



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**«Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος
Ανάπτυξη»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΩΔΟΜΗΣ
ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Παναγιωτοπούλου Μαριάνθη

Επιβλέπων

Δρίβας Δημήτριος

Αθήνα, Ιανουάριος 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΩΔΟΜΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: Παναγιωτοπούλου Μαριάνθη

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρίβας Δημήτριος

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ: 2017-18

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διαφορετικών μεθόδων μοντελοποίησης και ανάλυσης της ίδιας κατασκευής.

Η κατασκευή που επιλέχθηκε είναι η ανωδομή μίας γέφυρας. Στην πρώτη περίπτωση η κατασκευή μοντελοποιείται, αναλύεται και επιλύεται ως ραβδωτό στοιχείο δεδομένης διατομής κατά μήκος του, στη δεύτερη ως ραβδωτό στοιχείο χωρίς διατομή αλλά με τις ιδιότητες της εκάστοτε διατομής στην κάθε θέση κατά μήκος του και στην τρίτη η ίδια κατασκευή προσομοιώνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Εφαρμόζονται κάποιες από τις χαρακτηριστικές φορτίσεις που βάσει Ευρωκώδικα αφορούν τα καταστρώματα γεφυρών. Γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων, ζητημάτων μοντελοποίησης και παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των μεθόδων αυτών. Η μέθοδος του ραβδωτού φορέα είναι μία μέθοδος ανάλυσης με πληθώρα εφαρμογών σε ζητήματα πολιτικού μηχανικού εδώ και πολλά χρόνια ενώ η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία πιο σύγχρονη και σύνθετη μέθοδος υπολογισμού κατασκευών με μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος αλλά και μεγαλύτερες δυνατότητες εξαγωγής αποτελεσμάτων και προσομοίωσης οποιασδήποτε κατασκευής. Το συμπέρασμα είναι ότι για μία απλή διαστασιολόγηση η μέθοδος του ραβδωτού φορέα χωρίς διατομή είναι χρήσιμη και αξιόπιστη για εξαγωγή διαγραμμάτων και για ελέγχους επάρκειας αλλά όχι για υπολογισμούς οπλισμών και πλήρη μελέτη, ενώ η μέθοδος του ραβδωτού φορέα με διατομή είναι χρήσιμη για όλα τα παραπάνω και για εξαγωγή αποτελεσμάτων απαίτησης σε οπλισμό, ενώ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορούμε να έχουμε όλα τα παραπάνω αλλά και πλήρη απεικόνιση των τάσεων σε κάθε θέση του στοιχείου και για κάθε φόρτιση αλλά με περισσότερο κόπο στην προσομοίωση. Συμπερασματικά, η κάθε μέθοδος έχει τη χρησιμότητα της ανάλογα με την ανάγκη που καλούμαστε να καλύψουμε και πρέπει να εξετάζουμε πριν αποφασίσουμε ποιά θα χρησιμοποιήσουμε.

POST-GRADUATE THESIS: «INVESTIGATION OF RESULTS OF BRIDGE SUPERSTRUCTURE MODULES WITH DIFFERENT SIMULATION METHODS»

STUDENT: Panagiotopoulou Marianthi

SUPERVISIR: Drivas Dimitrios

ACADEMIC YEAR: 2017-18

Abstract

The goal of this thesis is the comparison and evaluation of the results of different methods of simulation and analysis of the same structure.

The structure chosen is a bridge superstructure. In the first case the structure is simulated, analysed and solved as a beam element of specific cross section along its length. In the second case as a beam element but without a cross section but with the cross section values at each position along its length and at the third case the same structure is simulated via finite element method. Some of the characteristic loads that are defined by the Eurocodes and refer to bridge superstructures are applied. Next a comparison of the results, of the matters of simulation and of the advantages and disadvantages of these methods is performed. Beam method is a simulation method with multiple applications in civil mechanics matters for many years now while finite element method is a more modern and complex method with larger calculation cost but also with greater potential on result extraction and simulation of any kind of construction. The conclusion is that for a simple design the beam method without specific cross section is useful and reliable for extraction of stress diagrams and checks of section adequacy but not for calculation of reinforcement and full design, while the beam method with cross section simulation is useful for all the above but also for reinforcement calculation while with the finite element method we can accomplish all the above but also full calculation of the stresses at each position of the structure for each load but with more calculation cost.

Conclusively each method has its use according to the need we are to cover and we have to examine which is the most suitable to use at each case.

Περιεχόμενα

1 ΓΕΝΙΚΑ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΟΡΕΑ	9
1.1 Μέθοδος ραβδωτού φορέα / Ιστορική αναδρομή - Περιγραφή μεθόδου – Βασικές έννοιες.....	9
1.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων / Ιστορική αναδρομή - Περιγραφή μεθόδου – Βασικές έννοιες	13
2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ	16
2.1 Γενικά.....	16
2.2 Κανονισμοί.....	16
2.3 Γενικά για τις γέφυρες.....	16
2.4 Φορέας – Υλικά – Περιοχή μελέτης.....	17
2.5 Διατομές Φορέα	17
3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΟΡΕΑ	21
3.1 Λογισμικό προσομοίωσης	21
3.2 Μοντέλα	21
3.2.1 Ραβδωτό μοντέλο με διατομή.....	21
3.2.2 Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή.....	26
3.2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.....	28
4 ΦΟΡΤΙΑ	31
4.1 Μόνιμα Φορτία	31
4.2 Κινητά φορτία	32
4.2.1 Φορτία κυκλοφορίας.....	32
4.2.2 Δυνάμεις πέδησης και επιτάχυνσης.....	35
4.2.3 Κινητό φορτίο πεζοδρομίων	35
4.3 Θερμοκρασιακές δράσεις	36
4.3.1 Γενικές Παραδοχές	36
4.3.2 Συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας - EC1-1-5 §6.1.3	37
4.3.3 Συνιστώσες θερμοκρασιακής διαφοράς – Καθ’ ύψος γραμμική συνιστώσα - EC1-1-5 §6.1.4.40	
4.3.4 Ταυτόχρονη δράση των συνιστωσών ομοιόμορφης θερμοκρασίας και θερμοκρασιακής διαφοράς.....	41
4.4 Ερπυσμός και συρρίκνωση.....	41
4.5 Φορτία ανέμου – Χιονιού	42
4.6 Σεισμική φόρτιση.....	42
4.6.1 Οριζόντια σεισμική συνιστώσα.....	42
4.6.2 Κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα	43
4.6.3 Μάζες	43
4.7 Συνδυασμοί Δράσεων	43
4.7.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (OKA ή Ultimate Limit State - ULS)	44

4.7.2 Σεισμικοί συνδυασμοί.....	45
5 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	48
5.1 Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή	48
5.2 Ραβδωτό μοντέλο με διατομή	56
5.3 Μοντέλο Πεπερασμένων στοιχείων	63
6 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	73
6.1 Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή	73
6.2 Ραβδωτό μοντέλο με διατομή	85
6.3 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.....	97
7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ / ΠΗΓΕΣ	121

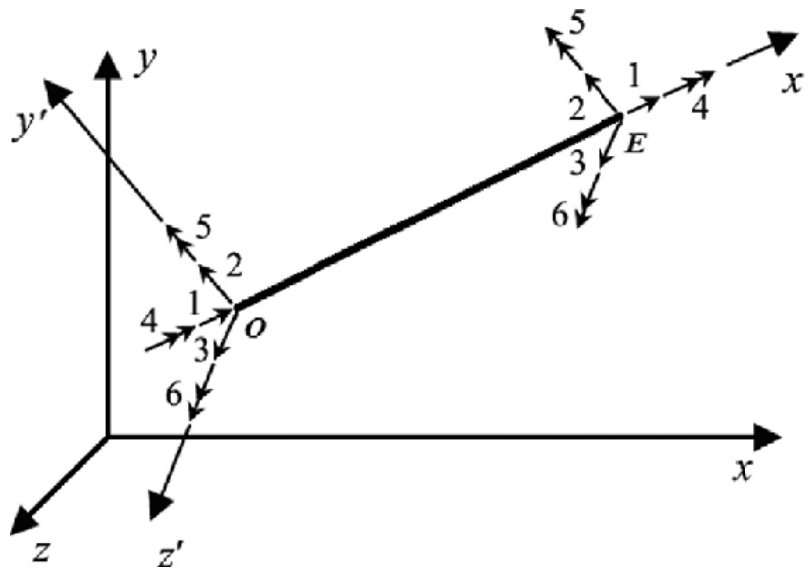
1 ΓΕΝΙΚΑ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΟΡΕΑ

1.1 Μέθοδος ραβδωτού φορέα / Ιστορική αναδρομή - Περιγραφή μεθόδου – Βασικές έννοιες

Ραβδωτός φορέας είναι ένας φορέας του οποίου η μία διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες δύο (μήκος σε σχέση με διαστάσεις διατομής). Ο άξονας του στοιχείου ορίζεται παράλληλα στην μεγαλύτερη διάσταση, ενώ οι διαστάσεις διατομής μπορούν ομαλά να μεταβάλλονται κατά μήκος του άξονα αυτού.

Με τη μέθοδο του ραβδωτού φορέα, ένας φορέας σύνθετης γεωμετρίας/διατομής αποδίδεται με τις ιδιότητές του κατά μήκος μίας ράβδου/ενός άξονα. Ο άξονας αυτός μπορεί να είναι ο κεντροβαρικός αλλά και οποιοσδήποτε άλλος άξονας, πχ η πάνω ή η κάτω ίνα της διατομής.

Η γεωμετρία της ράβδου περιγράφεται από δύο κόμβους, τον κόμβο αρχής και τέλος. Στους κόμβους της ράβδου αποδίδονται 6 βαθμοί ελευθερίας (μετακίνηση σε τρεις διευθύνσεις και στροφή σε τρεις άξονες) για τρισδιάστατα συστήματα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

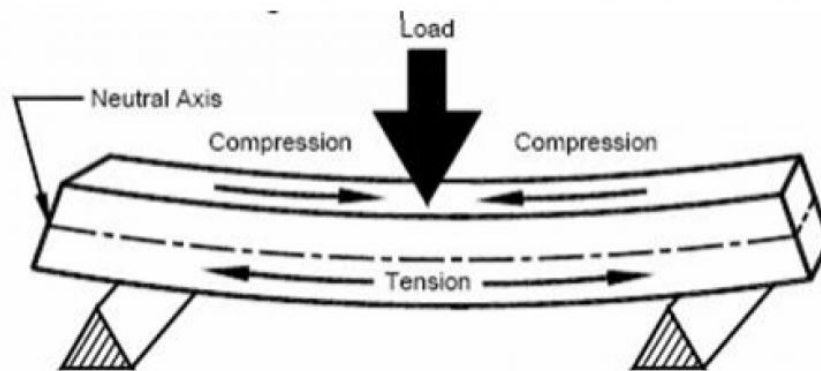


Εικόνα 1 – Στοιχείο ράβδου, 2 κόμβοι με 6 β.ε. ανά κόμβο

(πηγή: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Assidi/publication/305266791/figure/fig1/AS:383339581198336@1468406686691/fig-3-3D-beam-element-with-six-degrees-of-freedom-at-each-node-in-local-coordinates.png)

Τα φορτία προβάλλονται ουσιαστικά στον άξονα της ράβδου, πχ ένα έκκεντρο φορτίο προσομοιώνεται ως φορτίο επί του άξονα και ροπή στρέψεως της ράβδου ίση με τη ροπή που προκύπτει από τη δύναμη επί την απόσταση της δύναμης από το κέντρο βάρους της διατομής.

Σε ένα ραβδωτό στοιχείο υπό κάμψη η πάνω ίνα της διατομής συστέλλεται ενώ η κάτω διαστέλλεται, ενώ υπάρχει ένα επίπεδο μεταξύ της άνω και της κάτω ίνας της διατομής που διατηρεί τις αρχικές του διαστάσεις, η γραμμή που ορίζει αυτό το επίπεδο – δηλαδή άνωθεν της η διατομή συστέλλεται για τη δεδομένη φόρτιση ενώ κάτωθεν της διαστέλλεται - λέγεται ουδέτερος άξονας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.



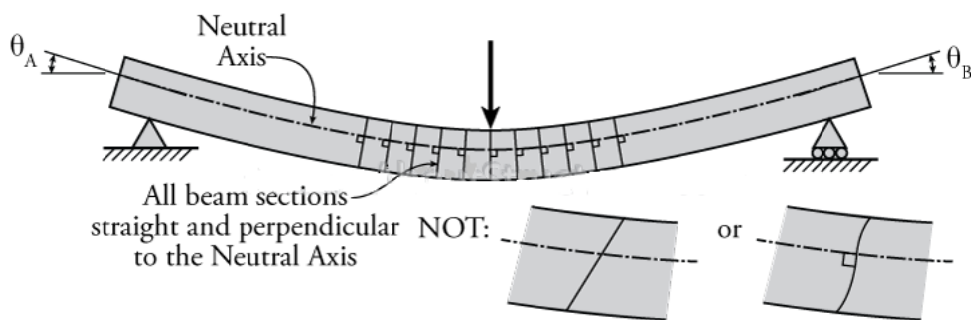
Εικόνα 2 - Δοκός υπό κάμψη - ουδέτερος άξονας (neutral axis)

(πηγή:http://static.heavyliftnews.com/media/b9/8/e3adb5fcf2ed92e925d145b8550c82ce1e3492087b7fb6fe48c831612307389b_m.jpg)

Για να ισορροπεί ένα ραβδωτό στοιχείο, οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό είναι ίσες με τις εσωτερικές (ορθές και διατμητικές τάσεις).

Το 1750 οι Euler και Bernoulli διατύπωσαν μια θεωρία για τους ραβδωτούς φορείς ως επέκταση της γραμμικής θεωρίας ελαστικότητας. Η θεωρία αυτή επέτρεπε τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και τάσεων διατομής θεωρώντας ότι η διατομή είναι άκαμπτη στο επίπεδό της, (ορίζει δηλαδή ότι σε άνα παραμορφωμένο φορέα η διατομή της ράβδου σε κάθε θέση είναι κάθετη στον παραμορφωμένο άξονα).

Η θεωρία αυτή βρίσκει ανταπόκριση σε μεγάλο εύρος προβλημάτων, αλλά δε μπορεί να εφαρμοστεί σε διατομές των οποίων το ύψος δεν είναι αμελητέο σε σχέση με το μήκος τους. Η θεωρία των Euler και Bernoulli παρότι διατυπώθηκε πολύ νωρίτερα άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα.



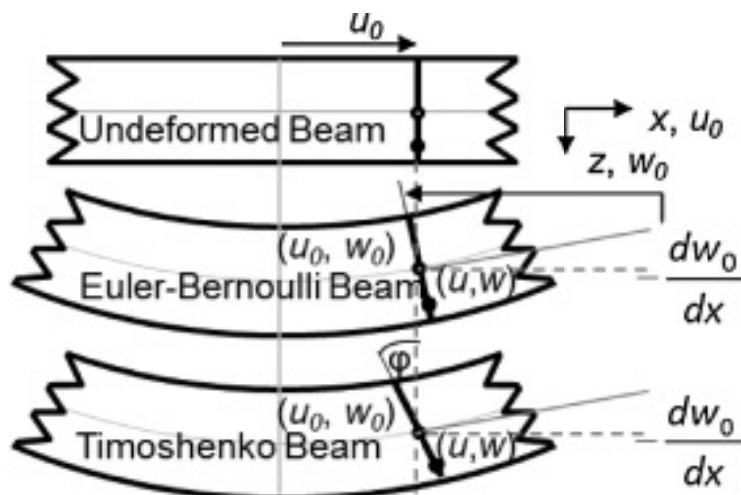
Εικόνα 3 - Δοκός Euler - Bernoulli

(πηγή: <http://www.learnaboutstructures.com/sites/default/files/images/4-Deflections/Plane-Sections.png>)

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο Stephen Timoshenko διατύπωσε μία θεωρία για τις δοκούς ως επέκταση της θεωρίας των Euler και Bernoulli που όμως λαμβάνει υπ'όψιν τη διατμητική παραμόρφωση της διατομής.

Οι βασικές αρχές της θεωρίας είναι ότι ο διαμήκης άξονας της αφόρτιστης ράβδου είναι ευθύγραμμος, όλα τα φορτία δρουν εγκάρσιως του διαμήκους άξονα, οι παραμορφώσεις είναι μικρές και μπορούν να υπολογιστούν με το νόμο του Hook και ότι οι επίπεδες διατομές που αρχικά είναι κάθετες στο διαμήκη άξονα θα παραμείνουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση.

Αυτό είναι και το σημείο βασικού διαχωρισμού από τις παραδοχές της θεωρίας των Euler και Bernoulli που όριζαν ότι οι διατομές θα παραμένουν κάθετες στον παραμορφωμένο άξονα, ο Timoshenko όρισε ότι οι επίπεδες διατομές θα περιστραφούν λόγω διατμητικών τάσεων.



Εικόνα 4 - Δοκός Euler - Bernoulli και δοκός Timoshenko υπό κάμψη

(πηγή: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0379073815005423-gr3.jpg>)

Σήμερα έχει πλέον διατυπωθεί η γενικευμένη θεωρία ραβδωτών φορέων / Generalised beam theory (GBT) που αποτελεί την πιο πλήρη και εμπειριστατωμένη θεώρηση στο ζήτημα των ραβδωτών φορέων. Η προέλευση της οφείλεται στον γερμανό Richard Schardt (1966) από το

πανεπιστήμιο Darmstadt (1ης τάξης ελαστική ανάλυση) αλλά έκτοτε έχει αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές όπως ο Dinar Camotim του πανεπιστημίου της Λισσαβώνας από τις αρχές του 21ου αιώνα και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε πρισματικό, λεπτότοιχο μέλος ευθύγραμμου ή καμπύλου άξονα και για οποιοσδήποτε συνοριακές συνθήκες.

1.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων / Ιστορική αναδρομή - Περιγραφή μεθόδου – Βασικές έννοιες

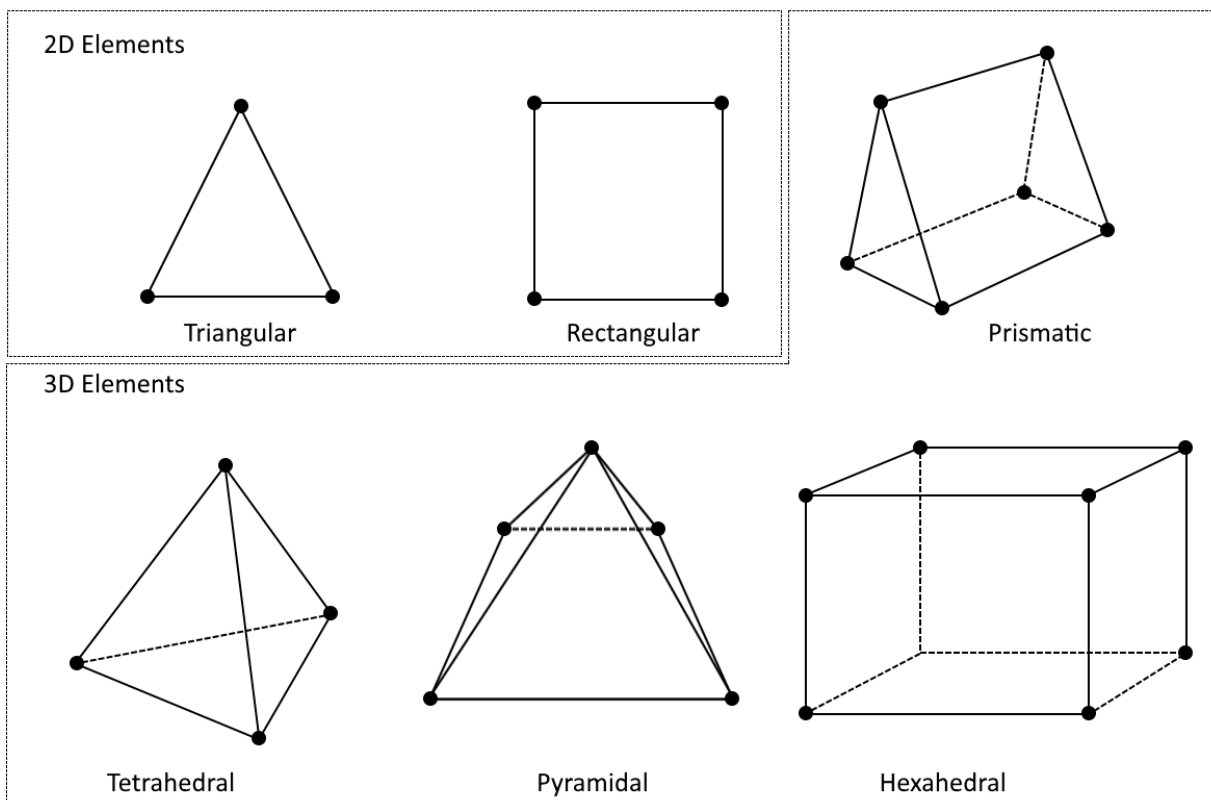
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ ή Finite Element Method) αρχικά διατυπώθηκε ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης, αργότερα όμως αναπτύχθηκε ευρύτερα και σε πιο θεμελιώδη θεωρητική βάση. Σύμφωνα με τον Πέτρο Α. Καρύδη [6] (Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές) από τις πρώτες δημοσιεύσεις για την μέθοδο ήταν αυτή των M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, και L. J. Topp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί από τους Richard Courant (1943), Alexander Pavlovich Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους.

Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Ιωάννη Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών.

Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίστηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου Ritz, και το 1964 οι Zienkiewicz και Cheung έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση.

Για προβλήματα κατασκευών υπάρχει τώρα ένας ικανός αριθμός προγραμμάτων γενικής χρήσης και το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τις δυνατότητες της μεθόδου έχει οδηγήσει στην ραγδαία εξέλιξη και χρήση της τα τελευταία χρόνια.

Η λογική της μεθόδου αυτής είναι ότι μία πραγματική κατασκευή (φορέας) μπορεί να προσομοιωθεί χωριζόμενη σε συστατικά της τμήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω πεπερασμένου αριθμού κόμβων. Ο χωρισμός στα τμήματα αυτά δεν είναι φυσικός/πραγματικός- αφού η κατασκευή είναι συνεχής- αλλά γίνεται τεχνητά προς εξυπηρέτησιν της μεθόδου. Όταν τα στοιχεία είναι επιφανειακά (δηλαδή επίπεδα) –αφού οι κόμβοι είναι πεπερασμένοι- είναι τριγωνικά ή τετράπλευρα (τρίκομβοι ή τετράκομβοι) και συνδέονται στις ακμές τους (τα εγγύς μοιράζονται κοινή πλευρά). Οι κόμβοι τους βρίσκονται στα άκρα τους. Όταν είναι χωρικά έχουμε από 4 έως 8 κόμβους.

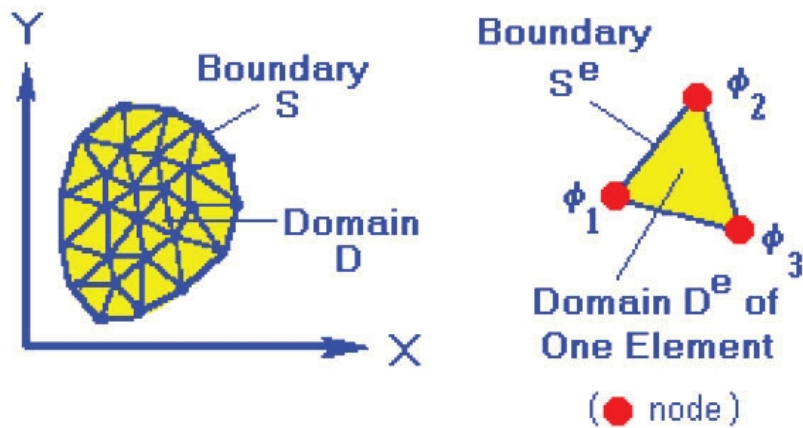


Εικόνα 5 - Πεπερασμένα στοιχεία

(πηγή: <https://cdn.comsol.com/cyclopedia/finite-element-method/geometry-and-nodes-linear-elements.png>)

Για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν οι μητρικές μέθοδοι, θα πρέπει να προσομοιωθεί η κατασκευή με πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών, οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων των στοιχείων και ενίοτε οι παράγωγοί τους. Στην περίπτωση που περιλαμβάνονται οι παράγωγοι των μετατοπίσεων κάνουμε πλέον λόγο για βαθμούς ελευθερίας.

Οι μετατοπίσεις των στοιχείων θα πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και πλέον οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται μέσω των μετατοπίσεων αυτών. Το πρόβλημα πλέον μεταφράζεται από αόριστο και συνεχές (σε όλο το εύρος του φορέα) στην εύρεση ενός διακριτού αριθμού μετατοπίσεων των κόμβων του στοιχείου και επιλύεται ως ένα πλήθος γραμμικών εξισώσεων με αριθμητικές μεθόδους (μεθόδους μητρώων).



Εικόνα 4 - Πεπερασμένα στοιχεία - Τρίγωνικά σε τυχαίο σχήμα φορέα
 (πηγή: https://www.mathworks.com/content/mathworks/www/en/company/newsletters/articles/accelerating-finite-element-analysis-in-matlab-with-parallel-computing/jcr:content/mainParsys/image_5.adapt.full.high.jpg/1469941508720.jpg)

Για να μπορέσει να επιλυθεί σωστά το πρόβλημα αυτό θα πρέπει στο εσωτερικό και στα σύνορα των πεπερασμένων στοιχείων να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας. Λόγω του ότι τις μετατοπίσεις στη μέθοδο αυτή τις φέρουν οι κόμβοι (ενώ στην πραγματικότητα το στοιχείο είναι συνεχές και η παραμόρφωση συνεχόμενη), δημιουργούνται κενά/ασυνέχειες στα σύνορα των στοιχείων/ακμές. Αυτό, παράγει σφάλμα σε σχέση με την πραγματική απόκριση του φορέα. Το σφάλμα αυτό περιορίζεται με τη χρήση περισσότερων και άρα μικρότερου μεγέθους πεπερασμένων στοιχείων (ήτοι περισσότεροι κόμβοι). Αλλά θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να γνωρίζουμε ότι λόγω της διακριτοποίησης του συνεχούς μέσου θα παράγεται πάντα κάποιο σφάλμα σε σχέση με τον πραγματικό φορέα, το οποίο όμως αν διαχειριστούμε σωστά τις παραδοχές της μοντελοποίησης θα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο, μέσω της σωστής παραδοχής μεταβολής των τάσεων στο εσωτερικό των πεπερασμένων και ορίζοντας σωστές ιδιότητες στα στοιχεία αυτά μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι θα έχουμε ικανοποιητική συμβιβαστότητα και στο εσωτερικό εκτός από μόνο τους κόμβους. Από τα προαναφερθέντα γίνεται σαφές ότι όσο πιο μικρά είναι τα τμήματα στα οποία υποδιαιρείται ένας φορέας τόσο πιο ικανοποιητική είναι και η προσομοίωση ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και τόσο πιο επίπονη και κοστοβόρα, γι' αυτό θα πρέπει να βρίσκεται η χρυσή τομή μεταξύ οικονομίας υπολογισμών και ικανοποιητικής απόδοσης του φορέα.

Η προσομοίωση των εξωτερικών φορτίων στη μέθοδο αυτή γίνεται μέσω της μεταφοράς τους στους κόμβους, χρησιμοποιούνται δηλαδή ισοδύναμα επικόμβια φορτία.

2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1 Γενικά

Για την εργασία επιλέχθηκε προς ανάλυση η ανωδομή μίας γέφυρας. Η έδραση μέσω των ελαστομεταλλικών εφεδράνων προσομοιώθηκε με ελατήρια και τα βάθρα ως σημειακές στηρίξεις και έτσι δόθηκε έμφαση στο στατικά ανεξάρτητο τμήμα της ανωδομής.

Εξετάζονται κάποιες χαρακτηριστικές φορτίσεις που αφορούν τις γέφυρες. Επιλέχθηκε να μελετηθούν δύο συνδυασμοί φορτίσεως η οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ) και οι σεισμικοί συνδυασμοί ως πιο χαρακτηριστικοί για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

2.2 Κανονισμοί

Χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι και οι οδηγίες του Ευρωκώδικα και συγκεκριμένα:
Οι κανονισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση και την επίλυση είναι

- EN 1990: Ευρωκώδικας 0 – Βάσεις σχεδιασμού φερουσών κατασκευών
- EN 1991: Ευρωκώδικας 1 – Δράσεις στις Φέρουσες Κατασκευές και Μέρος 2: Φορτία κυκλοφορίας σε γέφυρες
- EN 1992: Ευρωκώδικας 2 – Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από σκυρόδεμα
- EN 1998: Ευρωκώδικας 8 – Αντισεισμικός σχεδιασμός φερουσών κατασκευών και ειδικά το Μέρος 2, EN 1998-2:2005, Αντισεισμικός Σχεδιασμός γεφυρών
- ΟΜΟΕ (Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων) Κεφάλαιο 4 – Γέφυρες.

2.3 Γενικά για τις γέφυρες

Η γέφυρα είναι ένα ειδικό τεχνικό έργο του οποίου η σκοπιμότητα είναι να φέρει μία οδό πάνω από οποιοδήποτε κώλυμα όπως ποτάμι, γκρεμό, άλλη οδό.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη γεφυρών αναφορικά με τα υλικά κατασκευής πχ

- γέφυρες σκυροδέματος,
- μεταλλικές,
- σύμμικτες,
- ξύλινες,
- πέτρινες,

αναφορικά με τη χρήση τους πχ

- οδικές,
- πεζογέφυρες,

- σιδηροδρομικές,

αναφορικά με το στατικό τους σύστημα πχ

- γέφυρες πλαισιακής λειτουργίας,
- αμφιέριστες ή αλλιώς μορφής δοκού,
- καλωδιωτές,
- δικτυωτές,
- τοξοτές,

αναφορικά με τη μέθοδο κατασκευής πχ

- προβολοδομούμενες,
- κατασκευή με τη μέθοδο των φορέων,
- γέφυρες με προκατασκευή κ.ά.

Η ενδεικτική διάρκεια ζωής γέφυρας είναι βάσει EC0 2.3 Πίν. 2.1 100 έτη.

2.4 Φορέας – Υλικά – Περιοχή μελέτης

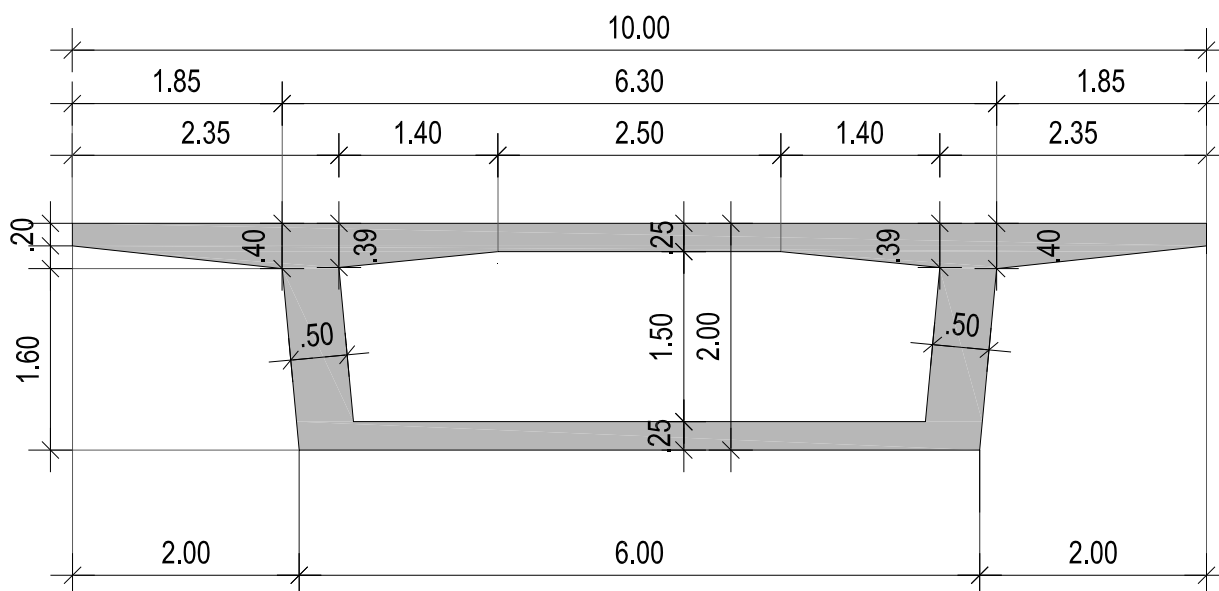
Ο φορέας που επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία, είναι η ανωδομή μίας ευθύγραμμης γέφυρας, οπλισμένου σκυροδέματος, ενός ανοίγματος, μονοκυβελικής κιβωτιοειδούς διατομής, μήκους 20 μέτρων (θεωρητικού μήκους 19 μέτρων), εδραζομένης επί ελαστομεταλλικών εφεδράνων.

Το σκυρόδεμα είναι ποιότητας C35/45 και ο χάλυβας οπλισμού B500C. Η περιοχή κατασκευής θεωρούμε ότι είναι η Αθήνα.

2.5 Διατομές Φορέα

Οι κιβωτιοειδείς διατομές προτιμώνται συχνά για μεγάλα ανοίγματα λόγω της καλής συμπεριφοράς όπως καλή σχέση δυσκαμψίας και δυστρεψίας σε συνδυασμό με λιγότερα νεκρά φορτία.

Στην περιοχή του μέσου του ανοίγματος, για ένα μήκος 10 μέτρων η διατομή του φορέα είναι η εικονιζόμενη στο παρακάτω σχήμα.

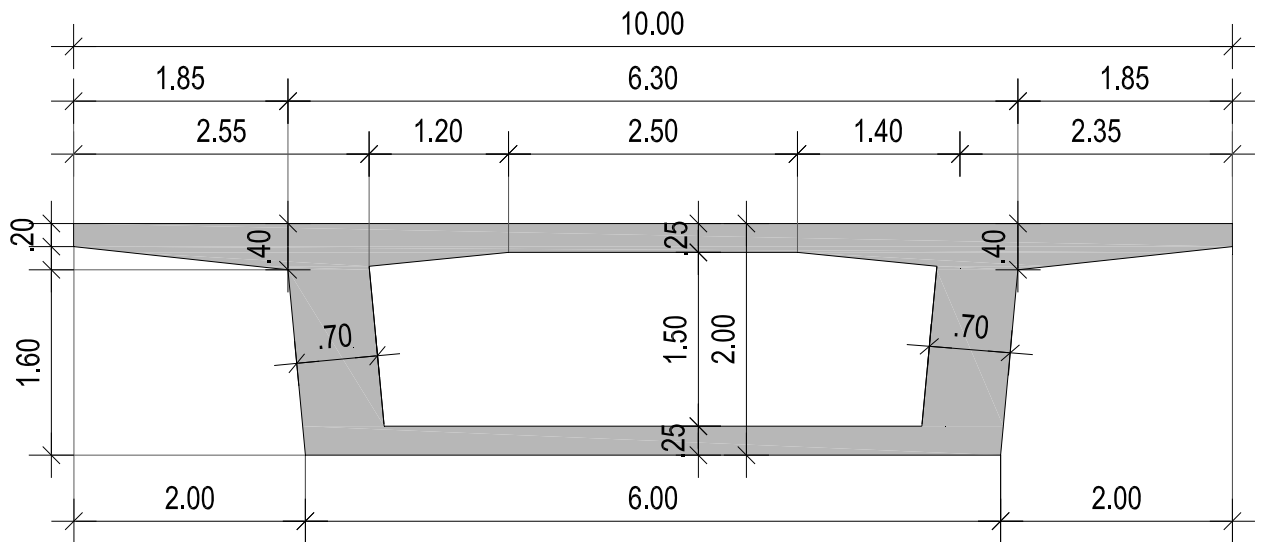


Διατομή ανοίγματος

Η διατομή είναι συμμετρική ως προς το μέσον του πλάτους της. Αποτελείται από την πάνω πλάκα (άνω πέλμα διατομής) πάχους 25εκ για 2.5 μέτρα και σταδιακά αυξανόμενου πάχους για 1.40 μέτρα σε κάθε μεριά έως τα 40 εκ στη συμβολή της πλάκας με τους κορμούς της διατομής. Τα άκρα της πλάκας είναι πρόβολοι μήκους 1.85 μέτρων πάχους 20εκ στην άκρη και 40εκ στη συμβολή με τους κορμούς. Οι πρόβολοι αυτοί στις γέφυρες, φέρουν τα πεζοδρόμια, που έχουν πολύ μικρότερα φορτία από τα φορτία κυκλοφορίας που αναλαμβάνει το υπόλοιπο κατάστρωμα της γέφυρας.

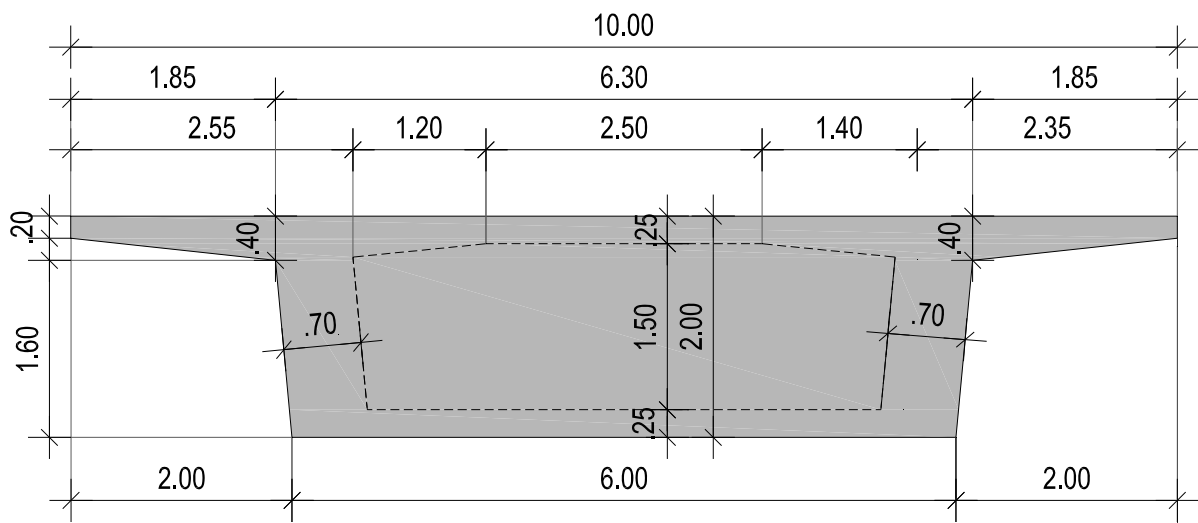
Το συνολικό πλάτος της διατομής στο άνω πέλμα της είναι 10 μέτρα. Μονολιθικά συνδεδεμένοι στην πλάκα είναι οι κορμοί του κιβωτίου, ελαφρώς κεκλιμένοι σε σχέση με την κατακόρυφο και σταθερού πάχους 50εκ μέχρι να συναντήσουν την κάτω πλάκα του κιβωτίου (κάτω πέλμα διατομής), επίσης σταθερού πάχους 25εκ σε όλο το πλάτος της, που φτάνει τα 6μέτρα. Το συνολικό ύψος της διατομής είναι 2 μέτρα.

Ακολουθεί για 4 μέτρα προς τις στηρίξεις σταδιακή πάχυνση των κορμών από 50 εκ σε 70 εκ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Διατομή με πάχυνση κορμών πριν τη στήριξη

Στην περιοχή των στηρίξεων, για 50εκ εκατέρωθεν του άξονα στηρίξεως (συνολικά 1 μέτρο) έχουμε τη συμπαγή διατομή του παρακάτω σχήματος.

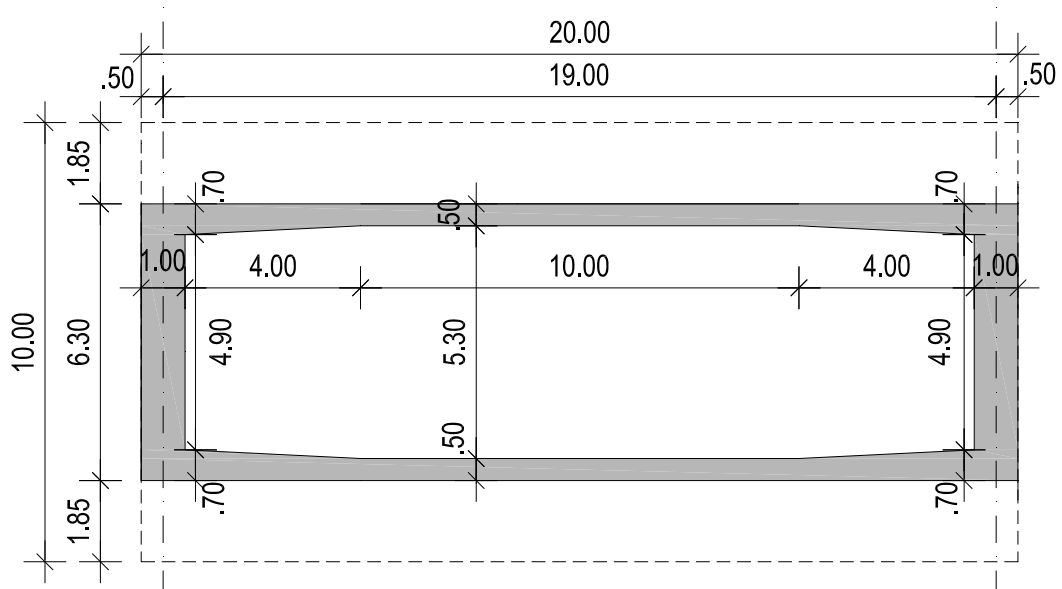


Συμπαγής διατομή στην περιοχή των στηρίξεων

Η κάτω παρειά της διατομής είναι σε επαφή με δύο ελαστομεταλλικά εφέδρανα στην αρχή και στο τέλος της γέφυρας (άξονες στήριξης – απόσταση αξόνων 19 μέτρα).

Συνήθως στις θέσεις αυτές στις γέφυρες υπάρχουν οπές που χρησιμεύουν για την επισκευσιμότητα του κιβωτίου αλλά κάτι τέτοιο δεν κρίθηκε σκόπιμο να ληφθεί υπ'όψιν στην παρούσα εργασία.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται ο φορέας σε οριζόντια τομή



Οριζόντια τομή φορέα

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα είναι συνηθισμένο στη γεφυροποιία να χρησιμοποιούνται για τη στήριξη της ανωδομής στα βάθρα, όπου δεν γίνεται η σύνδεση μονολιθικά. Είναι κατασκευές οι οποίες αποτελούνται από στρώσεις χαλύβδινων λαμαρίνων ανάμεσα από τις οποίες παρεμβάλλονται στρώσεις από καουτσούκ ή πολυχρωπένιο και συνδέονται με των ανωδομή και τα βάθρα με πείρους. Επιτρέπουν μετακινήσεις και στροφές στο κατάστρωμα.

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΟΡΕΑ

3.1 Λογισμικό προσομοίωσης

Για την προσομοίωση αλλά και στατική και δυναμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SOFiSTiK Structural & Finite Element program (SOFISTIK AG), πρόγραμμα που χρησιμοποιείται ευρέως στις μελέτες γεφυρών παγκοσμίως. Οι διατομές και τα υλικά περιγράφονται μέσω του υποπρογράμματος AQUA, η γεωμετρία του φορέα στο SOSIMSHA, τα μοντέλα των φορτίων στο SOFILOAD, οι επιλύσεις των φορτίων γίνονται στο ASE, οι αναλύσεις για το σεισμό στο DYNA, στο SIR που χρησιμοποιείται για τα π.σ. γίνεται η ολοκλήρωση των εντατικών μεγεθών σε έναν άξονα για εξαγωγή αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών πάνω στον άξονα αυτό, μέσω WINGRAF γίνεται η εξαγωγή των γραφημάτων για φορτίσεις, διαγράμματα κ.ά., μέσω του MAXIMA υπολογίζονται οι περιβάλλουσες των εντατικών μεγεθών για υπολογισμό των κρισιμότερων εντατικών μεγεθών που δρουν σε κάθε στοιχείο για όλες τις φορτίσεις και συνδυασμούς και μέσω του AQB η διαστασιολόγηση των ραβδωτών στοιχείων ενώ στο BEMESS η διαστασιολόγηση των π.σ. Ο REPORT BROWSER μας δίνει το τεύχος μελέτης με πινακοποιημένα όλα τα αποτελέσματα της μελέτης.\

3.2 Μοντέλα

3.2.1 Ραβδωτό μοντέλο με διατομή

Το σύστημα είναι τρισδιάστατο και ο άξονας της γέφυρας είναι στη διεύθυνση του x ενώ οι διατομές είναι στο επίπεδο που ορίζουν οι y και z με τον z να είναι στη διεύθυνση της βαρύτητας (θετικά z προς τα κάτω).

Τα εφέδρανα προσομοιώθηκαν ως ελατήρια συνδεδεμένα στο ένα άκρο τους με την ανωδομή και στο άλλο με μία στήριξη που δουλεύει ως πάκτωση και υπονοεί την έδραση στα ακρόβαθρα τα οποία όμως δεν προσομοιώθηκαν γιατί θεωρήθηκε ότι ξεφεύγουν από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Οι ελατηριακές σταθερές υπολογίστηκαν ως εξής:

Για τις οριζόντιες διευθύνσεις x και y

Οριζόντια ακαμψία = μέτρο διάτμησης* επιφάνεια εφεδράνου / ολικό πάχος ελαστικού =
= $A * G / H$ z και για το εφέδρανο της εργασίας 6600 kN/m³

Κατακόρυφη ακαμψία = μέτρο ελαστικότητας * επιφάνεια εφεδράνου / ολικό πάχος ελαστικού
= $A * E / H = 4500000$ kN/m³

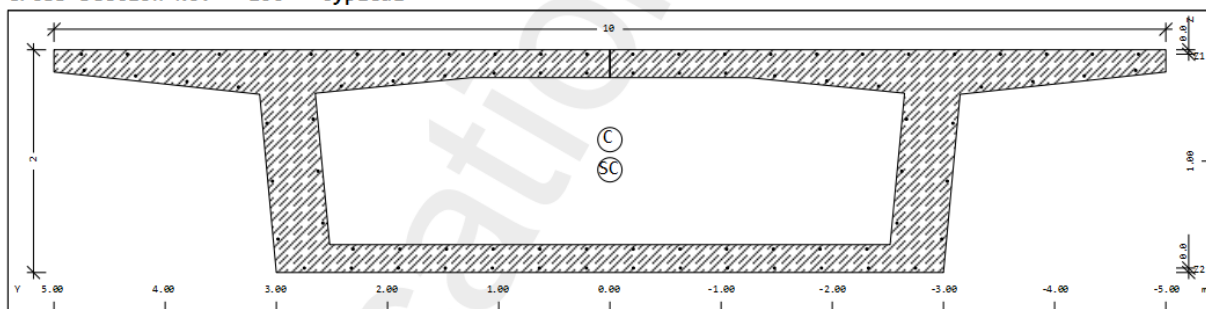
Ορίσαμε τον άξονα της ράβδου θεωρώντας τον στο μέσο του άνω πέλματος της διατομής και πάνω στον άξονα αυτό ορίστηκαν οι διαφορετικές διατομές, με τα υλικά τους και τον οπλισμό τους ανά τμήμα της ράβδου.

Η διατομή ορίστηκε με περιγραφή των κορυφών του πολυγώνου που ορίζουν το σχήμα της εξωτερικά και με περιγραφή των κορυφών του πολυγώνου που διαμορφώνει την τρύπα εσωτερικά.

Ορίστηκαν και οι στρώσεις του οπλισμού η θέση τους στη διατομή θεωρώντας επικάλυψη 4εκ, για να γίνει διαστασιολόγηση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων της απαίτησης σε οπλισμό για τους κρίσιμους συνδυασμούς.

Για καλύτερα αποτελέσματα ανάλυσης, το ενιαίας διατομής τμήμα των 10 μέτρων μοιράστηκε σε μικρότερα τμήματα ίδιας διατομής, η οποία ονομάστηκε διατομή 100 και είναι η εικονιζόμενη παρακάτω.

Cross section No. 100 - typical



Cross section No. 100 - typical

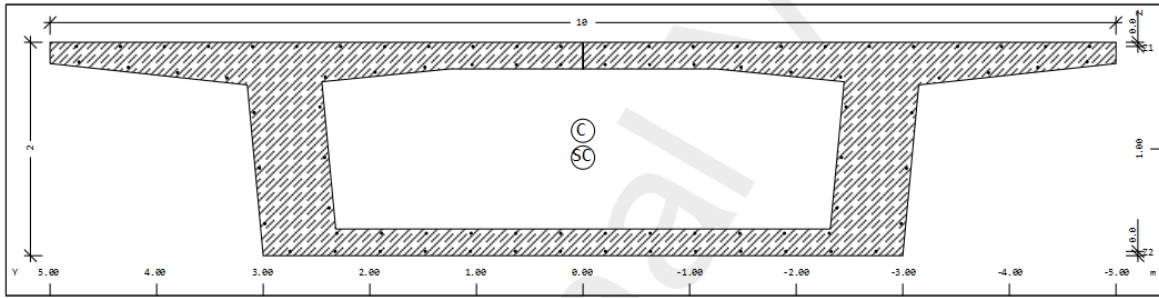
Static properties of cross section

SNo	Mat	A[m2]	Ay[m2]	Iy[m4]	yc[m]	ysc[m]	E[MPa]	g[kg/m]
	MRf	It[m4]	Az[m2]	Iz[m4]	zc[m]	zsc[m]	G[MPa]	
			Ayz[m2]	Iyz[m4]				
100	1	5.8928E+00	3.721E+00	3.337E+00	0.000	0.000	34077	14732.0
	2	8.355E+00	1.007E+00	4.073E+01	0.807	1.078	14199	(BEAM)
= typical								
SNo	section number		ysc[m],zsc[m]		ordinate of shear centre			
Mat	material number		E[MPa]		Young's modulus			
A[m2]	sectional area		g[kg/m]		weight per length			
Ay[m2],Az[m2],Ayz[m2]	transverse shear deformation area		MRf		reinforcement material number			
Iy[m4],Iz[m4],Iyz[m4]	bending moment of inertia		It[m4]		torsional moment of inertia			
yc[m],zc[m]	ordinate of elastic centroid		G[MPa]		Shear modulus			

Διατομή 100 και πίνακας στοιχείων της όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα REPORT BROWSER

Στην περιοχή της σταδιακής πάχυνσης των κορμών του κιβωτίου περιγράφηκαν ανά μέτρο οι διατομές ενδιάμεσου πάχους που προέκυπταν στις θέσεις και είναι οι διατομές 200 έως 204.

Cross section No. 200 - web 0.70



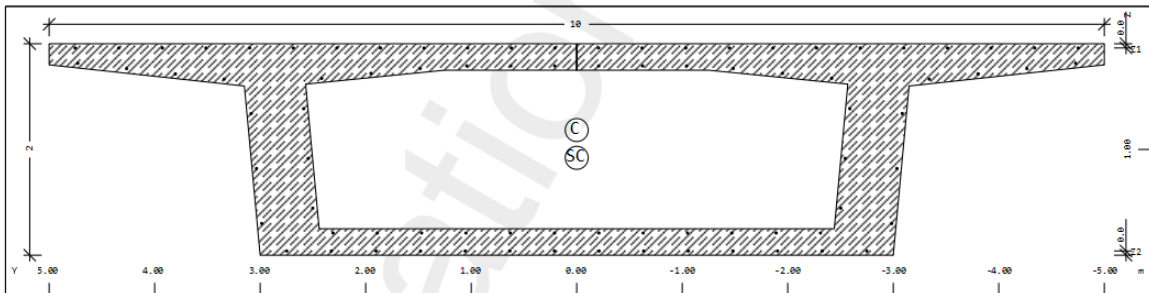
Cross section No. 200 - web 0.70

Static properties of cross section

SNo	Mat	A[m2]	Ay[m2]	Iy[m4]	yc[m]	ysc[m]	E[MPa]	g[kg/m]
	MRf	It[m4]	Az[m2]	Iz[m4]	zc[m]	zsc[m]	G[MPa]	
			Ayz[m2]	Iyz[m4]				
200	1	6.4434E+00	3.714E+00	3.456E+00	0.000	0.000	34077	16108.5
	2	8.547E+00	1.336E+00	4.414E+01	0.829	1.080	14199	(BEAM)
= web 0.70								
SNo	section number			ysc[m],zsc[m]		ordinate of shear centre		
Mat	material number			E[MPa]		Young's modulus		
A[m2]	sectional area			g[kg/m]		weight per length		
Ay[m2],Az[m2],Ayz[m2]	transverse shear deformation area			MRf		reinforcement material number		
Iy[m4],Iz[m4],Iyz[m4]	bending moment of inertia			It[m4]		torsional moment of inertia		
yc[m],zc[m]	ordinate of elastic centroid			G[MPa]		Shear modulus		

Διατομή 200 και πίνακας στοιχείων της

Cross section No. 203 - web 0.58



Cross section No. 203 - web 0.58

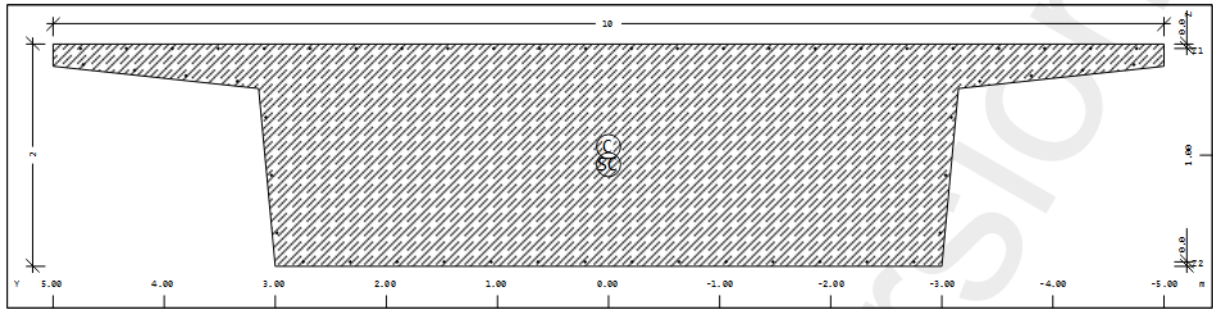
Static properties of cross section

SNo	Mat	A[m2]	Ay[m2]	Iy[m4]	yc[m]	ysc[m]	E[MPa]	g[kg/m]
	MRf	It[m4]	Az[m2]	Iz[m4]	zc[m]	zsc[m]	G[MPa]	
			Ayz[m2]	Iyz[m4]				
203	1	6.1124E+00	3.718E+00	3.385E+00	0.000	0.000	34077	15280.9
	2	8.445E+00	1.135E+00	4.216E+01	0.817	1.079	14199	(BEAM)
= web 0.58								
SNo	section number			ysc[m],zsc[m]		ordinate of shear centre		
Mat	material number			E[MPa]		Young's modulus		
A[m2]	sectional area			g[kg/m]		weight per length		
Ay[m2],Az[m2],Ayz[m2]	transverse shear deformation area			MRf		reinforcement material number		
Iy[m4],Iz[m4],Iyz[m4]	bending moment of inertia			It[m4]		torsional moment of inertia		
yc[m],zc[m]	ordinate of elastic centroid			G[MPa]		Shear modulus		

Διατομή 203 και πίνακας στοιχείων της

Η συμπαγής διατομή στη στήριξη ονομάστηκε 300.

Cross section No. 300 - DIAPHRAGM



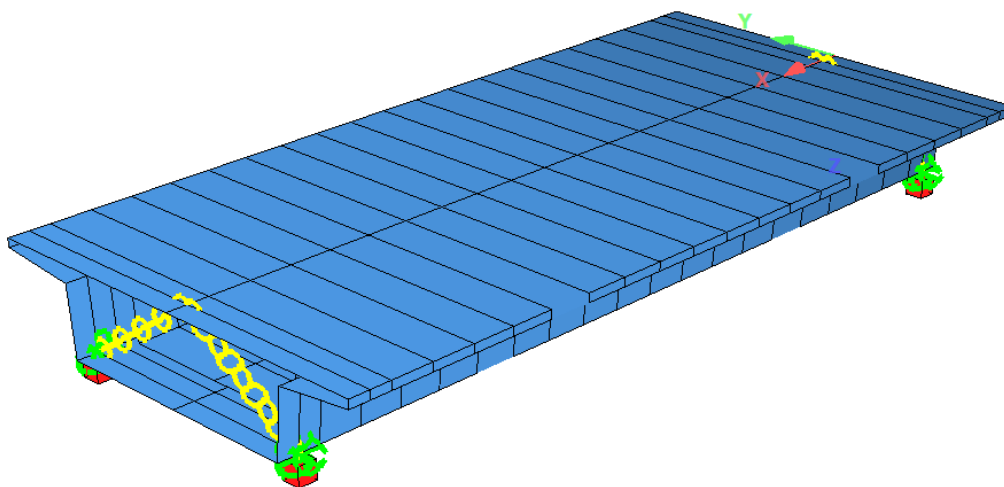
Cross section No. 300 - DIAPHRAGM

Static properties of cross section

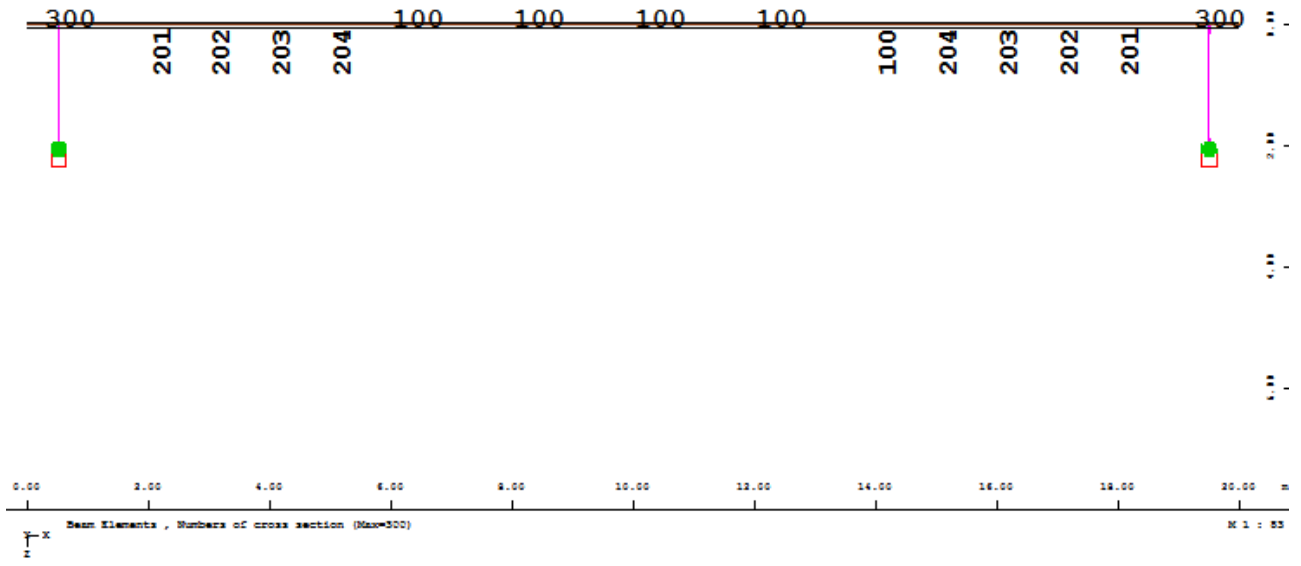
SNo	Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[m]	ysc[m]	E[MPa]	g[kg/m]
	MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[m]	zsc[m]	G[MPa]	
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					
300	1	1.3470E+01	1.178E+01	4.834E+00	0.000	0.000	34077	33675.0
	2	1.322E+01	7.260E+00	5.719E+01	0.922	1.085	14199	(BEAM)
= DIAPHRAGM								
SNo	section number			ysc[m],zsc[m]		ordinate of shear centre		
Mat	material number			E[MPa]		Young's modulus		
A[m ²]	sectional area			g[kg/m]		weight per length		
Ay[m ²],Az[m ²],Ayz[m ²]	transverse shear deformation area			MRf		reinforcement material number		
Iy[m ⁴],Iz[m ⁴],Iyz[m ⁴]	bending moment of inertia			It[m ⁴]		torsional moment of inertia		
yc[m],zc[m]	ordinate of elastic centroid			G[MPa]		Shear modulus		

Διατομή 300 και πίνακας στοιχείων της

Κατόπιν αυτών ορίστηκαν και οι κόμβοι των εφεδράνων. Επειδή όμως ο φορέας είναι ραβδωτός με τον άξονα της ράβδου να βρίσκεται στην άνω ίνα της διατομής έπρεπε να συνδεθεί η ράβδος με τους κόμβους των εφεδράνων και αυτό έγινε ορίζοντας συνθήκη εξάρτησης απολύτως στερεού σώματος μεταξύ των κόμβων της ράβδου και των δύο εφεδράνων όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Γραφική απεικόνιση Ραβδωτού μοντέλου με διατομή – Σύνδεση με συνθήκη στερεού σώματος μεταξύ των κόμβων της ράβδου στα άκρα με τα εφεδράνα – πάκτωση στη θέση των βάθρων



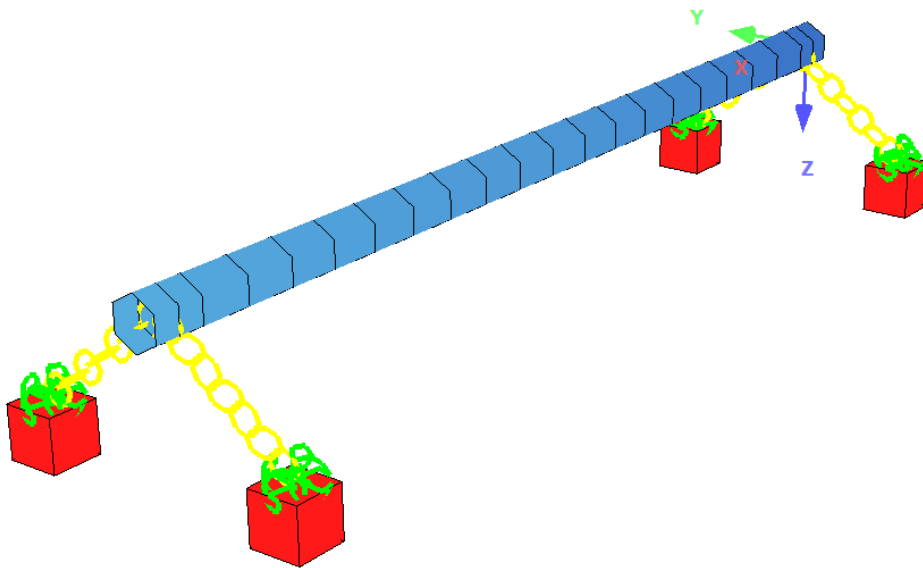
Παρουσίαση τύπου διατομής καταμήκος του άξονα (πρόγραμμα Wingraf)

3.2.2 Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

Στην περίπτωση του ραβδωτού φορέα άνευ διατομής ορίζουμε τον άξονα της ράβδου με τον ίδιο τρόπο αλλά αντί για σχήμα διατομής δίνουμε τις ιδιότητες της διατομής που ουσιαστικά ορίζουν τη συμπεριφορά του φορέα στην εκάστοτε καταπόνηση. Οι ιδιότητες αυτές είναι: το εμβαδό της διατομής (a), η ροπή αδρανείας της διατομής στις δύο διευθύνσεις στο επίπεδό της (i_y , i_z), η στρεπτική δυσκαμψία της (i_t), η απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής σε σχέση με το κέντρο διάτμησής του (y_{sc} , z_{sc}), η μέγιστη απόσταση των ακραίων ινών κατά y και z από τον άξονα της ράβδου (y_{min}/y_{max} , z_{min}/z_{max}). Οι ονομασίες των «διατομών» αυτών είναι όμοιες με του πρώτου μοντέλου για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.

Όνομα	a (m^2)	i_y (m^4)	i_z (m^4)	i_t (m^4)	y_{sc} (m)	z_{sc} (m)	y_{min}/y_{max} (m)	z_{min}/z_{max} (m)
100 typical	5.8928	3.337	40.73	8.355	0	0.271	-5/+5	0/+2
200 web 0.70	6.4434	3.456	44.14	8.547	0	0.251	-5/+5	0/+2
201 web 0.66	6.3328	3.433	43.50	8.516	0	0.255	-5/+5	0/+2
202 web 0.62	6.2225	3.409	42.84	8.481	0	0.259	-5/+5	0/+2
203 web 0.58	6.1124	3.385	42.16	8.444	0	0.262	-5/+5	0/+2
204 web 0.54	6.0026	3.361	41.46	8.402	0	0.267	-5/+5	0/+2
300 diaphragm	13.47	4.834	57.19	13.22	0	0.168	-5/+5	0/+2

Στο μοντέλο αυτό δε μπορούμε να δώσουμε οπλισμό ούτε άρα να πάρουμε αποτελέσματα για απαίτηση σε οπλισμό, αλλά μόνο εντατικά μεγέθη και συμπεριφορά του φορέα. Η σύνδεση με τα εφέδρανα έγινε όμοια με το πρώτο ραβδωτό μοντέλο όπως περιγράφεται παραπάνω.



Γραφική απεικόνιση Ραβδωτού μοντέλου χωρίς διατομή – Σύνδεση με συνθήκη στερεού σώματος μεταξύ των κόμβων της ράβδου στα άκρα με τα εφάδρανα – πάκτωση στη θέση των βάθρων

3.2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Στο μοντέλο με τα πεπερασμένα στοιχεία τα στοιχεία ομαδοποιήθηκαν σε 4 κατηγορίες: την άνω πλάκα, τους κορμούς, την κάτω πλάκα και τα διαφράγματα (συμπαγής περιοχή στις στηρίξεις).

Έγινε η περιγραφή των κόμβων της άνω πλάκας (πρόβολοι και επιφάνεια κυκλοφορίας). Οι κόμβοι αυτοί αφορούν στην άνω παρειά της πλάκας και τα διάφορα πάχη των π.σ. ορίζονται με κατεύθυνση προς τα κάτω. Η μία σειρά κόμβων αφορά την άκρη των προβόλων, η δεύτερη τη θέση τέλους των προβόλων –θέση συμβολής εξωτερικής παρειάς των κορμών-και η τρίτη το μέσο της πλάκας. Οι κόμβοι των κορμών στην κορυφή τους, ορίστηκαν στη θέση που η εξωτερική πλευρά τους συναντά την πλάκα (κοινοί κόμβοι με άνω πλάκα) και στη βάση τους εκεί που συναντά η εξωτερική τους παρειά την άνω παρειά της κάτω πλάκας (κοινοί κόμβοι με κάτω πλάκα). Τα πάχη τους ορίζονται προς τα μέσα. Οι κόμβοι της κάτω πλάκας είναι από τη μία οι κόμβοι που μοιράζονται με τη βάση των κορμών και από την άλλη στο μέσο του πλάτους της.

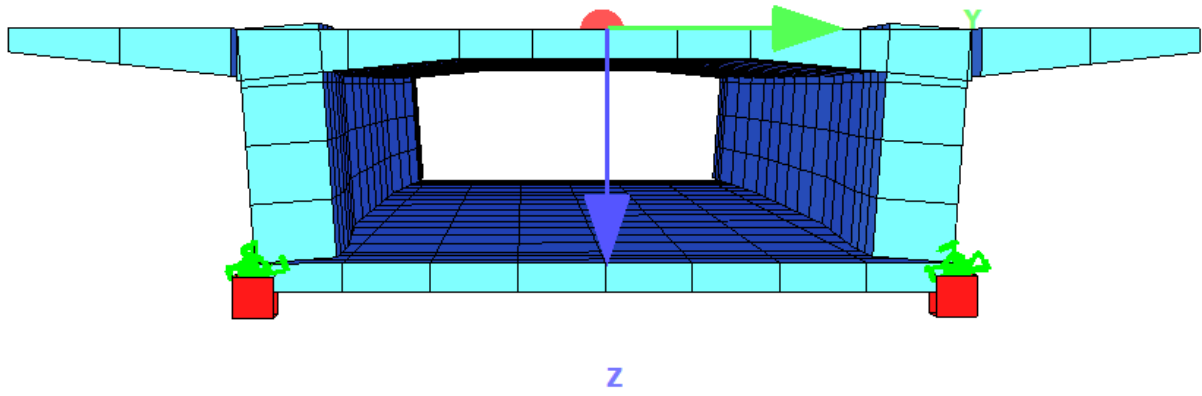
Για το διάφραγμα ορίστηκε κεντρικά στη θέση του άξονα της στήριξης πλέγμα π.σ. με κάποιους κοινούς κόμβους με τα στοιχεία των πλακών και των κορμών που συντρέχουν στη θέση αυτή έτσι ώστε ο φορέας να λειτουργεί ως ενιαίο σώμα. Μετά ζητήθηκε από το πρόγραμμα να μοιράσει τις ορισθείσες από τους κόμβους περιοχές σε δεδομένο πλήθος π.σ.

Οι κόμβοι περιγράφηκαν για το ένα τέταρτο της γέφυρας λόγω διπλής συμμετρίας ως προς τους άξονες του μέσου της γέφυρας και του μέσου του μήκους της και μετά αντιγράφηκαν και αναπαράχθηκαν και για τα υπόλοιπα τμήματα αξιοποιώντας τις συμμετρίες αυτές. Λόγω του επιλεχθέντος τρόπου μοντελοποίησης και όπως φαίνεται στο σχήμα 5 αναμένεται να παραχθεί ένα μικρό σφάλμα κατά τον υπολογισμό του ίδιου βάρους της κατασκευής λόγω κάποιων διπλών στοιχείων στη θέση συμβολής των μελών.

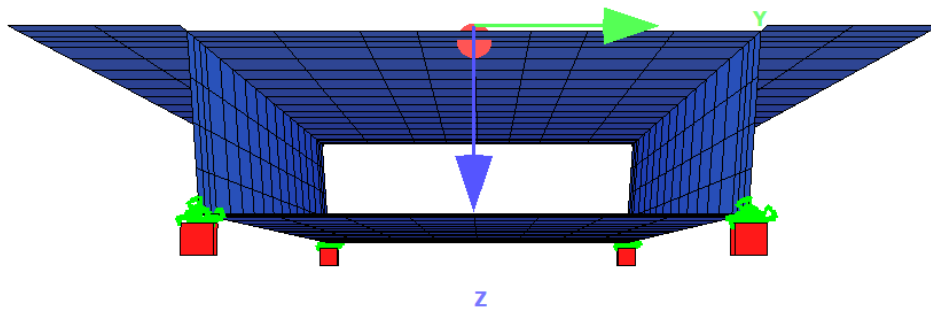
Επειδή με τη μέθοδο των π.σ. ουσιαστικά για τις καταπονήσεις εξάγονται αποτελέσματα τάσεων για κάθε επιφανειακό στοιχείο κάτι το οποίο δεν ισχύει για την επίλυση του συστήματος ως ραβδωτού φορέα προκειμένου να έχουμε αποτελέσματα συγκρίσιμα για τις δύο μεθόδους υπάρχει ένα υποπρόγραμμα του Sofistik το SIR το οποίο ολοκληρώνει τις εντάσεις ως προς ένα άξονα που έχουμε ορίσει (εδώ ορίστηκε ο άξονας αυτός στη θέση που έχουμε θεωρήσει για τα ραβδωτά) και παράγονται διαγράμματα εντατικών μεγεθών.

Για τις στηρίξεις ορίστηκαν τα ελατήρια των εφεδράνων στον κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκονται στη θέση της στήριξης.

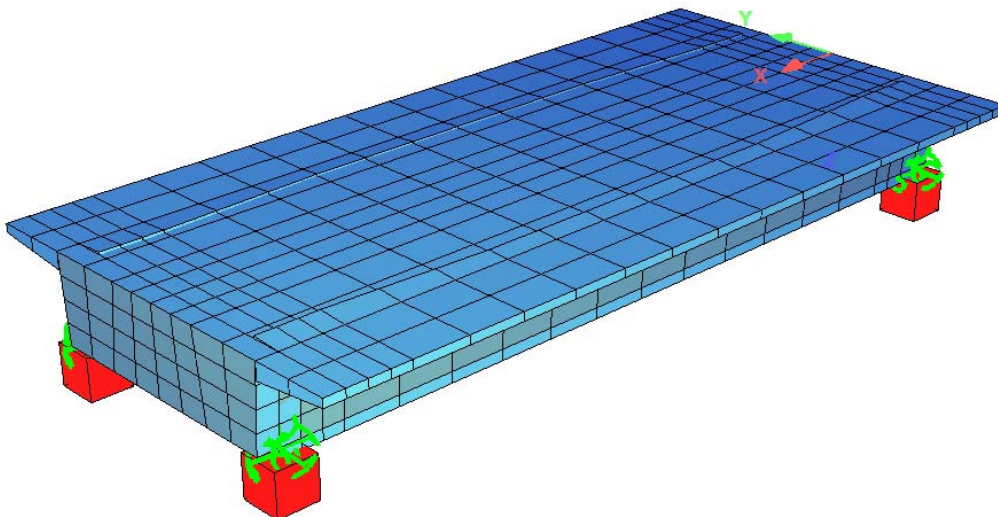
Η προσομοίωση του φορέα ως σύστημα πεπερασμένων στοιχείων ήταν αρκετά πιο δύσκολη και χρονοβόρα από τις προαναφερθείσες δύο μεθόδους.



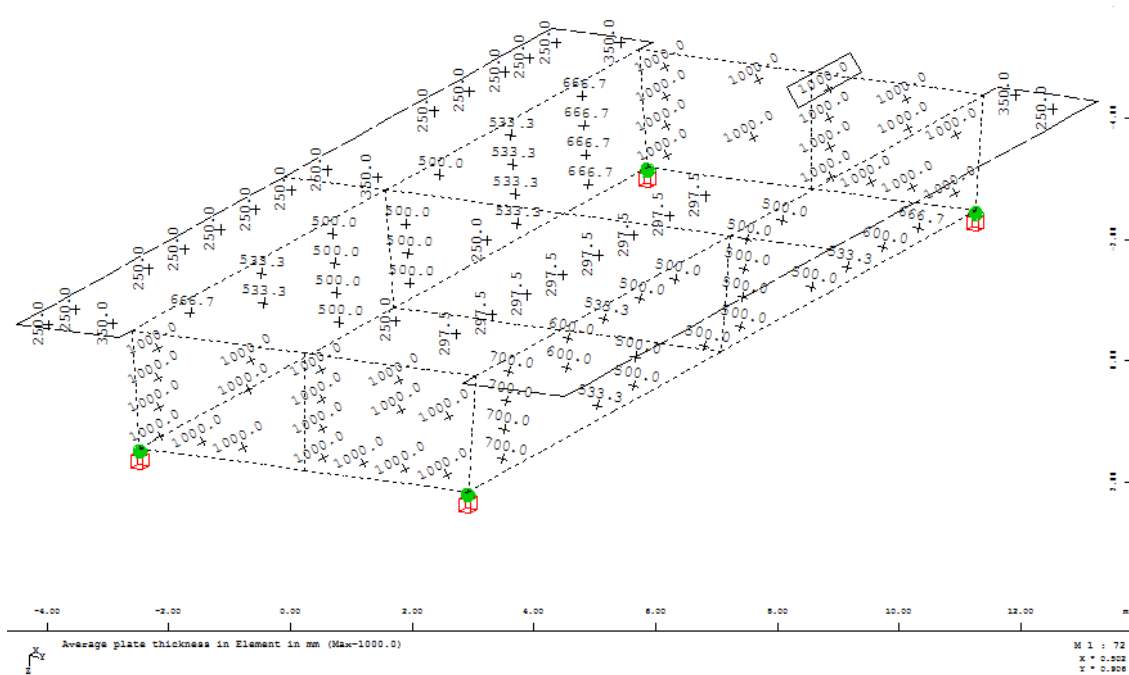
Γραφική απεικόνιση διατομής με πεπερασμένα στοιχεία με απεικόνιση του πάχους των στοιχείων



Γραφική απεικόνιση διατομής με πεπερασμένα στοιχεία χωρίς απεικόνιση του πάχους των στοιχείων



Γραφική απεικόνιση μοντέλου με π.σ.



Φορέας και πάχη στοιχείων σε χιλιοστά (πρόγραμμα Wingraf της Sofistik)

4 ΦΟΡΤΙΑ

4.1 Μόνιμα Φορτία

Το κατάστρωμα της ανωδομής της γέφυρας φέρει:

Τα πεζοδρόμια για την κυκλοφορία των πεζών με στηθαία πάνω τους για συγκράτηση οχημάτων σε περίπτωση εκτροπής τους, εδώ έχουμε θεωρήσει στηθαίο ΣΤΕ-1 που είναι συνήθης τύπος για γέφυρες, ενδιάμεσα των πεζοδρομίων τις ασφαλικές στρώσεις που διαμορφώνουν την επιφάνεια κυκλοφορίας των οχημάτων και κάτω από αυτές ένα σύστημα στεγάνωσης που αποτελείται από 5 εκ σκυρόδεμα άοπλο για προστασία της μεμβράνης και μία ειδική μεμβράνη στεγάνωσης. Όλα τα παραπάνω υπολογίζονται στα μόνιμα φορτία.

Παραδοχές φορτίων:

LC1- SELF WEIGHT - Ίδιο βάρος

- Πυκνότητα οπλισμένου σκυροδέματος: 25kN/m^3
Ο υπολογισμός I.B. κατασκευής γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα αφού έχει περιγραφεί ο φορέας και τα υλικά του.

LC2 – PAVING - Ασφαλτόστρωση

- Πάχος στρώσης 10εκ (EN1991-1-1 Πίν.Α.6): $24\text{kN/m}^3 * 0.10 = 2.4 \text{ kN/m}^2$
Και εφαρμόζεται ανάμεσα από τα πεζοδρόμια που έχουν θεωρηθεί πλάτους 1.25 m, στην επιφάνεια κυκλοφορίας δηλαδή σε πλάτος: $10.00 - 1.25 - 1.25 = 7.5 \text{ m}$
Για το ραβδωτό που η επιφανειακή φόρτιση μεταφράζεται σε γραμμική $2.4 \text{ kN/m}^2 * 7.5 \text{ m} = 18 \text{ kN/m}$

LC3 – CONCRETE DECK PROTECTION - Σκυρόδεμα προστασίας στεγανωτικής μεμβράνης

- Πάχος στρώσης 5εκ: 1.25kN/m^2

LC4 – SIDEWALKS - Πεζοδρόμια

- Πλάτους 1.25 επί των πλευρικών προβόλων = 0.52 m^2 (επιφάνεια πεζοδρομίου) * $25 \text{ kN/m}^3 = 13\text{kN/m}$
για το ραβδωτό
ή $13\text{kN/m} / 1.25 \text{ m} = 10.4 \text{ kN/m}^2$
για το μοντέλο π.σ.

LC5 – BARRIER - Στηθαία

- Τύπου ΣΤΕ-1 (EN1991-1-1 Πίν.Α.6): 0.5kN/m

LC6 – MEMBRANE - Στεγανωτική μεμβράνη

- Τοποθέτηση ανάμεσα από τα πεζοδρόμια. Ειδικό βάρος μεμβράνης: 0.1 kN/m²

4.2 Κινητά φορτία

4.2.1 Φορτία κυκλοφορίας

LC100 - UDL - LM1 - Ομοιόμορφο φορτίο

LC200 έως LC219 - TS 300- LM1 – Δίδυμος άξονας 300kN

LC300 έως LC319 - TS 200- LM1 – Δίδυμος άξονας 200kN

Για τα φορτία κυκλοφορίας στις γέφυρες υπάρχει ειδικό κεφάλαιο στους Ευρωκώδικες που περιγράφει αναλυτικά τα προσομοιώματα που πρέπει να εφαρμοστούν και είναι ο Ευρωκώδικας 1, Μέρος 2.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα (EN 1991-2-4:2004 §4.2.3) για να φορτιστεί το κατάστρωμα μίας γέφυρας χωρίζουμε ανάλογα με το πλάτος σε ονομαστικές λωρίδες κυκλοφορίας.

Πίνακας 4.1 - Αριθμός και πλάτος των ονομαστικών λωρίδων κυκλοφορίας

Πλάτος οδοστρώματος w	Αριθμός ονομαστικών λωρίδων	Πλάτος ονομαστικής λωρίδας w_l	Πλάτος εναπομένουσας επιφάνειας
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για παράδειγμα, για πλάτος οδοστρώματος ίσο με 11m, $n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$, και το πλάτος της εναπομένουσας επιφάνειας είναι $11 - 3 \times 3 = 2\text{m}$.

Το πλάτος του κυκλοφορουμένου καταστρώματος w αντιστοιχεί στην απόσταση των κρασπέδων
 $w = 10 \text{ m} - 1.25 \times 2 = 7.50\text{m}$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 Επειδή $w \geq 6.0\text{m}$, ο αριθμός των υπολογιστικών λωρίδων κυκλοφορίας N προκύπτει ως ο μέγιστος δυνατός ακέραιος αριθμός που προκύπτει από το πηλίκο $w/3$

$$N = \text{Int}(w/3) = 2$$

Πλάτος υπολογιστικής λωρίδας

$$b_l = 3,0 \text{ m}$$

Εναπομένον πλάτος καταστρώματος

$$R = w - 2b_l = 1.50 \text{ m}$$

Άρα για τη γέφυρα της εφαρμογής προκύπτουν 2 λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3 m και το εναπομένον πλάτος 1.5 m

Προσομοίωμα φόρτισης 1

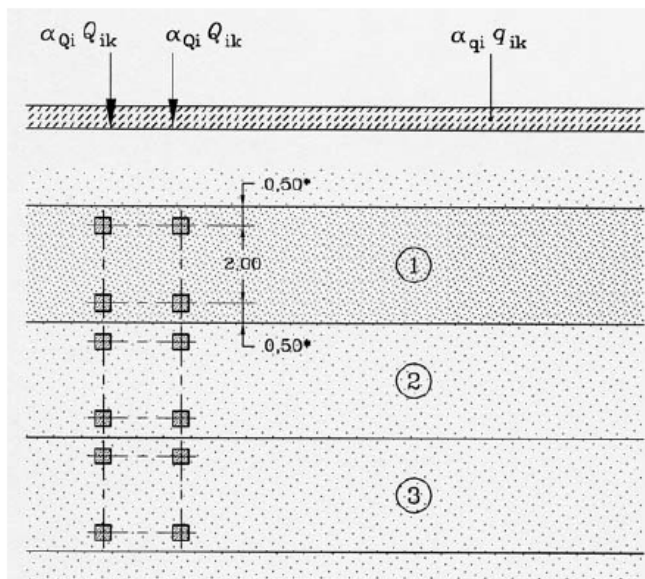
Το προσομοίωμα φόρτισης 1 αποτελείται από το ομοιόμορφο φορτίο (UDL) και το διαξονικό φορτίο (TS)

(4) Οι χαρακτηριστικές τιμές των Q_{ik} και q_{ik} , συμπεριλαμβανομένης και της δυναμικής προσαύξησης, θα πρέπει να λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 - Προσομοίωμα Φόρτισης 1 : χαρακτηριστικές τιμές

Θέση	Σύστημα διπλού άξονα TS	Σύστημα UDL	(ή q_{rk})
	Φορτία αξόνων Q_{ik} (kN)	q_{ik} (ή q_{ik}) (kN/m ²)	
Λωρίδα Αρ. 1	300	9	
Λωρίδα Αρ. 2	200	2,5	
Λωρίδα Αρ. 3	100	2,5	
Λοιπές λωρίδες	0	2,5	
Εναπομένουσα επιφάνεια (q_{rk})	0	2,5	

Οι λεπτομέρειες του Προσομοιώματος Φόρτισης 1 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2α.



Υπόμνημα

- (1) Λωρίδα Αρ. 1 : $Q_{1k} = 300 \text{ kN}$; $q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$
 (2) Λωρίδα Αρ. 2 : $Q_{2k} = 200 \text{ kN}$; $q_{2k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
 (3) Λωρίδα Αρ. 3 : $Q_{3k} = 100 \text{ kN}$; $q_{3k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
 * Για $w_l = 3,00 \text{ m}$

Απόσταση μεταξύ διπλών αξόνων 1.2m

Σχήμα 4.2α - Εφαρμογή του Προσομοιώματος Φόρτισης 1

Λωρίδα κυκλοφορίας 1

(Δίδυμος άξονας TS και ομοιόμορφο φορτίο UDL)

$$\text{TS: } \alpha_{Q1} \cdot Q_{1K} = 1,0 \times 300 = 300 \text{ kN} \text{ \u00c4ρα } 150 \text{ kN \u00e1 \u00e1\u00be\u00be\u00be}$$

$$\text{UDL: } \alpha_{q1} \cdot q_{1K} = 1,0 \times 9,0 = 9,0 \text{ kN/m}^2$$

Λωρίδα κυκλοφορίας 2

(Δίδυμος άξονας TS και ομοιόμορφο φορτίο UDL)

$$\text{TS: } \alpha_{Q2} \cdot Q_{2K} = 1 \times 200 = 200 \text{ kN} \text{ \u00e4ρα } 100 \text{ kN \u00e1 \u00e1\u00be\u00be\u00be}$$

$$\text{UDL: } \alpha_{q2} \cdot q_{2K} = 1,0 \times 2,5 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Υπόλοιπη επιφάνεια

(Ομοιόμορφο φορτίο μόνο)

$$\text{UDL: } \alpha_{q3} \cdot q_{3K} = 1,0 \times 2,5 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Τα συστήματα των διπλών αξόνων τοποθετούνται το ένα παραπλεύρως του άλλου. Για τους συνολικούς ελέγχους τα συστήματα των διπλών αξόνων τοποθετούνται στον άξονα της αντίστοιχης λωρίδας. Σε μία μελέτη θα έπρεπε οι λωρίδες αυτές να θεωρηθούν σε διάφορες

θέσεις στο κατάστρωμα αλλά για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας αυτό δεν κρίθηκε αναγκαίο έγινε δηλαδή η παραδοχή ότι η λωρίδα 1 είναι στην αριστερή πλευρά του καταστρώματος και 2 λωρίδα 2 δίπλα της, ενώ το εναπομένον πλάτος 1.5 m στη δεξιά μεριά.

Η φόρτιση του ομοιόμορφου φορτίου κυκλοφορίας έχει ονομαστεί LC100 - UDL - LM1 και περιλαμβάνει το ομοιόμορφο φορτίο στις διάφορες λωρίδες, ενώ η φόρτιση του διπλού συστήματος αξόνων είναι η ομάδα φορτίσεων LC200 έως LC219 - TS 300- LM1 για το δίδυμο άξονα 300 kN στη λωρίδα 1 και η ομάδα φορτίσεων LC300 έως LC319 - TS 200- LM1 για το δίδυμο άξονα 200 kN στη λωρίδα 2. Η κάθε φόρτιση στις ομάδες φορτίσεων αυτές αφορά συγκεκριμένη θέση του συστήματος καταμήκος της λωρίδας του.

4.2.2 Δυνάμεις πέδησης και επιτάχυνσης

LC7 – BRAKE LOAD

Σύμφωνα με EC1-2 §6.5.3:

Η δύναμη τροχοπέδησης Q_{Lk} , θα λαμβάνεται ως διαμήκης δύναμη ασκούμενη στο επίπεδο της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Η χαρακτηριστική τιμή του Q_{Lk} , υπολογίζεται ως ένα κλάσμα των συνολικών μέγιστων κατακόρυφων φορτίων που αντιστοιχούν στη λωρίδα κυκλοφορίας 1:

$$Q_{Lk} = 0.6 * \alpha_{Ql} * (2 * Q_{Ik}) + 0.10 * \alpha_{q1} * q_{lk} * w_1 * L$$

και

$$360\alpha_{Ql} \leq Q_{Lk} \leq 900 \text{ kN}$$

Έτσι, το φορτίο τροχοπέδησης είναι:

$$Q_{Lk} = 0.6 * 0.8 * 2 * 300 + 0.1 * 1.0 * 9.0 * 3 * 20.00 = 342 \text{ kN}$$

$$288 \text{ kN} \leq 342 \text{ kN} \leq 900 \text{ kN}$$

4.2.3 Κινητό φορτίο πεζοδρομίων

LC9 - SIDEWALK LIVE LOAD LEFT – Κινητό αριστερού πεζοδρομίου

LC 10 - SIDEWALK LIVE LOAD RIGHT – Κινητό δεξιού πεζοδρομίου

Το κινητό φορτίο των πεζοδρομίων λαμβάνεται ίσο με $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$ (EN1991-2 §5.3.2) και εφαρμόζεται στο πλάτος του πεζοδρομίου άρα $5 \text{ kN/m}^2 * 1.25 \text{ m} = 6.25 \text{ kN/m}$.

4.3 Θερμοκρασιακές δράσεις

4.3.1 Γενικές Παραδοχές

Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών δράσεων χρησιμοποιήθηκε ο Ευρωκώδικας 1 Μέρος 5 ΕΛΟΤ EN 1991-1-5:2004 και το Εθνικό προσάρτημα.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα οι θερμικές δράσεις πρέπει να ταξινομούνται ως μεταβλητές και έμμεσες δράσεις. Επίσης, σύμφωνα με EC1-1-5 τμήμα 4 (5) Για τον προσδιορισμό των θερμικών επιδράσεων θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του υλικού.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής για το σκυρόδεμα και το χάλυβα λαμβάνεται ίσος με $\alpha_T=10^{-5}$ σύμφωνα με τον Πίν 6.1 - EC1-1-5. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι τύπου 3 βάσει EC1-1-5 §6.1.1 .

Σύμφωνα με EC1-1-5 §6.1.2 (1) Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των θερμικών δράσεων θα πρέπει να αξιολογούνται από τη συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας και τις συνιστώσες θερμοκρασιακής διαφοράς. Εξετάζονται δηλαδή δύο ομάδες φορτίσεων εκ των οποίων η πρώτη συνίσταται από δράσεις συστολοδιαστολών που προκαλούνται από ομοιόμορφη ψύξη και θέρμανση του φορέα ενώ η δεύτερη από φορτίσεις που θεωρούν την καταπόνηση του φορέα υπό διαφορές θερμοκρασίας των ιών του, όπως θερμότερη άνω παρειά στο κατάστρωμα με ψυχρότερο κάτω πέλμα κλπ.

4.3.2 Συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας - EC1-1-5 §6.1.3

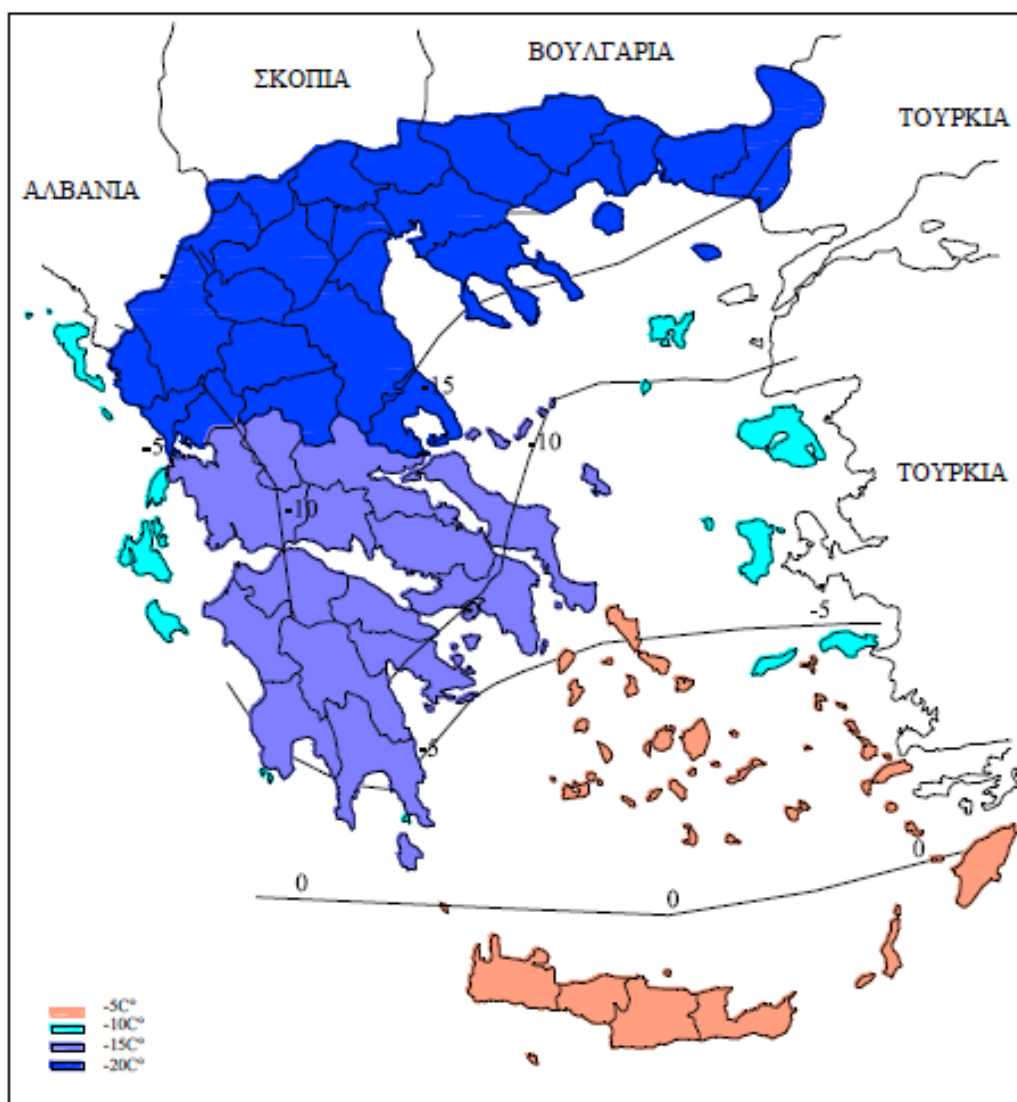
LC 20 - uniform-DTNcon – Ομοιόμορφη συστολή

LC 21 - uniform-DTNexp – Ομοιόμορφη διαστολή

Για τη συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας εξετάζουμε τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί σε μία γέφυρα.

Η ελάχιστη T_{min} και η μέγιστη T_{max} περιβάλλοντος υπό σκιά λαμβάνονται από τις παρακάτω εικόνες του Εθνικού Προσαρτήματος

4 Χάρτες ελάχιστης θερμοκρασίας υπό σκιά T_{min} και μέγιστης θερμοκρασίας υπ σκιά T_{max} , με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0,02



ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΥΠΟ ΣΚΙΑΝ (T_{min}) ΜΕ ΕΤΗΣΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ 0,02

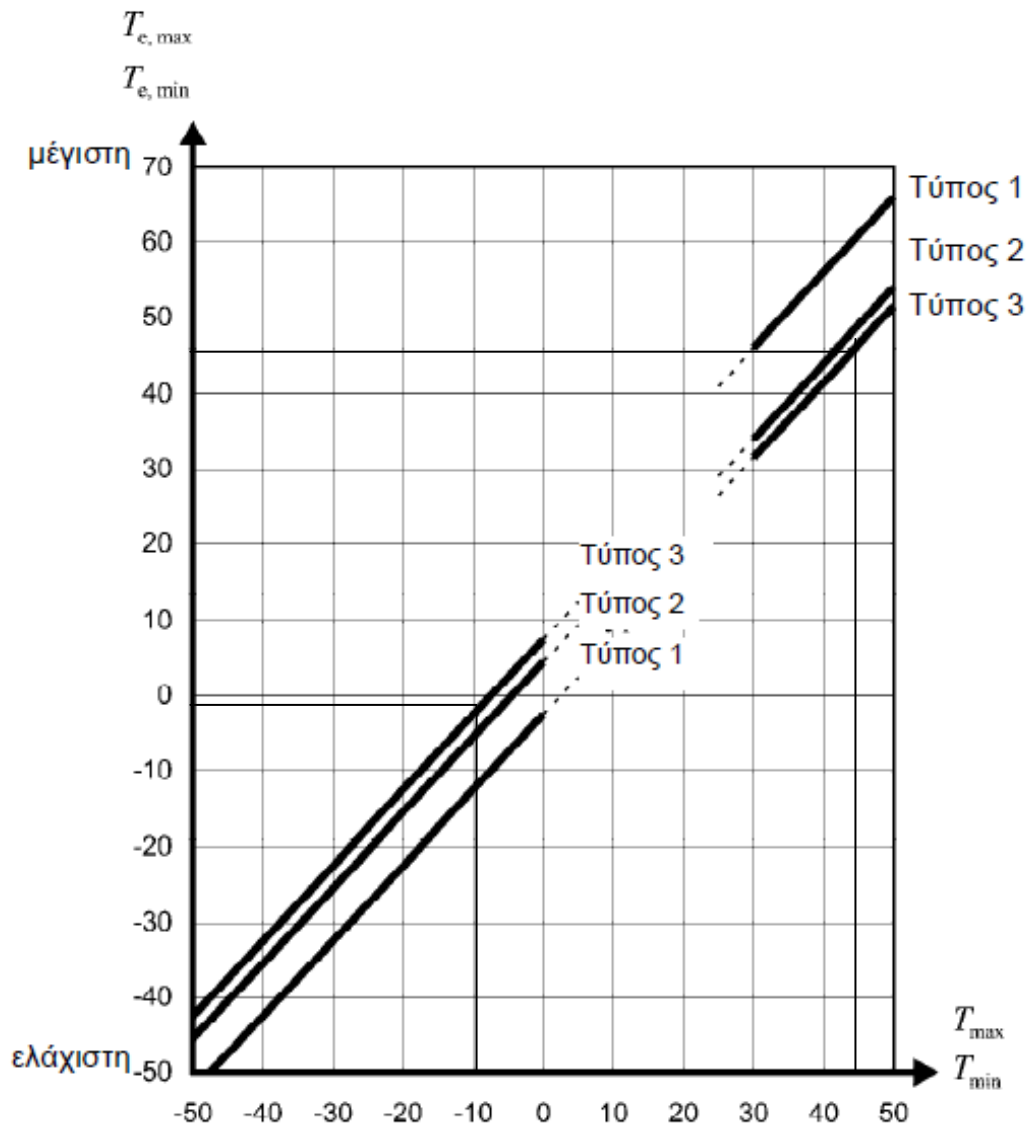


ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΥΠΟ ΣΚΙΑΝ (T_{max}) ΜΕ ΕΤΗΣΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ 0,02

Προκύπτει $T_{min} = -10^{\circ}\text{C}$ και $T_{max} = +45^{\circ}\text{C}$.

Η ελάχιστη και η μέγιστη συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας γέφυρας $T_{e,max}$ and $T_{e,min}$ προκύπτουν από την παρακάτω εικόνα.

$T_{e,min} = -2^{\circ}\text{C}$ και $T_{e,max} = +45^{\circ}\text{C}$



Τιμές $T_{e,max}$ και $T_{e,min}$ (EC1-1-5 Εικόνα 6.1)

Η αρχική θερμοκρασία T_0 από το παράρτημα Α ορίζεται ως 15°C (EC1-1-5, § Α.1). Συνεπώς το εύρος των χαρακτηριστικών τιμών για τον υπολογισμό της συνιστώσας ομοιόμορφης θερμοκρασίας της γέφυρας – μέγιστη συστολή $\Delta T_{N,con}$ και της μέγιστης διαστολής $\Delta T_{N,exp}$ (6.1) & (6.2) προκύπτουν σύμφωνα με EC1-1-5:

- $\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = 15^\circ\text{C} - (-2^\circ\text{C}) = 17^\circ\text{C}$
- $\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 45^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C} > T_0$

4.3.3 Συνιστώσες θερμοκρασιακής διαφοράς – Καθ' ύψος γραμμική συνιστώσα - EC1-1-5 §6.1.4

LC 22 – DTM_{heat} – Καθ' ύψος θερμοκρασιακή διαφορά άνω παρειά θερμότερη

LC 23 – DTM_{cool} – Καθ' ύψος θερμοκρασιακή διαφορά κάτω παρειά θερμότερη

Σύμφωνα με EC1-1-5 §6.1.4 πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν φόρτιση κατά την οποία θεωρούμε ότι το κατάστρωμα μίας γέφυρας θερμαίνεται ενώ η κάτω παρειά είναι ψυχρότερη και το αντίστροφο για μια προδιαγεγραμμένη χρονική περίοδο.

Η γραμμική συνιστώσα θερμοκρασιακής διαφοράς σύμφωνα με την Προσέγγιση 1 §6.1.4.1 και τους πίνακες 6.1 & 6.2 του EC1-1-5, προκύπτει για κατάστρωμα τύπου 3 και κιβωτοειδή διατομή:

Πίνακας 6.1 – Συνιστώμενες τιμές της γραμμικής συνιστώσας της θερμοκρασιακής διαφοράς για διάφορους τύπους καταστρωμάτων οδογεφυρών, πεζογεφυρών και σιδηροδρομικών γεφυρών

Τύπος Καταστρώματος	Άνω επιφάνεια θερμότερη από την κάτω	Κάτω επιφάνεια θερμότερη από την άνω
	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)
Τύπος 1: Χαλύβδινο κατάστρωμα	18	13
Τύπος 2: Σύμμικτο κατάστρωμα	15	18
Τύπος 3: Κατάστρωμα από σκυρόδεμα: - κιβωτοειδής κύρια δοκός από σκυρόδεμα	10	5
- κύρια δοκός από σκυρόδεμα	15	8
- πλάκα από σκυρόδεμα	15	8
<p>ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1: Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα αντιπροσωπεύουν άνω οριακές τιμές της γραμμικά μεταβαλλόμενης συνιστώσας της θερμοκρασιακής διαφοράς για αντιπροσωπευτικά δείγματα γεωμετρίας γεφυρών.</p> <p>ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2: Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα βασίζονται σε πάχος επιφανειακής στρώσης 50mm για οδογέφυρες και σιδηροδρομικές γέφυρες. Για διαφορετικού πάχους επιφανειακές στρώσεις οι τιμές αυτές θα πρέπει να πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή k_{sur}. Συνιστώμενες τιμές για τον συντελεστή k_{sur} δίνονται στον Πίνακα 6.2.</p>		

Πίνακας 6.2 – Συνιστώμενες τιμές του k_{sur} για διαφορετικά πάχη επιφανειακών στρώσεων

Οδογέφυρες, πεζογέφυρες και σιδηροδρομικές γέφυρες						
Πάχος επιφανειακής στρώσης	Τύπος 1		Τύπος 2		Τύπος 3	
	Άνω επιφάνεια θερμότερη από την κάτω	Κάτω επιφάνεια θερμότερη από την άνω	Άνω επιφάνεια θερμότερη από την κάτω	Κάτω επιφάνεια θερμότερη από την άνω	Άνω επιφάνεια θερμότερη από την κάτω	Κάτω επιφάνεια θερμότερη από την άνω
[mm]	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}
χωρίς επιφανειακή στρώση	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1
υδατοστεγές ¹⁾	1,6	0,6	1,1	0,9	1,5	1,0
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0
150	0,7	1,2	1,0	1,0	0,5	1,0
έρμα (750 mm)	0,6	1,4	0,8	1,2	0,6	1,0

¹⁾ Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν άνω οριακές τιμές για επιφάνειες σκούρου χρώματος

Και για τη διατομή μας που έχουμε θεωρήσει 10εκ ασφαλικές στρώσεις

- Max heating (πάνω επιφάνεια θερμότερη): $k_{sur} \cdot \Delta T_{M,heat} = 0.7 \cdot 10^{\circ}C = 7^{\circ}C$
- Max cooling (κάτω επιφάνεια θερμότερη): $k_{sur} \cdot \Delta T_{M,cool} = 1.0 \cdot 5^{\circ}C = 5^{\circ}C$

4.3.4 Ταυτόχρονη δράση των συνιστωσών ομοιόμορφης θερμοκρασίας και θερμοκρασιακής διαφοράς

Έχουμε τους κάτωθι συνδυασμούς σύμφωνα με EC1-1-5 §6.1.5:

$$\begin{aligned} \Delta T_{M,heat} + \omega_N \cdot \Delta T_{N,exp} & \quad \omega_M \cdot \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,exp} \\ \Delta T_{M,heat} + \omega_N \cdot \Delta T_{N,con} & \quad \omega_M \cdot \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,con} \\ \Delta T_{M,cool} + \omega_N \cdot \Delta T_{N,exp} & \quad \omega_M \cdot \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,exp} \\ \Delta T_{M,cool} + \omega_N \cdot \Delta T_{N,con} & \quad \omega_M \cdot \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,con} \end{aligned}$$

όπου ω_N και ω_M λαμβάνονται 0.35 και 0.75 αντίστοιχα.

4.4 Ερπυσμός και συρρίκνωση

Σύμφωνα με την παράγραφο §2.3.2.2, EC2-1-1, τα αποτελέσματα του ερπυσμού και τις συρρίκνωσης λαμβάνονται υπ' όψιν στην ΟΚΑ μόνο όταν τα αποτελέσματά τους είναι σημαντικά, ενώ, γενικά, θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν στην οριακή κατάσταση λειτουργίας (ΟΚΛ). Σύμφωνα με το §2.4.2.1, EC2-1-1, ο μερικός συντελεστής για τη συρρίκνωση συνίσταται να λαμβάνεται ίσος με 1.

Παραδοχές για τη συρρίκνωση

- Μέση υγρασία περιβάλλοντος: 70%

- Κατηγορία τσιμέντου: N

Η χρονική στιγμή έναρξης της συρρίκνωσης του σκυροδέματος της ανωδομής λογίζεται σε μία (1) ημέρα μετά τη σκυροδέτηση. Η ενεργός ηλικία του σκυροδέματος της ανωδομής κατά την επιβολή της έντασης λογίζεται σε εικοσιοκτώ (28) ημέρες.

Η τιμή της συστολής ξήρανσης υπολογίζεται ίση με 22×10^{-5} ($t = \infty$) EN 1992-1-1 §3.1.4.

Για τους συνδυασμούς στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας η συρρίκνωση λαμβάνεται με συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{SH}=1.0$ σύμφωνα με το EN 1992-1-1 §2.4.2.1.

4.5 Φορτία ανέμου – Χιονιού

Οι φορτίσεις ανέμου και χιονιού εξαιρούνται από την παρούσα εργασία.

4.6 Σεισμική φόρτιση

4.6.1 Οριζόντια σεισμική συνιστώσα

Σύμφωνα με τον EN1998-1 & EN1998-2, το Τύπου 1 ελαστικό φάσμα απόκρισης χρησιμοποιείται (θεωρώντας συντελεστή συμπεριφοράς q ίσο με 1.00). Βλ. EC8-2 §7.4 & EC8-1 §3.2.2.2. Για την οριζόντια σεισμική συνιστώσα έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

- Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς (οριζόντια συνιστώσα) $a_{gR} = 0.24g$ (ζώνη Z2 Πιν.1 §2.6 ΕΛΟΤ)
- Τύπος εδάφους (EC8-1 §3.1.2 & Πιν.3.2) A
- Συντελεστής εδάφους $S=1.00$
- Ιξώδης απόσβεση (EC8-2 §4.1.3) $\xi = 5\%$
- Διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης (EC8-1 §3.2. 2.2) $n=1.00$
- Συντελεστής συμπεριφοράς $q=1.00$
- Συντελεστής σπουδαιότητας 1.00
- Χαρακτηριστικές περίοδοι οριζοντίου φάσματος (EC8-1 §3.2.2.2 & Πιν. 3.2) ($T_B=0.15s$, $T_C=0.40s$, $T_D=2.0s$)

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης $S_e(T)$ για την οριζόντια συνιστώσα περιγράφεται από τις ακόλουθες εκφράσεις (EC8-1 Eqs. (3.2)-(3-5)):

- $0 \leq T \leq T_B$: $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot [1 + T/T_B(2.5 \cdot n - 1)]/q$
- $T_B \leq T \leq T_C$: $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot n/q$
- $T_C \leq T \leq T_D$: $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot n \cdot T_C/T/q$
- $T_D \leq T \leq 4s$: $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot n \cdot T_C \cdot T_D/T^2/q$

4.6.2 Κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα

Τα αποτελέσματα της κατακόρυφης συνιστώσας λαμβάνονται υπ' όψιν σε όλες τις περιπτώσεις στην ULS (EC8-2 §4.1.7). Για την κατακόρυφη συνιστώσα ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

- Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς (κατακόρυφη συνιστώσα) $a_{v,g} = 0.9 \cdot 0.24g = 0.216 \cdot g$
- Χαρακτηριστικές περίοδοι (EC8-1 §3.2.2.3 & Πίν. 3.4) ($T_B=0.05s$, $T_C=0.15s$, $T_D=1.0s$)
- Συντελεστής συμπεριφοράς $q_v=1.00$

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης $S_e(T)$ για την κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα περιγράφεται από τις ακόλουθες εκφράσεις (EC8-1 Eqs. (3-8) – (3-11)):

- $0 \leq T \leq T_B$: $S_e(T) = a_{vg} \cdot [1 + T/T_B(3.0 \cdot n - 1)]$
- $T_B \leq T \leq T_C$: $S_e(T) = a_{vg} \cdot 3.0 \cdot n$
- $T_C \leq T \leq T_D$: $S_e(T) = a_{vg} \cdot 3.0 \cdot n \cdot T_C/T$
- $T_D \leq T \leq 4s$: $S_e(T) = a_{vg} \cdot 3.0 \cdot n \cdot T_C \cdot T_D/T^2$

4.6.3 Μάζες

Σύμφωνα με το EC8-2 §4.1.2 έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

- Οι μάζες εφαρμόζονται στους κόμβους του μοντέλου.
- Για το σεισμικό συνδυασμό, οι τιμές των μαζών που αφορούν στα φορτία κυκλοφορίας είναι το αποτέλεσμα των $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$, όπου το $Q_{k,1}$ είναι ένα ομοιόμορφο φορτίο ίσο με τη χαρακτηριστική τιμή του ίσο με το UDL εφαρμοσμένο σε όλο το μήκος του καταστρώματος, με συντελεστή κατηγοριοποίησης.
- Θεωρούμε ότι η γέφυρα εξυπηρετεί έντονη κυκλοφορία άρα ο συντελεστής $\psi_{2,1}$ για το σεισμικό συνδυασμό λαμβάνεται ίσος με 0.2.

4.7 Συνδυασμοί Δράσεων

Σύμφωνα με τον EN1990 και EN1993 οι συνδυασμοί δράσεων που πρέπει να εξετάζονται είναι οι εξής:

- Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (OKA ή Ultimate Limit State - ULS)
- Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (OKΛ ή Serviceability Limit State - SLS)

Από αυτές στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθούν μόνο οι έλεγχοι και οι συνδυασμοί που αφορούν στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.

4.7.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (OKA ή Ultimate Limit State - ULS)

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είναι οι έλεγχοι που εξασφαλίζουν την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής και του δομήματος και περιγράφονται από την παρακάτω μαθηματική σχέση (EC0 §6.4.3.2 & EC0-A2 §A2.3.1, Πίν. A.2.4 (B)) για μόνιμες ή οιονεί μόνιμες καταστάσεις σχεδιασμού:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i \geq 2} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

Ενώ οι επιμέρους συντελεστές γ_G και γ_Q και ψ_0 παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (EC0-A2, Πίν. A.2.3 (B)):

Επιμέρους συντελεστές δράσεων στην OKA

Δράσεις	Συνεισφορά	Συντελεστής	Μόνιμες / Οιονεί μόνιμες	Τυχηματικές
Μόνιμες δράσεις	δυσμενής	γ_{Gsup}	1.35	1.00
	ευνοϊκή	γ_{Ginf}	1.00	1.00
Φορτία κυκλοφορίας LM1	δυσμενής	γ_Q	1.45	0.00
	ευνοϊκή	γ_Q	0.00	0.00
Πέδηση - Επιτάχυνση	δυσμενής	γ_Q	1.50	0.00
	ευνοϊκή	γ_Q	0.00	0.00
Κινητά Πεζοδρομίων	δυσμενής	γ_Q	1.35	0.00
	ευνοϊκή	γ_Q	0.00	0.00
Θερμοκρασιακές Δράσεις	δυσμενής	γ_Q	1.50	1.00
	ευνοϊκή	γ_Q	0.00	0.00

Συντελεστές ψ για οδικές γέφυρες

Δράσεις	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Φορτία κυκλοφορίας LM1	0.80	0.80	0.00
Φορτία κυκλοφορίας LM1	0.00	1.00	0.00
Πέδηση - Επιτάχυνση	0.80	0.80	0.00
Κινητά Πεζοδρομίων	0.80	0.50	0.00
Θερμοκρασιακές Δράσεις	0.60	0.60	0.50

Παράγονται οι περιβάλλουσες των εντατικών μεγεθών για το συνδυασμό ΟΚΑ για τις οιονεί μόνιμες δράσεις με τις οποίες σε συνδυασμό με τους σεισμικούς συνδυασμούς γίνεται η διαστασιολόγηση και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων απαίτησης σε οπλισμό και ονομάζονται

LC 1001	MAX-N BEAM ULS
LC 1007	MAX-MY BEAM ULS
LC 1009	MAX-MZ BEAM ULS
LC 1011	MAX-MT BEAM ULS
LC 1021	MAX-VZ BEAM ULS
LC 1031	MAX-VY BEAM ULS

Για τα ραβδωτά μοντέλα και

LC 1001	MAX-NXX QUAD ULS
LC 1003	MAX-NYY QUAD ULS
LC 1005	MAX-NXY QUAD ULS
LC 1001	MAX-NXX QUAK ULS
LC 1003	MAX-NYY QUAK ULS
LC 1005	MAX-NXY QUAK ULS
LC 1007	MAX-MX QUAD ULS
LC 1009	MAX-MY QUAD ULS
LC 1011	MAX-MXY QUAD ULS
LC 1007	MAX-MX QUAK ULS
LC 1009	MAX-MY QUAK ULS
LC 1011	MAX-MXY QUAK ULS
LC 1021	MAX-VX QUAD ULS
LC 1021	MAX-VX QUAK ULS
LC 1031	MAX-VY QUAD ULS
LC 1031	MAX-VY QUAK ULS

Για το μοντέλο π.σ.

4.7.2 Σεισμικοί συνδυασμοί

Ο σεισμικός συνδυασμός περιγράφεται από την κάτωθι έκφραση από EC0 §6.4.3.4

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} " + " P " + " A_{Ed} " + " \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

:

όπου Q είναι οι μεταβλητές δράσεις, περιλαμβανομένων των φορτίων κυκλοφορίας και των θερμοκρασιακών δράσεων, ενώ το A_{Ed} αναπαριστά τους παρακάτω σεισμικούς συνδυασμούς:

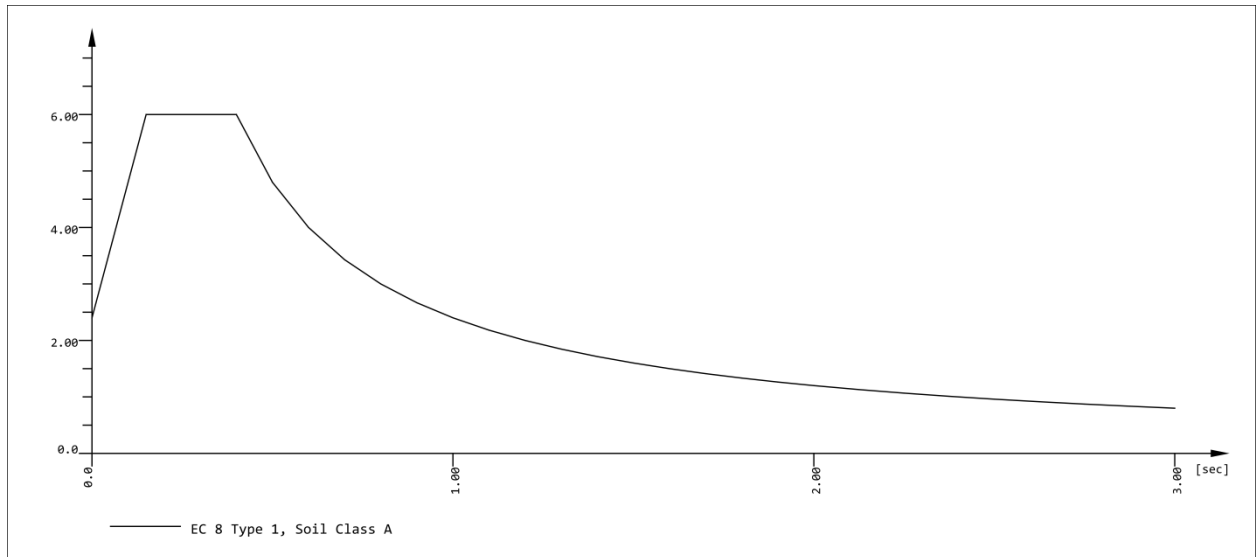
$E_{Edx} "+" 0.30 E_{E dy} "+" 0.30 E_{Edz}$
 $0.30 E_{Edx} "+" E_{E dy} "+" 0.30 E_{Edz}$
 $0.30 E_{Edx} "+" 0.30 E_{E dy} "+" E_{Edz}$

Πραγματοποιείται δυναμική φασματική μέθοδος με πλήρη ιδιομορφική ανάλυση.
 Χρησιμοποιήθηκαν οι πρώτες 20 ιδιομορφές με ονομασία από 9000 έως 9019

Οι φορτίσεις του σεισμού είναι οι
 LC9997 για σεισμό X και LC9998 για σεισμό Y

SOFISTIK AG.

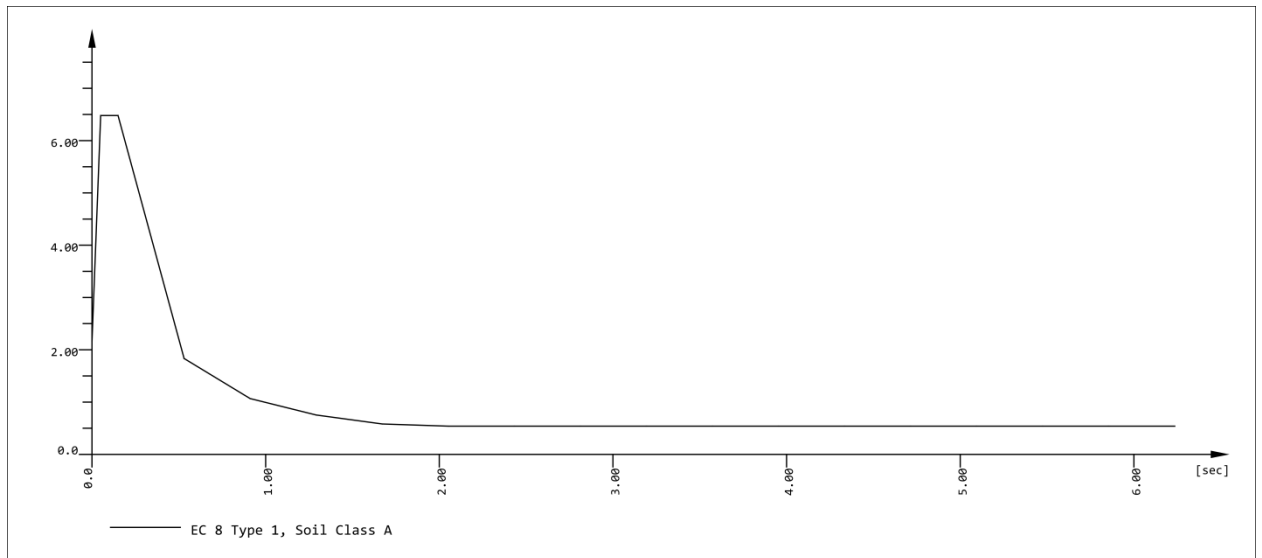
Load Case	9998									
Factor forces and moments	1.000									
Response spectra EC 8 Type 1, Soil Class A										
D[-]	SA[-]	SB[-]	MIN[-]	TB[sec]	TC[sec]	TD[sec]	TE[sec]	K1[-]	K2[-]	A[m/sec ²]
0.0500	2.400	6.000	0.600	0.150	0.400	2.000	0.000	1.000	1.000	0.00
Zone =				ah =*	1.000	av =*	0.000			



Φάσμα για σεισμό X και Y – Οριζόντιες συνιστώσες

LC9999 για σεισμό Z

Response spectra EC 8 Type 1, Soil Class A										
D[-]	SA[-]	SB[-]	MIN[-]	TB[sec]	TC[sec]	TD[sec]	TE[sec]	K1[-]	K2[-]	A[m/sec ²]
0.0500	2.160	6.480	0.540	0.050	0.150	6.235	0.000	1.000	1.000	0.00
Zone =				ah =*	1.000	av =*	0.000			



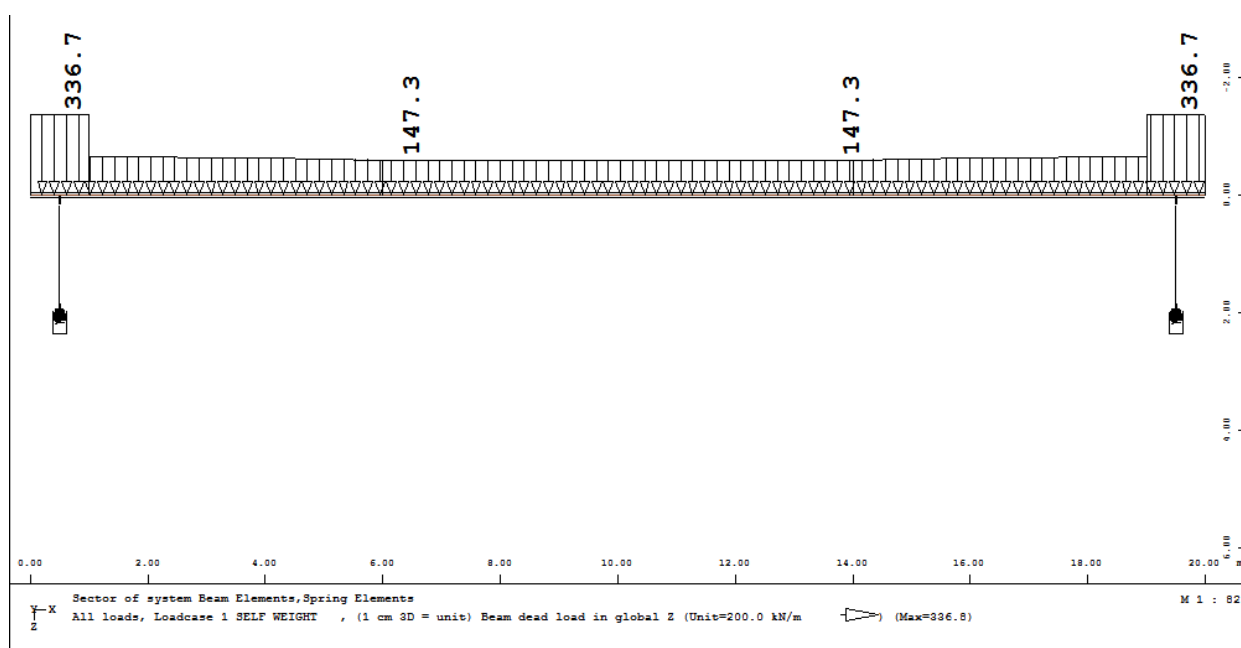
Φάσμα για σεισμό Z – Κατακόρυφη συνιστώσα

5 Φορτίσεις στα μοντέλα

5.1 Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

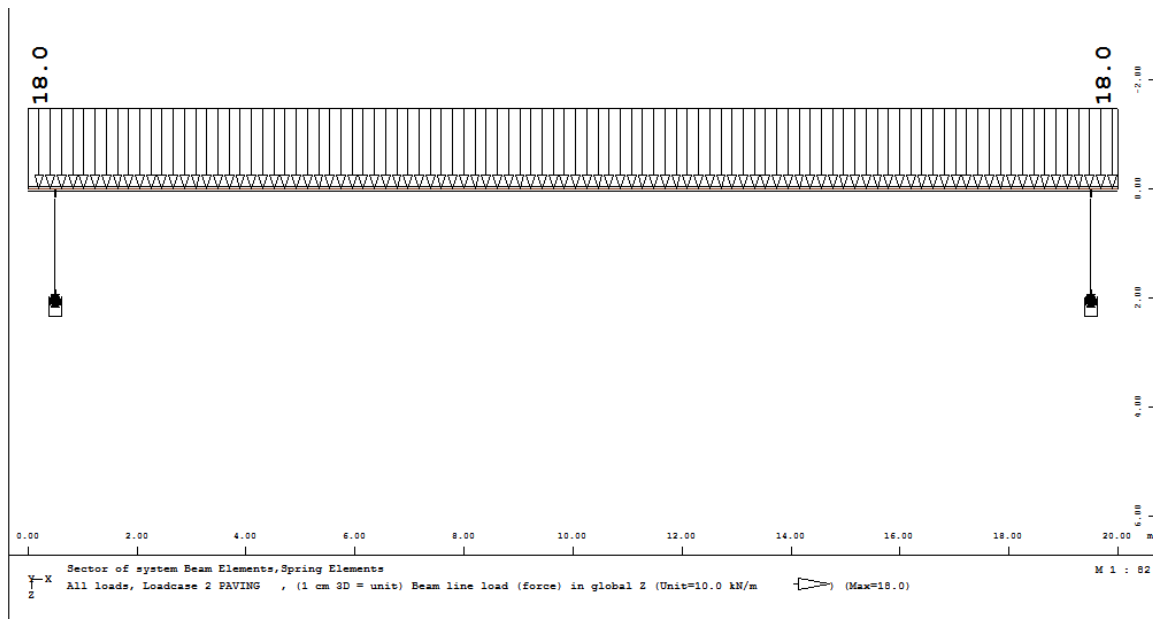
Στα ραβδωτά μοντέλα, όλα τα φορτία προβάλλονται στον άξονα της ράβδου και υπολογίζονται ως φορτία ανά τρέχον μέτρο δοκού. Αν τα φορτία είναι έκκεντρα, το πρόγραμμα τα μετατρέπει σε δύναμη στον άξονα μαζί με τη ροπή που προκαλείται από την εκκεντρότητα.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε ότι ο υπολογισμός του IB προκύπτει ως επιφάνεια εκάστοτε διατομής * ειδικό βάρος σκυροδέματος και υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα όταν ορίζουμε να λαμβάνεται υπ'όψιν το IB του φορέα.

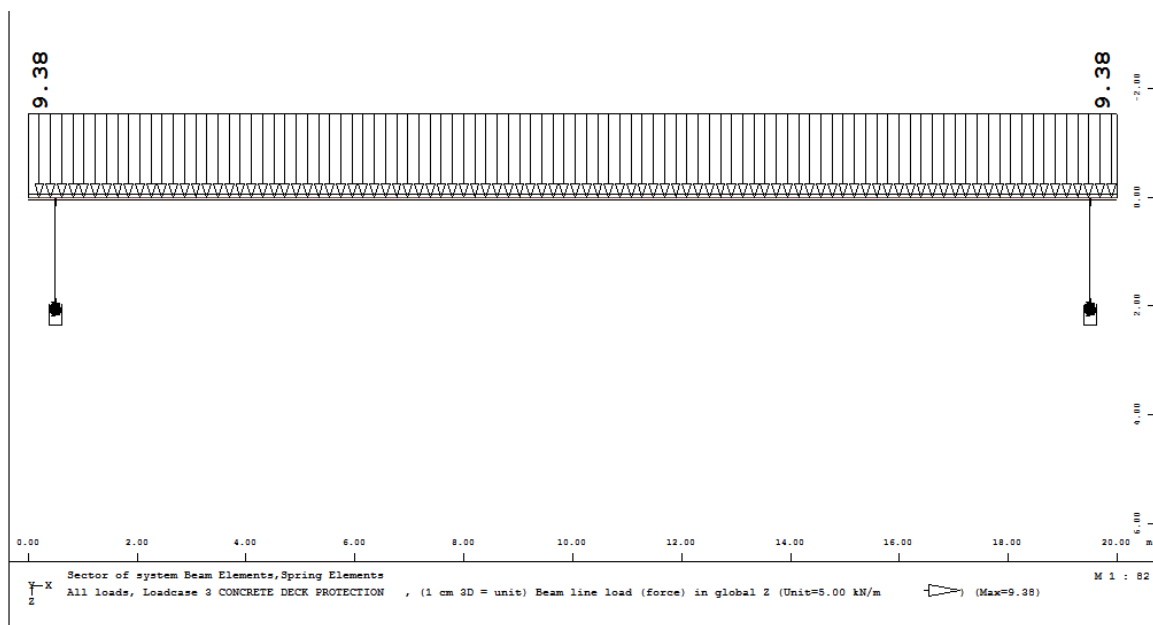


LC1 / Φόρτιση IB στο ραβδωτό χωρίς διατομή

Τα επιφανειακά φορτία όπως επιστρώσεις κ.λ.π. πολλαπλασιάζονται με το πλάτος επιρροής και ορίζονται ως φορτία ανά τρέχον μέτρο.

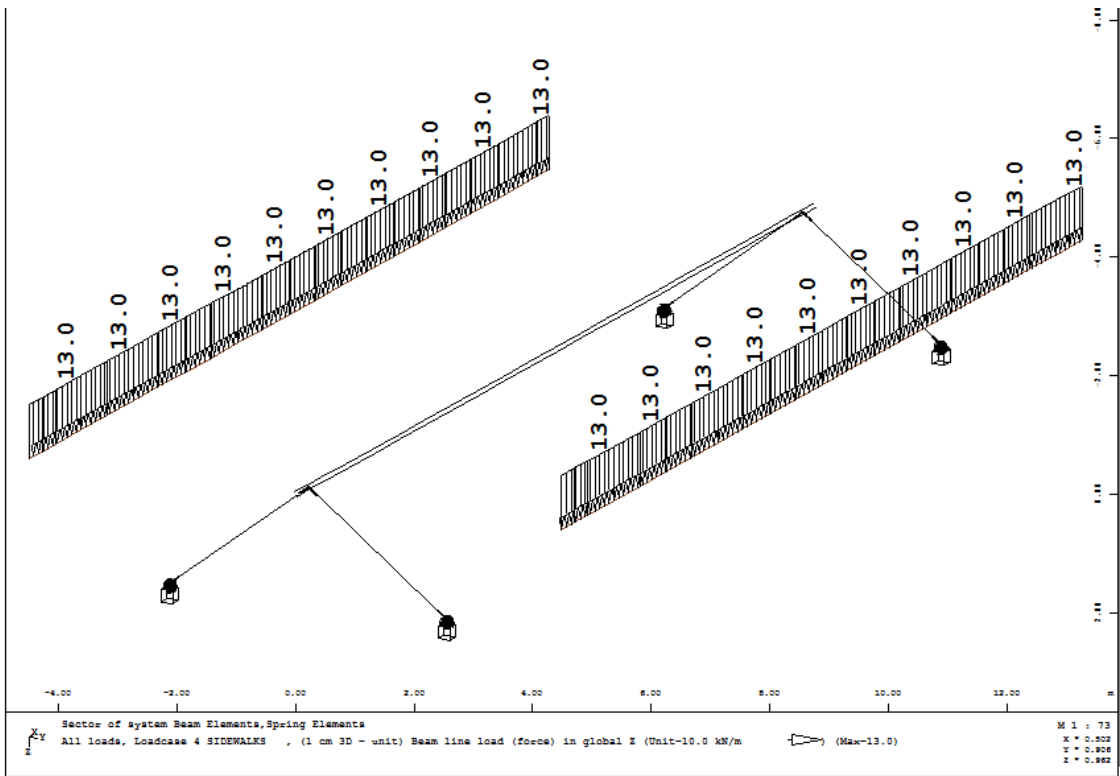


LC2 / στο ραβδωτό χωρίς διατομή



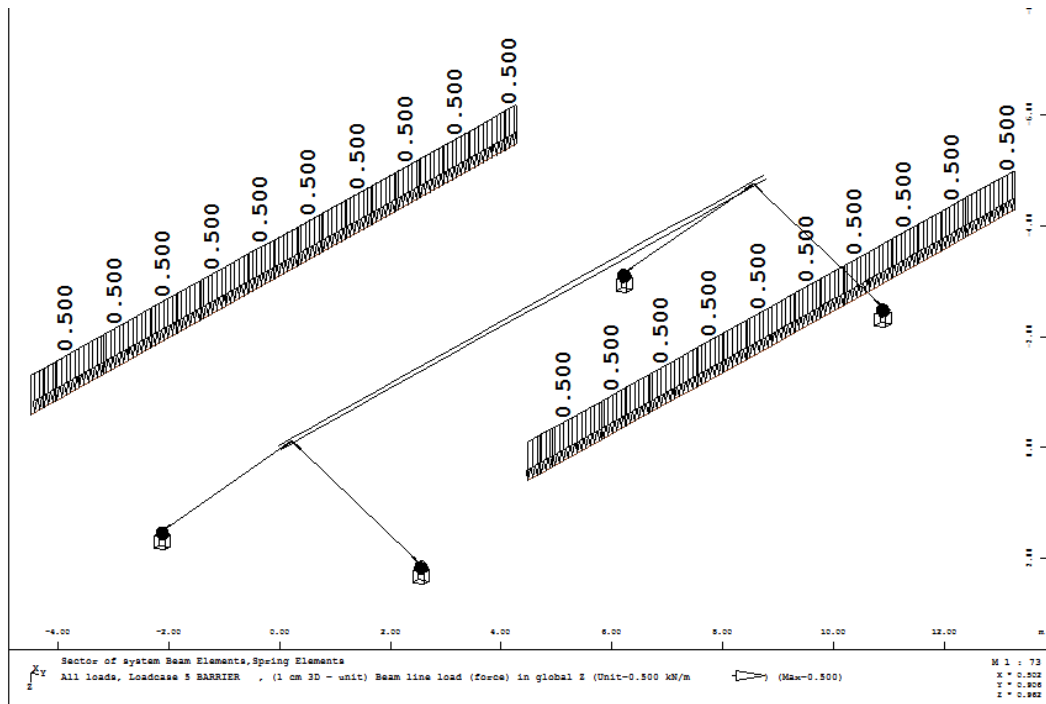
LC3 / στο ραβδωτό χωρίς διατομή

Τα επιφανειακά φορτία πεζοδρομίων πολλαπλασιάζονται με το πλάτος πεζοδρομίου και ορίζονται ως φορτία ανά τρέχον μέτρο που τοποθετούνται στο μέσο του πλάτους του πεζοδρομίου.

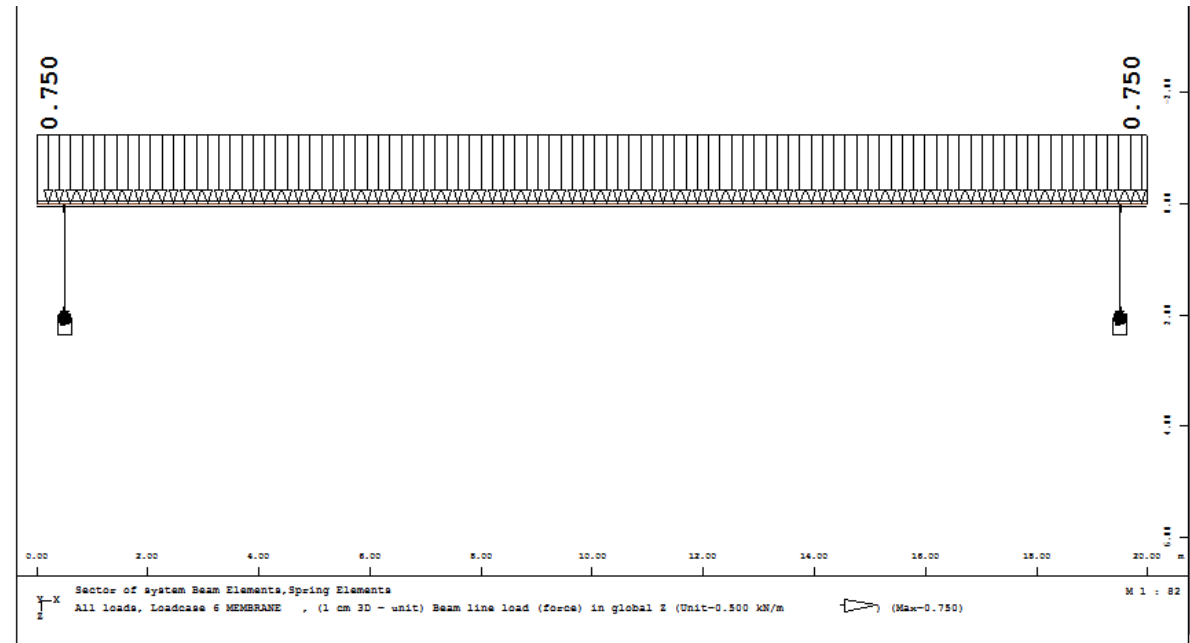


LC4 / στο ραβδωτό χωρίς διατομή

Το στηθαίο ως γραμμικό φορτίο τοποθετείται στην θέση του πάνω στη διατομή σε όλο το μήκος του φορέα

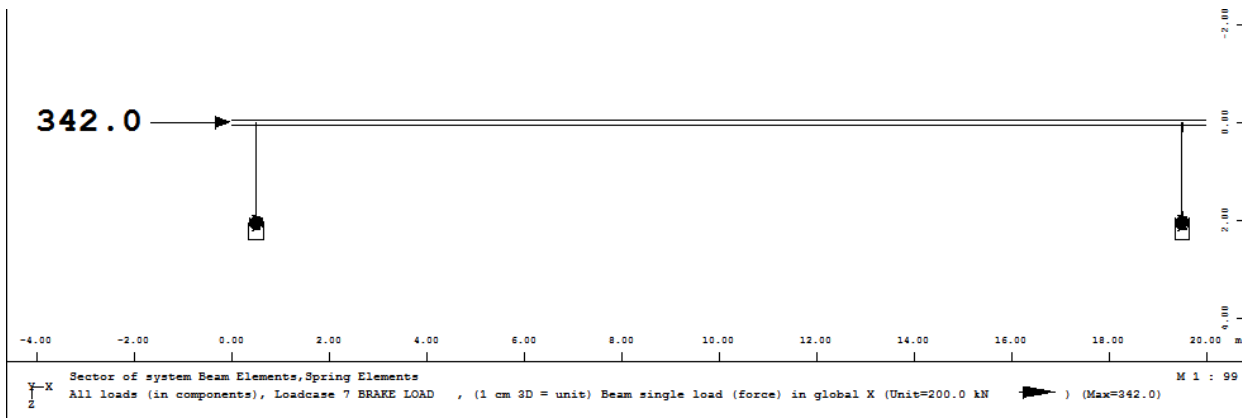


LC5 / στο ραβδωτό χωρίς διατομή

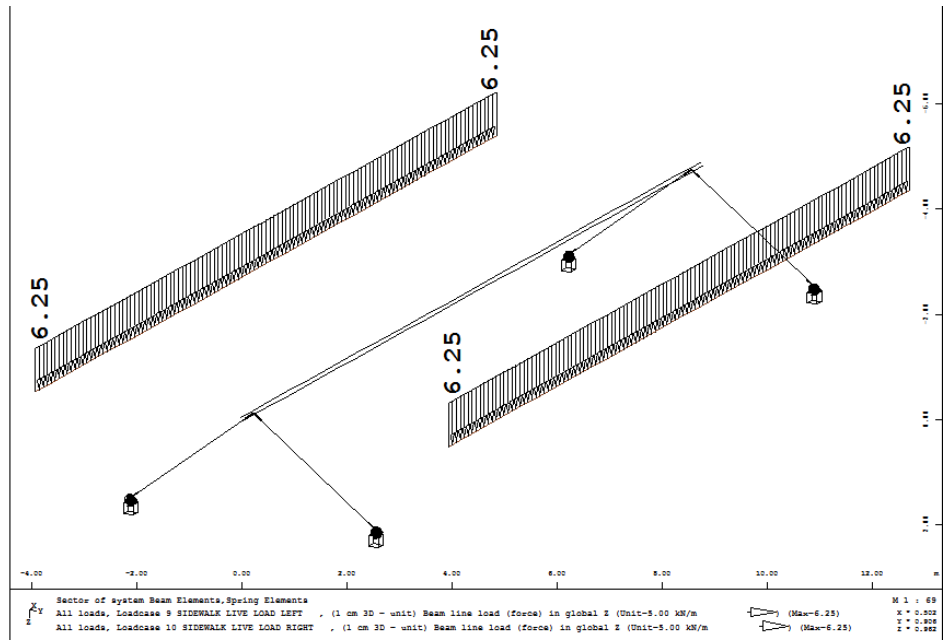


LC6 / στο ραβδωτό χωρίς διατομή

Το φορτίο πέδησης επιτάχυνσης προσομοιώθηκε ως οριζόντια δύναμη στην αρχή του καταστρώματος

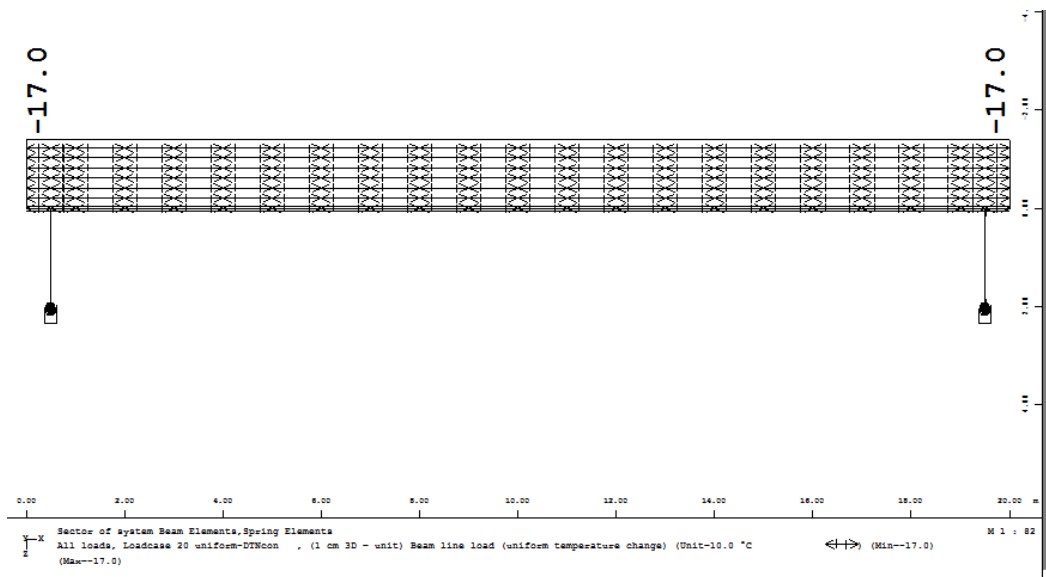


LC7 –στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

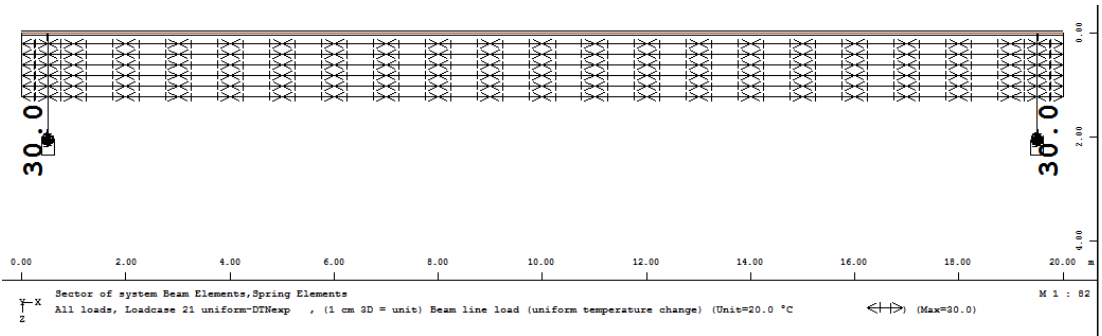


LC9 και 10 – στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

Τα θερμοκρασιακά προσομοιώθηκαν ως ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας σε όλο το φορέα

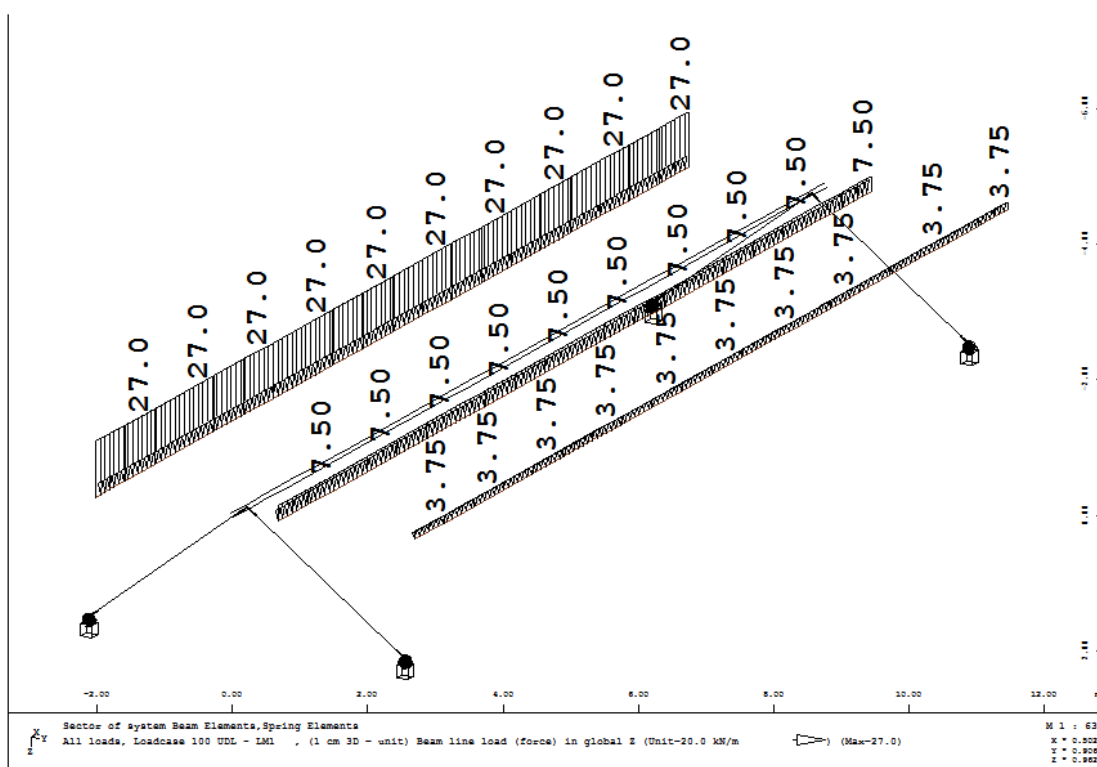


LC20 στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



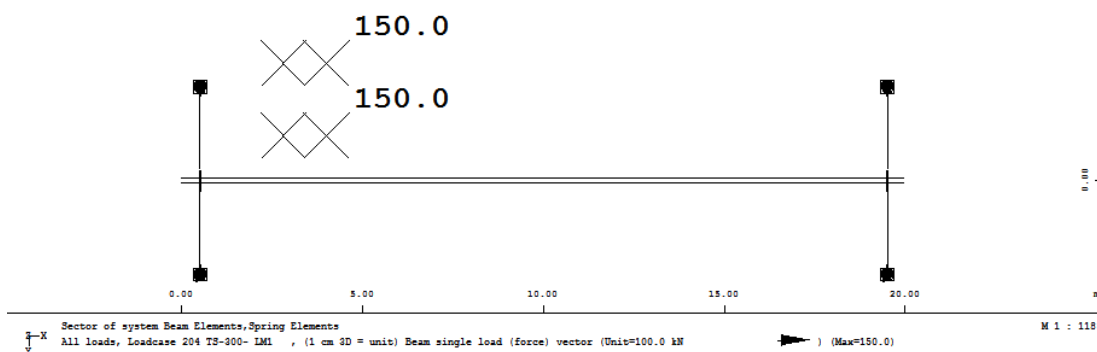
LC21 στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

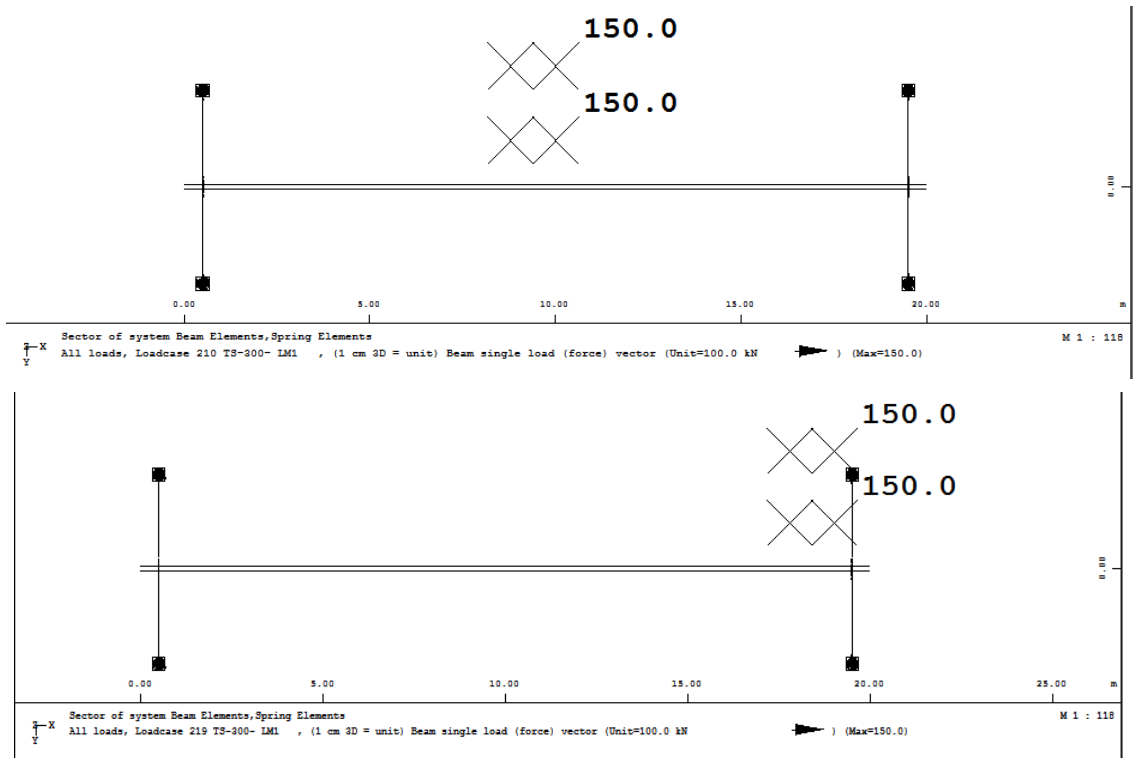
Τα φορτία UDL προσομοιώθηκαν ως γραμμικά φορτία αφού πολλαπλασιάστηκε η τιμή τους με το πλάτος της κάθε λωρίδας και τοποθετήθηκαν στο μέσο της κάθε λωρίδας



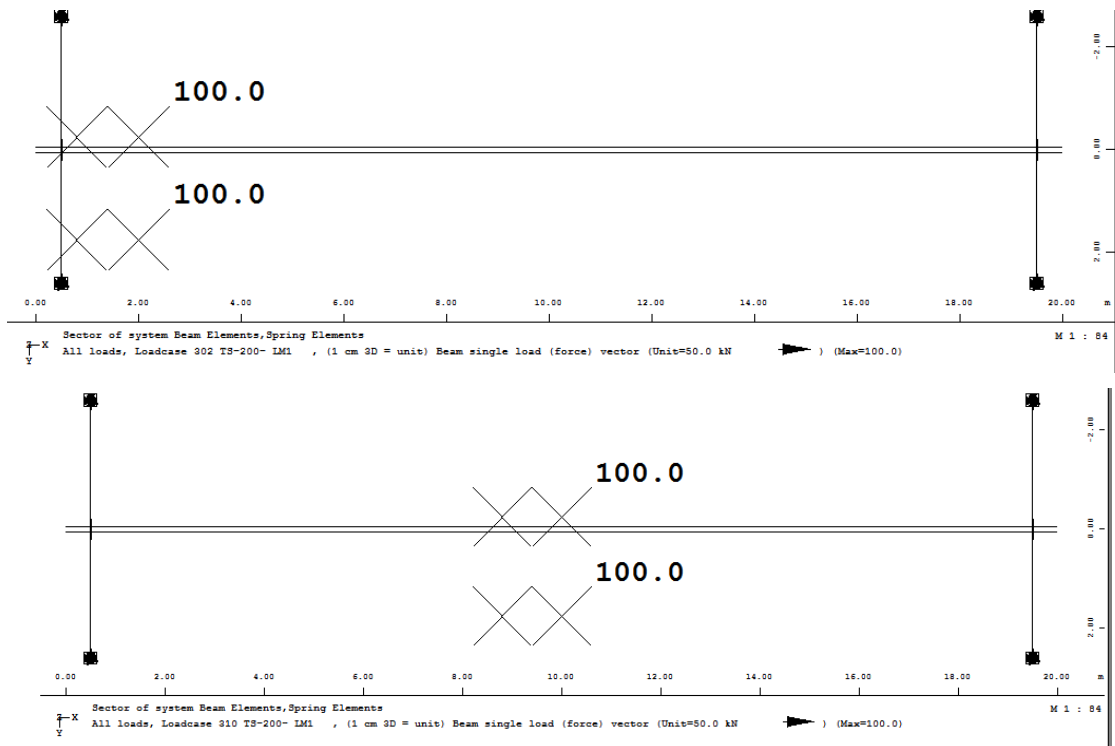
LC100 – φορτίο UDL στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

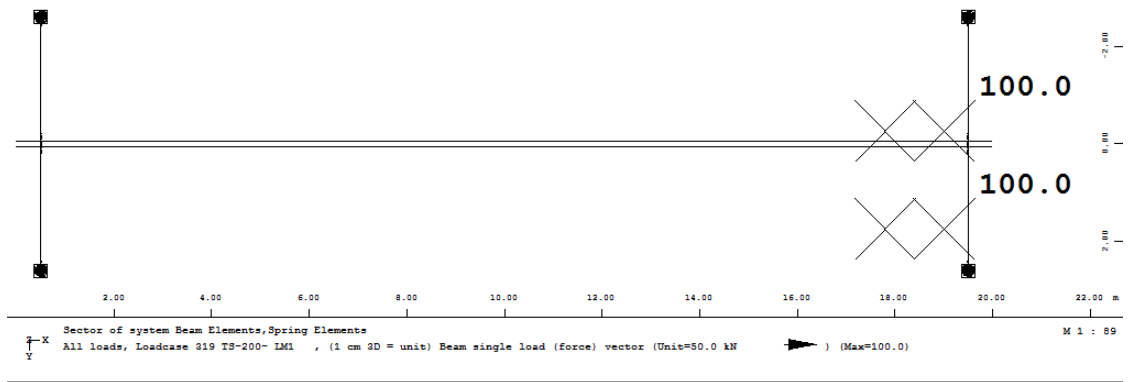
Για το φορτίο TS προσομοιώθηκαν 4 κατακόρυφα φορτία στις αποστάσεις που ορίζει ο κανονισμός ως αποστάσεις αξόνων προσωμοιωματος οχήματος . Το σύστημα αυτό των 4 φορτίων τοποθετήθηκε διαδοχικά ανά 1 μέτρο σε όλες τις θέσεις του καταστρώματος από την αρχή του φορέα μέχρι το τέλος του στη θέση της λωρίδας που επιλέχθηκε ως κύρια λωρίδα και κεντρικά στη λωρίδα αυτή.





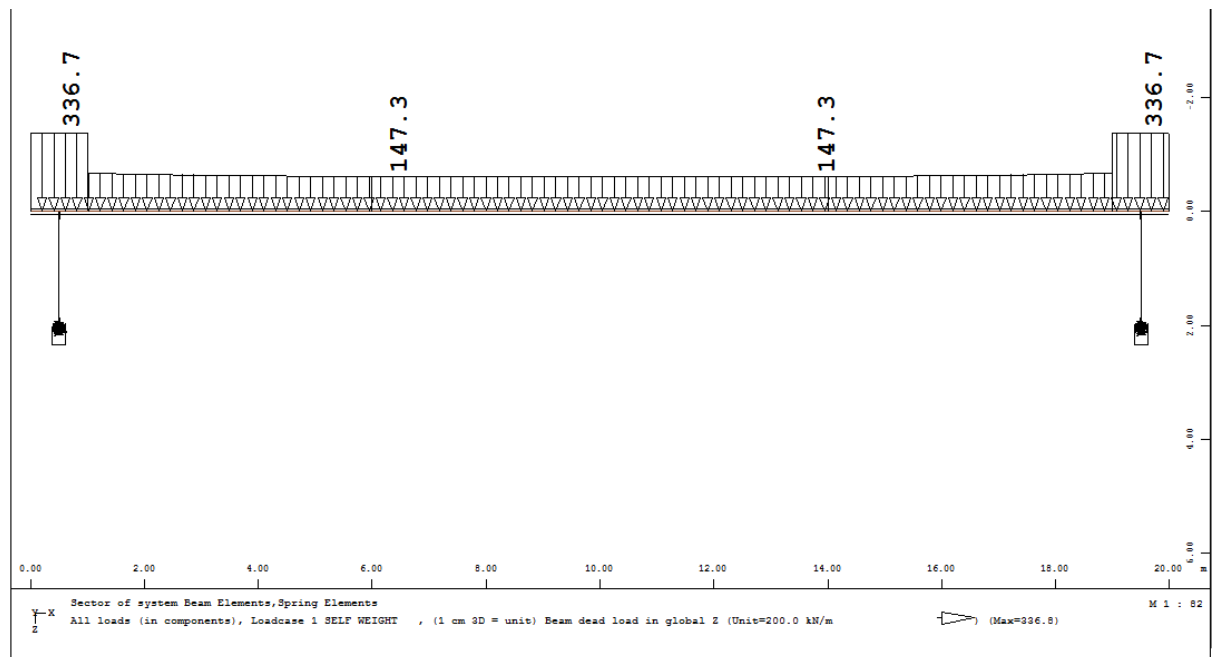
LC200 – φορτίο TS της λαρίδας I σε διάφορες θέσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή – προβολή από πάνω



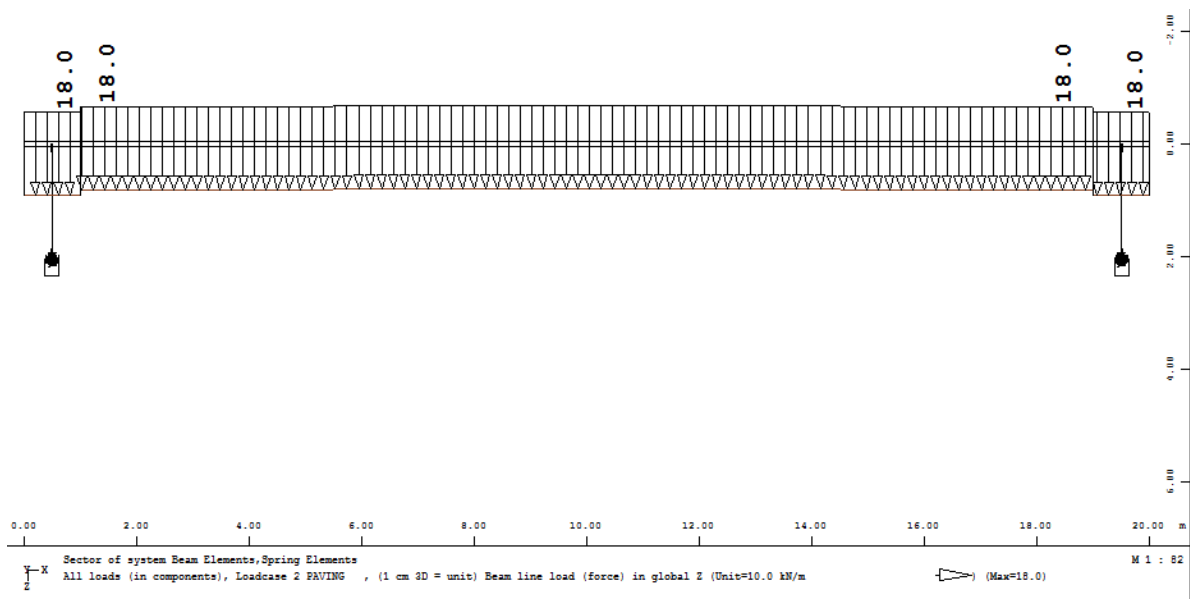


LC300 – φορτίο TS της λωρίδας 2 σε διάφορες θέσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή – προβολή από πάνω

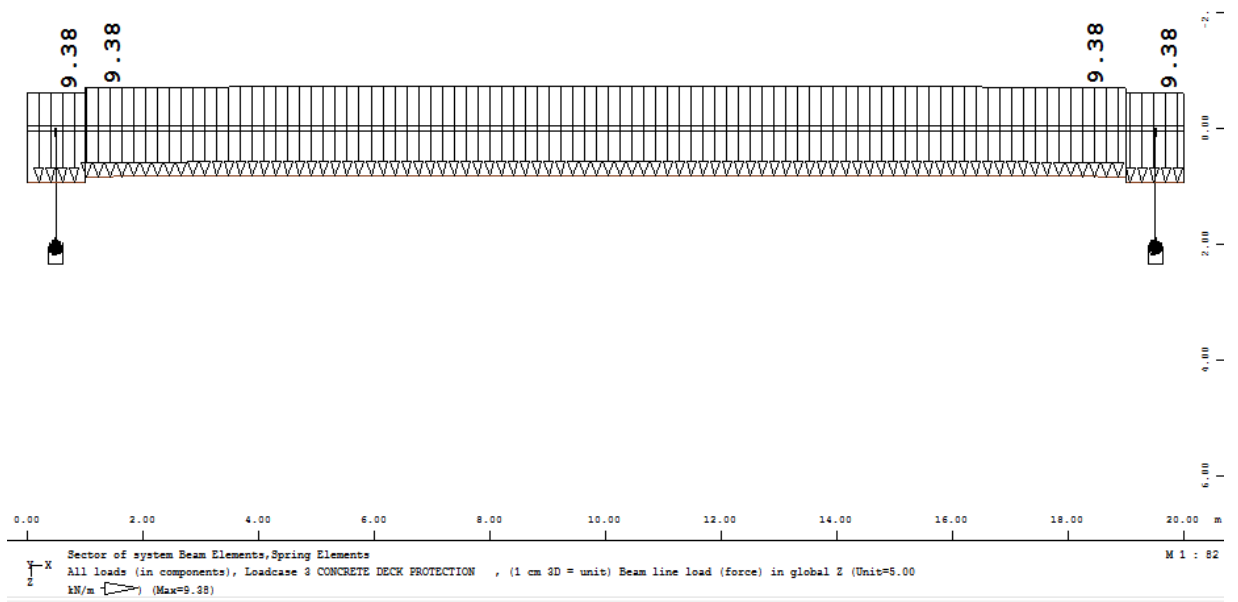
5.2 Ραβδωτό μοντέλο με διατομή



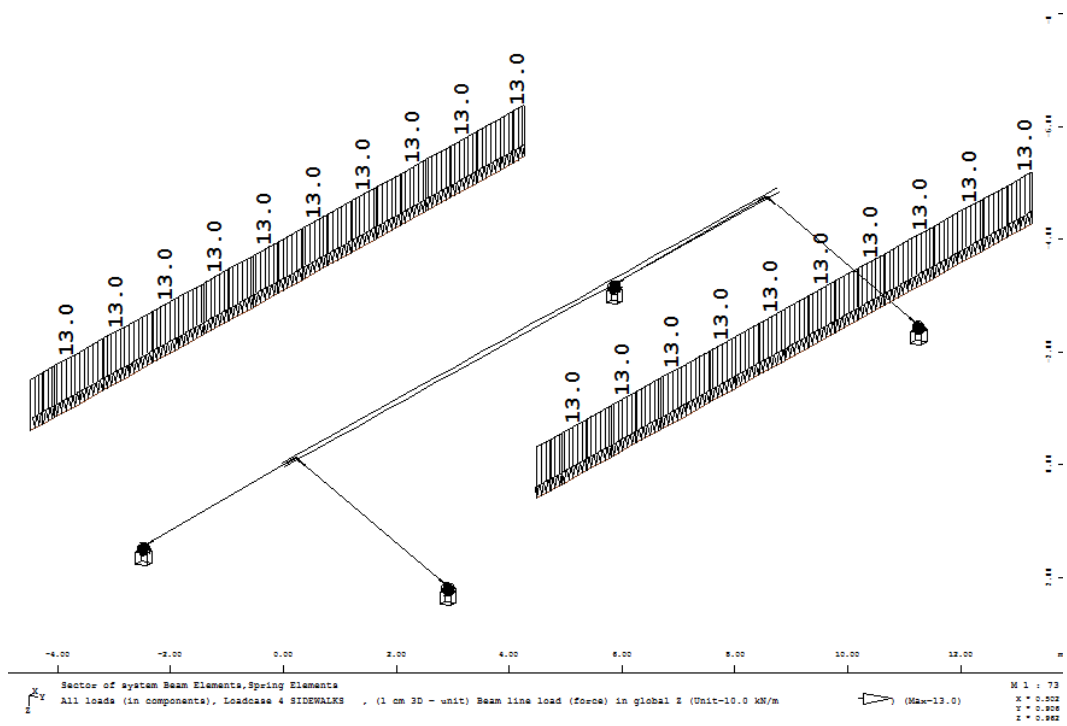
LC1 / Φόρτιση IB στο ραβδωτό με διατομή



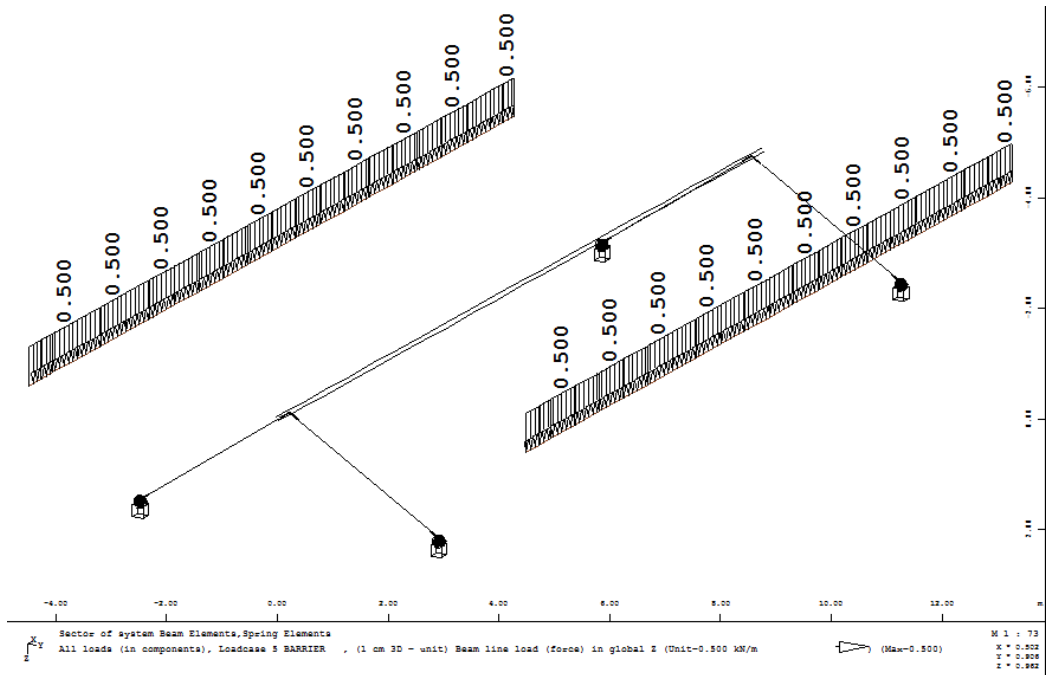
LC2 / στο ραβδωτό με διατομή



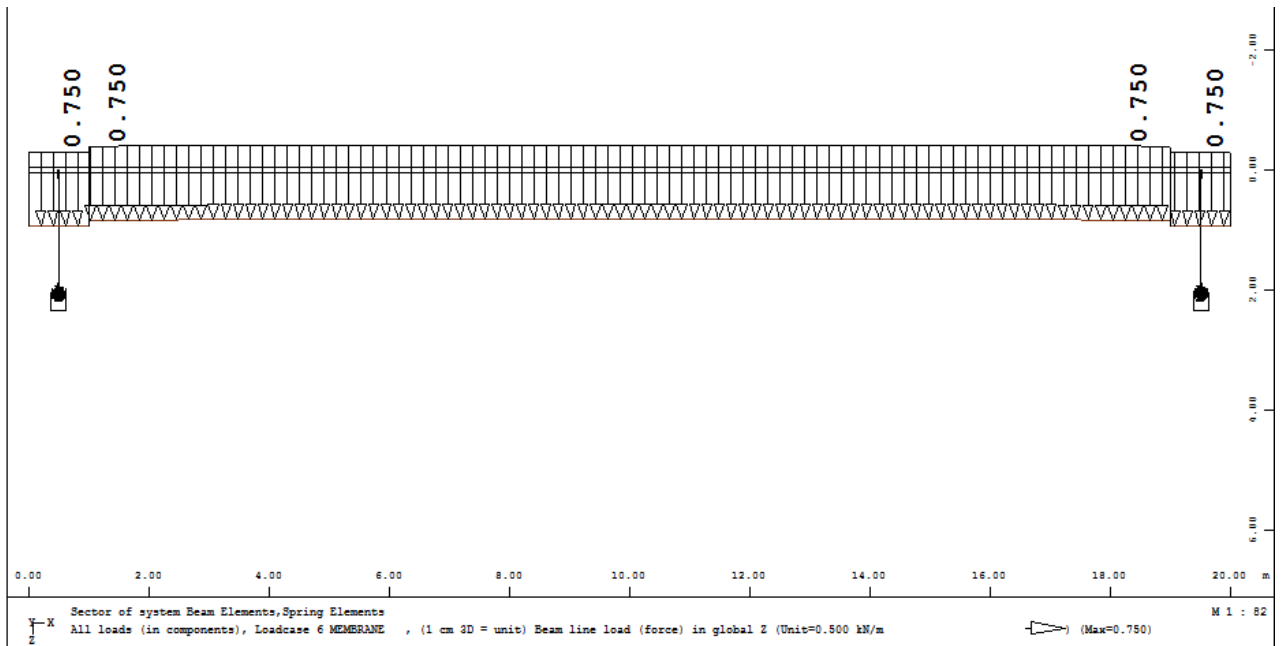
LC3 / στο ραβδωτό με διατομή



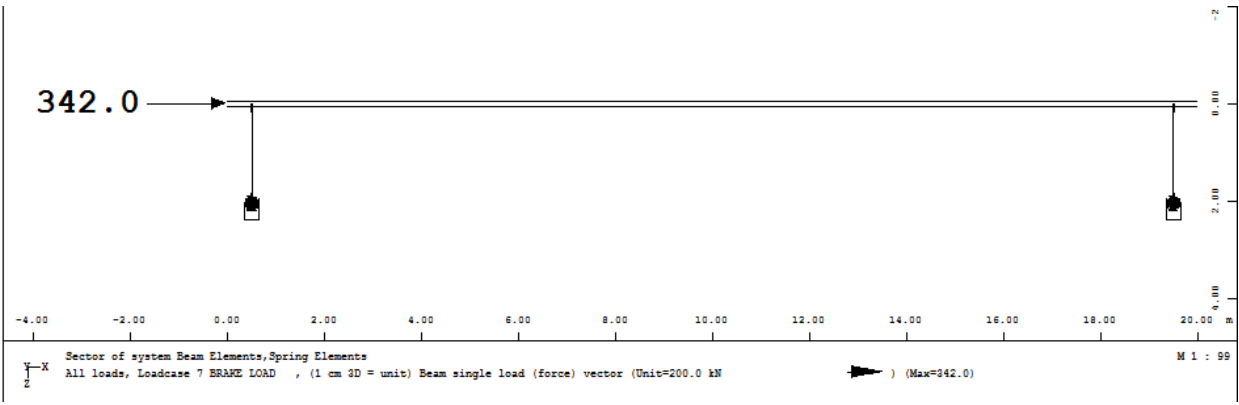
LC4 / στο ραβδωτό με διατομή



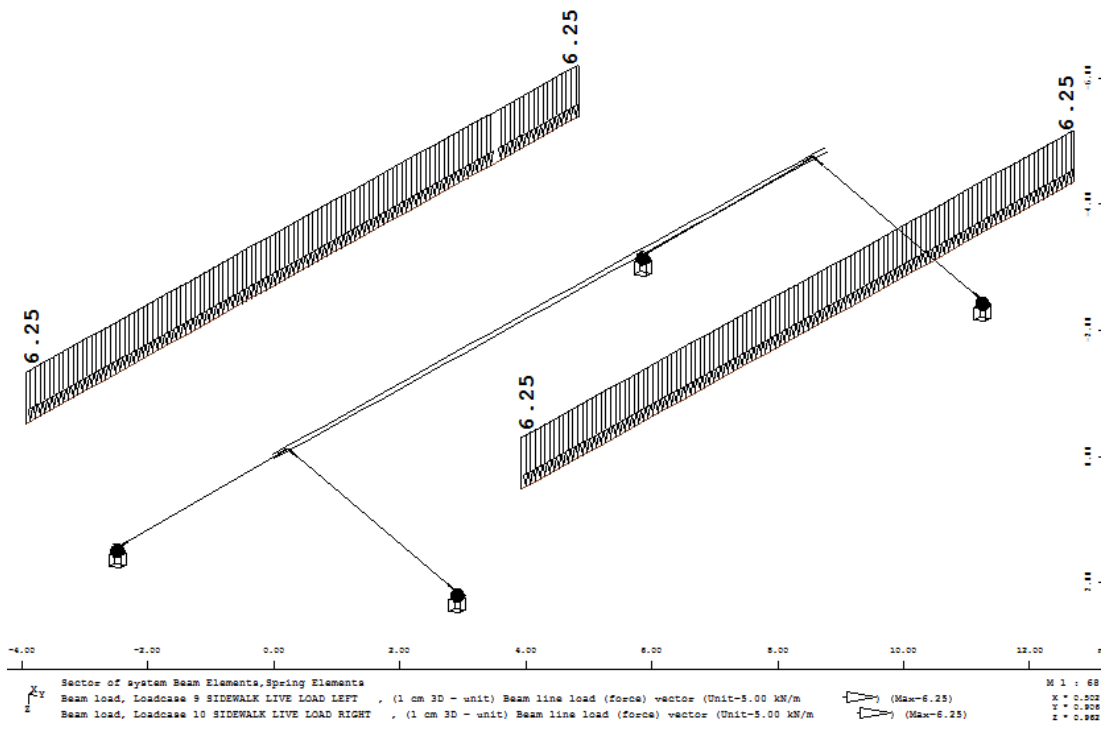
LC5 / στο ραβδωτό με διατομή



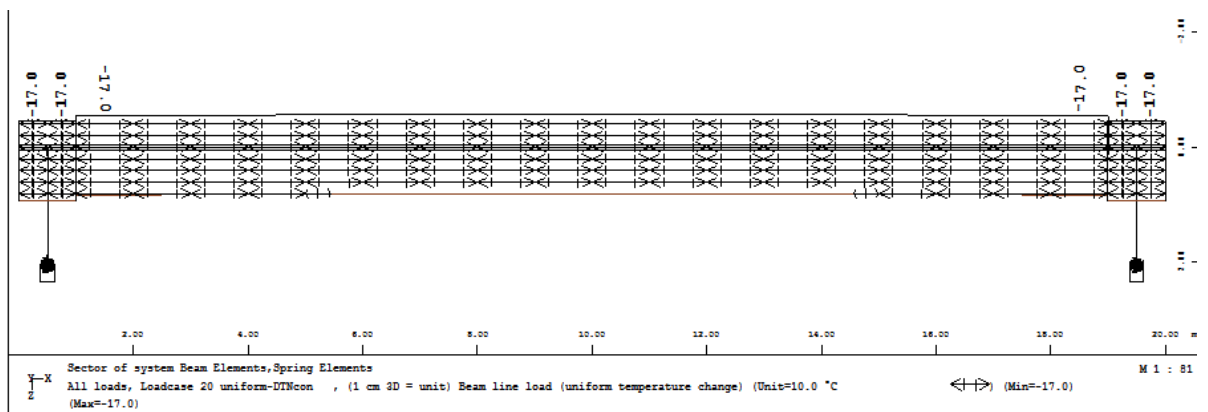
LC6 / στο ραβδωτό με διατομή



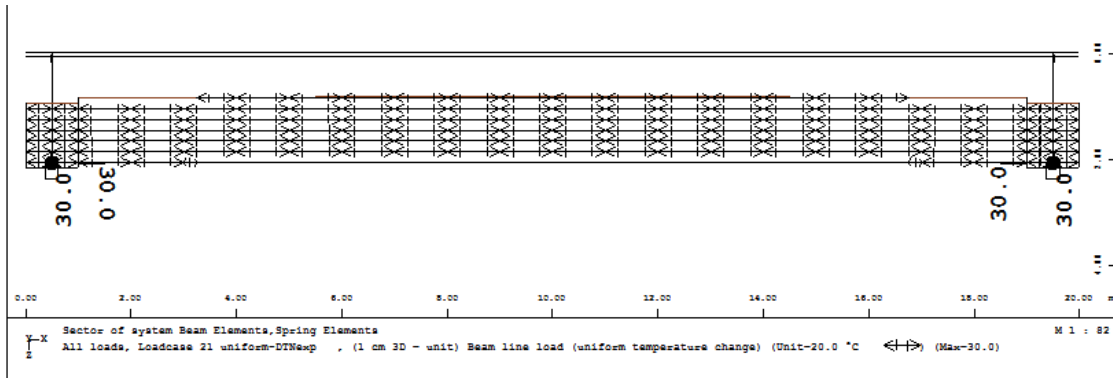
LC7 – στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



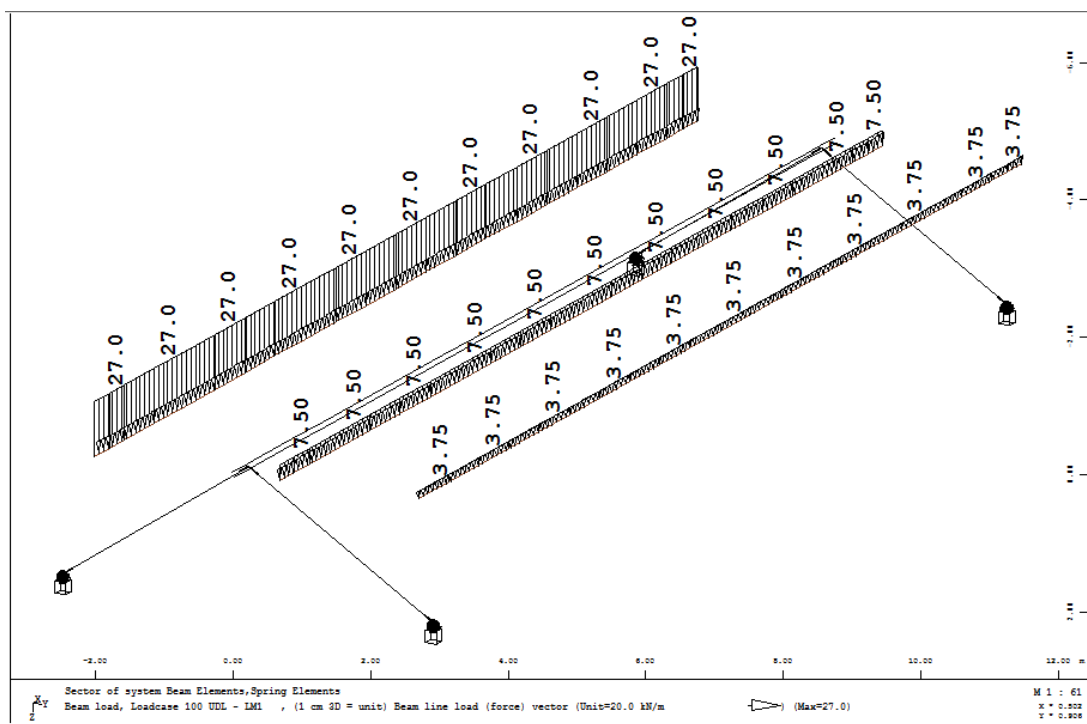
LC9 και 10 – στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



LC20 στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

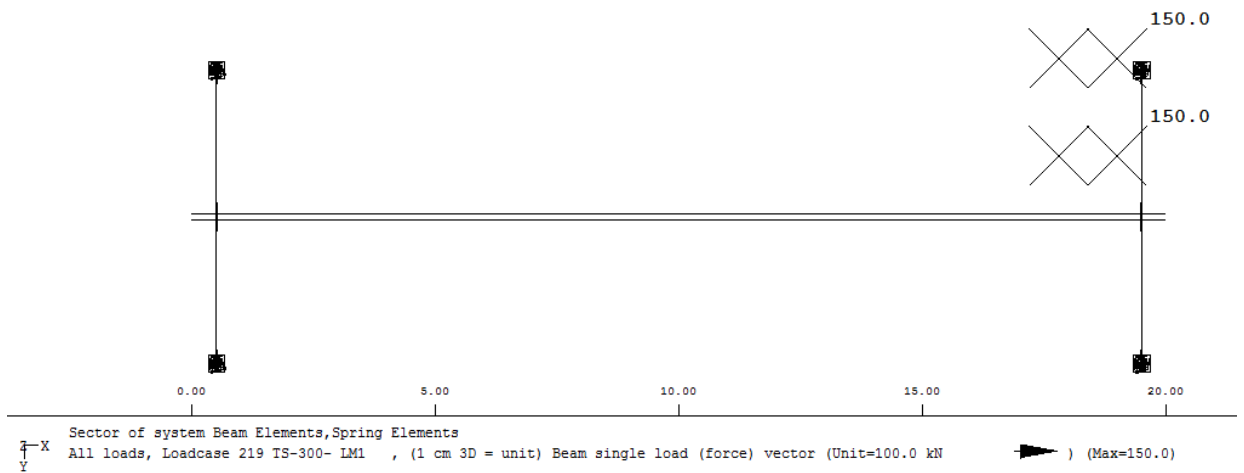
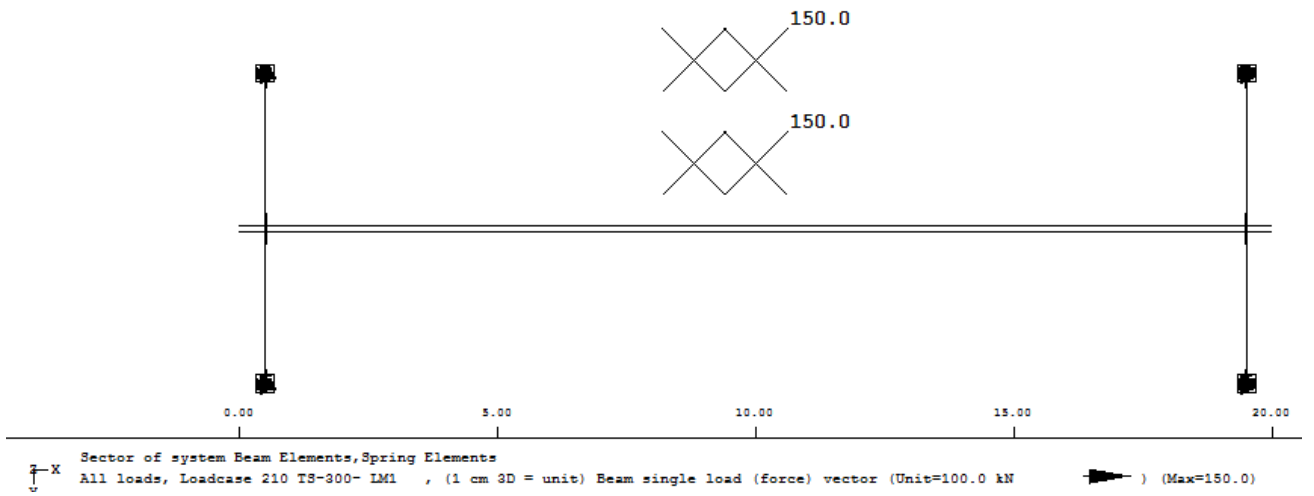
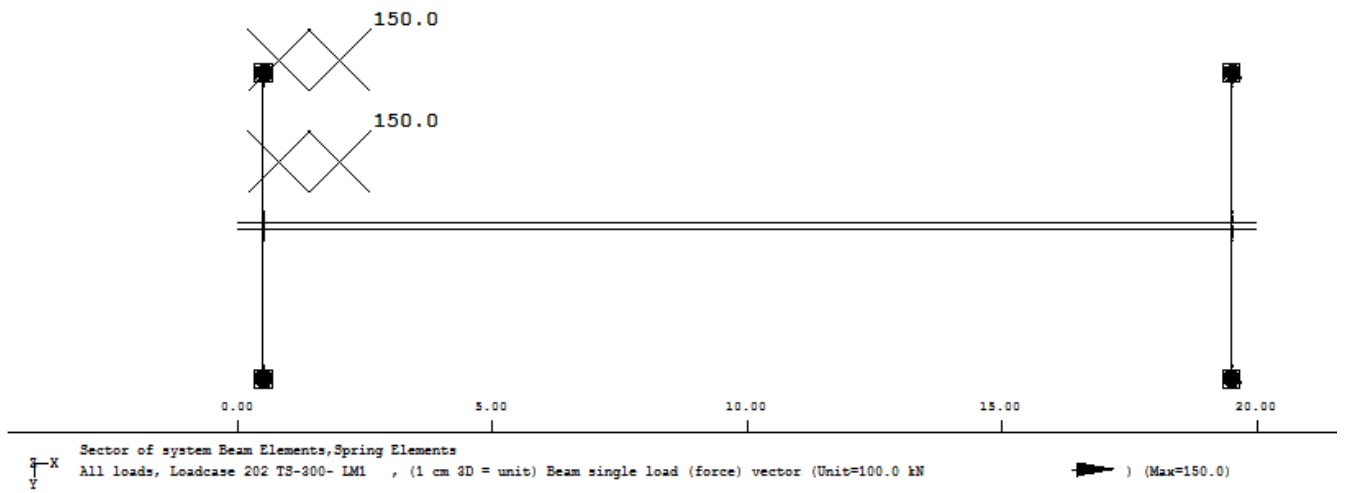


LC21 στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

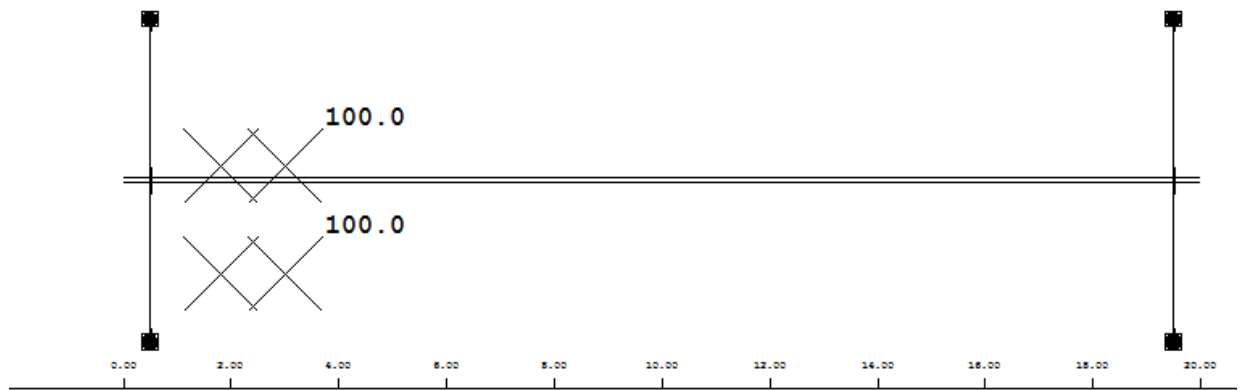


LC100 – φορτίο UDL στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

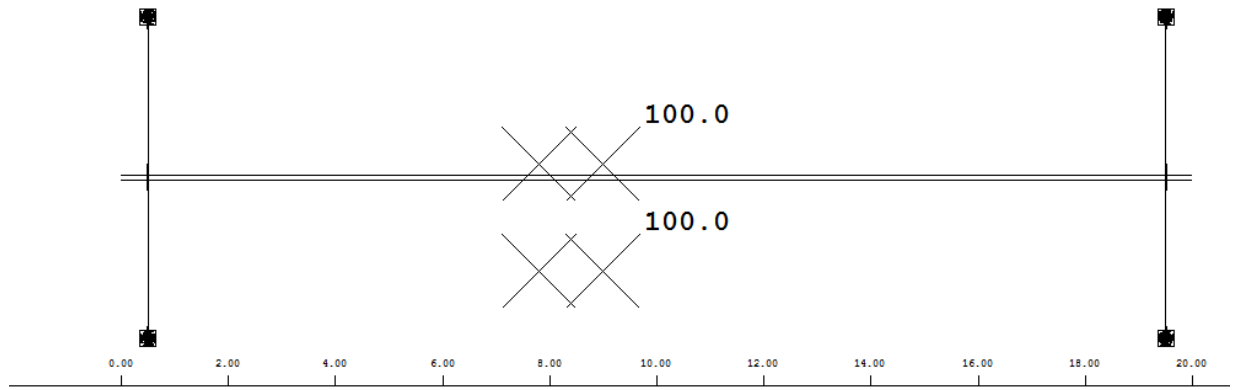
Τα επιφανειακά φορτία πολλαπλασιάζονται με το πλάτος της λωρίδας και εφαρμόζονται στο μέσον της. Οι εκκεντρότητες θα ληφθούν υπ'όψιν και θα παραχθούν οι αντίστοιχες ροπές



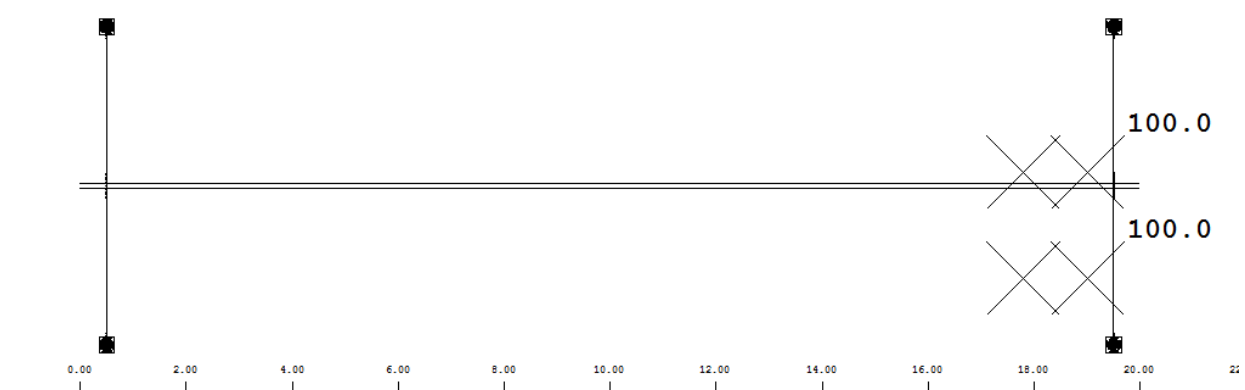
LC200 – φορτίο TS της λωρίδας 1 σε διάφορες θέσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή – προβολή από πάνω



Sector of system Beam Elements, Spring Elements
 All loads, Loadcase 303 TS-200- LM1 , (1 cm 3D = unit) Beam single load (force) vector (Unit=50.0 kN) (Max=100.0)



Sector of system Beam Elements, Spring Elements
 All loads, Loadcase 309 TS-200- LM1 , (1 cm 3D = unit) Beam single load (force) vector (Unit=50.0 kN) (Max=100.0)

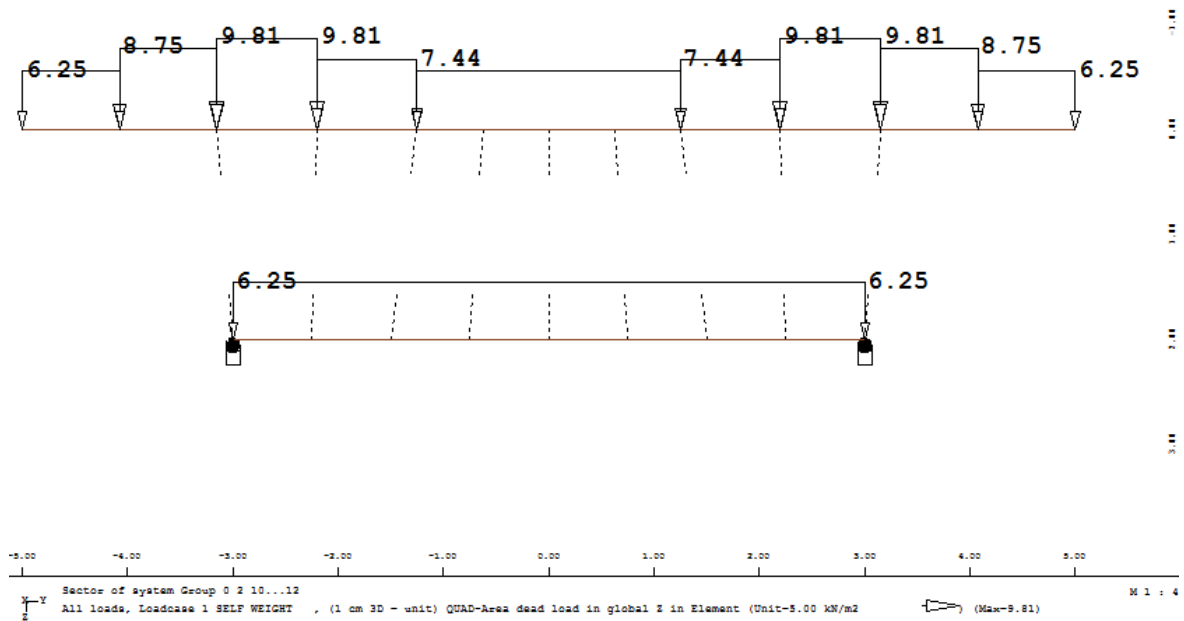


Sector of system Beam Elements, Spring Elements
 All loads, Loadcase 319 TS-200- LM1 , (1 cm 3D = unit) Beam single load (force) vector (Unit=50.0 kN) (Max=100.0)

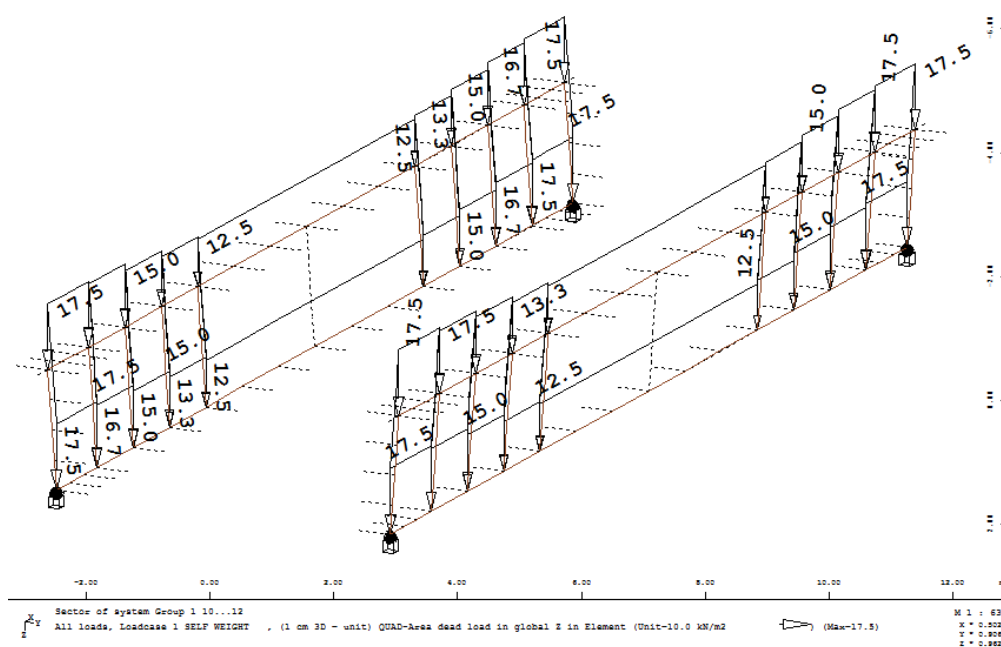
LC300 – φορτίο TS της λωρίδας 2 σε διάφορες θέσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή – προβολή από πάνω

5.3 Μοντέλο Πεπερασμένων στοιχείων

Στο μοντέλο π.σ. θα παρουσιαστεί η φόρτιση τμηματικά για είναι εποπτική

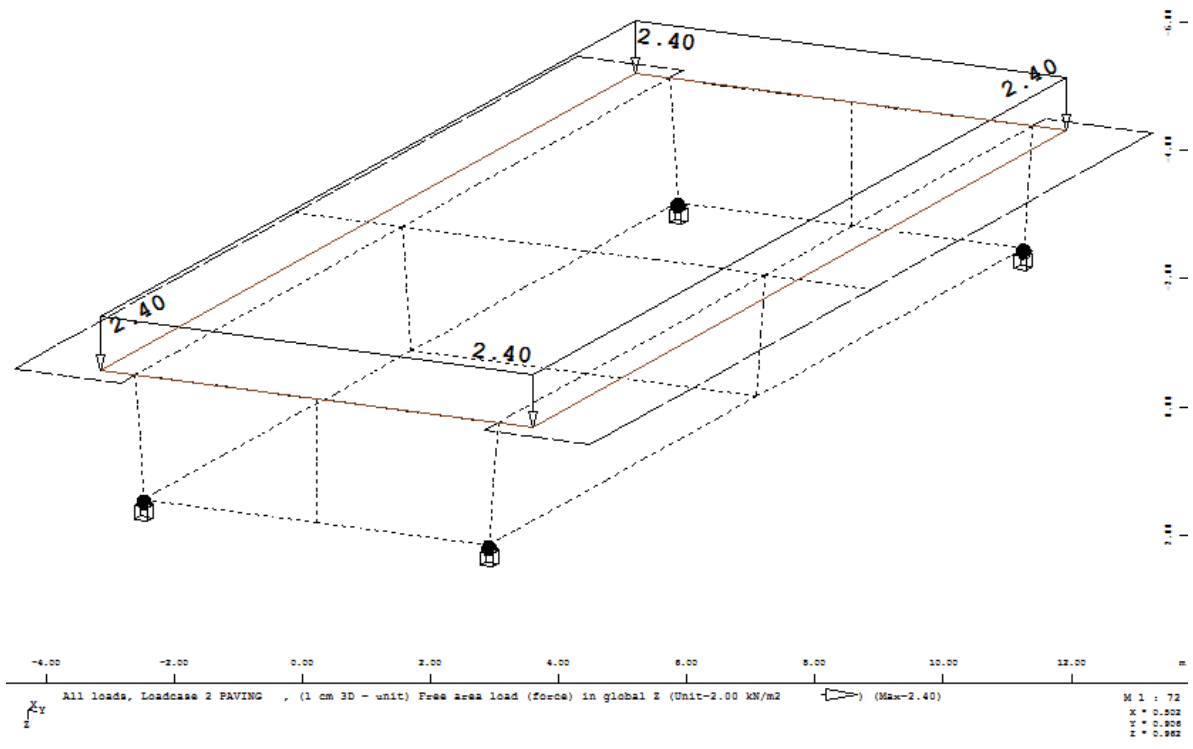


LC1 / Φόρτιση IB στο μοντέλο π.σ. - άξονες y-z (πάχος στοιχείου*ειδ.βάρους σκυροδέματος) –άνω και κάτω πέλμα

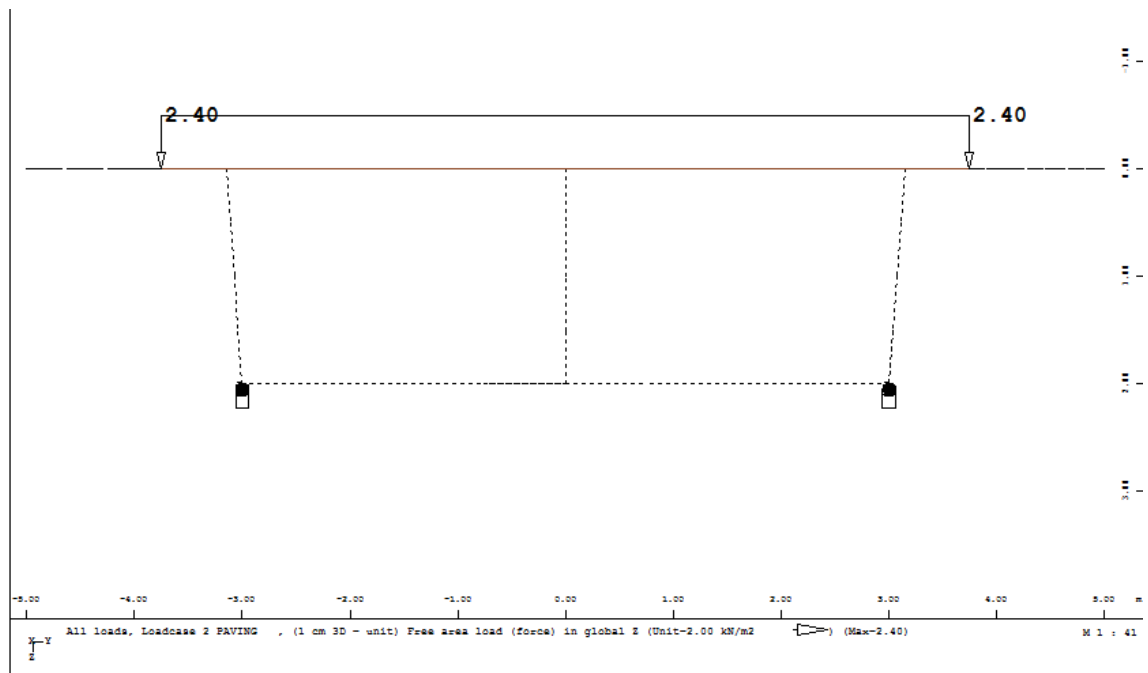


LC1 / Φόρτιση IB στο μοντέλο π.σ. – κορμοί κιβωτίου– (Wingraf)

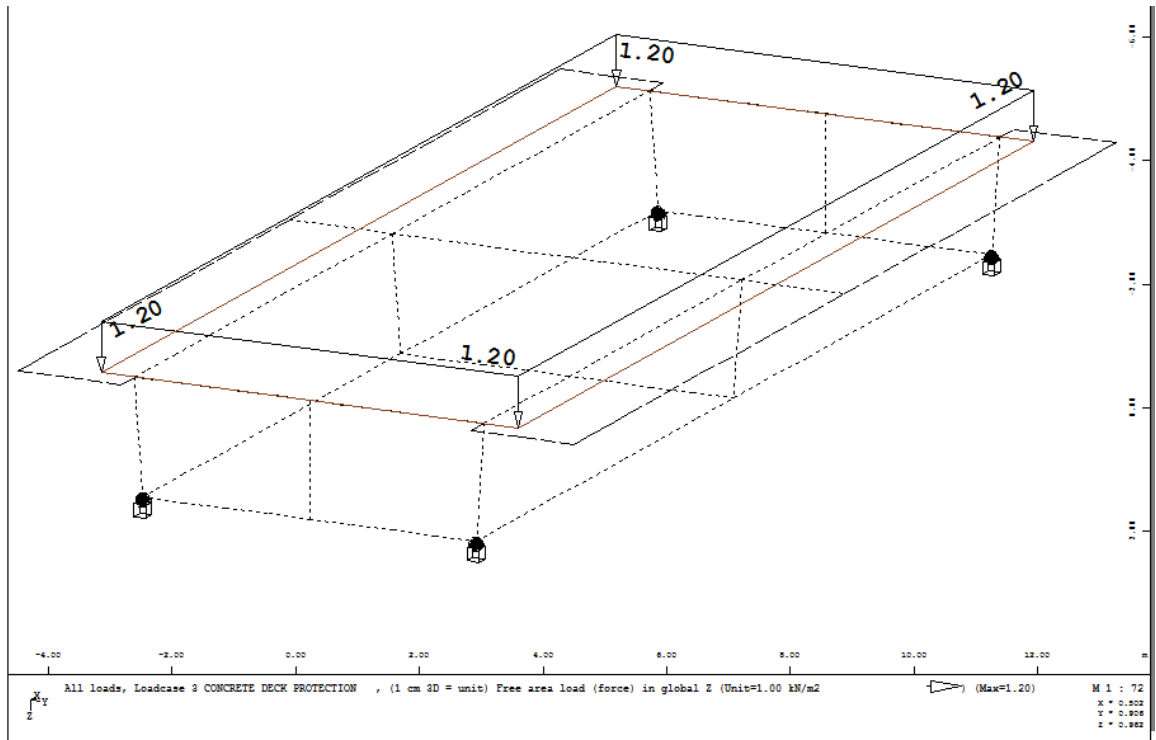
Τα επιφανειακά φορτία του καταστρώματος στο μοντέλο προσομοιώθηκαν κανονικά ως επιφανειακά στην περιοχή που εφαρμόζονται



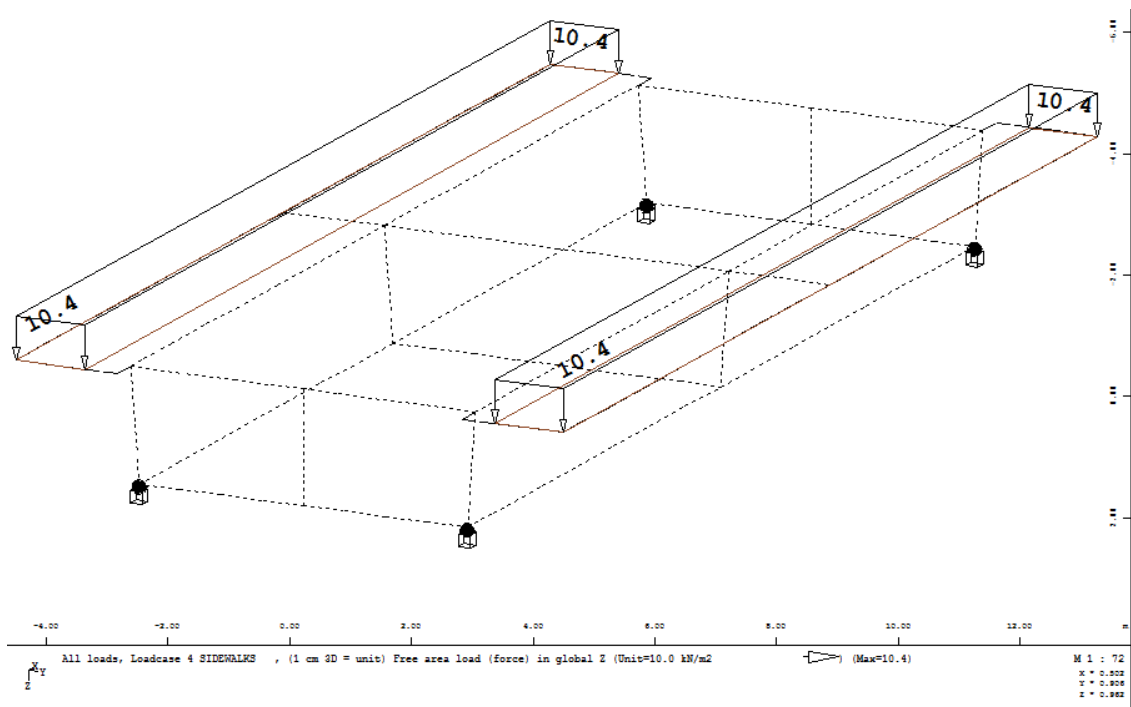
LC2 / στο μοντέλο π.σ.



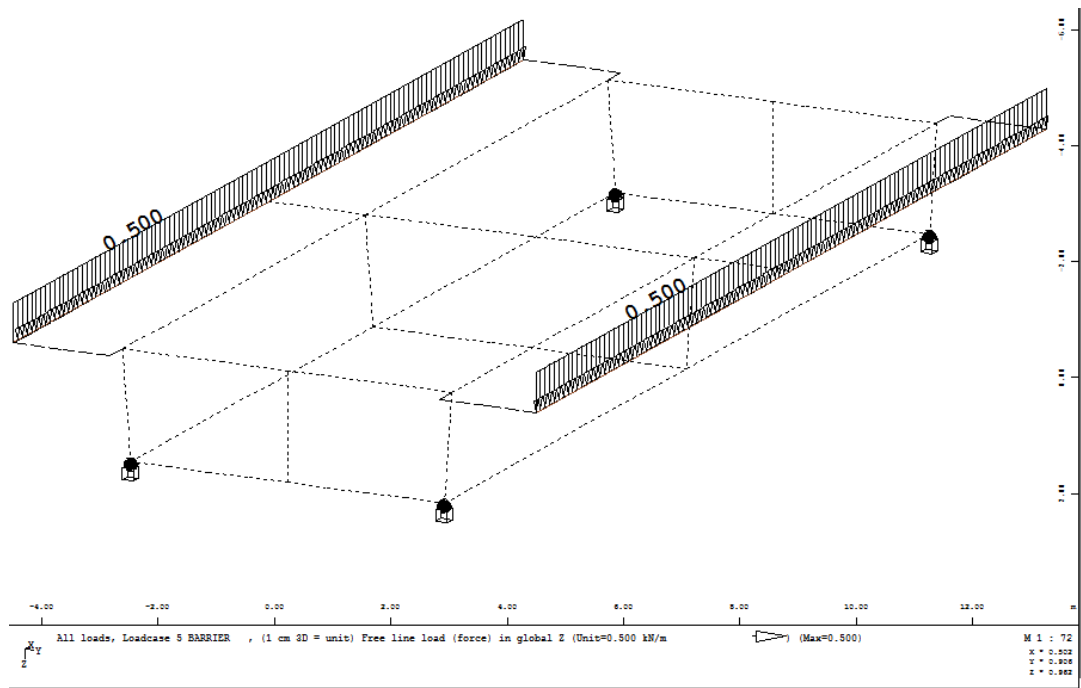
LC2 / στο μοντέλο π.σ. - παρουσίαση σε επίπεδο y-z



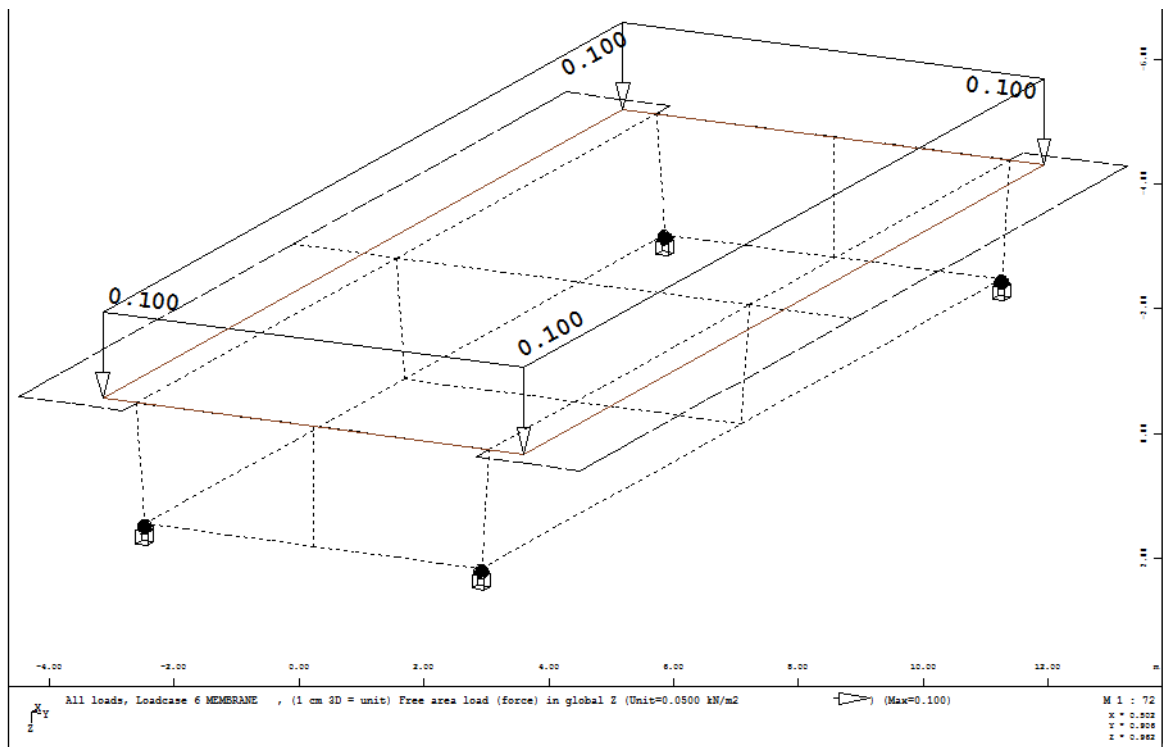
LC3 / στο μοντέλο π.σ



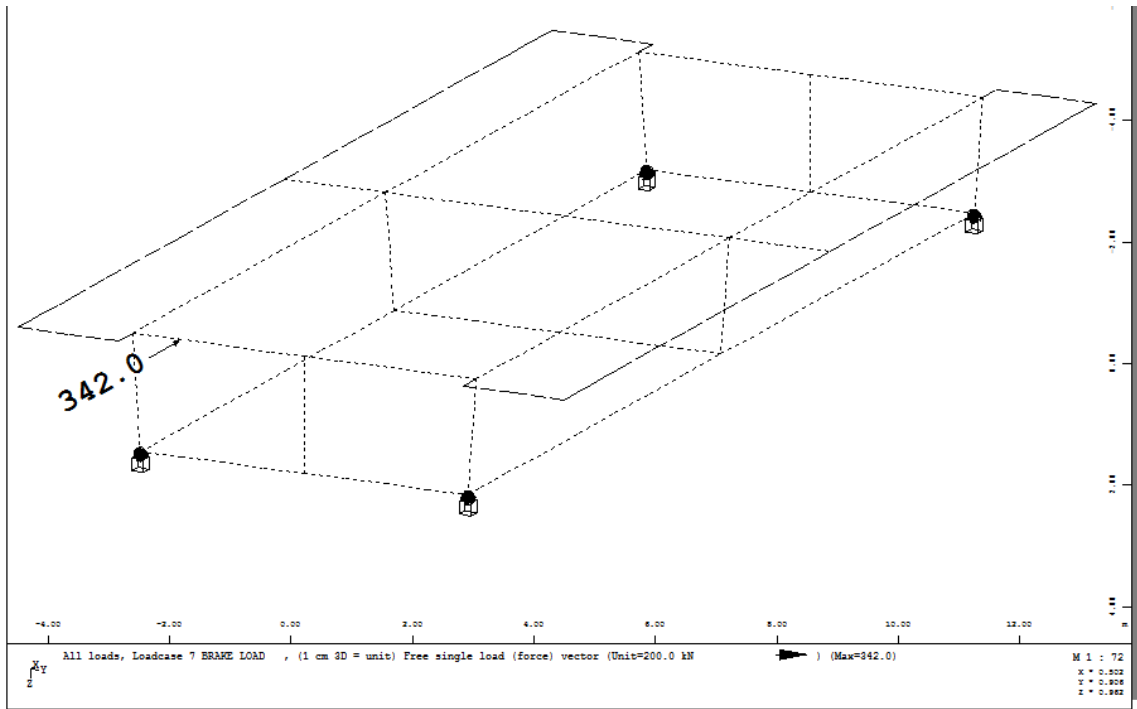
LC4 / στο μοντέλο π.σ



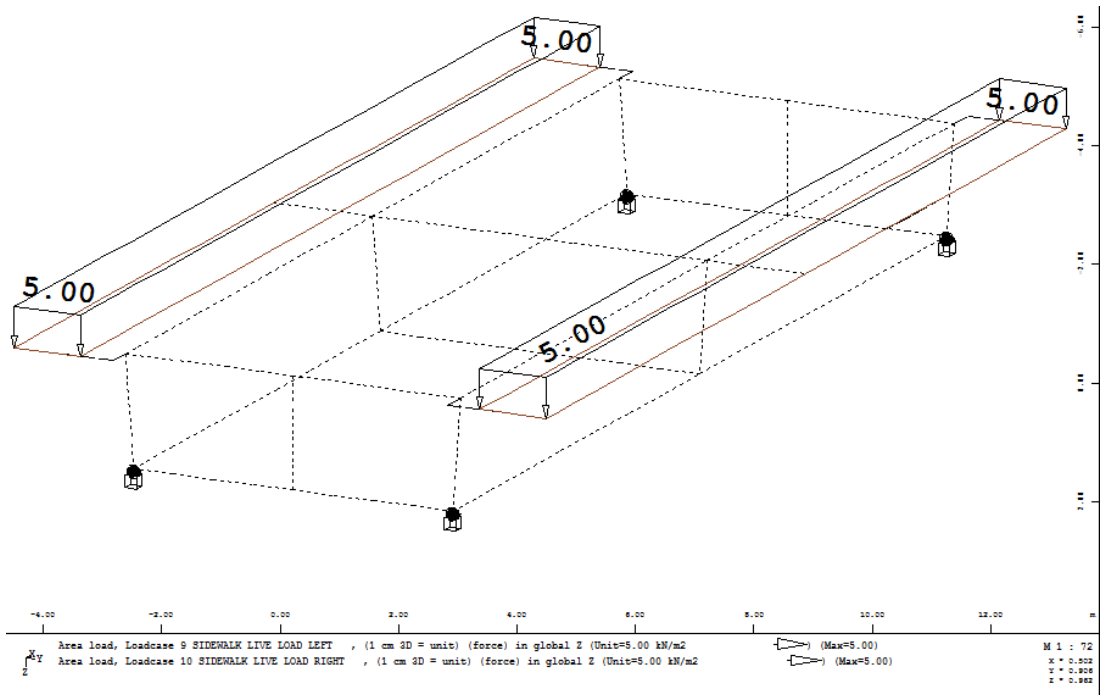
LC5 / στο μοντέλο π.σ



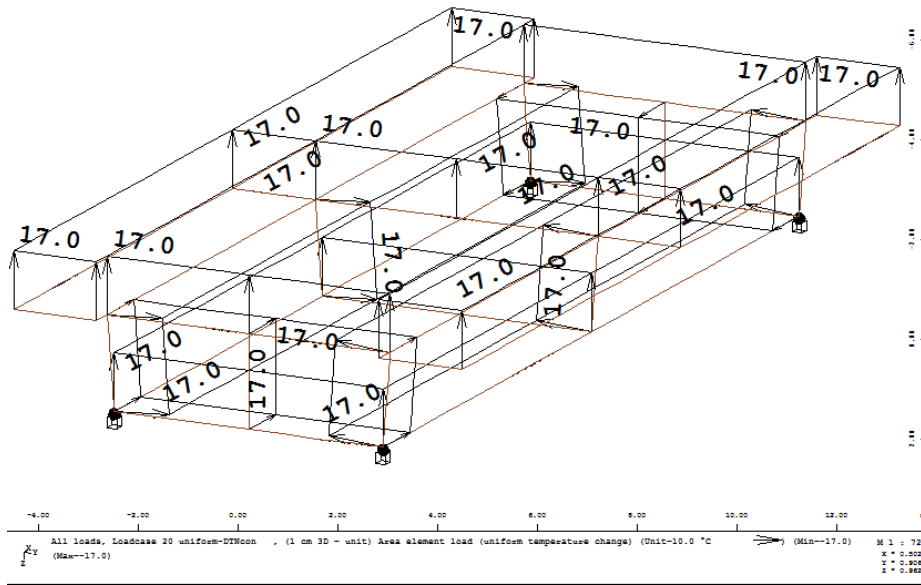
LC6 / στο μοντέλο π.σ



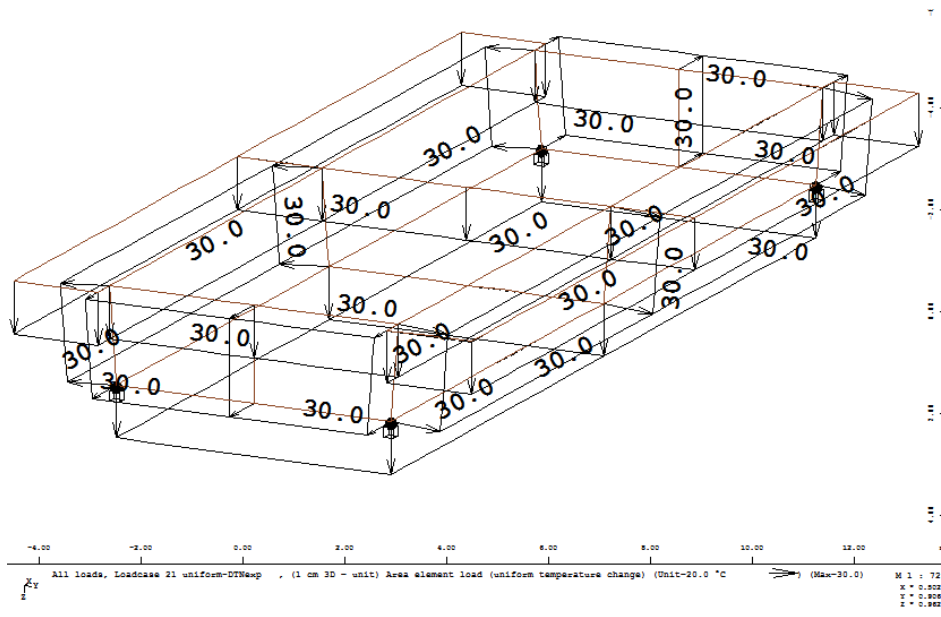
LC7 –στο μοντέλο π.σ



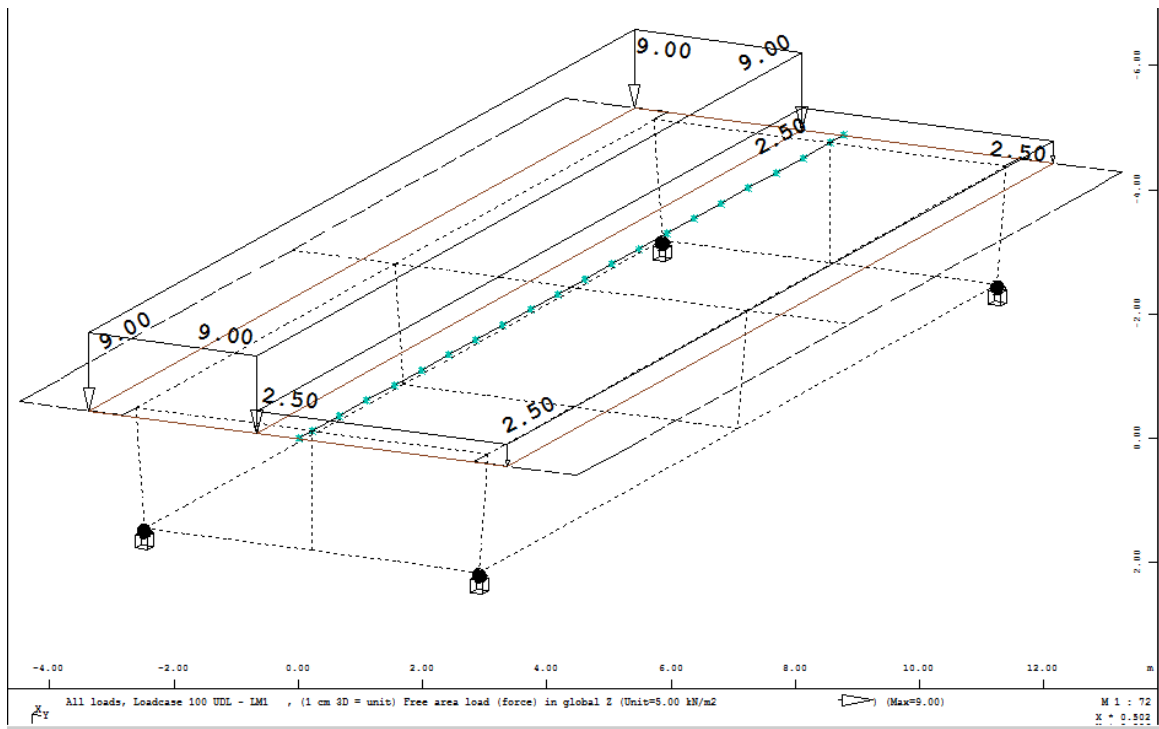
LC9 και 10 – στο μοντέλο π.σ



LC20 στο μοντέλο π.σ.

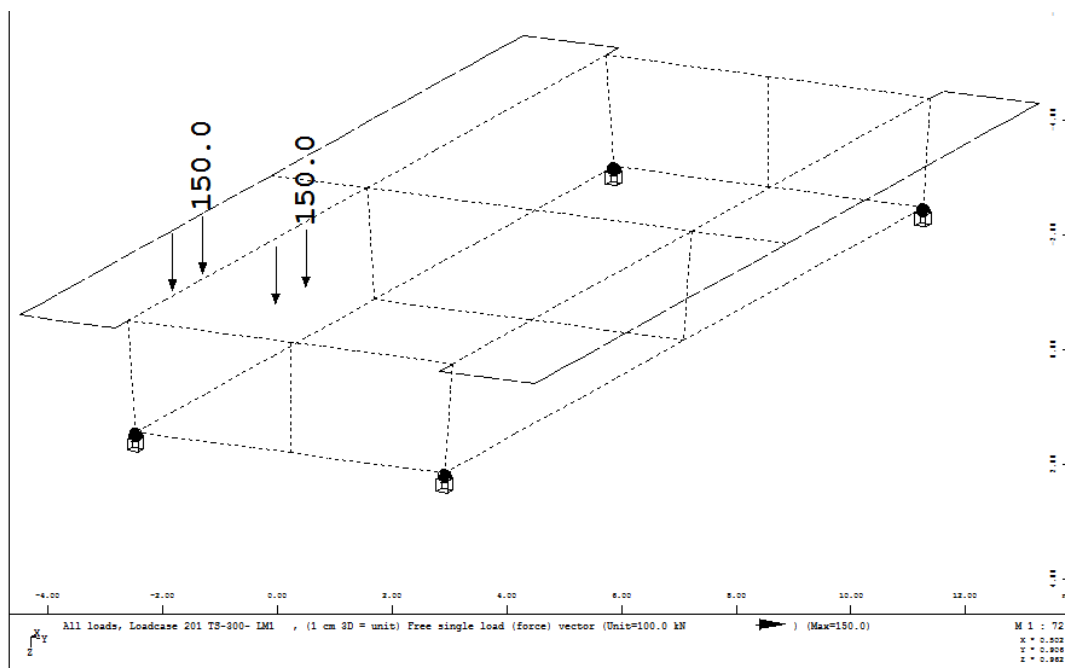


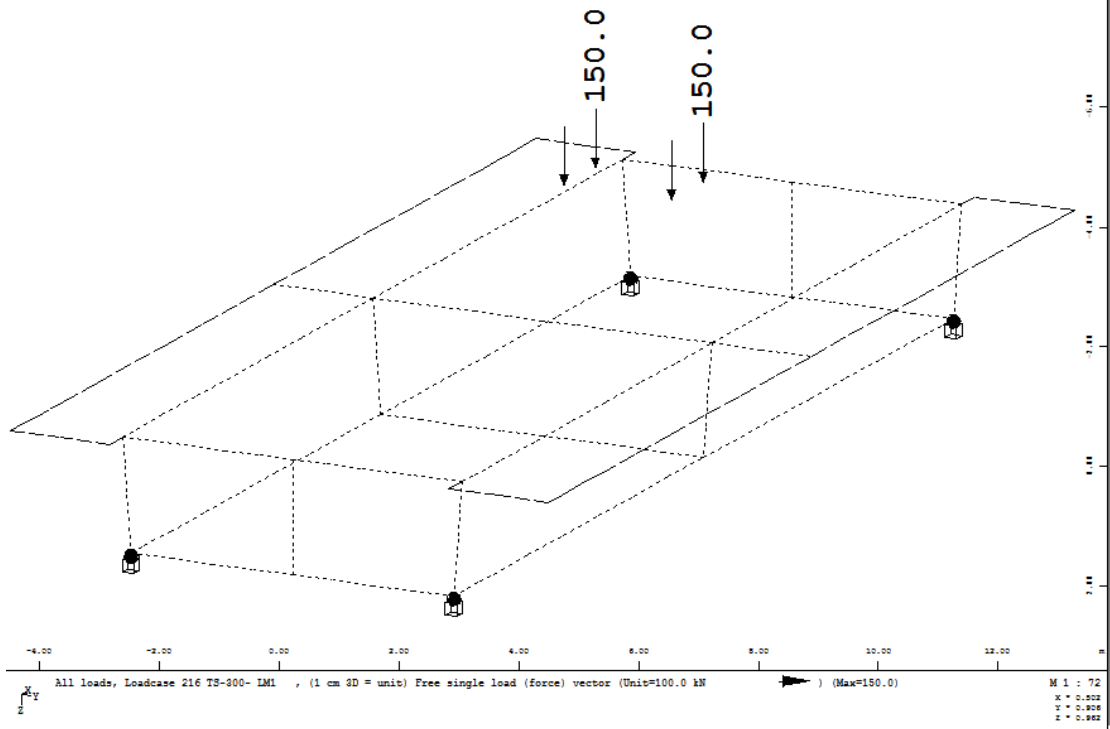
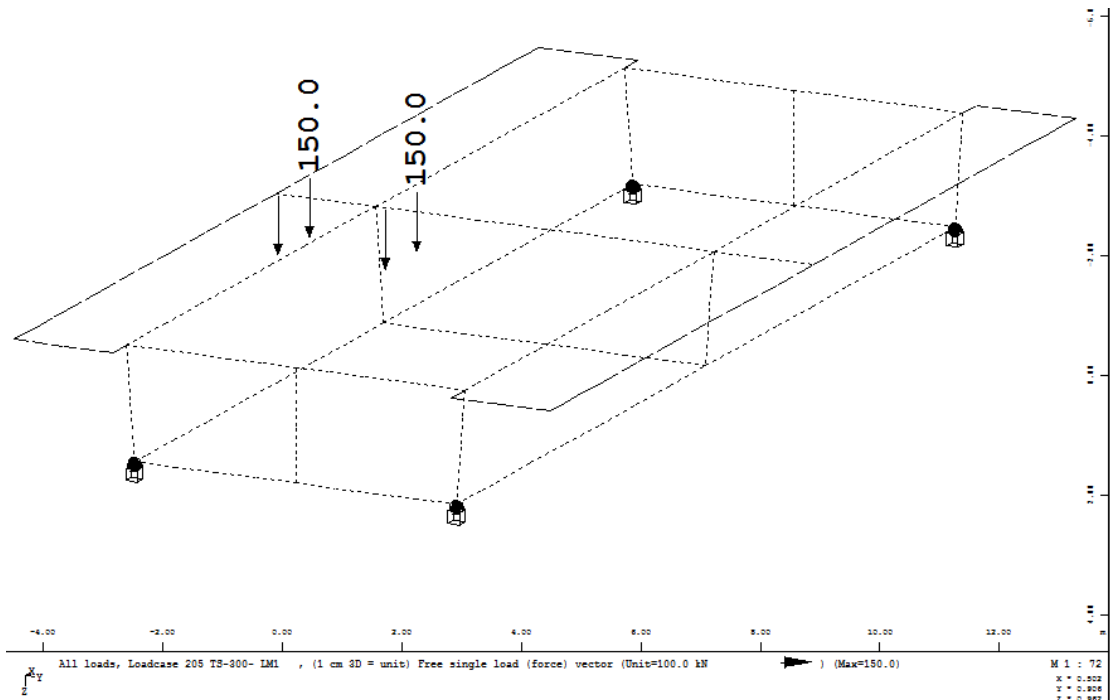
LC21 στο μοντέλο π.σ.



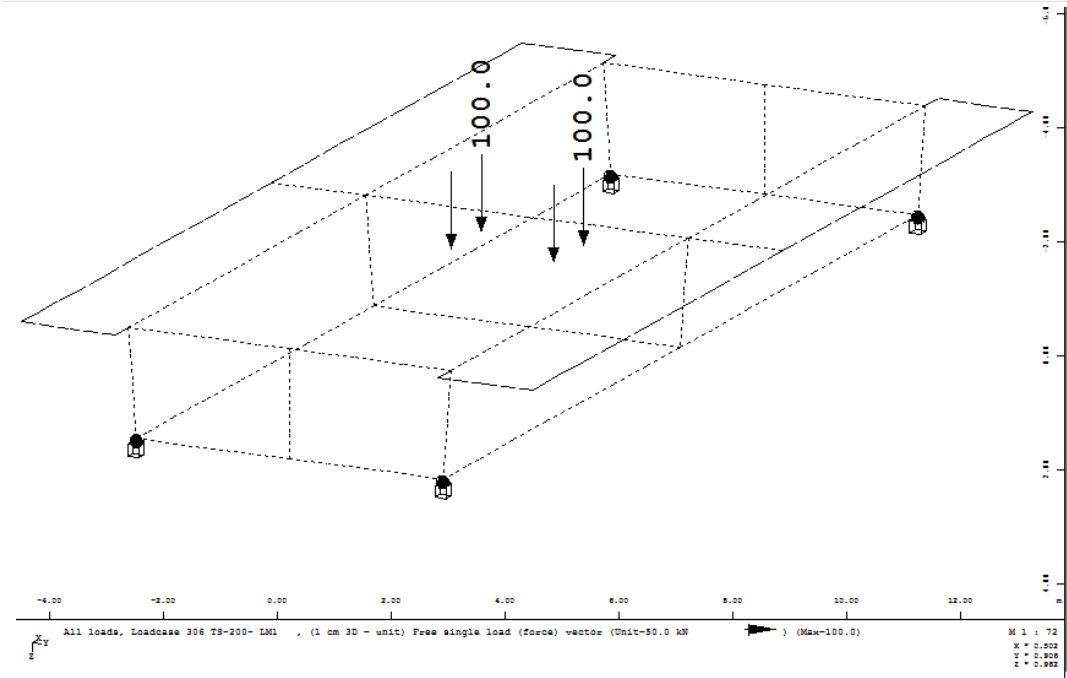
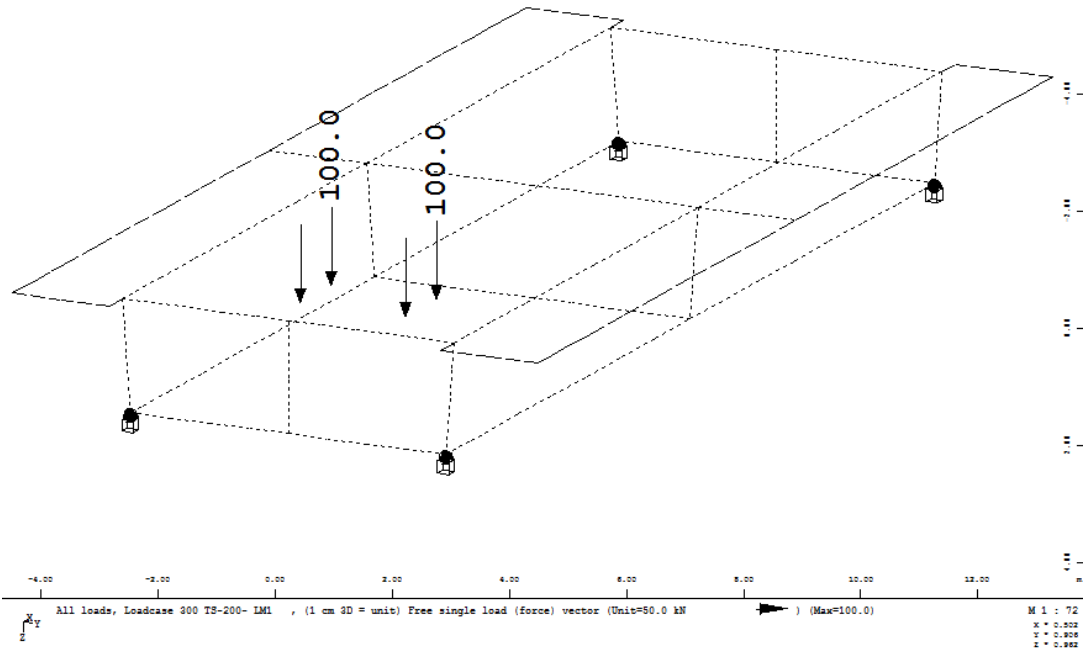
LC100 – φορτίο UDL στο μοντέλο π.σ

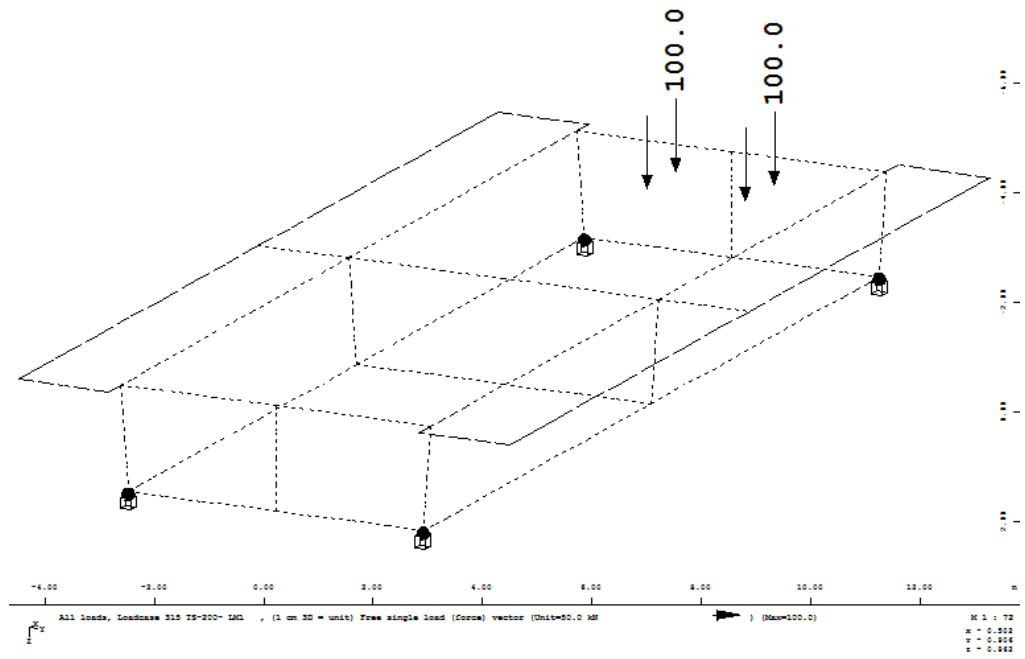
Η λωρίδα 1 φορτίζεται με 9kN/m^2 ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια με 2.5kN/m^2





LC200 – φορτίο TS της λωρίδας 1 σε διάφορες θέσεις στο μοντέλο π.σ

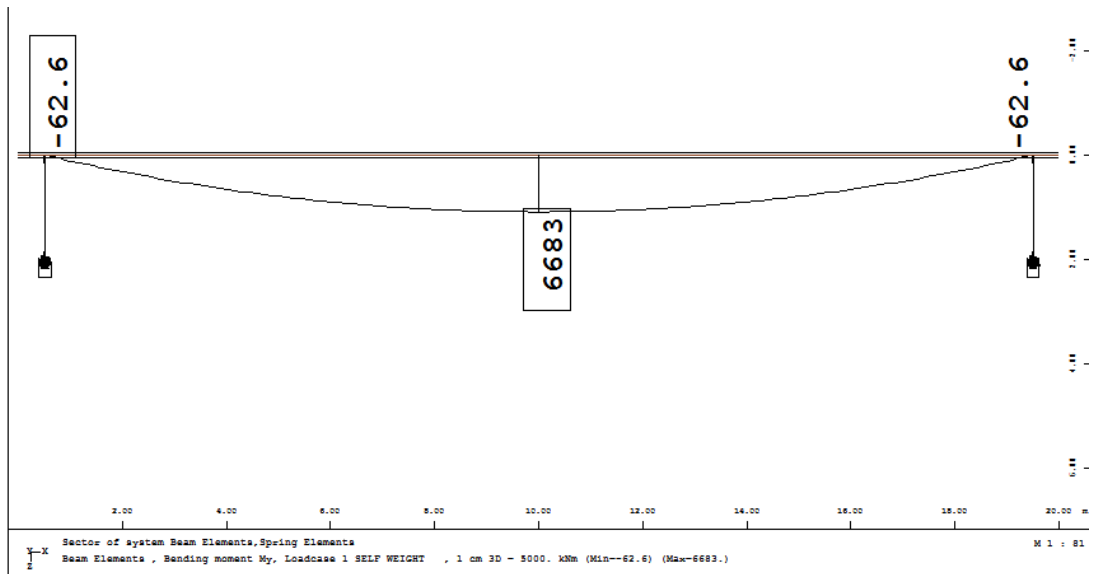




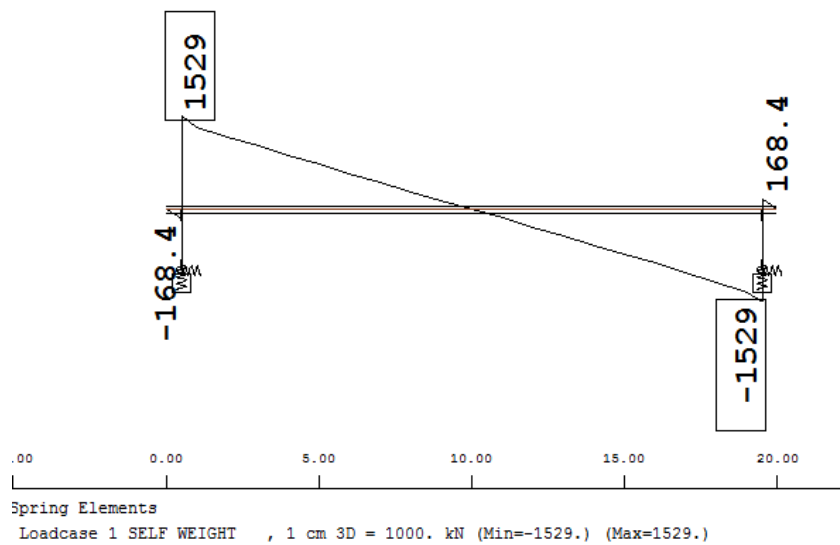
LC300 – φορτίο TS της λωρίδας 2 σε διάφορες θέσεις στο μοντέλο π.σ

6 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

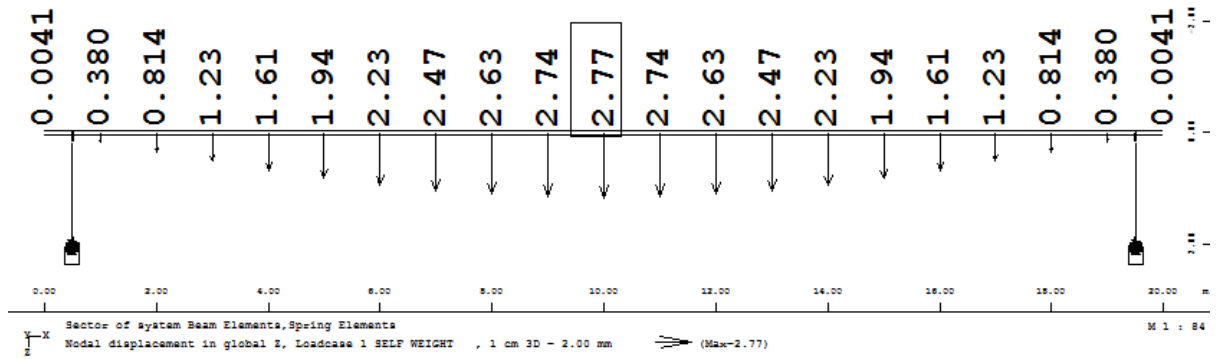
6.1 Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



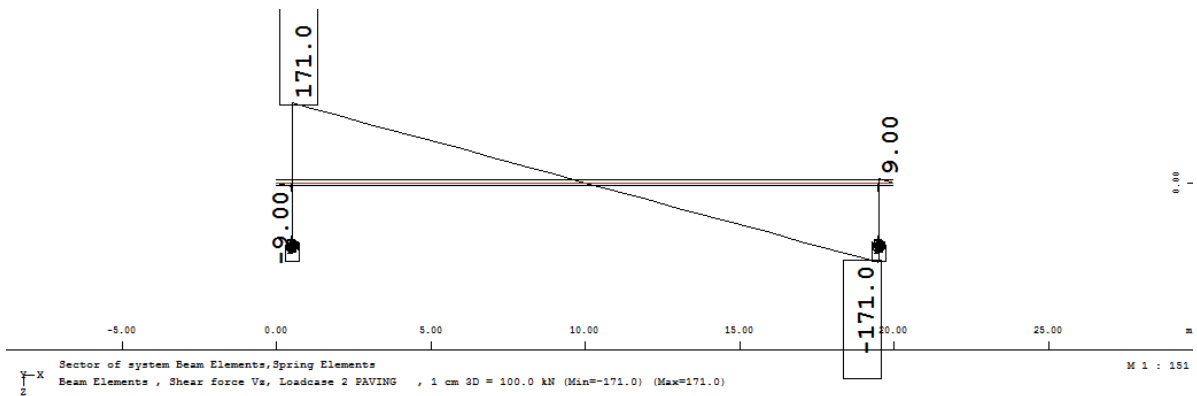
LC1 / Διάγραμμα M_y στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



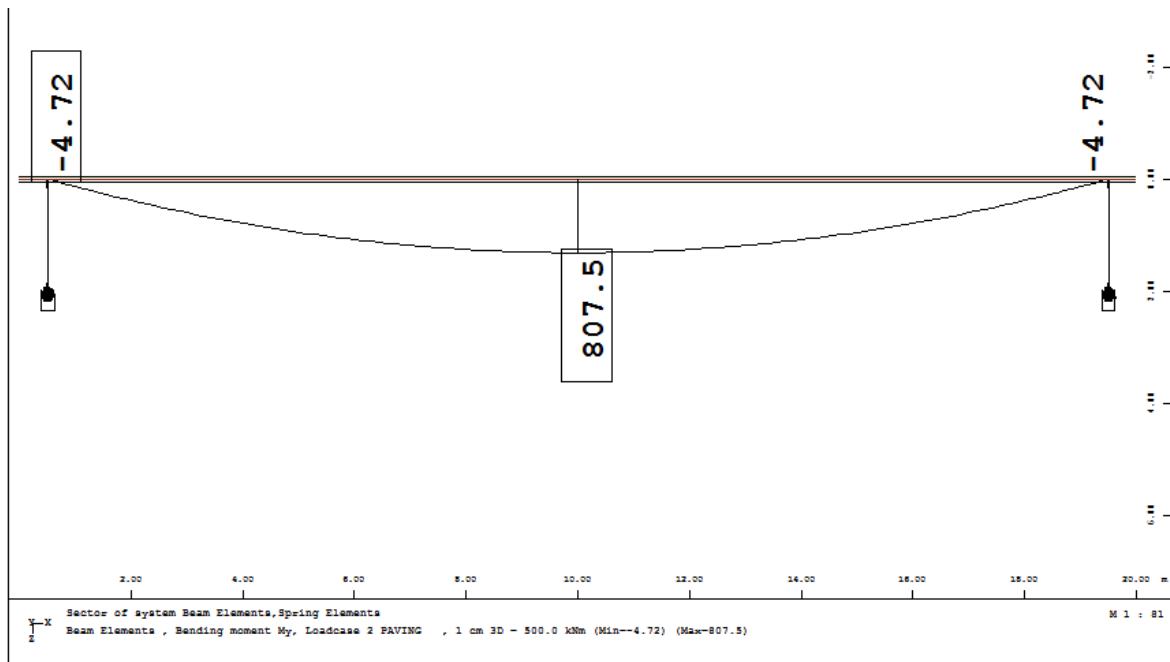
LC1 / Διάγραμμα V_z στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



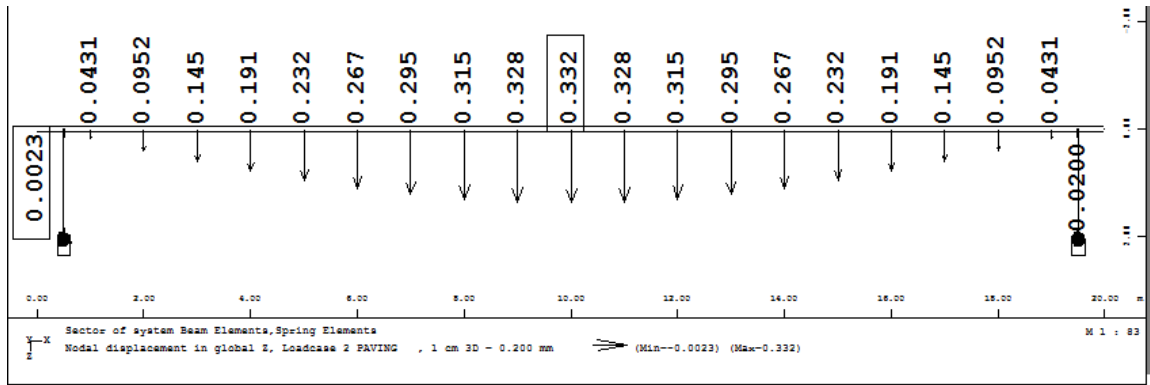
LC1 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



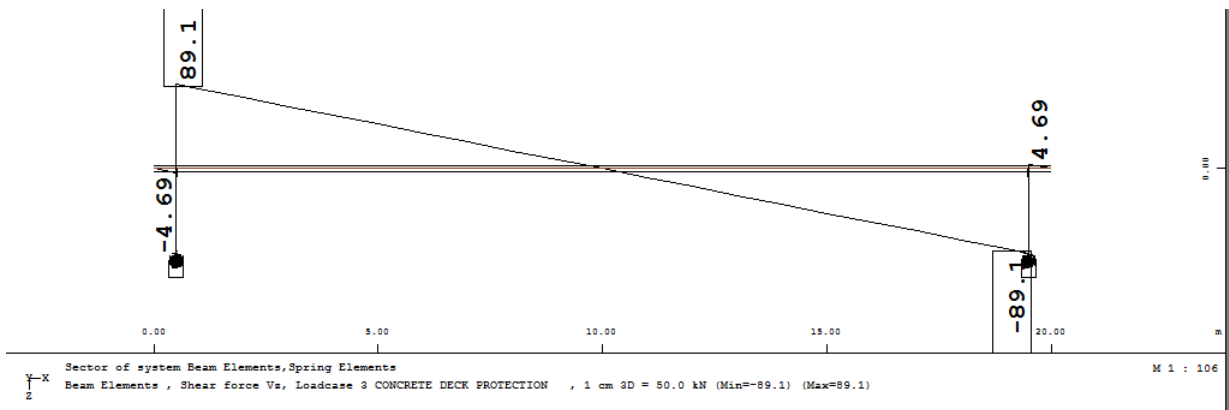
LC2 / Διάγραμμα Vz στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



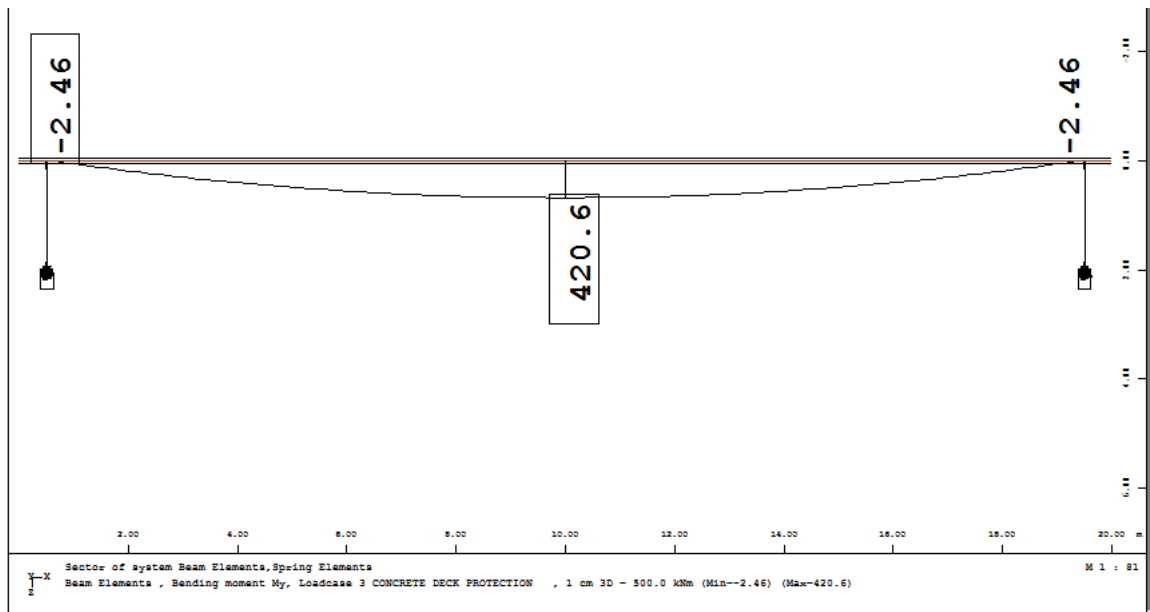
LC2 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



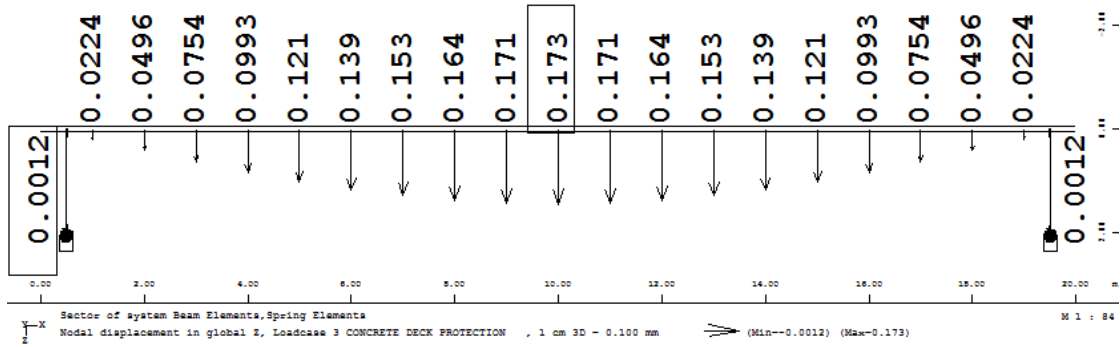
LC2 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



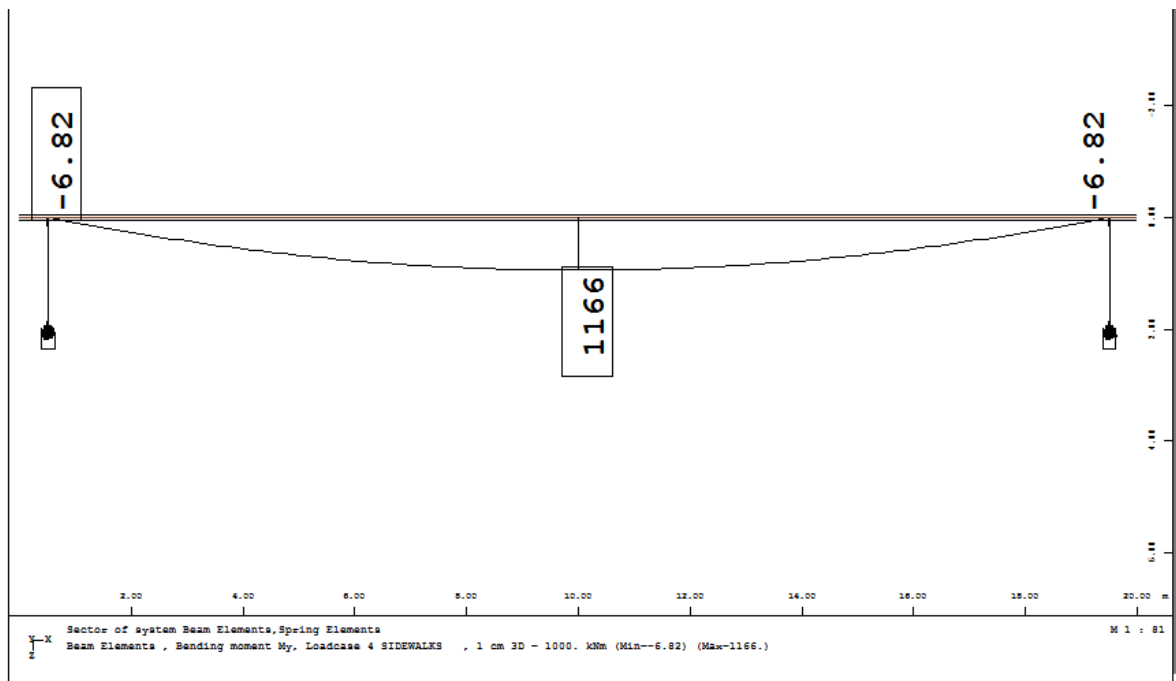
LC3 / Διάγραμμα Vz στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



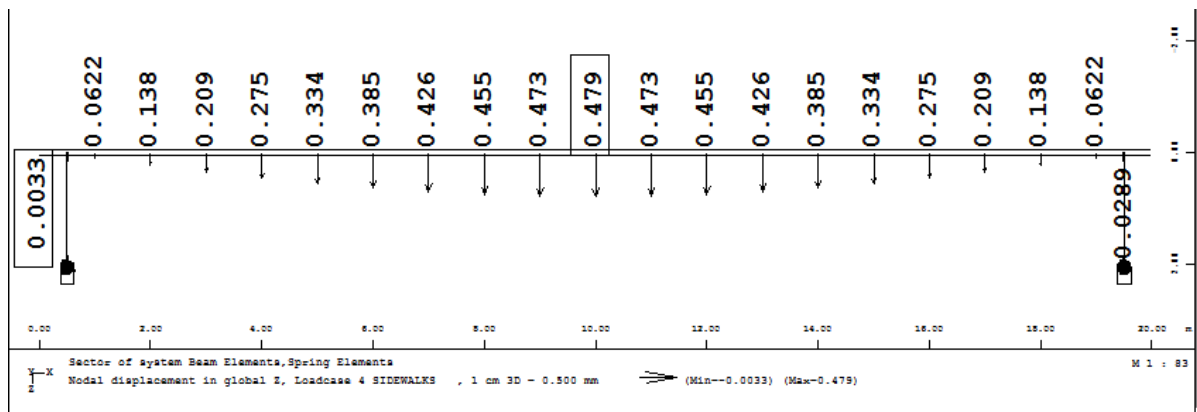
LC3 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



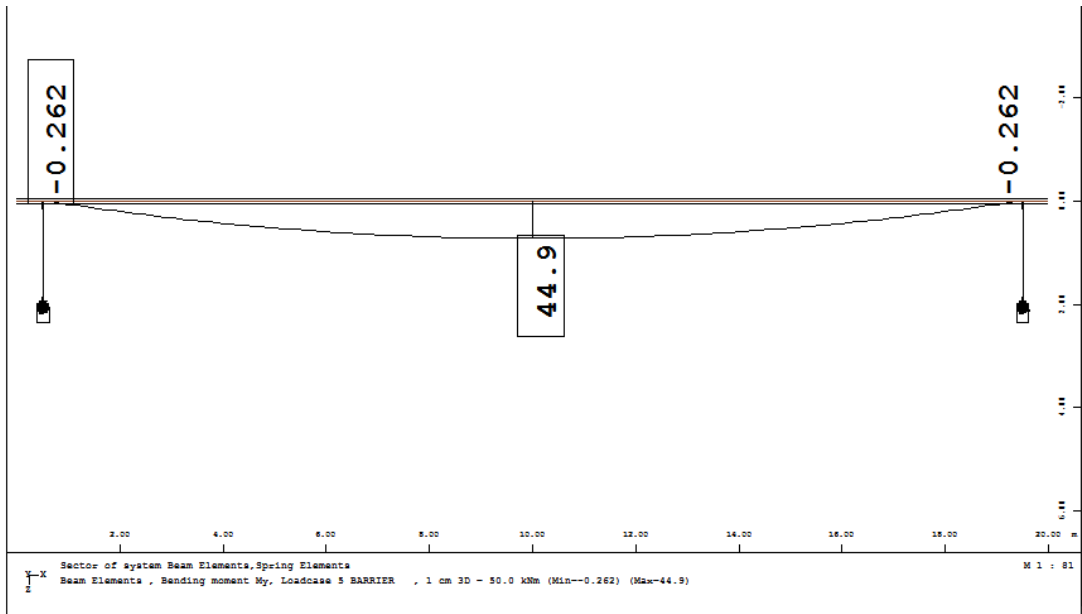
LC3 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



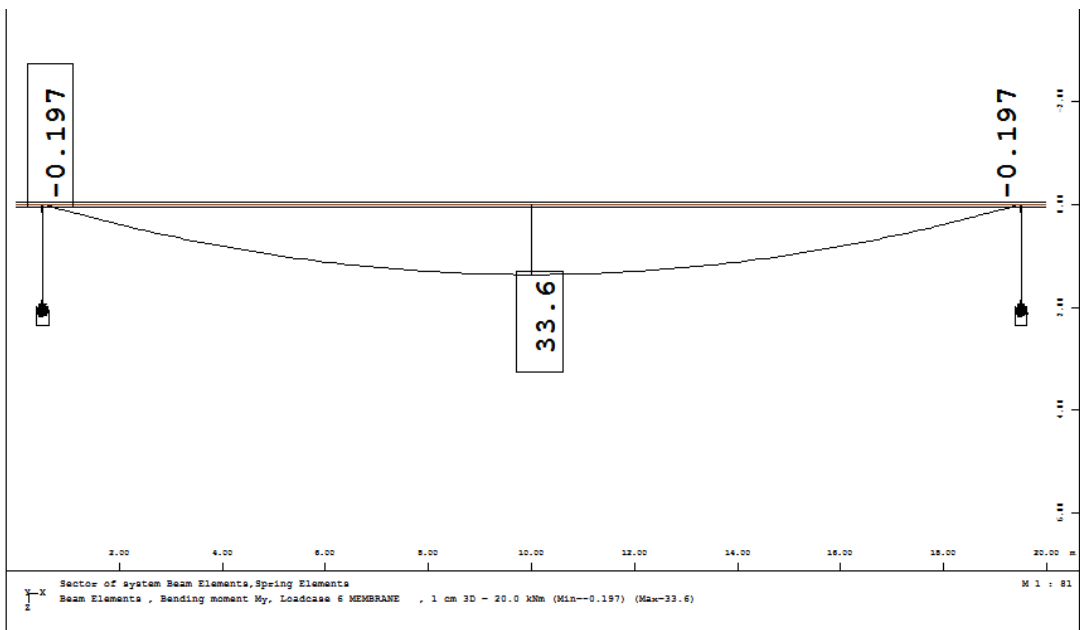
LC4 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



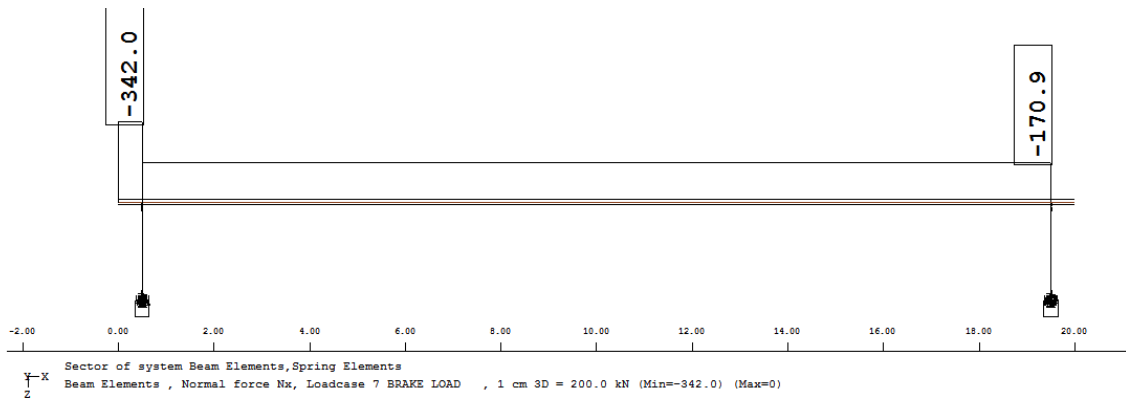
LC4 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



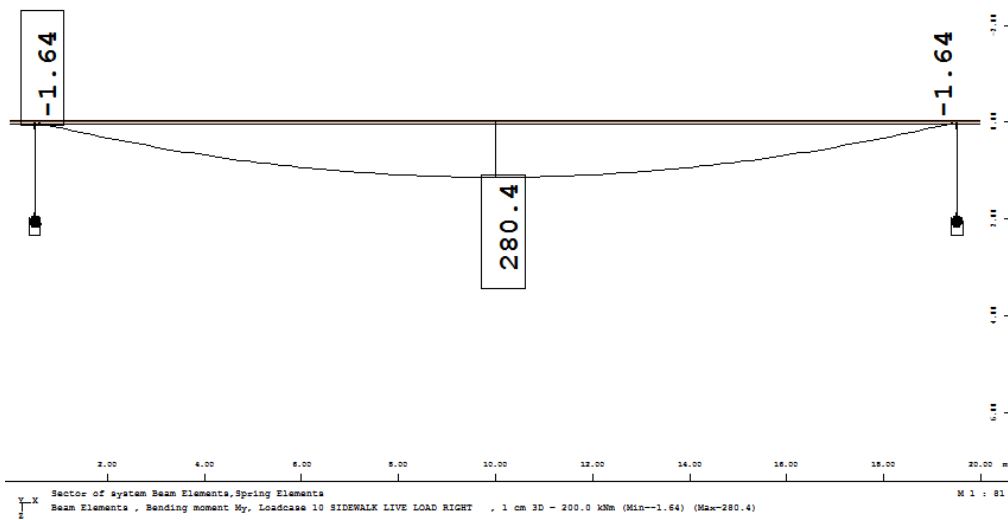
LC5 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



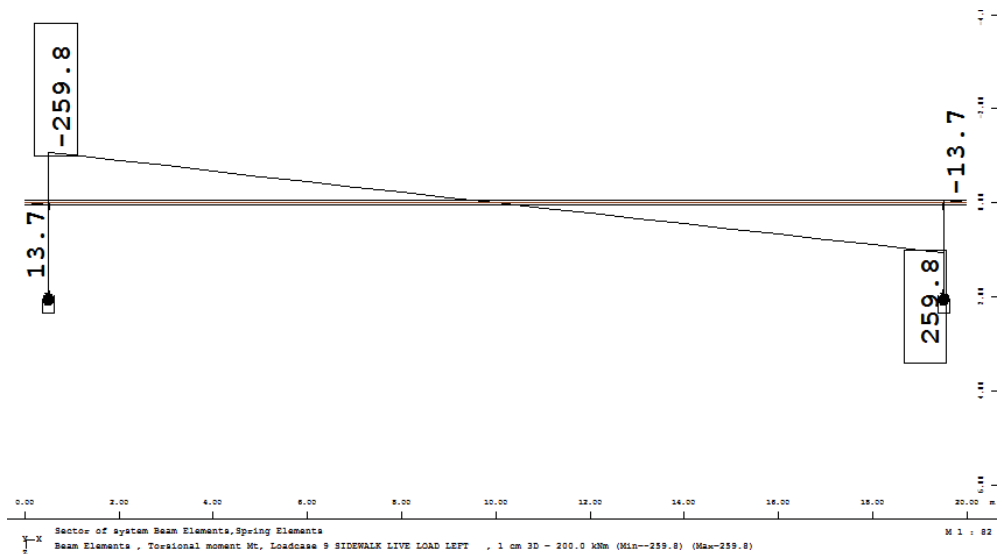
LC6 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



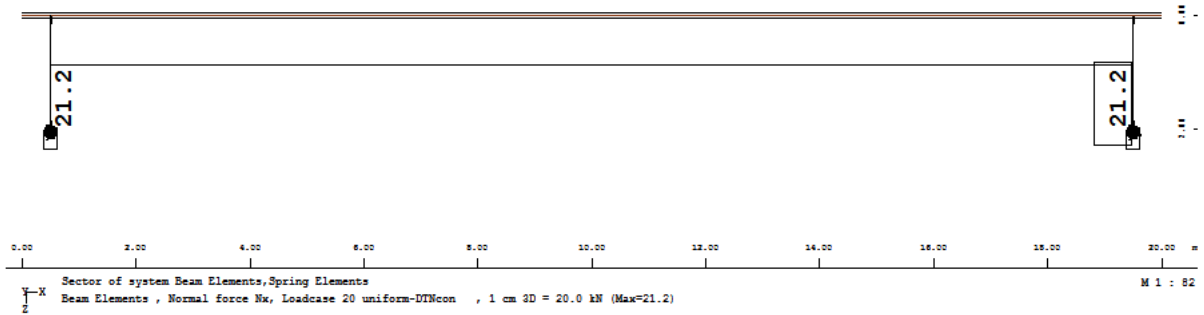
LC7 / Διάγραμμα Nx στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



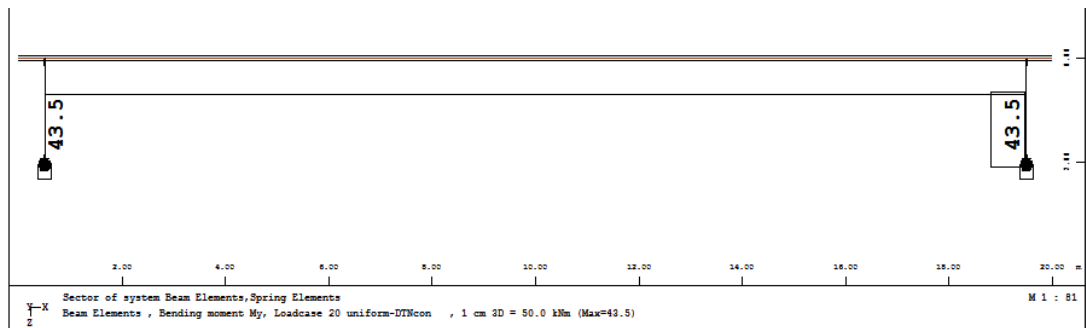
LC9 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



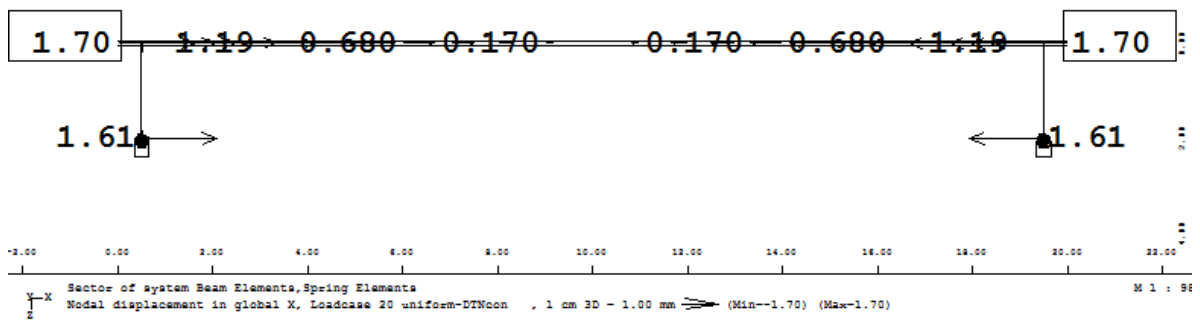
LC9 / Διάγραμμα M_t – Ροπές στρέψεως - στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



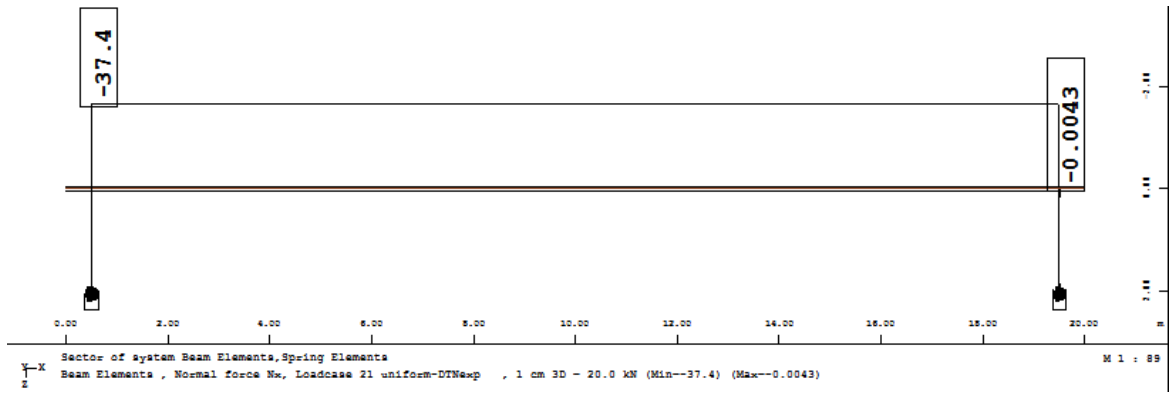
LC20 / Διάγραμμα N_x στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



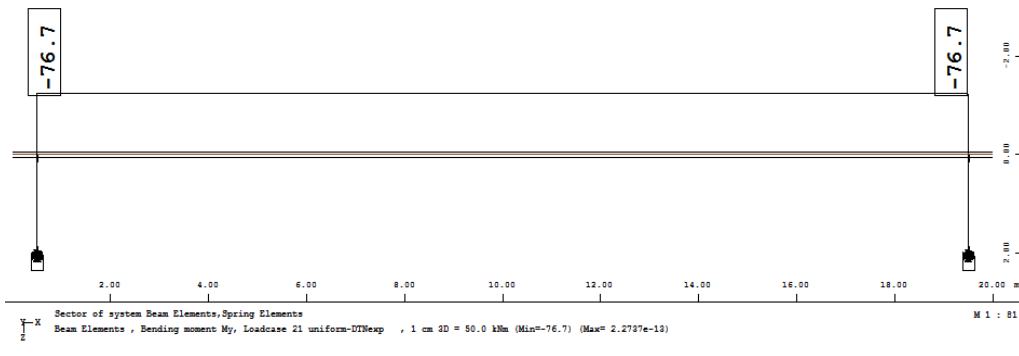
LC20 / Διάγραμμα M_y στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



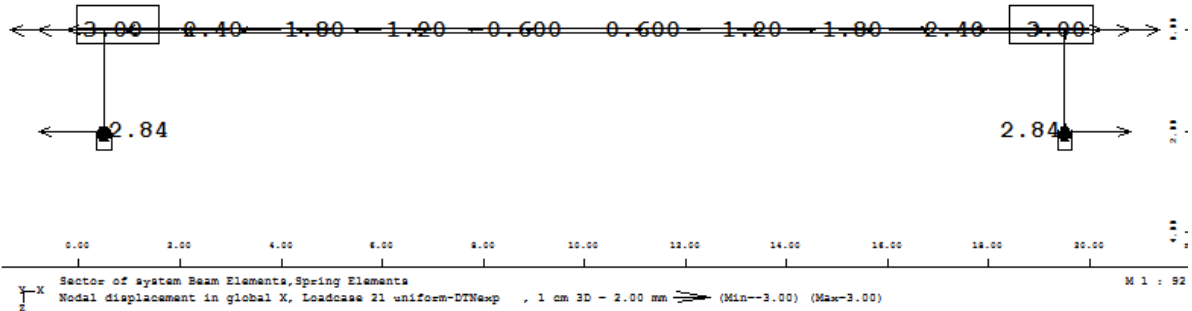
LC20 / Οριζόντιες Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



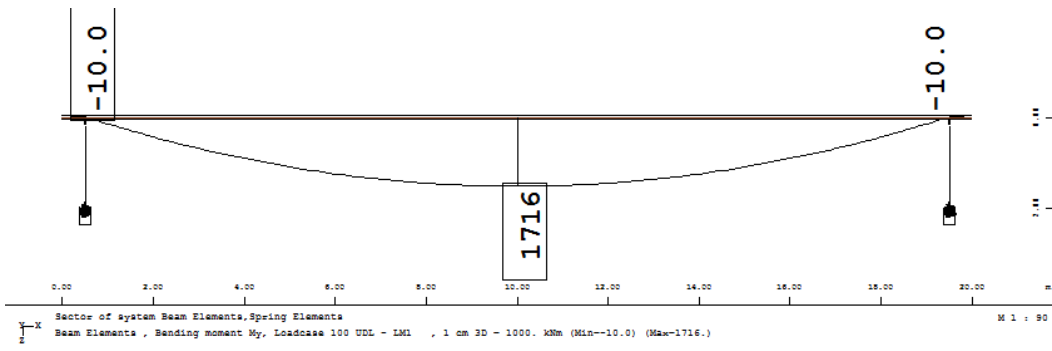
LC21 / Διάγραμμα Nx στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



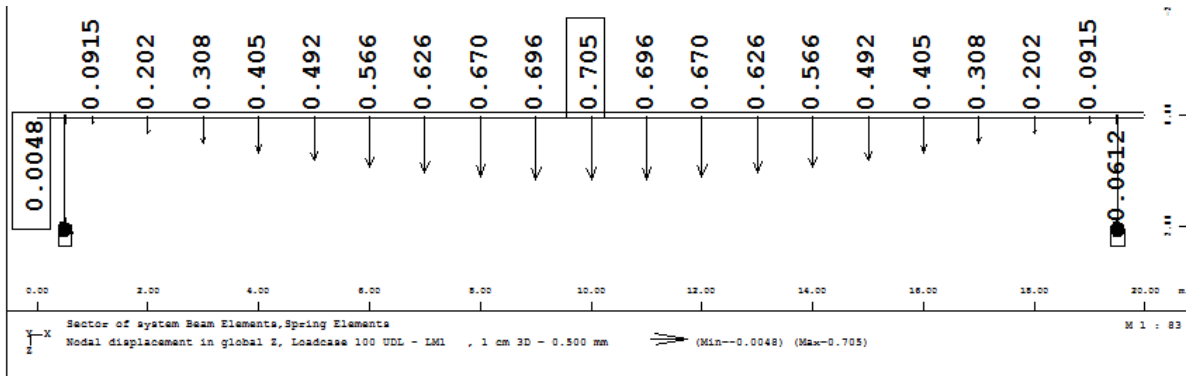
LC21 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



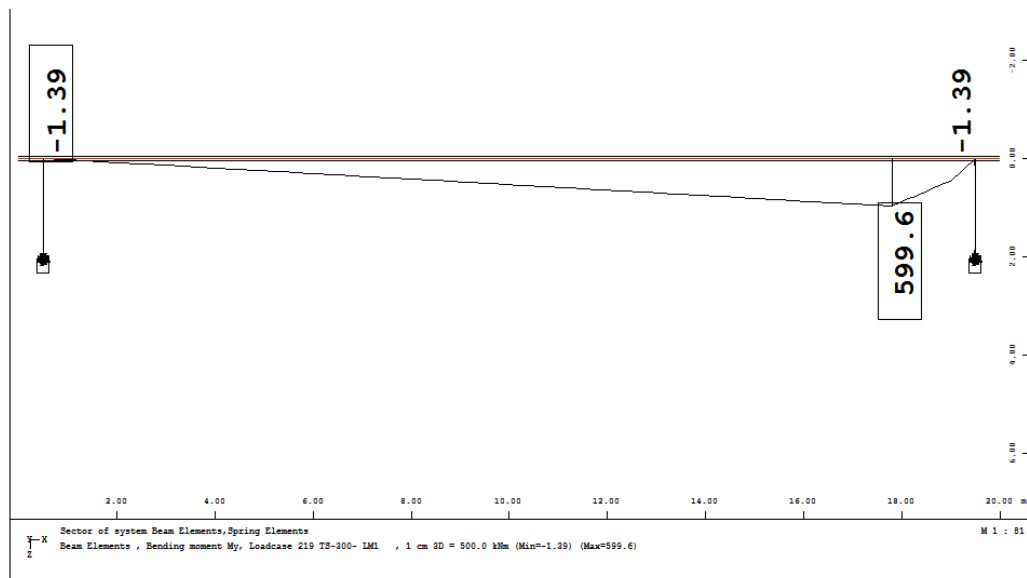
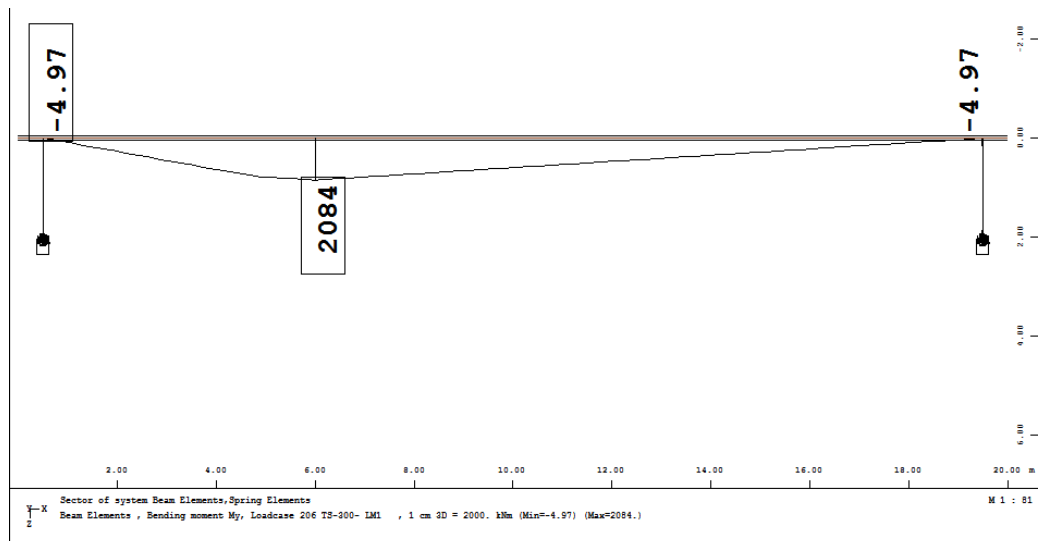
LC21 / Οριζόντιες μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



LC100 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



LC100 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

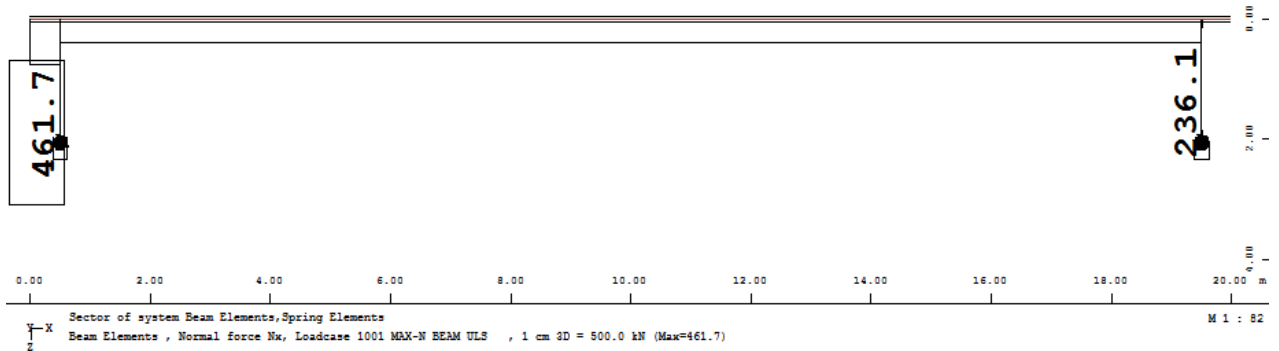


LC200 / Διαγράμματα My στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή για διάφορες θέσεις του TS

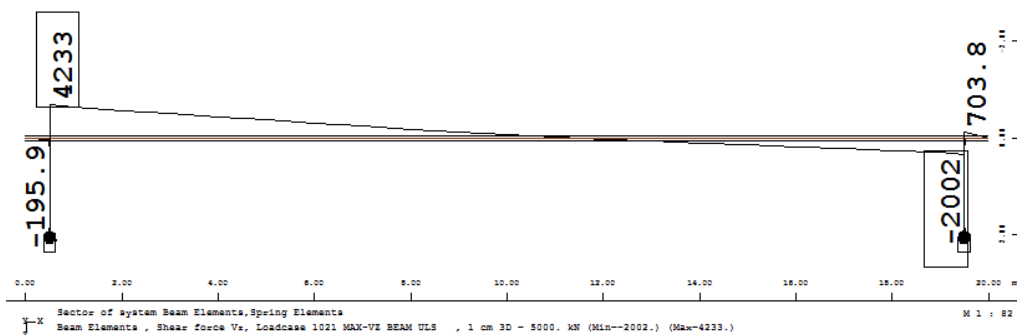
Eigenvalues

No.	LC	λ [rad2/sec2]	error [-]	ω [rad/sec]	f [Hz]	T [sec]	ξ [%]	Meff			participation			
								X[%]	Y[%]	Z[%]	X[%]	Y[%]	Z[%]	
1	9000	6.7421E+01	0.0E+00	8.211	1.307	0.765	5.000	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
2	9001	6.7436E+01	0.0E+00	8.212	1.307	0.765	5.000	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
3	9002	1.4618E+02	0.0E+00	12.090	1.924	0.520	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	9003	3.9104E+03	0.0E+00	62.533	9.953	0.100	5.000	0.0	0.0	71.2	0.0	0.0	0.0	71.2
5	9004	2.0545E+04	0.0E+00	143.336	22.813	0.044	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	9005	3.7118E+04	0.0E+00	192.659	30.663	0.033	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	9006	7.9262E+04	0.0E+00	281.535	44.808	0.022	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	9007	8.8401E+04	0.0E+00	297.324	47.321	0.021	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	9008	1.0138E+05	0.0E+00	318.409	50.676	0.020	5.000	0.0	0.0	20.9	0.0	0.0	0.0	20.9
10	9009	1.6971E+05	0.0E+00	411.955	65.565	0.015	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	9010	1.7650E+05	0.0E+00	420.123	66.865	0.015	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	9011	2.3141E+05	0.0E+00	481.049	76.561	0.013	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	9012	2.5285E+05	0.0E+00	502.845	80.030	0.012	5.000	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	7.5
14	9013	2.8999E+05	0.0E+00	538.506	85.706	0.012	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	9014	3.2457E+05	0.0E+00	569.708	90.672	0.011	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	9015	3.9465E+05	2.1E-13	628.210	99.983	0.010	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	9016	4.8671E+05	4.8E-12	697.644	111.034	0.009	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	9017	6.1735E+05	1.4E-06	785.715	125.050	0.008	5.000	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
19	9018	6.3601E+05	2.0E-08	797.501	126.926	0.008	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	9019	6.7982E+05	5.1E-07	824.514	131.225	0.008	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21		7.2231E+05	8.1E-07	849.888	135.264	0.007	Σ (%) ¹	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

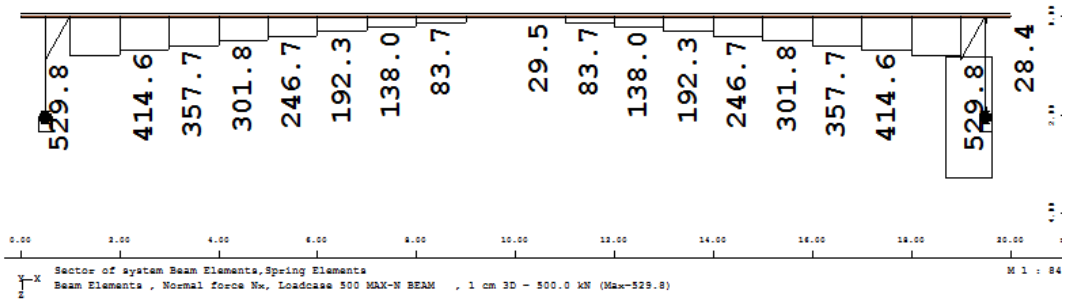
Πίνακας με Ιδιομορφές στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



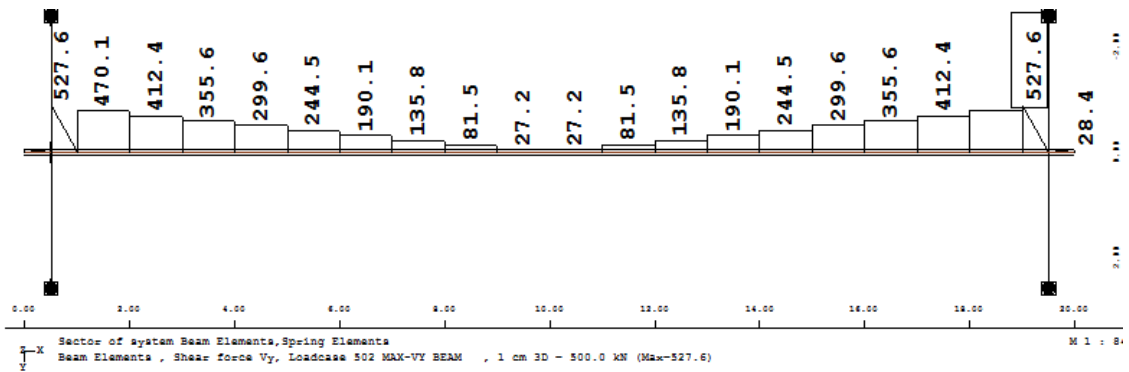
Περιβάλλουσα Αξονικής για την ΟΚΑ στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



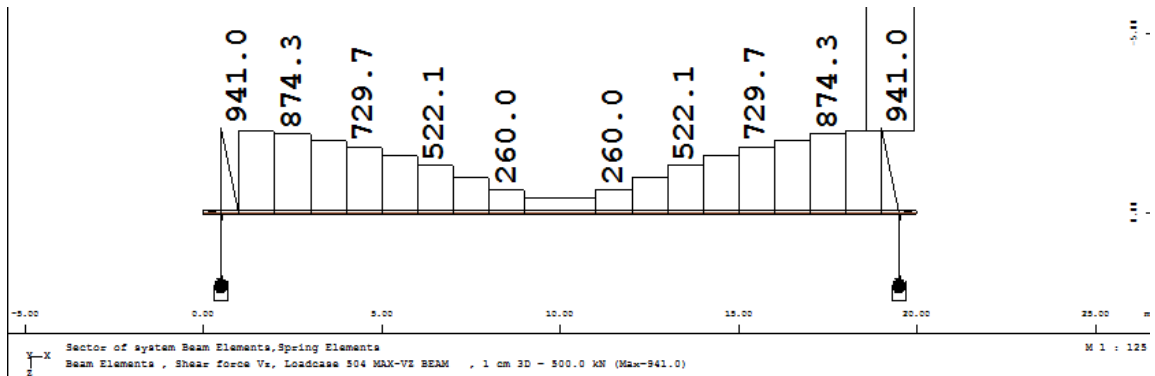
Περιβάλλουσα Τέμνουσας για την ΟΚΑ στην διεύθυνση Z στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



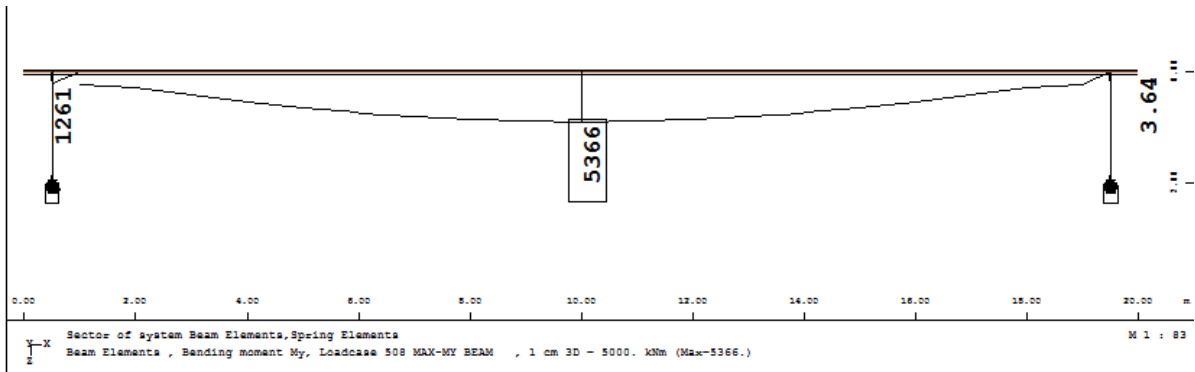
Περιβάλλουσα Αξονικής για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



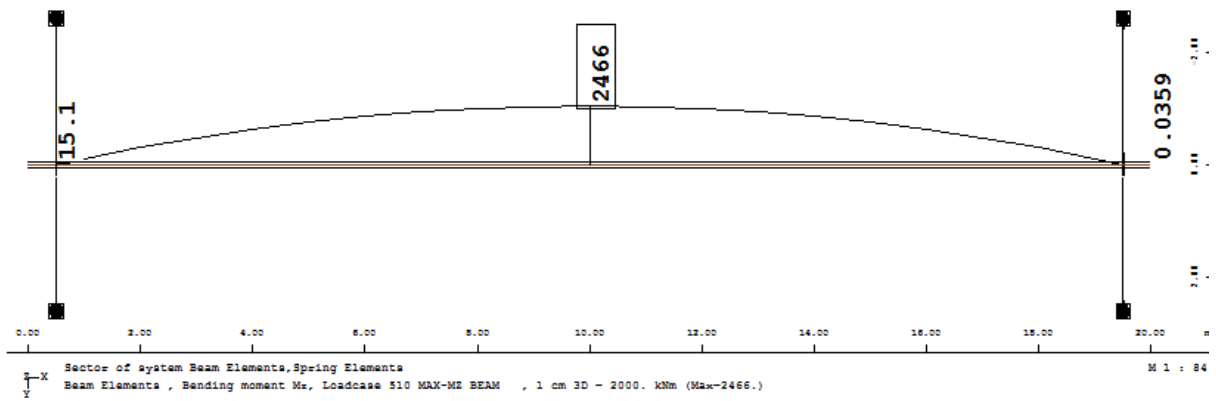
Περιβάλλουσα Τέμνουσας V_y για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή



Περιβάλλουσα Τέμνουσας V_z για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

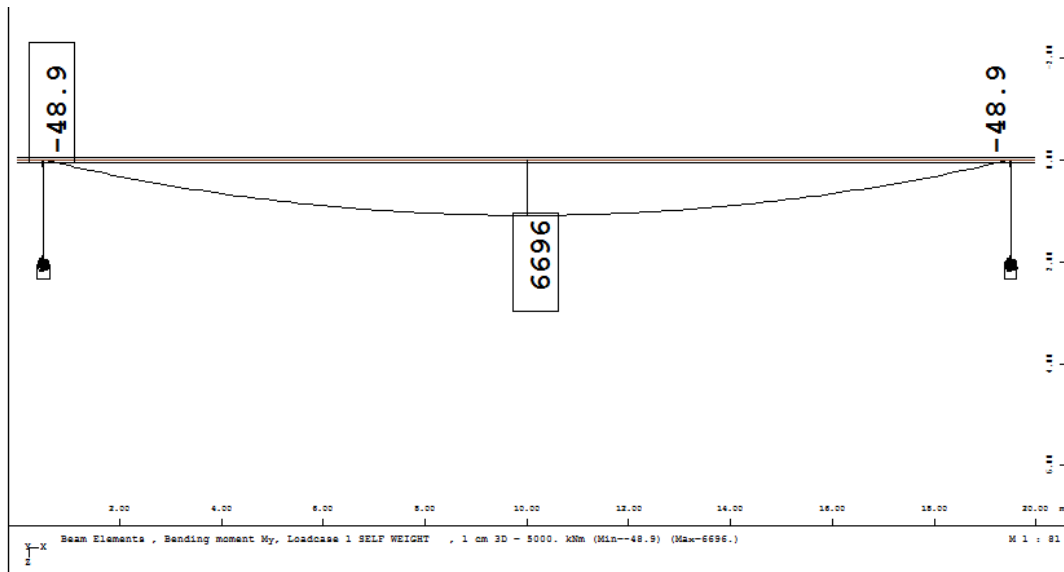


Περιβάλλουσα Ροπής κάμψης M_y για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

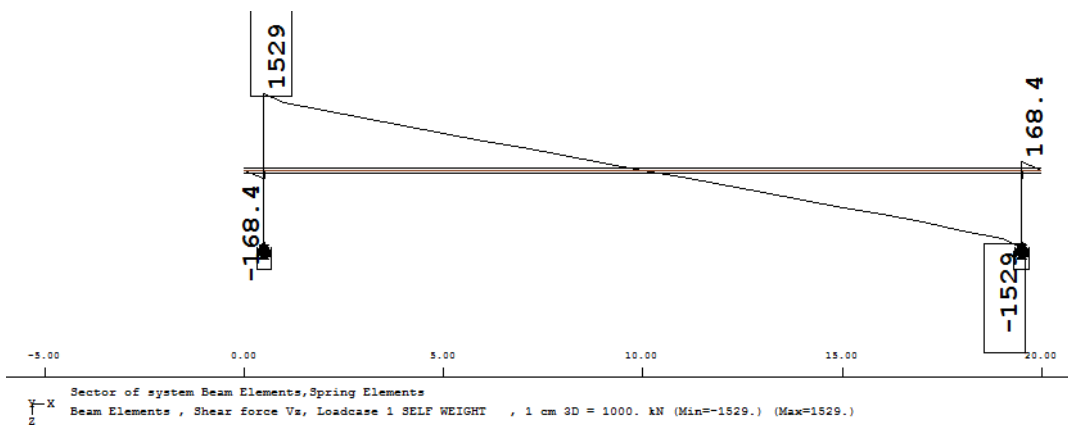


Περιβάλλουσα Ροπής κάμψης M_z για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή

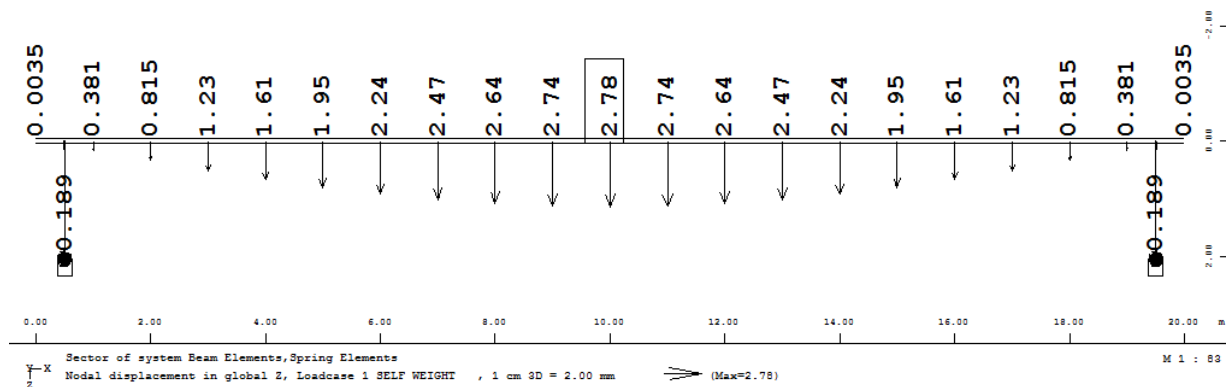
6.2 Ραβδωτό μοντέλο με διατομή



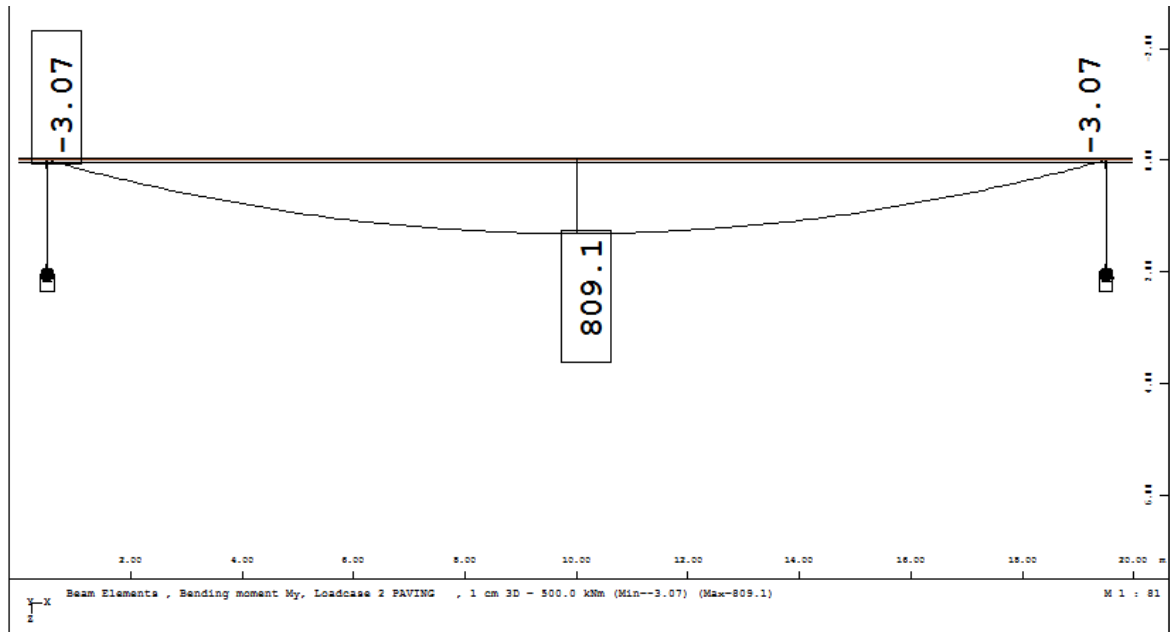
LC1 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



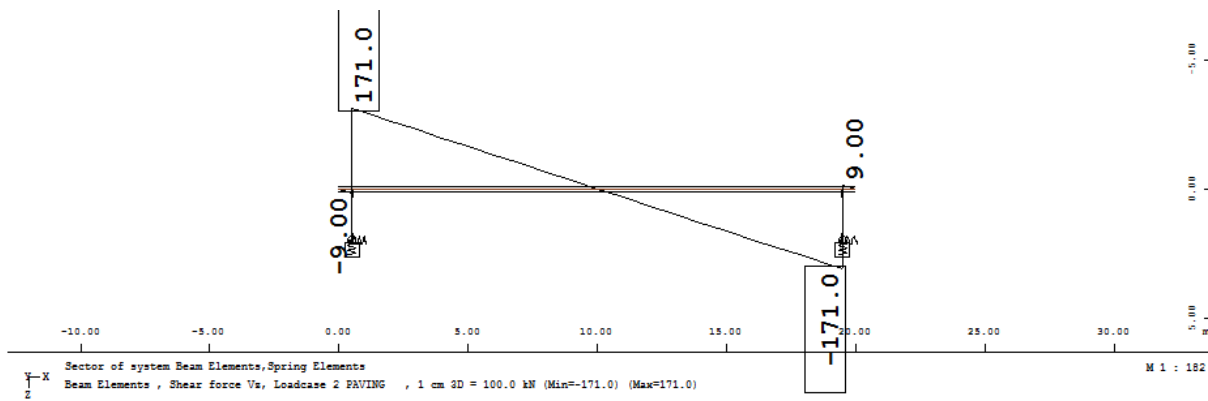
LC1 / Διάγραμμα Vz στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



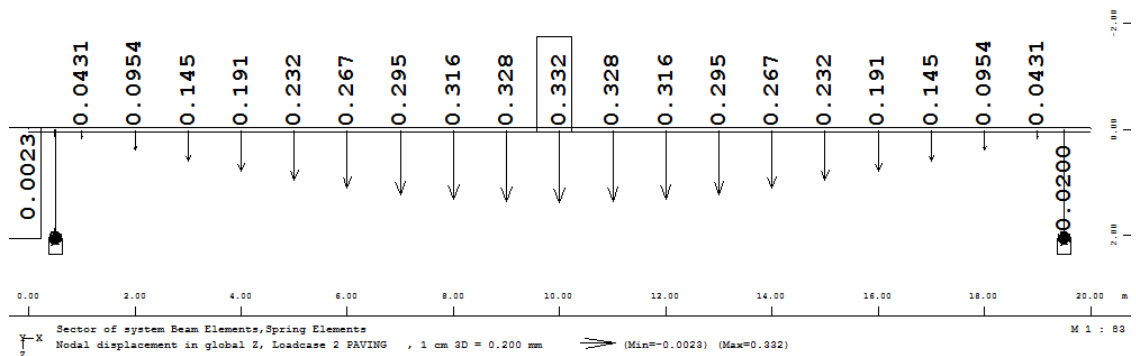
LC1 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



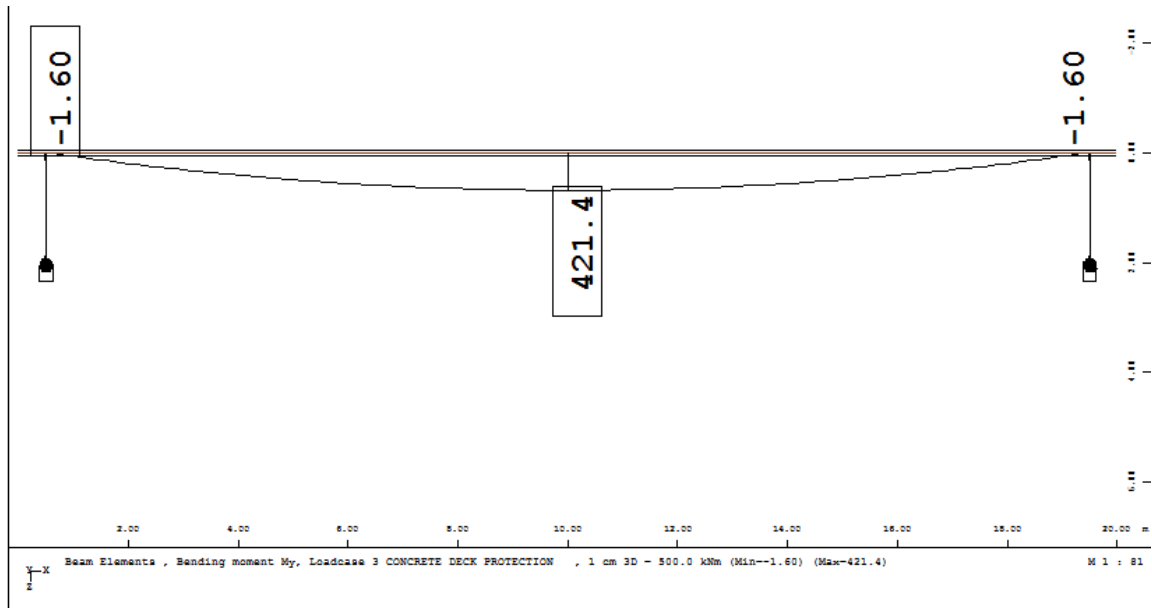
LC2 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



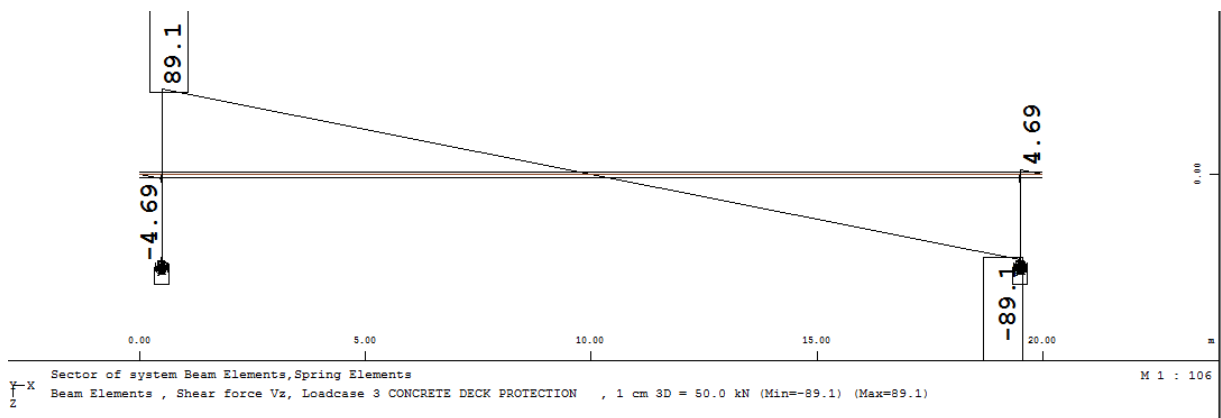
LC2 / Διάγραμμα Vz στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



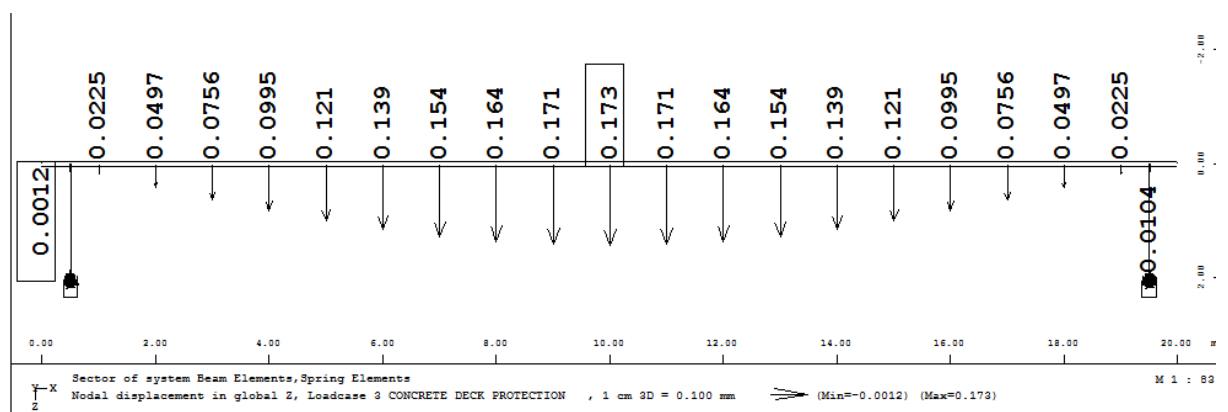
LC2 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



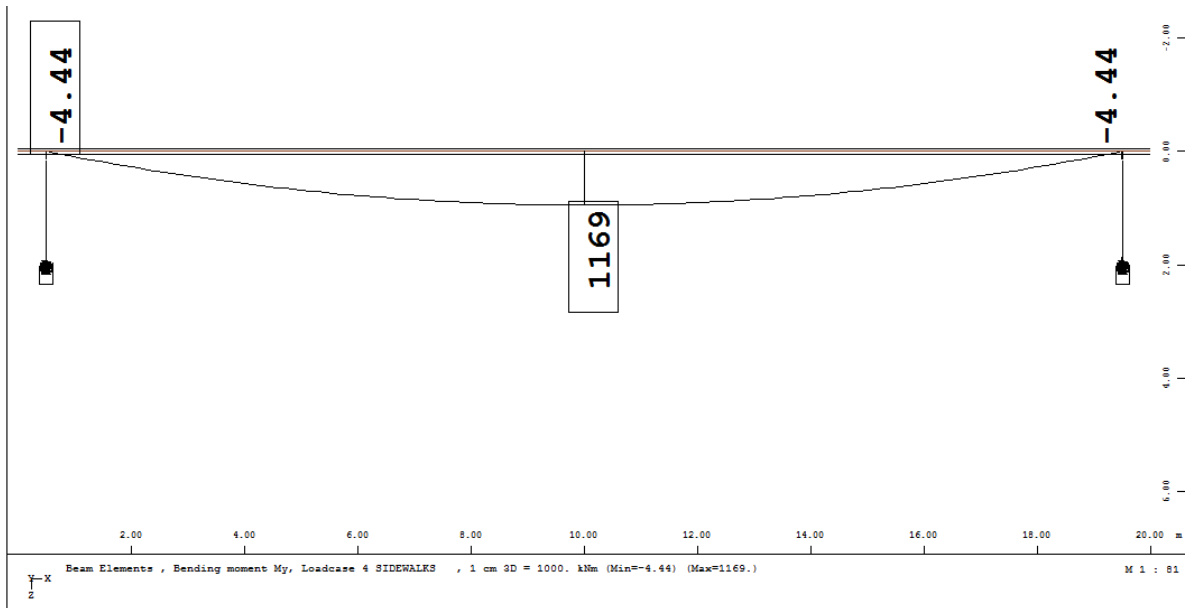
LC3 / Διάγραμμα M_γ στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



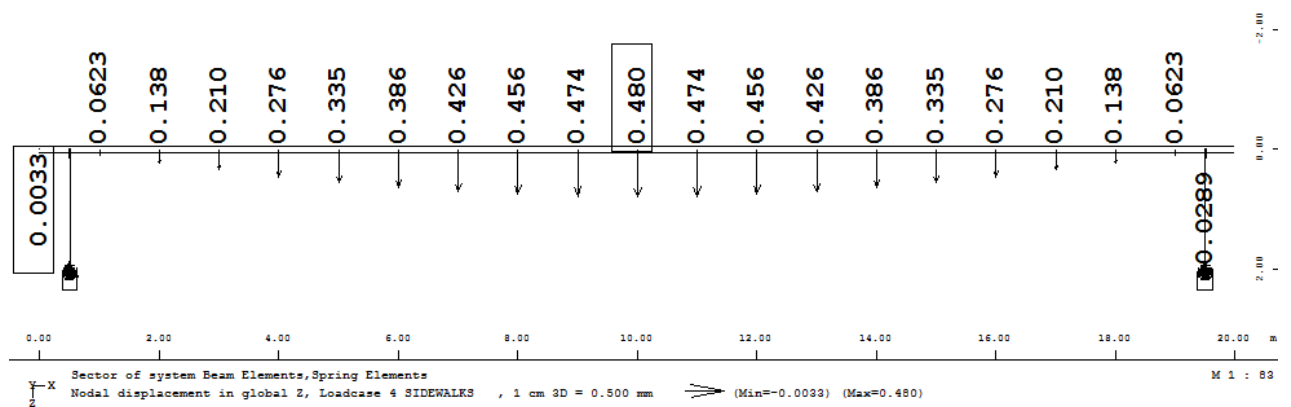
LC3 / Διάγραμμα V_z στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



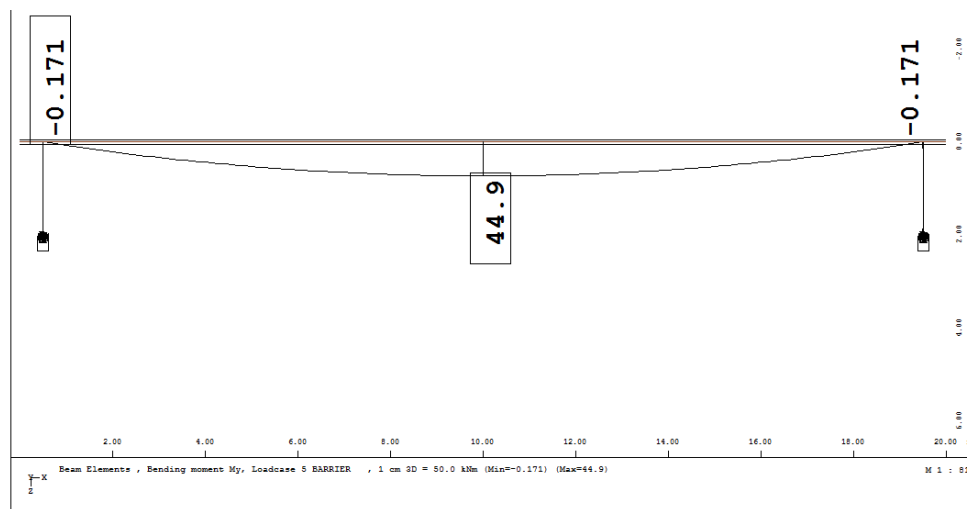
LC3 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



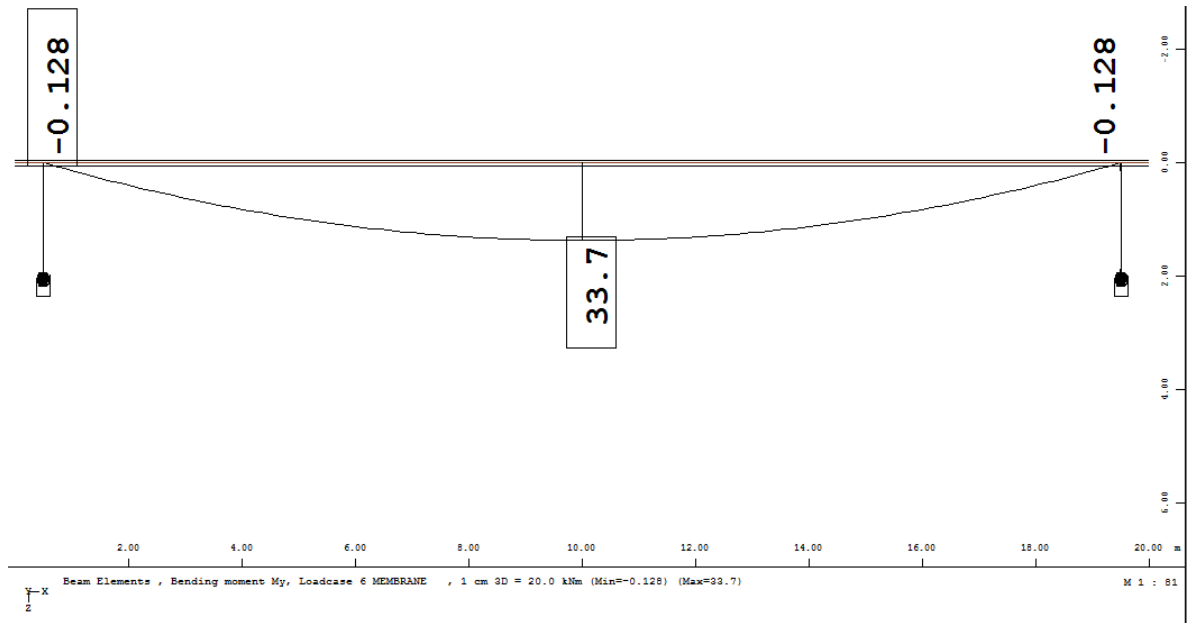
LC4 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



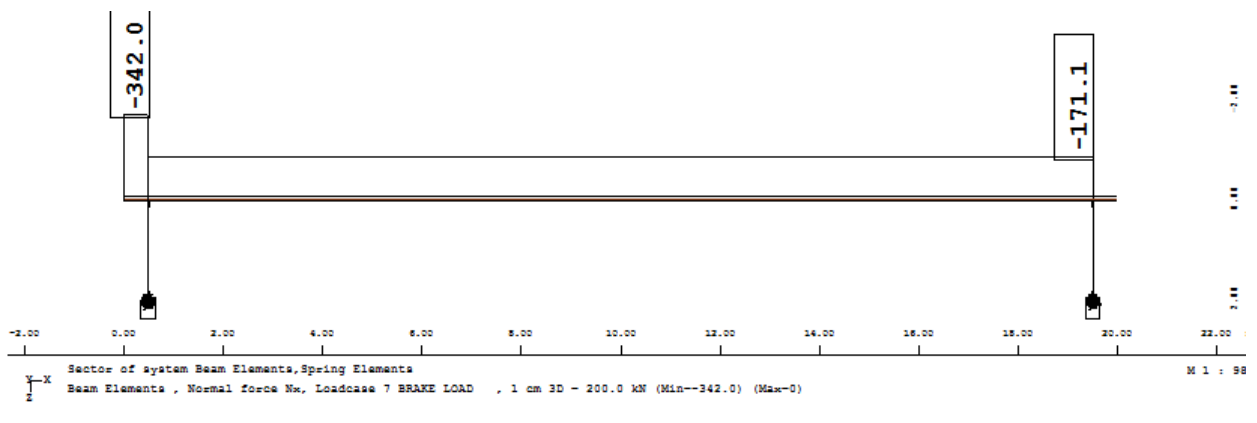
LC4 / Μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



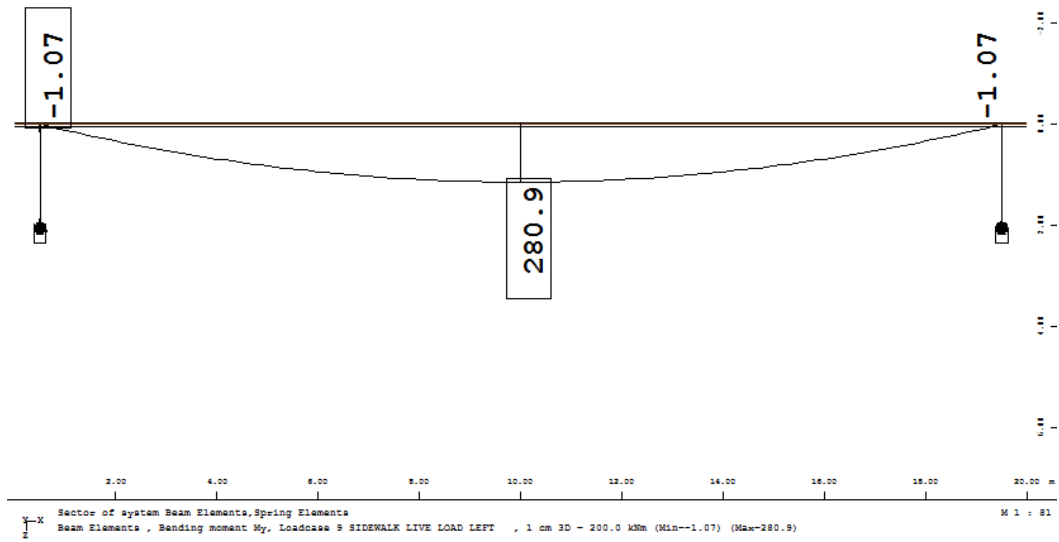
LC5 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



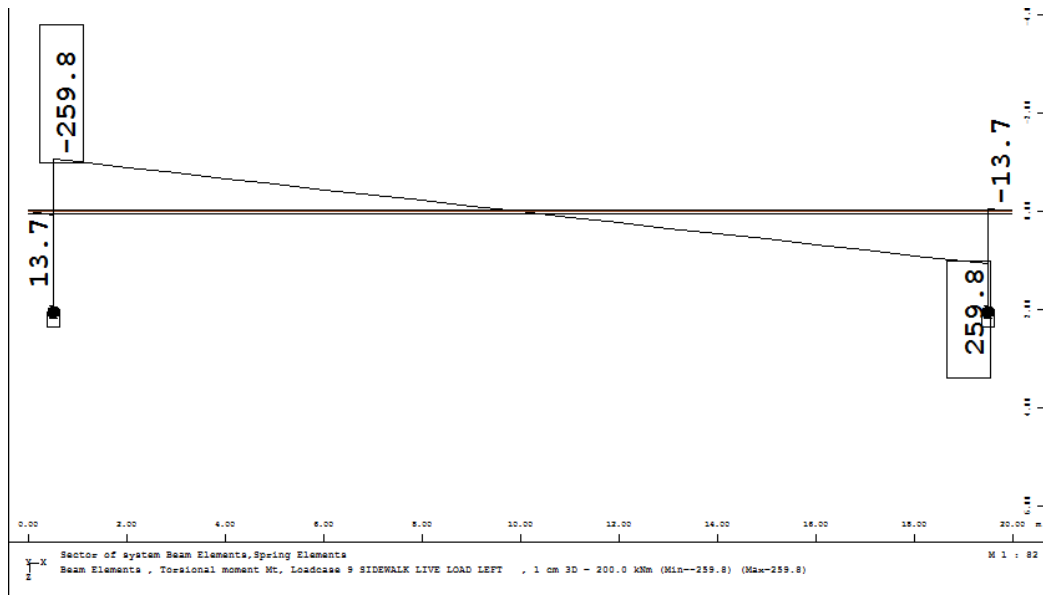
LC6 / Διάγραμμα M_y στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



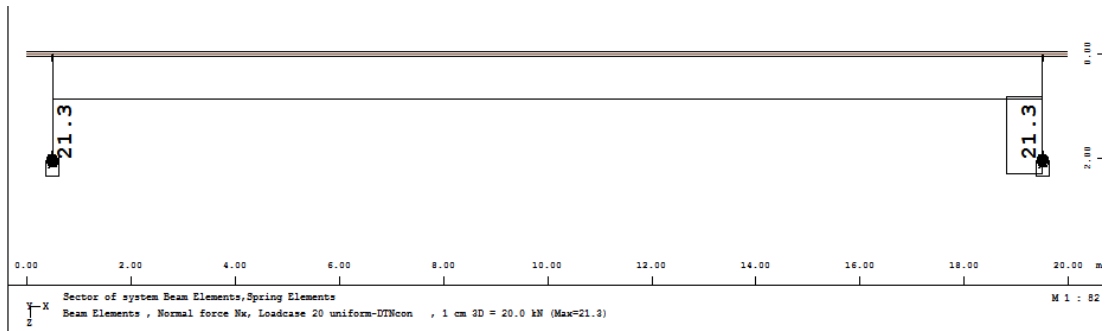
LC7 / Διάγραμμα N_x στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



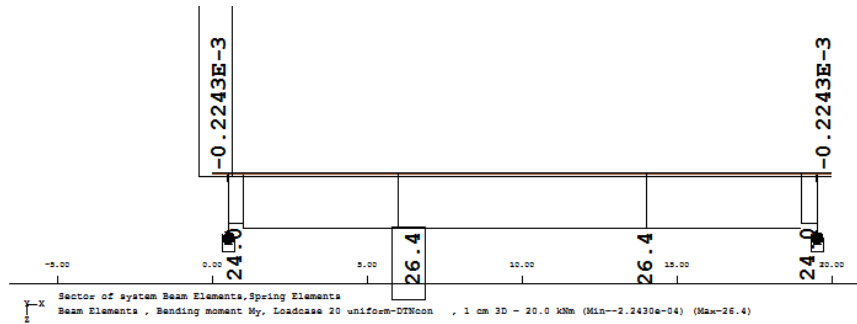
LC9 / Διάγραμμα M_y στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



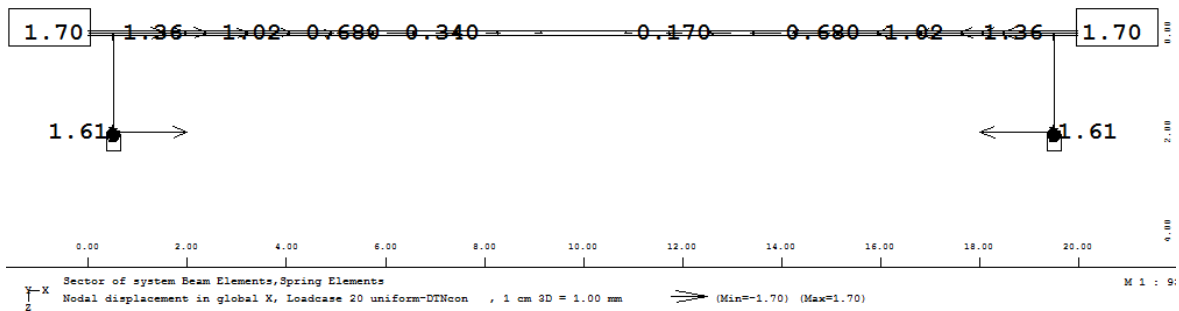
LC9 / Διάγραμμα M_t στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



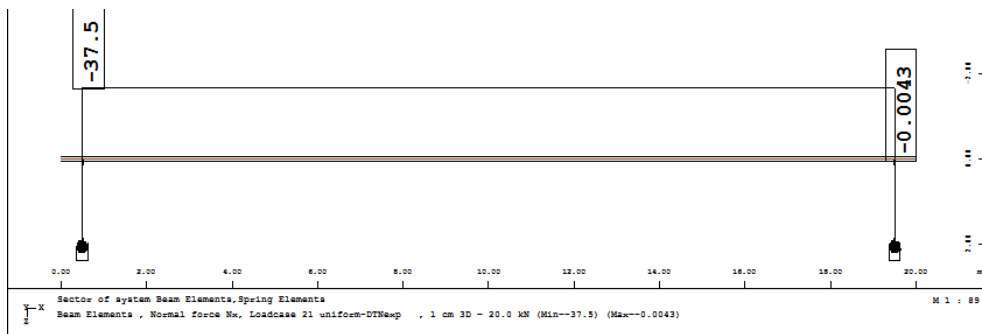
LC20 / Διάγραμμα N_x στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



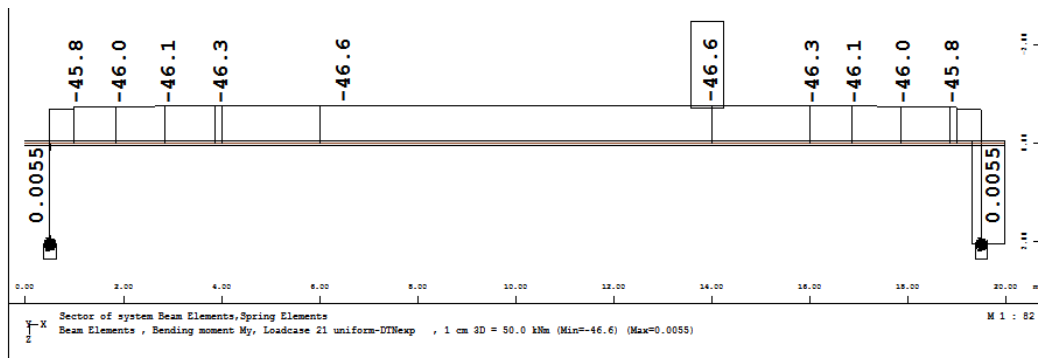
LC20 / Διάγραμμα My στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

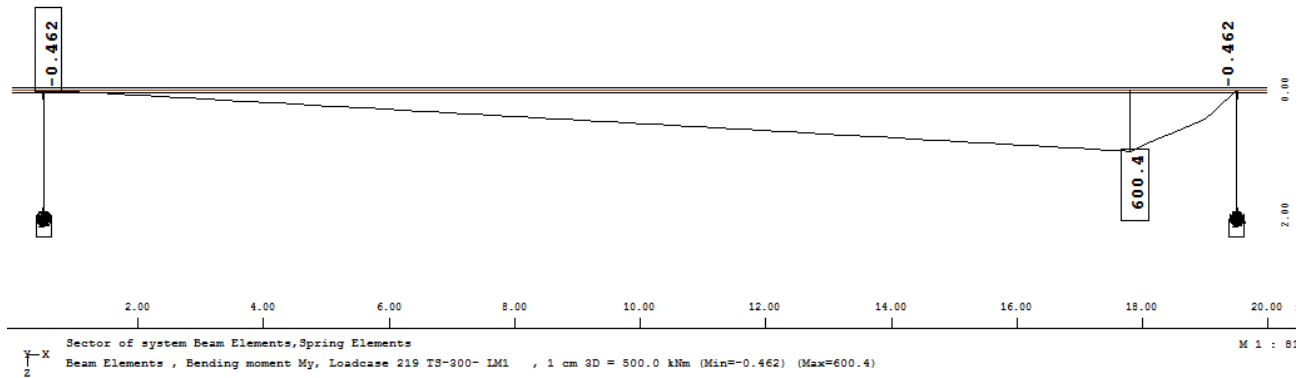
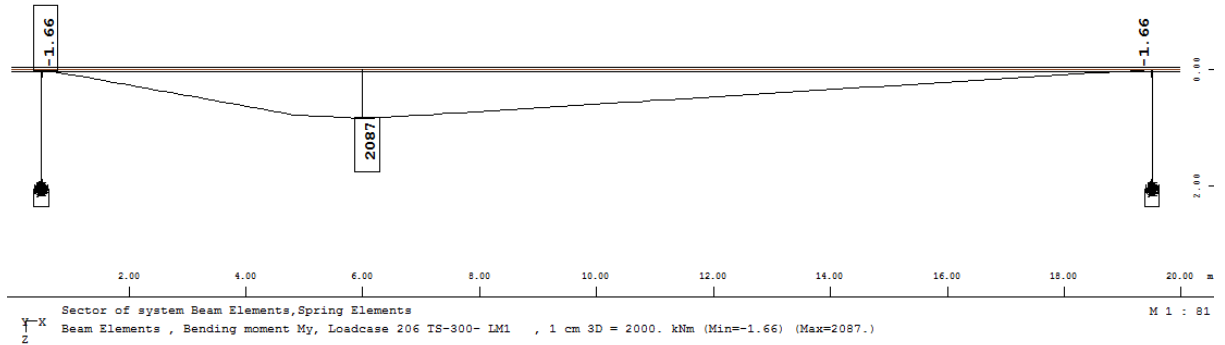
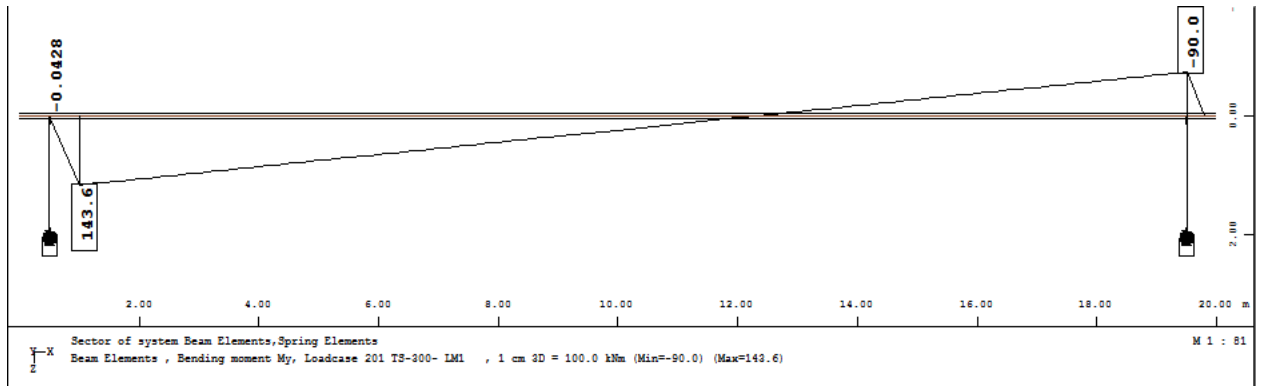


LC20 / Οριζόντιες μετατοπίσεις στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



LC21 / Διάγραμμα Nx στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



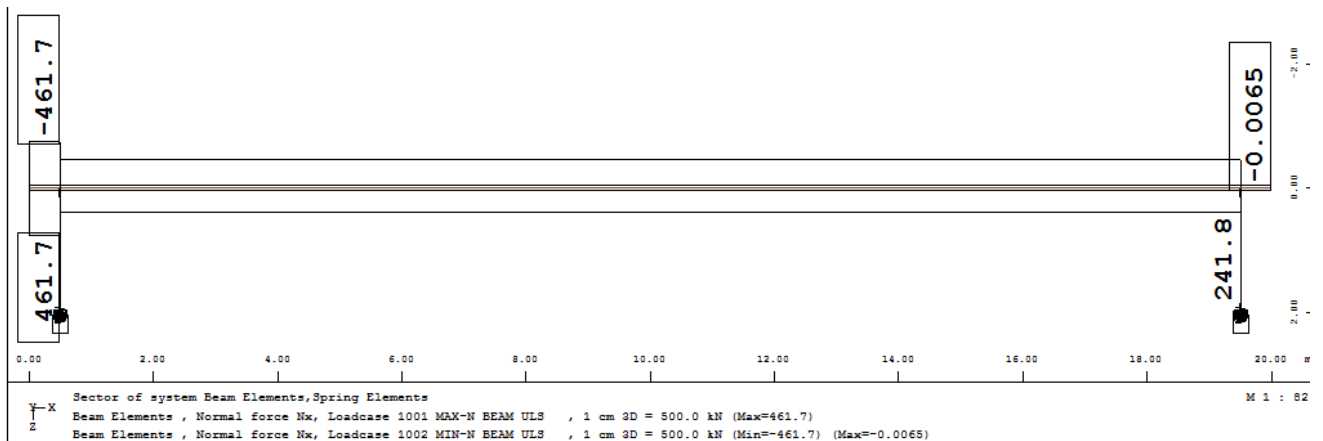


LC200 / Διαγράμματα My στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή για διάφορες θέσεις του TS

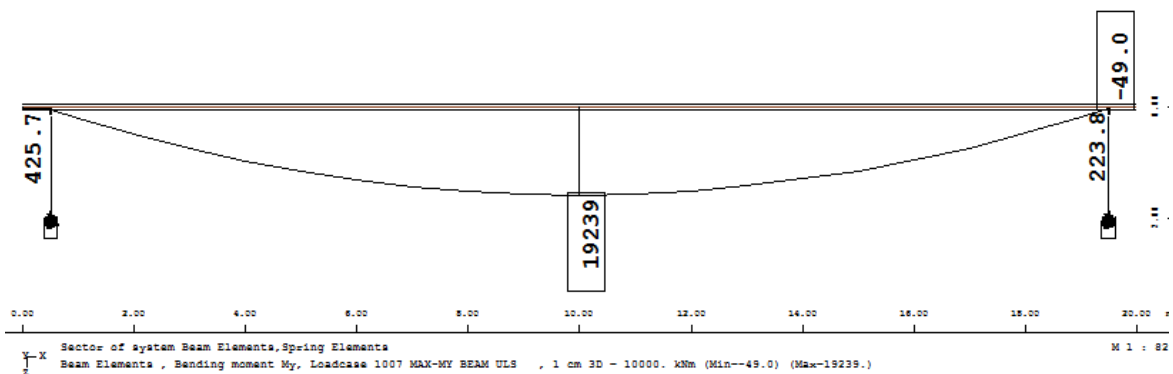
Eigenvalues

No.	LC	λ [rad ² /sec ²]	error [-]	ω [rad/sec]	f [Hz]	T [sec]	ξ [%]	Meff			participation			
								X[%]	Y[%]	Z[%]	X[%]	Y[%]	Z[%]	
1	9000	6.7463E+01	0.0E+00	8.214	1.307	0.765	5.000	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
2	9001	6.7517E+01	0.0E+00	8.217	1.308	0.765	5.000	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
3	9002	1.4962E+02	0.0E+00	12.232	1.947	0.514	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	9003	3.8954E+03	0.0E+00	62.413	9.933	0.101	5.000	0.0	0.0	0.0	71.1	0.0	0.0	71.1
5	9004	2.2322E+04	0.0E+00	149.406	23.779	0.042	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	9005	3.7010E+04	0.0E+00	192.381	30.618	0.033	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	9006	8.5816E+04	0.0E+00	292.944	46.623	0.021	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	9007	8.8586E+04	0.0E+00	297.634	47.370	0.021	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	9008	1.0117E+05	0.0E+00	318.069	50.622	0.020	5.000	0.0	0.0	0.0	21.0	0.0	0.0	21.0
10	9009	1.6880E+05	0.0E+00	410.848	65.389	0.015	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	9010	1.9026E+05	0.0E+00	436.184	69.421	0.014	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	9011	2.3073E+05	0.0E+00	480.341	76.449	0.013	5.000	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
13	9012	2.5090E+05	0.0E+00	500.902	79.721	0.013	5.000	0.0	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	7.4
14	9013	2.9465E+05	0.0E+00	542.818	86.392	0.012	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	9014	3.4099E+05	0.0E+00	583.939	92.937	0.011	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	9015	3.8995E+05	2.1E-13	624.458	99.386	0.010	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	9016	5.0493E+05	8.4E-11	710.582	113.093	0.009	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	9017	6.1000E+05	1.1E-06	781.023	124.304	0.008	5.000	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
19	9018	6.4047E+05	2.5E-08	800.297	127.371	0.008	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	9019	6.8747E+05	6.8E-07	829.141	131.962	0.008	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21		7.3656E+05	1.8E-06	858.233	136.592	0.007	$\Sigma(\%)^1$	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

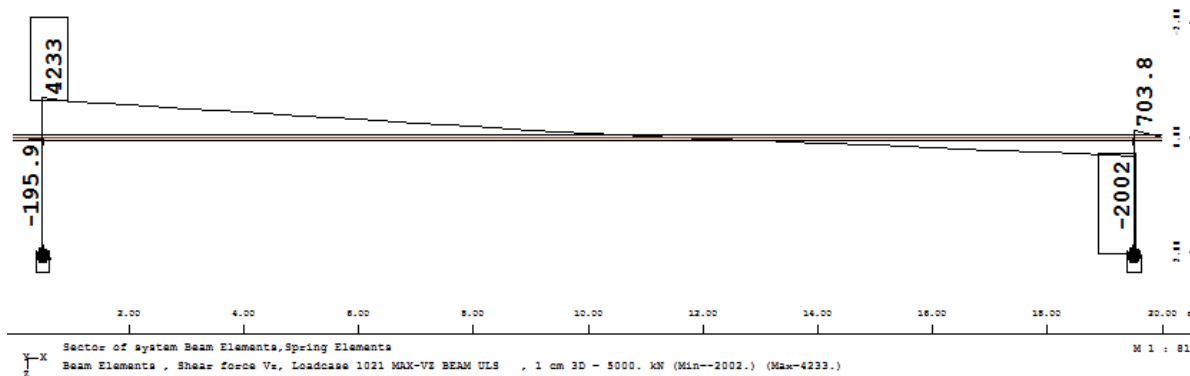
Πίνακας με Ιδιομορφές στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



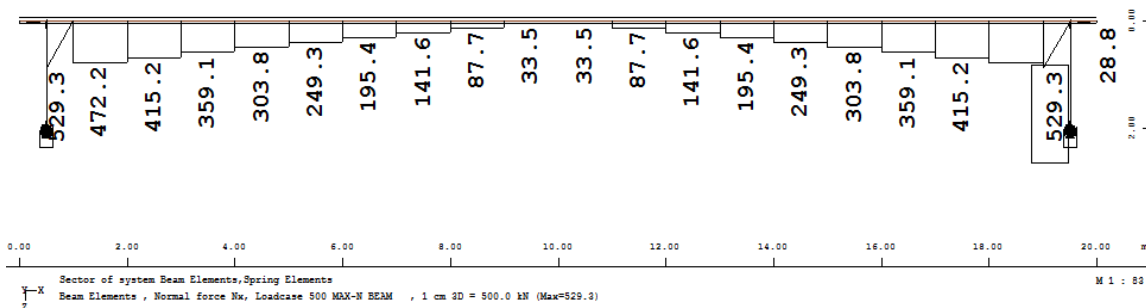
Περιβάλλουσα Αξονικής για την ΟΚΑ στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



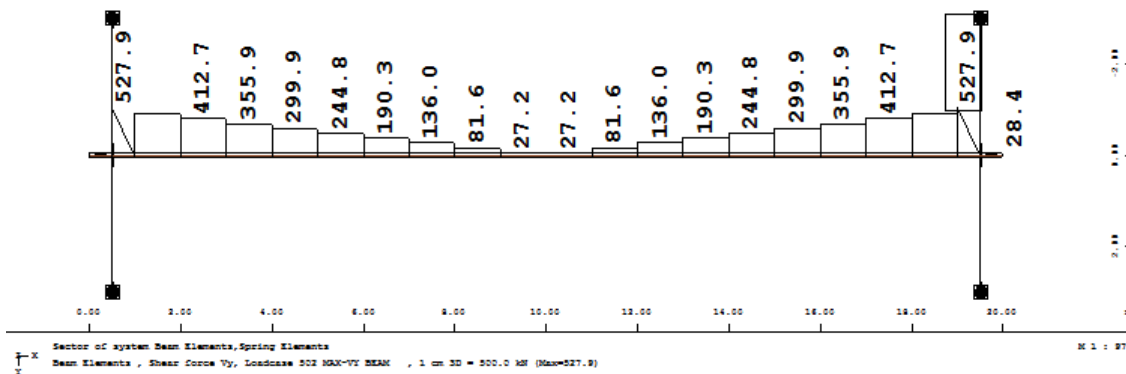
Περιβάλλουσα Ροπής κάμψης για την ΟΚΑ στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



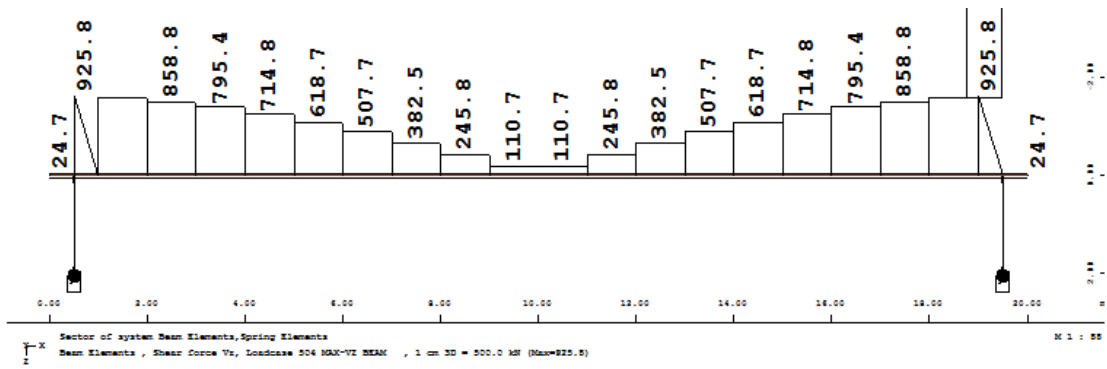
Περιβάλλουσα Τέμνουσας για την ΟΚΑ στην διεύθυνση Z στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



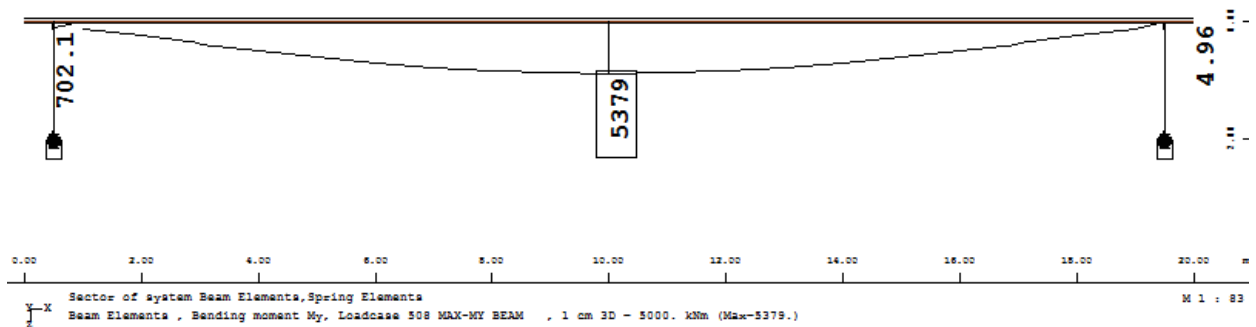
Περιβάλλουσα Αξονικής για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



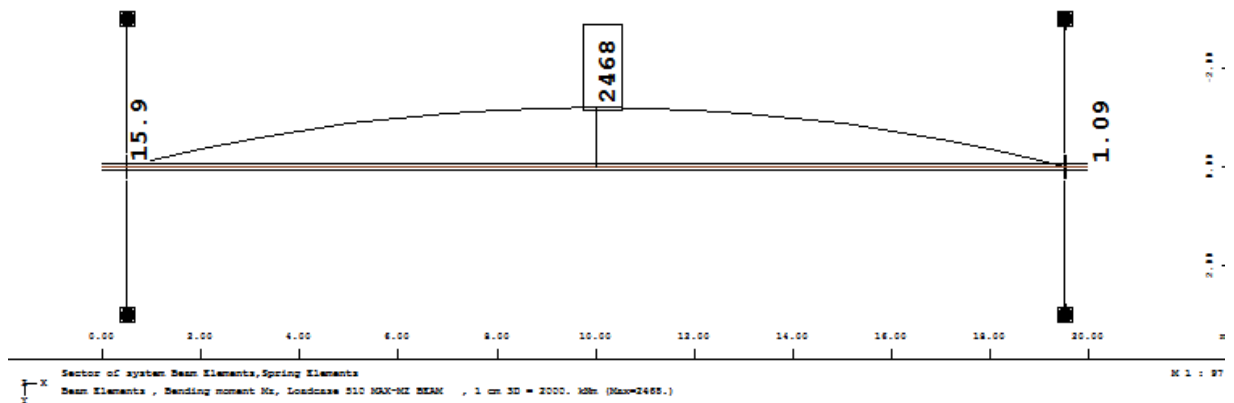
Περιβάλλουσα Τέμνουσας Vy για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή



Περιβάλλουσα Τέμνουσας V_z για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

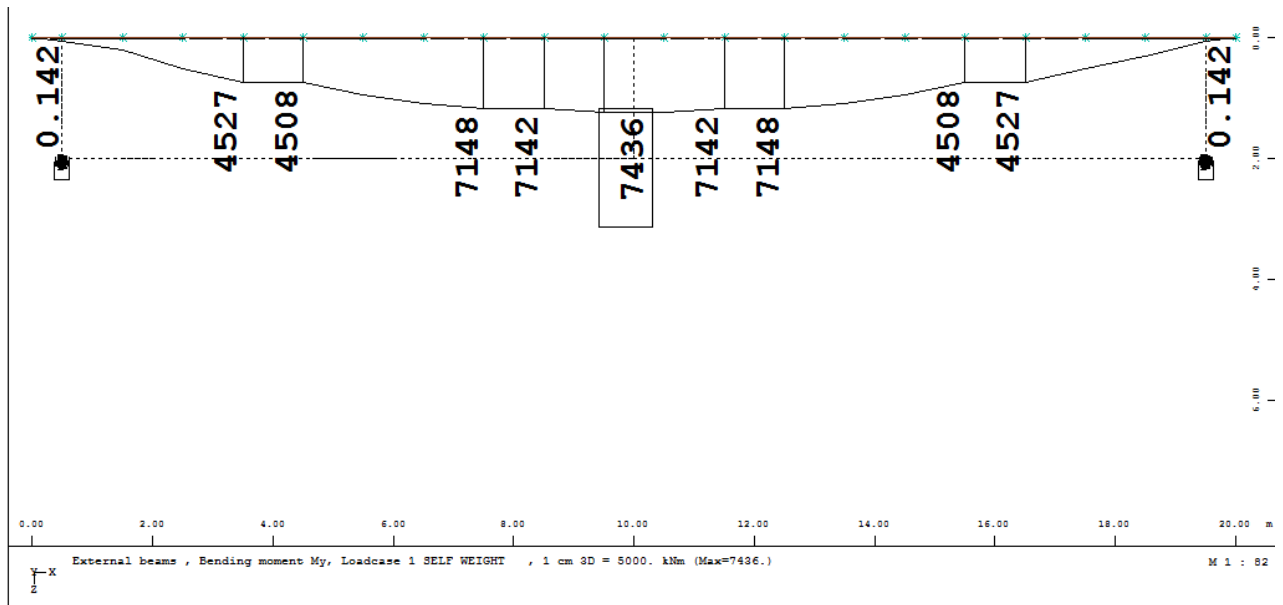


Περιβάλλουσα Ροπής κάμψης M_y για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

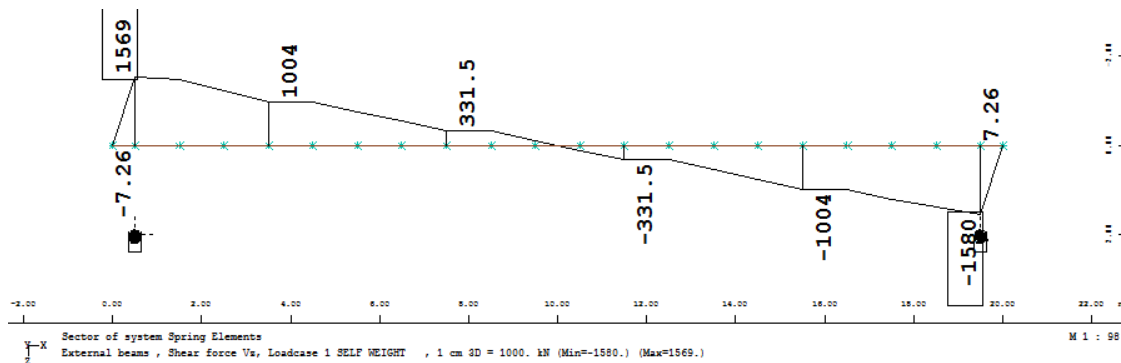


Περιβάλλουσα Ροπής κάμψης M_z για τους σεισμικούς συνδυασμούς στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή

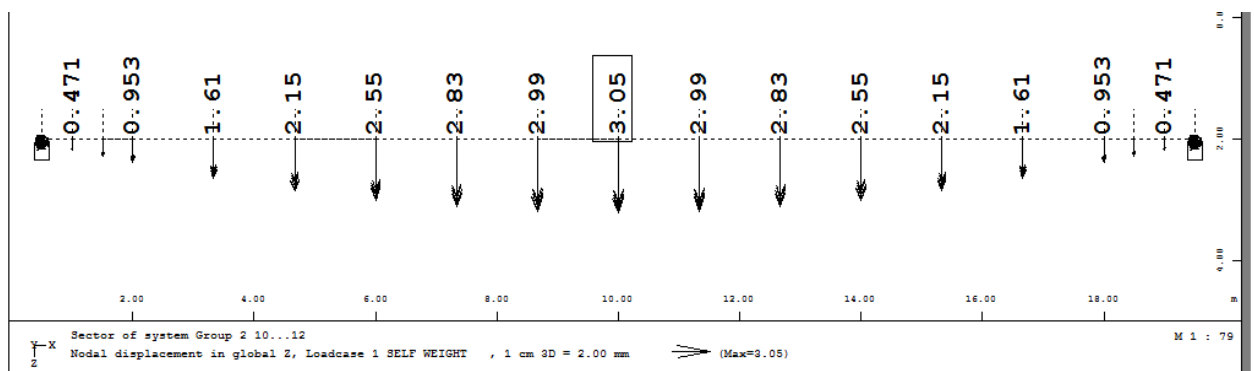
6.3 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων



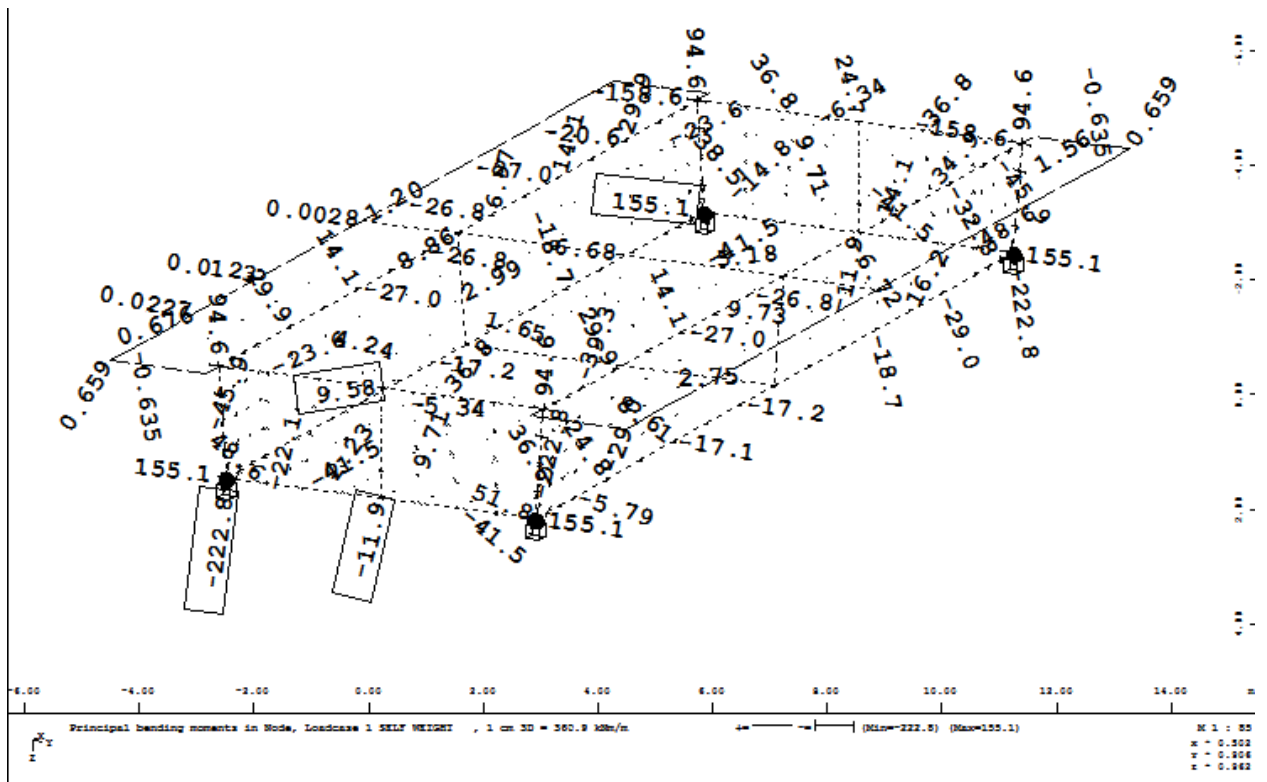
LC1 / Διάγραμμα M_y στο μοντέλο π.σ – πρόγραμμα SIR - Ολοκλήρωση εντατικών μεγεθών για προβολή στον άξονα



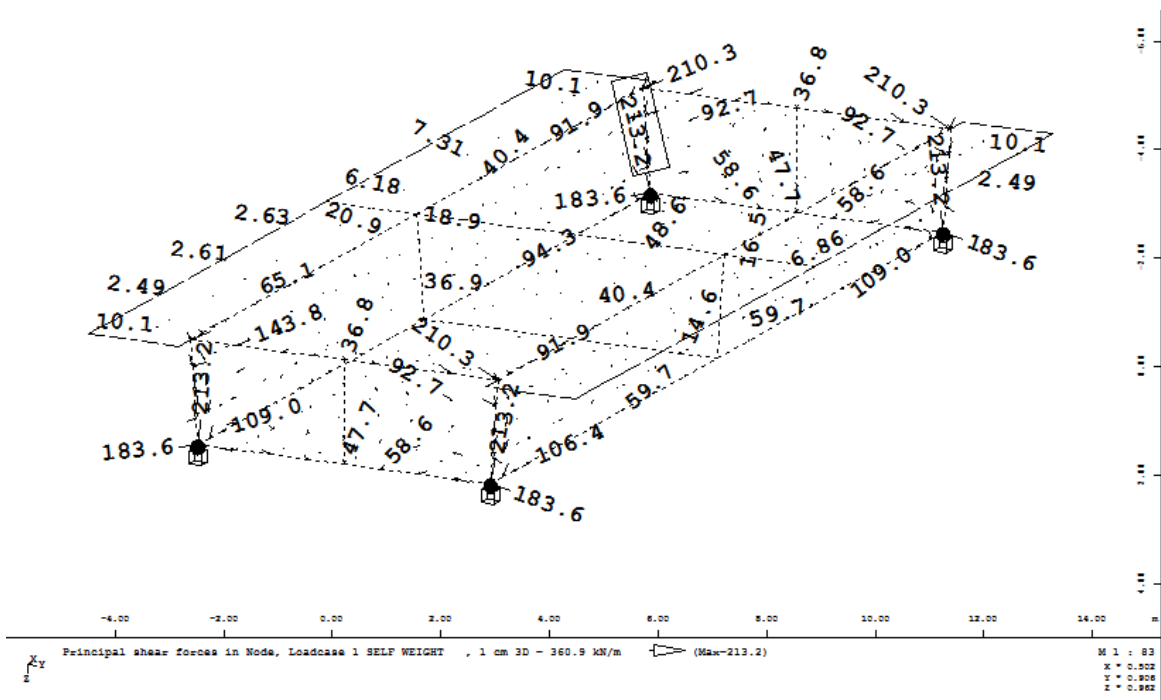
LC1 / Διάγραμμα V_z στο μοντέλο π.σ– πρόγραμμα SIR



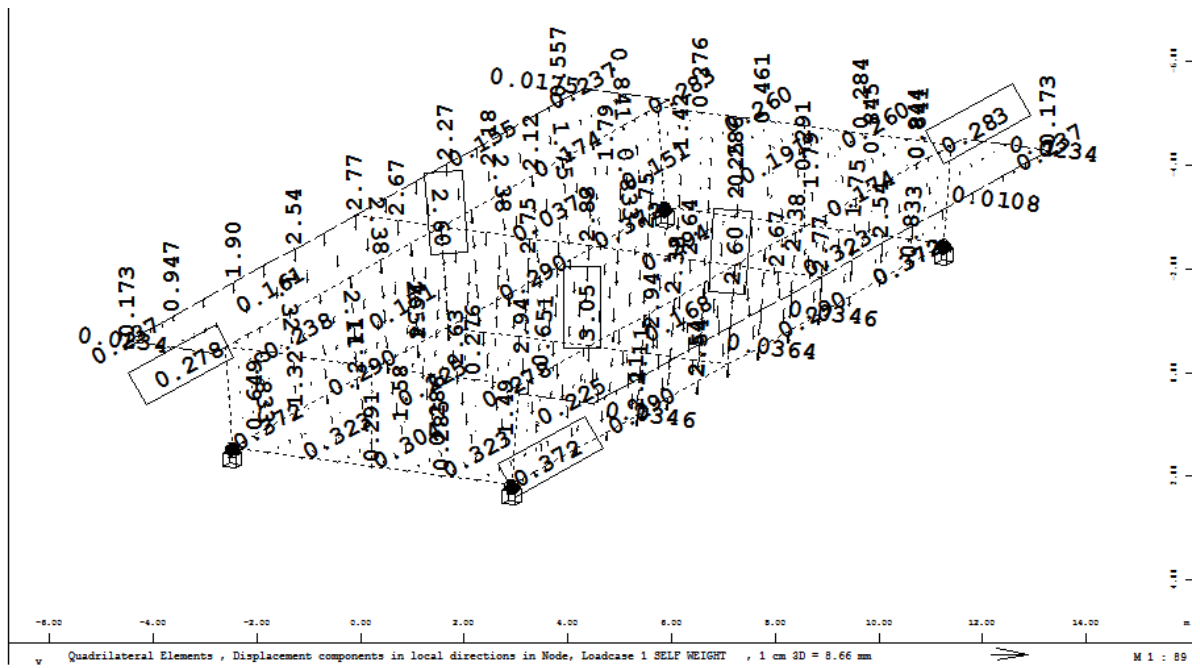
LC1 / Μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ– πρόγραμμα SIR



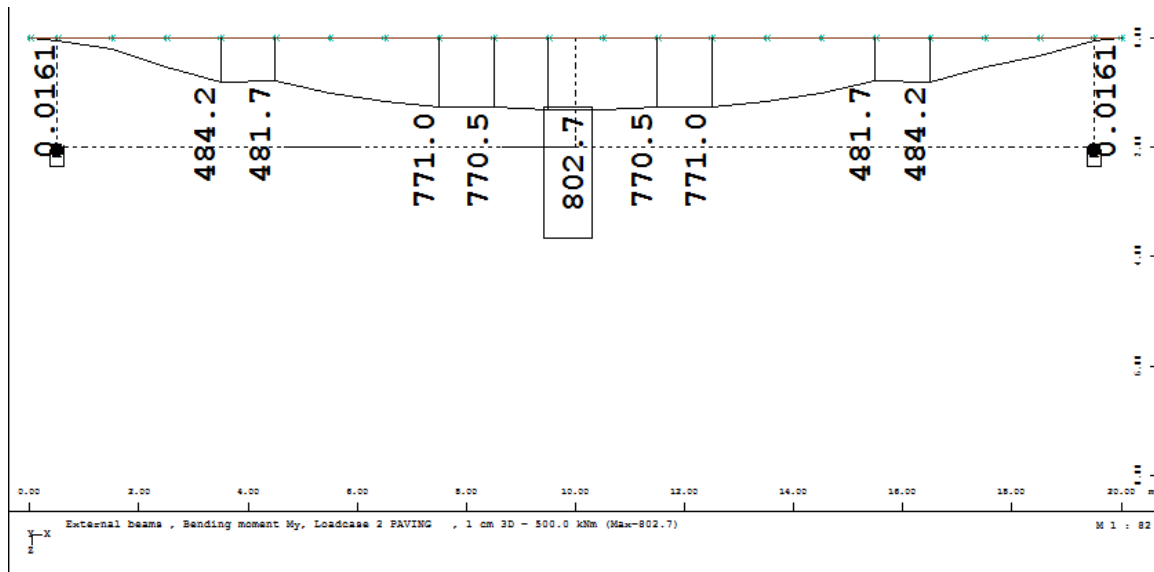
LC1 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ – Τρισδιάστατη απεικόνιση φορέα



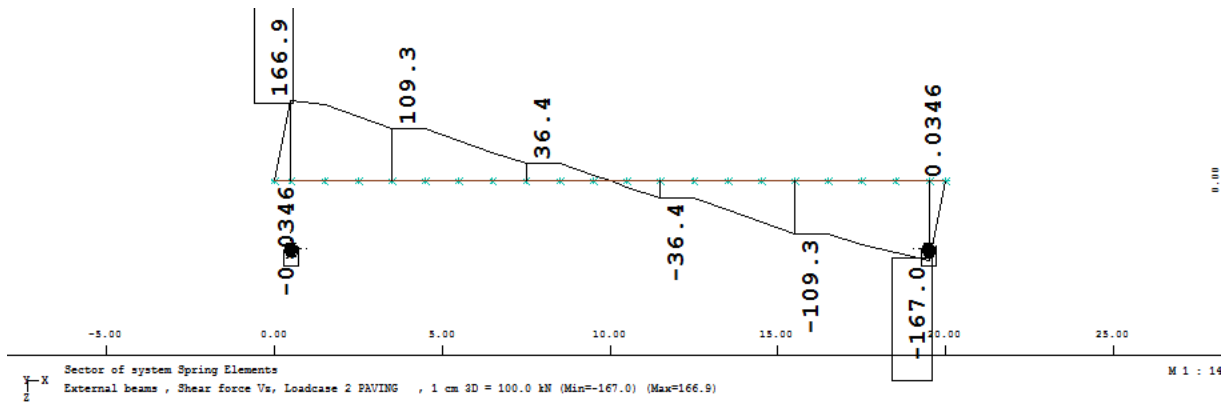
LC1 / Διατμητικές τάσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ



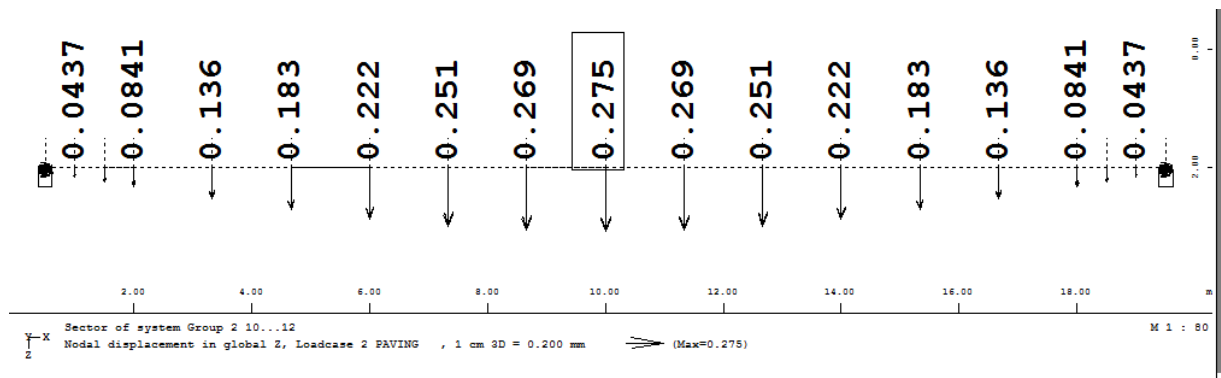
LC1 / Μετατοπίσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ



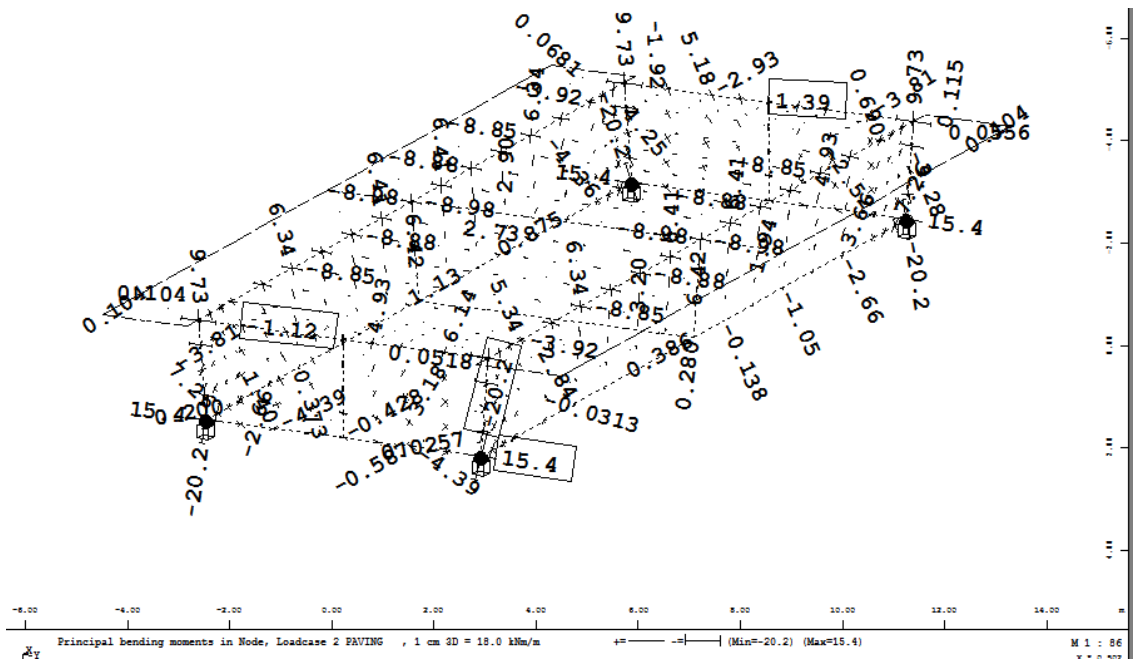
LC2 / Διάγραμμα My στο μοντέλο π.σ – πρόγραμμα SIR



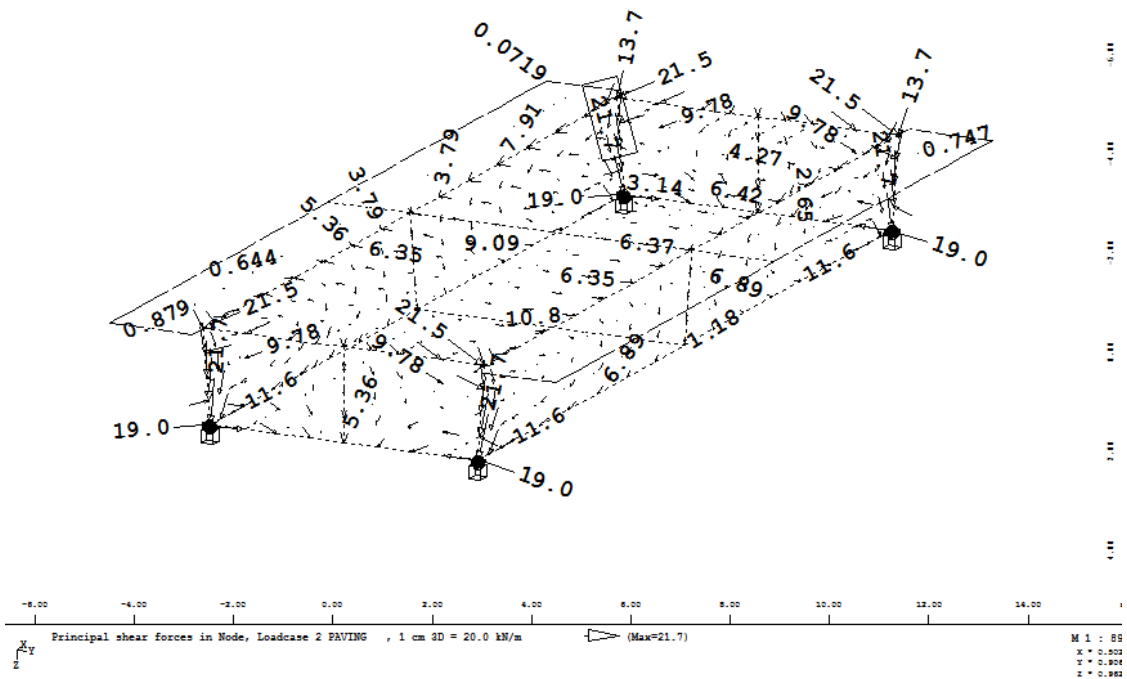
LC2 / Διάγραμμα Vz στο μοντέλο π.σ – πρόγραμμα SIR



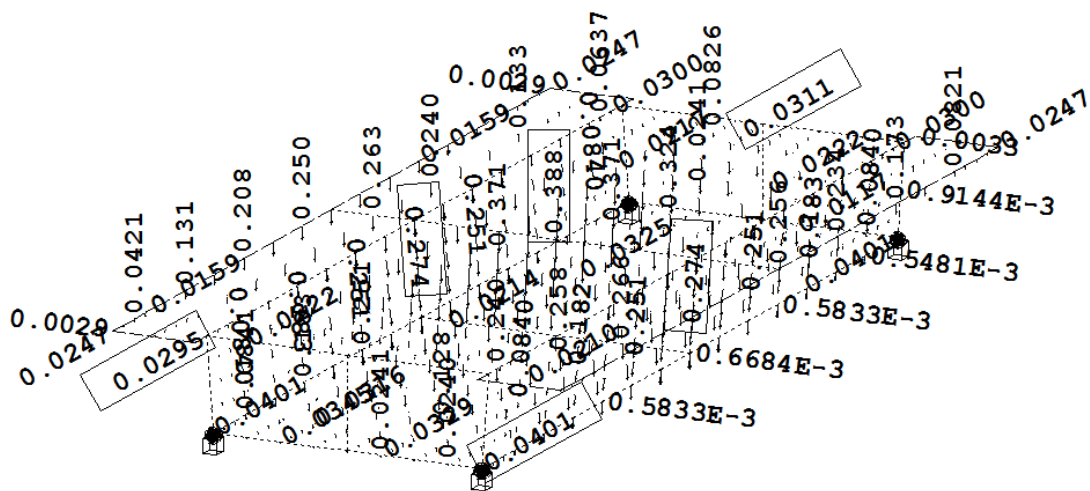
LC2 / Μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ – πρόγραμμα SIR

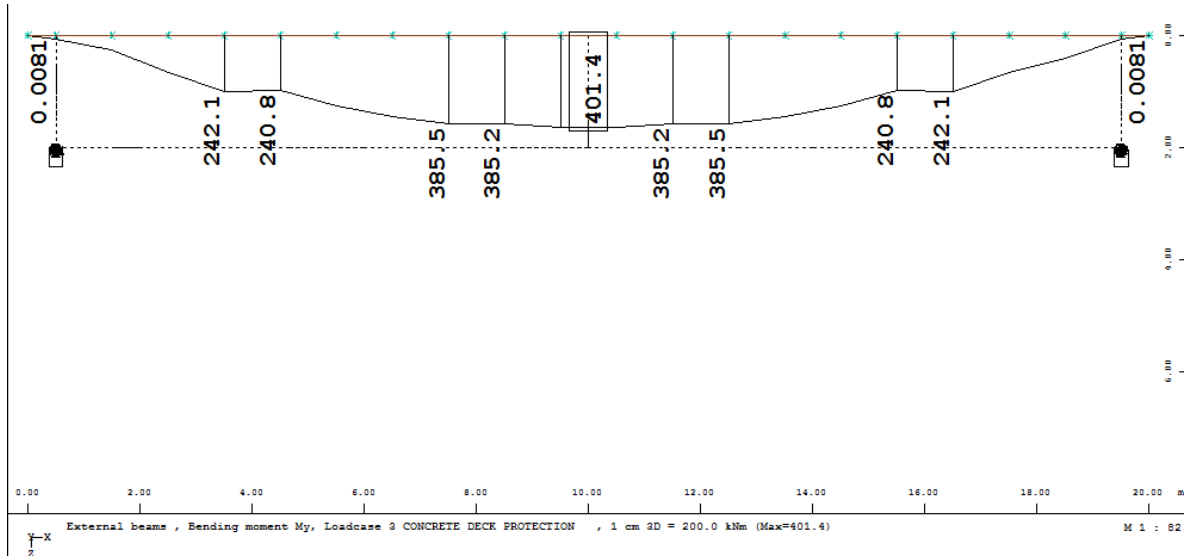


LC2 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ

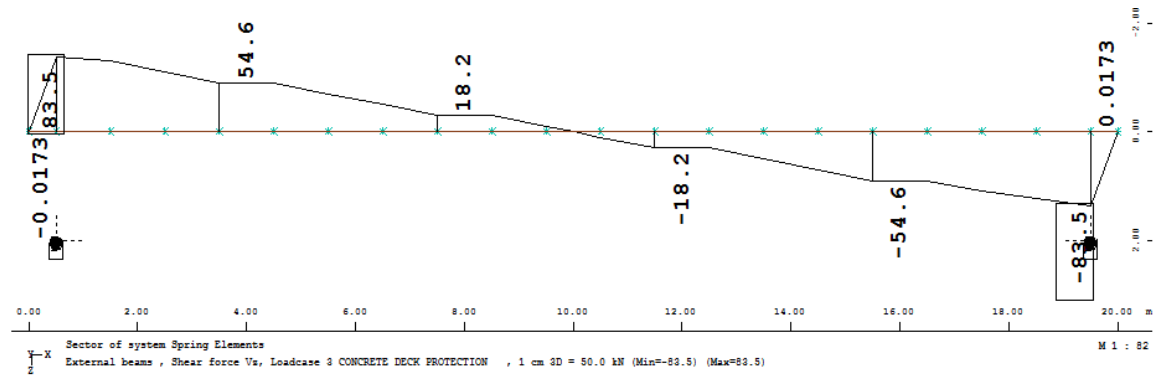


LC2 / Διατμητικές τάσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ.

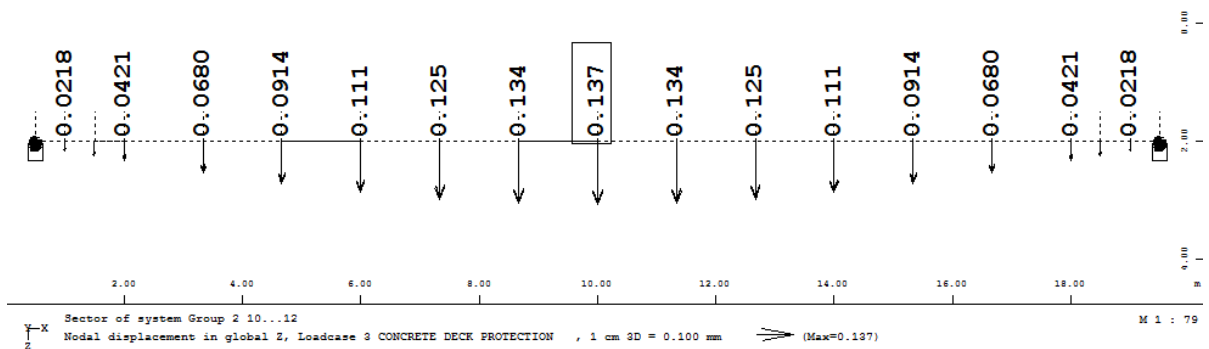




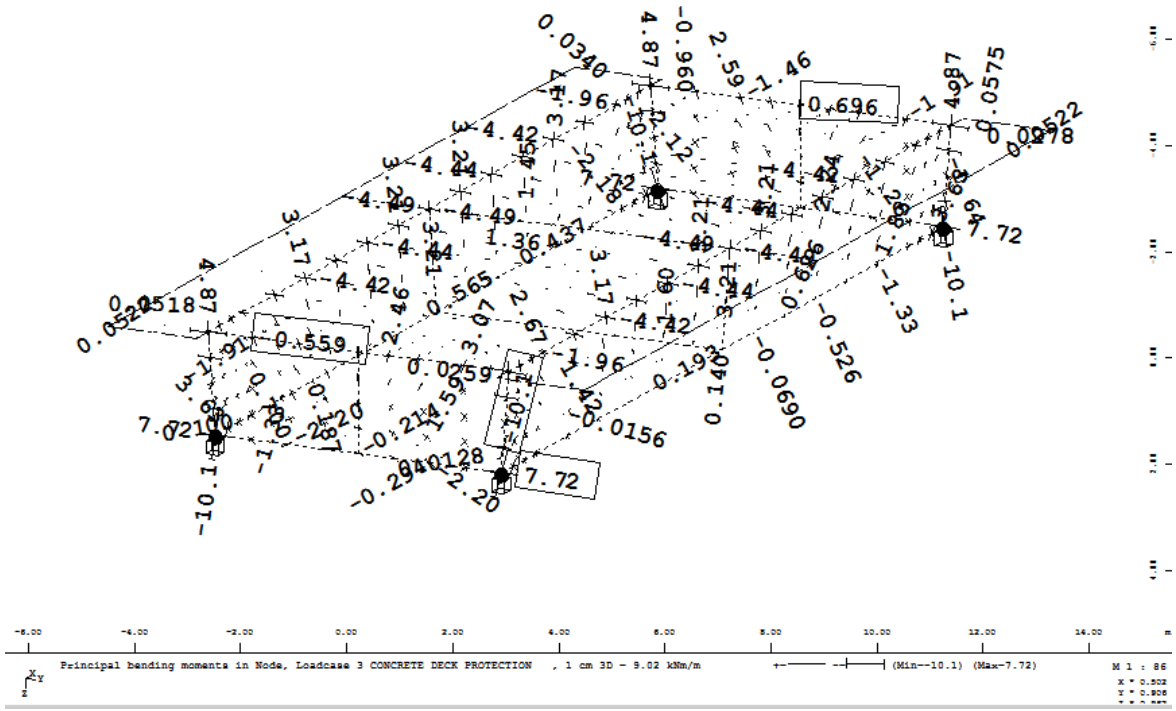
LC3 / Διάγραμμα My στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



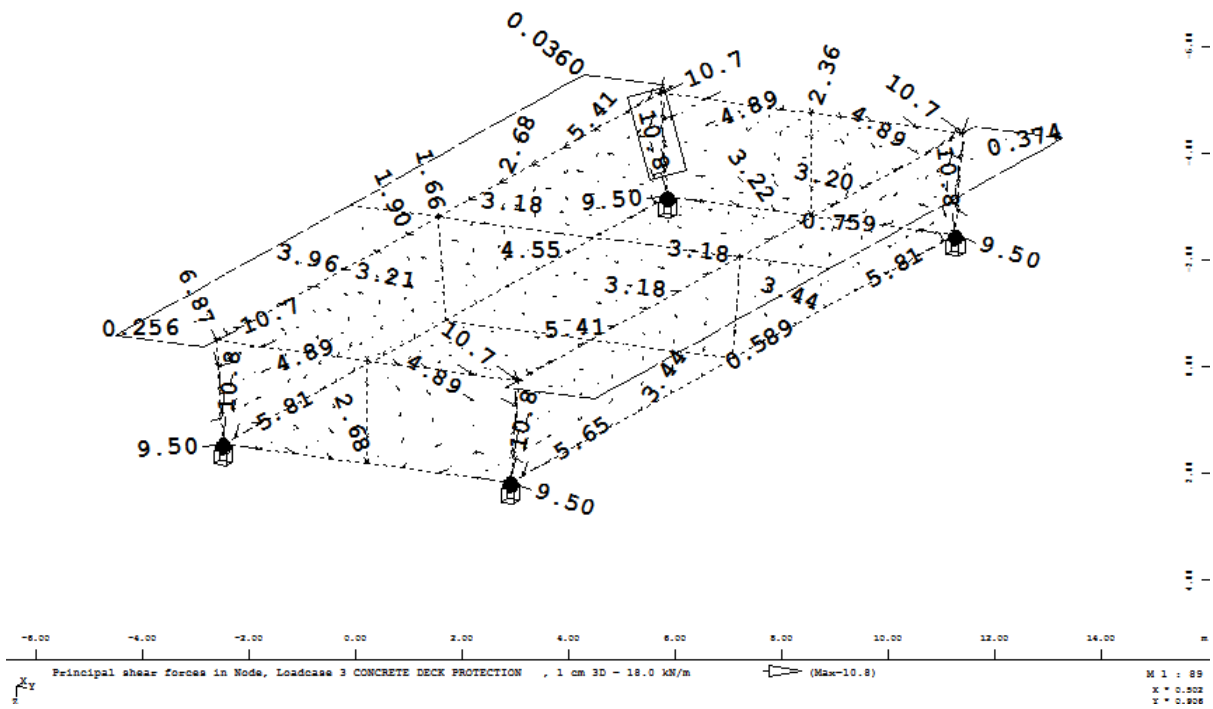
LC3 / Διάγραμμα Vz στο μοντέλο π.σ



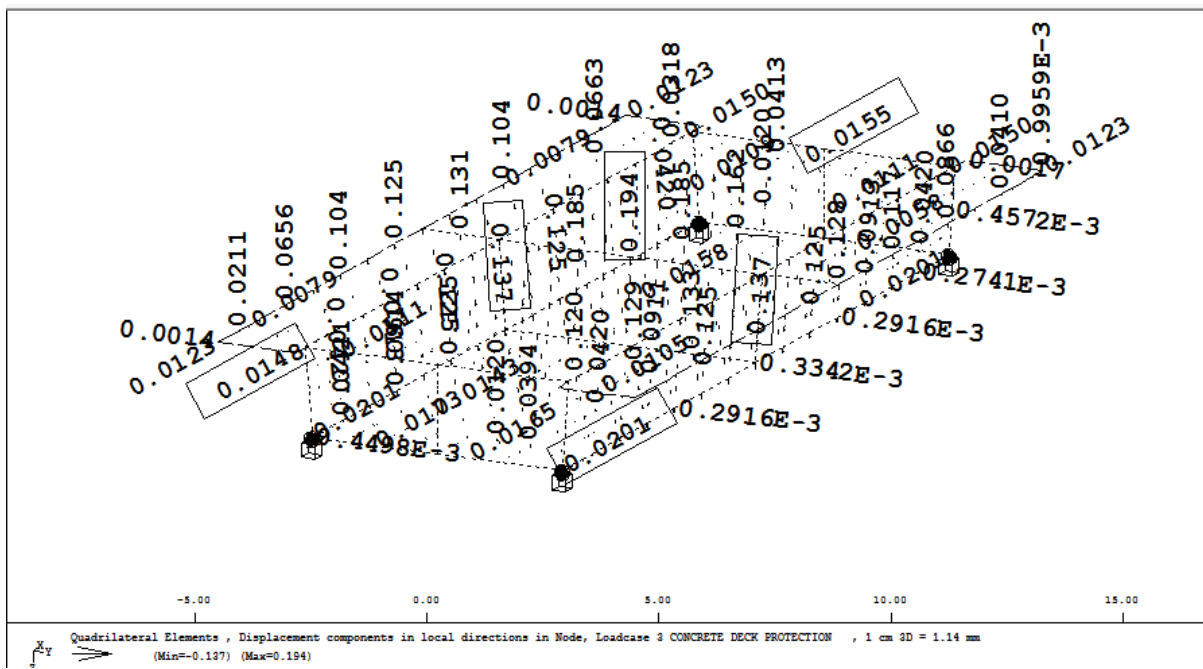
LC3 / Μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



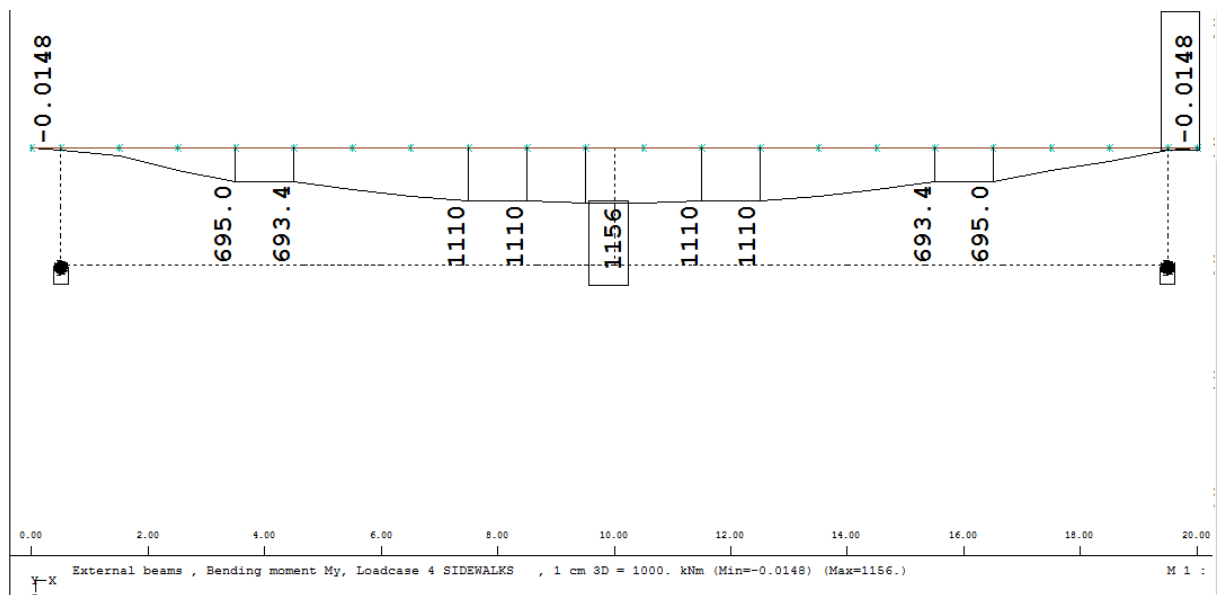
LC3 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ



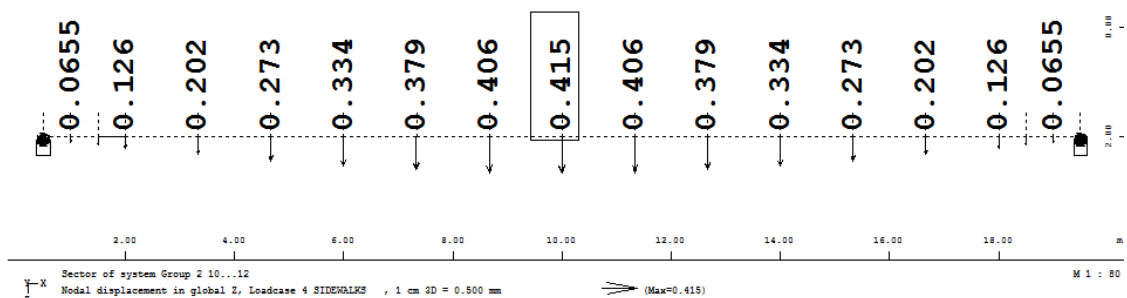
LC3 / Διατμητικές τάσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ.



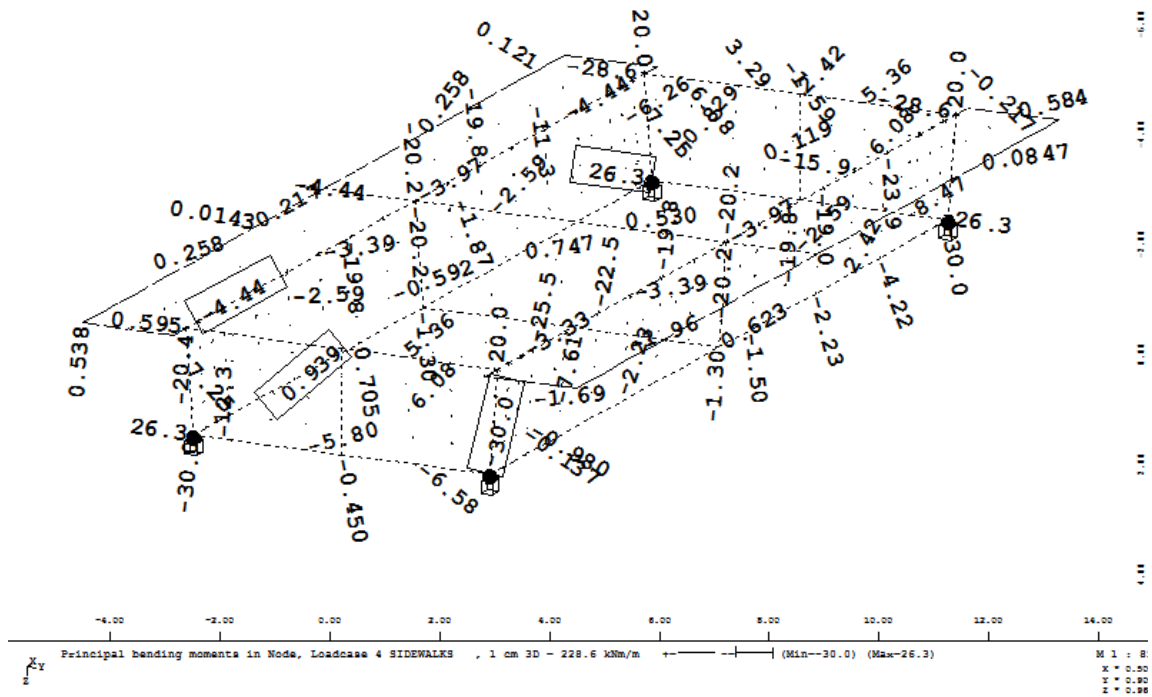
LC3 / Μετατοπίσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ



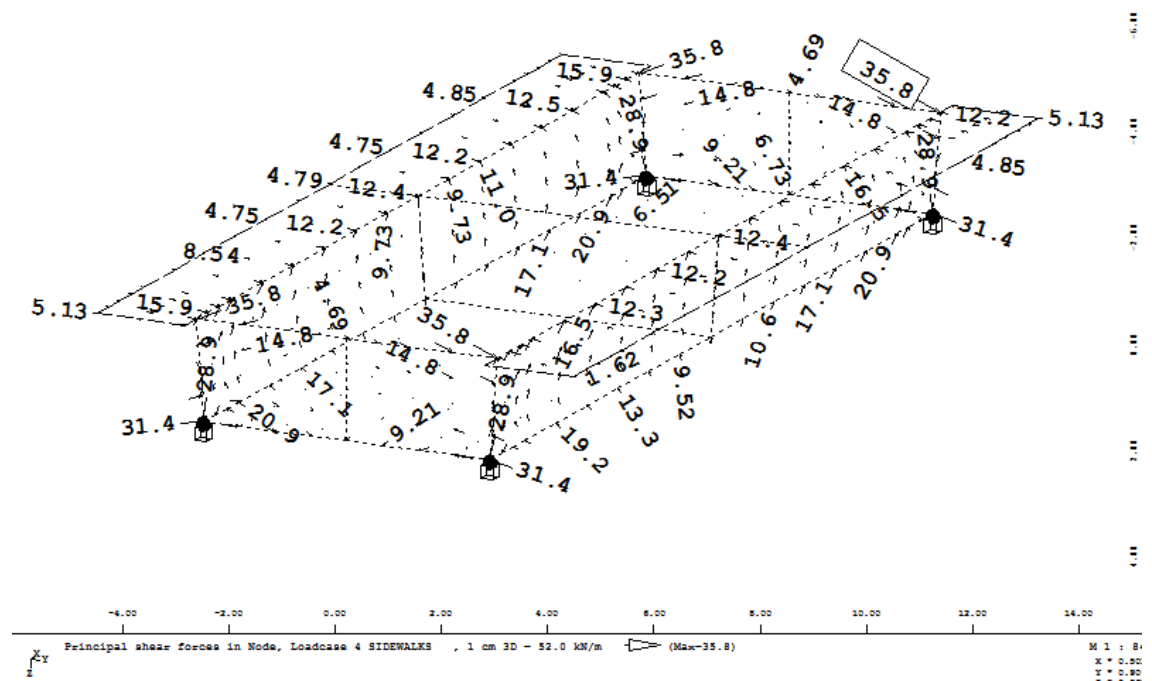
LC4 / Διάγραμμα My στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



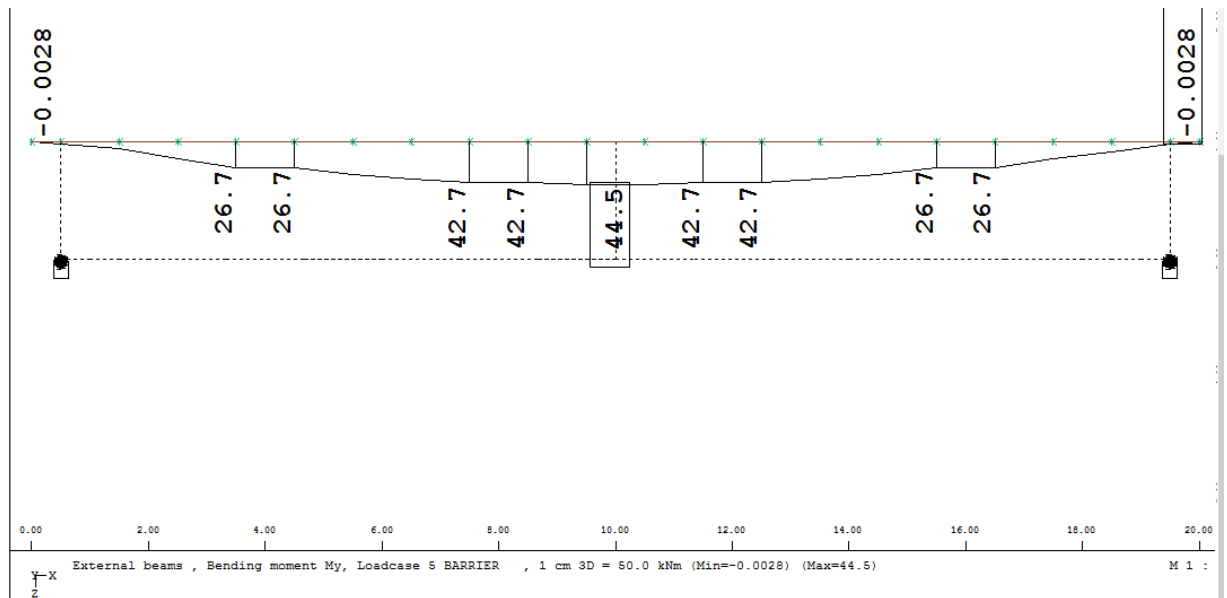
LC4 / Μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



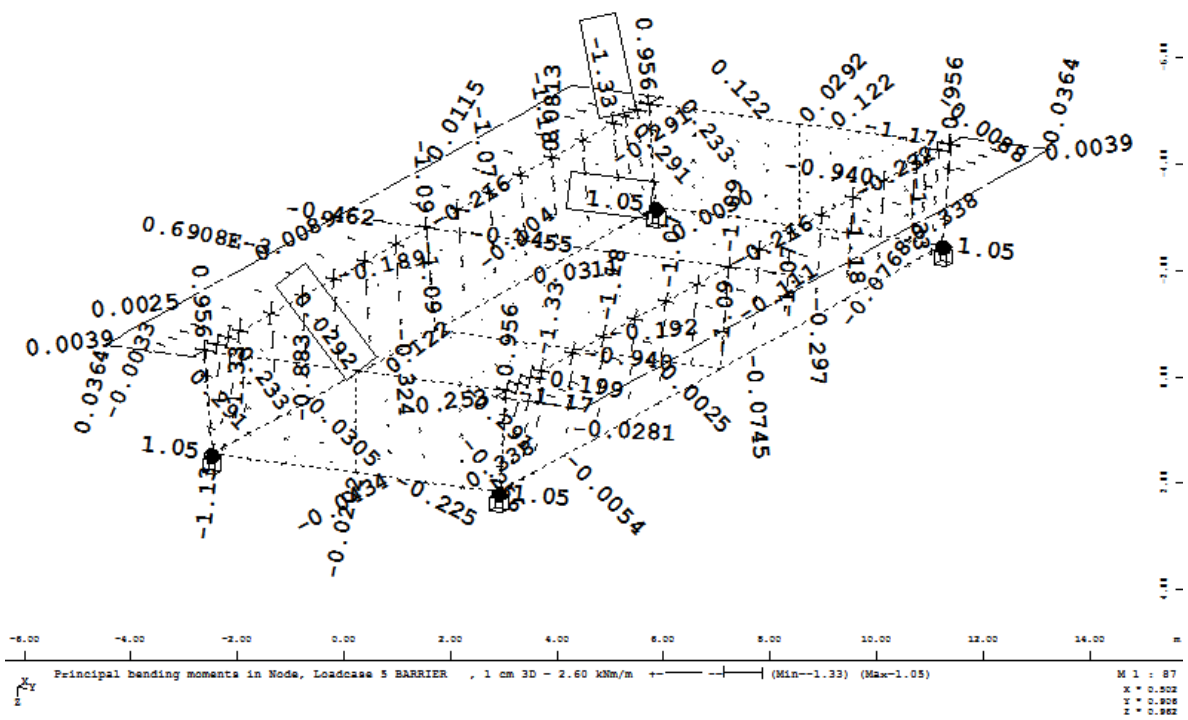
LC4 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ



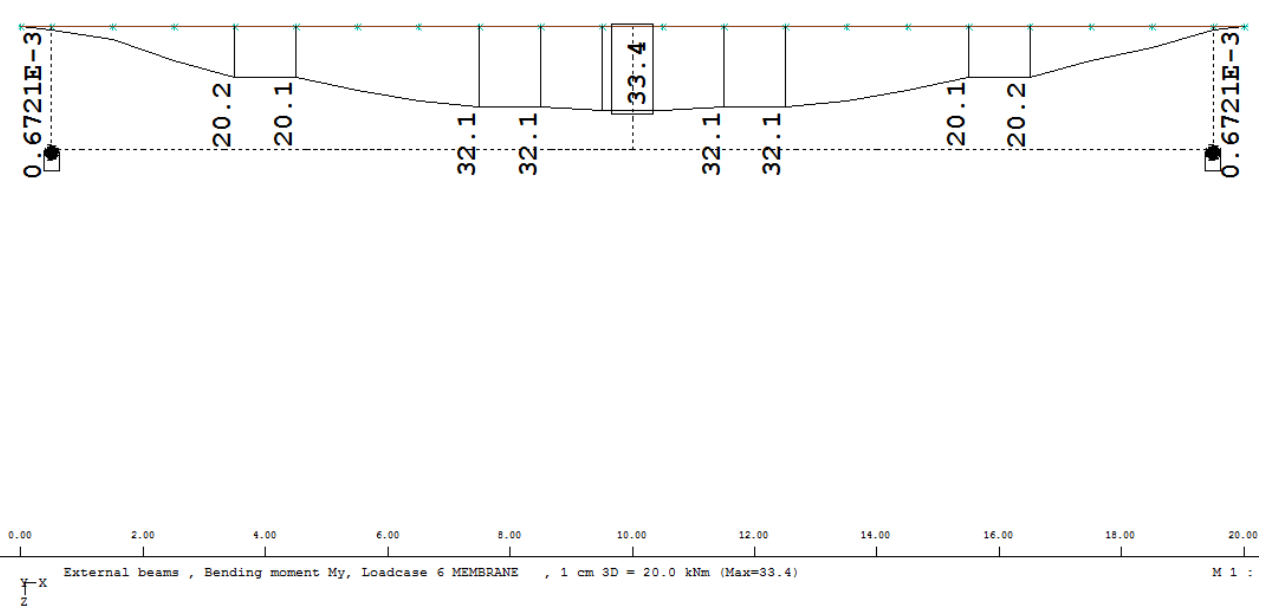
LC4 / Διαμητικές τάσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ.



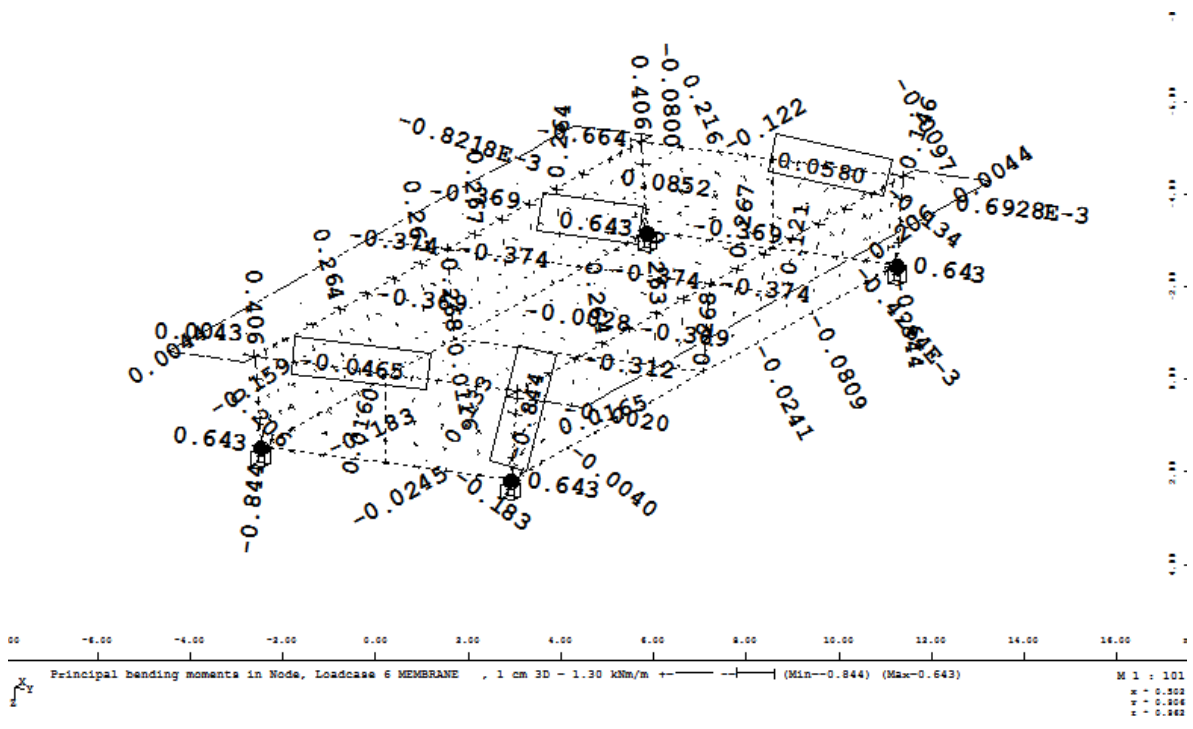
LC5 / Διάγραμμα M_y στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



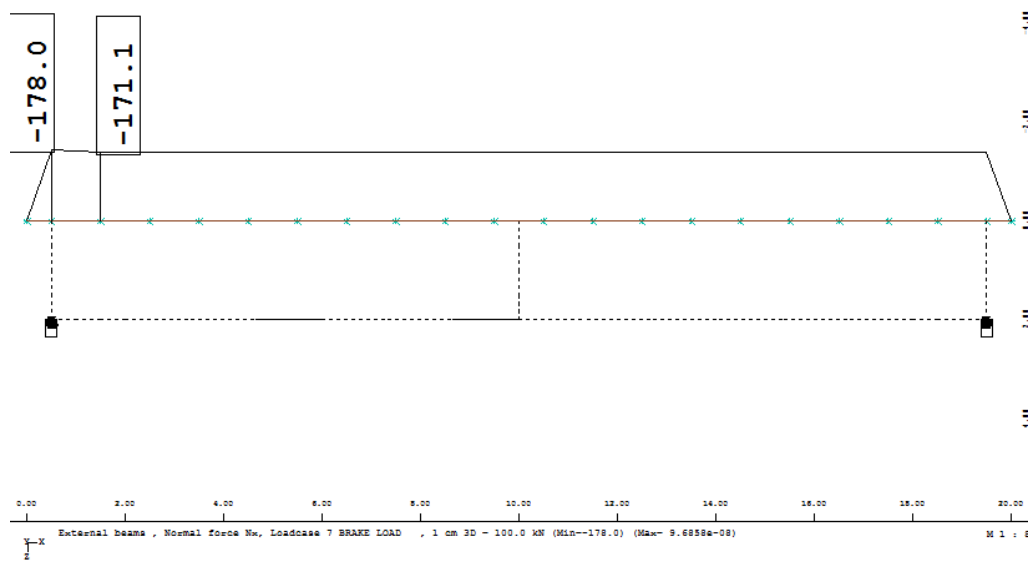
LC5 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ



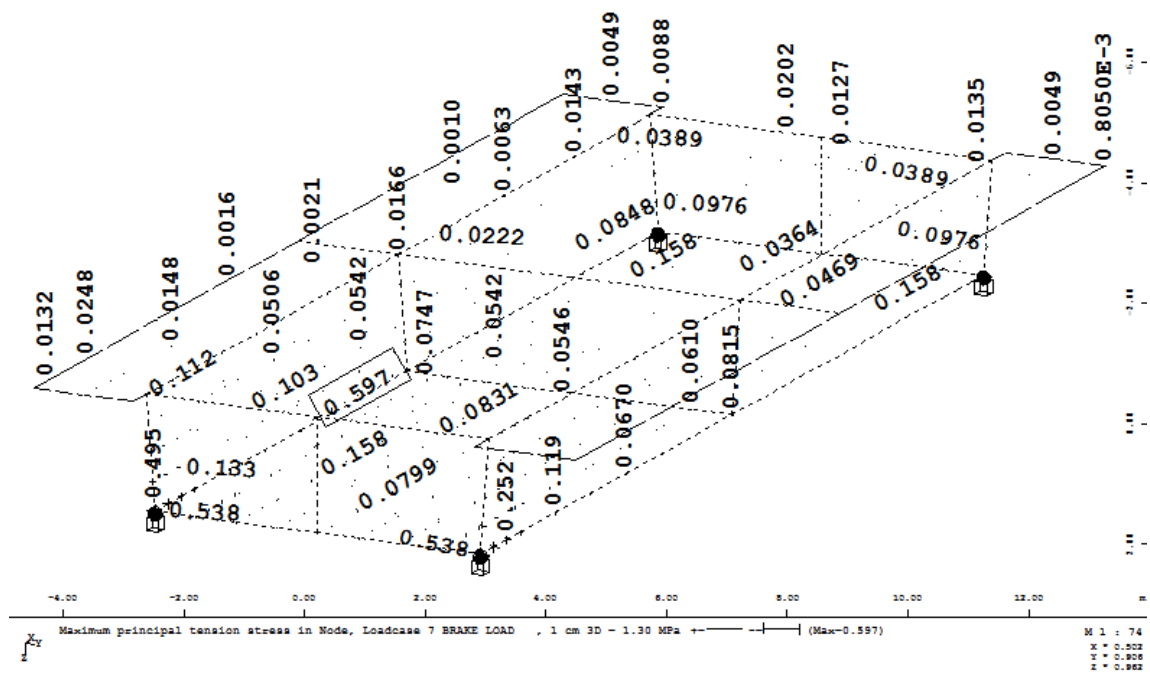
LC6 / Διάγραμμα M_y στο μοντέλο π.σ– πρόγραμμα SIR



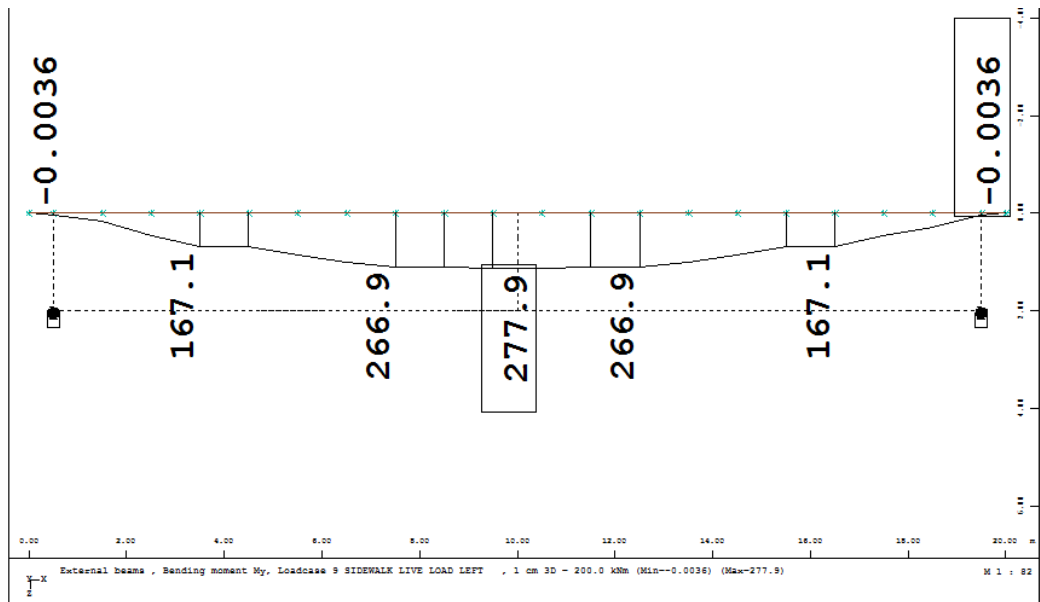
LC6 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ



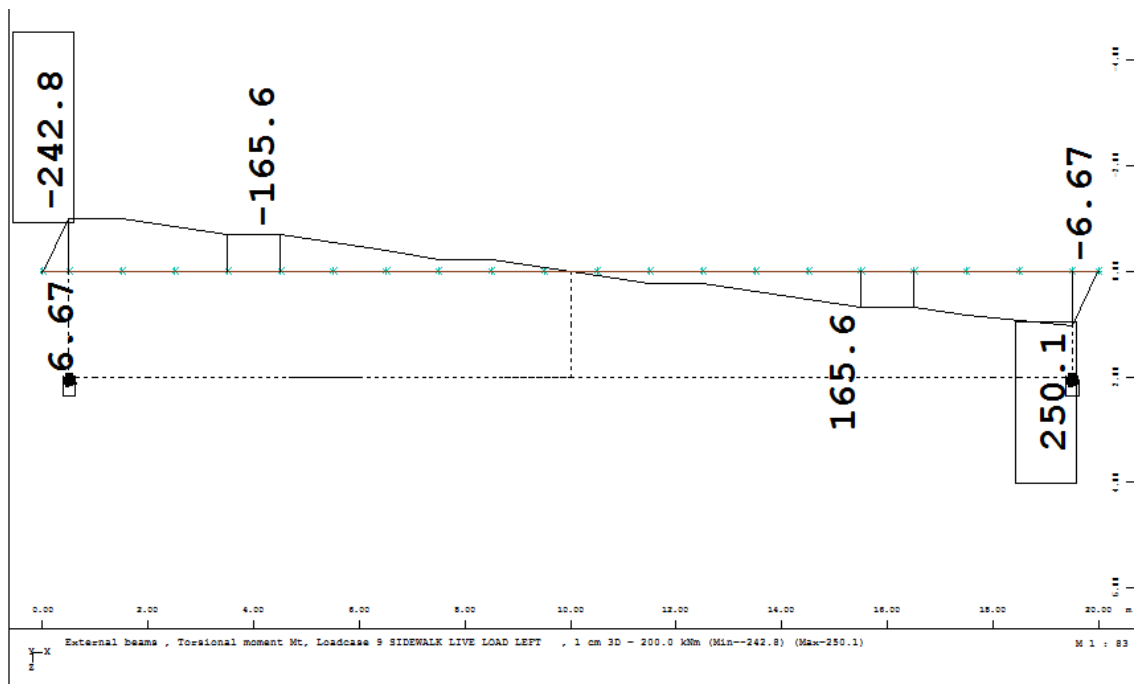
LC7 / Διάγραμμα N_x στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



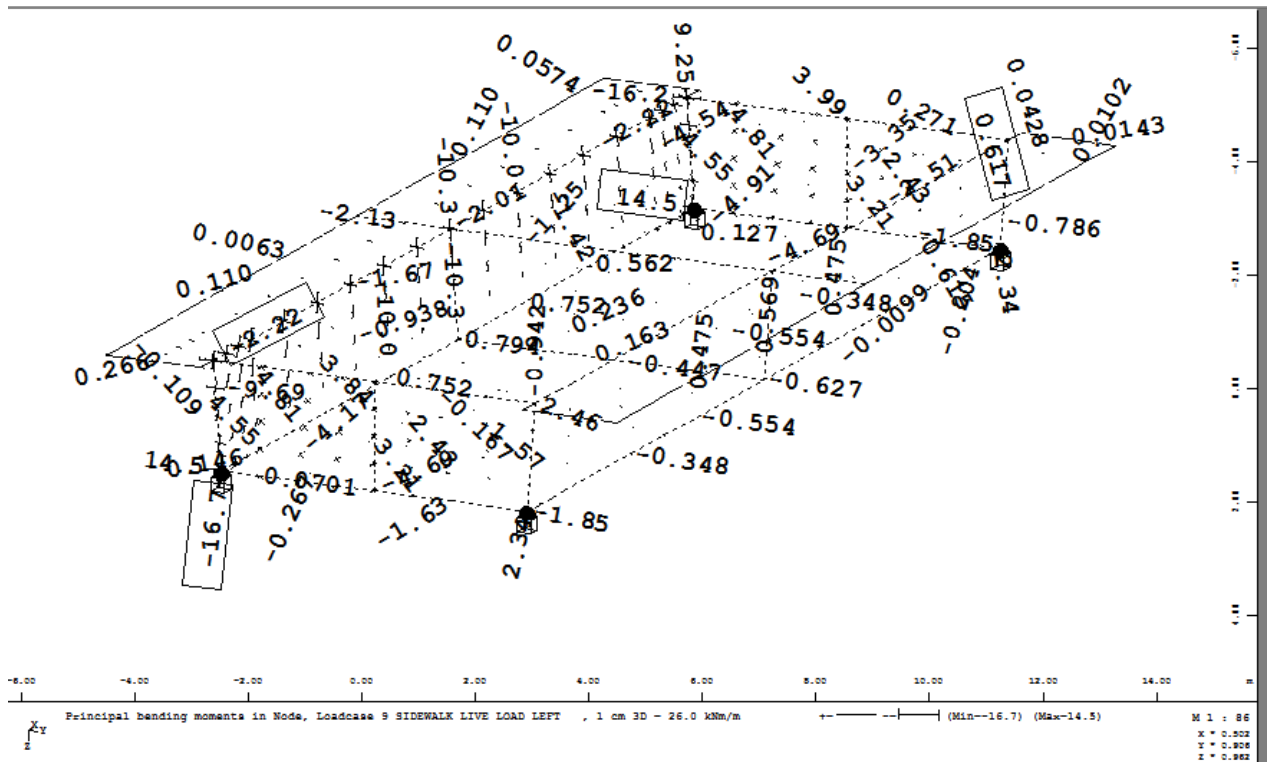
LC5 / Κύριες τάσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ



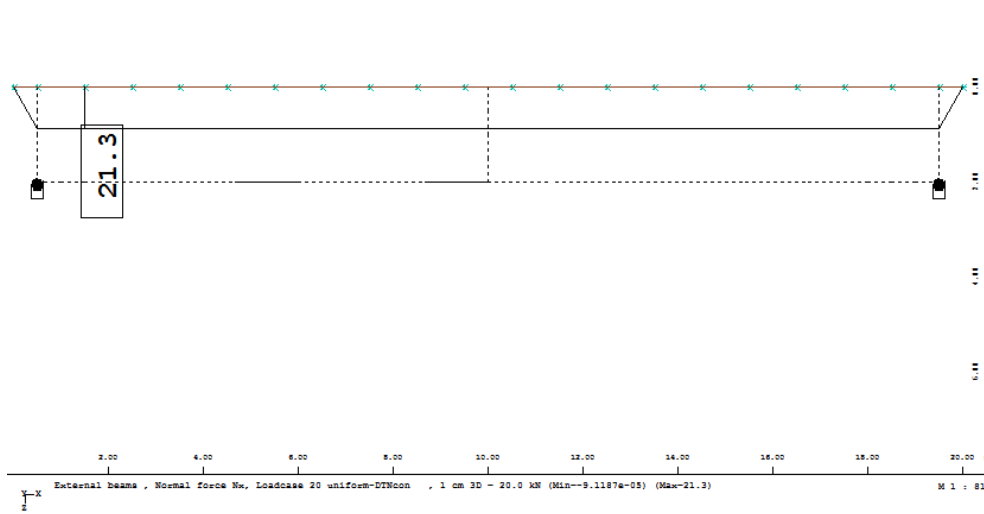
LC9 / Διάγραμμα My στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



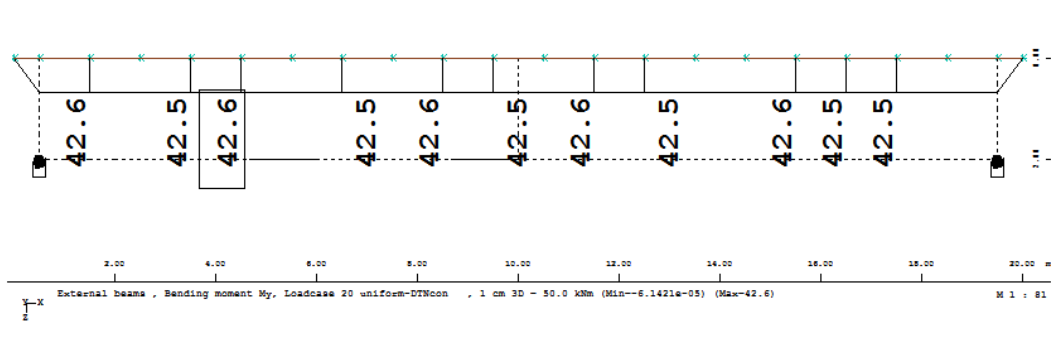
LC9 / Διάγραμμα Mt στο μοντέλο π.σ- πρόγραμμα SIR



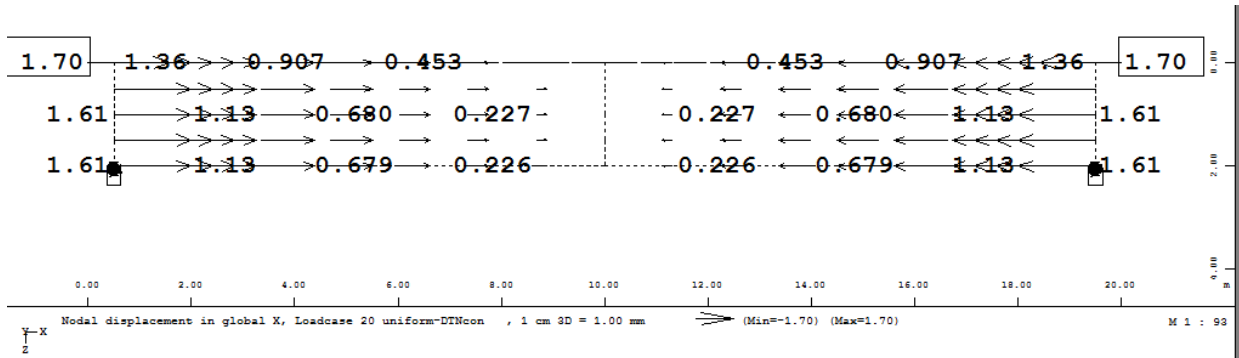
LC9 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ



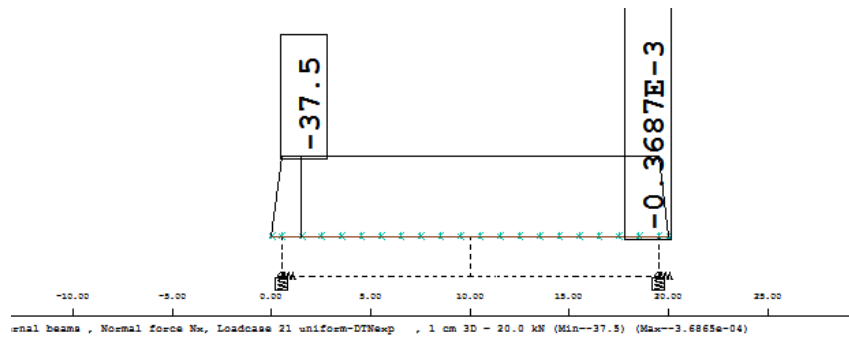
LC20 / Διάγραμμα N_x στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



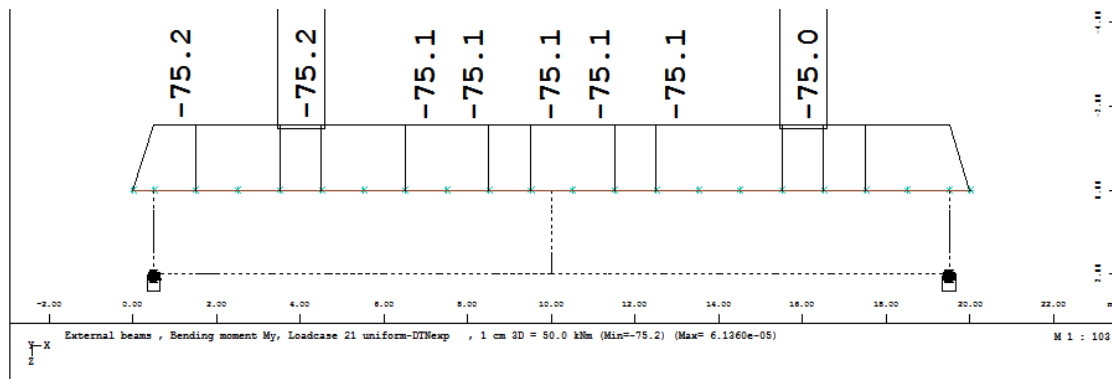
LC20 / Διάγραμμα M_y στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



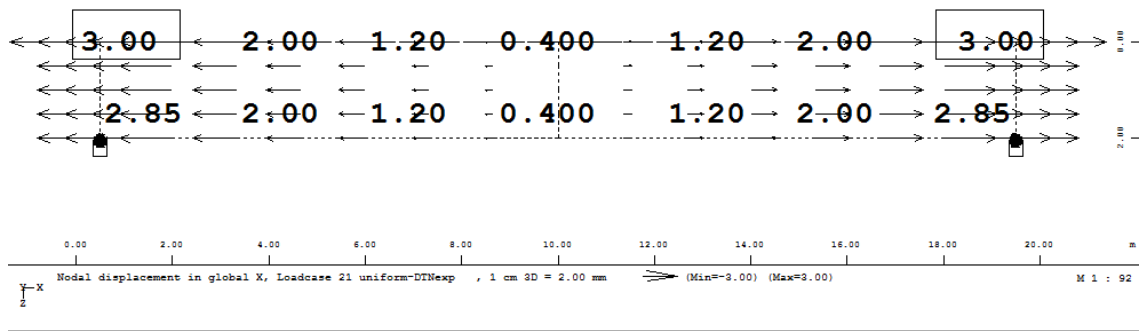
LC20 / Οριζόντιες μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



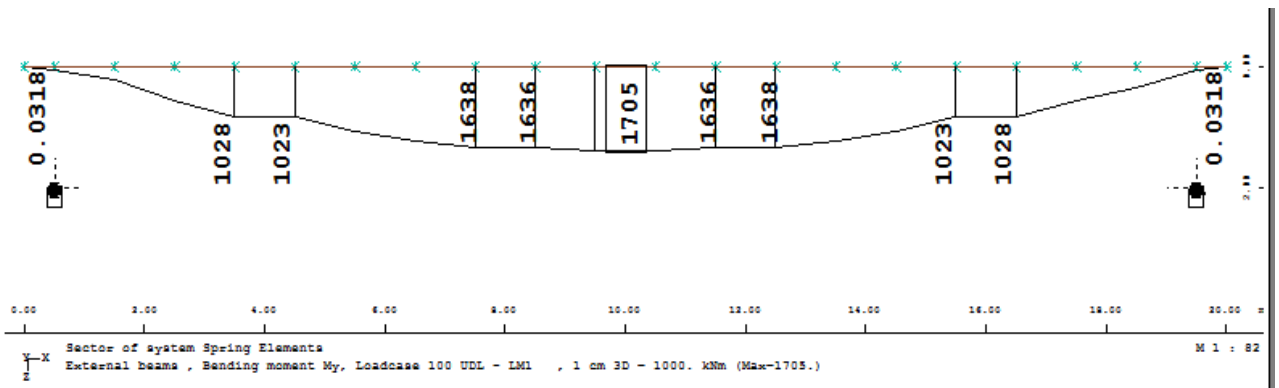
LC21 / Διάγραμμα N_x στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



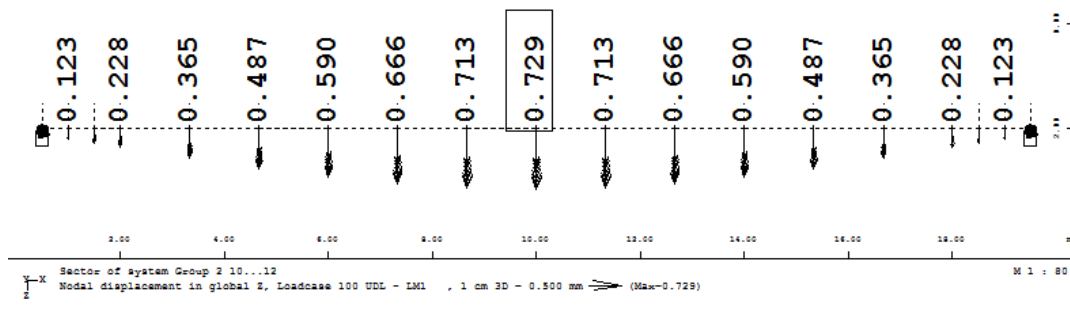
LC21 / Διάγραμμα M_y στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



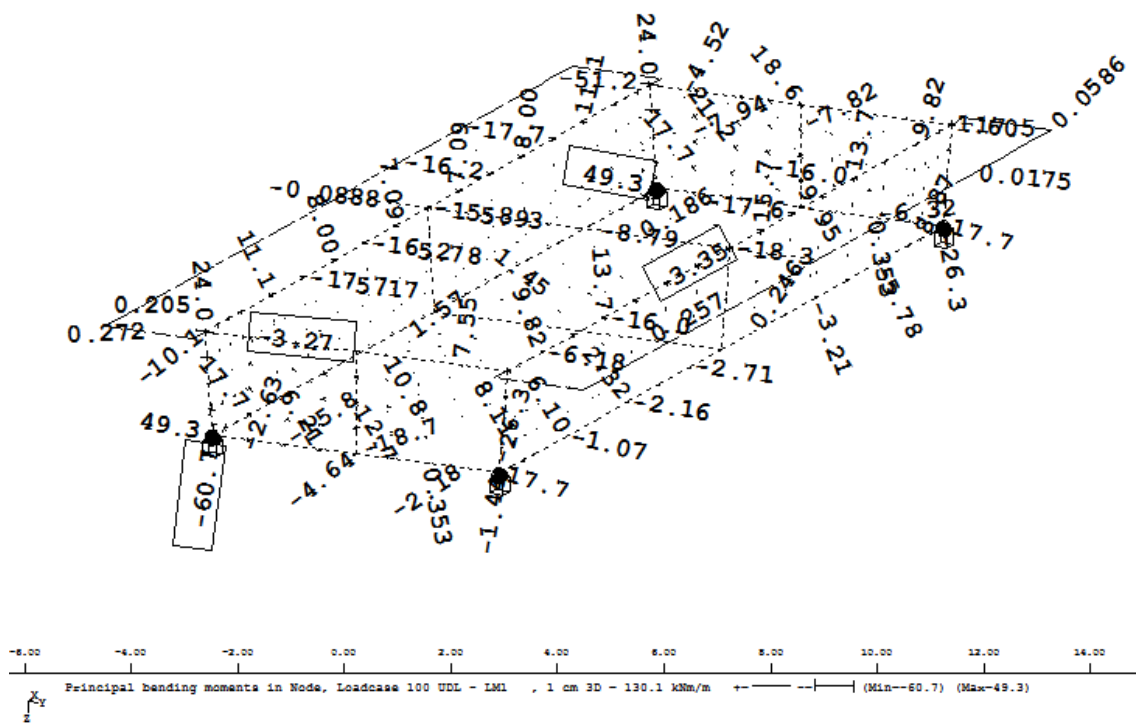
LC21 / Οριζόντιες μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



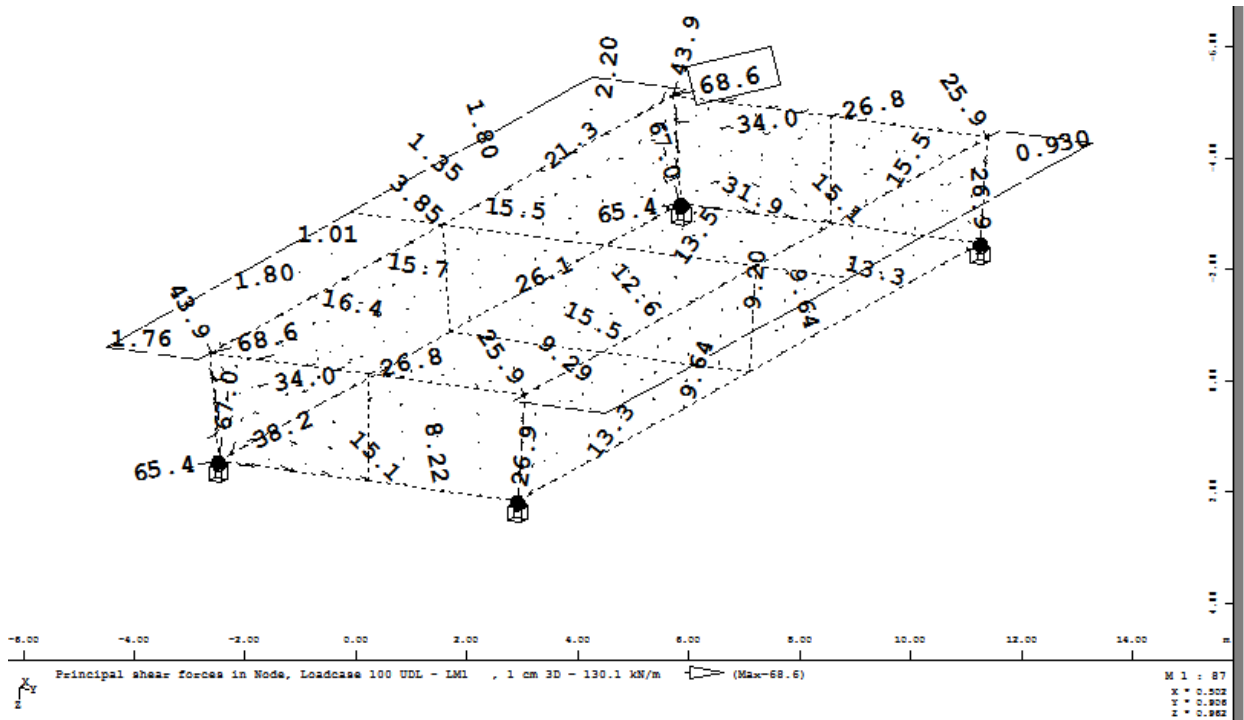
LC100 / Διάγραμμα My στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



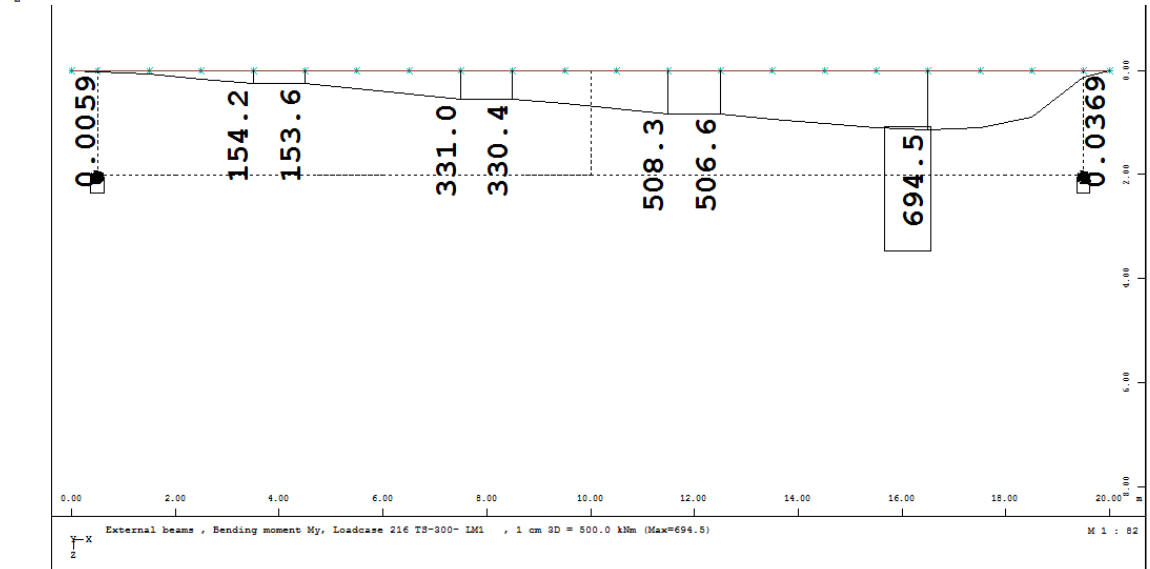
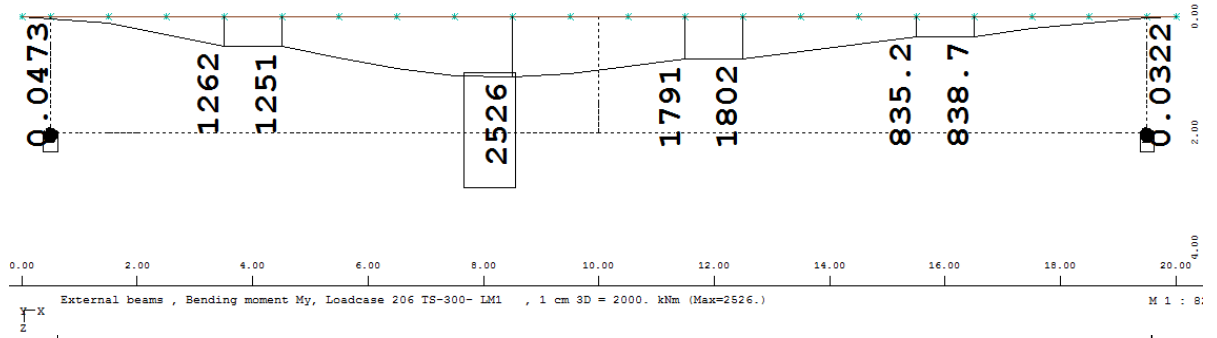
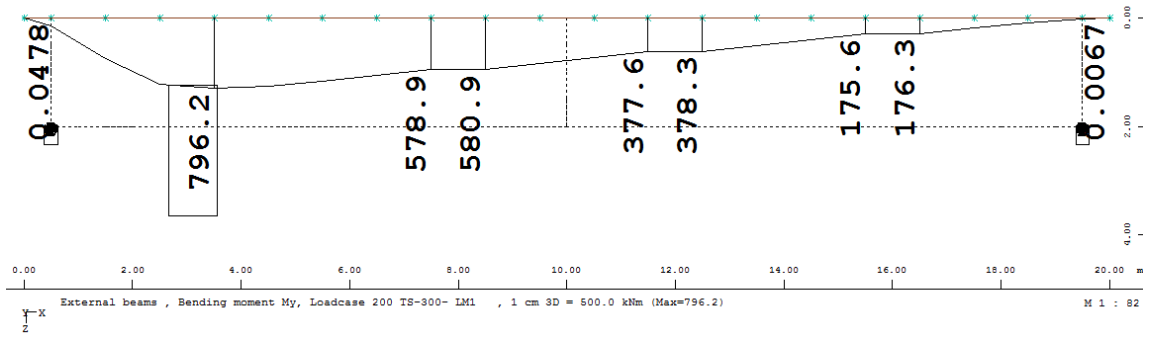
LC100 / Μετατοπίσεις στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



LC100 / Κύριες καμπτικές ροπές στοιχείων στο μοντέλο π.σ



LC100 / Διατμητικές τάσεις στοιχείων στο μοντέλο π.σ

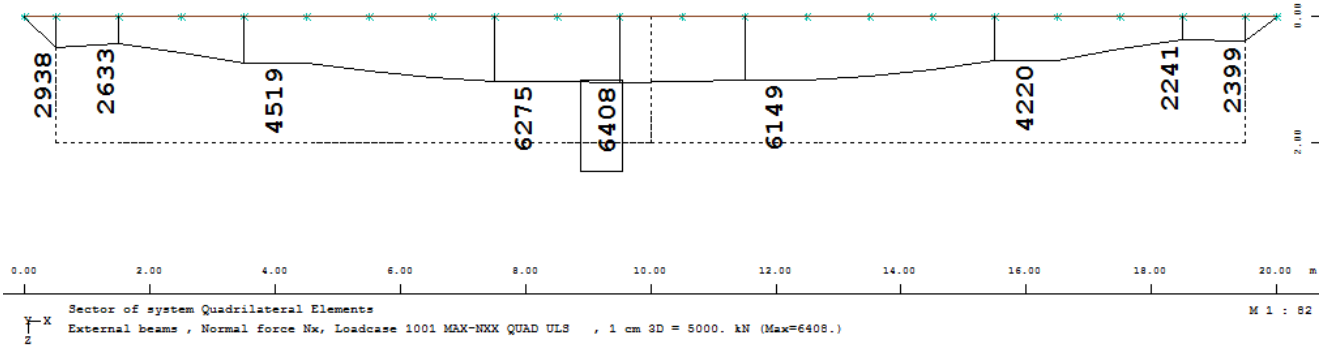


LC200 / Διαγράμματα My στο μοντέλο π.σ για διάφορες θέσεις του TS- πρόγραμμα SIR

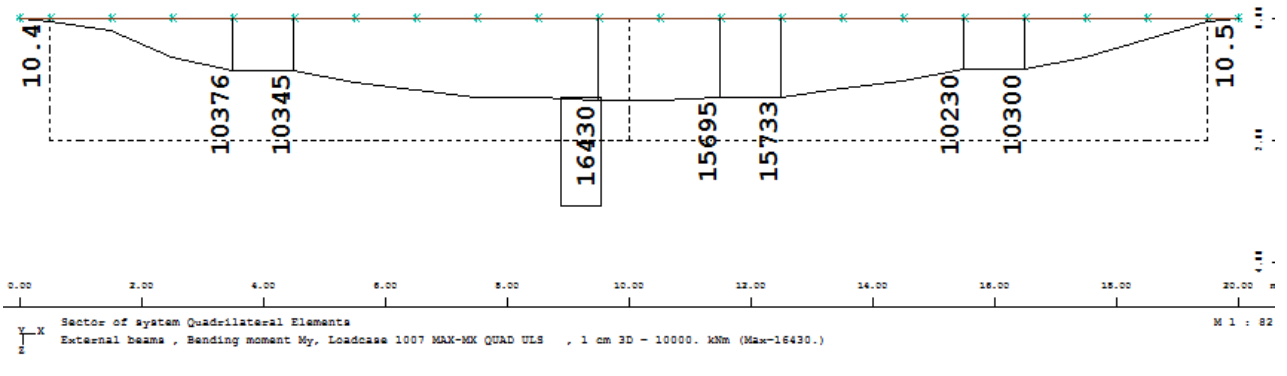
Eigenvalues

No.	LC	λ [rad ² /sec ²]	error [-]	ω [rad/sec]	f [Hz]	T [sec]	ξ [%]	Meff			participation			
								X[%]	Y[%]	Z[%]	X[%]	Y[%]	Z[%]	
1	9000	6.0091E+01	0.0E+00	7.752	1.234	0.811	5.000	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
2	9001	6.0141E+01	0.0E+00	7.755	1.234	0.810	5.000	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
3	9002	1.2811E+02	0.0E+00	11.319	1.801	0.555	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	9003	4.2242E+03	0.0E+00	64.994	10.344	0.097	5.000	0.0	0.0	71.9	0.0	0.0	0.0	71.9
5	9004	1.0058E+04	0.0E+00	100.290	15.962	0.063	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	9005	2.4227E+04	0.0E+00	155.651	24.773	0.040	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	9006	2.7293E+04	0.0E+00	165.206	26.293	0.038	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	9007	3.4144E+04	0.0E+00	184.780	29.409	0.034	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	9008	3.9405E+04	0.0E+00	198.507	31.593	0.032	5.000	0.0	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
10	9009	4.2270E+04	1.1E-14	205.596	32.722	0.031	5.000	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
11	9010	4.4130E+04	2.2E-12	210.072	33.434	0.030	5.000	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
12	9011	4.4814E+04	1.5E-12	211.694	33.692	0.030	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	9012	4.7262E+04	1.8E-12	217.399	34.600	0.029	5.000	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
14	9013	5.5481E+04	5.8E-11	235.545	37.488	0.027	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	9014	6.8251E+04	2.4E-07	261.250	41.579	0.024	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	9015	7.3420E+04	7.7E-05	270.960	43.125	0.023	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	9016	7.9728E+04	5.7E-06	282.362	44.939	0.022	5.000	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
18	9017	8.1087E+04	6.0E-06	284.757	45.321	0.022	5.000	0.0	0.0	13.9	0.0	0.0	0.0	13.9
19	9018	9.6710E+04	3.1E-03	310.983	49.494	0.020	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	9019	9.8623E+04	2.0E-02	314.043	49.981	0.020	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21		1.0216E+05	8.3E-03	319.632	50.871	0.020	Σ (%) ¹	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0	93.3	100.0

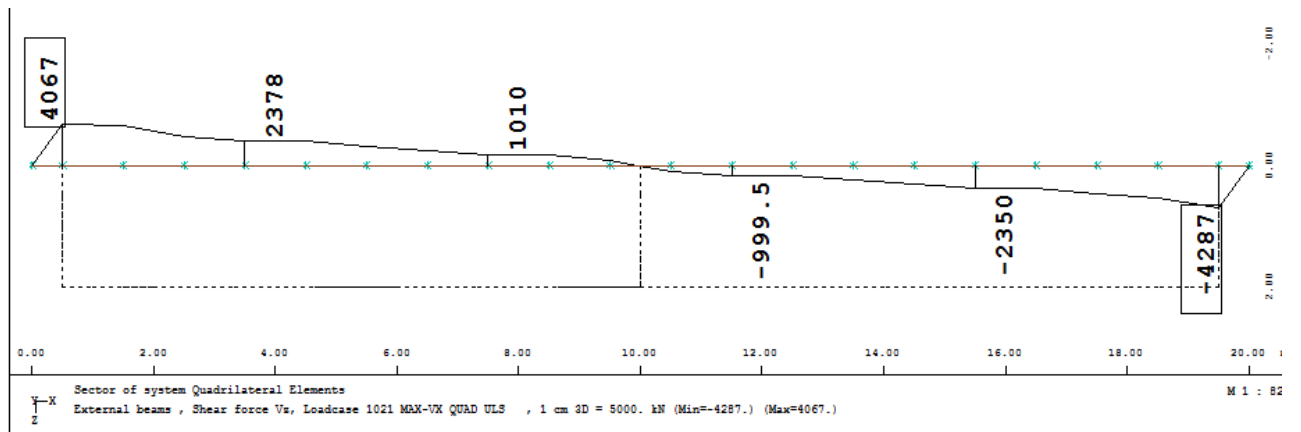
Πίνακας με Ιδιομορφές στο μοντέλο π.σ



Περιβάλλουσα Αξονικής για την ΟΚΑ στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR



Περιβάλλουσα Ροπής κάμψης για την ΟΚΑ στο μοντέλο π.σ.



Περιβάλλουσα Τέμνουσας για την ΟΚΑ στην διεύθυνση Z στο μοντέλο π.σ. – πρόγραμμα SIR

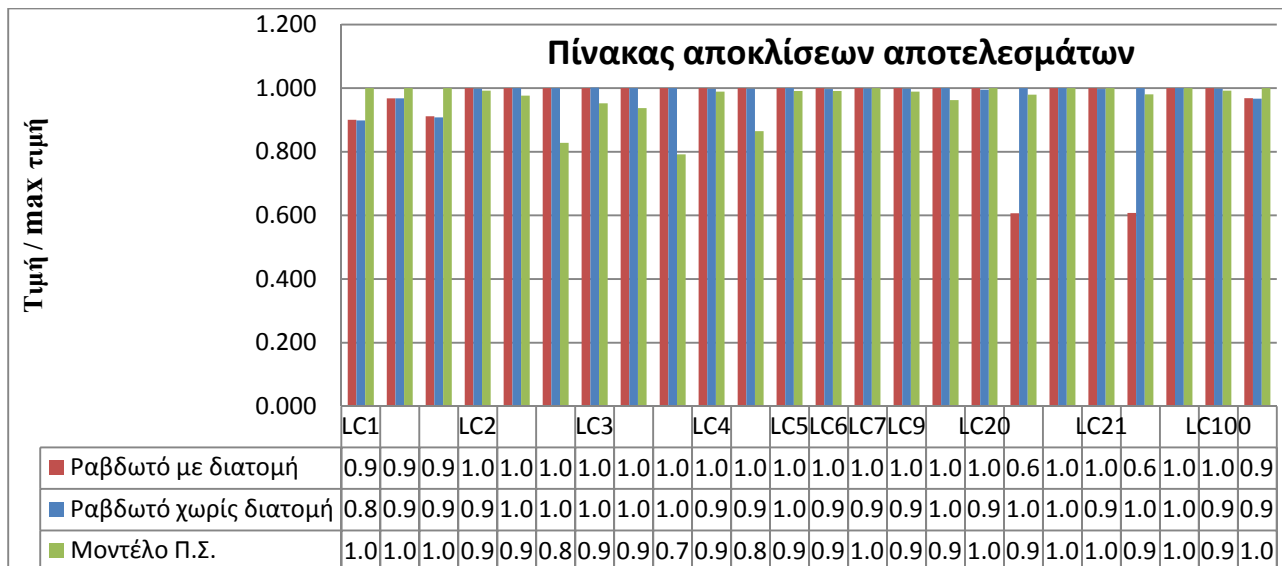
7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα των εντατικών μεγεθών και μετακινήσεων για τα τρία μοντέλα

	Εντατικό μέγεθος	Ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή	Ραβδωτό μοντέλο με διατομή	Μοντέλο Π.Σ.
LC1	My - kNm	6683	6696	7436
	Vz - kN	1529	1529	1580
	u - mm	2.77	2.78	3.05
LC2	My - kNm	807.5	809.1	802.7
	Vz - kN	171	171	167
	u - mm	0.332	0.332	0.275
LC3	My - kNm	420.6	421.4	401.4
	Vz - kN	89.1	89.1	83.5
	u - mm	0.173	0.173	0.137
LC4	My - kNm	1166	1169	1156
	u - mm	0.479	0.48	0.415
LC5	My - kNm	44.9	44.9	44.5
LC6	My - kNm	33.6	33.7	33.4
LC7	Nx - kN	170.9	171.1	171.1
LC9	My - kNm	280.4	280.9	277.9
	Mt - kNm	259.8	259.8	250.1
LC20	Nx - kN	21.2	21.3	21.3
	My - kNm	43.5	26.4	42.6
	u - mm	1.7	1.7	1.7
LC21	Nx - kN	37.4	37.5	37.5
	My - kNm	76.7	46.6	75.2
	u - mm	3	3	3
LC100	My - kNm	1716	1719	1705
	u - mm	0.705	0.706	0.729

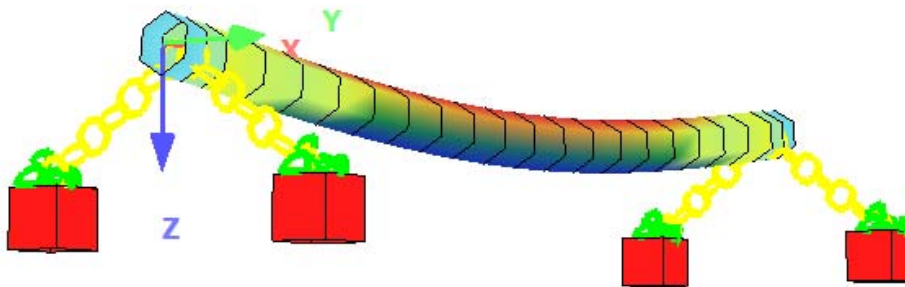
Ακολουθεί διάγραμμα παρουσίασης αποκλίσεων τιμών μεταξύ των τριών μοντέλων.

Η κάθε ράβδος του διαγράμματος είναι ο λόγος της τιμής του εκάστοτε εντατικού μεγέθους κάθε μοντέλου προς τη μέγιστη τιμή μεταξύ των αποτελεσμάτων των 3 μοντέλων.

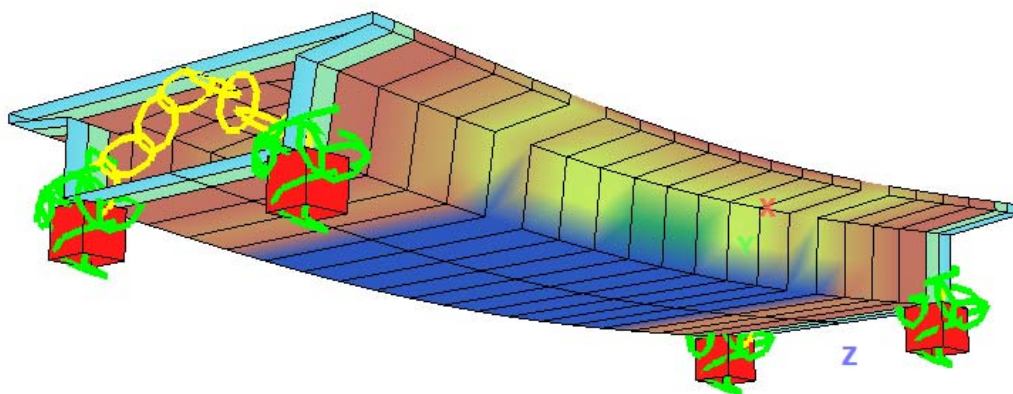


Όπως φαίνεται γενικώς τα αποτελέσματα είναι κοντινά. Το ίδιο βάρος του φορέα ήταν αναμενόμενο να προκύψει μεγαλύτερο στο μοντέλο π.σ. λόγω του τρόπου που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί ο φορέας. Στις θέσεις συναρμογής των κορμών με την άνω και κάτω πλάκα της διατομής έχουμε κοινή θέση π.σ. κορμού και πλάκας άρα και διπλό βάρος αφού κανένα από τα δύο δεν ορίστηκε ως αβαρές. Γενικώς το μοντέλο π.σ. έδωσε ευμενέστερα αποτελέσματα από τα ραβδωτά.

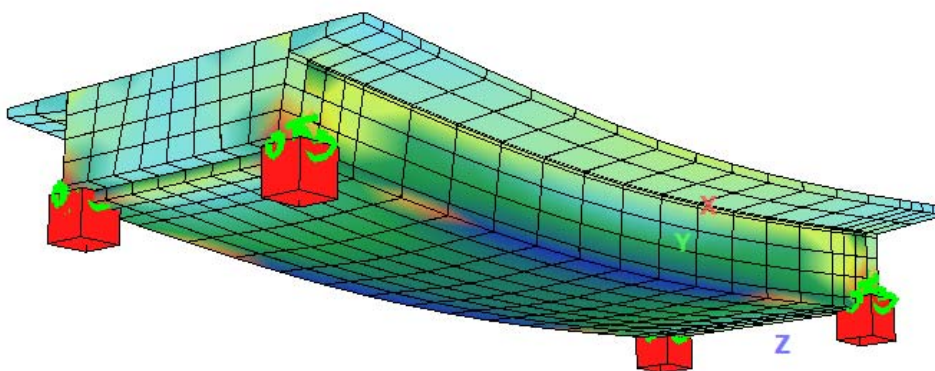
Ακολουθούν εικόνες που έχουν παραχθεί από το πρόγραμμα Animator του Sofistik που παρουσιάζει γραφικά το μοντέλο και τον τρόπο που παραμορφώνεται για κάθε καταπόνηση.



Κάμψη υπό το IB για το ραβδωτό μοντέλο χωρίς διατομή.

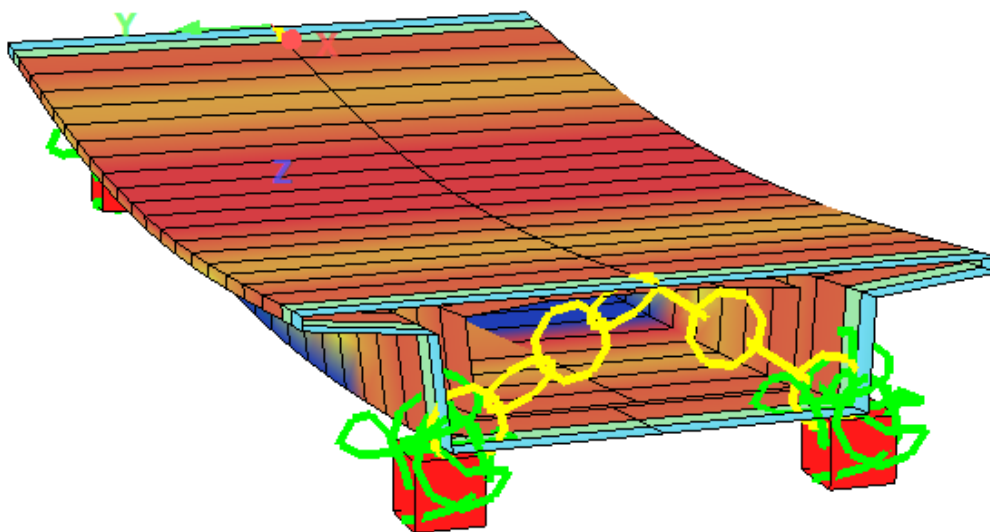


Κάμψη υπό το IB για το ραβδωτό μοντέλο με διατομή.

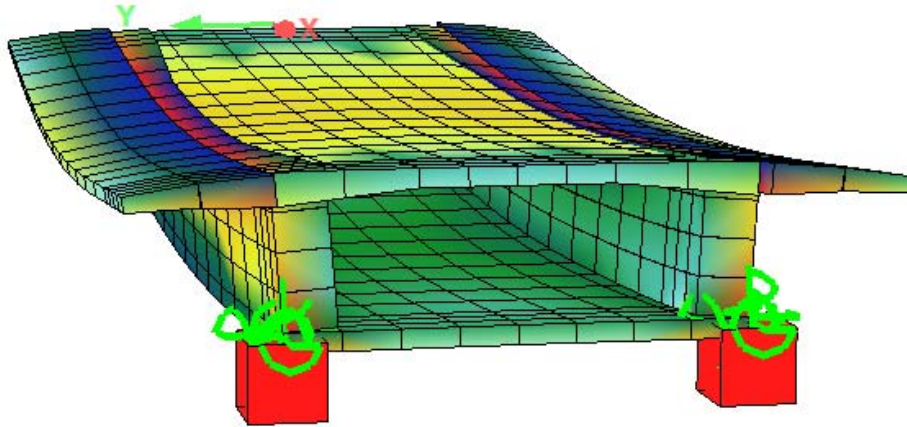


Κάμψη υπό το IB για το μοντέλο π.σ.

Στις παραπάνω εικόνες το κάτω πέλμα του φορέα στα ραβδωτά φαίνεται ενιαία να εμφανίζει αυξημένες τάσεις ενώ στο μοντέλο π.σ. φαίνεται επιπλέον η συγκέντρωση τάσεων στη συναρμογή των κορμών με το κάτω πέλμα όπως επίσης και στις θέσεις των στηρίξεων.



Παραμόρφωση υπό το φορτίο των πεζοδρομίων για το ραβδωτό μοντέλο με διατομή



Παραμόρφωση υπό το φορτίο των πεζοδρομίων για το μοντέλο π.σ.

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες οι πρόβολοι των πεζοδρομίων στο ραβδωτό δεν παραμορφώνονται σε σχέση με το άνω πέλμα κάτι το οποίο δεν είναι αληθές ενώ στο μοντέλο π.σ. μια τέτοια σχετική παραμόρφωση λαμβάνεται υπ' όψιν και υπολογίζεται και η συγκέντρωση τάσεων στη θέση της συναρμογής τους.

Από τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν για το κάθε μοντέλο βλέπουμε ότι στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζονται οι τάσεις σε κάθε κόμβο και σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Αυτό μας δίνει πληρέστερη πληροφορία για κάθε σημείο του φορέα, βλέπουμε τις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπως παραδείγματος χάριν στις θέσεις αλλαγής διατομής, πάχους στοιχείων. Μπορούμε να υπολογίσουμε τοπικές παραμορφώσεις και καταπονήσεις όπως πχ των προβόλων του καταστρώματος σε σχέση με την πάνω πλάκα, κάτι που δεν είναι εφικτό στο ραβδωτό μοντέλο με διατομή. Πήραμε αποτελέσματα για τη συμπαγή ζώνη στη θέση των στηρίξεων σε κάθε θέση της διατομής ενώ στα ραβδωτά μοντέλα επειδή η διατομή σε κάθε θέση αντιμετωπίζεται ως απαραμόρφωτη στο επίπεδο της όλες αυτές οι πληροφορίες δεν υπολογίζονται ούτε λαμβάνονται υπ' όψιν αλλά εξετάζεται η συμπεριφορά της διατομής συνολικά σαν ένα ενιαίο σώμα. Οι πληροφορίες όμως που παράγονται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι πολλές και σύνθετες και απαιτούν κατάλληλη εμπειρία από το μελετητή ώστε να μπορέσει να τις ελέγξει και να τις αξιολογήσει σωστά διότι είναι ευκολότερο σε σχέση με αυτά του ραβδωτού να μας παραπλανήσουν σε περίπτωση μοντελικού λάθους.

Συμπερασματικά, αναλόγως τους στόχους της κάθε μελέτης πρέπει να επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος προσομοίωσης συνυπολογίζοντας ανάγκη σε ακρίβεια αποτελεσμάτων και υπολογιστικό κόστος. Η εμπειρία του μελετητή είναι πάντα απαραίτητη ώστε τώρα που τα υπολογιστικά εργαλεία έχουν πληθύνει να μπορεί να αξιολογεί κάθε φορά τα αποτελέσματα που είναι σημαντικά και κρίσιμα για τη σωστή διαστασιολόγηση του φορέα.

8 Βιβλιογραφία / Πηγές

- [1] Structural Analysis. Solid Mechanics and Its Applications/ Bauchau-Craig
- [2] http://web.mit.edu/16.20/homepage/7_SimpleBeamTheory/SimpleBeamTheory_files/module_7_no_solutions.pdf
- [3] Government Engineering College, Bhavnagar. Civil Engineering Department / Advanced Engineering Mathematics Topic:- Application of Ordinary Differential Equation Elastic Beams / Nitin Charel – Kartik Hingol – Bhavik Shah – Yash Shah – Digvijay Solank
- [4] Aamer Haque, Introduction to Timoshenko Beam Theory
- [5] Generalised Beam Theory / Instituto Superior Técnico, ICIST, Universidade de Lisboa, March 2016
- [6] Πέτρος Α. Καρύδης, «Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές», ΕΜΠ - Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών
- [7] Δρ. Πασχάλης Γκότσης, «Πεπερασμένα στοιχεία», εκδόσεις ΖΗΤΗ, Δεκέμβριος 2004