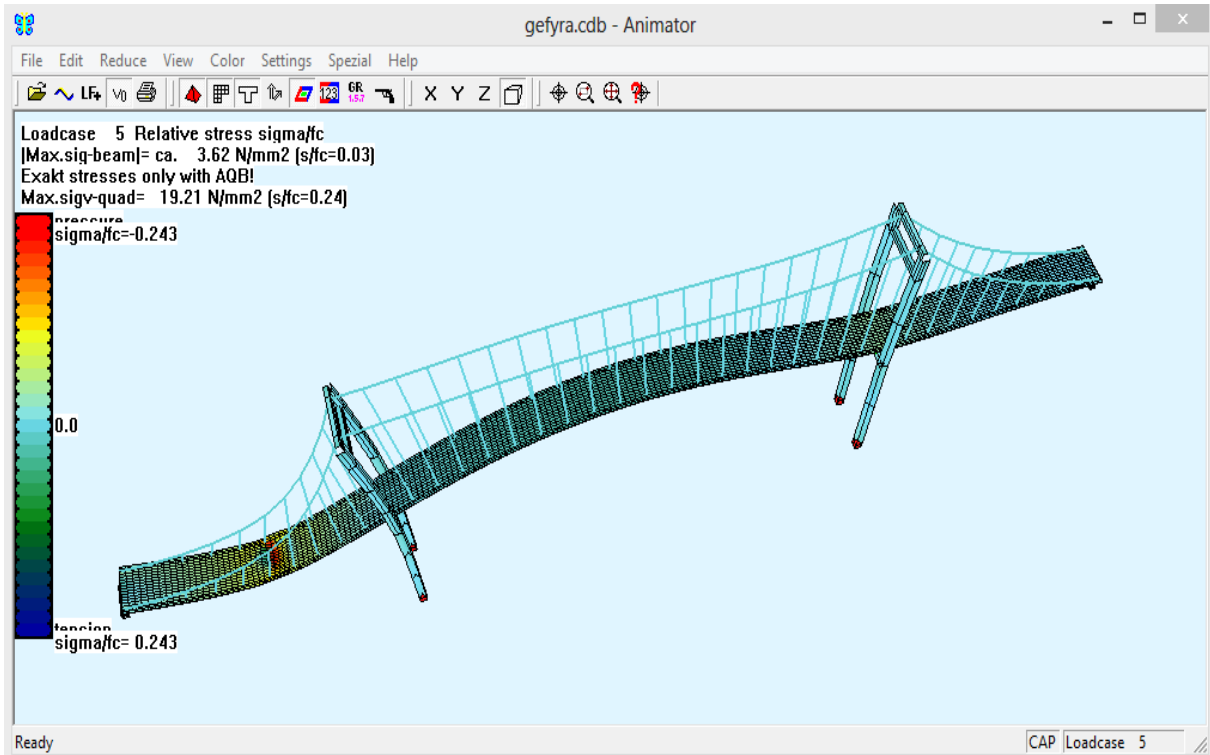
Σχήμα 3.37: LC 3 τάσεις κάτω



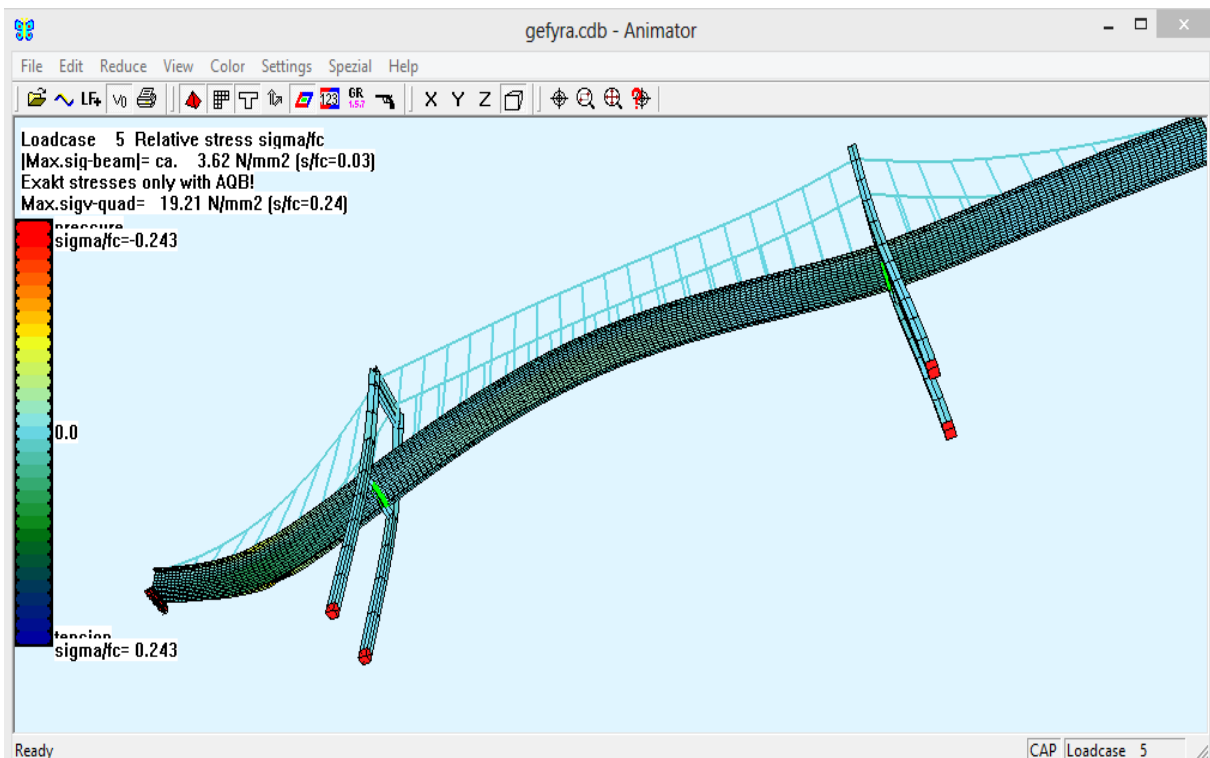
Σχήμα 3.38: LC 4 τάσεις άνω



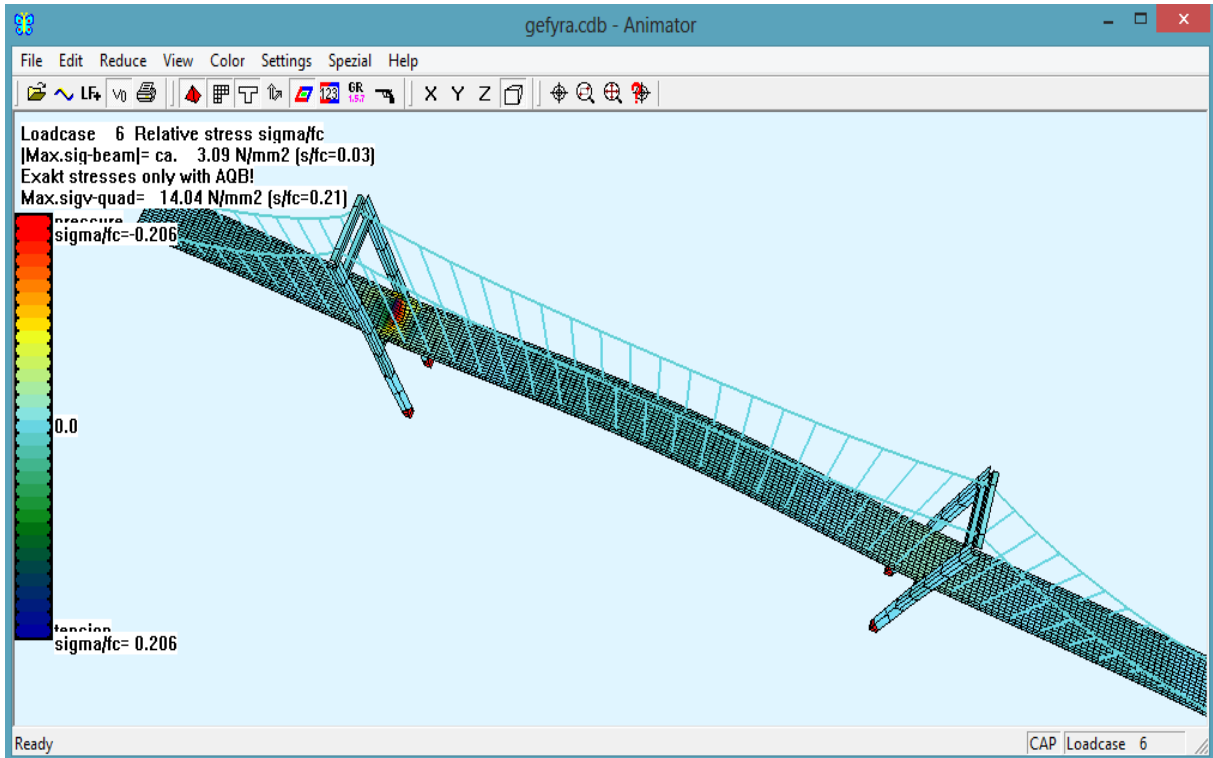
Σχήμα 3.39: LC 4 τάσεις κάτω



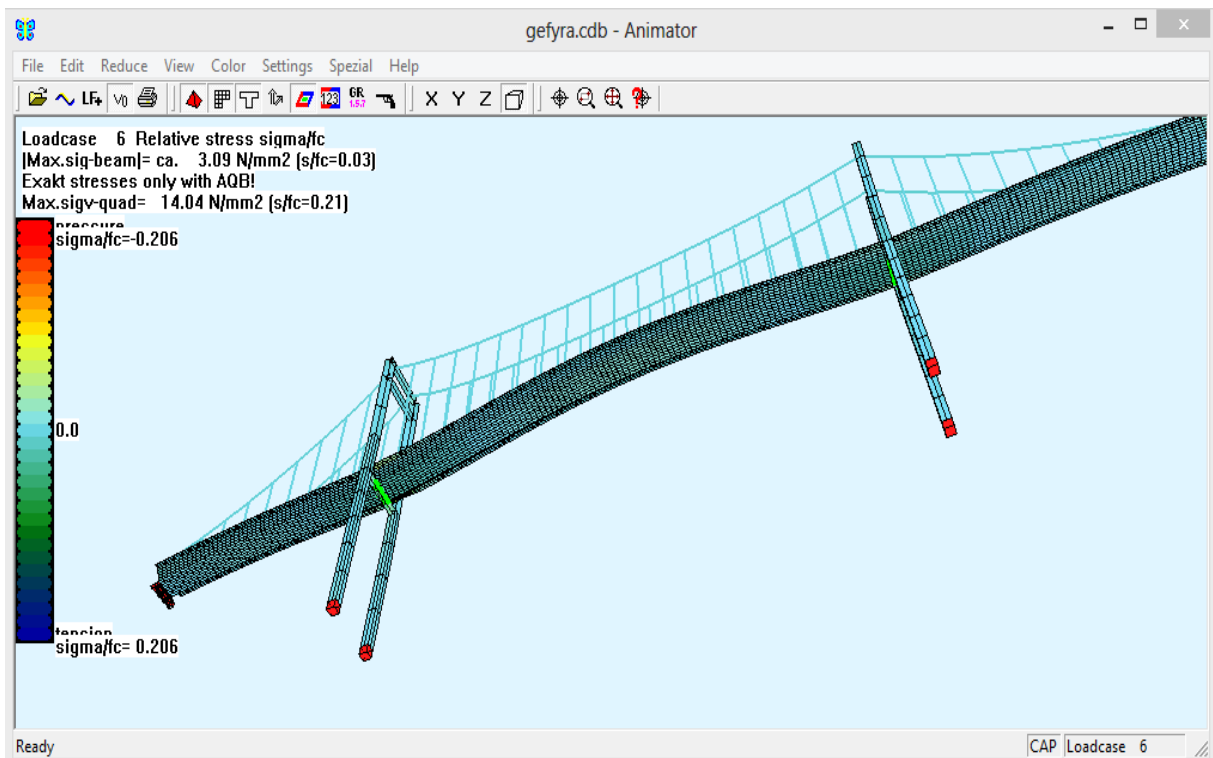
Σχήμα 3.40: LC 5 τάσεις άνω



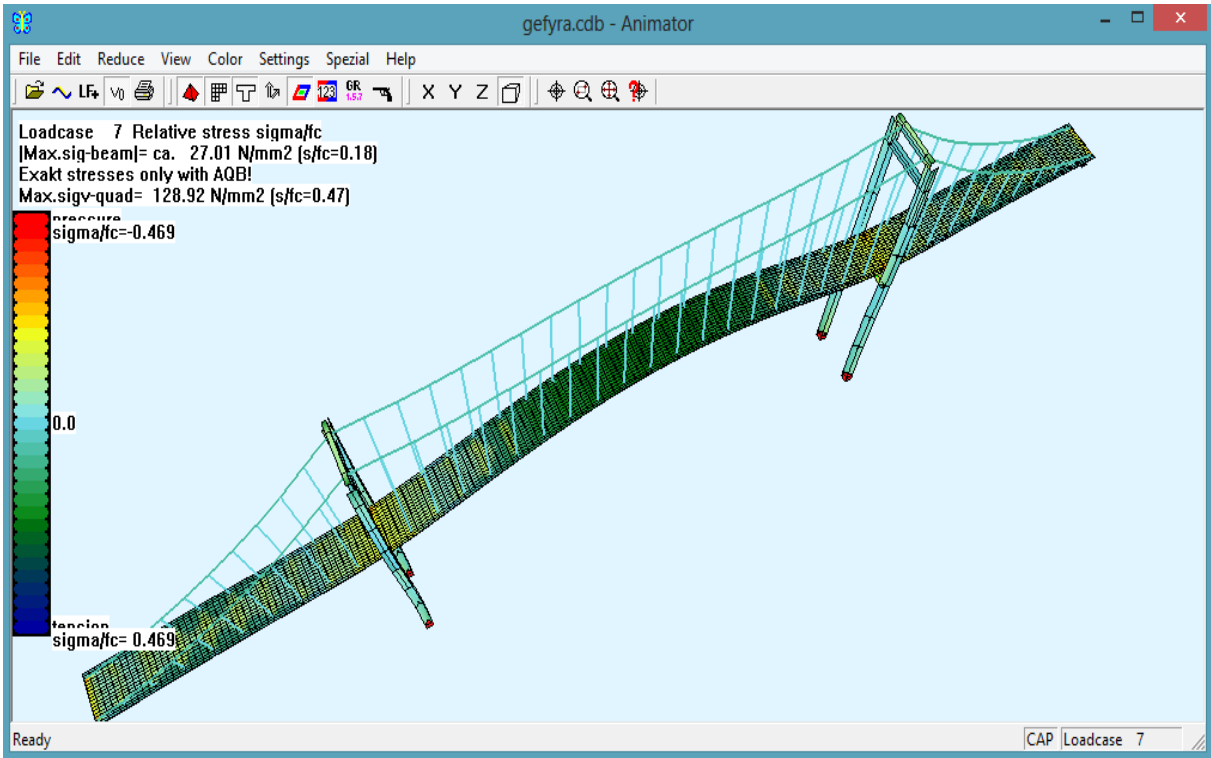
Σχήμα 3.41: LC 5 τάσεις κάτω



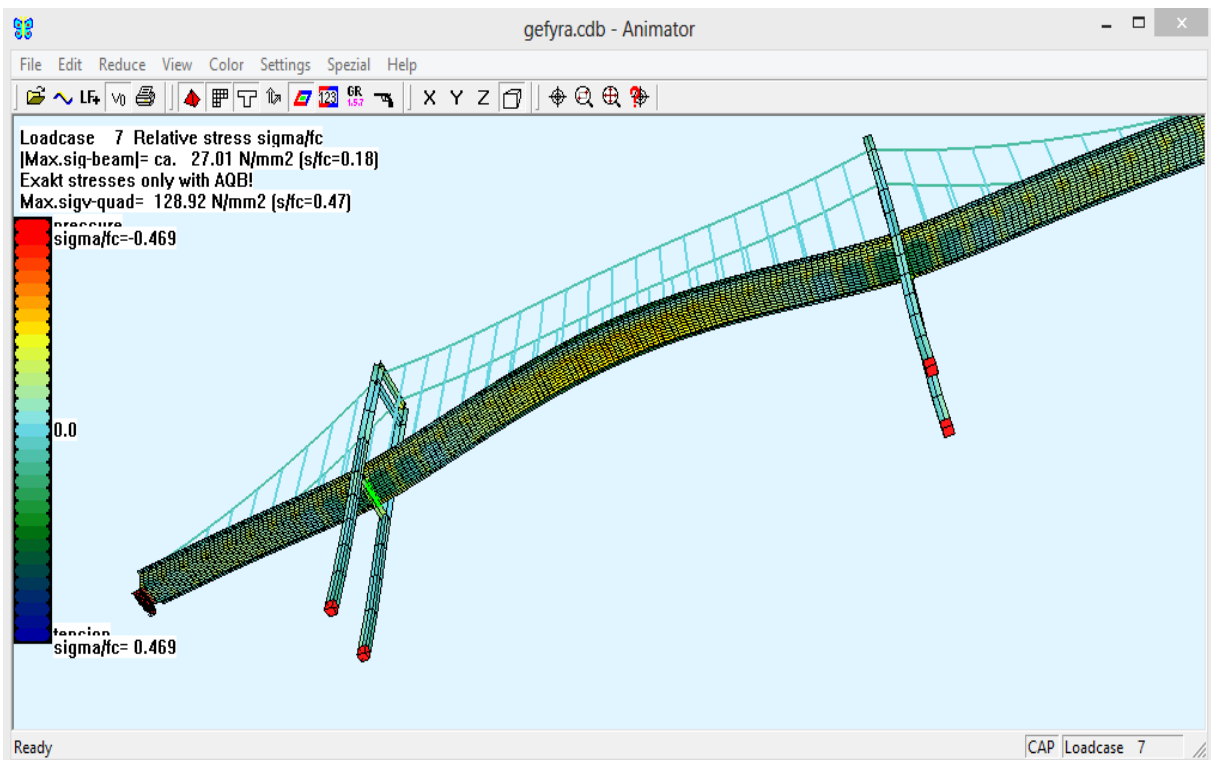
Σχήμα 3.42: LC 6 τάσεις άνω



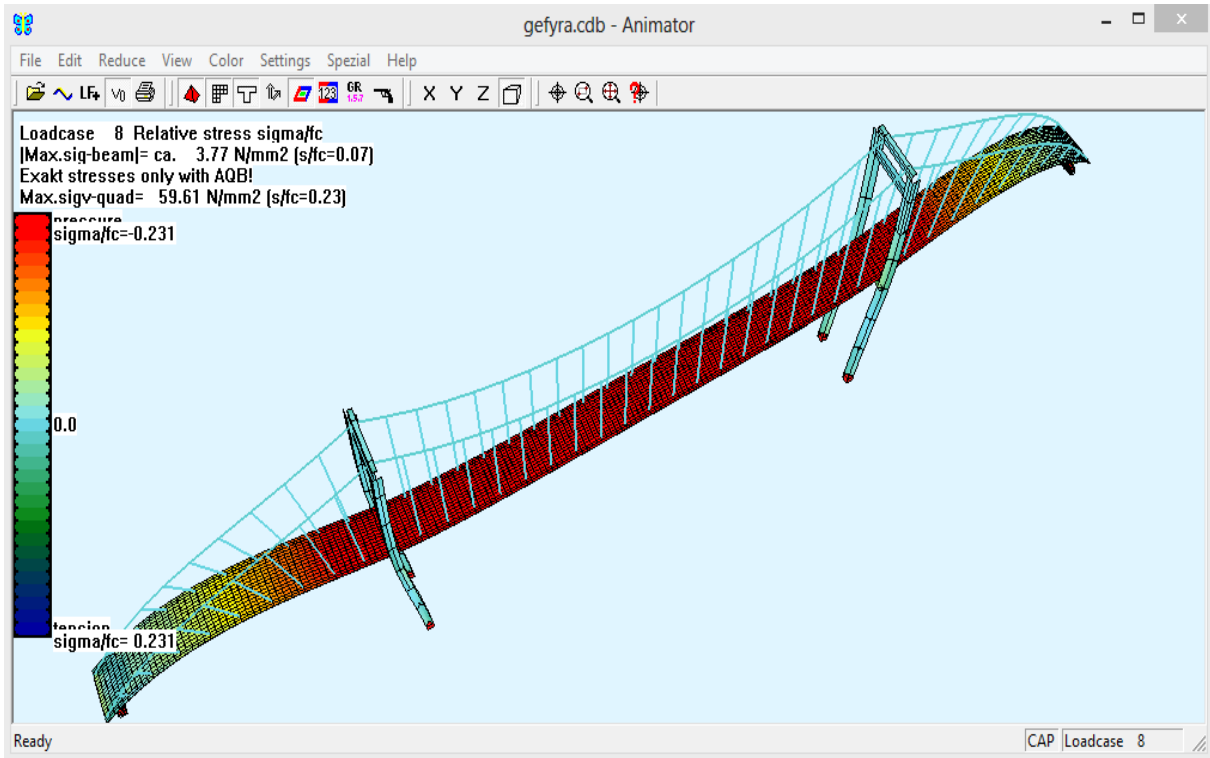
Σχήμα 3.43: LC 6 τάσεις κάτω



Σχήμα 3.44: LC 7 τάσεις άνω

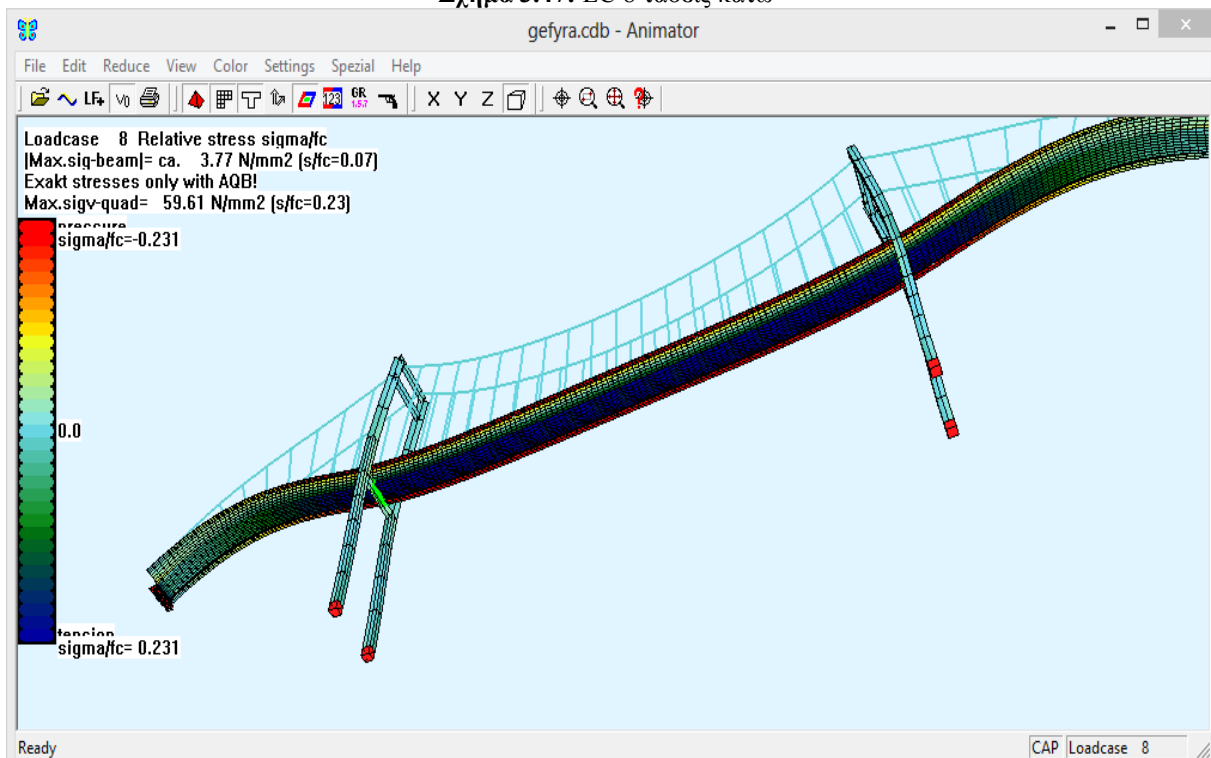


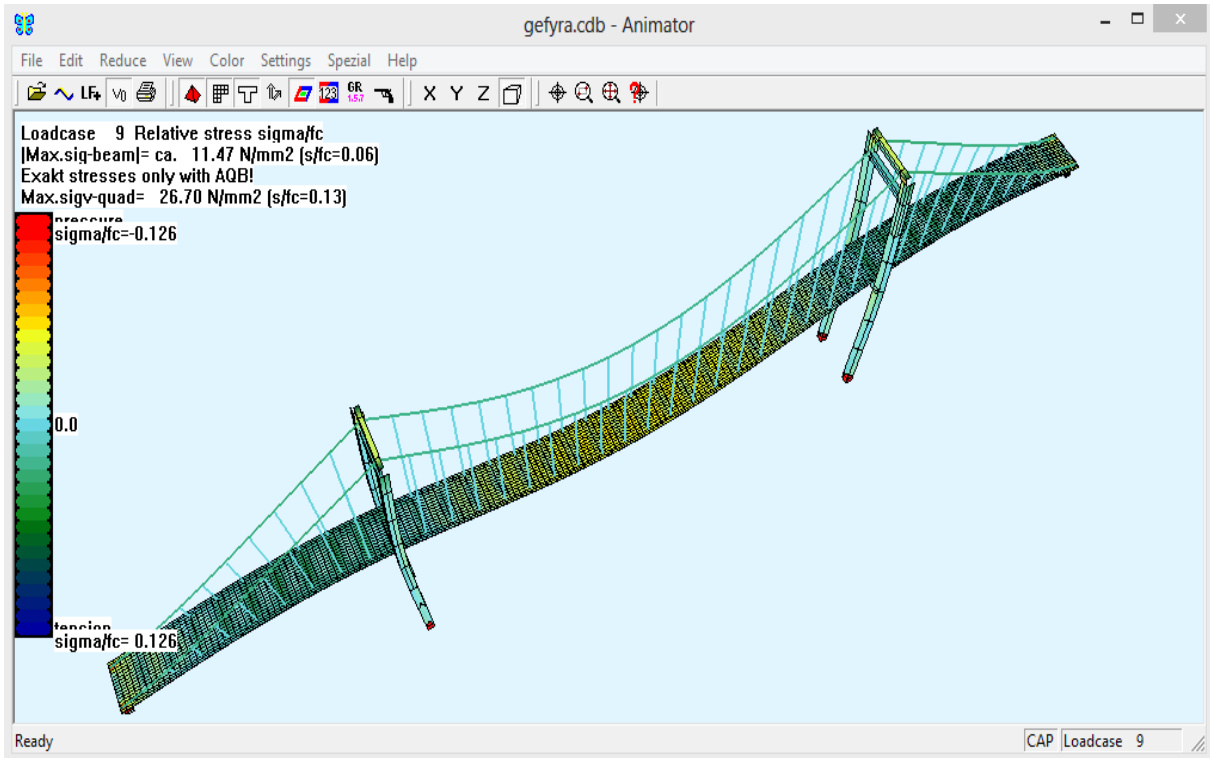
Σχήμα 3.45: LC 7 τάσεις κάτω



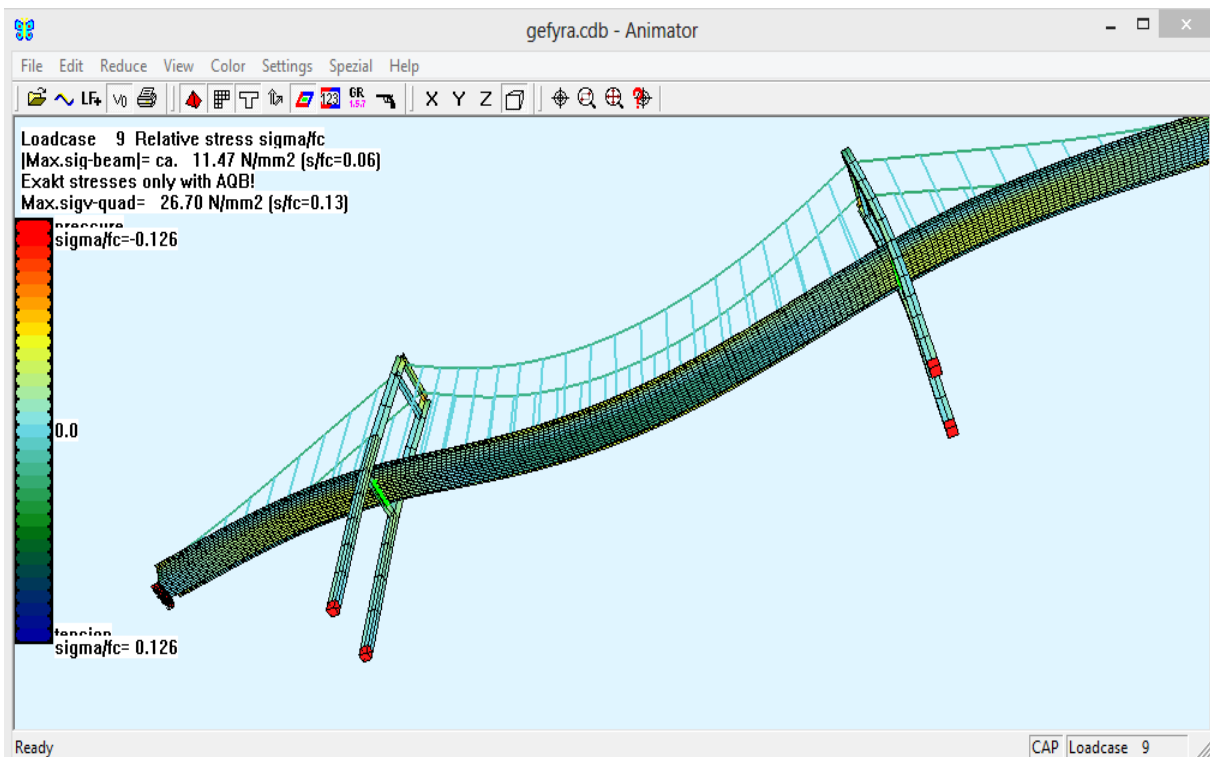
Σχήμα 3.46: LC 8 τάσεις άνω

Σχήμα 3.47: LC 8 τάσεις κάτω

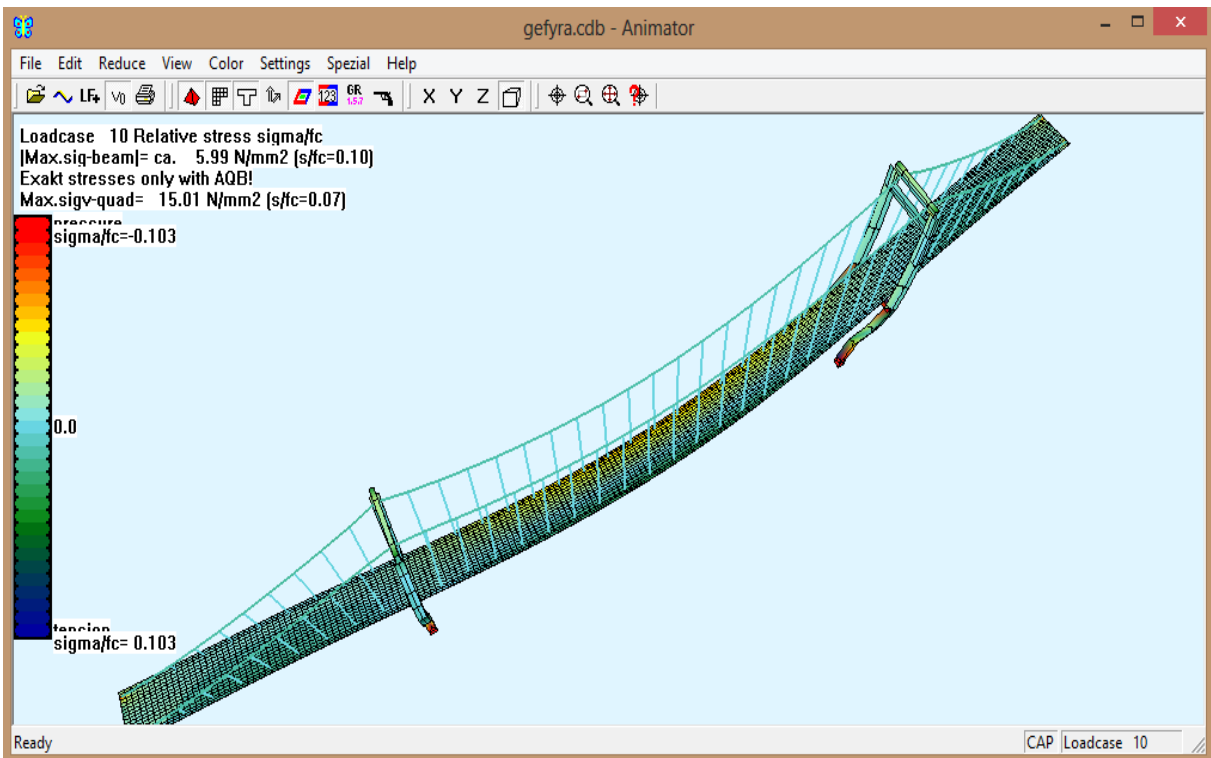




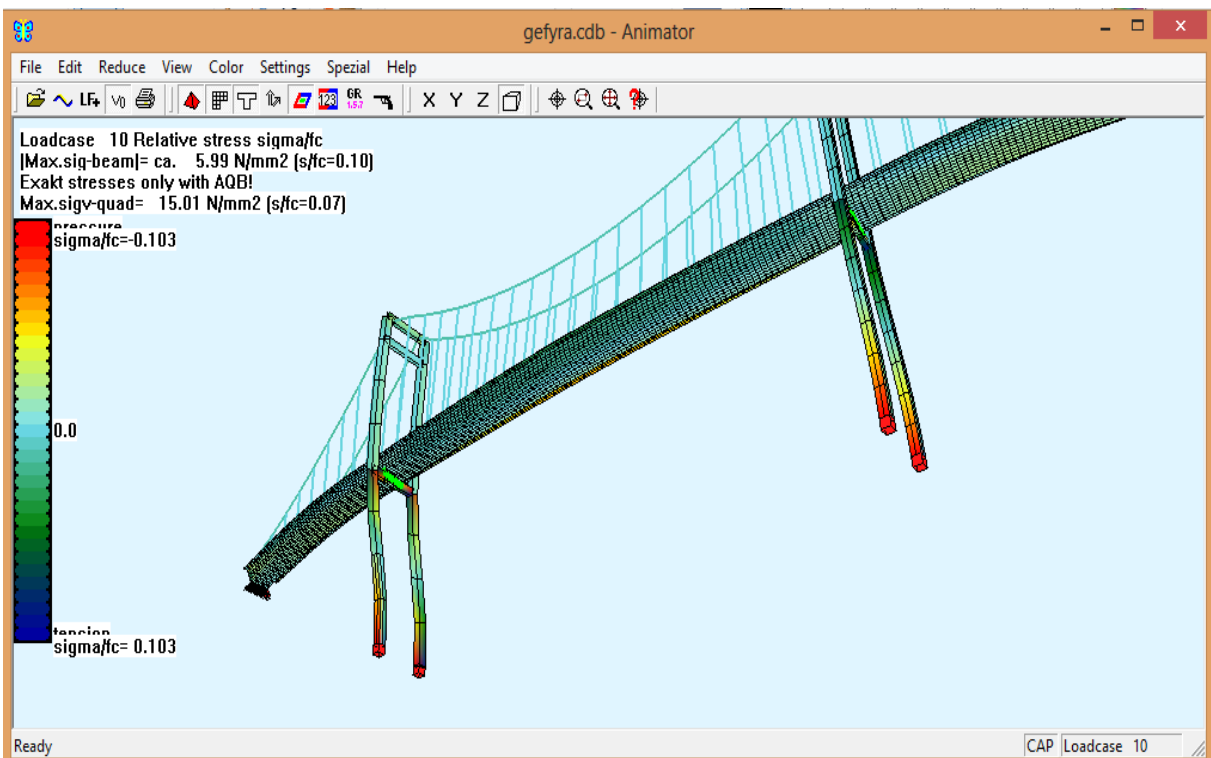
Σχήμα 3.48: LC 9 τάσεις άνω



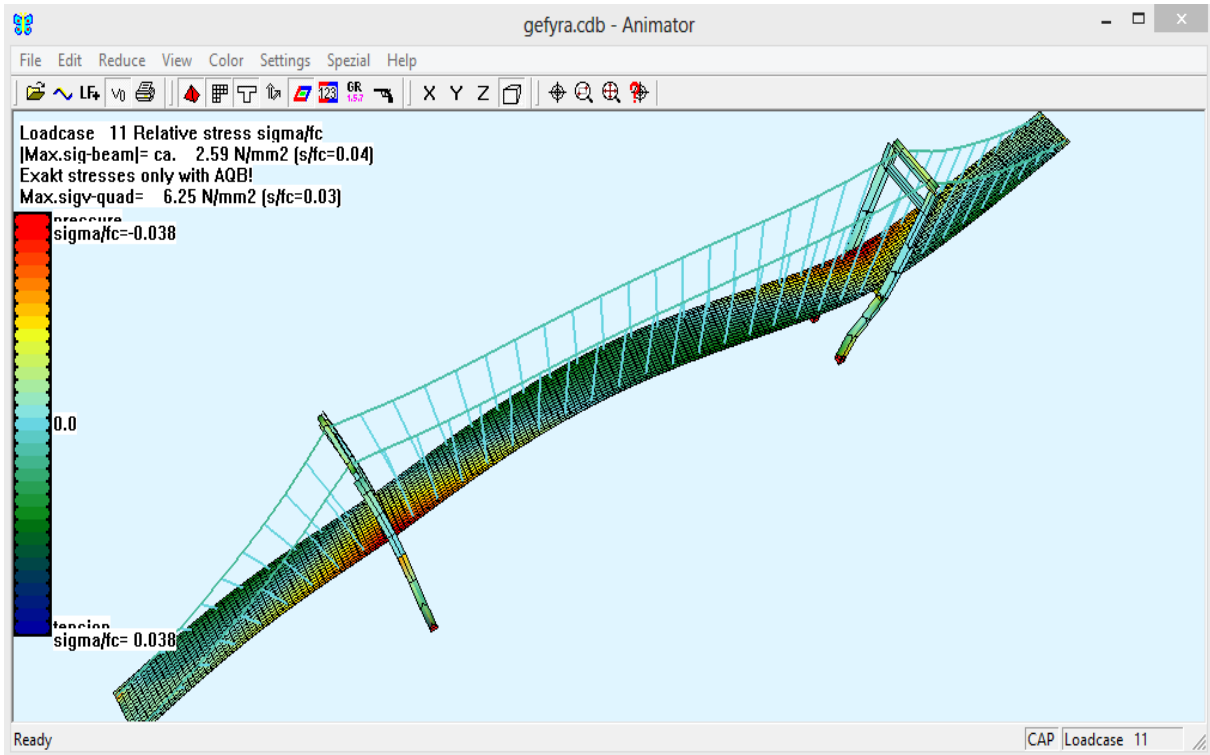
Σχήμα 3.48: LC 9 τάσεις κάτω



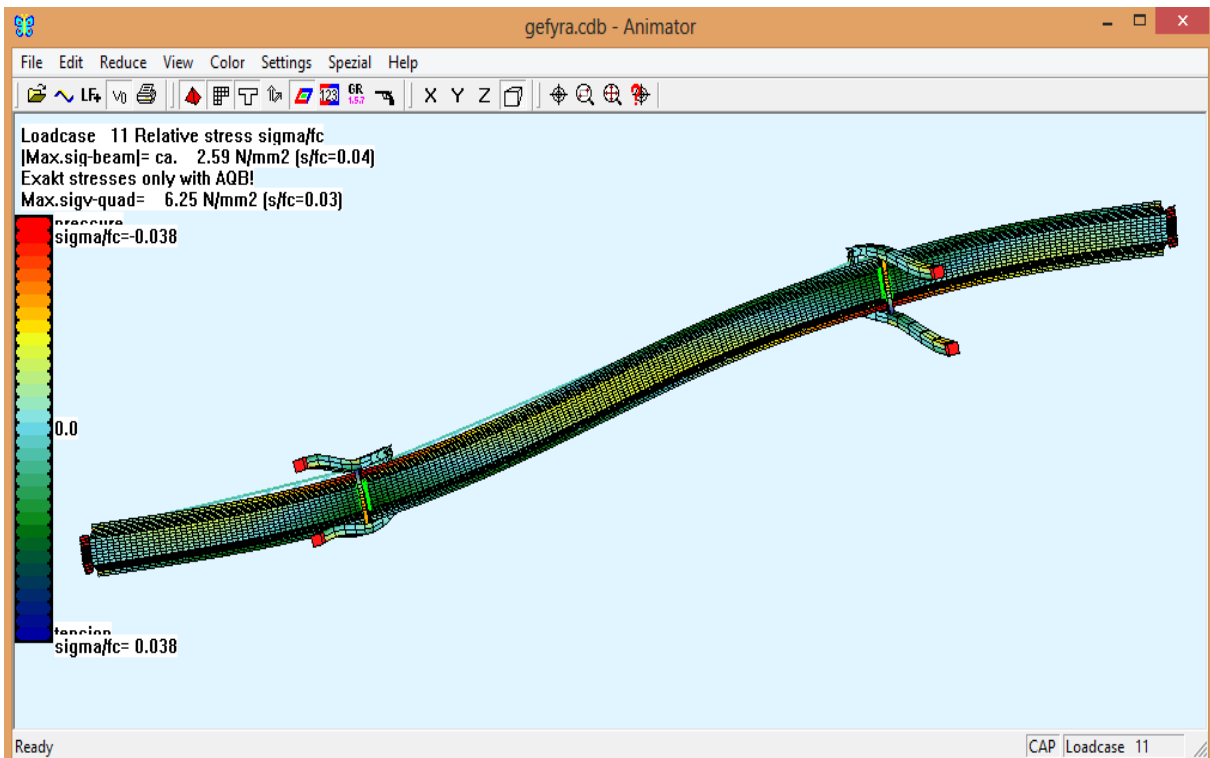
Σχήμα 3.49: LC 10 τάσεις άνω



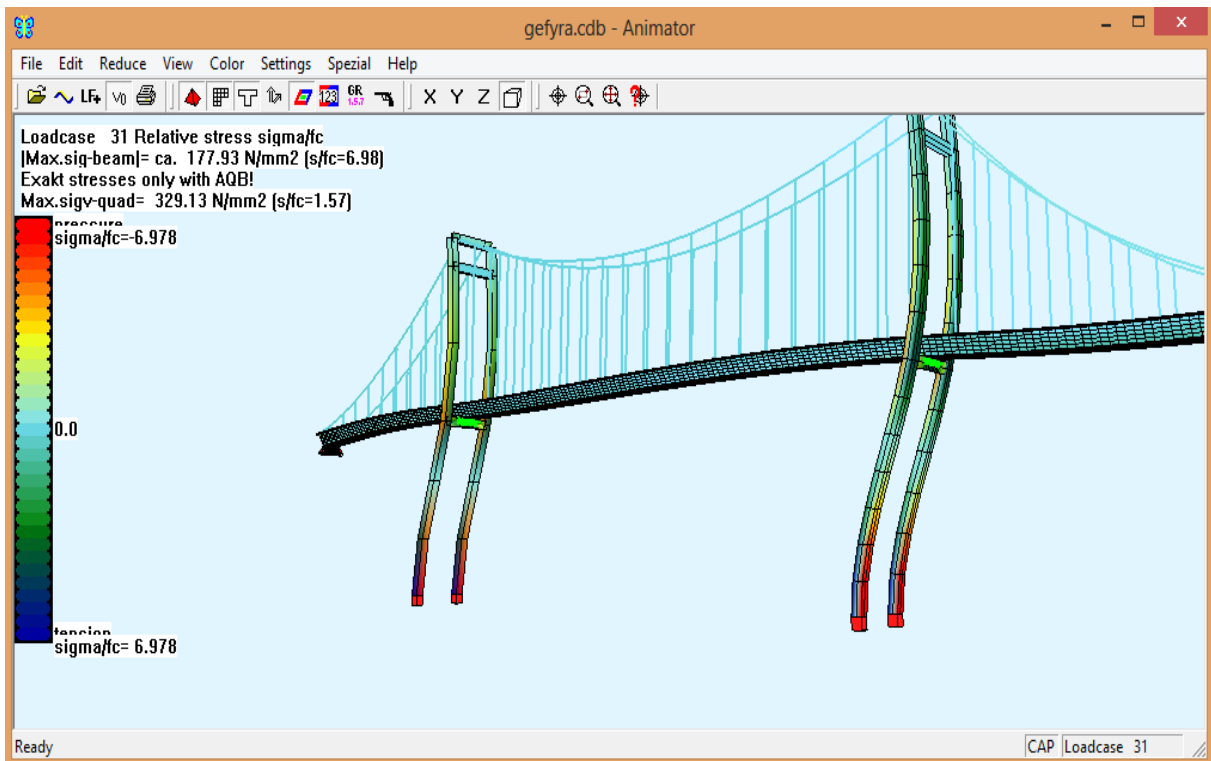
Σχήμα 3.50: LC 10 τάσεις κάτω



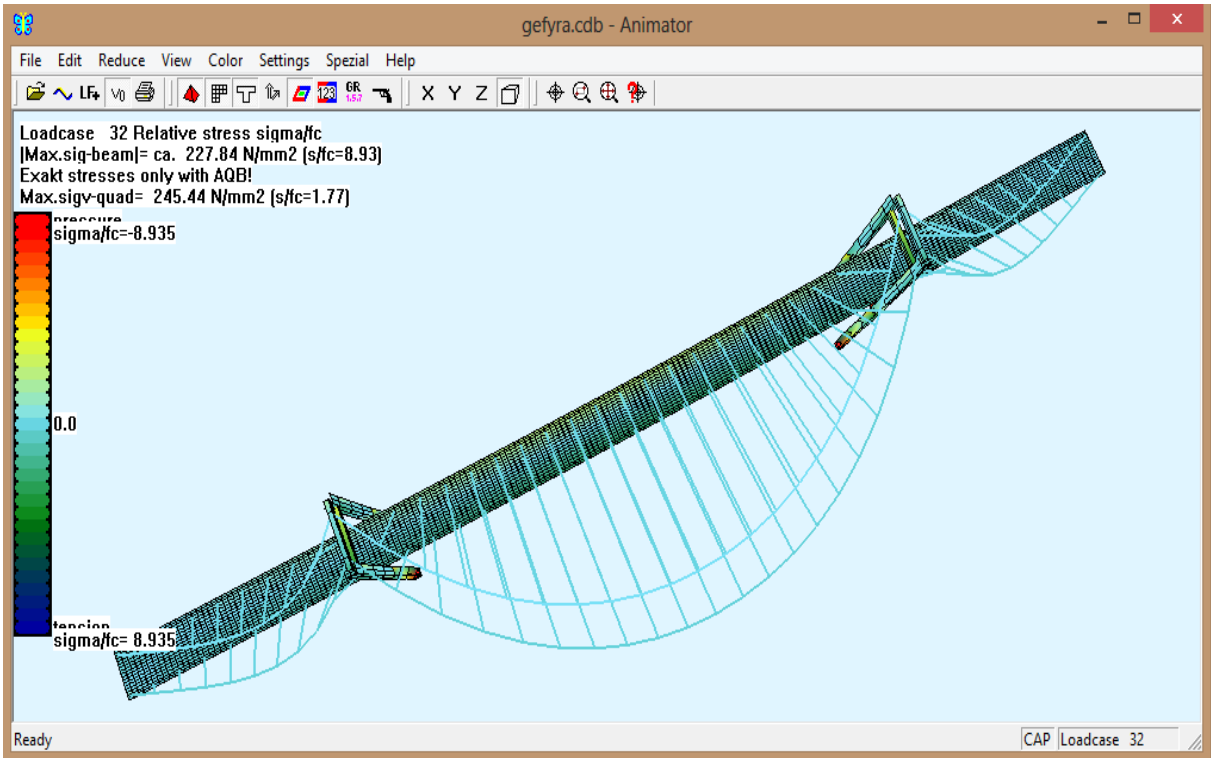
Σχήμα 3.51: LC 11 τάσεις άνω



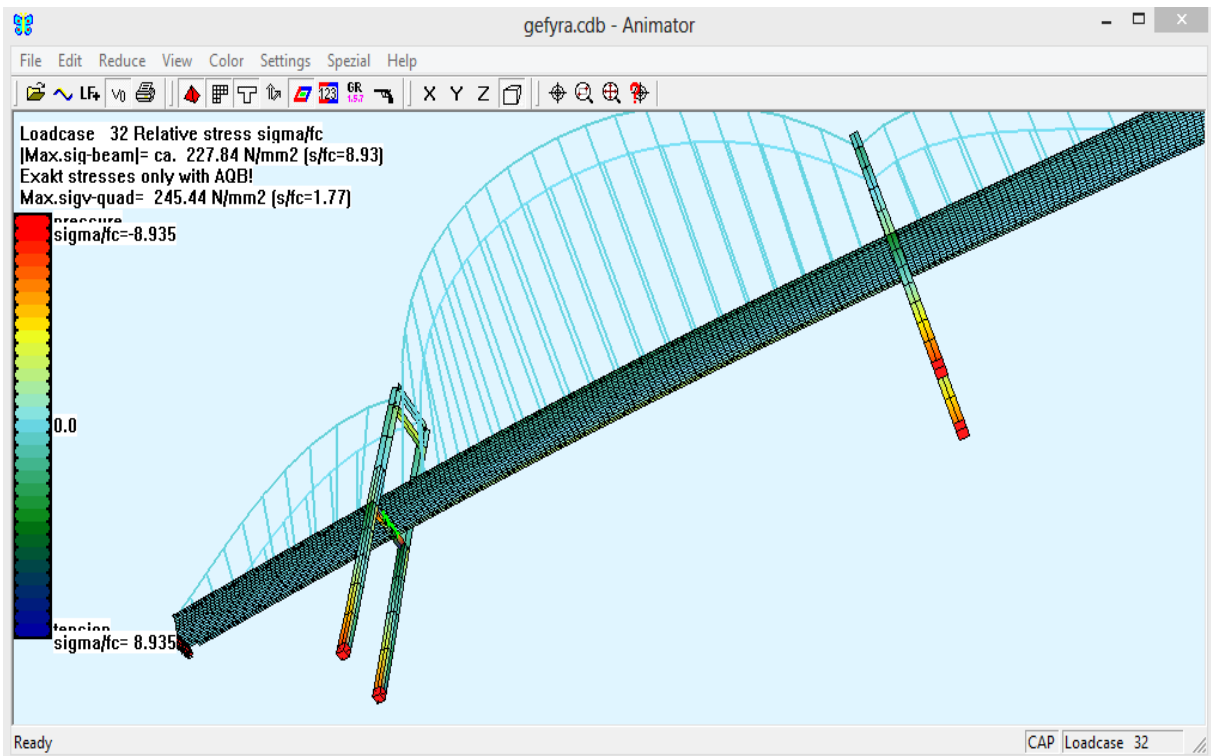
Σχήμα 3.52: LC 11 τάσεις κάτω



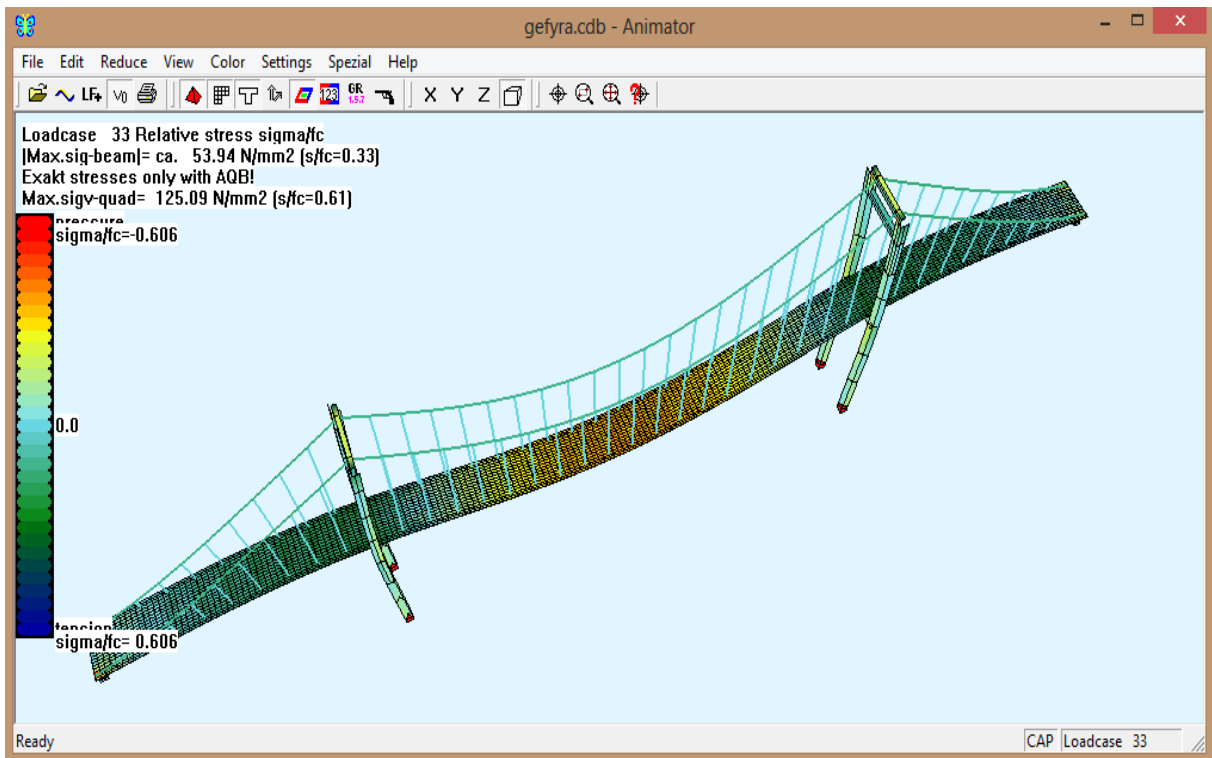
Σχήμα 3.53: LC 31 τάσεις



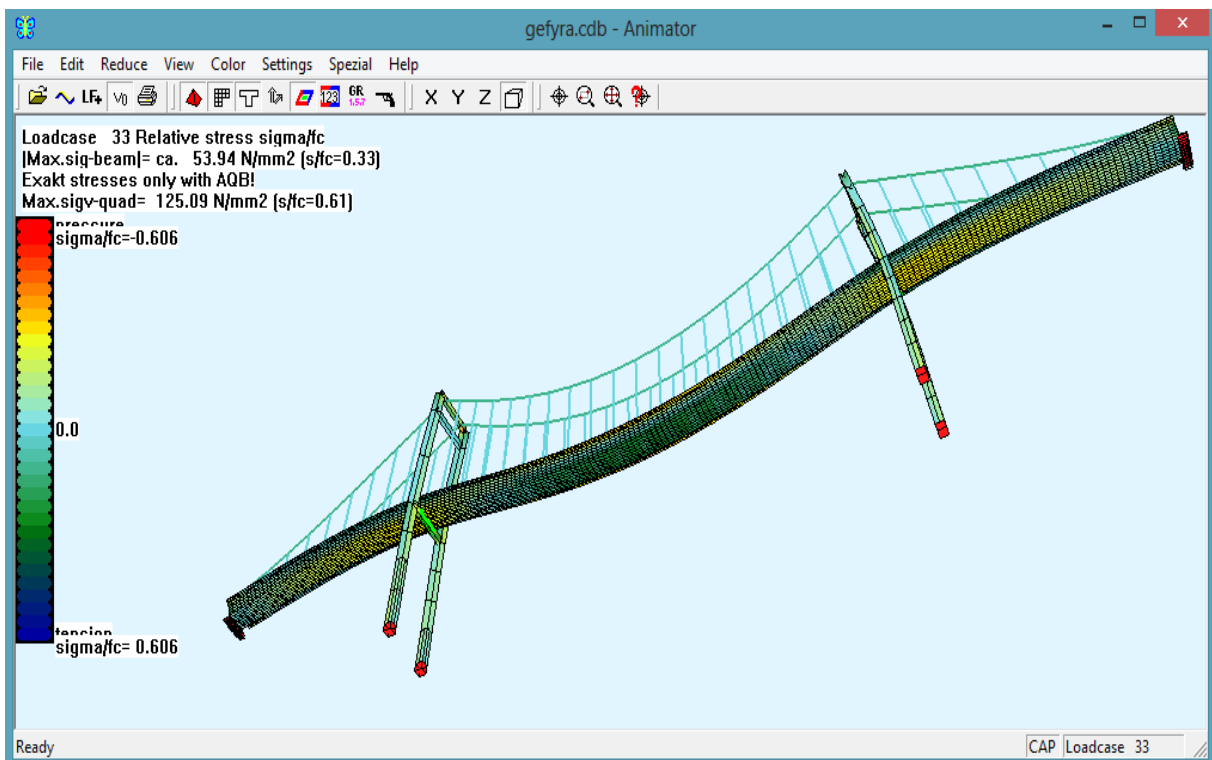
Σχήμα 3.54: LC 32 τάσεις άνω



Σχήμα 3.55: LC 32 τάσεις κάτω



Σχήμα 3.56: LC 33 τάσεις άνω



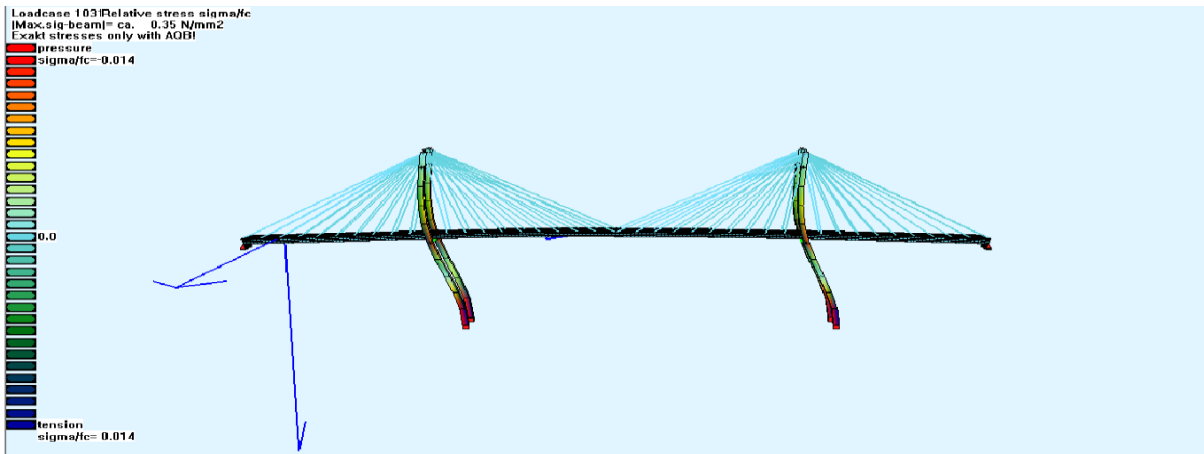
Σχήμα 3.57: LC 33 τάσεις κάτω

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

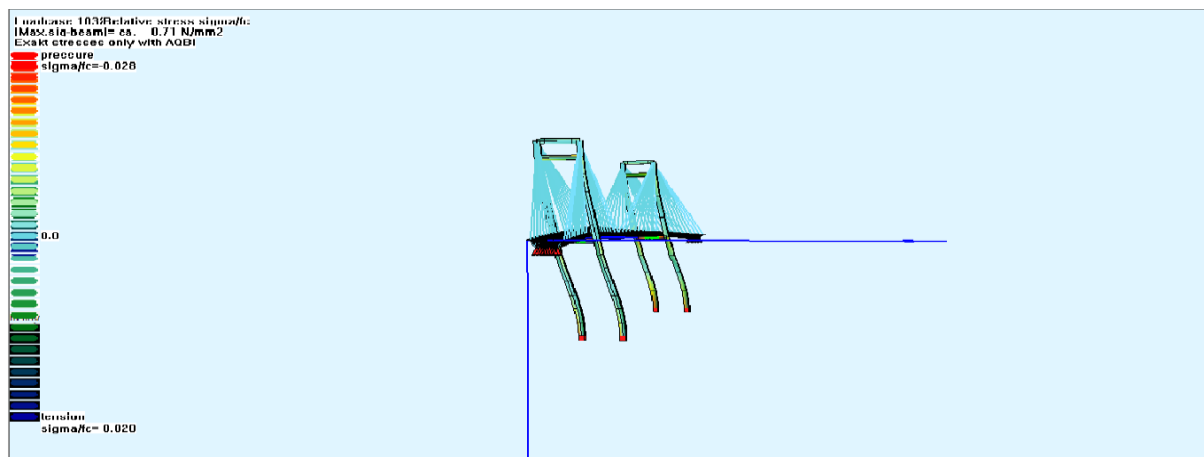
Ιδιομορφές

Βρέθηκαν 50 ιδιομορφές, με τη βοήθεια του υποπρογράμματος DYNA, οι οποίες αντιστοιχούν σε 50 ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης. Εδώ παρουσιάζονται μόνο 4 βασικές ιδιομορφές.

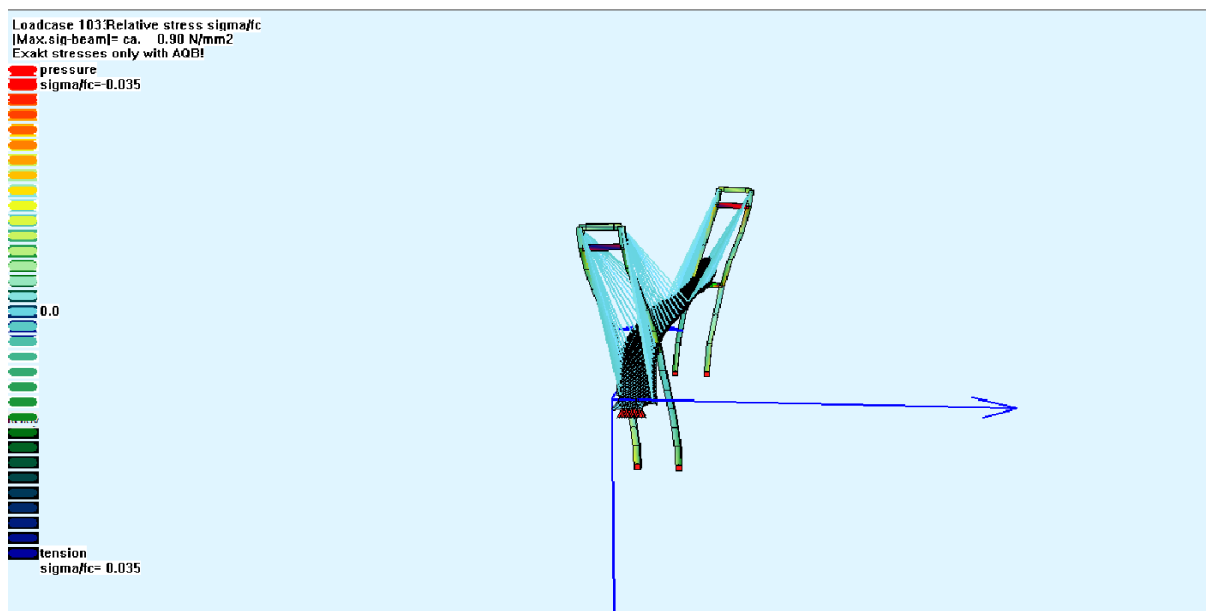
4.1 Ιδιομορφές καλωδιωτής



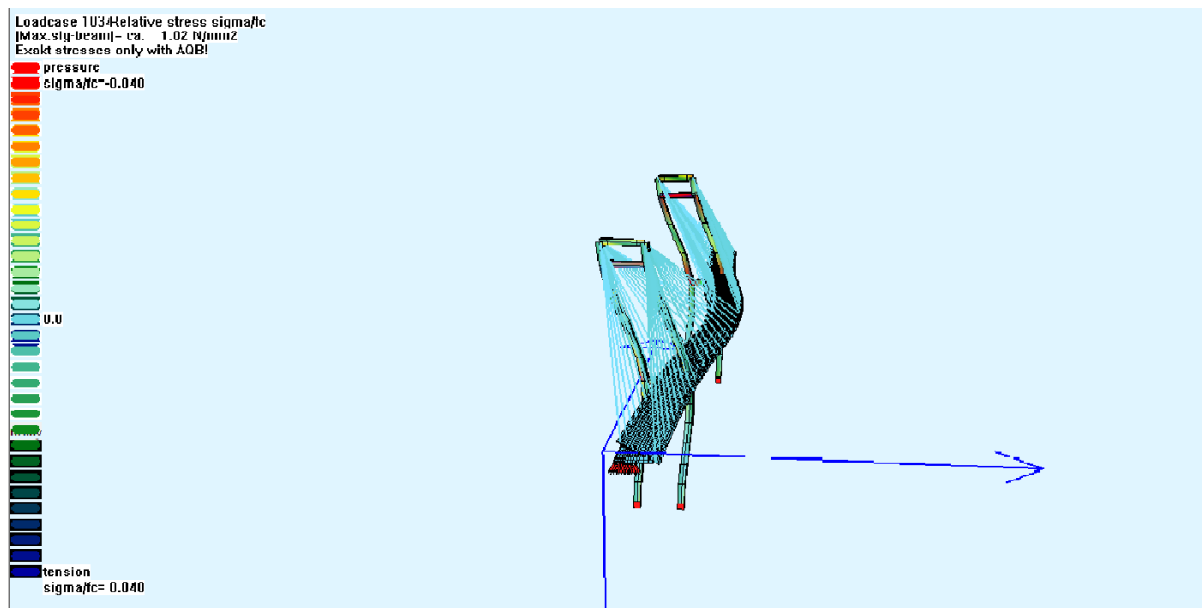
Σχήμα 4.1: 1^η ιδιομορφή (H=0.099Hz / T=10,10 sec)



Σχήμα 4.2: 2^η ιδιομορφή (H=0.112Hz / T=8,92 sec)

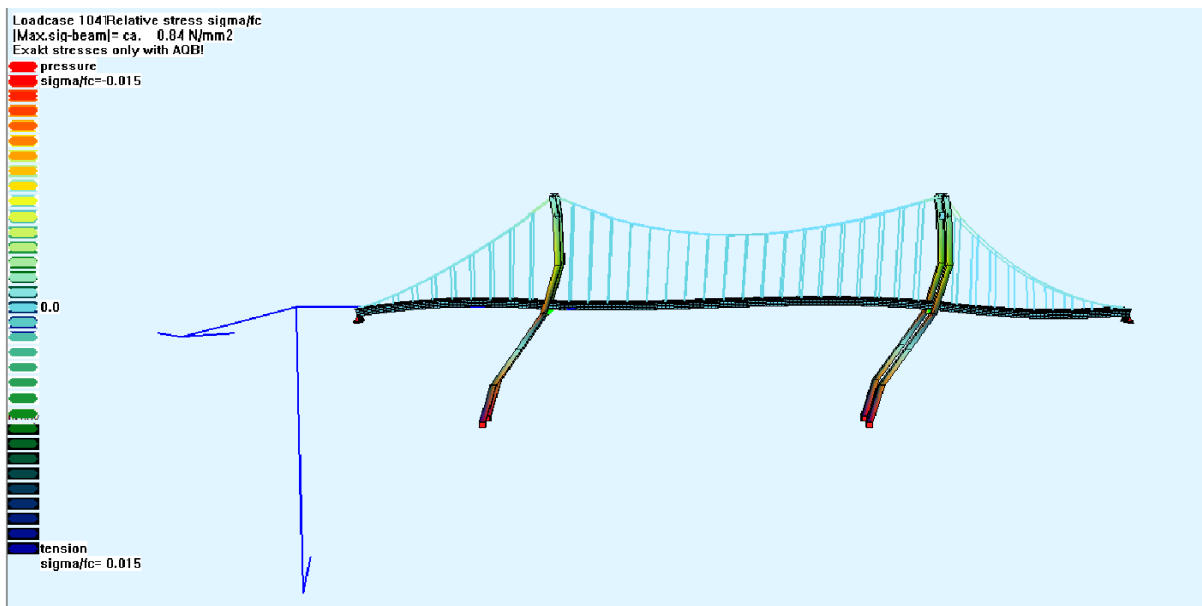


Σχήμα 4.3: 3^η ιδιομορφή (H=0.160Hz / T=6,25 sec)

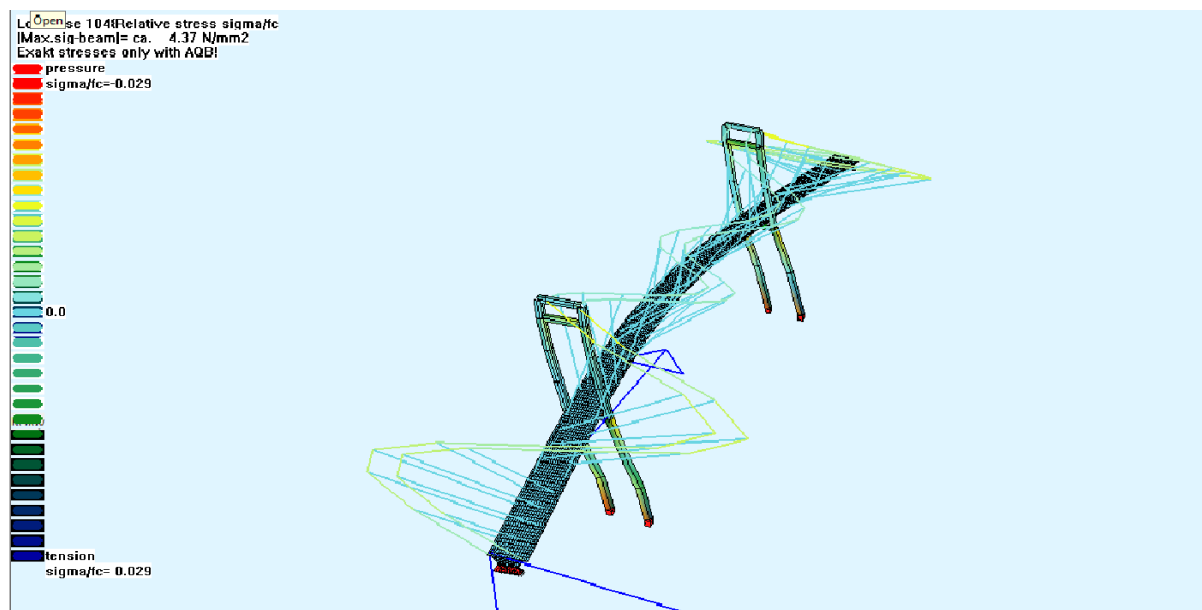


Σχήμα 4.4: 4^η ιδιομορφή (H=0.242Hz / T=4,13 sec)

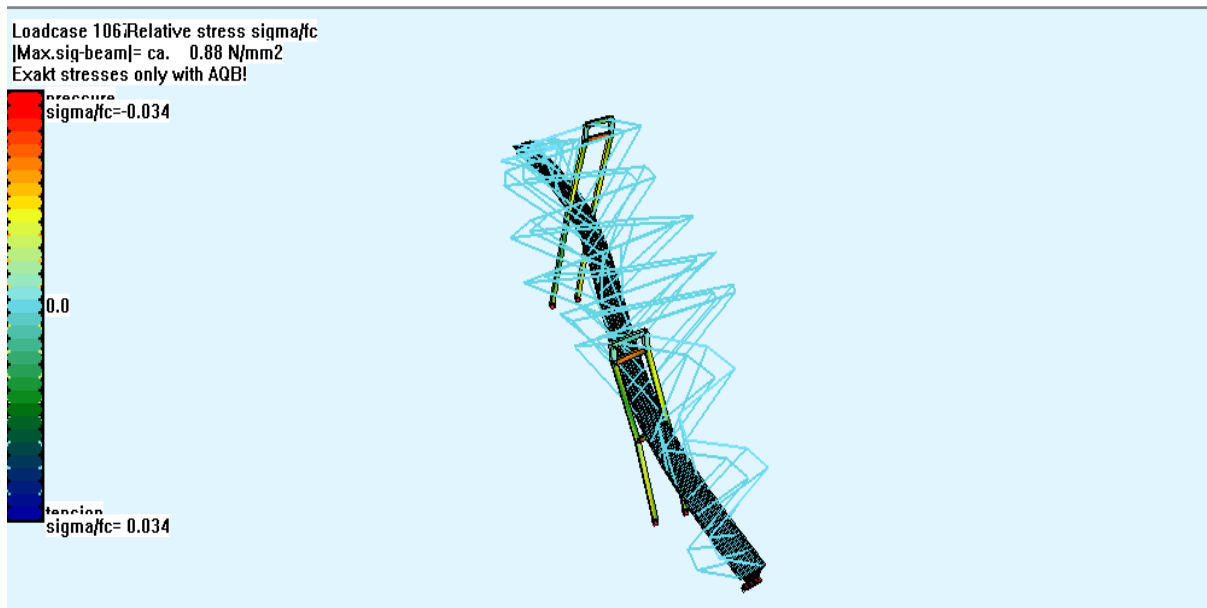
4.2 Ιδιομορφές κρεμαστής



Σχήμα 4.5: 1^η ιδιομορφή (H=0,173 Hz / T=5,78 sec)



Σχήμα 4.6: 2^η ιδιομορφή (H=0,231 Hz / T=4,33 sec)



Σχήμα 4.7: 3^η ιδιομορφή (H=0,326 Hz / T=3.07 sec)



Σχήμα 4.8: 4^η ιδιομορφή (H=0,360 Hz / T=2.77 sec)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα ανάλυσης από συνδυασμό φορτίσεων

5.1 Αντιδράσεις στήριξης

Οι αντιδράσεις στήριξης προέκυψαν από το δυσμενέστερο ανάμεσα στην ΟΚΛ και στο σεισμικό συνδυασμό, όπως φαίνεται και στο πρόγραμμα.

```
+PROG MAXIMA urs:14
HEAD antidraseis
PAGE LINE 65 LANO 1
ECHO FULL
LC 1 AG 1.00 ; 2 P 1.00 ;
      3 A1 1.00 ;
      4 A1 1.00 ;
      5 A1 1.00 ;
      6 A1 1.00 ;

LC 1 AG 1.00 ; 2 P 0.50 ; 3 A1 0.50
      31 A3 1.00 ; 32 F 0.3 ; 33 F 0.3
      32 A3 1.00 ; 31 F 0.3 ; 33 F 0.3
      33 A3 0.7 ; 31 F 0.3 ; 32 F 0.3

node
SUPE MAMI Px; SUPE MAMI Py; SUPE MAMI Pz;
CTRL LCST 91
END
```

5.1.1 Αντιδράσεις στήριξης στην καλωδιωτή

Supporting Forces in Nodes									
Node.	LC	Name	PX	PY	PZ	MX	MY	MZ	
Nr	Nr		[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	
7051	92	MINZ-PX	-26794	-6099,5	-100343	-180362	923259	-36698	
7043	91	MAXZ-PX	27,5	-116,5	-65172	-2254,18	123,38	93,65	
7051	94	MINZ-PY	-8550,7	-20085	-176935	-597084	296672	8513,12	
24	93	MAXZ-PY	0,0	799,6	-565,2	0,00	0,00	0,00	
7051	96	MINZ-PZ	-8543,4	-20079	-177465	-597059	296484	8559,59	
7039	95	MAXZ-PZ	-8532,8	-19821	26481	-591338	298063	-8488,62	
7051	94	MINZ-MX	-8550,7	-20085	-176935	-597084	296672	8513,12	
7039	91	MAXZ-MX	27,5	116,5	-65172	2254,10	123,39	-93,66	
7047	91	MINZ-MY	-3,2	87,8	-76355	1062,02	-981,59	157,67	
7039	92	MAXZ-MY	-26792	-5912,3	-53084	-177418	925045	36534	
7043	92	MINZ-MZ	-26452	-6110,7	-108793	-181257	911438	-49551	
7047	92	MAXZ-MZ	-26457	-5856,3	-42046	-175656	909775	49505	

5.1.2 Αντιδράσεις στήριξης στην κρεμαστή

Supporting Forces in Nodes									
Node.	LC	Name	PX	PY	PZ	MX	MY	MZ	
Nr	Nr		[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	
7051	92	MINZ-PX	-24580	-6422,1	-97632	-181388	830169	-31457	
7043	91	MAXZ-PX	1340,5	-584,6	-75083	-11912	-31115	3047,26	
7051	94	MINZ-PY	-8707,7	-19312	-154521	-562662	284739	-1882,75	
23	93	MAXZ-PY	0,0	6111,8	7678,3	0,00	0,00	0,00	
7043	96	MINZ-PZ	-5072,1	-19166	-158745	-559880	189965	-16903	
31	95	MAXZ-PZ	0,0	-7433,1	12790	0,00	0,00	0,00	
7051	94	MINZ-MX	-8707,7	-19312	-154521	-562662	284739	-1882,75	
7039	93	MAXZ-MX	1283,6	531,9	-76895	9678,01	-29618	-3354,07	
7043	91	MINZ-MY	1340,5	-584,6	-75083	-11912	-31115	3047,26	
7051	92	MAXZ-MY	-24580	-6422,1	-97632	-181388	830169	-31457	
7043	92	MINZ-MZ	-21888	-5813,4	-98014	-169035	764413	-32109	
7047	92	MAXZ-MZ	-24316	-4836,9	-53625	-150723	820716	38344	

5.2 Τάσεις von Mises¹

5.2.1 Ορισμός

Σε κάθε σημείο μέσα σε ένα σώμα υπάρχουν τάσεις που δρουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις, και η κατεύθυνση και το μέγεθος των τάσεων αλλάζει από σημείο σε σημείο. Συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις κύριες τάσεις που μπορεί να υπολογιστούν σε οποιοδήποτε σημείο, ενεργώντας κατά τις διευθύνσεις x , y και z . Παρόλο που καμία από τις κύριες τάσεις μπορεί να μην υπερβαίνει την τάση διαρροής του υλικού, είναι δυνατόν η αστοχία να προκύψει από τον συνδυασμό αυτών των τάσεων. Το κριτήριο von Mises είναι ένας τύπος για τον υπολογισμό του κατά πόσον ο συνδυασμός των τριών αυτών τάσεων σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενός όλκιμου υλικού (π.χ. χάλυβας) θα προκαλέσει αστοχία². Συγκεκριμένα, αν η τάση von Mises υπερβαίνει την τάση διαρροής, τότε το υλικό θεωρείται ότι είναι στην κατάσταση αστοχίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ποιότητας S275, δηλαδή χάλυβας με τάση διαρροής 275MPa.

5.2.2 Εικόνες

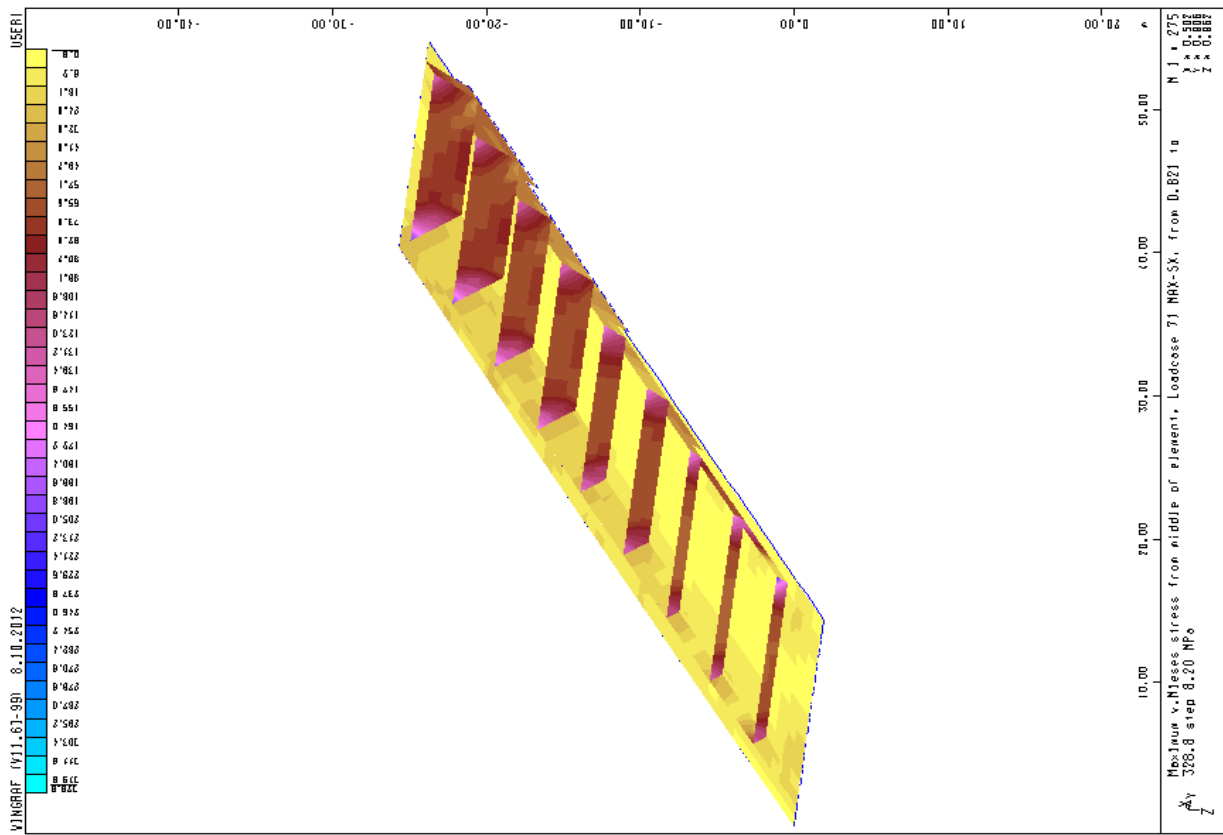
Παρακάτω φαίνονται οι τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται τόσο στο κατάστρωμα όσο και στην κιβωτιοειδή κύρια δοκό. Επειδή οι γέφυρες ακολουθούν ημιτονοειδή καμπύλη κατά τον διαμήκη άξονα, χρειάστηκε να γίνουν κατάλληλες τομές και να χωριστεί η γέφυρα σε τρία τμήματα (όσα και τα ανοίγματα) ώστε να είναι εφικτή η παρουσίαση των τάσεων.

¹ Βρέθηκαν και οι κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στα μοντέλα ανάλυσης, οι οποίες όμως δεν παρουσιάζονται στο τεύχος παρά μόνο στην ηλεκτρονική μορφή.

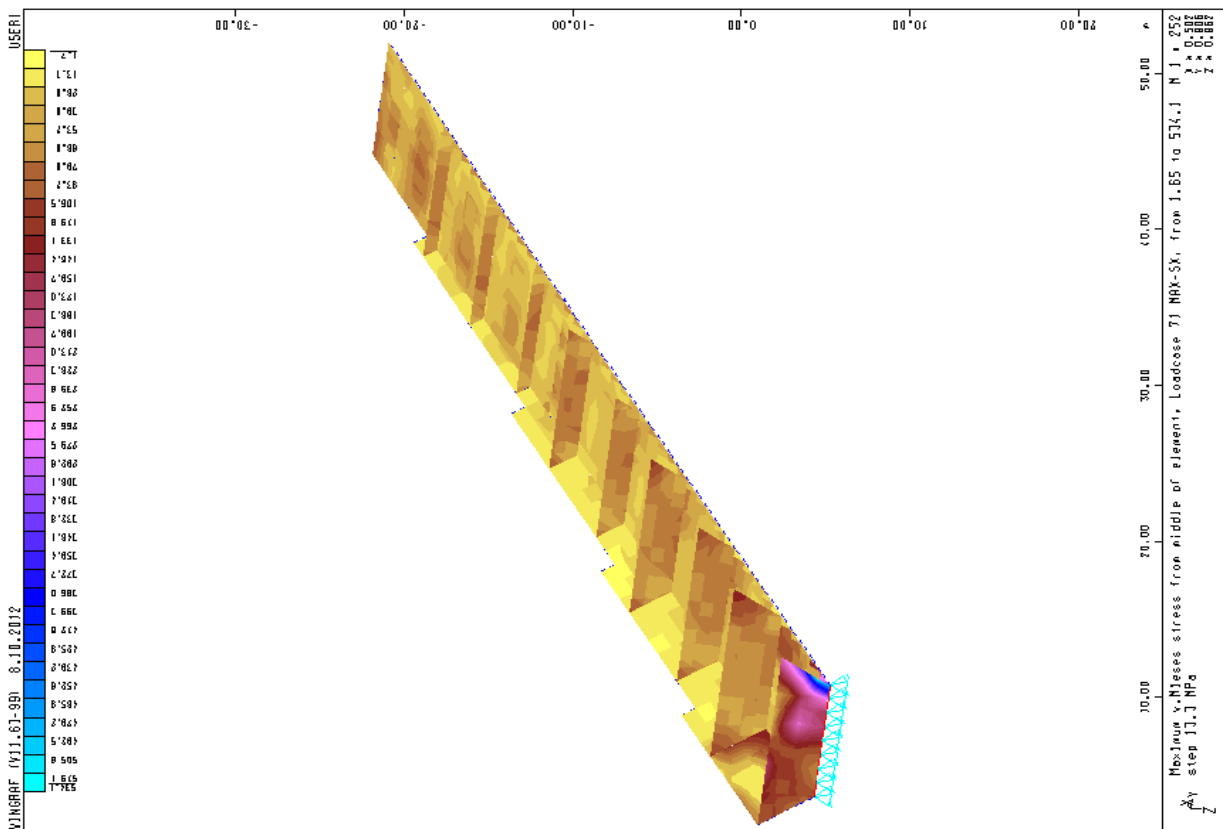
² Βέβαια θεωρίες αστοχίας των υλικών δεν θα αναπτυχθούν στην παρούσα διπλωματική, αλλά αναφέρουμε απλώς ότι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας είναι, για τα όλκιμα υλικά, αυτό του von Mises, και για τα ψαθυρά υλικά, αυτό της μέγιστης εφελκυστικής τάσης.

5.2.2.1 Καλωδιωτή γέφυρα – τάσεις Von Mises

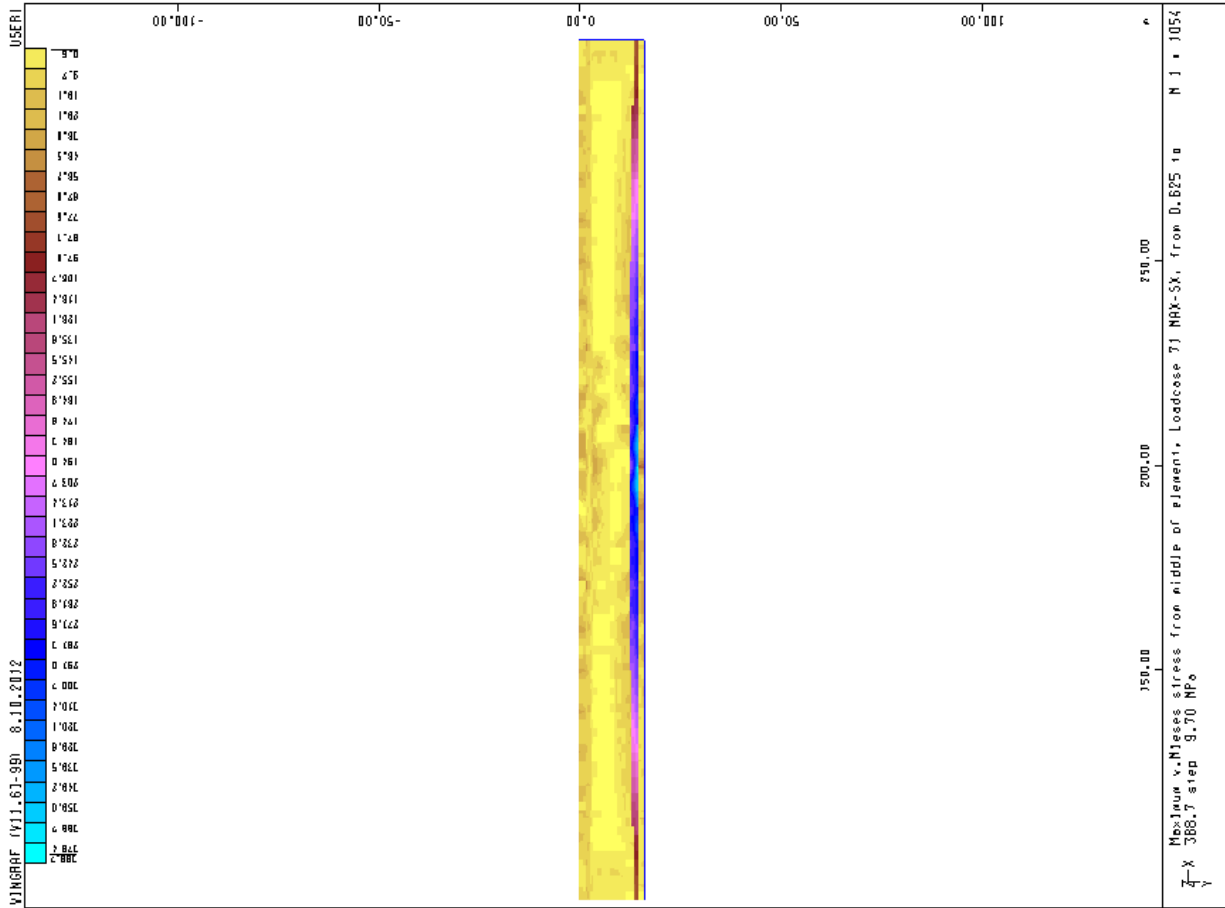
Max Sx



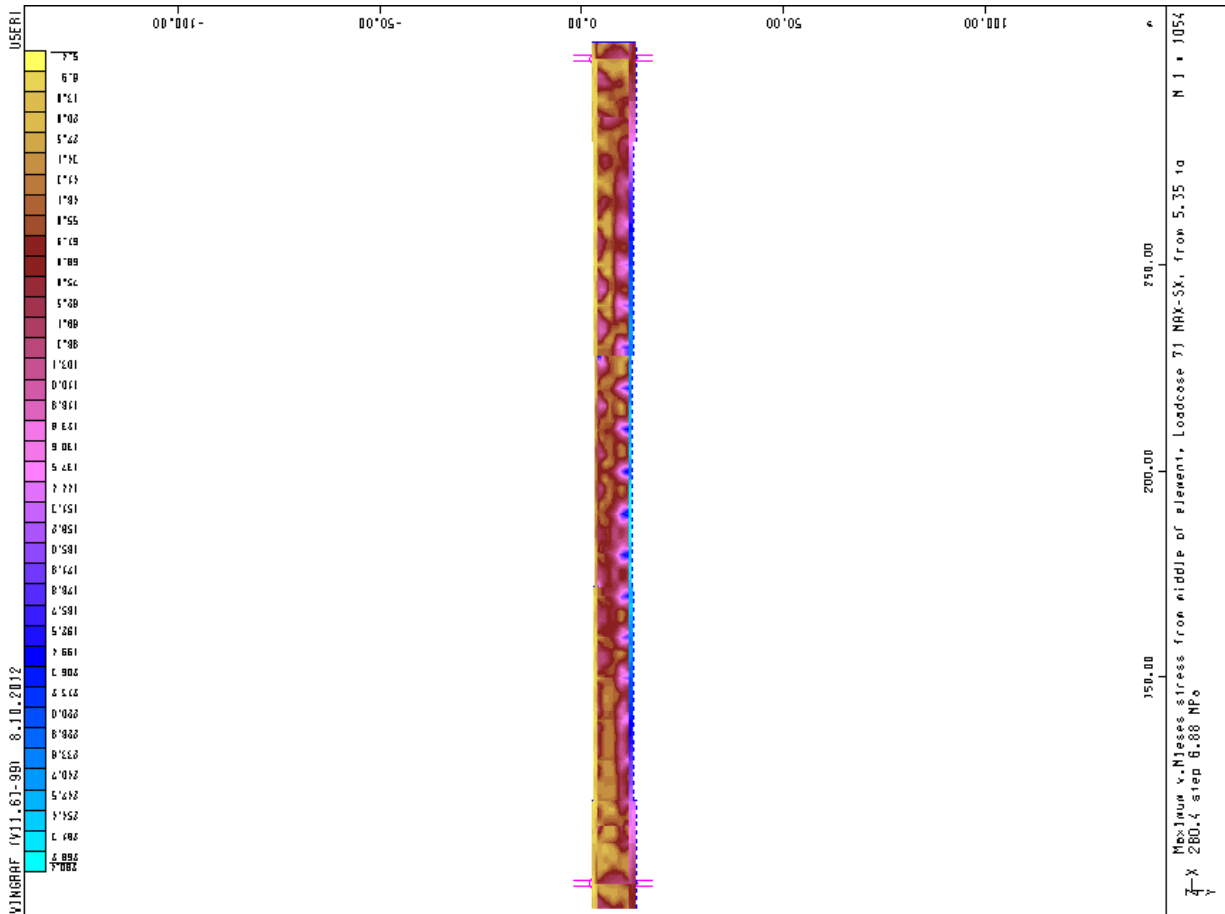
Σχήμα 5.2: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



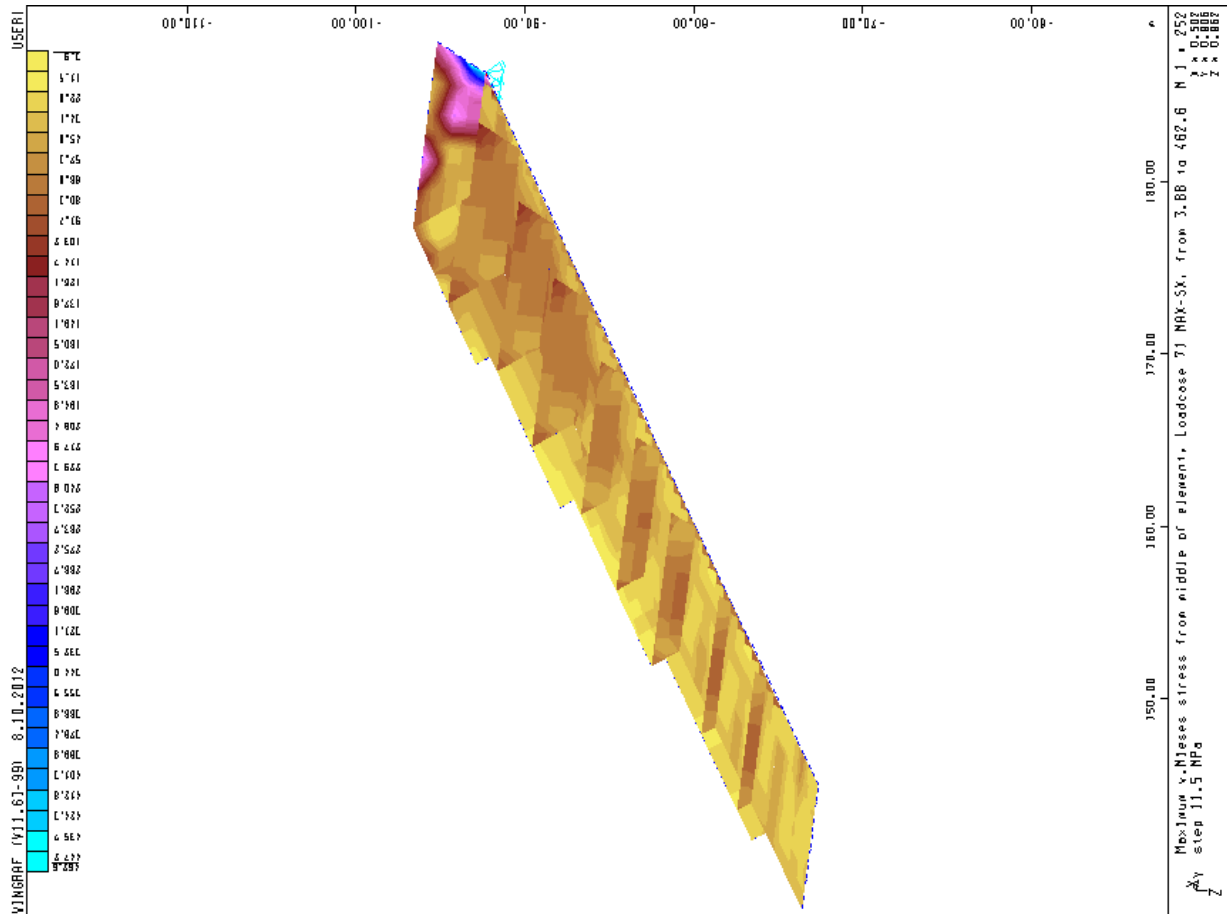
Σχήμα 5.1: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοειδής κύρια δοκός



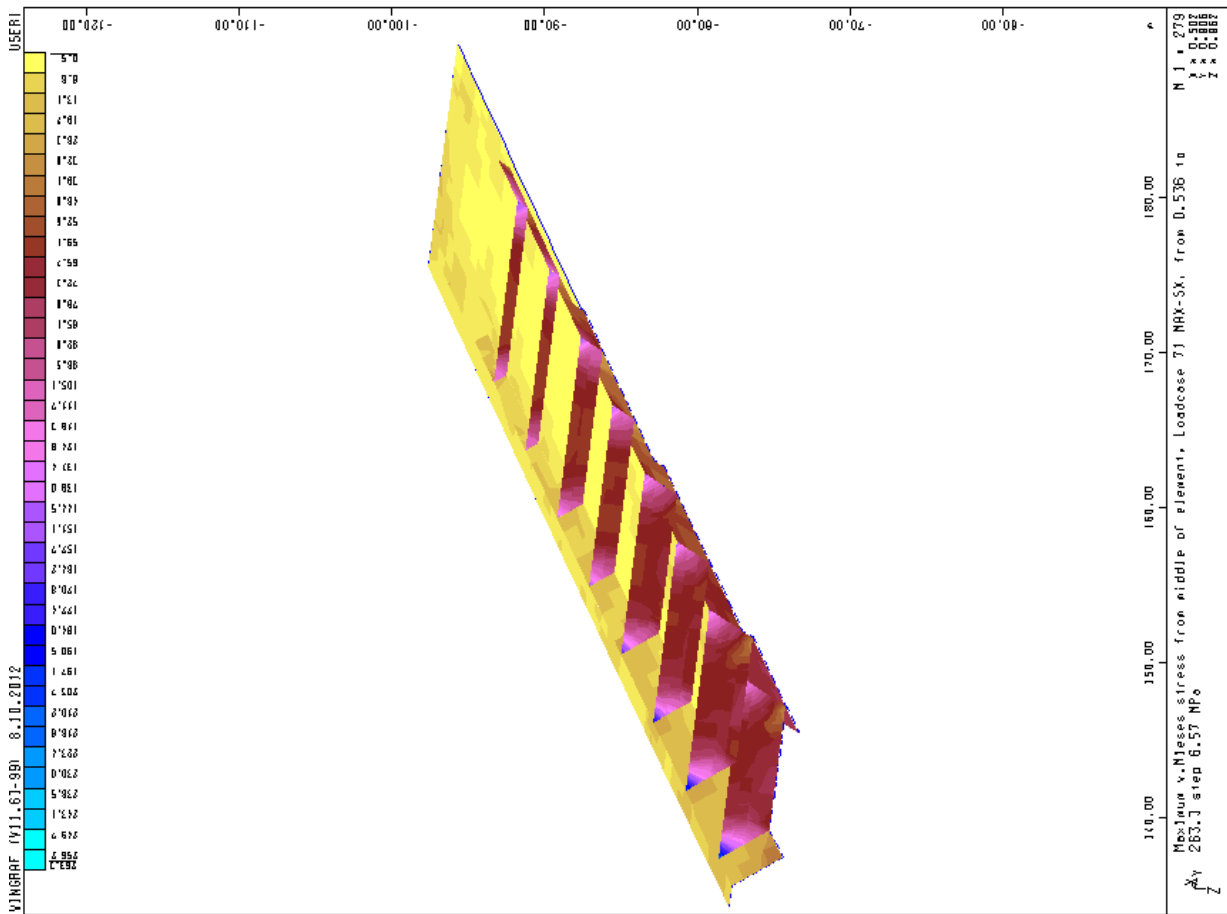
Σχήμα 5.4: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα



Σχήμα 5.3: Κεντρικό άνοιγμα – Κιβωποειδής κύρια δοκός

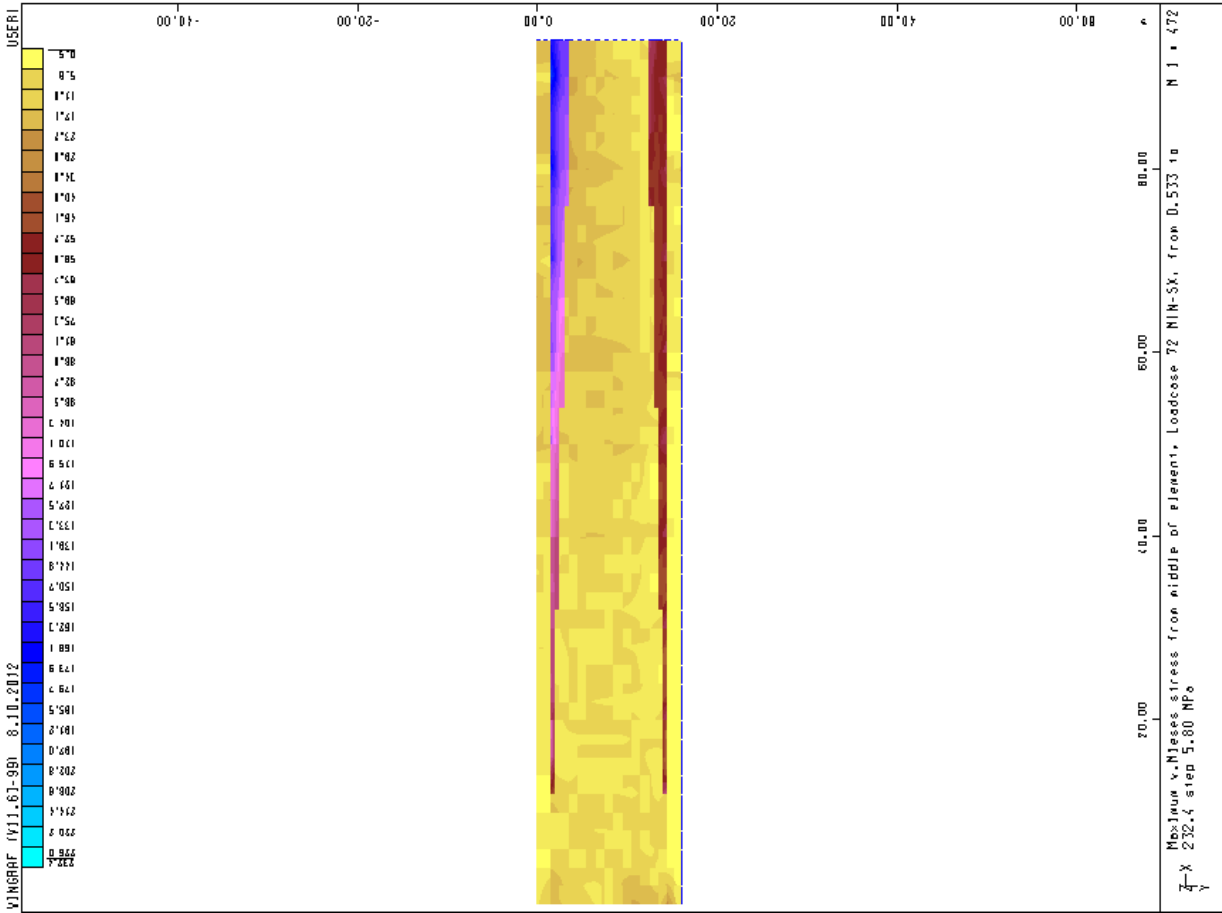


Σχήμα 5.5: Ακράιο άνοιγμα – Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός

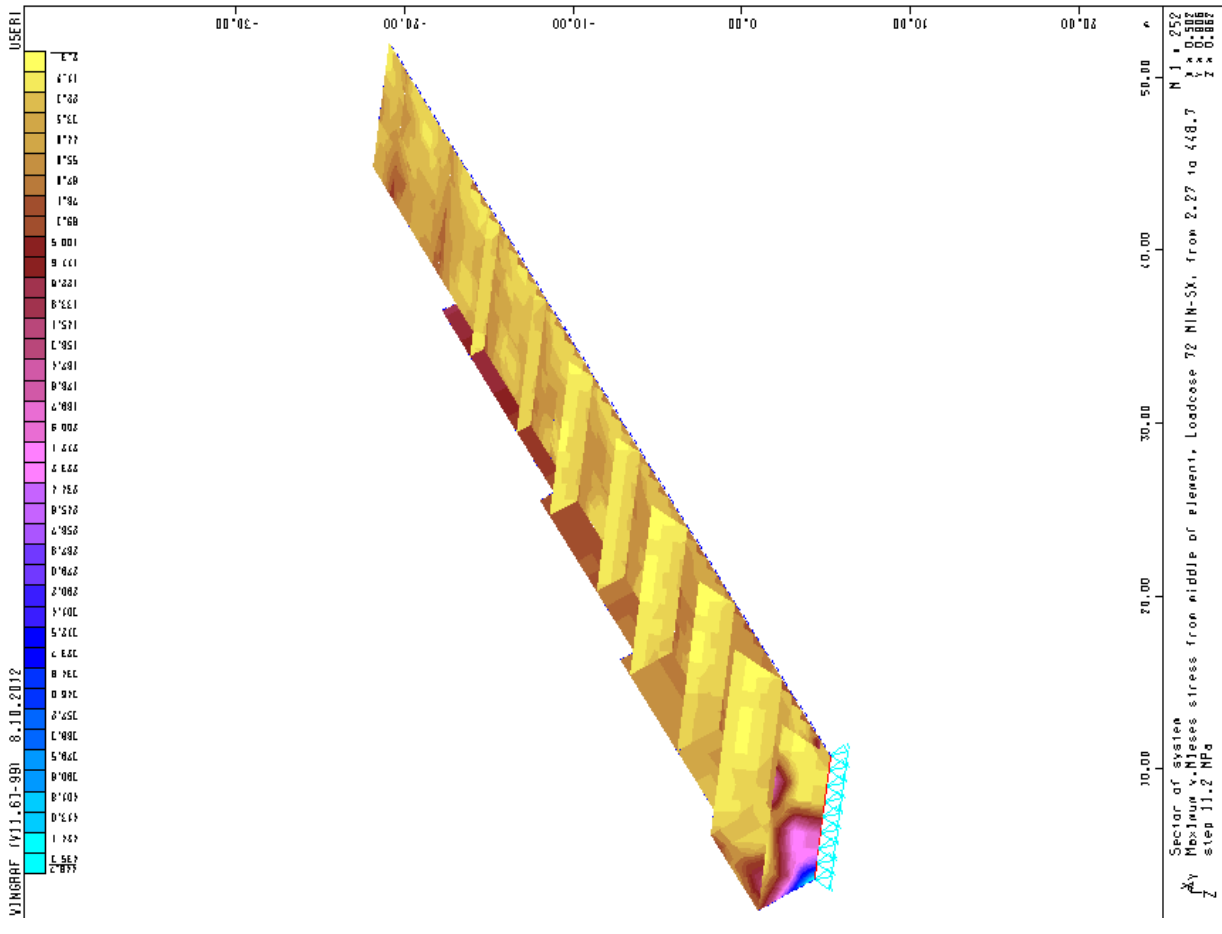


Σχήμα 5.6: Ακράιο άνοιγμα - Κατάστροφα

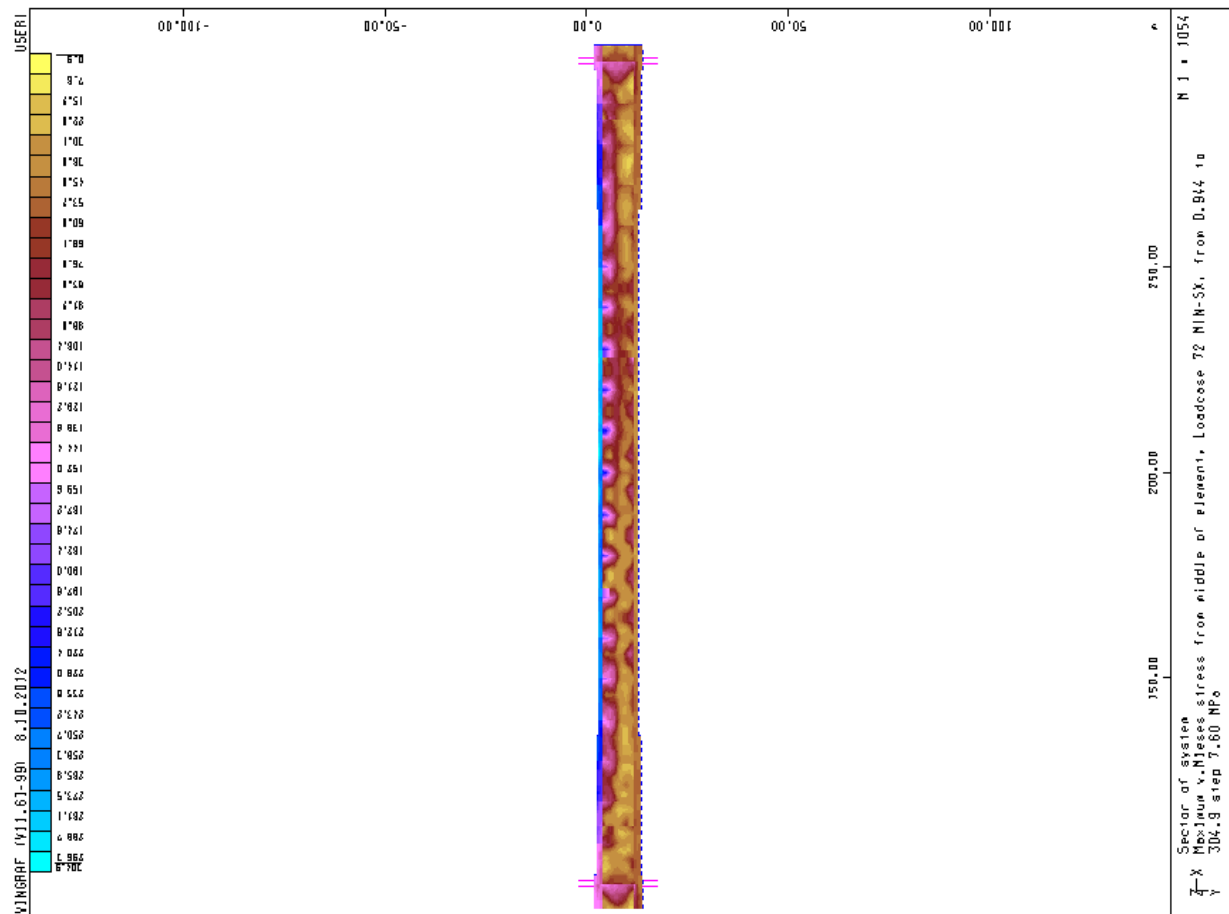
Min Sx



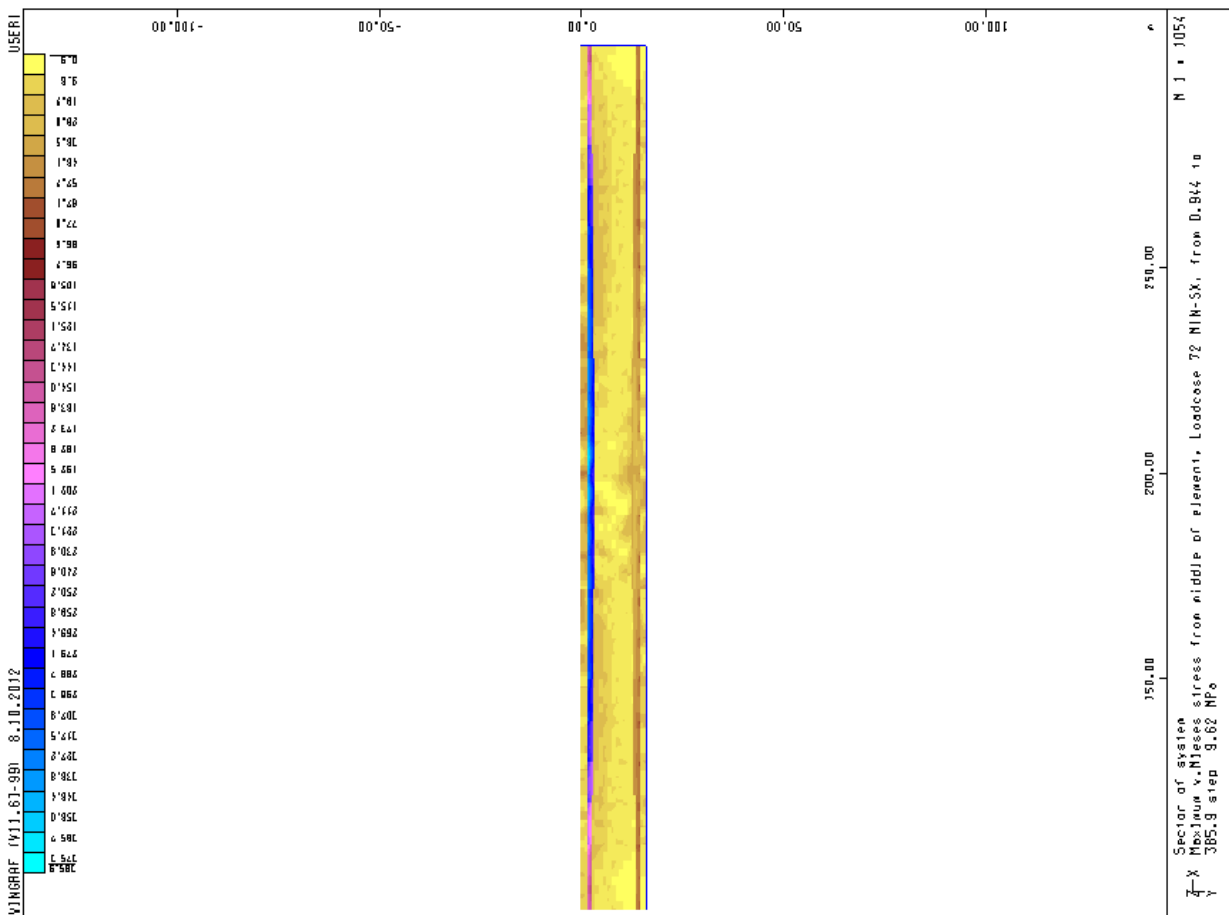
Σχήμα 5.8: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



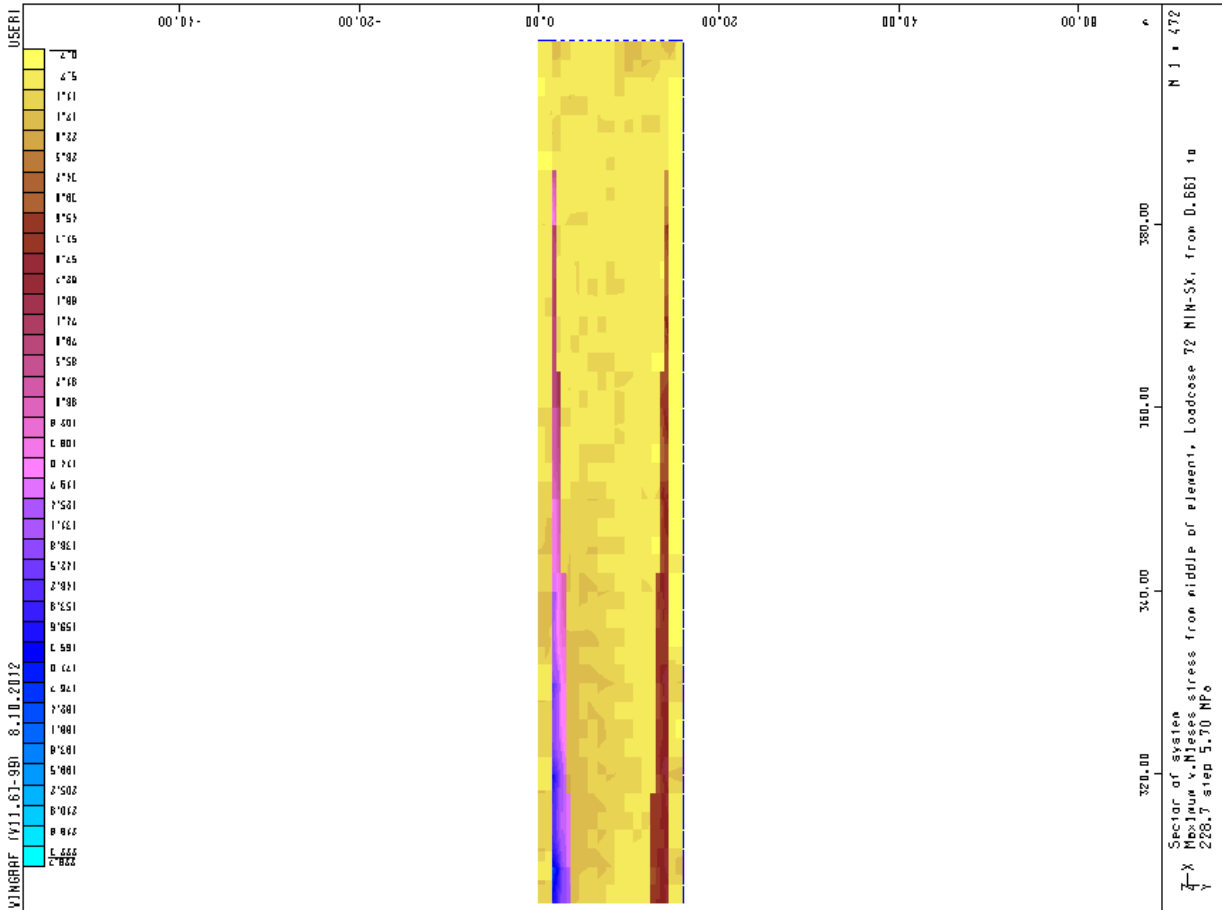
Σχήμα 5.7: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιητής κύρια δοκός



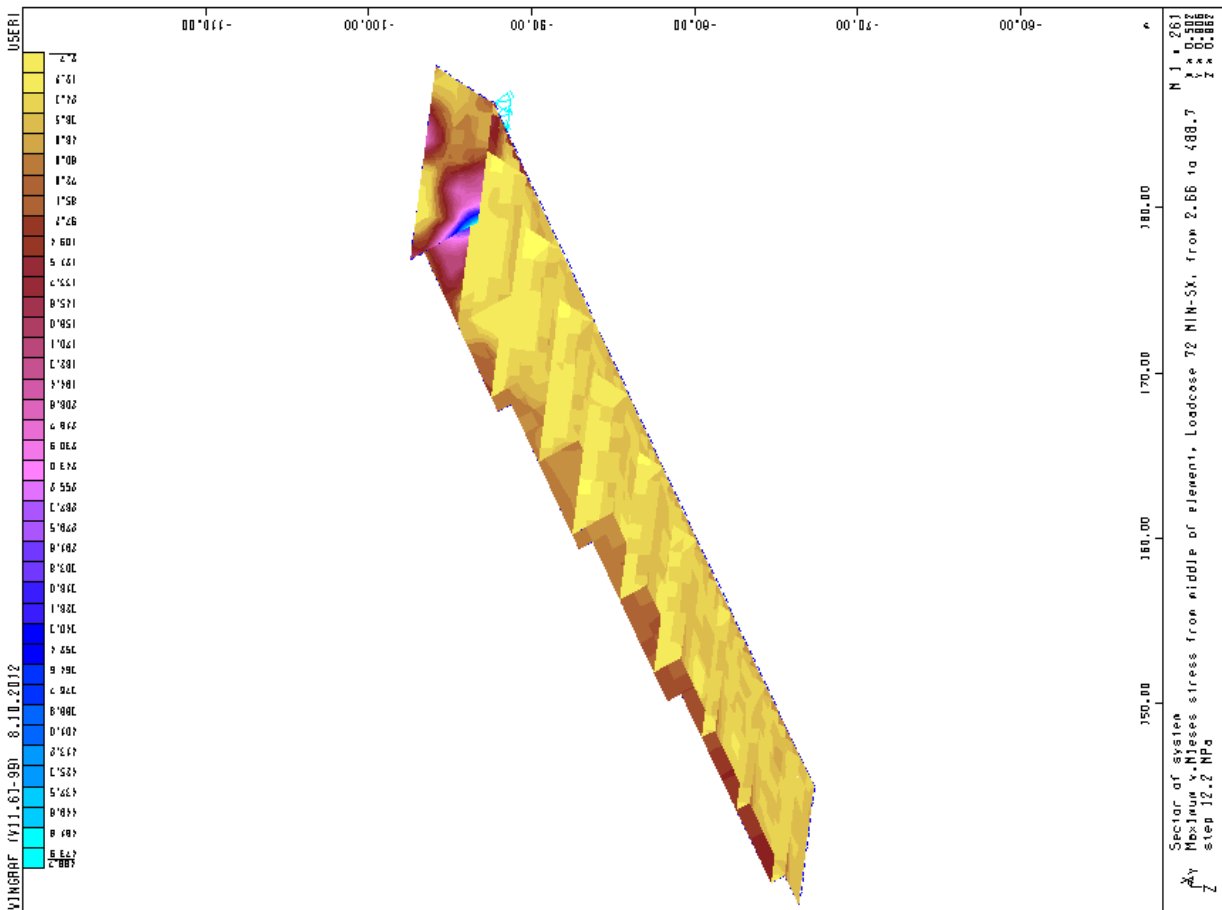
Σχήμα 5.9: Κεντρικό άνοιγμα – Κιβωποειδής κύρια δοκός



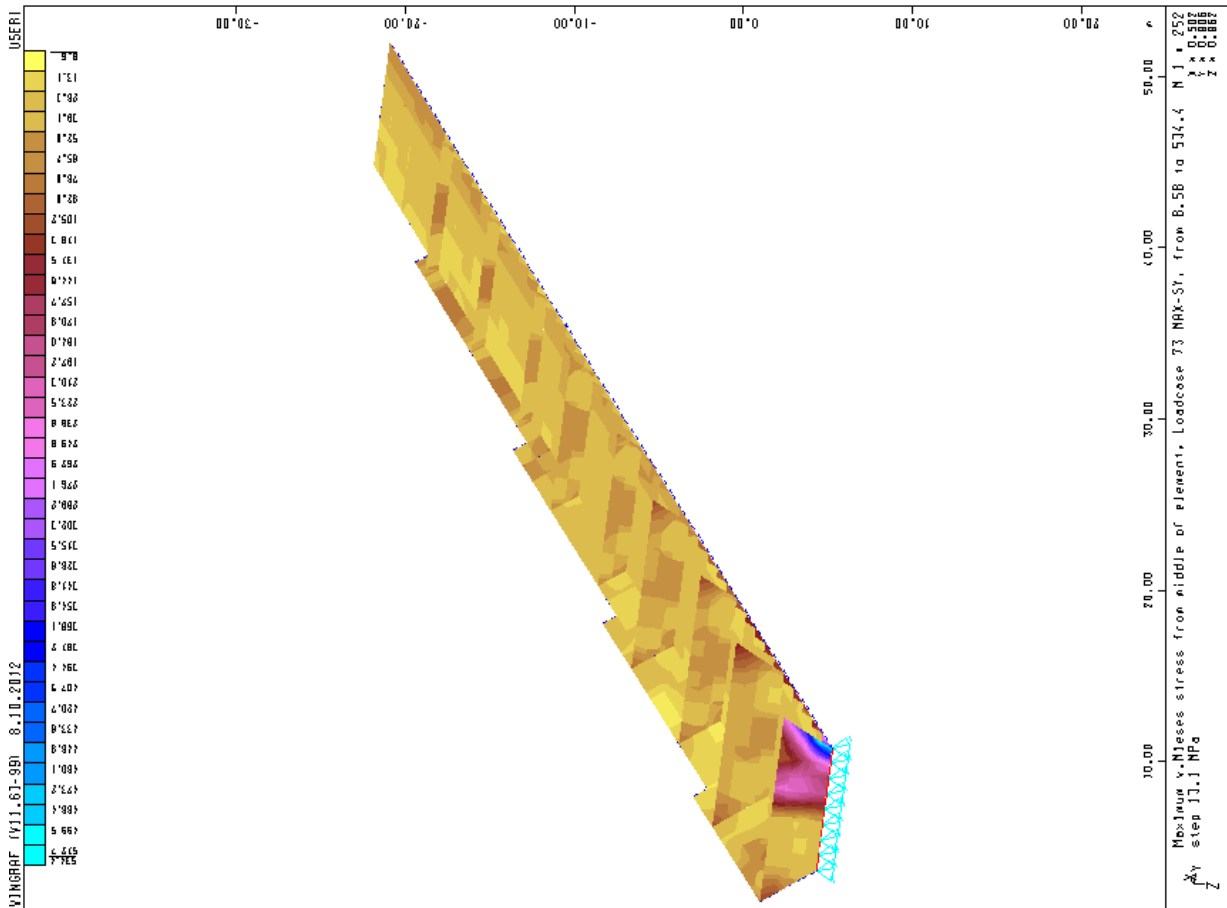
Σχήμα 5.10: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα



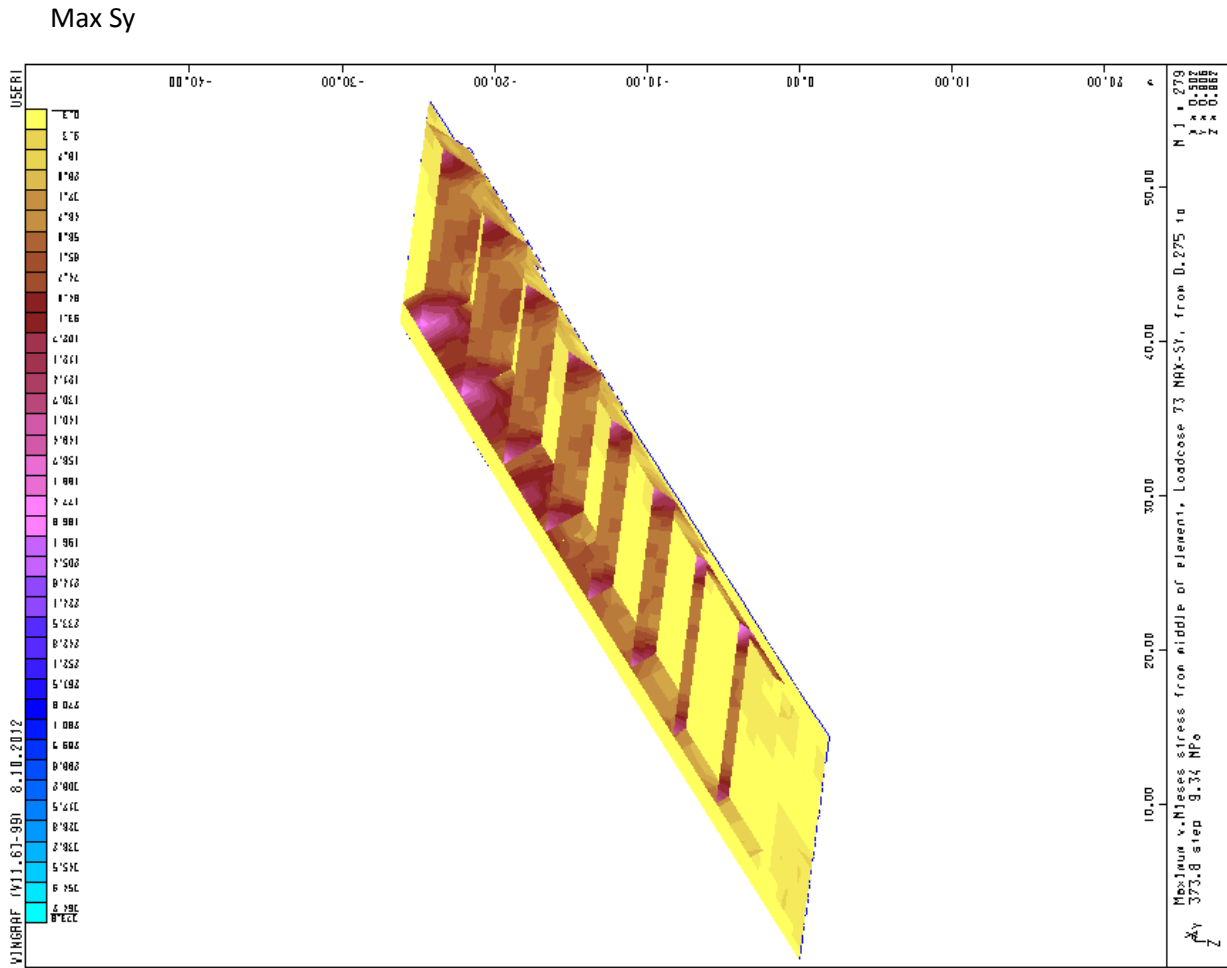
Σχήμα 5.12: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



Σχήμα 5.11: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιείδης κύρια δοκός

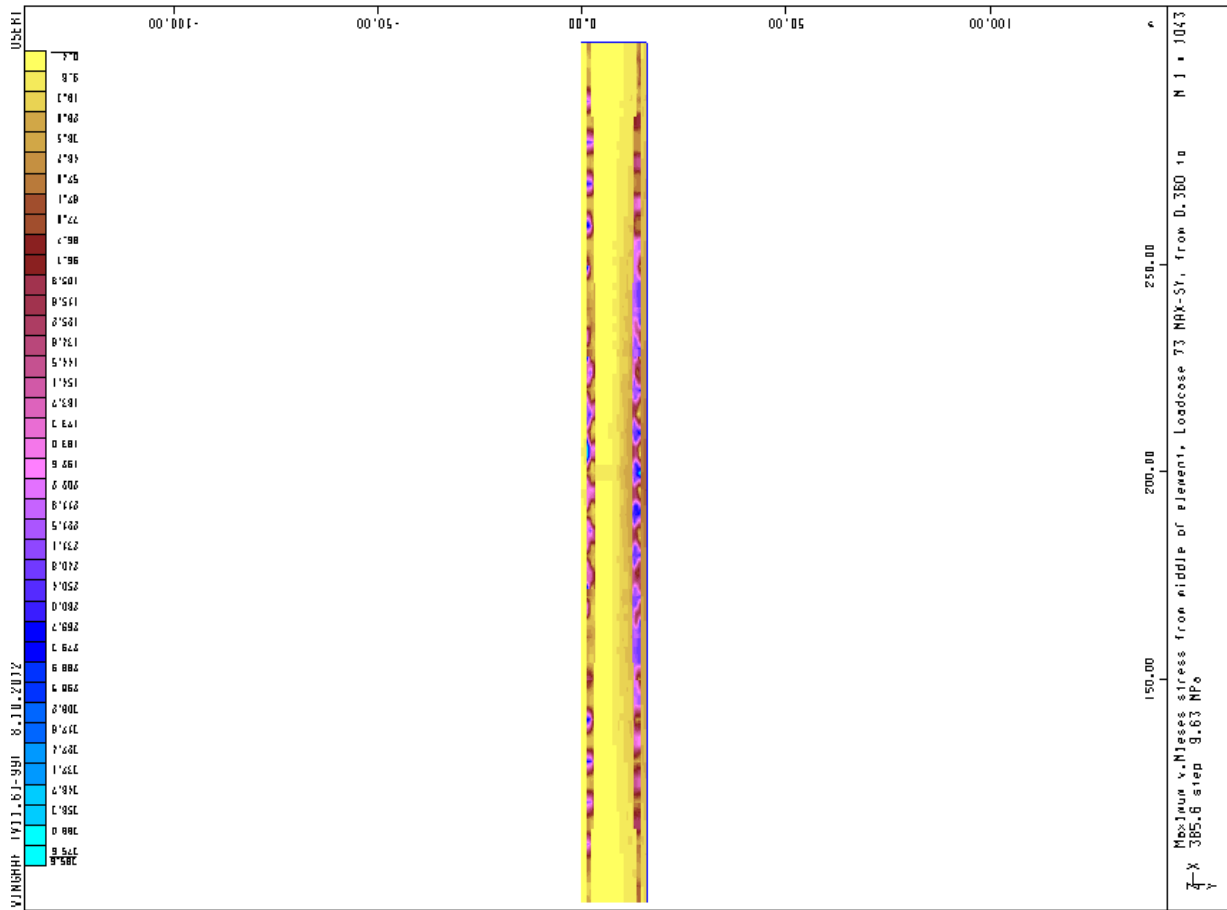


Σχήμα 5.13: Ακράτιο άνοιγμα – Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός

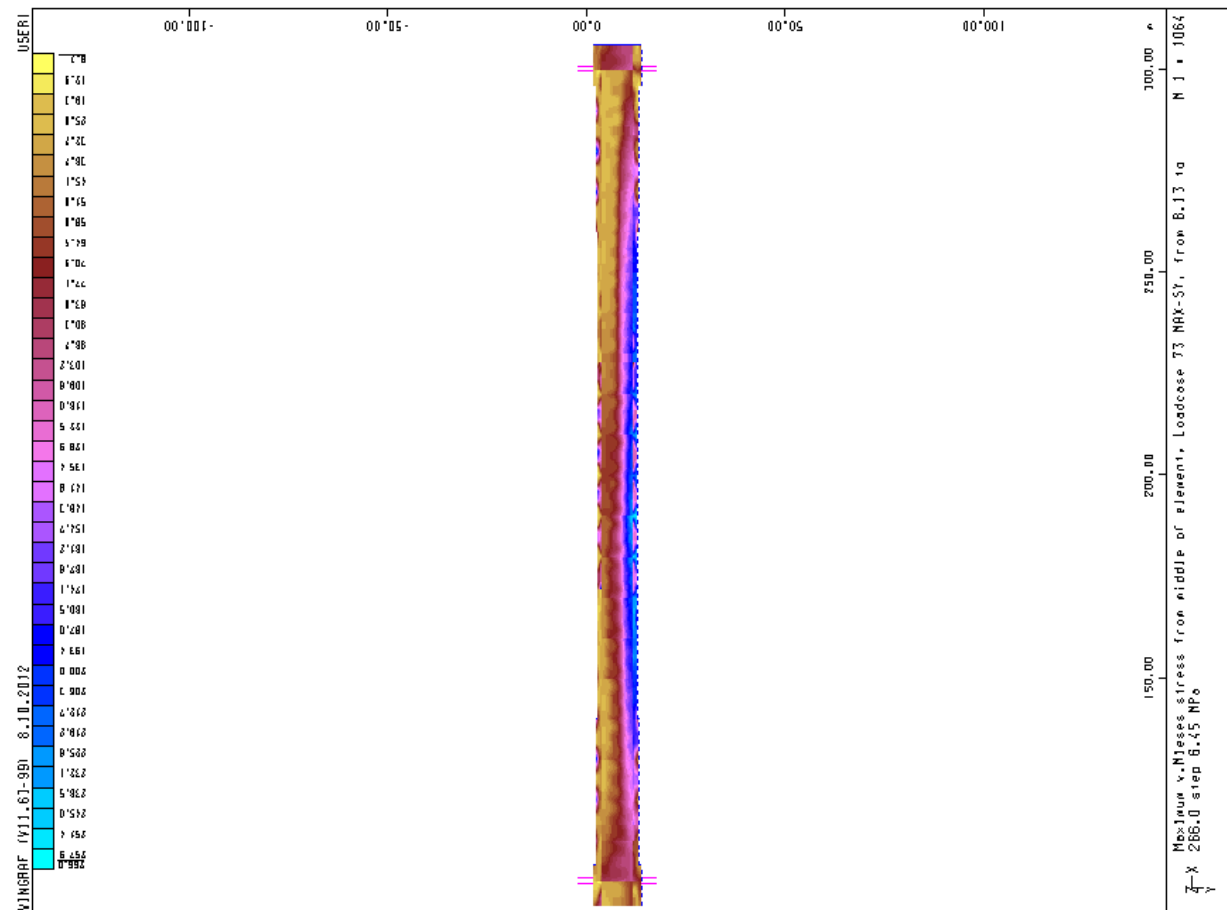


Σχήμα 5.14: Ακράτιο άνοιγμα - Κατάστρωμα

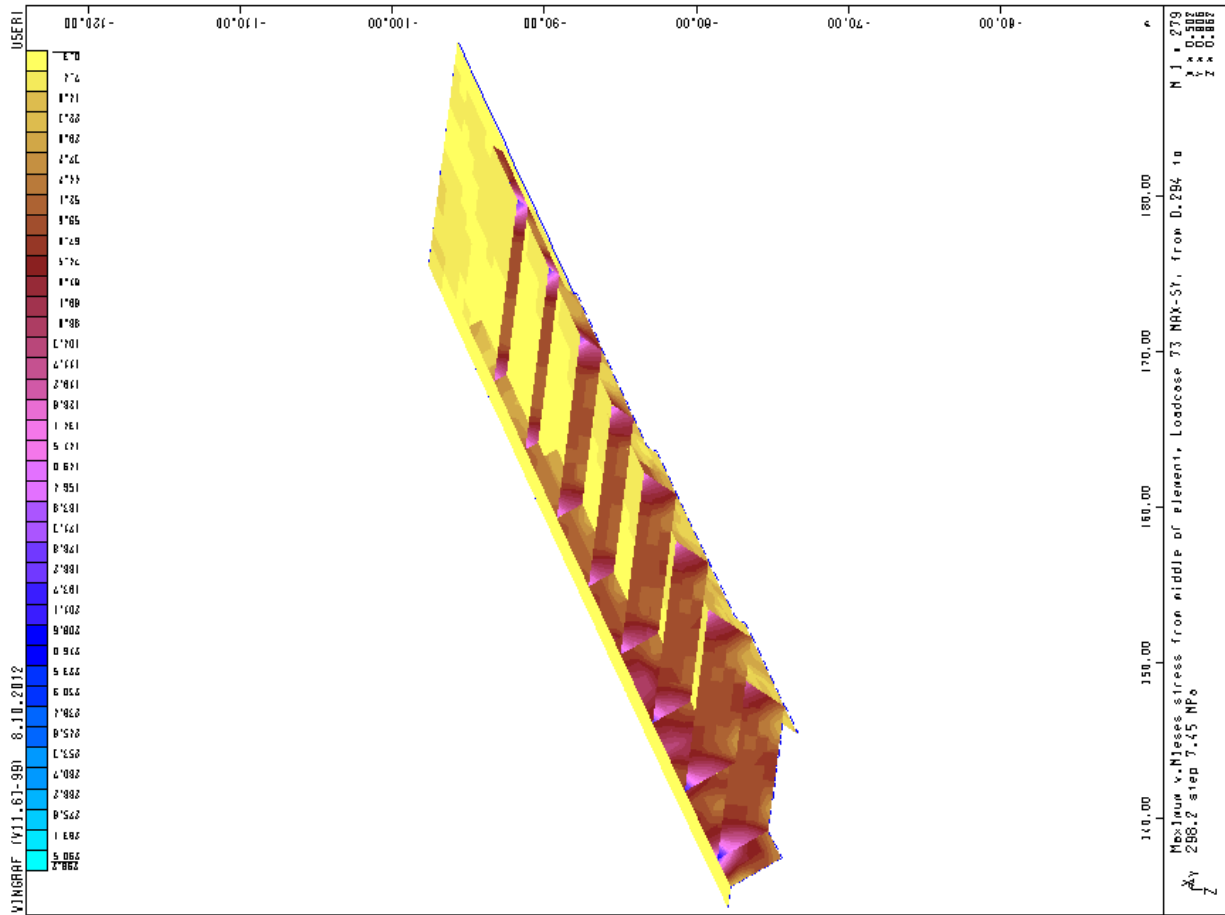
Max Sy



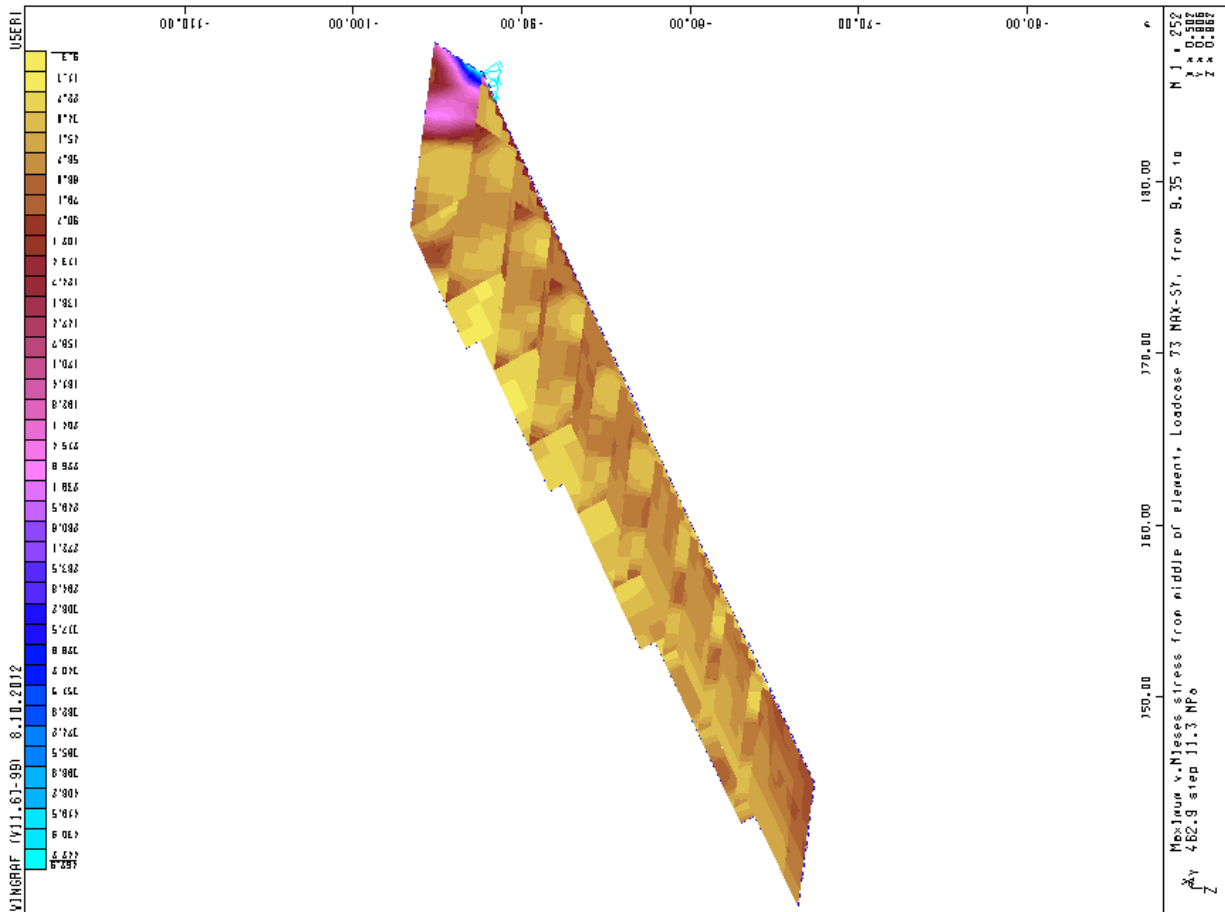
Σχήμα 5.16: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα



Σχήμα 5.15: Κεντρικό άνοιγμα – Κιβωτισιοειδής κύρια δοκός

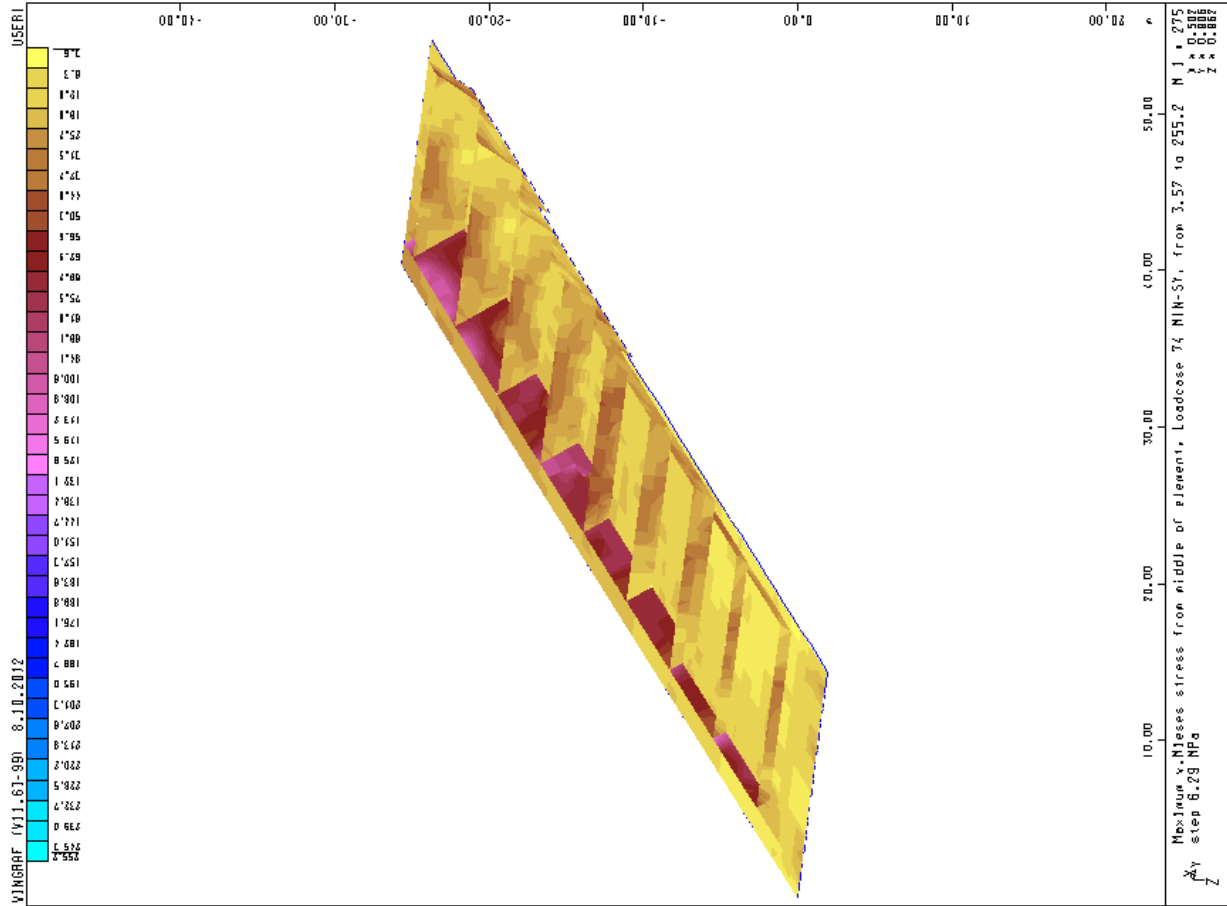


Σχήμα 5.18: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

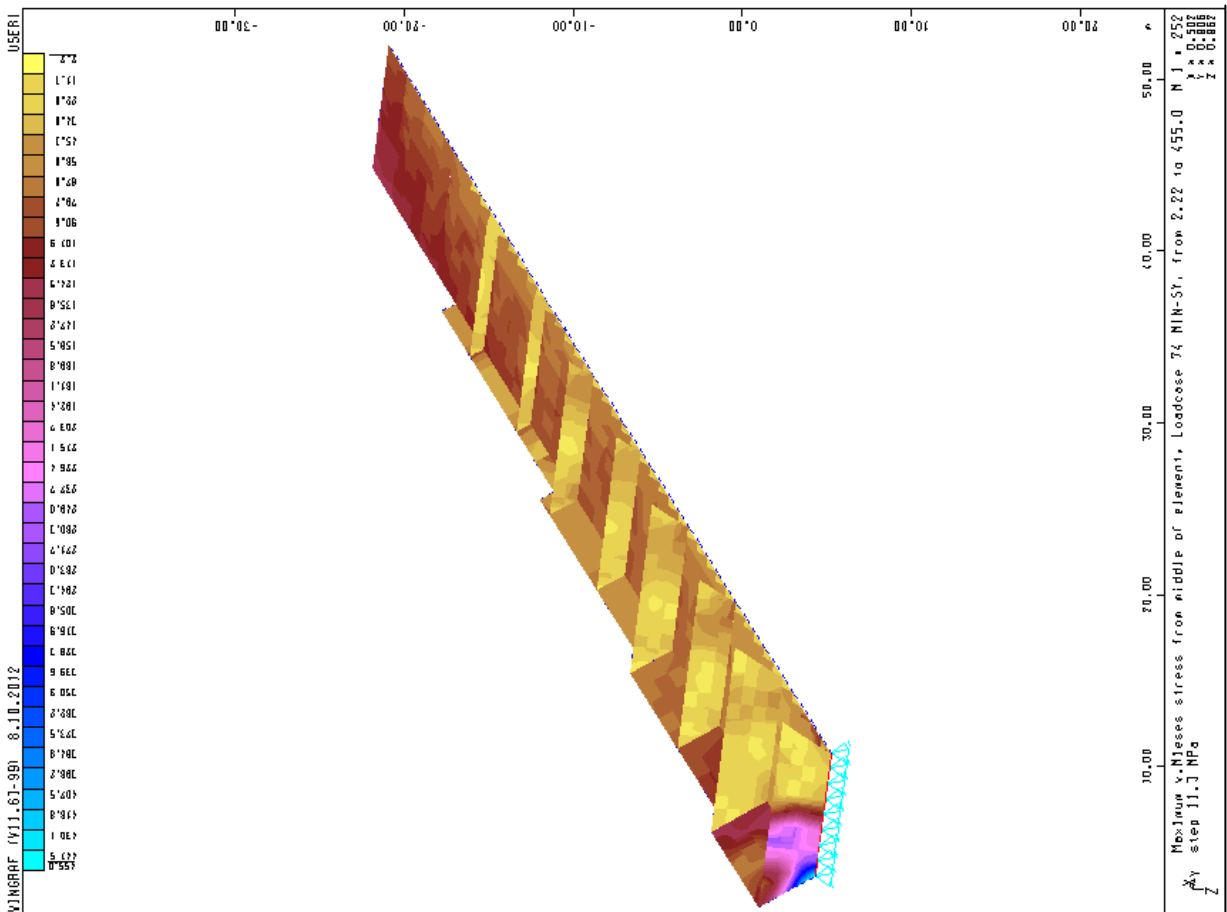


Σχήμα 5.17: Ακραίο άνοιγμα - Κιβωτοποιιής κύρια δοκός

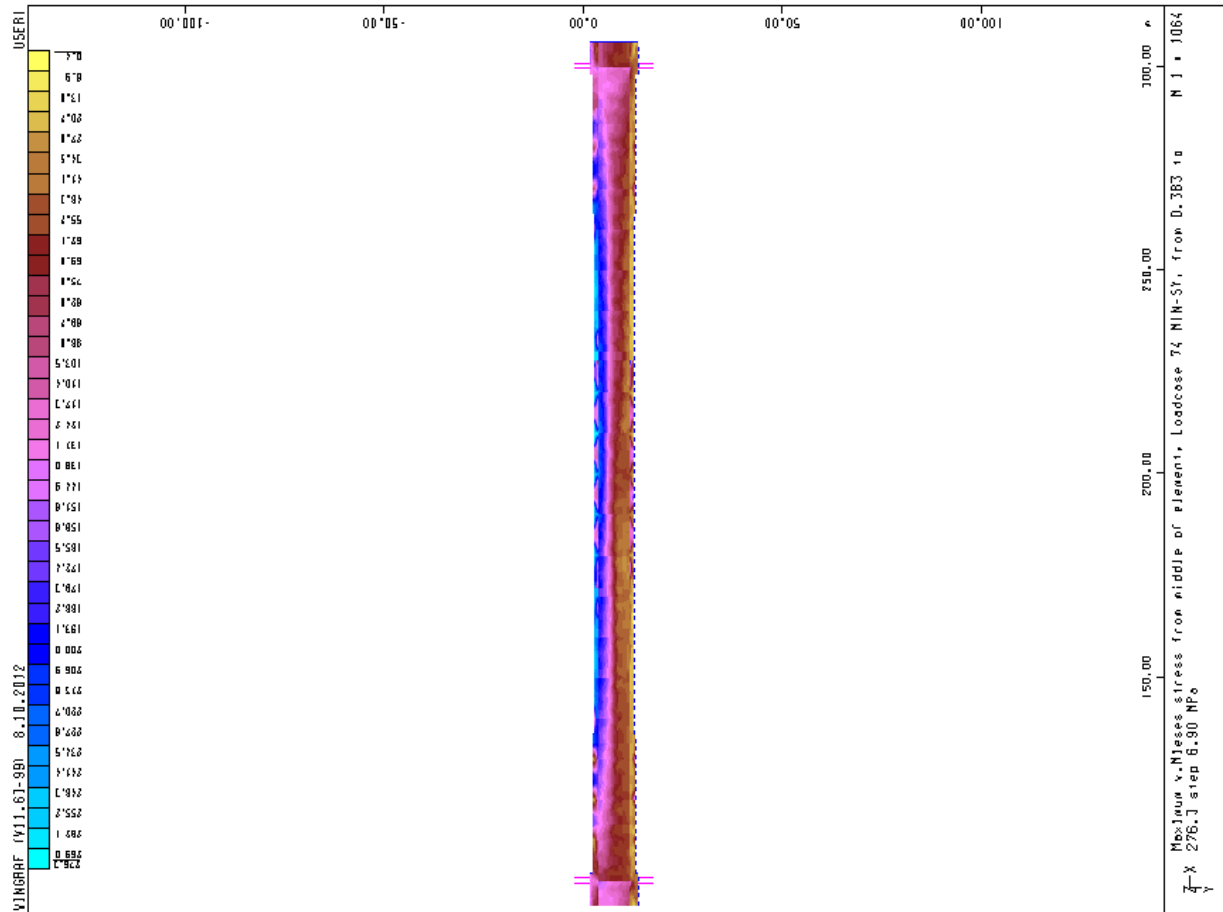
Min Sy



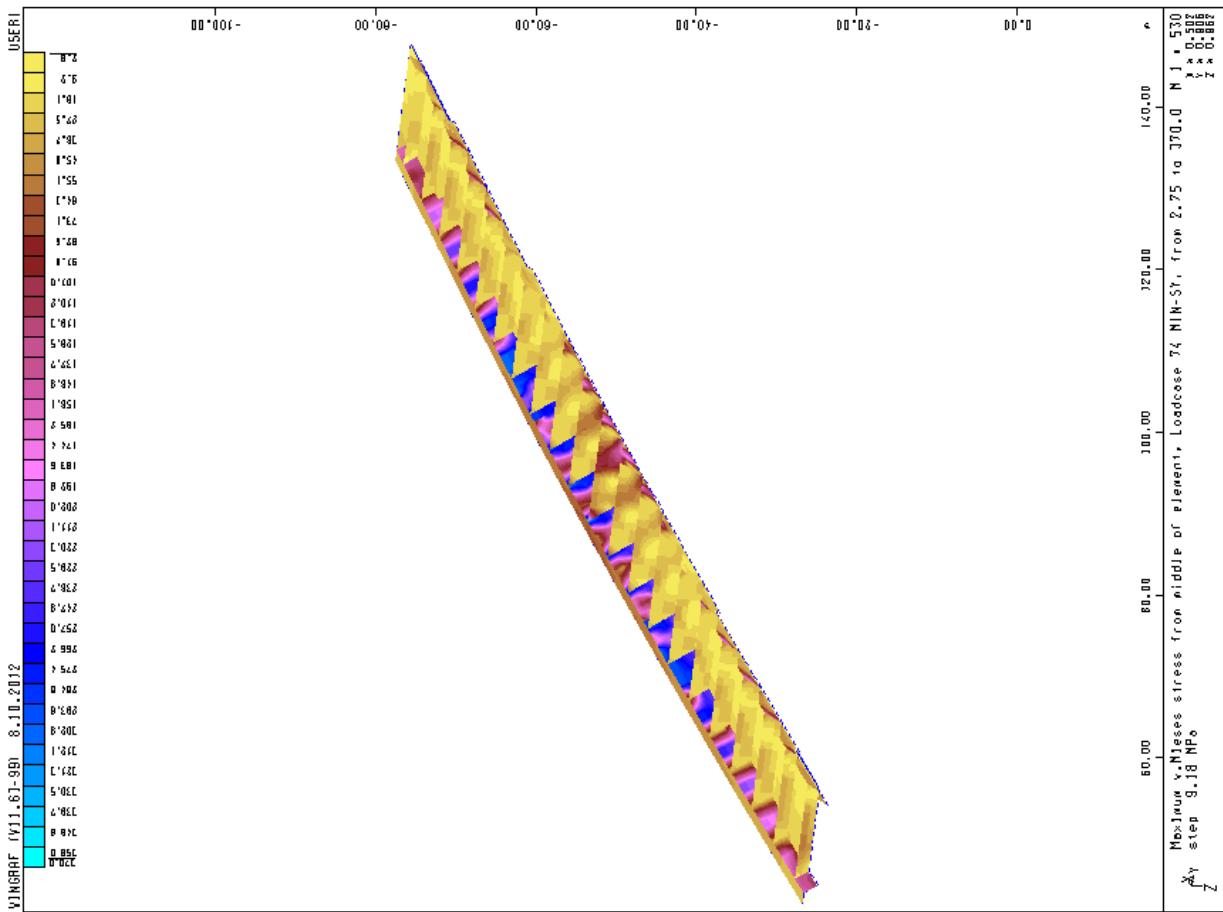
Σχήμα 5.20: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



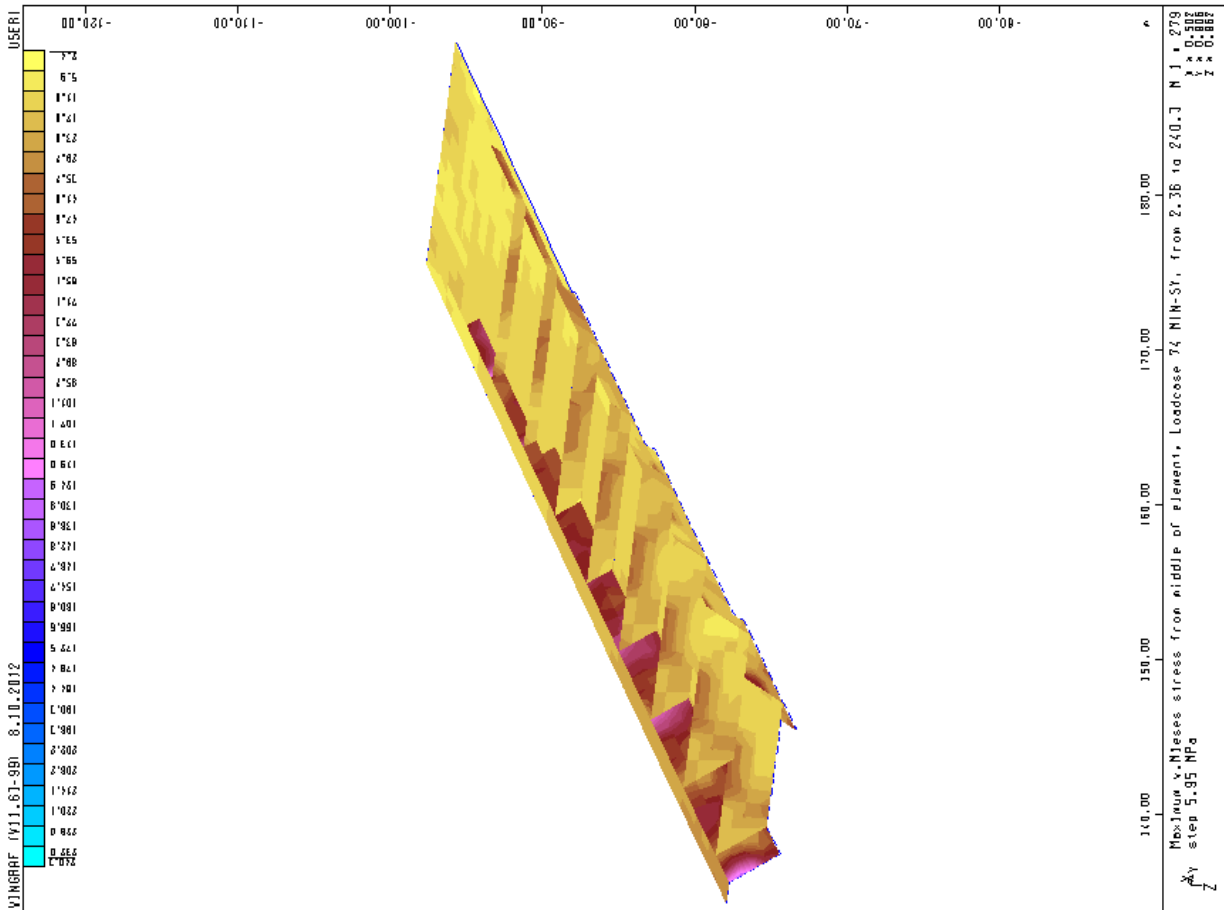
Σχήμα 5.19: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιείδης κύρια δοκός



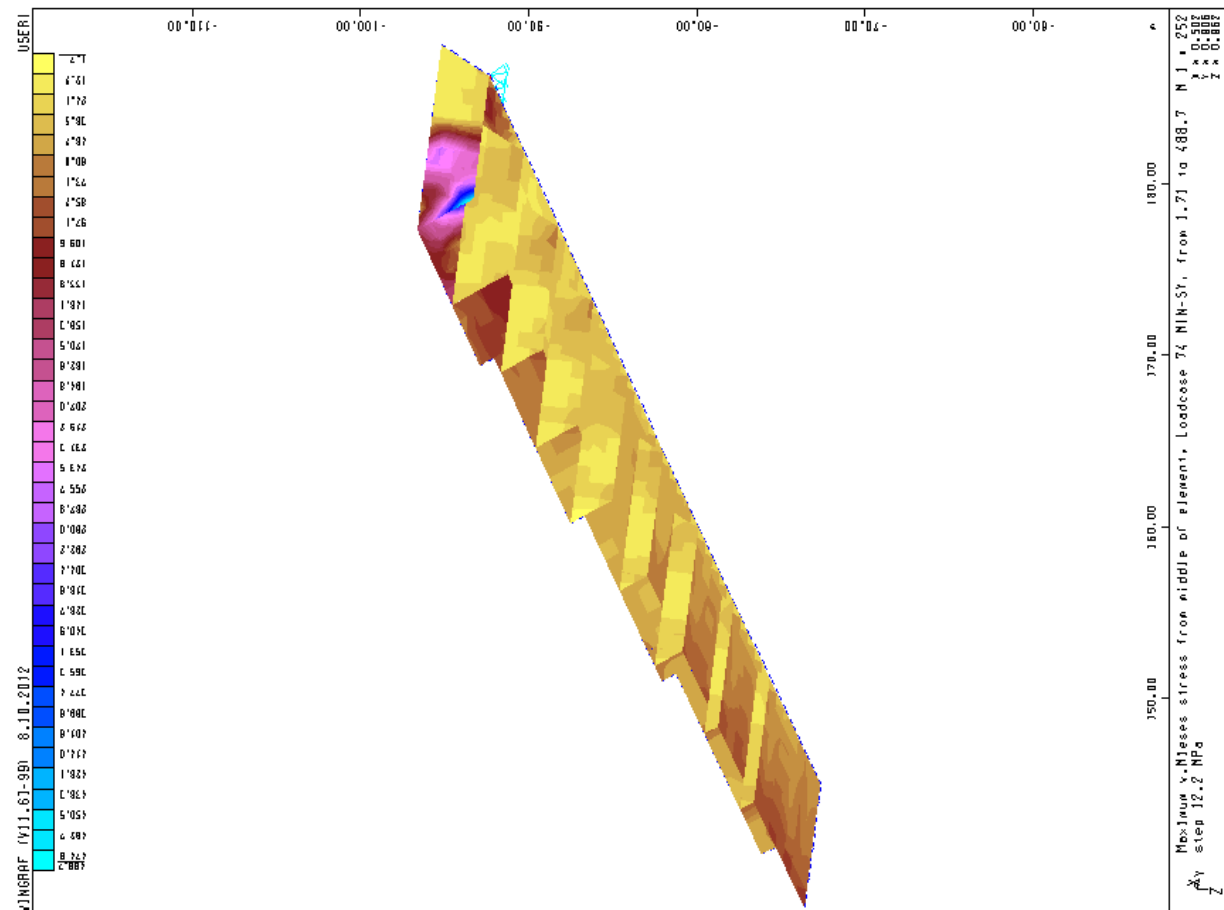
Σχήμα 5.21: Κεντρικό άνοιγμα – Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός



Σχήμα 5.22: Κεντρικό άνοιγμα – Κατάστρωμα

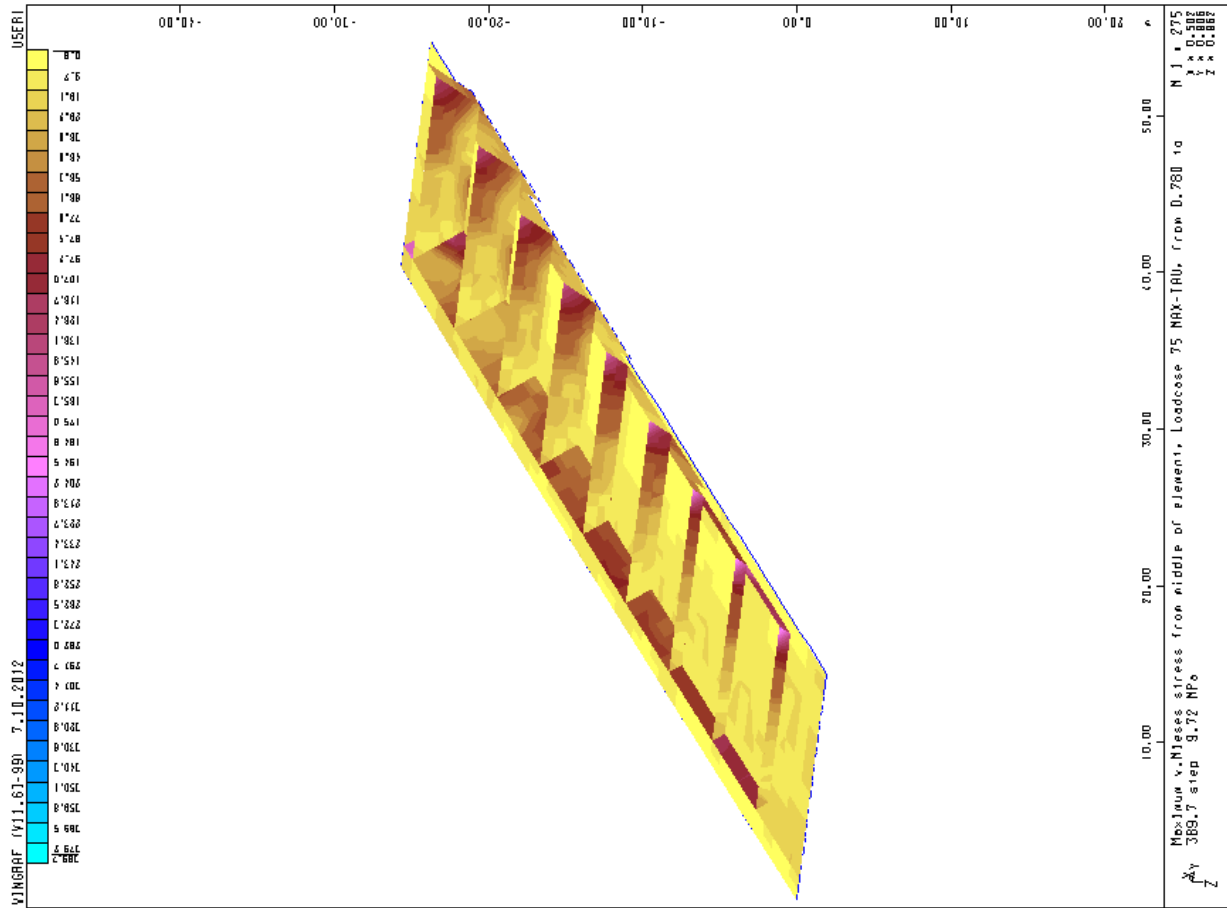


Σχήμα 5.24: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

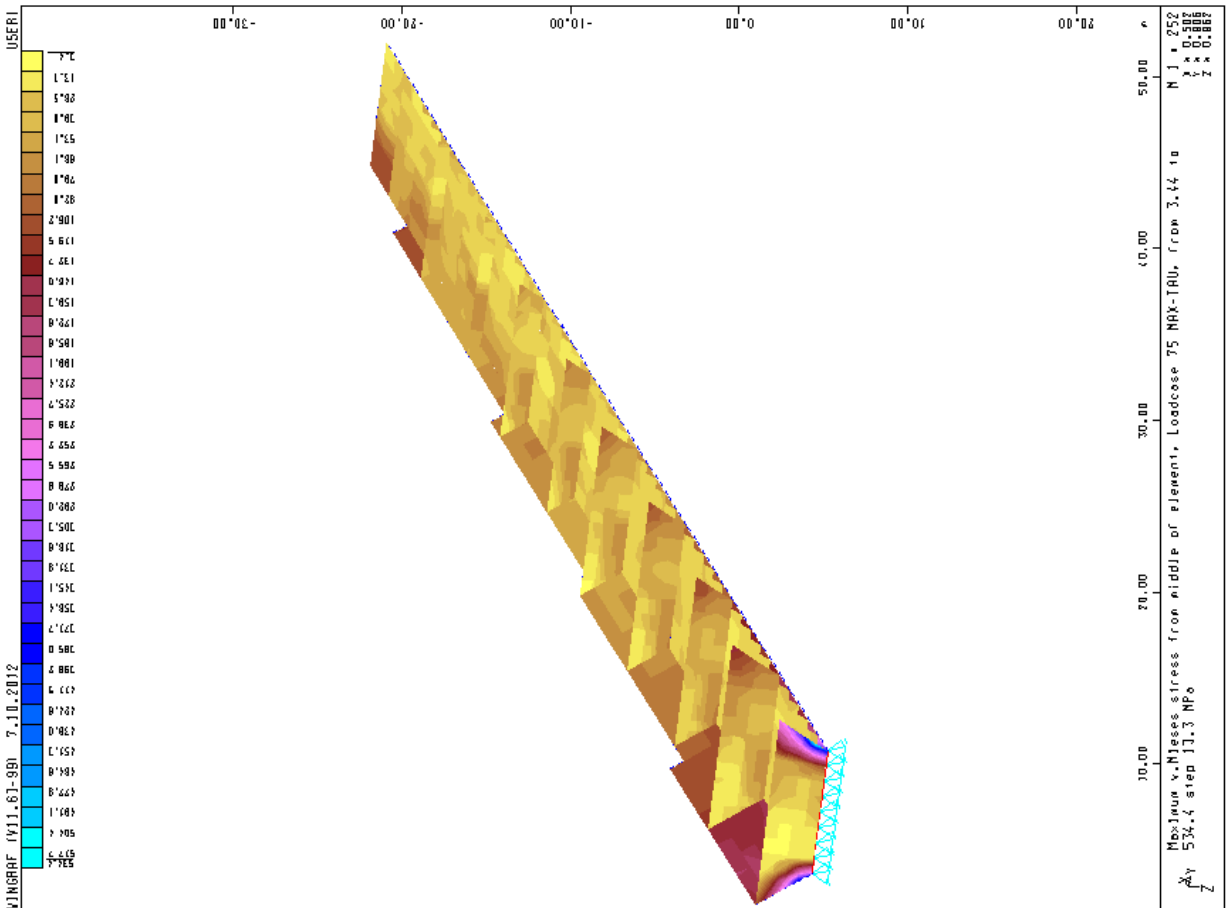


Σχήμα 5.23: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοειδής κύρια δοκός

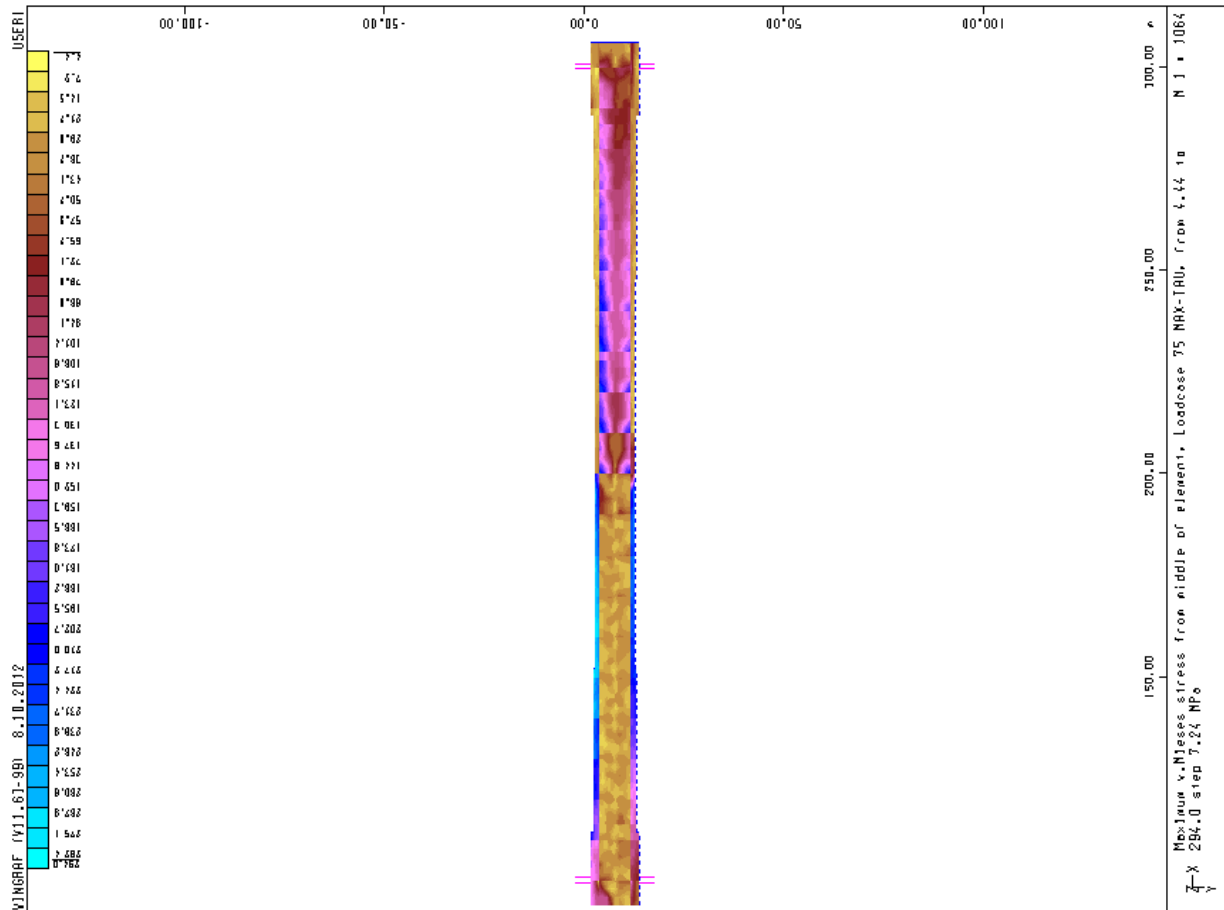
Max TAU



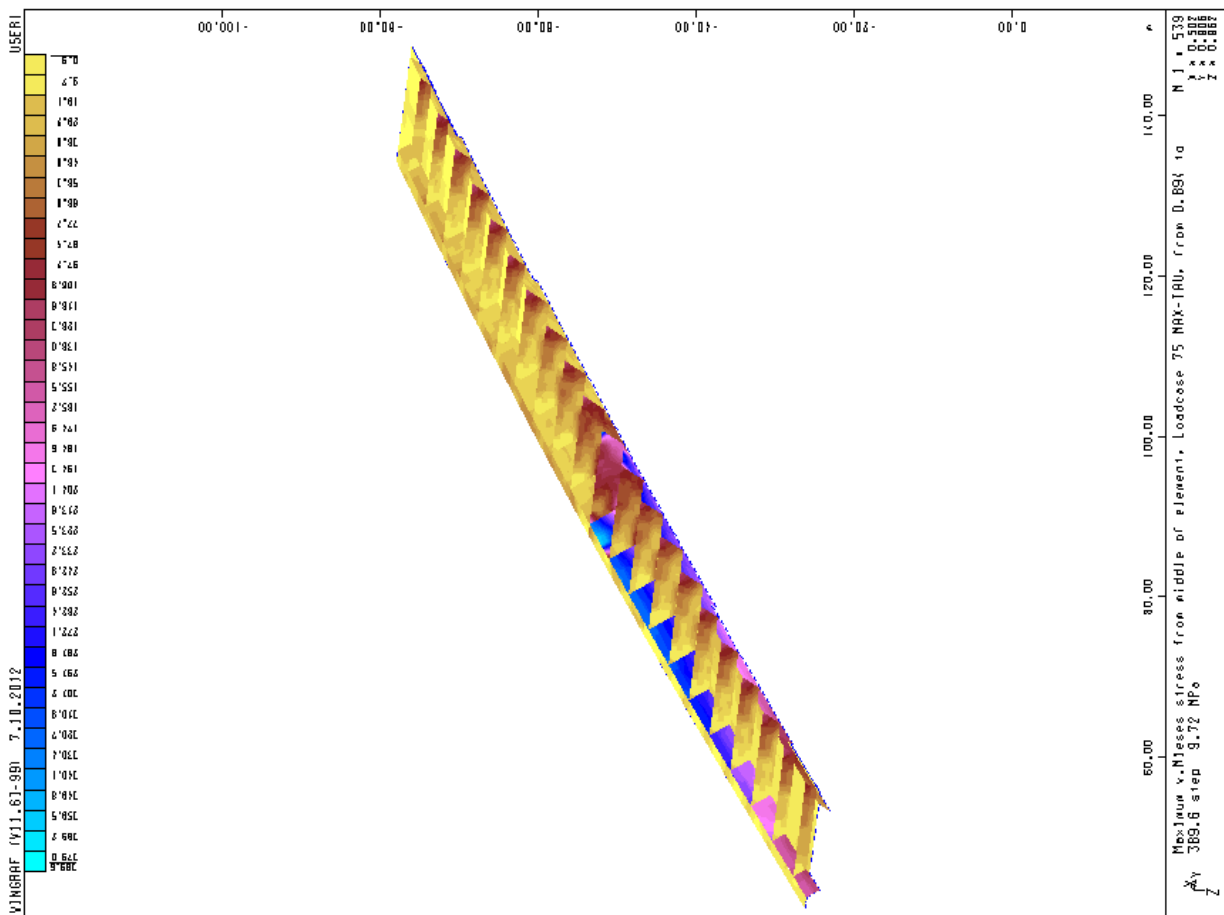
Σχήμα 5.26: Ακράιο άνοιγμα - Κατάστρωμα



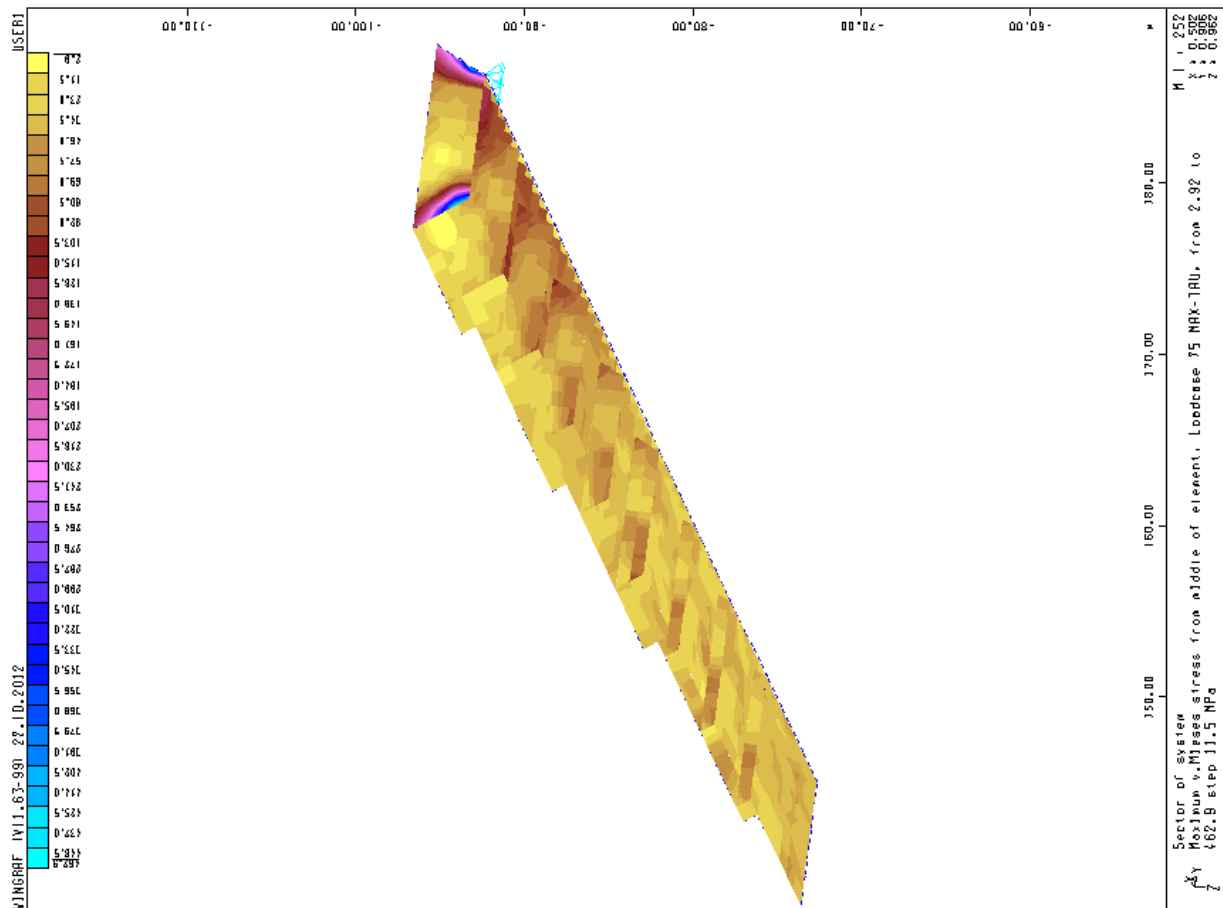
Σχήμα 5.25: Ακράιο άνοιγμα – Κιβωτοποιιδής κύρια δοκός



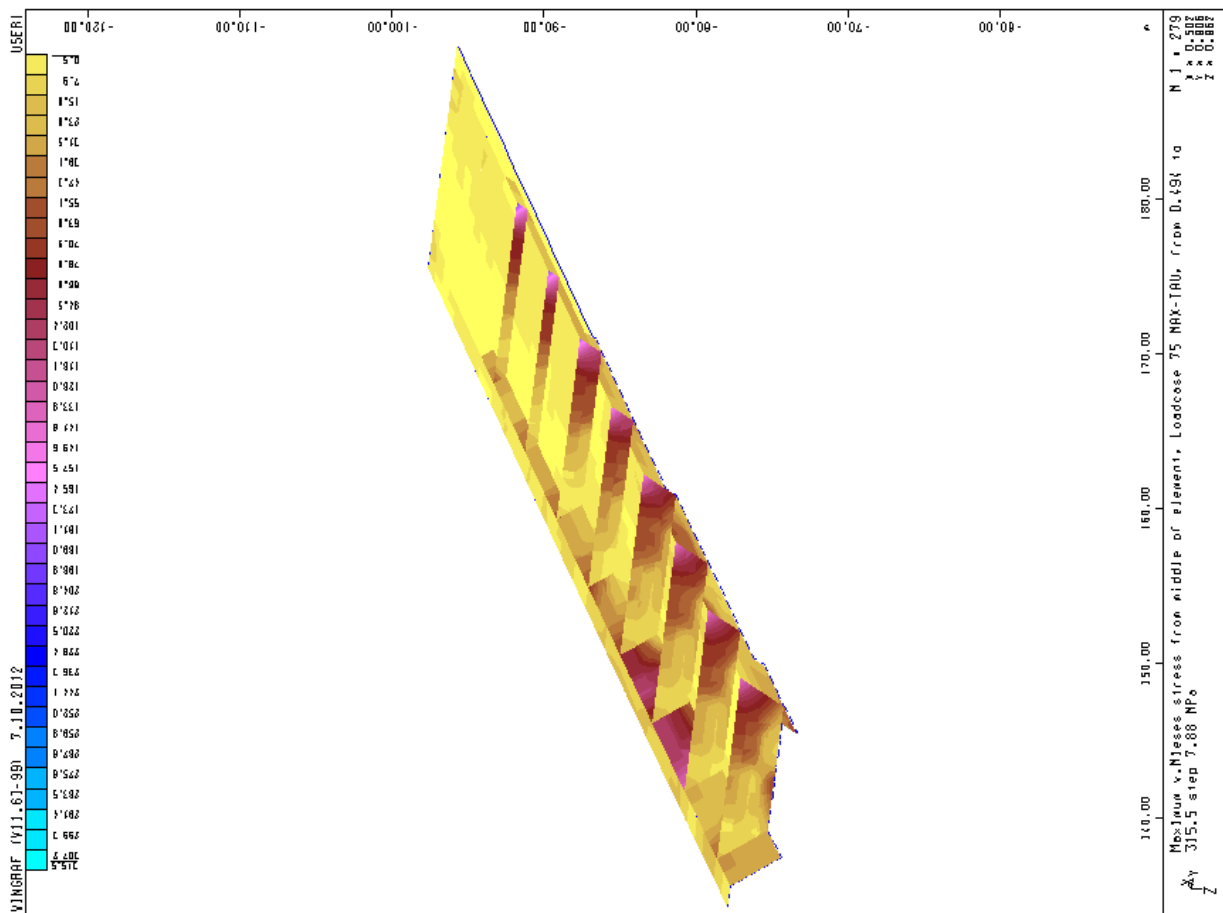
Σχήμα 5.27: Κεντρικό άνοιγμα – Κιβωτισιοειδής κύρια δοκός



Σχήμα 5.28: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα

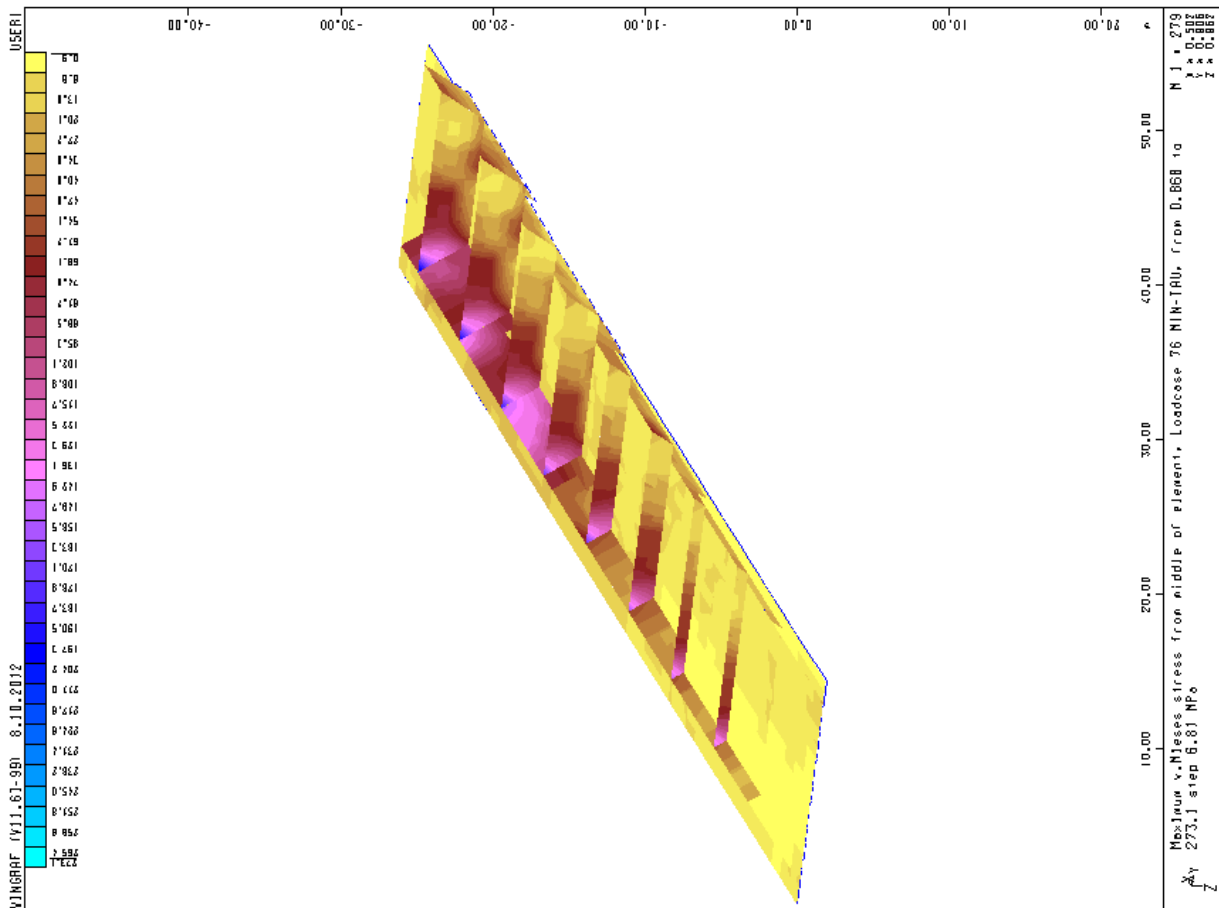


Σχήμα 5.28: Ακραίο άνοιγμα - Κιβωποειδής κύρια δοκός

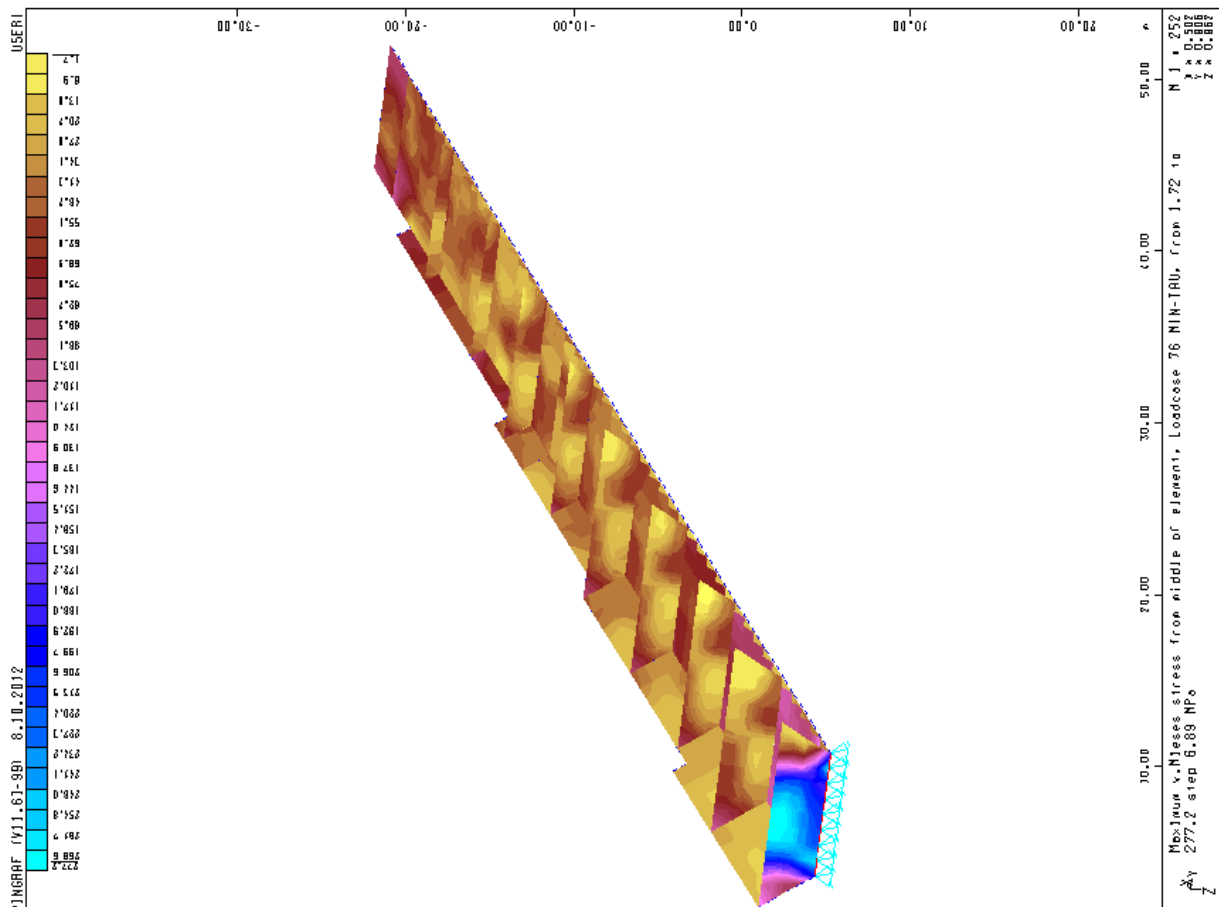


Σχήμα 5.29: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

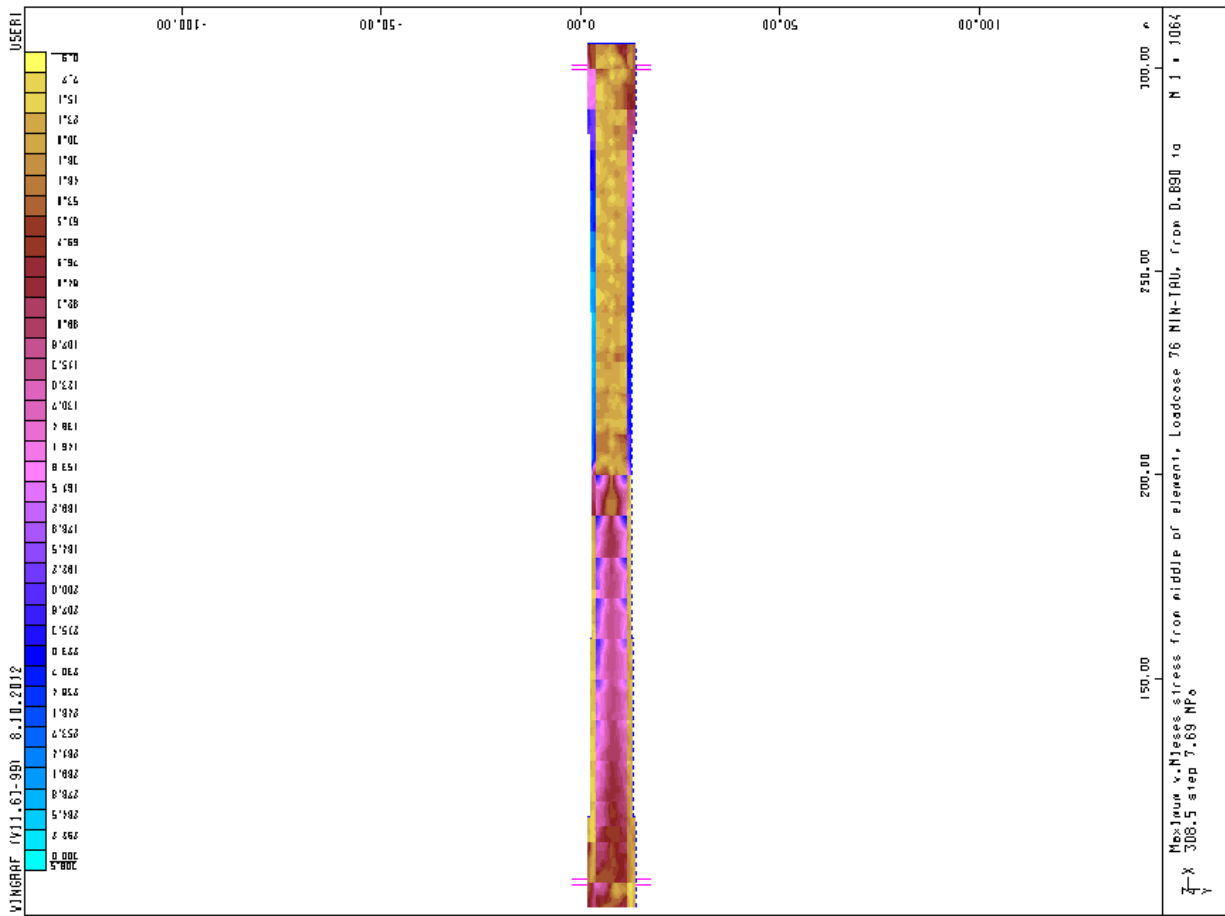
Min TAU



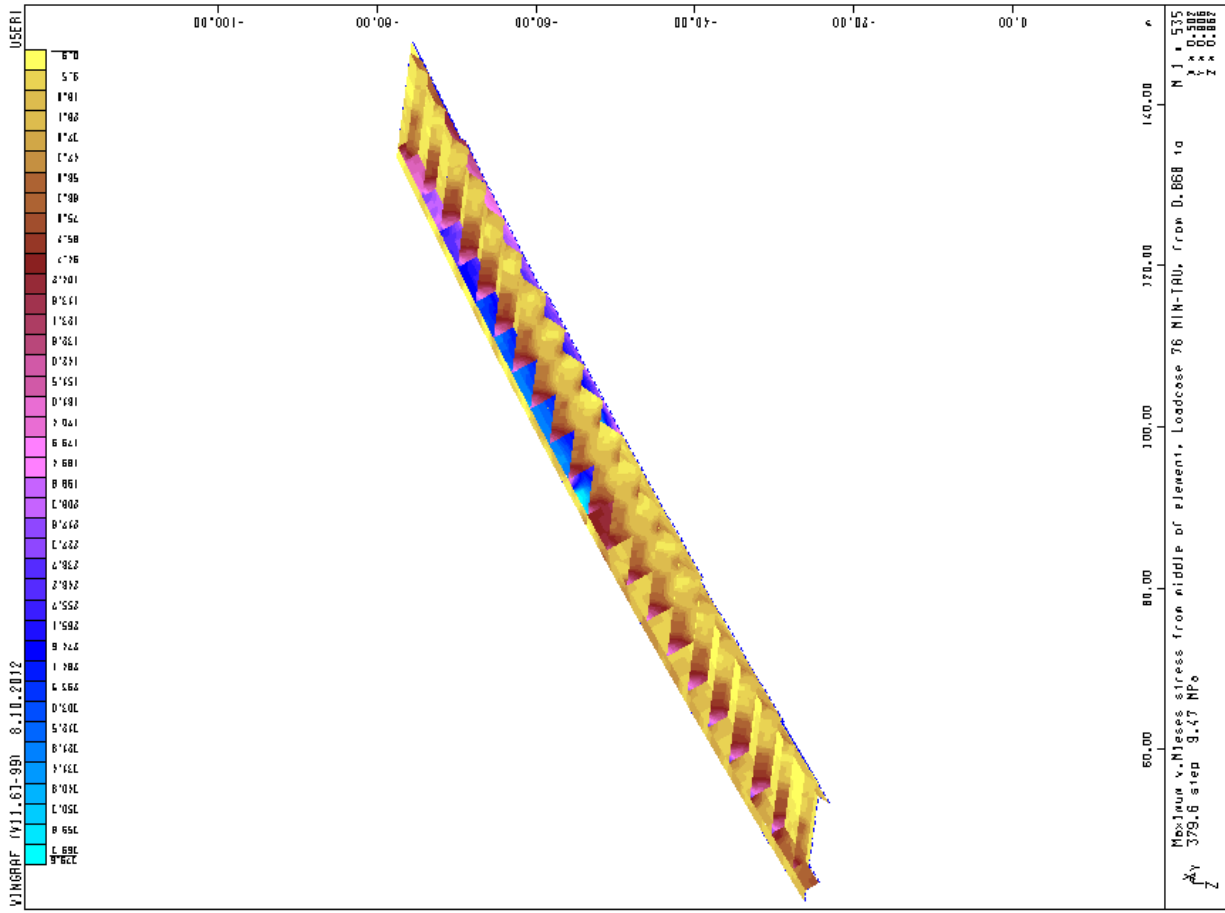
Σχήμα 5.32: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



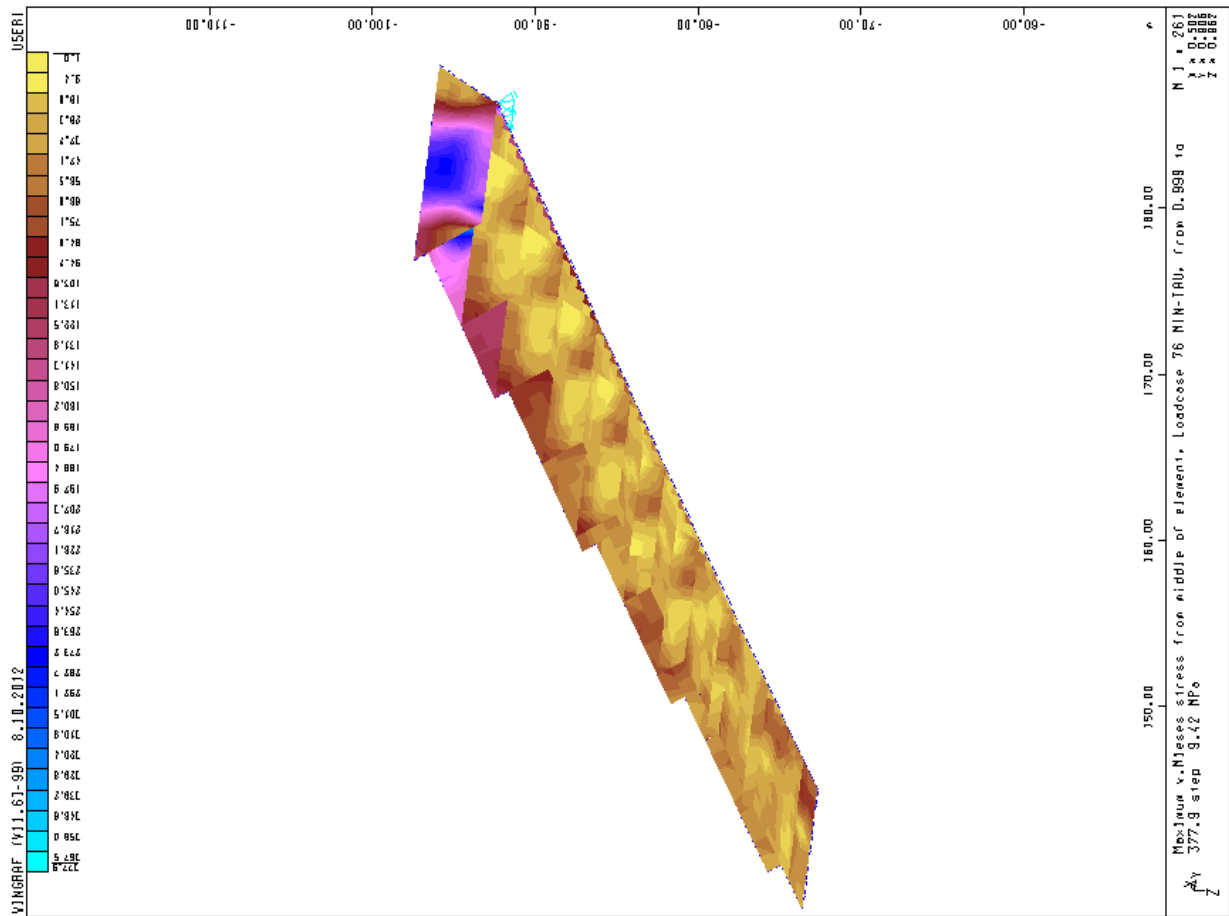
Σχήμα 5.31: Ακραίο άνοιγμα - Κιβωτοειδής κύρια δοκός



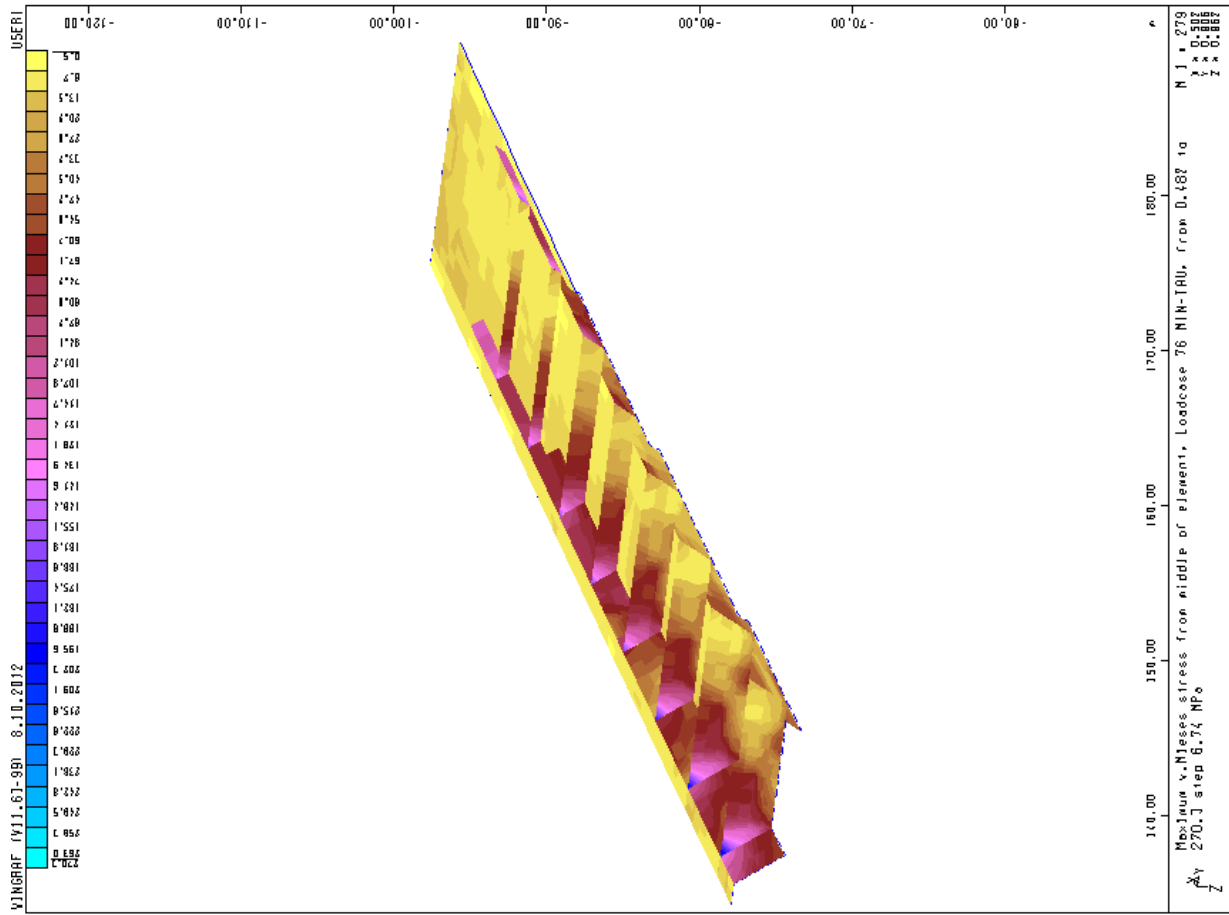
Σχήμα 5.33: Κεντρικό άνοιγμα – Κιβωτιοειδής κύρια δοκός



Σχήμα 5.34: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάσφρωμα

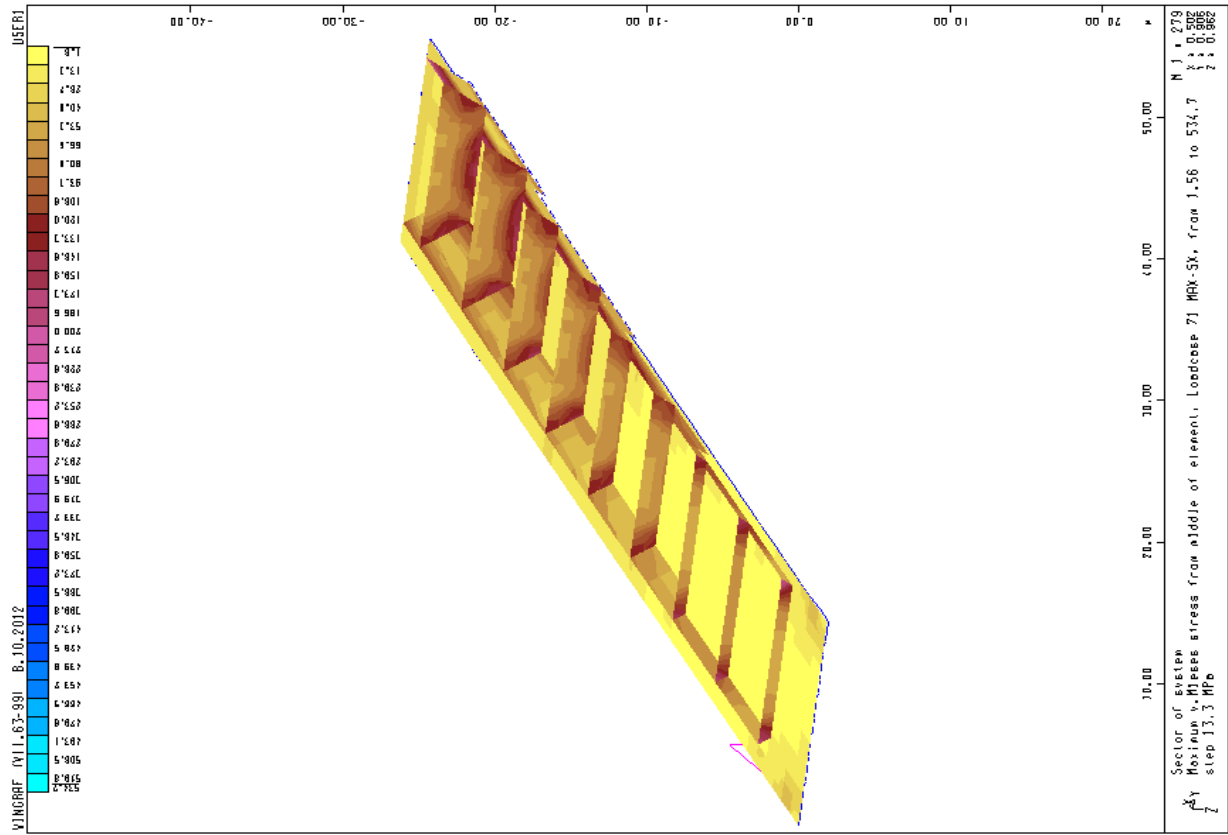


Σχήμα 5.35: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτιοειδής κύρια δοκός

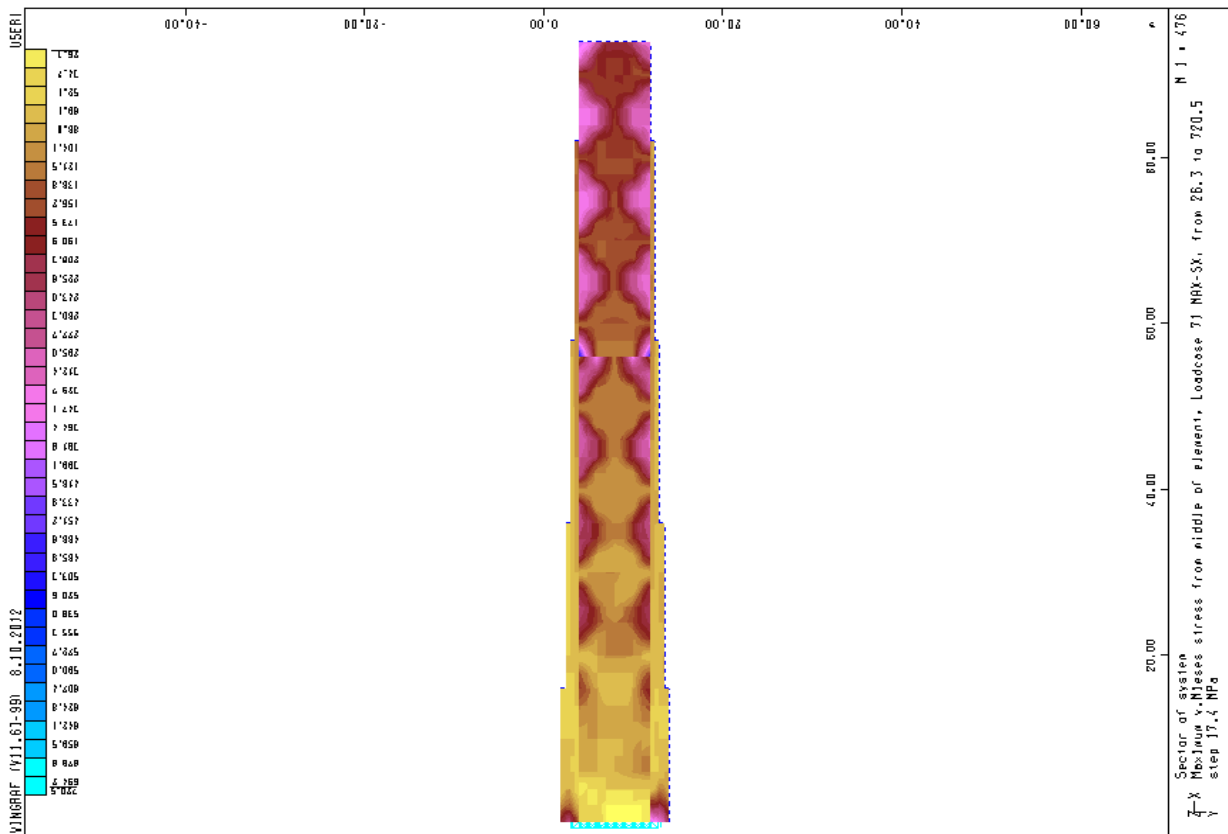


Σχήμα 5.36: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

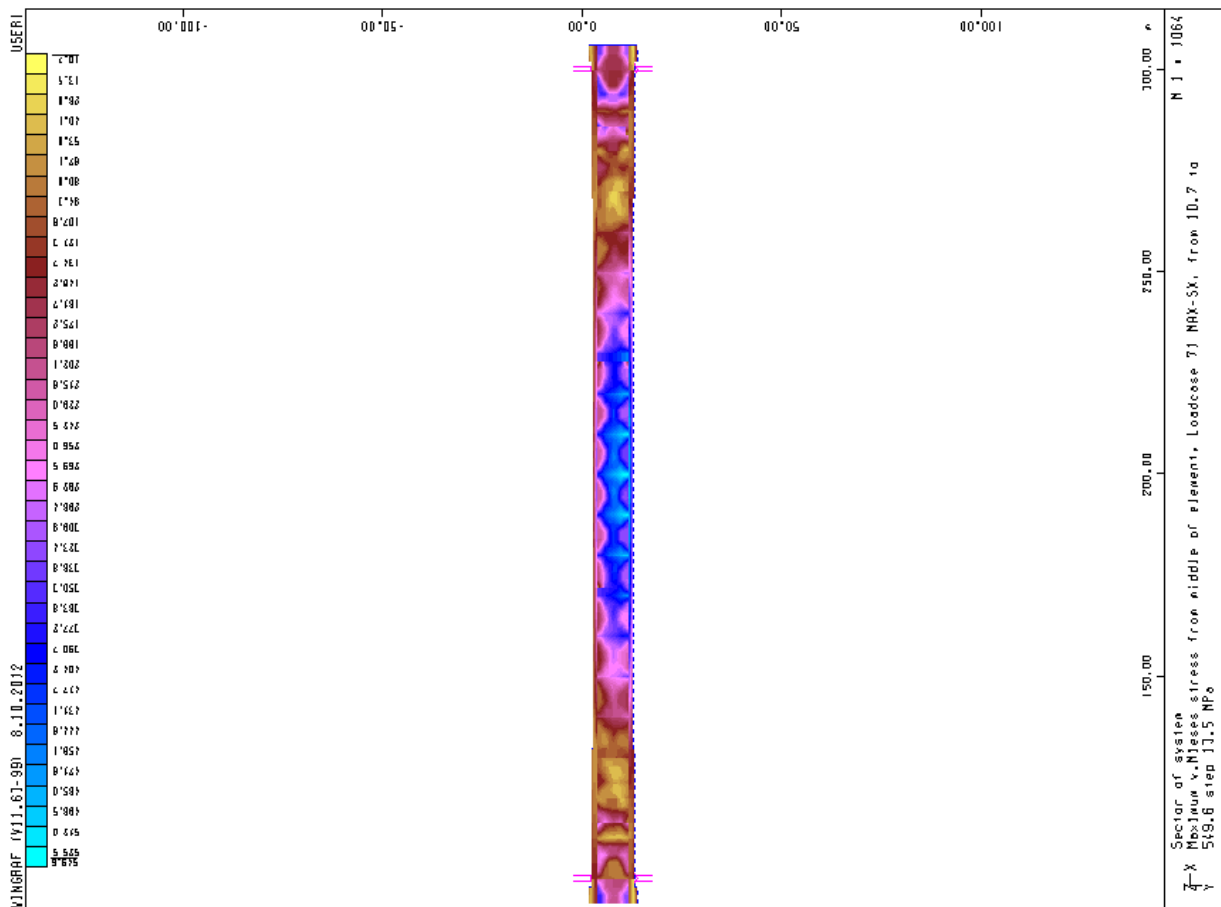
5.2.2.2 Κρεμαστή γέφυρα – τάσεις Von Mises
Max Sx



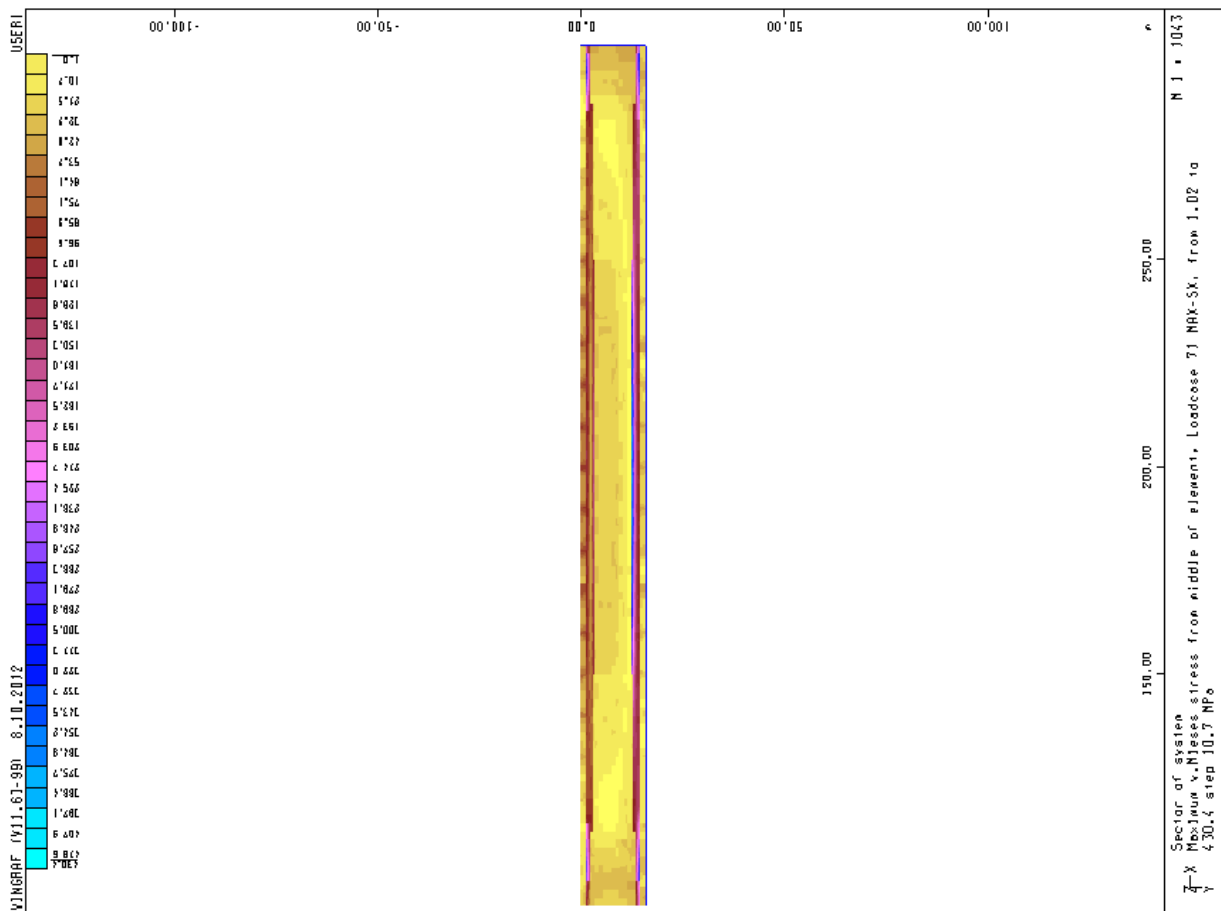
Σχήμα 5.38: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



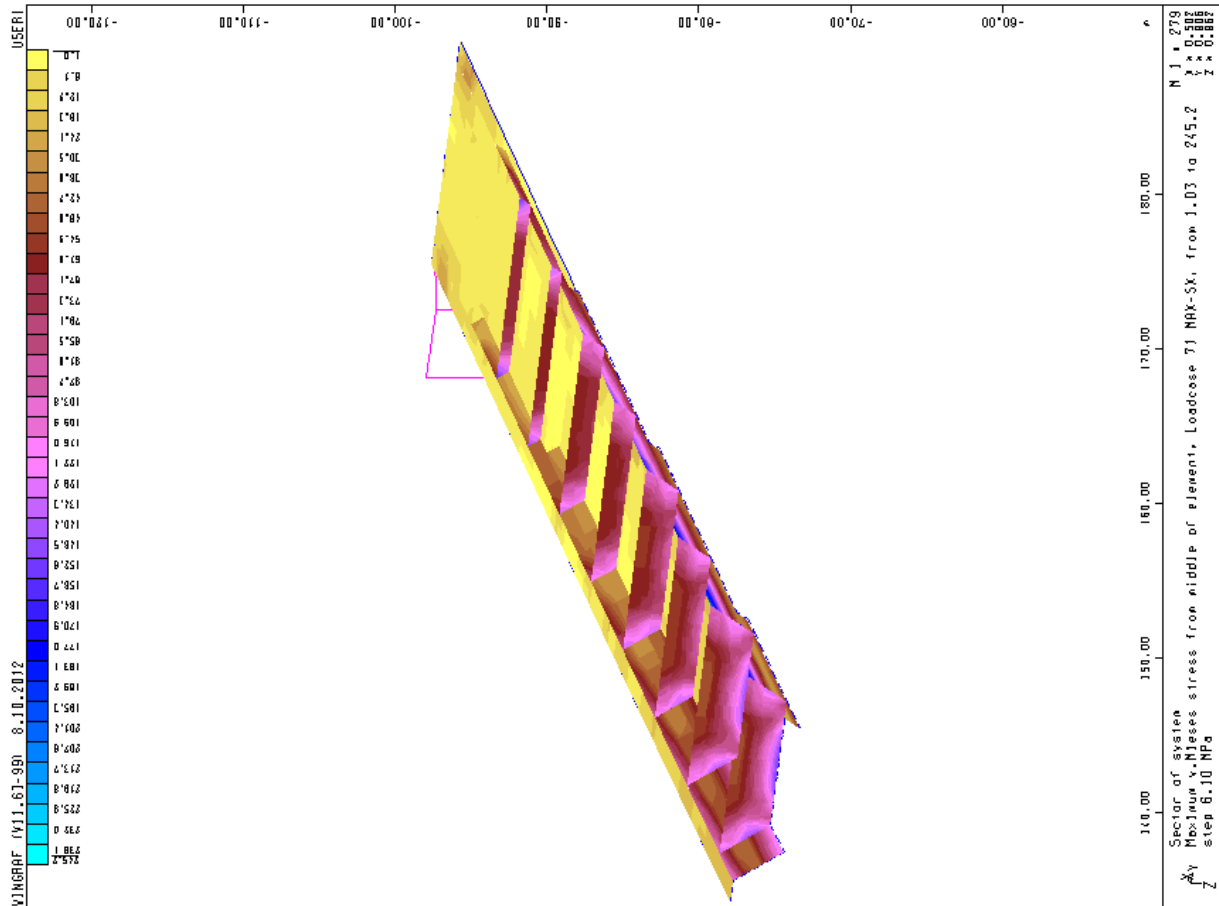
Σχήμα 5.37: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιητής κύρια δοκός



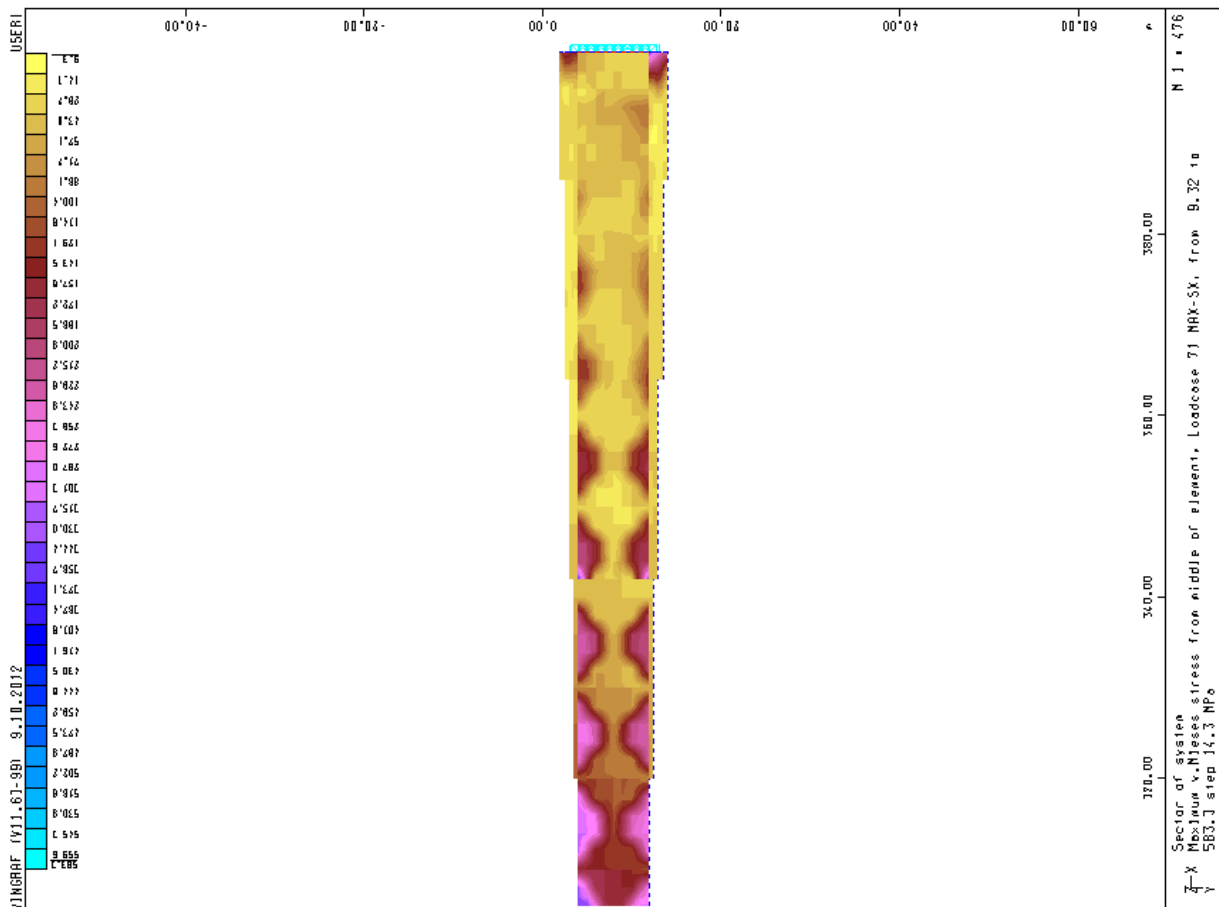
Σχήμα 5.39: Κεντρικό άνοιγμα - Κιβωτοειδής κύρια δοκός



Σχήμα 5.40: Κεντρικό άνοιγμα- Κατάστρωμα

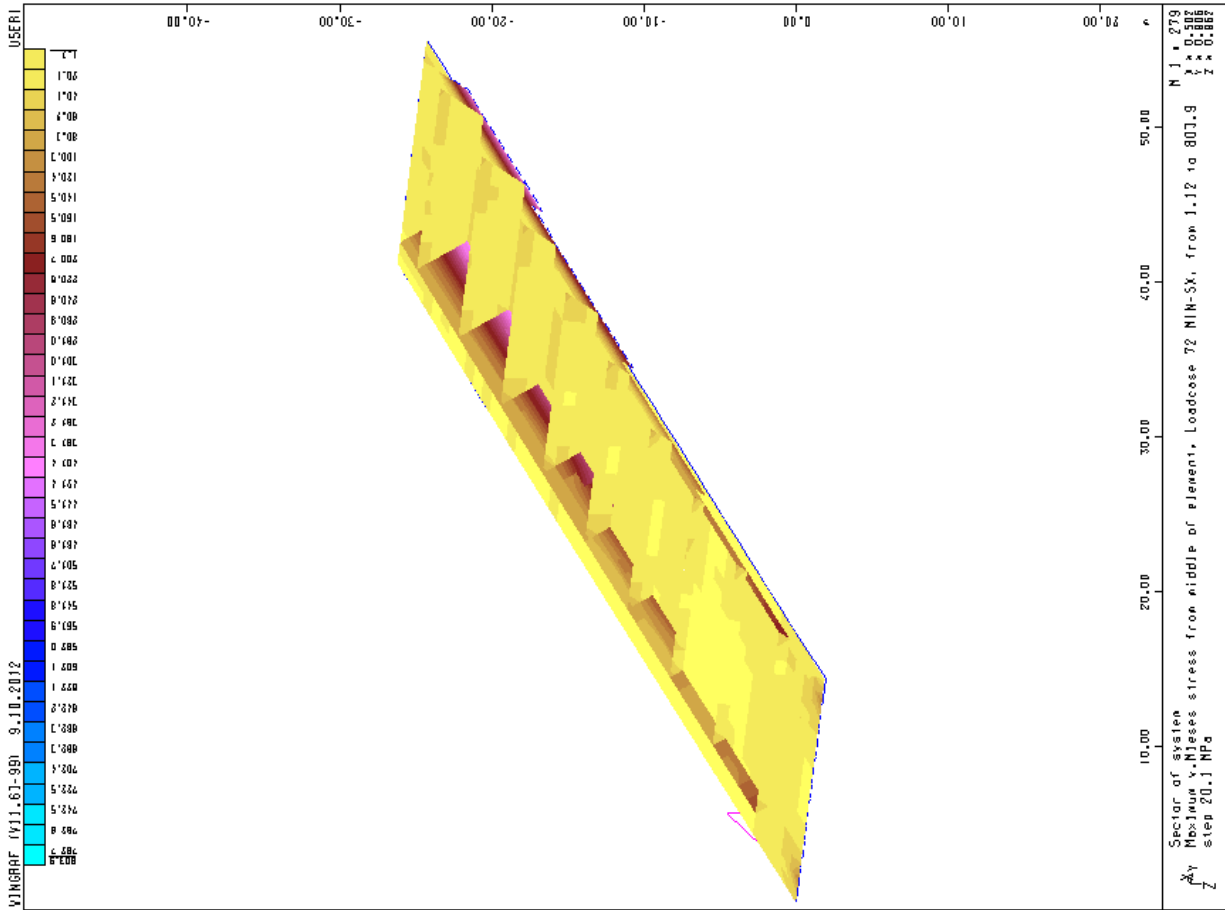


Σχήμα 5.42: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

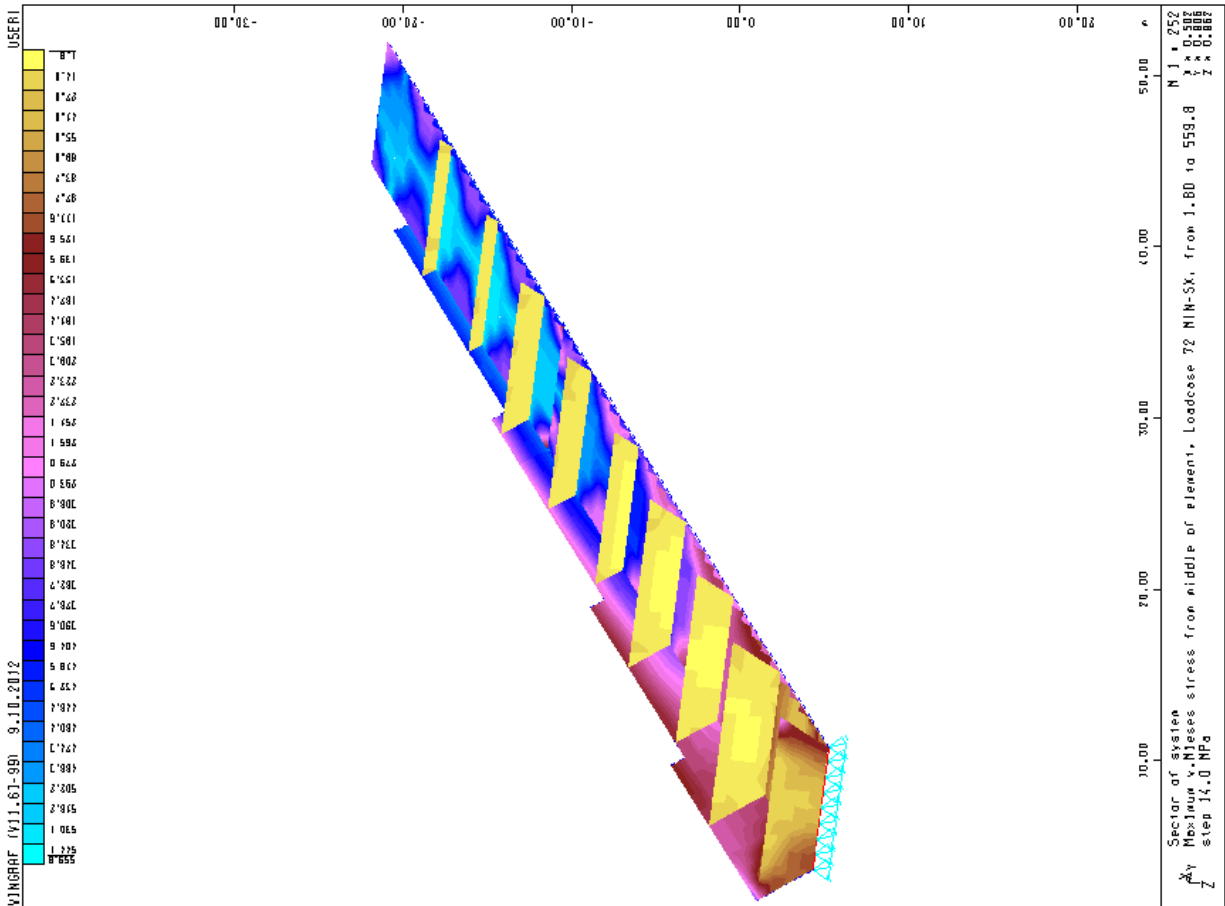


Σχήμα 5.41: Ακραίο άνοιγμα - Κιβωτοποιιδής κύρια δοκός

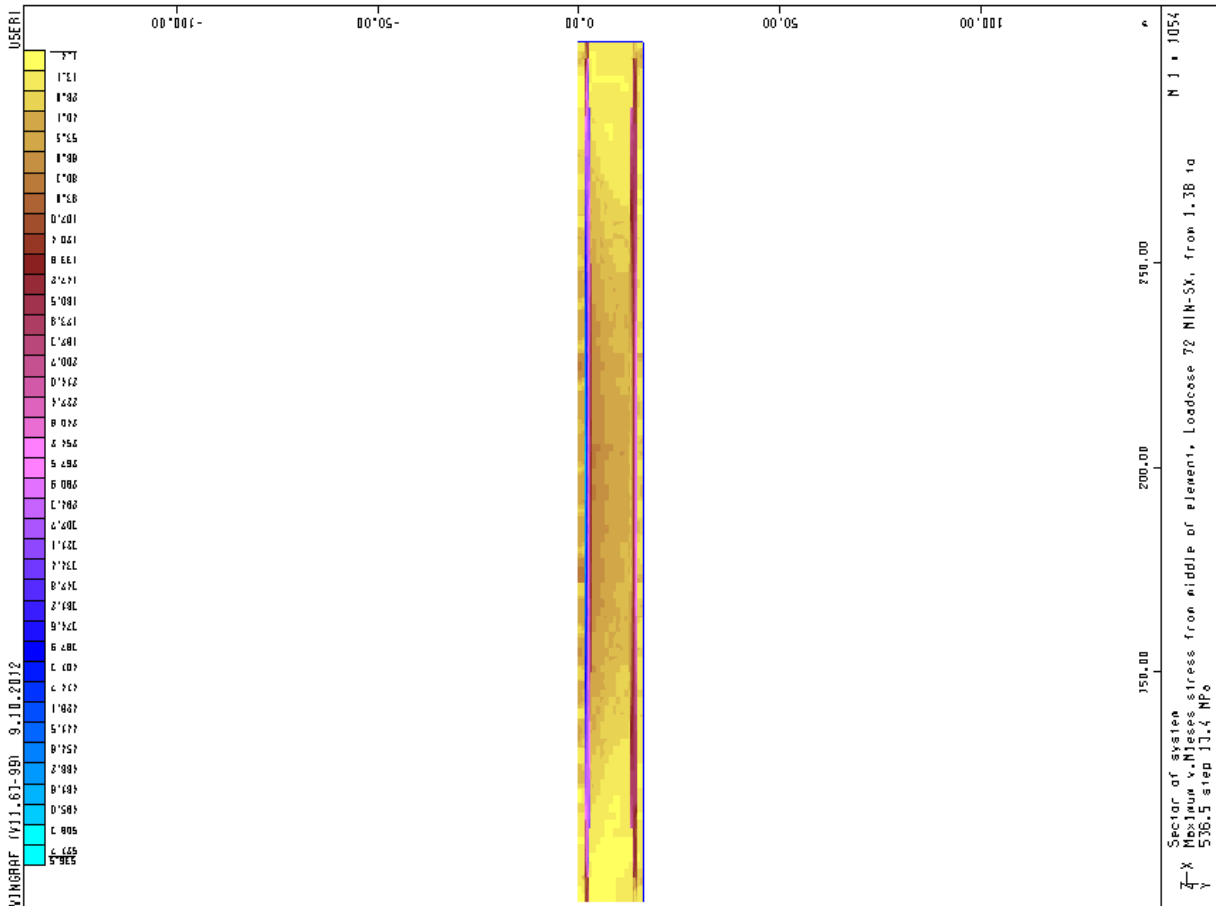
Min Sx



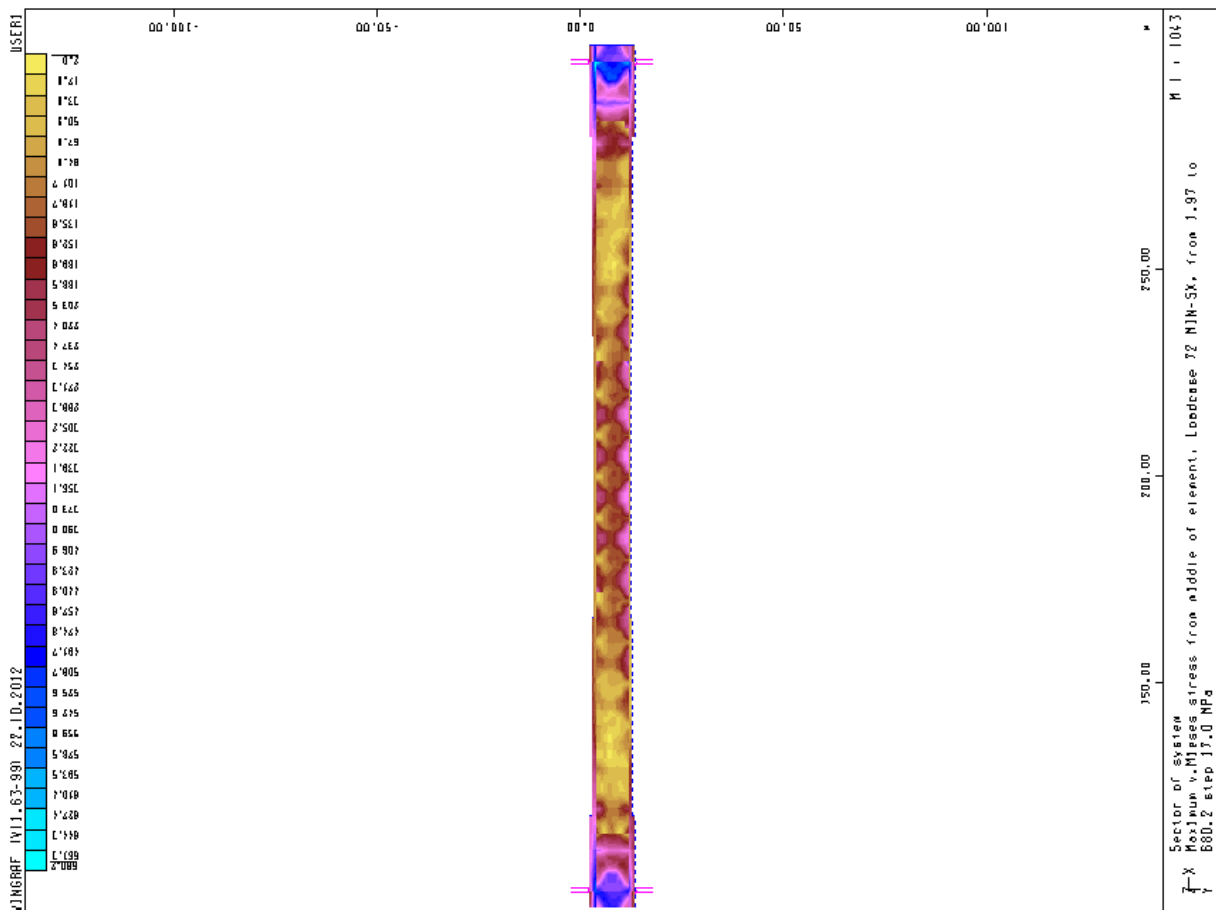
Σχήμα 5.44: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



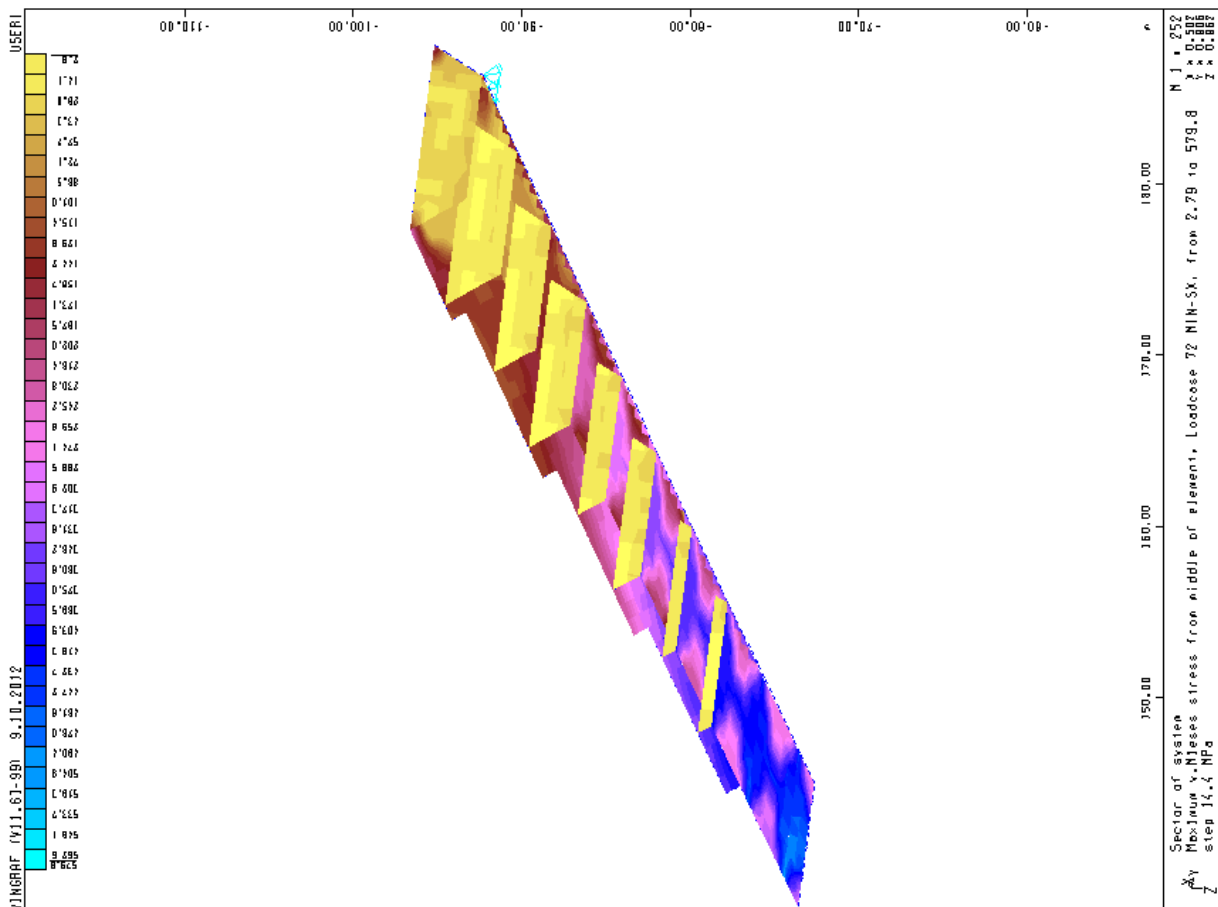
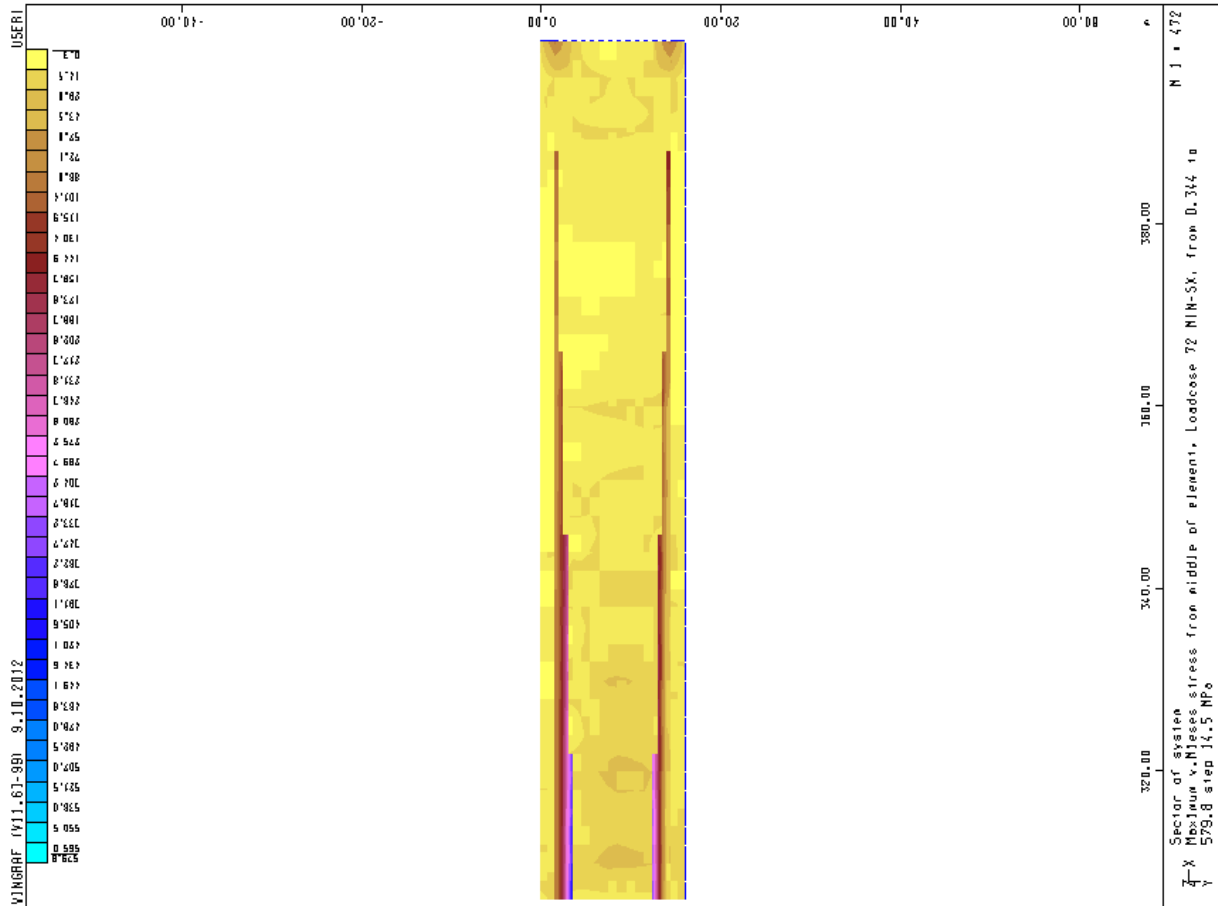
Σχήμα 5.43: Ακραίο άνοιγμα - Κιβωτοποιείδης κύρια δοκός



Σχήμα 5.46: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρομα



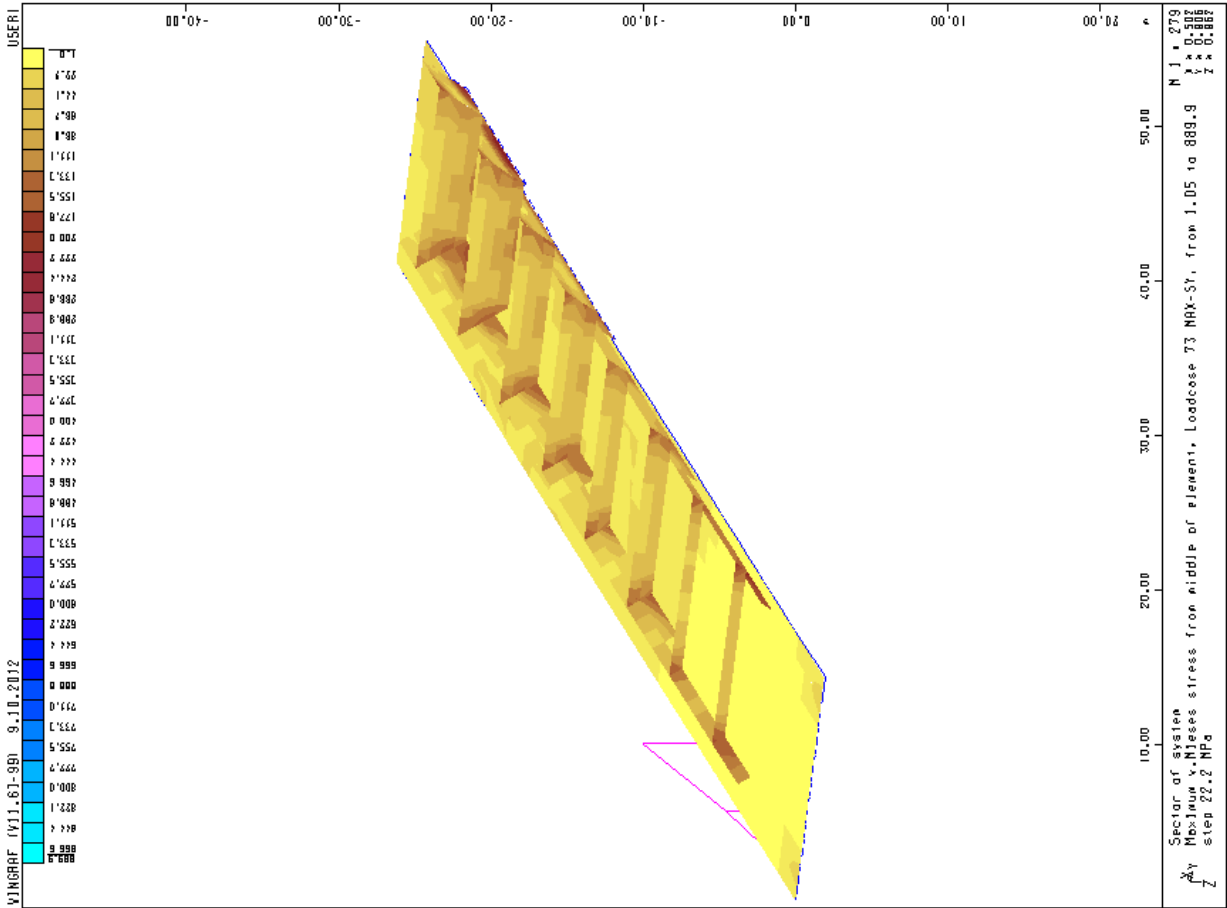
Σχήμα 5.45: Κεντρικό άνοιγμα - Κιβωτοειδής κύρια δοκός



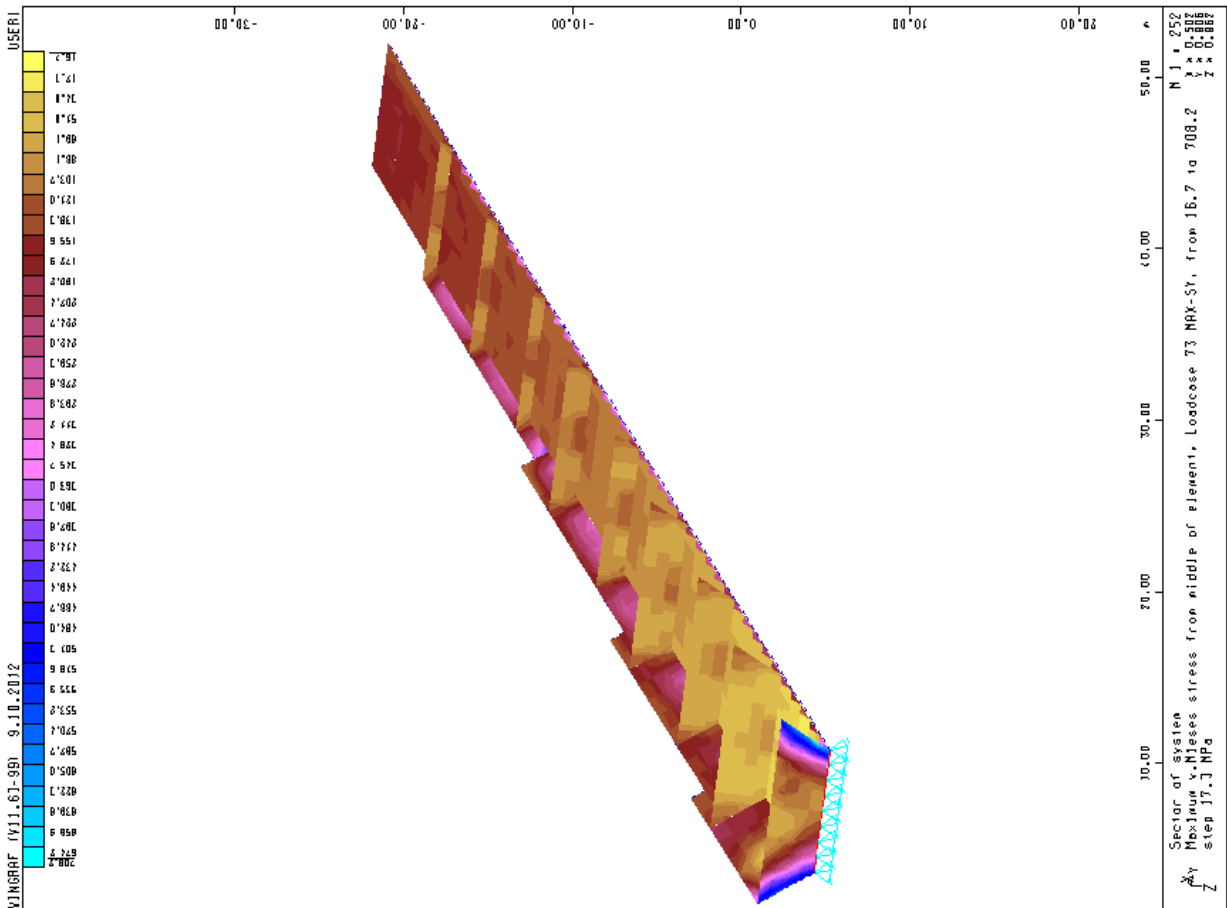
Σχήμα 5.48: Ακράιο άνογιμα - Κατάστρωμα

Σχήμα 5.47: Ακράιο άνογιμα – Κιβωτιοειδής κύρια δοκός

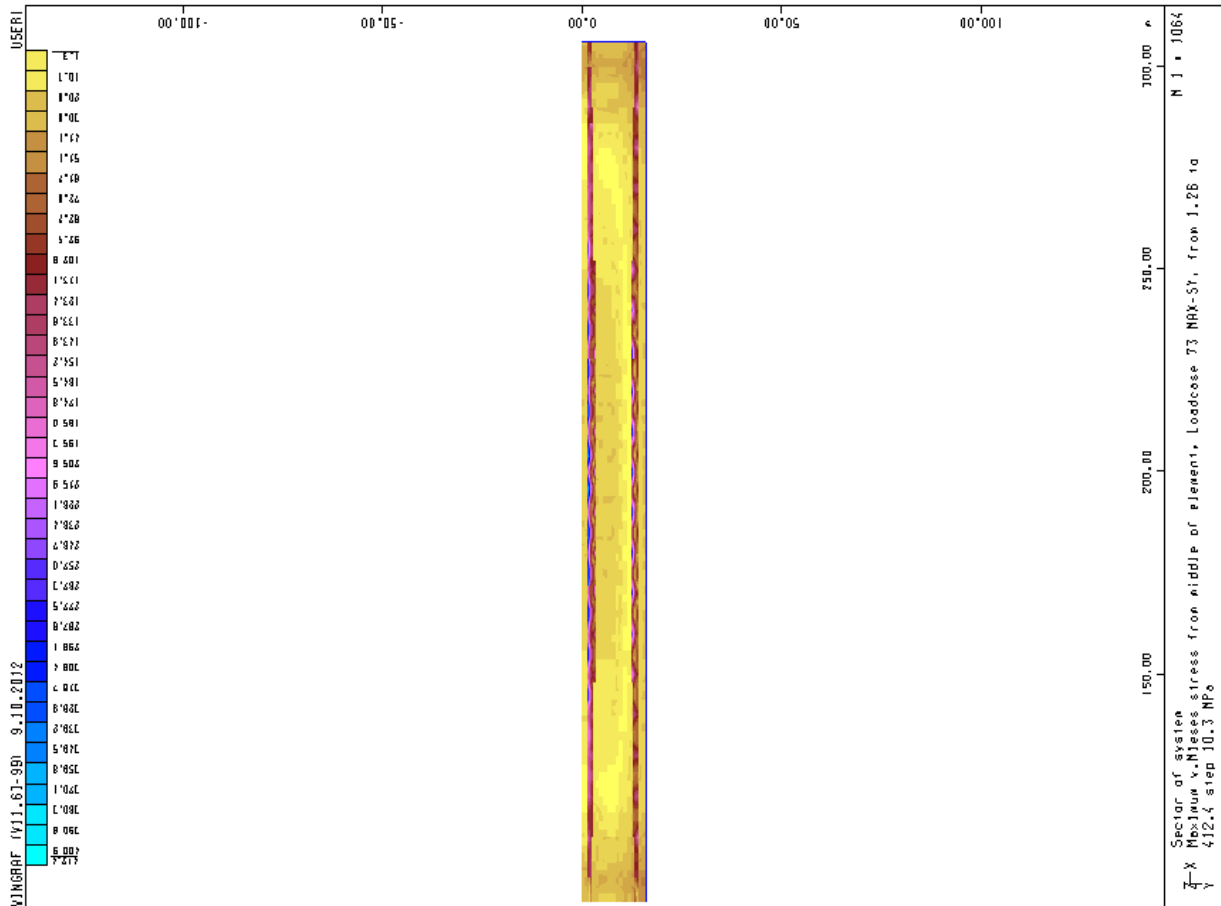
Max Sy



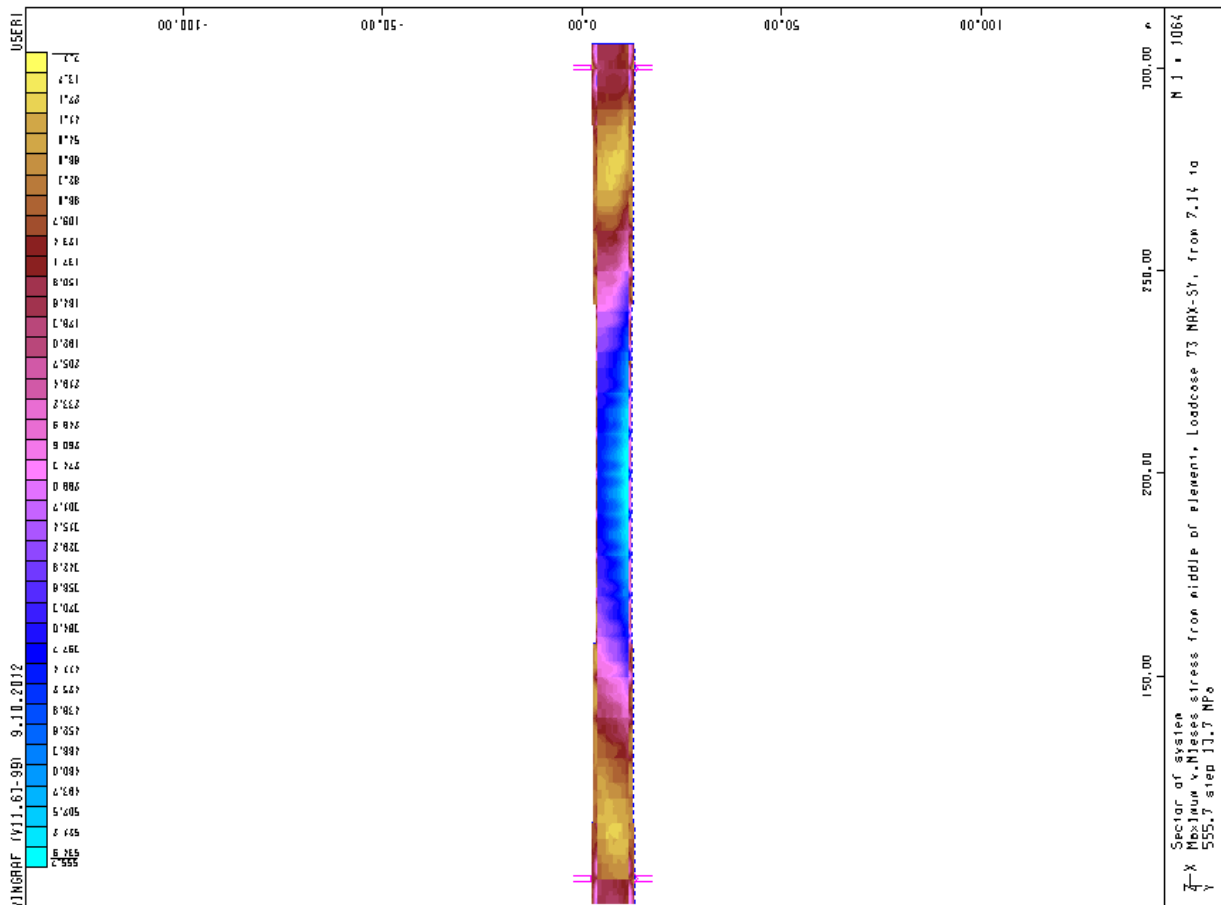
Σχήμα 5.50: Ακράτο άνοιγμα - Κατάστρωμα



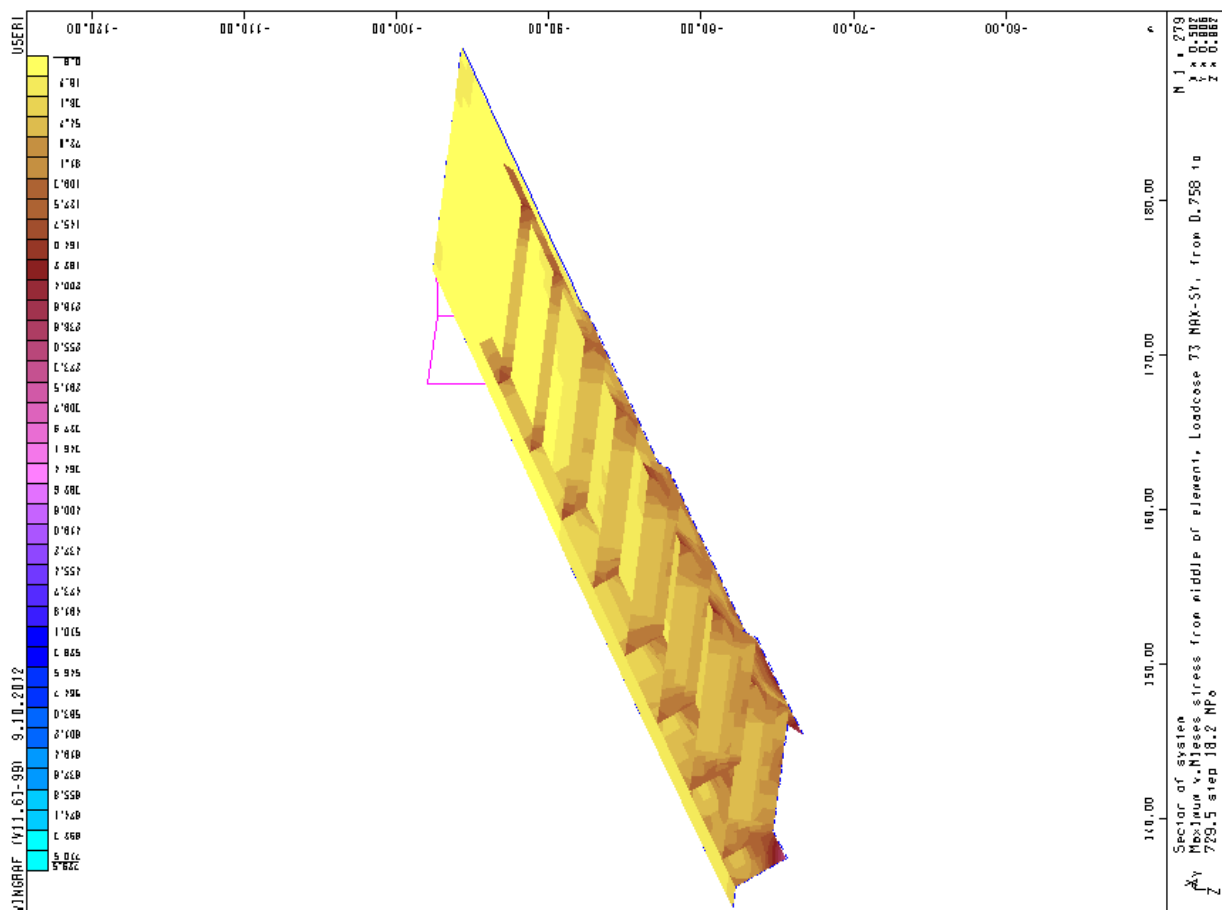
Σχήμα 5.49: Ακράτο άνοιγμα - Κιβωτοποιητής κύρια δοκός



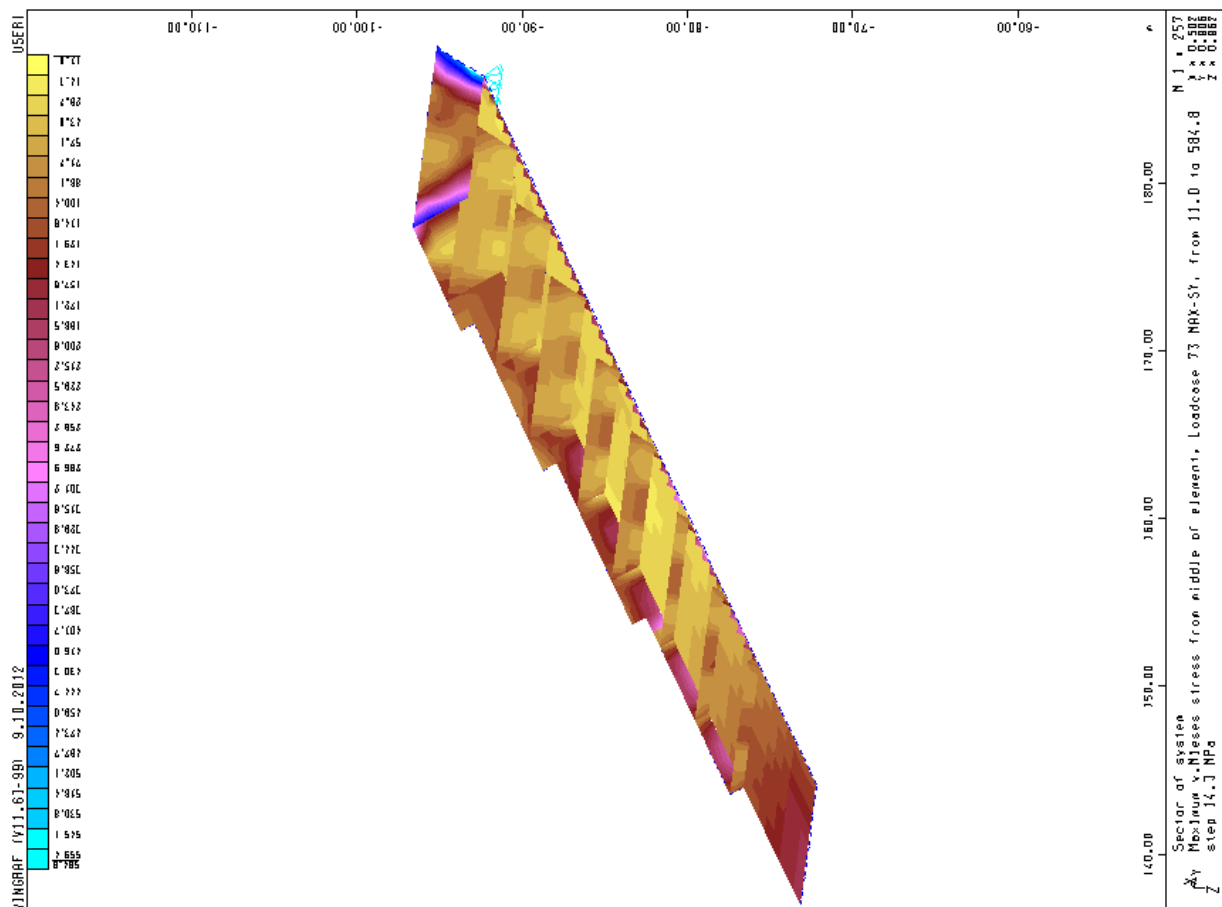
Σχήμα 5.52: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα



Σχήμα 5.51: Κεντρικό άνοιγμα - Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός

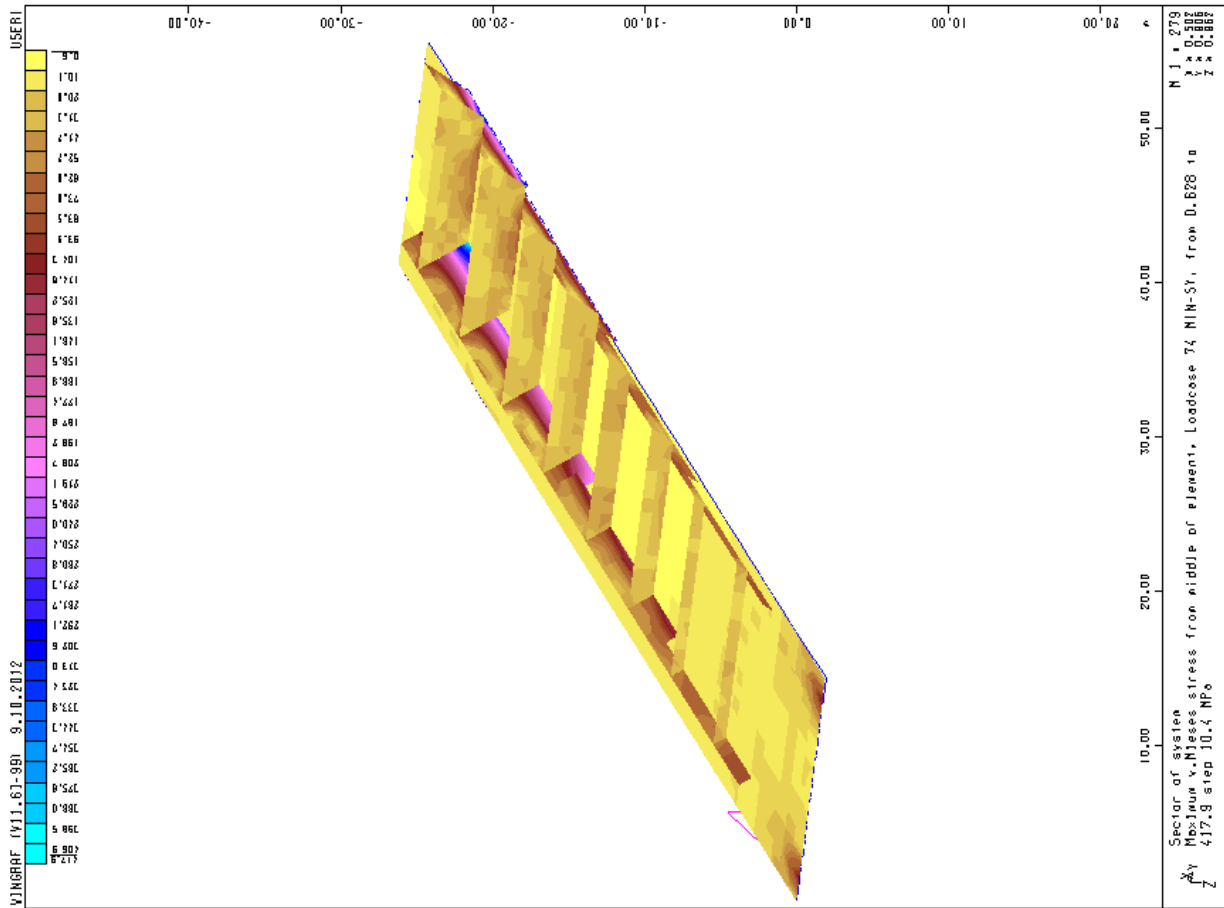


Σχήμα 5.54: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

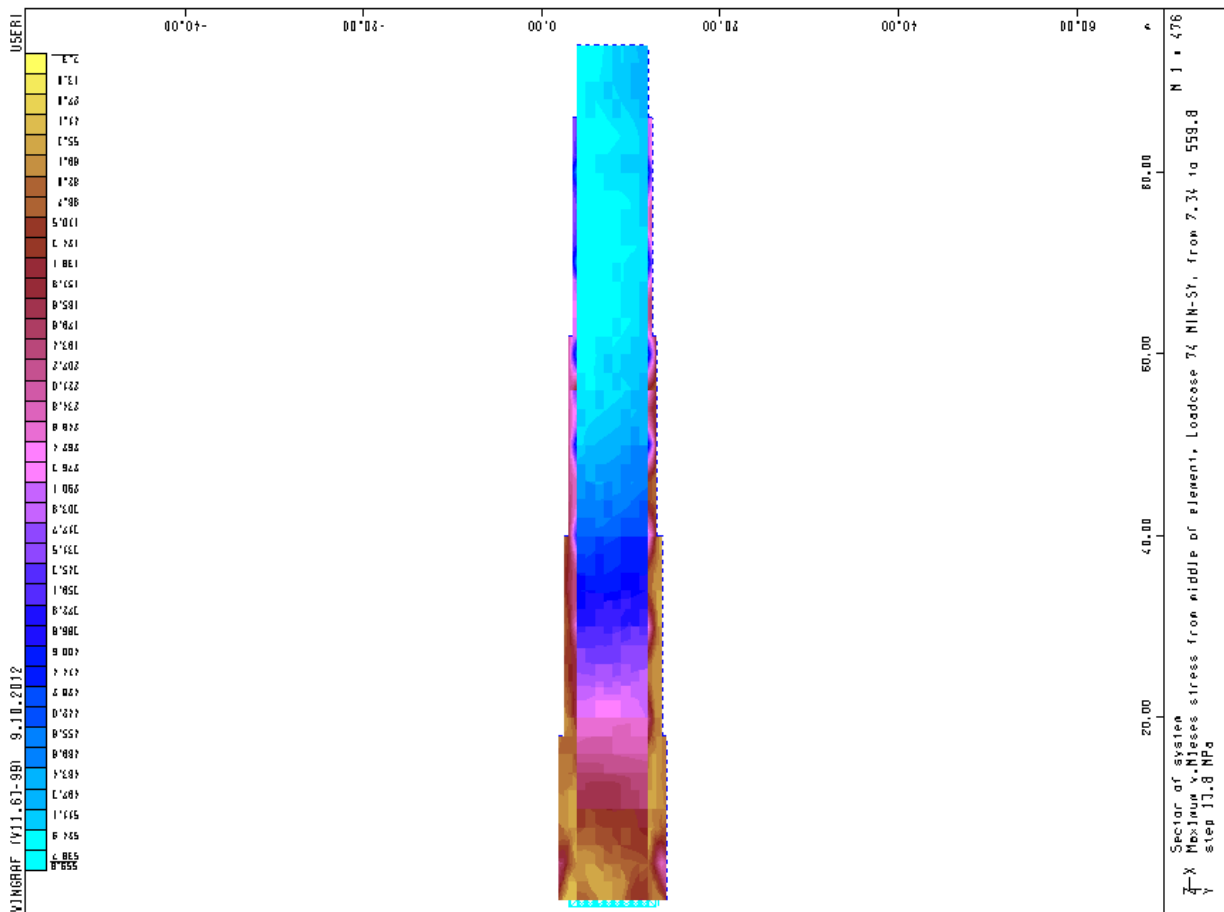


Σχήμα 5.53: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός

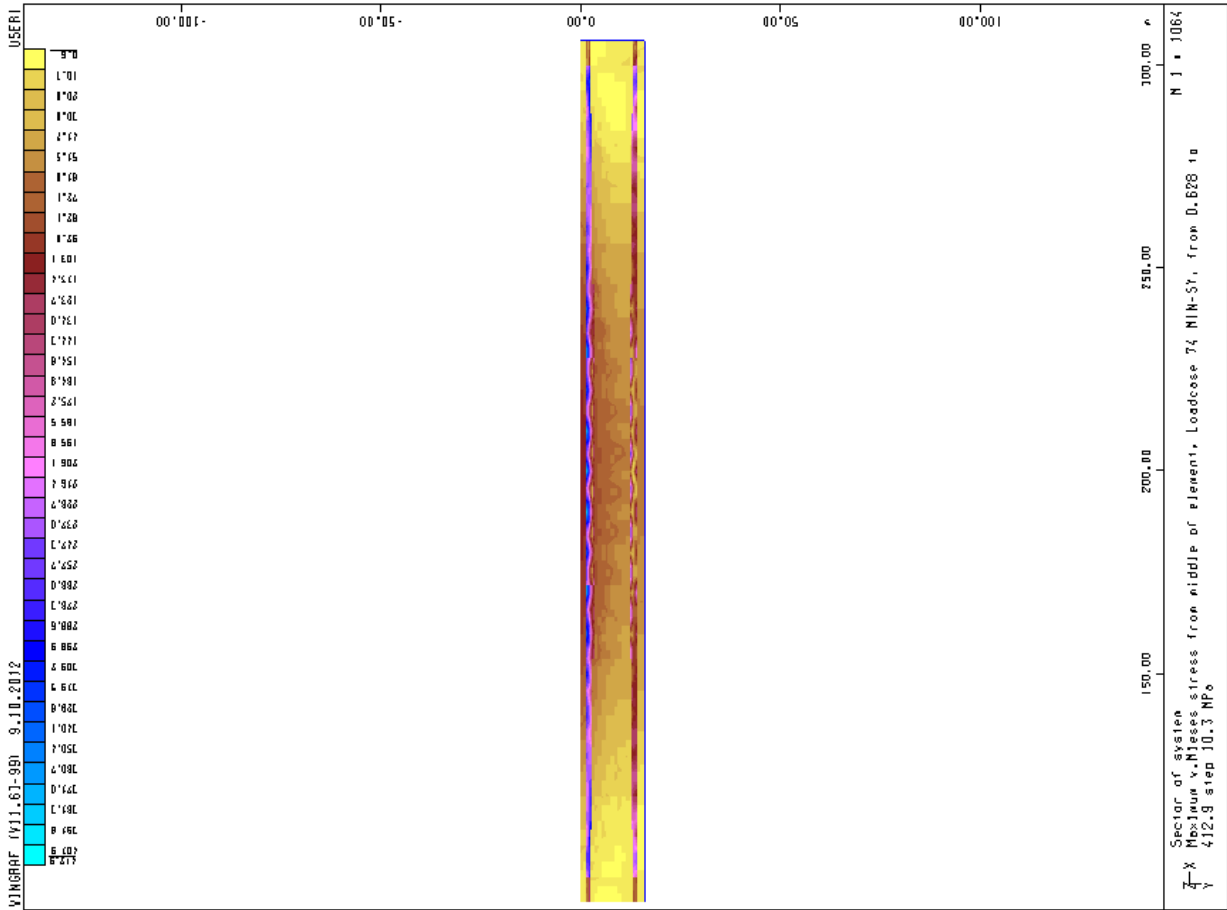
Min Sy



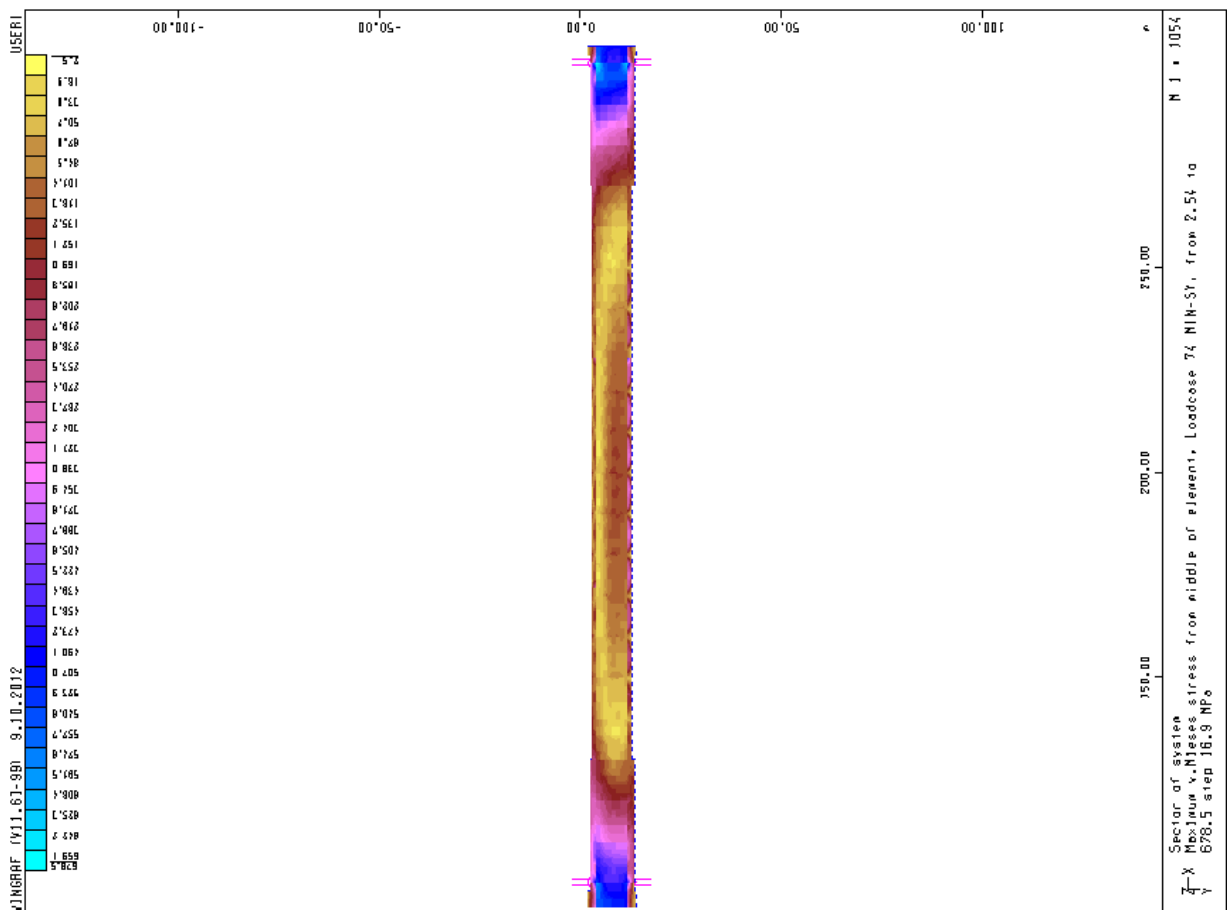
Σχήμα 5.56: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



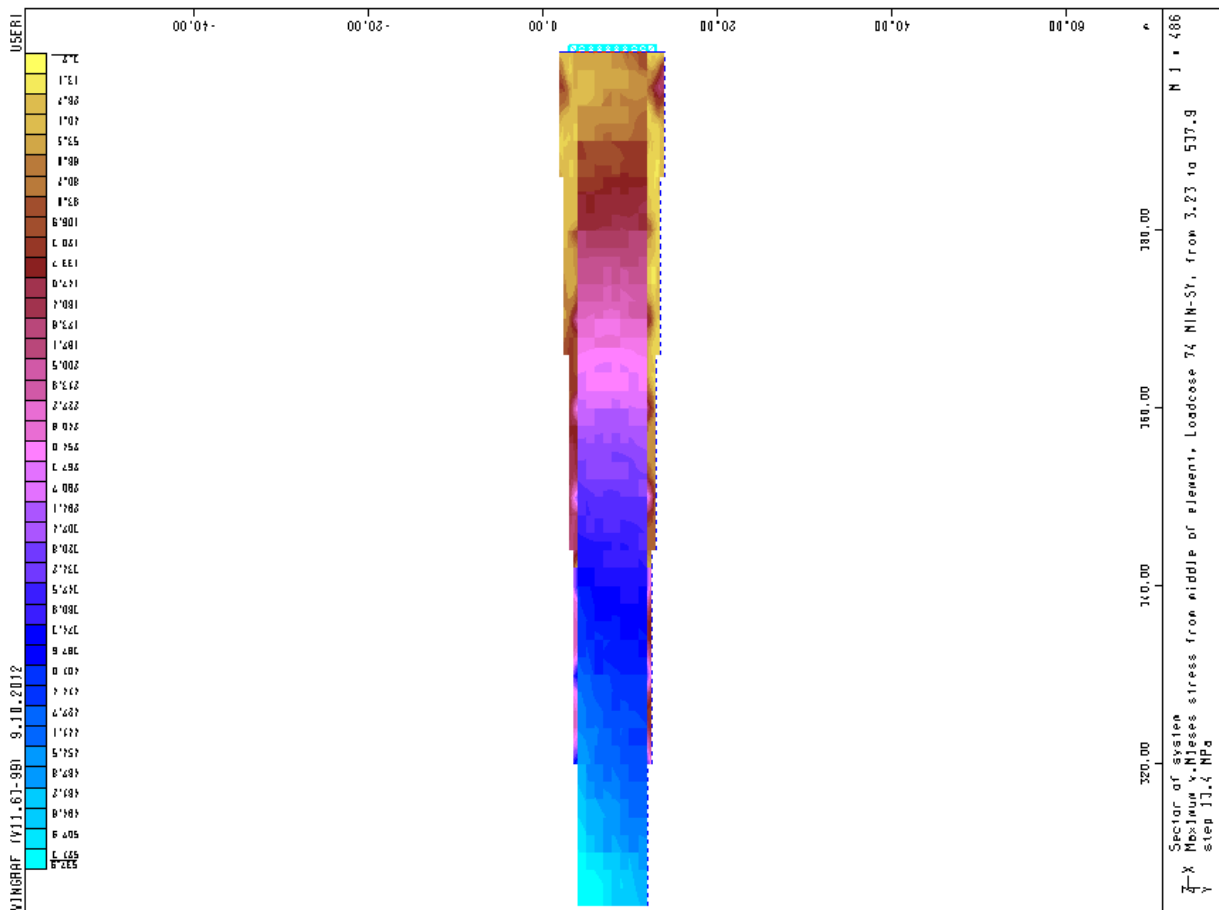
Σχήμα 5.55: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός



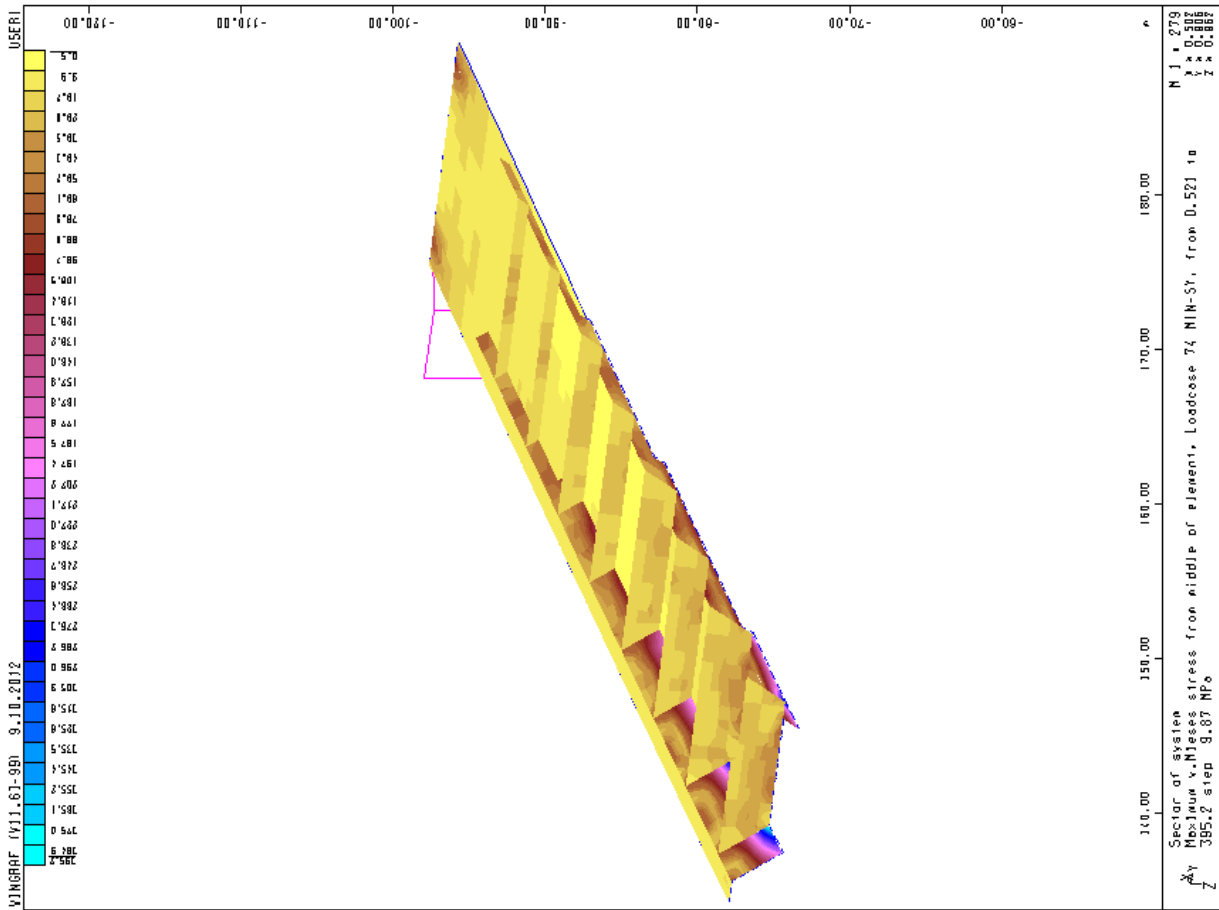
Σχήμα 5.58: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρομα



Σχήμα 5.57: Κεντρικό άνοιγμα - Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός

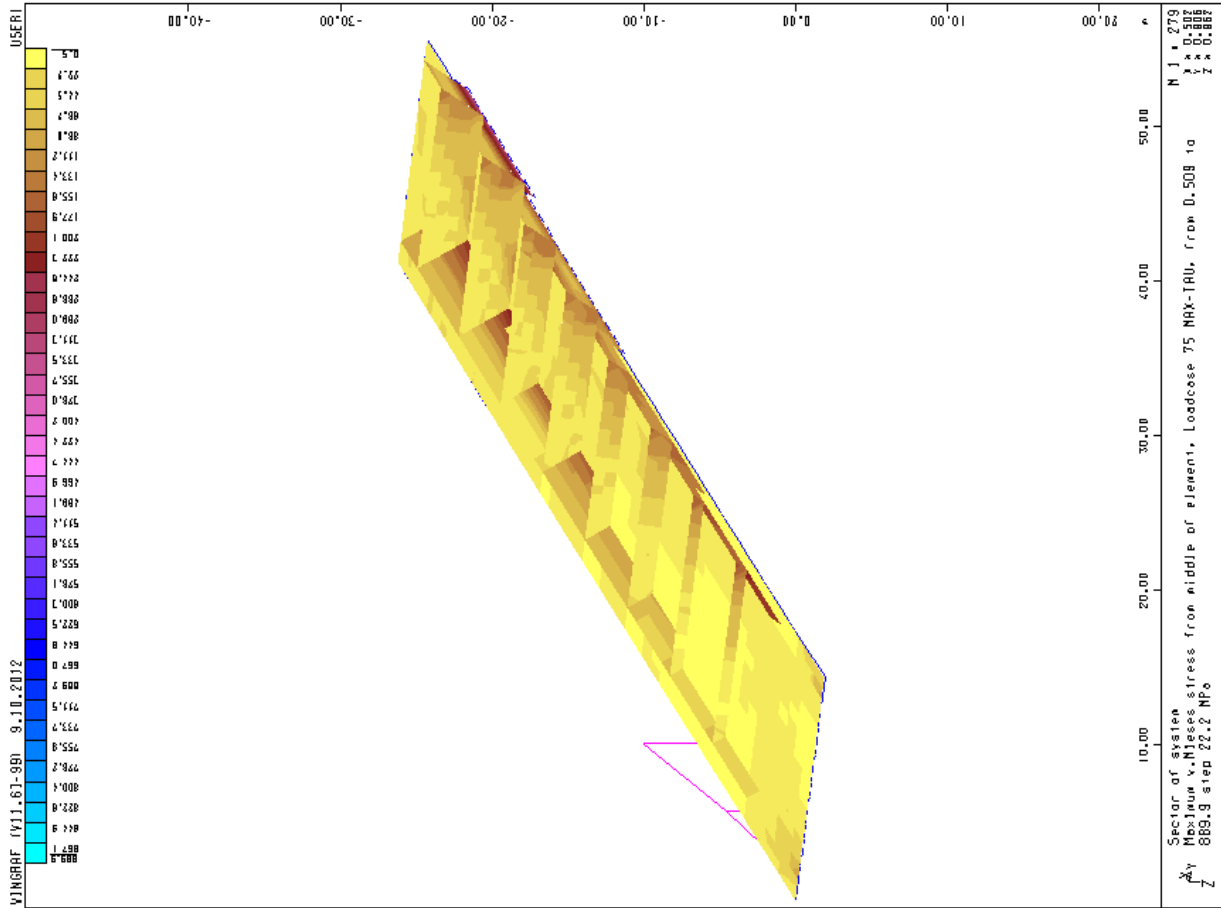


Σχήμα 5.59: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός

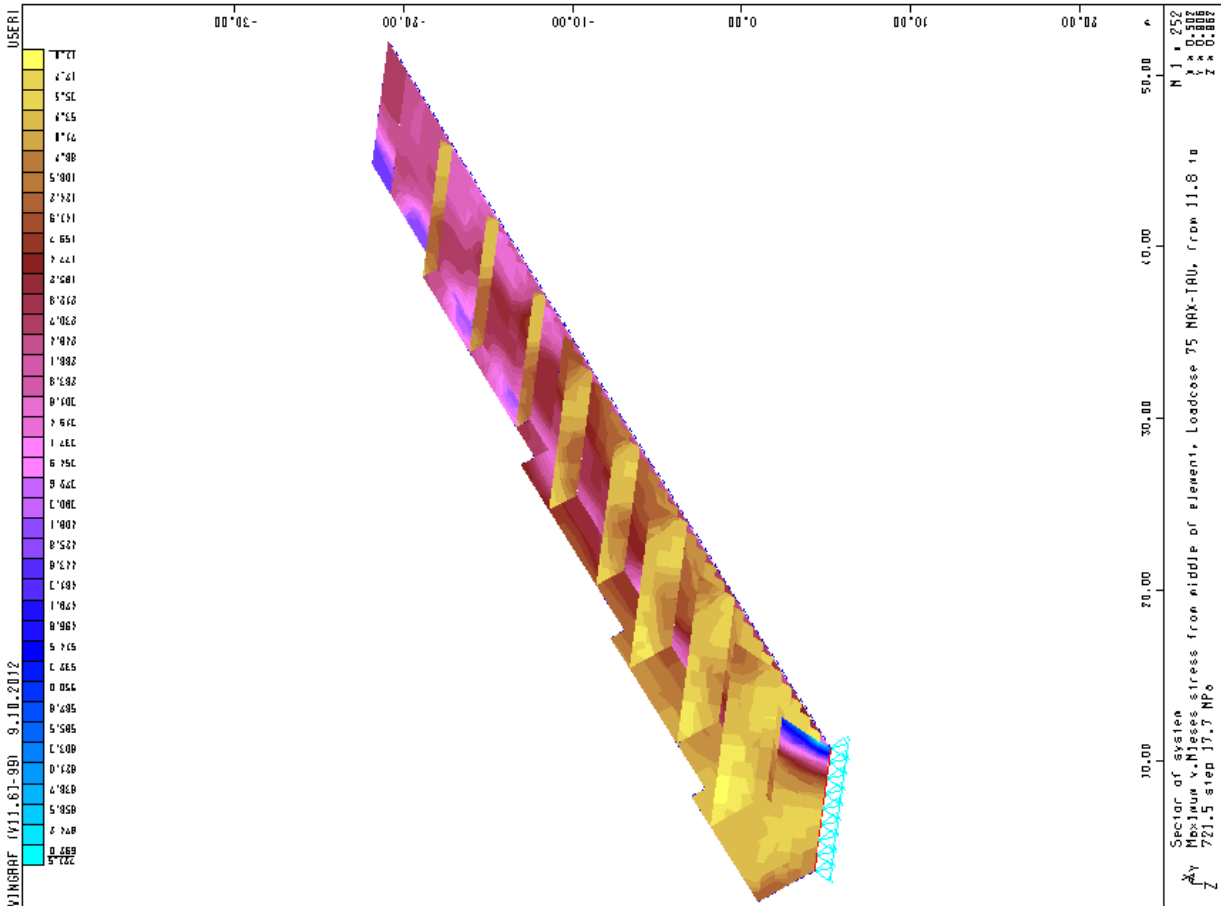


Σχήμα 5.60: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

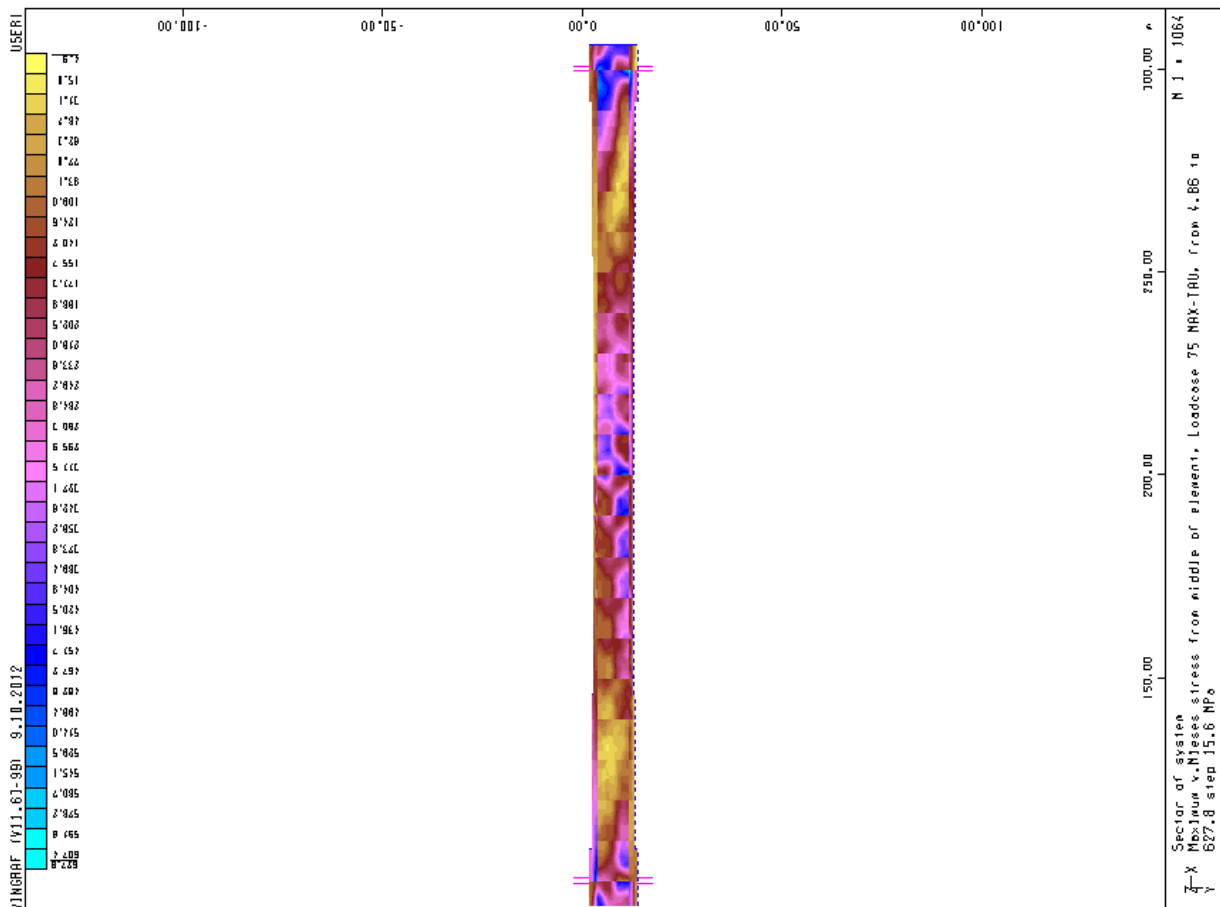
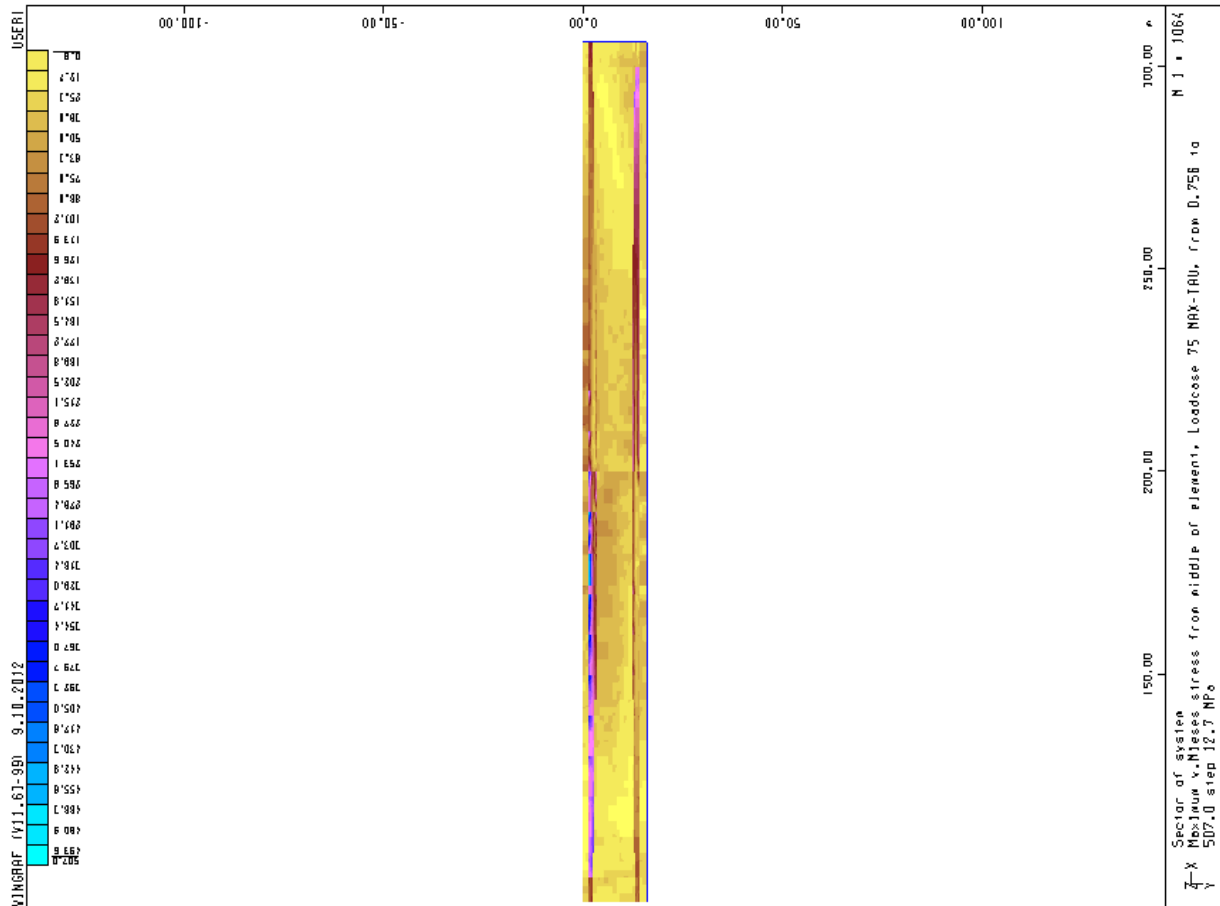
Max TAU



Σχήμα 5.62: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωση

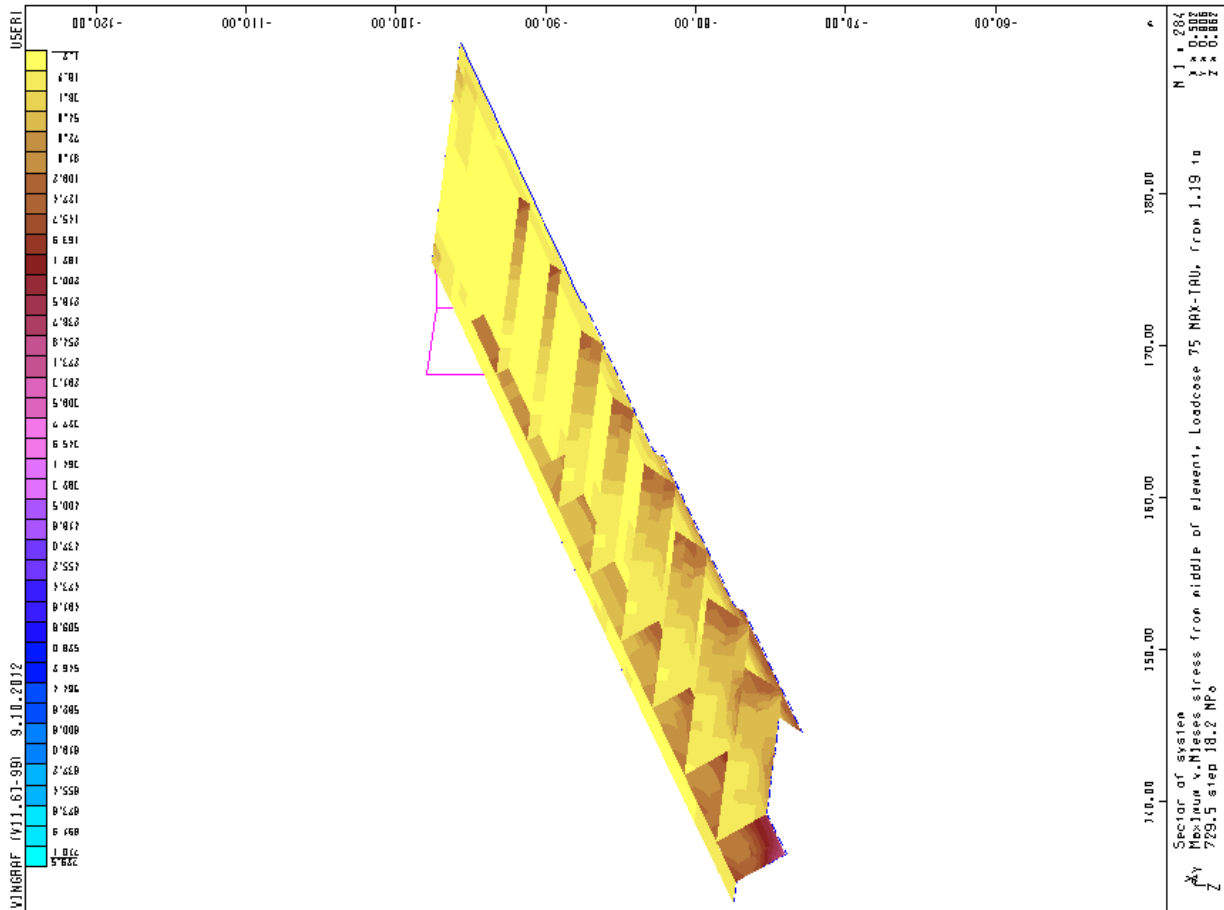


Σχήμα 5.61: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτισειδής κύρια δοκός

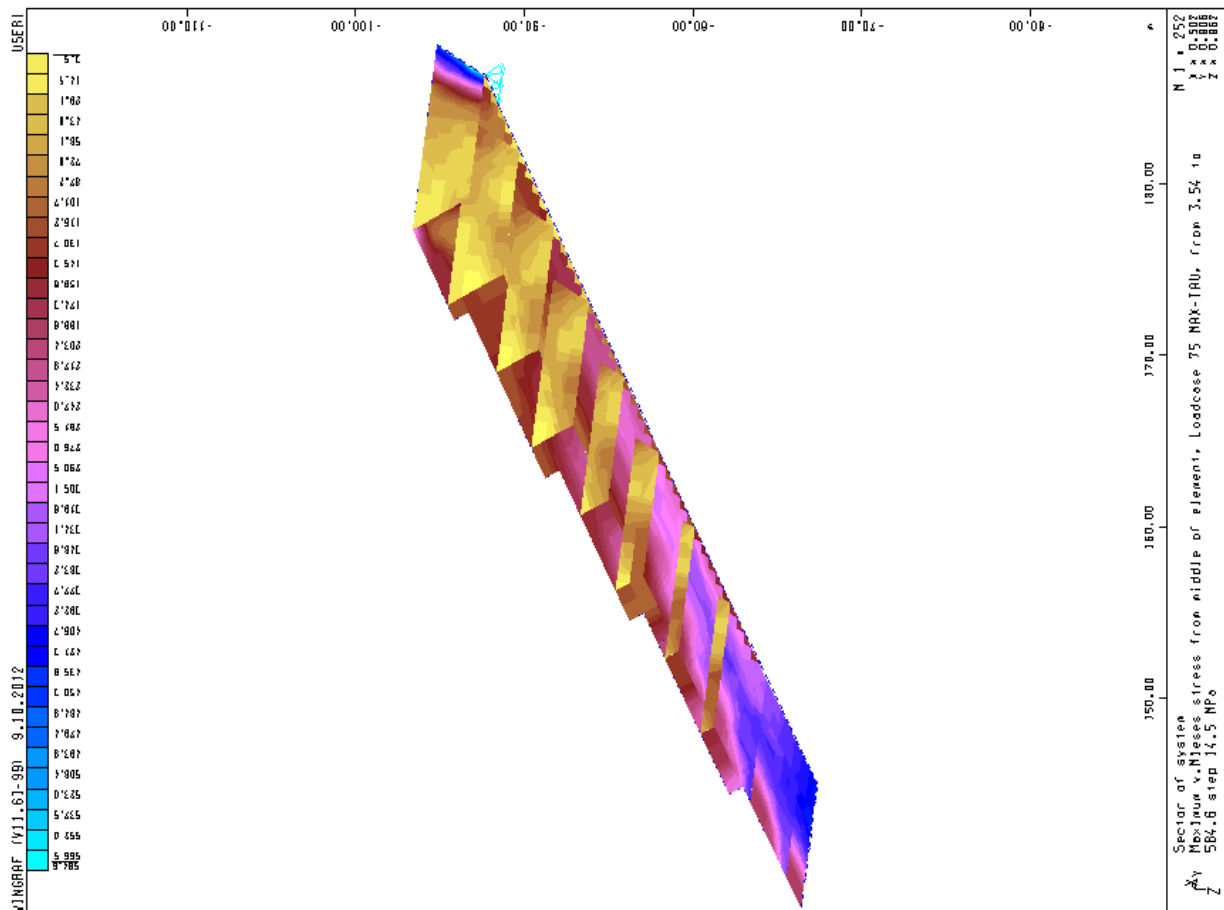


Σχήμα 5.64: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα

Σχήμα 5.63: Κεντρικό άνοιγμα - Κιβωτοποιείδης κύρια δοκός

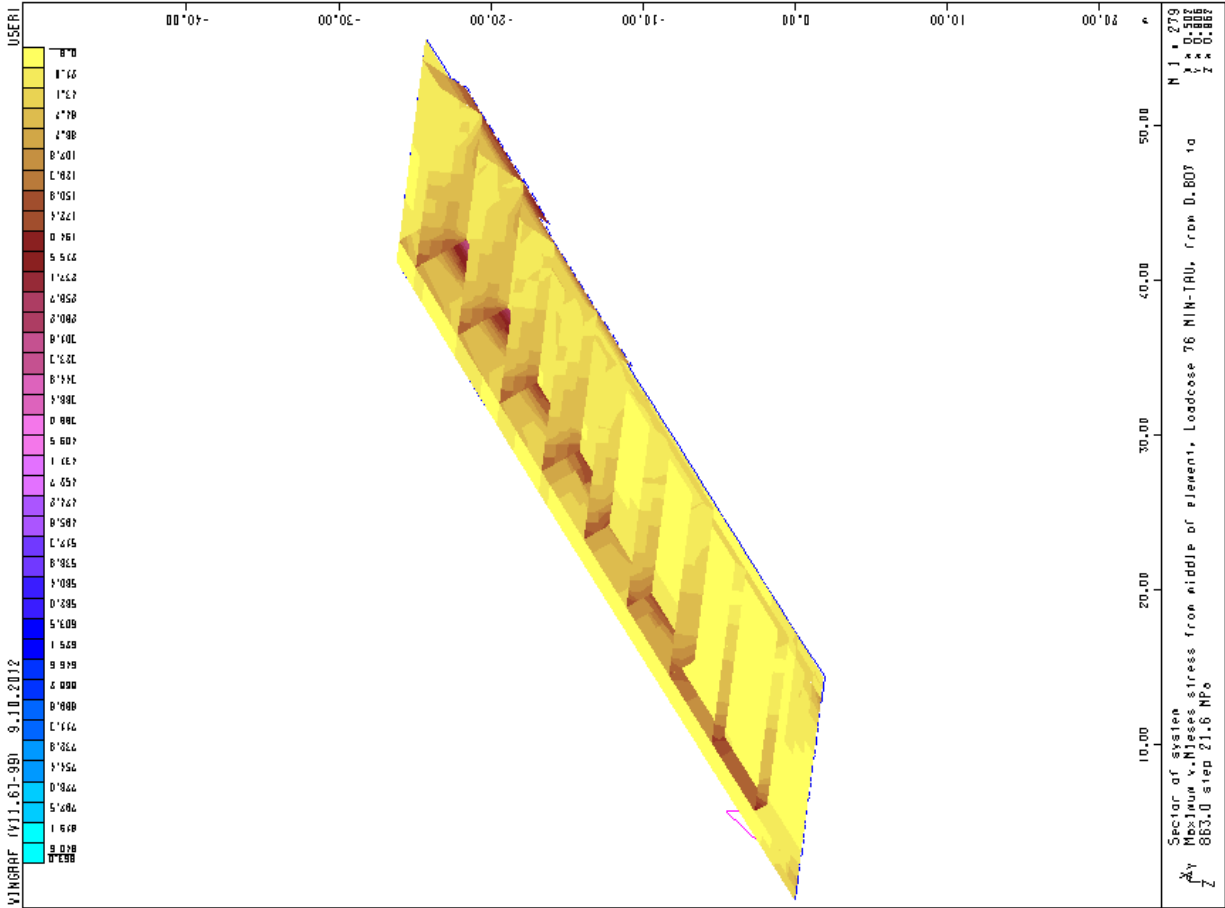


Σχήμα 5.66: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα

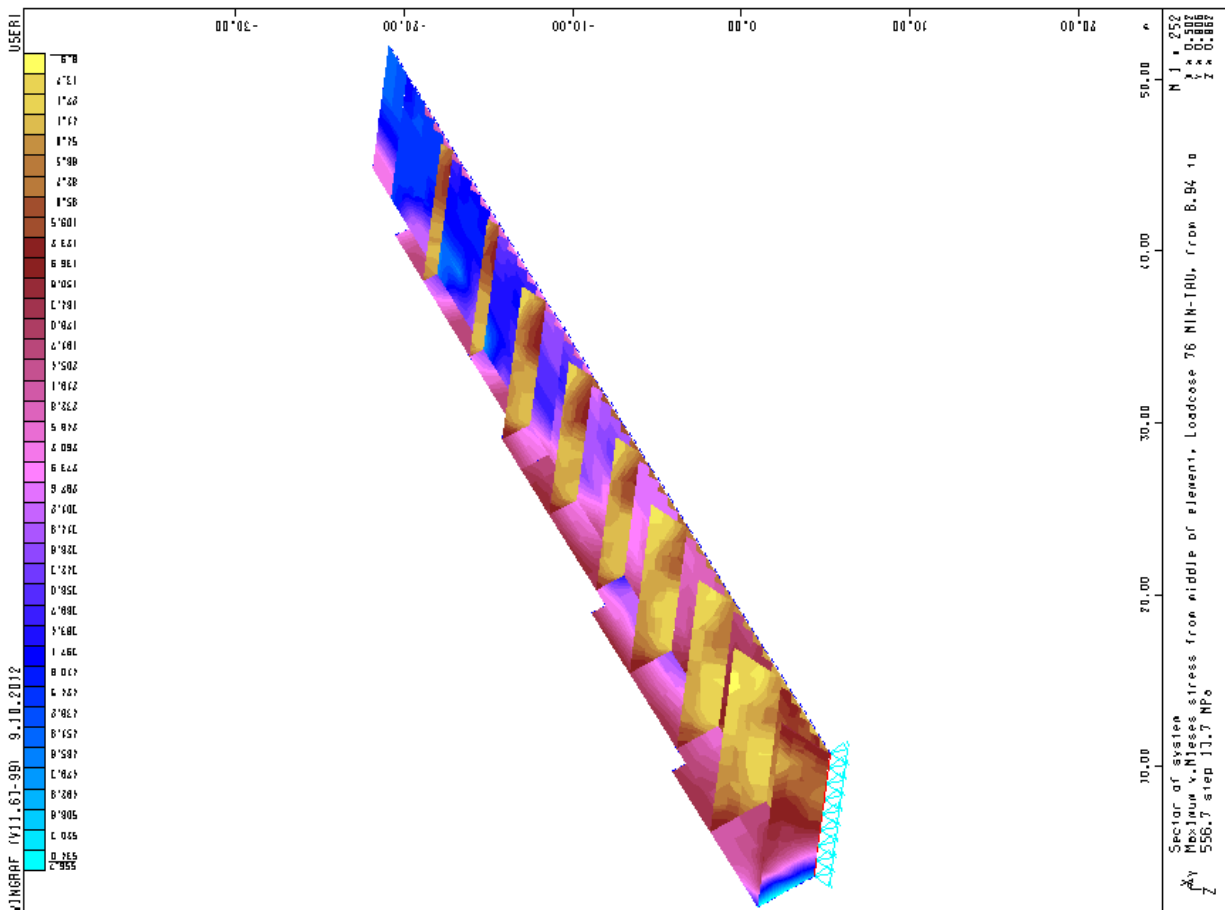


Σχήμα 5.65: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιείδης κύρια δοκός

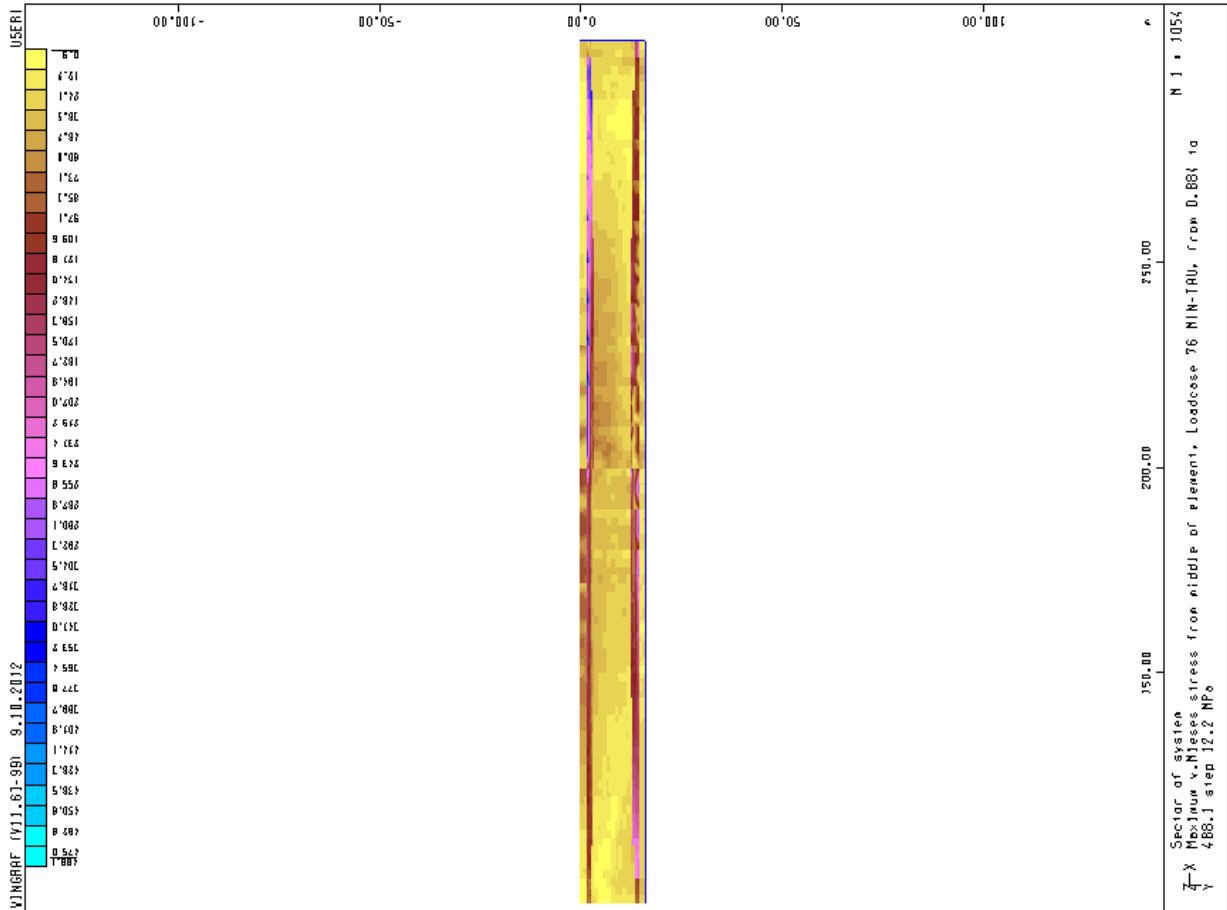
Min TAU



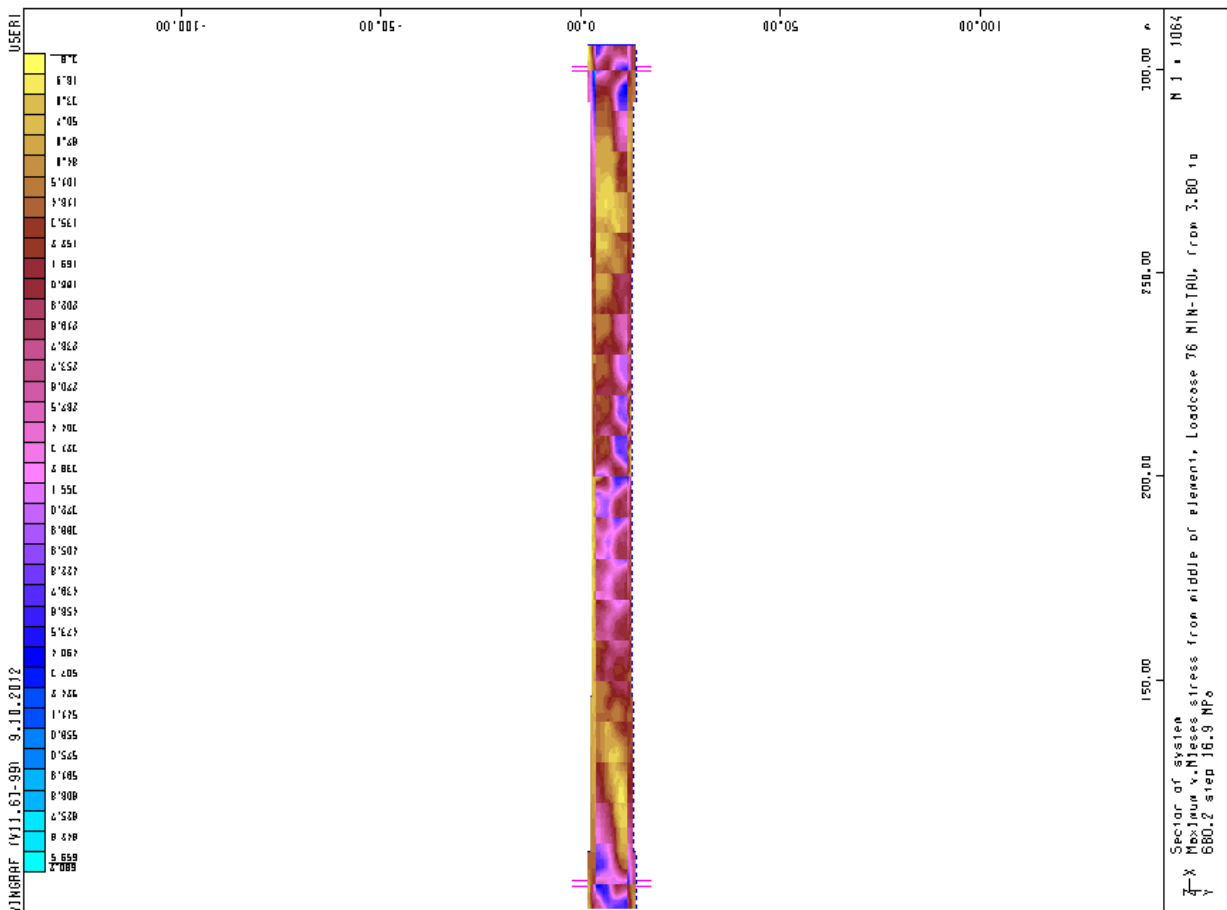
Σχήμα 5.68: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωση



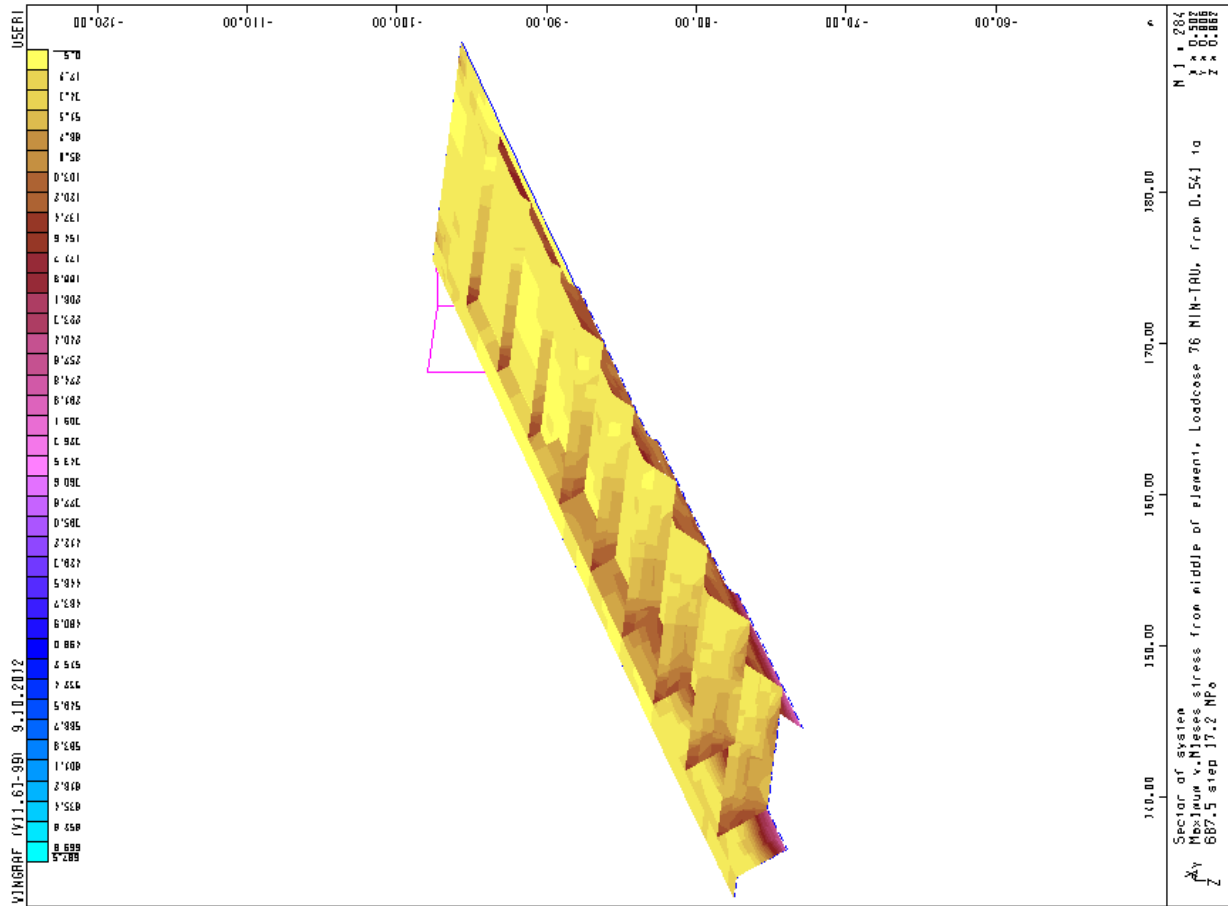
Σχήμα 5.67: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιητής κύρια δοκός



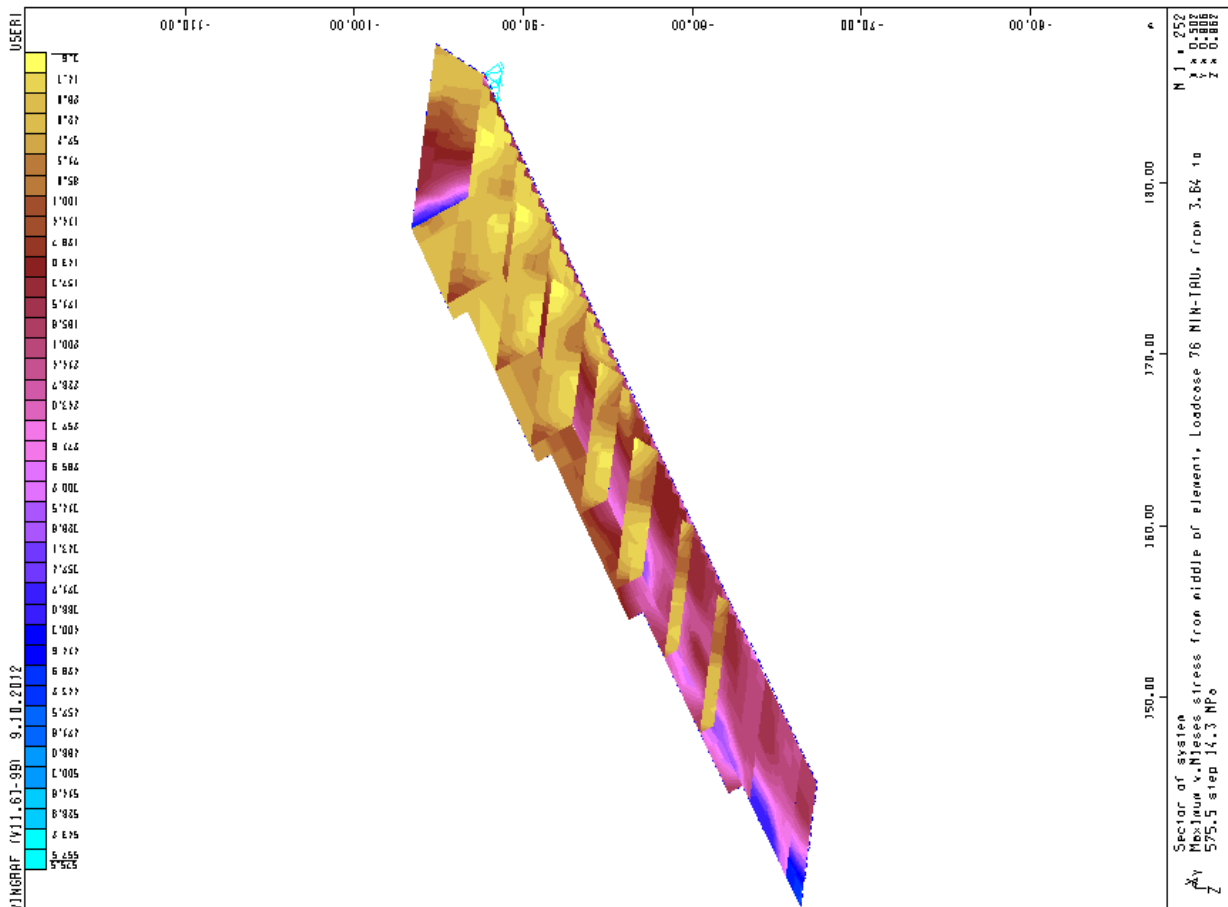
Σχήμα 5.70: Κεντρικό άνοιγμα - Κατάστρωμα



Σχήμα 5.69: Κεντρικό άνοιγμα - Κιβωτοποιειδής κύρια δοκός



Σχήμα 5.72: Ακραίο άνοιγμα - Κατάστρωμα



Σχήμα 5.71: Ακραίο άνοιγμα – Κιβωτοποιεϊδης κύρια δοκός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Μπορούν να σημειωθούν οι εξής παρατηρήσεις όσον αφορά το σχεδιασμό καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών:

- Συμπερότερη οικονομικά είναι η καλωδιωτή γέφυρα. Η κρεμαστή έχει μεγαλύτερο κόστος καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα υλικών (μεγάλο κόστος κατασκευής του κύριου καλωδίου καθώς και μεγάλες ποσότητες έρματος σκυροδέματος για την καλή αγκύρωσή του), οπότε συμφέρει για ανοίγματα μεγαλύτερα από 1000m, ενώ εμείς έχουμε $L=400m$. Το σύμμικτο κατάστρωμα και στις δύο γέφυρες προτιμήθηκε γιατί έχει χαμηλότερο κόστος έναντι του μεταλλικού (ο χάλυβας είναι ακριβό υλικό) αλλά μικρότερο *ι.β.* σε σχέση με αυτού από σκυρόδεμα.
- Και στα δύο μοντέλα ανάλυσης εφαρμόστηκε αρχικά προένταση 5% και εν συνεχεία 1%, χωρίς να παρατηρηθεί μεγάλη διαφορά στις αντιδράσεις στήριξης και γενικότερα στην ένταση του φορέα. Για προένταση 1% προέκυψαν παρόμοιες αντιδράσεις στήριξης στην έδραση των πυλώνων των δύο φορέων, ελαφρώς μεγαλύτερες στην καλωδιωτή.
- Στην καλωδιωτή γέφυρα οι ιδιομορφές έχουν μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους T σε σχέση με την κρεμαστή, οπότε υπάρχει μικρότερος κίνδυνος κατάρρευσης σε περίπτωση σεισμού.
- Όσον αφορά τα ελατήρια στις οριζόντιες δοκούς παρατηρήθηκε ότι στην καλωδιωτή η μέγιστη τιμή είναι 750KN και εμφανίζεται όταν έχουμε σεισμό E_y , ενώ στην κρεμαστή η μέγιστη τιμή είναι 2300KN και εμφανίζεται λόγω *ι.β.*
- Οι τάσεις von Mises προκύπτουν μεγαλύτερες στην κρεμαστή γέφυρα και συγκεκριμένα έχουμε υπέρβαση του ορίου διαρροής τόσο στο κατάστρωμα όσο και στην κύρια δοκό.

Συμπερασματικά, η καλωδιωτή γέφυρα είναι οικονομικότερη σε σχέση με την κρεμαστή και επιπλέον το μοντέλο ανάλυσής της έδωσε καλύτερα αποτελέσματα κατά τον υπολογισμό των ιδιοπεριόδων, των ελατηρίων αλλά κυρίως των τάσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ευρωκώδικας 1 – EN 1991-1: Βάσεις σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών.
2. Ευρωκώδικας 3 – EN 1993-1: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα.
3. Ευρωκώδικας 4 – EN 1994-2: Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα – Μέρος 2^ο: Σύμμικτες γέφυρες.
4. ΕΑΚ 2000.
5. Ερμόπουλος Ι., Σιδηρές και σύμμικτες γέφυρες (2^η έκδοση), εκδ. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Αθήνα, 2008.
6. Βάγιας Ι., Σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα (2^η έκδοση), εκδ. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Αθήνα, 2006.
7. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., Σιδηρές κατασκευές.
8. Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α., Σύμμικτες γέφυρες, Οδηγός σχεδιασμού με βάση τα DIN-Fachberichte και τους Ευρωκωδικες, εκδ. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Αθήνα, 2006.
9. Μιχάλτσος Γ., Προβλήματα δυναμικής των σιδηρών γεφυρών, εκδ. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα, 2005.
10. Παπαδρακάκης Μ., Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εκδ. ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, Αθήνα, 2001.
11. O' Connor Colin, Design of bridge superstructures, εκδ., UMI Books on demand.
12. Διπλωματική εργασία: Ζαχαράκη Β., Σχεδιασμός χαλύβδινης γέφυρας, Αθήνα, 2010.
13. Διπλωματική εργασία: Γάτσιου Ι., Στατική και δυναμική ανάλυση σύμμικτης γέφυρας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Αθήνα, 2008.
14. Μεταπτυχιακή εργασία: Στάμος Σ., Μελέτη καλωδιωτής γέφυρας, Αθήνα, 2005.
15. Sofistik manual analysis programs, version 12.00
16. Διάφοροι ιστότοποι