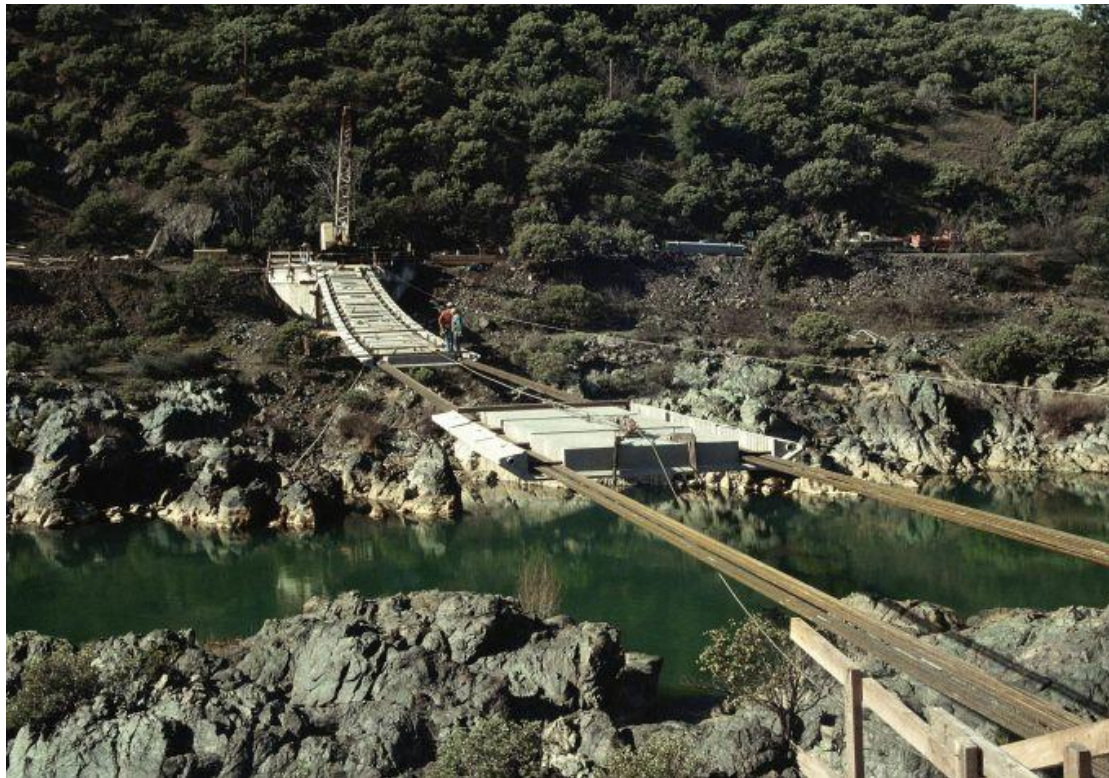




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΤΑΙΝΙΟΔΙΑΔΡΟΜΩΝ
(STRESS RIBBON) ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΦΥΡΩΝ ΕΛΑΦΡΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**



ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ-01107069

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Βιντζηλαίου Ε. , Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Σιγάλας Ι.Ν. , Επιστημονικός συνεργάτης Ε.Μ.Π.**

ΑΘΗΝΑ , ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ
ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ
ΤΑΙΝΙΟΔΙΑΔΡΟΜΩΝ (STRESS RIBBON)
ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΦΥΡΩΝ
ΕΛΑΦΡΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ»**

Του Φοιτητή

Ηλιόπουλου Σωκράτη

Επιβλέπων

Σιγάλας Ιωάννης, Ε.Μ.Π, Σχολή Πολιτικών
Μηχανικών

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Copyright © 2012 , Ηλιόπουλος Σωκράτης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η διανομή, η αναπαραγωγή, η μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό (φωτοτυπία , εκτύπωση , μικροφίλμ , ...) , χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα.

Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Η έγκριση της διπλωματικής αυτής εργασίας από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. Ο συγγραφέας γνωρίζει ότι αυτός είναι ο κύριος υπεύθυνος για ό,τι δηλώνεται στην παρούσα εργασία και καταβάλει κάθε προσπάθεια για να διαβεβαιώσει την ορθότητα τους.

Σε περίπτωση που θέλετε να επικοινωνήσετε με τον συγγραφέα, για θέματα σχετικά με την εργασία, μπορείτε να απευθυνθείτε στη διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου socili069@hotmail.com .

Εξώφυλλο : Πεζογέφυρα stress ribbon στον ποταμό Sacramento , Καλιφόρνια , Αμερική

“Διάλεξε ένα επάγγελμα που σου αρέσει και δεν θα ξανά χρειαστεί να δουλέψεις στη ζωή σου.”

Κομφούκιος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ix
ΣΥΝΟΨΗ	x
ABSTRACT	xi
ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	xii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xiii
ΣΥΜΒΟΛΑ	xix

1. ΘΕΩΡΙΑ STRESS RIBBON

1.1 Ιστορική αναδρομή	2
1.2 Ορισμοί	3
1.3 Κίνητρα ανάπτυξης	4
1.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα μεθόδου	5
1.5 Πεδίο εφαρμογής	8
1.6 Συστατικά μέρη γέφυρας stress-ribbon-περιγραφή- ιδιαιτερότητες τους	
1.6.1 Σύστημα θεμελίωσης	9
1.6.2 Μεσόβαθρα-Ακρόβαθρα	13
1.6.3 Κατάστρωμα	
1.6.3.1 Καλώδια ανάρτησης (bearing tendons)	16
1.6.3.2 Προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι (precast segments)	
1.6.3.3 Επιτόπου σκυρόδεμα δεύτερης φάσης (cast-in-place concrete)	19
1.6.3.4 Τένοντες προέντασης (Prestressing tendons)	19
1.7 Μορφές στατικών συστημάτων-φορέων	
1.7.1 Ολόσωμες γέφυρες	22
1.7.2 Γέφυρες stress-ribbon	23
1.8 Κατασκευαστική διαδικασία	26

2. ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ-ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Δράσεις-συνδυασμοί δράσεων	34
2.2 Μέθοδοι υπολογισμού	
2.2.1 Αναλυτικές	35
2.2.2 Απλοποιημένες μέθοδοι-προσεγγιστικές αναλυτικές	51
2.2.3 Εξελιγμένες αριθμητικές μέθοδοι	61
2.3 Διαστασιολόγηση επιμέρους στοιχείων	62

2.4 Μελέτη σε στάδια	
2.4.1 Φάση κατασκευής	63
2.4.2 Φάση λειτουργίας	64
2.5 Θέματα τεχνολογίας	67
2.6 Θέματα δυναμικής	69
3. ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ABAQUS	
3.1 Συστολή ξηράνσεως	73
3.2 Ερπυσμός και χαλάρωση σκυροδέματος	73
3.2.1 Υπολογισμός του συντελεστή ερπυσμού	74
3.2.2 Μέθοδοι υπολογισμού των χρονικά μεταβαλλόμενων τάσεων λόγω ερπυσμού	76
3.2.2.1 Μέθοδος του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας (Effective Modulus Method – EM)	76
3.2.2.2 Μέθοδος του ρυθμού ερπυστικών παραμορφώσεων (Rate of Creep Method - RM)	77
3.2.2.3 Μέθοδος της υπέρθεσης (Superposition Method)	78
3.2.3 Εισαγωγή του ερπυσμού στο Abaqus με χρήση της εντολής *CREEP	79
3.2.4 Εισαγωγή του ερπυσμού στο Abaqus με χρήση της εντολής *RELAXATIONAL TEST DATA	81
3.3 Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο	83
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
4.1 Δισδιάστατο μοντέλο γέφυρας stress ribbon με χρήση Abaqus	
4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	87
4.1.2 Ανάλυση σε φάσεις	88
4.2 Τρισδιάστατο μοντέλο γέφυρας stress ribbon με χρήση Abaqus	
4.2.1 PARTS	93
4.2.2 MATERIALS	96
4.2.3 STEPS	98
4.2.4 LOADS AND BOUNDARY CONDITIONS	101
4.2.5 Αποτελέσματα	
4.2.5.1 Μετατοπίσεις	104
4.2.5.2 Απαραμόρφωτος κάναβος στα στάδια της ανάλυσης	111

4.2.5.3	Ιδιομορφές	112
4.2.5.4	Τάσεις – Εντάσεις	115
4.3	Τρισδιάστατο μοντέλο γέφυρας stress ribbon με το SOFISTIK	
4.3.1	Εισαγωγή	117
4.3.2	Αποτελέσματα	
4.3.2.1	Μετακινήσεις	118
4.3.2.2	Καμπτικές ροπές	119
4.3.2.3	Αξονική δύναμη καλωδίου	120
4.3.2.4	Οριζόντια δύναμη στη στήριξη	121
4.3.2.5	Άνεμος	123
4.3.2.6	Ιδιομορφές-ιδιοσυχνότητες	124
4.3.2.7	Τάσεις	125
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ		
ΜΕΛΕΤΗ		
5.1	Συμπεράσματα	128
5.2	Συστάσεις για περαιτέρω μελέτη	129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		131
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΡΙΠΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ		
ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ		134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ		
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ		136
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ SOFISTIK		137

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ξεκινώντας μια διπλωματική εργασία όλα φαίνονται εύκολα και απλά , εξαιτίας του ενθουσιασμού που υπάρχει για την εξερεύνηση ενός καινούριου κόσμου , μιας νέας , διαφορετικής ιδέας. Ο χρόνος φαντάζει αρκετός για την εκπλήρωση της διατριβής. Στην πορεία όμως και δυσκολίες εμφανίζονται αλλά και ο χρόνος πιέζει. Χάριν όμως στη βοήθεια και συμπαράσταση πολυάριθμων ανθρώπων όλες αυτές οι δυσκολίες μπορούν να επιλυθούν. Ξεκινώντας λοιπόν θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Σιγάλα , ο οποίος υπήρξε όχι μόνο επιβλέπων και εμπνευστής της ιδέας της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και ο άνθρωπος που με εμπιστεύτηκε και με ενθάρρυνε σε κάθε βήμα της εργασίας. Η βοήθεια του τόσο σε θεωρητικό όσο και αναλυτικό επίπεδο ήταν συνεχής και ανεκτίμητη. Δεύτερον κατά σειρά προτεραιότητας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Έλληνα διδάκτορα του ελεύθερου πανεπιστημίου Βρυξελλών (Vrije Universiteit Brussels) Ιωάννη Βασιλάκο για την αμέριστη και ανιδιοτελή βοήθειά του στην εξοικείωσή μου με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Στον άνθρωπο αυτό, που έχει διακριθεί στο πανεπιστήμιο των Βρυξελλών για τη συνεισφορά του στις inverse μεθόδους για το χαρακτηρισμό της ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών και που είχα την τύχη να γνωρίσω στα πλαίσια της πρακτικής μου άσκησης στο ίδιο πανεπιστήμιο, οφείλεται η ακριβής προσομοίωση της κατασκευαστικής ακολουθίας καθώς και των ιδιοτεροτήτων του προβλήματος που καλούμαι στην παρούσα διπλωματική εργασία να διερευνήσω και να φέρω εις πέρας . Θερμά ευχαριστώ επίσης στο Χρήστο Γιαννέλο για τη βοήθεια του στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Sofistik. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω και στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο που στα 5 χρόνια των σπουδών μου κατόρθωσε μέσα από αξιόλογους καθηγητές να μου δώσει το θεωρητικό υπόβαθρο, τη δυνατότητα αναλυτικής και συνθετικής σκέψης αλλά και την κρίση που απαιτείται για την εξάσκηση του επαγγέλματος με ορθότητα, αξιοπρέπεια και ασφάλεια. Ευχαριστώ επίσης τους φίλους και συμφοιτητές μου για τις αέναες συζητήσεις και προβληματισμούς σε θέματα που άπτονται άμεσα της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού. Θερμά ευχαριστώ στην οικογένεια μου , η οποία εκτός από την οικονομική υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών πρόσφερε ηθική και ψυχολογική υποστήριξη σε κάθε μου βήμα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τη Χρυσούλα , η αγάπη και η υποστήριξη της οποίας ήταν καθοριστική για την εξέλιξη μου τα 4 τελευταία χρόνια των σπουδών ιδιαίτερα δε στη δύσκολη φάση της αποπεράτωσης της διπλωματικής μου εργασίας. Για όλους τους παραπάνω ανθρώπους που με σχημάτισαν και εξακολουθούν να με σχηματίζουν ως προσωπικότητα αισθάνομαι ιδιαίτερα ευγνώμων.

Ηλιόπουλος Σωκράτης ,

Αθήνα 2012

ΣΥΝΟΨΗ

Μια γέφυρα με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους, όπως μεταφράζεται στα ελληνικά η γέφυρα stress ribbon , είναι μια πολύ λεπτή και εύκαμπτη κατασκευή στην οποία το κατάστρωμα αναρτάται από φέροντα καλώδια που περνούν μέσα από τη διατομή και τα οποία με τη σειρά τους έχουν αναρτηθεί από δύο σταθερά σημεία στα ακρόβαθρα. Η απόκριση μιας τέτοιας γέφυρας είναι σύνθετη , εξαιτίας της συνδυασμένης δράσης της γεωμετρικής μη γραμμικότητας , της προέντασης , της εξάρτησης της συμπεριφοράς των υλικών από φαινόμενα εξελισσόμενα με το χρόνο (ερπυσμός- συστολή ξηράνσεως-αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος με το χρόνο) καθώς και της κατασκευαστικής ακολουθίας. Παρ' όλα αυτά , ένας αξιοσημείωτος αριθμός από γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους έχει κατασκευασθεί από τη στιγμή της εμφάνισης αυτού του νέου κατασκευαστικού τύπου τη δεκαετία του 1960. Στην παρούσα διπλωματική εργασία , επιχειρείται η ανάλυση μιας stress ribbon πεζογέφυρας ενός ανοίγματος , συνολικού μήκους 99 m που βασίζεται σε μια ήδη κατασκευασμένη γέφυρα αυτού του είδους. Η ανάλυση πραγματοποιείται με το εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/cae , όπου λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων ανάρτησης , αποτυπώνεται σε μεγάλη συμφωνία με την πραγματικότητα και με αρκετή λεπτομέρεια η διαδικασία κατασκευής σε βήματα , προσομοιώνεται με ακρίβεια η επίδραση των φαινομένων ερπυσμού και αύξησης του μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος , φαινομένων δηλαδή που εξελίσσονται με το χρόνο , μέσω της βελτίωσης του νόμου του υλικού του σκυροδέματος. Τα μεγέθη που υπολογίζονται και είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στην παρούσα εργασία είναι οι μετατοπίσεις τόσο του καλωδίου όσο και της συνολικής κατασκευής σε κάθε βήμα της ανάλυσης , καθώς επίσης και η εξέλιξη των τάσεων σε κάθε μέλος της κατασκευής , όπως και οι εντάσεις , οι αντιδράσεις στις στηρίξεις και οι ροπές κάμψης κυρίως στα ακρόβαθρα. Προκειμένου να προσομοιωθεί με ακρίβεια η επίδραση του ερπυσμού στη γέφυρα προσομοιώνεται αρχικά ένα απλό παράδειγμα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και τα αποτελέσματα του συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από τη μέθοδο της υπέρθεσης με επίλυση στο Matlab. Στη συνέχεια , πριν την κατασκευή και ανάλυση του τρισδιάστατου προσομοιώματος της πεζογέφυρας στο Abaqus , πραγματοποιείται η προσομοίωση μιας διαφορετικής γέφυρας stress ribbon σε δύο διαστάσεις , τα αποτελέσματα της οποίας σχεδόν ταυτίζονται με αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση της ίδιας γέφυρας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων DIANA , όπως παρουσιάζονται στο διαδίκτυο. Δεδομένης της δυσκολίας προσομοίωσης της ενεργοποίησης των στοιχείων επόμενης φάσης στο αντίστοιχο βήμα της ανάλυσης και της δυσκολίας ακριβούς προσομοίωσης της προέντασης στο Abaqus επιχειρείται , τέλος , στην παρούσα διπλωματική εργασία , η προσομοίωση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μιας απλής γέφυρας stress ribbon με τη βοήθεια του εμπορικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Sofistik.

ABSTRACT

A stress ribbon bridge is a very flexible and slender structure in which the deck hangs in a suspended cable like form. These cables are called bearing cables, come through the cross section of the deck and are suspended by two fixed points in the abutments. The structural response of this kind of structure is complex, because of the combined effects of geometric nonlinearity, prestressing, time-dependent materials behavior (creep and shrinkage of concrete, development of Young's modulus with time) and finally because of the construction process. However, since the introduction of this new type of structure in the 1960's, a considerable number of stress ribbon bridges have been built. In the current diploma thesis, I am trying to analyze a stress ribbon footbridge of one span and total length of 99 m that is based on a constructed bridge of such a type. For the analysis, the commercial Finite Element Software (FEM) Abaqus/cae was used, in order a) to consider the geometric non linear behavior of the bearing cables, b) to depict with great detail and not far from reality the construction process and c) to simulate precisely the long term effects of creep to concrete and the development of Young's modulus of concrete with time by improving the material model for the concrete. Results considered to be of special interest, in this thesis, were the deformation of either the bearing cables in the beginning or of the whole structure later in every step of the analysis, the development of stresses in each member of the structure, the section forces and moments, reaction forces and moments in the abutments. In order to be sure that creep is simulated well for this bridge with Abaqus a simple example was analyzed first and its results were compared with the theoretical method of superposition for the calculation of creep strains using Matlab. Then, before the 3-D simulation of the stress ribbon bridge, a 2-D stress ribbon bridge was analyzed with Abaqus. The results showed a great convergence with the ones from the same analysis using DIANA as FE software. As many difficulties occurred from the analysis of the construction process and the prestressing of the prestressing tendons with the use of Abaqus I tried to simulate a simple stress ribbon pedestrian bridge and present the results with the help of another commercial finite element software called Sofistik.

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση , με στόχο τη γνωριμία , ενός νέου είδους γέφυρας που απευθύνεται σε πεζούς και ονομάζεται stress ribbon pedestrian bridge , ή γέφυρα με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους , όπως μεταφράζεται στα ελληνικά. Μέσα από αυτή την εργασία ο αναγνώστης αναγνωρίζει και κατανοεί τις δυσκολίες της ανάλυσης μιας γέφυρας αυτού του είδους, οι οποίες αφορούν στη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων ανάρτησης (bearing tendons) , στην επιβολή της προέντασης , στην κατασκευή της γέφυρας σε φάσεις , στα φαινόμενα που εξελίσσονται με το χρόνο. Για όλους τους παραπάνω λόγους , καθίσταται σαφές , ότι είναι απαραίτητη η ανάλυση μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους , με τη βοήθεια ενός ισχυρού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Για τις ανάγκες της διπλωματικής , λοιπόν , γίνεται χρήση του εμπορικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Abaqus , αναλύονται κάποιες βασικές εντολές του προγράμματος , δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον αναγνώστη να εξοικειωθεί με αυτό , ώστε στη συνέχεια να είναι σε θέση όχι μόνο να παρακολουθήσει τα αποτελέσματα , αλλά και να επιλύσει ο ίδιος τις δυσκολίες του προβλήματος , να βελτιώσει τη λύση του ή ακόμα και να προχωρήσει σε μεγαλύτερο βάθος και εύρος την ανάλυση μιας γέφυρας stress ribbon. Διαβάζοντας τα αποτελέσματα , παρατηρεί κανείς την επίδραση της σταδιακής κατασκευής στις μετατοπίσεις , στην εξέλιξη των τάσεων , αλλά και των εντάσεων , των αντιδράσεων στις στηρίξεις , ώστε να είναι σε θέση να βελτιστοποιήσει ως προς την κατασκευαστική ακολουθία , τη δύναμη προέντασης , την ποσότητα του υλικού ακόμα και το είδος του χρησιμοποιούμενου υλικού. Καθ' ότι ο ερπυσμός , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως , είναι ένα ιδιαίτερο φαινόμενο της γέφυρας αυτής , επιδιώκεται προσωπικά η ορθή προσομοίωση του μέσω της ανάλυσης ενός απλού παραδείγματος με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η μετάβαση σε ένα σύνθετο , τρισδιάστατο προσομοίωμα γέφυρας stress ribbon γίνεται αφού πρώτα εξεταστεί ένα δισδιάστατο , απλό μοντέλο stress ribbon γέφυρας και αξιολογηθεί η δυνατότητα προσομοίωσης μιας τέτοιας γέφυρας με το πρόγραμμα Abaqus. Έτσι και στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται πρώτα η ανάλυση ενός 2-D μοντέλου και τα αποτελέσματα του συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση με διαφορετικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Αφού τα δύο προγράμματα παρουσιάζουν σύγκλιση αποτελεσμάτων γίνεται η μετάβαση στο σύνθετο προσομοίωμα. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν με μεγαλύτερη αξιοπιστία τα αποτελέσματα που αφορούν στην επιβολή της προέντασης των τενόντων προέντασης επιδιώκεται επίσης η προσομοίωση ενός απλού παραδείγματος γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Sofistik.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή γεφυρών ήταν και εξακολουθεί να είναι μια πρόκληση για τους μηχανικούς, καθώς αυτή εξυπηρετεί ποικίλους σκοπούς. Βασική λειτουργία της γέφυρας είναι η κάλυψη ενός κωλύματος είτε αυτό είναι θαλάσσιο είτε αυτό είναι ανθρώπινο δημιούργημα (π.χ. δρόμοι) με σκοπό την εξυπηρέτηση της κυκλοφορίας οχημάτων ή πεζών. Μια ιδιαίτερη κατηγορία γεφυρών είναι οι πεζογέφυρες που εκτός των άλλων καλούνται να προσελκύσουν τους πεζούς που πρόκειται να τις χρησιμοποιήσουν. Οι ταλαντώσεις του καταστρώματος που οφείλονται στη διέγερση από το περπάτημα των πεζών ή τον άνεμο δεν πρέπει να παράγουν αισθήματα ανασφάλειας στους χρήστες. Φυσικά μια γέφυρα που απευθύνεται σε πεζούς πρέπει να προσφέρει επιπλέον ασφάλεια και αξιοπιστία, πρέπει να είναι ελαφριά και σχεδόν διάφανη από μεγάλη απόσταση. Μια πεζογέφυρα που καλύπτει όλες αυτές τις απαιτήσεις αλλά και τις απαιτήσεις οικονομικότητας της κατασκευής, αισθητικής και σεβασμού στο περιβάλλον, είναι η γέφυρα με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους, που αποτελεί μετάφραση του αγγλικού όρου stress ribbon pedestrian bridges.

Οι γέφυρες αυτού του είδους εκμεταλλεύονται τις αρχές της ανάρτησης, όπως αυτές έχουν επινοηθεί ήδη από την αρχαιότητα από τους πολιτισμούς της Ασίας, της Νότιας Αμερικής και της Αφρικής. Τότε, οι γέφυρες στην πιο απλή μορφή τους αποτελούνταν από φέροντα σχοινιά (χωρίς αναρτήρες ή δοκούς στο κατάστρωμα) στα οποία στηρίζονταν εγκάρσια μέλη που επέτρεπαν τη διέλευση των πεζών κατά μήκος της αλυσοειδούς καμπύλης. Οι Incas στη Νότια Αμερική κατασκεύαζαν γέφυρες ανάρτησης χρησιμοποιώντας 3 ή περισσότερες σειρές από σχοινιά κατασκευασμένα από ίνες λαχανικών για τη διευκόλυνση της διάβασης και 2 σειρές σχοινιών στα άκρα ως κιγκλιδώματα σε μια υψηλότερη στάθμη. Εγκάρσια κλαδιά σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος των σχοινιών της χαμηλότερης στάθμης, αφού επιμηκύνονταν, συνδέονταν με τα σχοινιά της υψηλότερης στάθμης σχηματίζοντας έτσι μια διατομή μορφής U ή V, όπως φαίνεται στην εικόνα 1. Η πιο αξιοσημείωτη γέφυρα αυτού του είδους κατά μήκος του ποταμού Apurimac είχε 45 m άνοιγμα σε ύψος 40 m πάνω από την όχθη του ποταμού με διάρκεια χρήσης πάνω από 500 χρόνια (με κάποιες βέβαια περιοδικές επιδιορθώσεις ή αντικαταστάσεις στα σχοινιά).

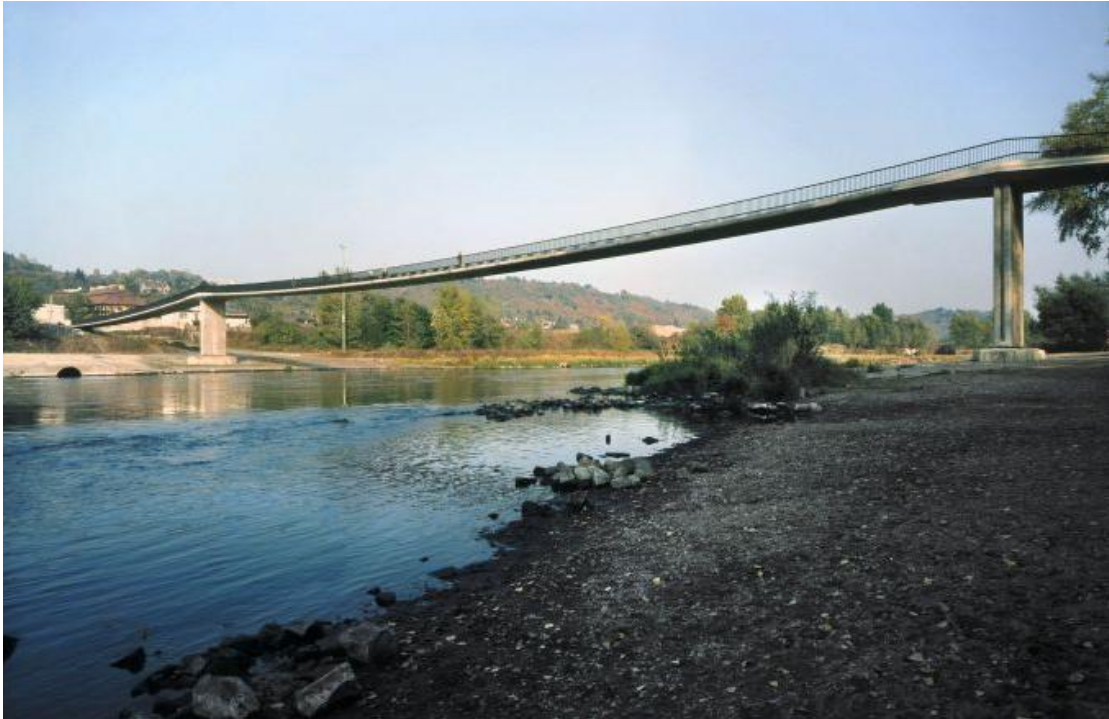
Βασιζόμενες, λοιπόν, στην πρωταρχική ιδέα χρήσης φερόντων καλωδίων για την εξυπηρέτηση των πεζών, οι γέφυρες τύπου stress ribbon εμφανίζονται, με κάποιες παραλλαγές από τις αρχικές, για πρώτη φορά στο προσκήνιο τη δεκαετία του 1960 στοχεύοντας στον περιορισμό του προβλήματος μεγάλων μετατοπίσεων των καλωδίων ανάρτησης. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλου συνδυασμού βάρους και δυσκαμψίας της κατασκευής με κριτήριο, ο λόγος βύθισης προς το άνοιγμα της γέφυρας να διατηρείται μικρός (τυπικά $<1/50$), απαραίτητη προϋπόθεση για τη διασφάλιση της λειτουργικότητας της γέφυρας. Μια από τις πρώτες προσπάθειες κατασκευής γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon), σύμφωνα με τις νεότερες αρχές, είναι η πεζογέφυρα στο Freiburg της Γερμανίας (Tang 1976) και η οδογέφυρα πάνω από τον ποταμό Maldonado στην Ουρουγουάη.



Εικόνα 1. Γέφυρα από ξύλινο αμπελόκλημα

Το κυριότερο μειονέκτημα αυτών των γεφυρών είναι οι πολύ μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις που μεταφέρονται στα ακρόβαθρα. Λόγω όμως της εξαιρετικής λεπτότητας της κατασκευής και της εναρμόνισης της με το περιβάλλον οι γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους κερδίζουν ολοένα και μεγαλύτερο έδαφος και έτσι είναι εύκολο να τις συναντήσει κανείς σε διάφορες χώρες , όπως Ιαπωνία , Ελβετία , Ηνωμένο Βασίλειο , πρώην Τσεχοσλοβακία , Ηνωμένες Πολιτείες.

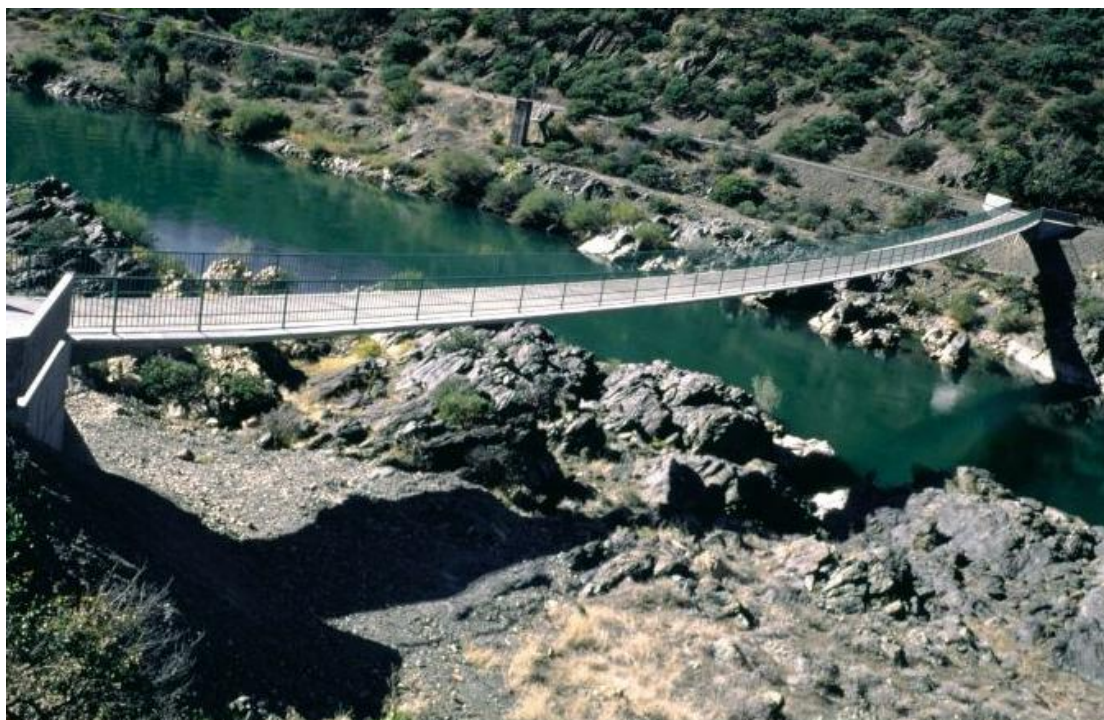
Οι γέφυρες τύπου stress ribbon αποτελούνται είτε από μεταλλικό κατάστρωμα (Wheen και Wilson 1977) είτε τις περισσότερες φορές από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Η συνεισφορά του Jiri Strasky και των συναδέλφων του τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο είναι εκπληκτική. Δύο από τις πιο αξιοσημείωτες πεζογέφυρες είναι η πεζογέφυρα που διασχίζει τον ποταμό Vlatva (Strasky 1987) [εικόνα 2] και η πεζογέφυρα που διασχίζει τον ποταμό Sacramento στην Καλιφόρνια (Redfield et al. 1992) με άνοιγμα 130 m και ύψος διατομής μόλις 38 cm [εικόνες 3α,3β].



Εικόνα 2. Πεζογέφυρα στον ποταμό Vltava , Prague-Troja (Strasky 1987)



Εικόνα 3α. Άποψη από ψηλά πεζογέφυρας στον ποταμό Sacramento , California (Redfield et al. 1992)



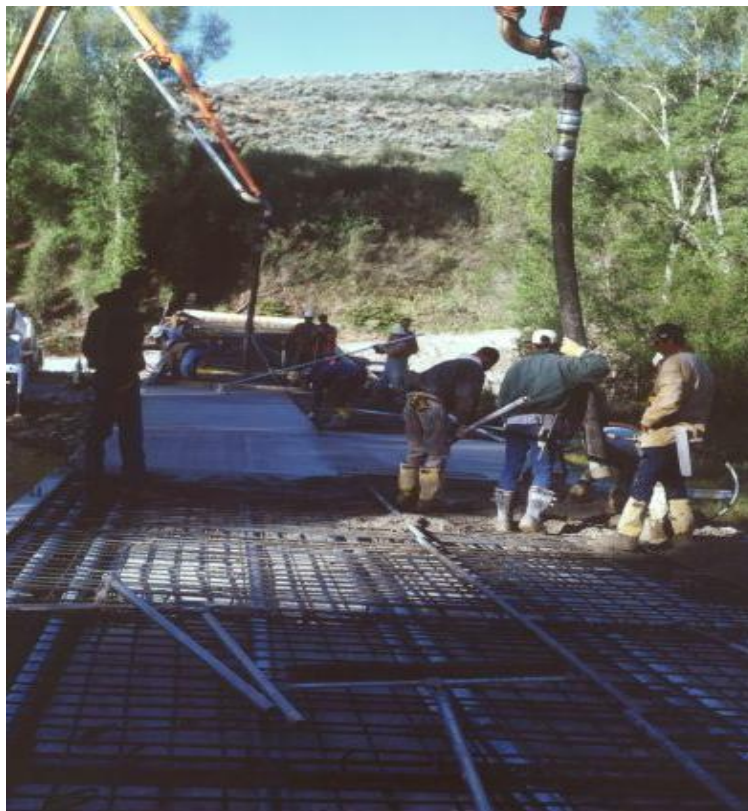
Εικόνα 3β. Πλάγια όψη πεζογέφυρας στον ποταμό Sacramento , California (Redfield et al. 1992)

Η συνήθης κατασκευαστική ακολουθία περιλαμβάνει την ανάρτηση των φερόντων καλωδίων (bearing cables) από τα ακρόβαθρα , τα οποία έχουν κατασκευασθεί σε προηγούμενη φάση. Στη συνέχεια , προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι από σκυρόδεμα αναρτώνται από τα φέροντα καλώδια [εικόνα 4]. Ακολουθεί η επιτόπου χύτευση του σκυροδέματος δεύτερης φάσης και το κλείσιμο των αρμών με αυτό [εικόνα 5]. Ο φορέας μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος έχει αλλάξει διατομή από καλώδιο σε σύμμικτη διατομή. Προκειμένου να αποκτήσει την απαραίτητη συνέχεια και δυσκαμψία ο φορέας προεντείνεται με τη βοήθεια ενός άλλου είδους τενόντων ,των τενόντων προέντασης (prestressing tendons) με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θλιπτικών δυνάμεων που εξισορροπούν τα αντιφορτία που αναπτύσσονται στο αντεστραμμένο τόξο. Πολλές φορές η κατασκευή προεντείνεται και πριν το κλείσιμο των αρμών εφελκύνοντας τα φέροντα καλώδια (bearing tendons). Η επιβολή , όμως , της προέντασης σε εύκαμπτους φορείς , όπως οι γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους , δημιουργεί σημαντικές καμπτικές ροπές ακόμα και στην περίπτωση κεντρικής προέντασης , αφού οι ακτινικές δυνάμεις αλλάζουν μέγεθος και διεύθυνση ακολουθώντας την παραμορφωμένη γεωμετρία.

Οι κυριότερες δυσκολίες της ανάλυσης μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) εμφανίζονται όταν καλείται κανείς να προσομοιώσει τη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής , την επιβολή της προέντασης , την κατασκευαστική ακολουθία καθώς και την εξάρτηση της κατασκευής από φαινόμενα εξελισσόμενα με το χρόνο , όπως ερπυσμό και συστολή ξηράνσεως . Επιπλέον , οι γέφυρες αυτού του είδους , εξαιτίας της λεπτότητας τους , είναι ευαίσθητες σε δυναμικές διεγέρσεις.



Εικόνα 4. Ανάρτηση προκατασκευασμένων σπονδύλων από τα φέροντα καλώδια.



Εικόνα 5. Επιτόπου χύτευση σκυροδέματος δεύτερης φάσης

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια. Πριν την εμφάνιση του πρώτου κεφαλαίου υπάρχει ένα εισαγωγικό κεφάλαιο , στο οποίο παρουσιάζονται τα περιεχόμενα της εργασίας , αναφέρονται οι ευχαριστίες , γίνεται μια σύνοψη του θέματος προς διερεύνηση τόσο στα ελληνικά όσο και στα αγγλικά. Επιπλέον , στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο , διαφαίνεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας , γίνεται μια εισαγωγή στις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους που μελετώνται και αναλύονται στη συνέχεια και τέλος περιγράφονται τα σύμβολα που εμφανίζονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται όλη η θεωρία των γεφυρών stress ribbon. Ξεκινώντας από κάποια ιστορικά στοιχεία και δίνοντας βασικούς ορισμούς , περιγράφονται τα κίνητρα ανάπτυξης των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους , όπως επίσης και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Στη συνέχεια , παρουσιάζεται το πεδίο εφαρμογής των γεφυρών αυτών και τα συστατικά τους μέρη από το σύστημα θεμελίωσης μέχρι το κατάστρωμα. Μετά την περιγραφή της μορφής του φορέα και των αντίστοιχων στατικών συστημάτων το κεφάλαιο κλείνει με την ιδιαίτερης σημασίας ενότητα που αφορά την κατασκευαστική ακολουθία.

Το κεφάλαιο 2 περιγράφει τα θέματα σχεδιασμού και μελέτης των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon). Η πρώτη ενότητα του κεφαλαίου αναφέρεται στα φορτία των πεζογεφυρών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι ανάλυσης και υπολογισμού των γεφυρών αυτών (αναλυτικές , ημιαριθμητικές , μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Αξιοσημείωτη είναι η ενότητα 2.3 που αναφέρεται στη διαστασιολόγηση των επιμέρους στοιχείων ώστε να περιγραφεί αργότερα η διαδικασία της μελέτης στη φάση κατασκευής και στη φάση λειτουργίας. Τέλος , στο κεφάλαιο αυτό , γίνεται επίσης αναφορά σε θέματα τεχνολογίας και θέματα δυναμικής συμπεριφοράς.

Το κεφάλαιο 3 και 4 περιλαμβάνει τα πάντα γύρω από την προσομοίωση μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους. Όπως έχει γίνει γνωστό από τα προηγούμενα κεφάλαια μια ιδιαιτερότητα των γεφυρών αυτών είναι η απόκριση τους σε φαινόμενα που μεταβάλλονται με το χρόνο , όπως ο ερπυσμός. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται αρχικά μια μικρή θεωρία σχετικά με τις μεθόδους υπολογισμού των τάσεων λόγω ερπυσμού και στη συνέχεια επιχειρείται η προσομοίωση των μεθόδων αυτών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Όταν επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος και της θεωρίας προκύπτει το συμπέρασμα ότι μπορεί να γίνει η προσομοίωση του ερπυσμού με αυτό τον τρόπο και στη δεδομένη γέφυρα. Στην ενότητα 4.1 παρουσιάζεται ένα δισδιάστατο προσομοίωμα γέφυρας stress ribbon που αποτελεί ένδειξη εξοικείωσης του γράφοντα με το Abaqus για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Έτσι , ακολουθεί ένα σύνθετο προσομοίωμα γέφυρας stress ribbon σε 3 διαστάσεις , όπου περιγράφεται με ακρίβεια η κατασκευαστική ακολουθία και δίνονται κάποια αποτελέσματα. Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων , κυρίως σε ό,τι αφορά την επιβολή της προέντασης στους τένοντες προέντασης , παρουσιάζεται τέλος η ανάλυση μιας γέφυρας stress ribbon με το Sofistik.

Στο 5 κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι συστάσεις για περαιτέρω μελέτη. Το βιβλίο κλείνει με τη βιβλιογραφία και τα παραρτήματα.

ΣΥΜΒΟΛΑ

φ_0 ο ονομαστικός συντελεστής ερπυσμού

$\beta_c(t, t_0)$ συντελεστής που περιγράφει την πρόοδο του ερπυσμού με το χρόνο μετά τη φόρτιση

φ_{RH} συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη σχετική υγρασία

$\beta(f_{cm})$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

$\beta(t_0)$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την ηλικία του σκυροδέματος κατά τη φόρτιση

RH η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος εκφρασμένη σε ποσοστό %

h η ονομαστική διάσταση του σκυροδέματος σε mm

A_c η επιφάνεια της διατομής του σκυροδέματος

u η περίμετρος του σκυροδέματος που έρχεται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος

f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος στην ηλικία των 28 ημερών σε MPa

t η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες τη θεωρούμενη στιγμή (χρόνος αναφοράς)

t_0 η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες τη στιγμή της φόρτισης

β_H συντελεστής που εξαρτάται από τη σχετική υγρασία και την ονομαστική διάσταση του σκυροδέματος

$E_{c,eff}$ το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λόγω ερπυσμού

E_c το μέτρο ελαστικότητας κατά Young του σκυροδέματος 28 ημερών

σ_0 η τάση στο σκυρόδεμα κατά τη στιγμή της πρώτης φόρτισης t_0

$\Delta\sigma$ η πρόσθετη τάση στο σκυρόδεμα κατά την επόμενη φόρτιση t_1

t_1 η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες κατά τη δεύτερη φόρτιση

$G_r(t)$ το μέτρο διάτμησης κατά τη χαλάρωση ως συνάρτηση του χρόνου

$K_r(t)$ το μέτρο συμπίεστότητας κατά τη χαλάρωση ως συνάρτηση του χρόνου

G_0 το στιγμιαίο μέτρο διάτμησης

K_0 το στιγμιαίο μέτρο συμπίεστότητας

E_0 το στιγμιαίο μέτρο ελαστικότητας

ν_0 ο λόγος του Poisson

$g_r(t)$ το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης κατά τη χαλάρωση

$k_r(t)$ το κανονικοποιημένο μέτρο συμπίεστότητας κατά τη χαλάρωση

E_c το μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 28 ημερών σε MPa

f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος 28 ημερών από μετρήσεις (MPa)

E_{cs} το τέμνον μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του σκυροδέματος

$\beta_E(t)$ συντελεστής που εξαρτάται από την ηλικία του σκυροδέματος t

$\beta_{cc}(t)$ συντελεστής για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας ως συνάρτηση της ηλικίας του σκυροδέματος t

s συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου

SF ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολισθήσεως

SF_0 ο απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας έναντι ολισθήσεως

V_q η κατακόρυφη δύναμη από τα μόνιμα και κινητά φορτία της ανωδομής

V_{an} η κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης των αγκυρίων

H_q η οριζόντια δύναμη από τα μόνιμα και κινητά φορτία της ανωδομής

H_{an} η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης των αγκυρίων

φ, c η γωνία τριβής και η συνοχή του εδάφους

A η επιφάνεια κατά μήκος της οποίας γίνεται η ολίσθηση

λ ο λόγος βύθισης

f η βύθιση στη μεσαία διατομή του ανοίγματος

L το μήκος του ανοίγματος

$\frac{1}{R}$ η καμπυλότητα του καλωδίου

u_v πρόσθετο ομοιόμορφο φορτίο στο καλώδιο λόγω H_v

H_v πρόσθετη δύναμη προέντασης

w συνολικό αρχικό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο κατάστρωμα

H_w οριζόντια δύναμη στο καλώδιο του ισοδύναμου συστήματος ανάρτησης

$y(x)$ συνάρτηση θέσης της αρχικής γεωμετρίας του καλωδίου

$\eta(x)$ συνάρτηση θέσης της πρόσθετης μετατόπισης λόγω κινητού φορτίου

$z(x)$ συνάρτηση θέσης της τελικής γεωμετρίας του καλωδίου

$q_c(x)$ κατανεμημένο φορτίο στο καλώδιο

H_p πρόσθετη οριζόντια δύναμη στο καλώδιο λόγω κινητού φορτίου p

H_g οριζόντια δύναμη στο καλώδιο λόγω μονίμων φορτίων g

$q(x)$ το συνολικό φορτίο στη δοκό του ισοδύναμου συστήματος ανάρτησης

G, γ, ε γνωστές αδιάστατες παράμετροι σχεδιασμού

Z, D άγνωστη αδιάστατη παράμετρος του ισοδύναμου συστήματος ανάρτησης

M_{max} η μέγιστη ροπή κάμψης στην περίπτωση αρθρωτών στηρίξεων

η_{max} η μέγιστη πρόσθετη μετατόπιση για φόρτιση με κινητά στο μισό μήκος

M_s η ροπή στήριξης στην περίπτωση πακτωμένων στηρίξεων

M_{span} η ροπή στο μέσο του ανοίγματος για πακτωμένες στηρίξεις

M_{fix} η ροπή στη στήριξη λόγω προέντασης

M_{s-fix} η τελική ροπή στη στήριξη ύστερα από την υπέρθεση

$M_{max-span}$ η τελική ροπή στο μέσο του ανοίγματος ύστερα από υπέρθεση

α αδιάστατη παράμετρος που εκφράζει το λόγο πάχους

ρ αδιάστατη παράμετρος που εκφράζει το ποσοστό του προεντεταμένου οπλισμού

H_0 η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης στη στήριξη του καλωδίου

V_0 η κατακόρυφη συνιστώσα της αντίδρασης στη στήριξη του καλωδίου

T_0 η συνισταμένη δύναμη του καλωδίου στη στήριξη(κατά την εφαπτομένη)

T η ένταση του καλωδίου σε τυχαία θέση

θ η γωνία που σχηματίζει η χορδή του καλωδίου με την οριζόντια γραμμή

d κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της χορδής και του παραμορφωμένου καλωδίου

S_0 ολικό απαραμόρφωτο μήκος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΙΑ STRESS RIBBON

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στο παρελθόν , σε περιπτώσεις όπου η κατασκευή μεσοβάθρων ήταν δύσκολη ή αδύνατη , οι γέφυρες που κατασκευάζονταν ήταν κυρίως τοξωτές ή απλές γέφυρες ανάρτησης. Το 1958 , ο Γερμανός μηχανικός Ulrich Finsterwalder , εισήγαγε τη σύγχρονη ιδέα των γεφυρών stress ribbon και έκτοτε δεκάδες γέφυρες αυτού του είδους έχουν κατασκευαστεί σε Ευρώπη και Αμερική. Το ιδιαίτερο πλεονέκτημα τους να γεφυρώνουν μεγάλα ανοίγματα με πολύ μικρό πάχος καταστρώματος , να έχουν την απλούστερη κατασκευαστικά μορφή , να εναρμονίζονται με το περιβάλλον και ταυτόχρονα να μην απαιτούν τη χρήση εξωτερικών αναρτήρων ή πυλώνων , τους έδωσε ιδιαίτερη ώθηση. Η ιδέα , ωστόσο , αυτού του είδους γεφύρωσης με ανάρτηση του καταστρώματος είναι πιο παλιά. Έχει τις ρίζες της στους αρχαίους πολιτισμούς των χωρών της Αμερικής , της Ασίας και της Αφρικής , όπου χρησιμοποιούνταν κλαδιά από δέντρα ή από αμπελο-κλίματα για να φέρουν τα φορτία και εγκάρσια κλαδιά για να εξυπηρετούν τη διάβαση των πεζών. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν κατασκευασθεί πολλές παραλλαγές της αρχικής ιδέας με έναν αισθητικά και κατασκευαστικά διαφορετικό τρόπο συνδυάζοντας νέα υλικά κυρίως για πεζογέφυρες, αλλά και για οδογέφυρες. Στη δεύτερη περίπτωση η γέφυρα stress ribbon δεν έχει την κλασσική μορφή , αλλά συνδυάζεται με άλλα στατικά συστήματα, όπως του τόξου που στηρίζει ή αναρτά το κατάστρωμα stress ribbon ή παίρνει τη μορφή της **εικόνας 1.1**



Εικόνα 1.1 Γέφυρα Shioshai , Ιαπωνία

1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ

Γέφυρα: είναι το τεχνικό έργο που αποκαθιστά τη συνέχεια μιας συγκοινωνιακής αρτηρίας (οδός , σιδηρόδρομος , πεζόδρομος) που διακόπτεται από φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο.

Γέφυρα με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon): είναι μια διαφορετική γέφυρα ανάρτησης. Το κατάστρωμα δεν αναρτάται από εξωτερικά καλώδια με τη βοήθεια αναρτήρων , όπως στις κρεμαστές γέφυρες , αλλά η ανάρτηση του γίνεται με τη βοήθεια αναρτημένων καλωδίων που διέρχονται μέσα από το κατάστρωμα. Αντίθετα με τις κρεμαστές γέφυρες , που συνήθως έχουν μια μορφή τόξου , εμφανίζουν δηλαδή μια ανύψωση στο κέντρο , οι γέφυρες stress ribbon χαρακτηρίζονται από μια μορφή αντίστροφου τόξου , που ακολουθεί τη μορφή του καλωδίου , εμφανίζουν δηλαδή μια βύθιση στο κέντρο.

Άνοιγμα γέφυρας: είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στηρίξεων (ακρόβαθρο-ακρόβαθρο ή ακρόβαθρο-μεσόβαθρο)

Συνολικό μήκος γέφυρας: είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ των ακροβάθρων. Σε γέφυρες ενός ανοίγματος το συνολικό μήκος ταυτίζεται με το μήκος του ανοίγματος της γέφυρας. Σε γέφυρες πολλών ανοιγμάτων το συνολικό μήκος ισούται με το άθροισμα των επιμέρους μηκών των ανοιγμάτων.

Ανωδομή : περιλαμβάνει τον κύριο φορέα με το κατάστρωμα κυκλοφορίας , όλα τα στοιχεία που αποβλέπουν στην εξυπηρέτηση της κίνησης (οδόστρωμα , μονώσεις , πεζοδρόμια , στηθαία , ασφαλείας , συστήματα αποχέτευσης καταστρώματος , θέσεις διελεύσεως αγωγών κλπ.) και τα στοιχεία διαμόρφωσης αρμών και στηρίξεως του φορέα της ανωδομής.

Υποδομή: περιλαμβάνει τα ακρόβαθρα , μεσόβαθρα , τη θεμελίωση , τους τοίχους αντιστηρίξεως , έργα μετάβασης από τη γέφυρα στην οδό , έργα προστασίας των θεμελίων.

Ακρόβαθρα: είναι οι ακραίες στηρίξεις μιας γέφυρας.

Μεσόβαθρα: είναι εκείνα τα στοιχεία της υποδομής που παρεμβάλλονται μεταξύ των ακραίων στηρίξεων κατά μήκος της γέφυρας , όταν το συνολικό μήκος της είναι μεγάλο , και αποτελούν τις ενδιάμεσες στηρίξεις της γέφυρας. Η στήριξη του καταστρώματος πάνω σε αυτά γίνεται είτε μονολιθικά είτε με τη βοήθεια εφεδράνων.

1.3 ΚΙΝΗΤΡΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Βασικό κίνητρο για την ανάπτυξη των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) ήταν η χρήση του αποδεδειγμένα πιο αποδοτικού εφελκόμενου στοιχείου, δηλαδή του καλωδίου, με ένα πιο μοναδικό, αισθητικά ξεχωριστό και κατασκευαστικά διαφορετικό τρόπο. Οι γέφυρες αυτού του είδους έπρεπε να απολάβουν τις ευεργετικές ιδιότητες των καλωδίων, δηλαδή τη δυνατότητα τους να εκμεταλλεύονται πλήρως την αντοχή τους εξαιτίας της αυτόματης προσαρμογής στην αλυσοειδή καμπύλη για οποιαδήποτε περίπτωση φόρτισης. Ταυτόχρονα, όμως, έπρεπε να αντιμετωπίσουν και τις δύο κύριες δυσκολίες που απορρέουν από τη χρήση των καλωδίων. Η πρώτη αφορά στις πολύ μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καλώδια, μεταφέρονται στα ακρόβαθρα και απαιτούν την ομαλή και επιτυχημένη μεταφορά τους στο έδαφος, ενώ η δεύτερη αφορά στις μεγάλες μετατοπίσεις που δημιουργούνται από τα πρόσθετα φορτία. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρώτο πρόβλημα χρειάζεται να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην τελική γεωμετρία σχεδιασμού του φορέα, που εξαρτάται από την προένταση των καλωδίων ανάρτησης ή ταινιοδιαδρόμων, τα νεκρά φορτία και την επίδραση των μακροχρόνιων φαινομένων στο σκυρόδεμα, όπως ερπυσμό και συστολή ξηράνσεως. Όπως φαίνεται η λύση στο πρώτο πρόβλημα δεν έχει να κάνει με την αντοχή του ίδιου του καλωδίου. Το δεύτερο πρόβλημα επιλύεται προσφέροντας στην κατασκευή την απαιτούμενη δυσκαμψία κάνοντας χρήση της προέντασης αλλά και της καμπτικής δυσκαμψίας που παρέχει το κατάστρωμα [εικόνα 1.2]



Εικόνα 1.2 δοκιμαστική φόρτιση γέφυρας στην Prague-Troja, Κροατία

1.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος γεφύρωσης ανοιγμάτων με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) αποκτά όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στις μεθόδους κατασκευής γεφυρών , ιδιαίτερα πεζογεφυρών , από την πρώτη στιγμή της εμφάνισης της , τη δεκαετία του 1960 , εξαιτίας των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων που εμφανίζει :

- Γεφυρώνει μεγάλα ανοίγματα με μικρό ύψος καταστρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γέφυρα stress ribbon με άνοιγμα 144 m και ύψος διατομής μόλις 30 cm. Στην **εικόνα 1.3** παρουσιάζεται η γέφυρα στον ποταμό Sacramento της Καλιφόρνια με άνοιγμα περίπου 128 m και ύψος καταστρώματος 38 cm.
- Είναι ελαφριά , αφού η κατανάλωση των υλικών είναι ελάχιστη , σχεδόν διάφανη από μακριά , λόγω της λεπτότητας της κατασκευής
- Έχει αυξημένη δυσκαμψία κατά τη διαμήκη διεύθυνση , εξαιτίας της επιβαλλόμενης προέντασης
- Αποτελεί μια οικονομικά βιώσιμη (ευνοϊκή) κατασκευή , γεγονός που οφείλεται στην ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται , στη μέθοδο κατασκευής , στη συντήρηση , στη λειτουργία
- Απαιτεί ελάχιστη συντήρηση σε βάθος χρόνου , αφού δεν απαιτεί τη χρήση εφεδράνων ή αρμών διαστολής , λόγω του ότι η γέφυρα είναι συνεχής μετά την κατασκευή της
- Σέβεται το περιβάλλον , προσαρμόζεται σε αυτό είτε κατασκευάζεται σε στεριά είτε σε θάλασσα, ποταμό ή λίμνη και εναρμονίζεται με αυτό. [**εικόνες 1.4 ,1.5**]
- Περιορίζει τον αριθμό των ενδιάμεσων στηρίξεων , χάρις στη δυνατότητα γεφύρωσης του κωλύματος με ένα μόνο άνοιγμα
- Προκαλεί ελάχιστη οπτική επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον και λόγω της κομψότητας της κατασκευής και λόγω της δυνατότητας κατασκευής της στην απλούστερη μορφή. Πρόκειται για μια γέφυρα που εγγράφεται στο περιβάλλον , ταυτίζεται με αυτό και η μορφή της εξαρτάται άμεσα από αυτό.
- Δεν απαιτεί συνήθως τη χρήση ξυλότυπου, αφού μπορεί να κατασκευασθεί από προκατασκευασμένα στοιχεία , τα οποία ανεγείρονται με τη βοήθεια γερανού. Ο ξυλότυπος αυξάνει το κόστος της κατασκευής και έχει σημαντική επίδραση στο περιβάλλον [**εικόνα 1.6**]
- Διαθέτει αυξημένη ανθεκτικότητα στο χρόνο , ιδιαίτερα στην περίπτωση των πεζογεφυρών που η χρήση και τα φορτία δεν είναι τόσα όσα στις οδογέφυρες
- Είναι αισθητικά ευχάριστη , μοναδική
- Είναι ορόσημο για την περιοχή , πόλος έλξης όχι μόνο για τους τουρίστες , αλλά και για τους μόνιμους κατοίκους της περιοχής όπου κατασκευάζεται
- Παρακολουθεί τη ροή των εσωτερικών δυνάμεων και παίρνει το σχήμα της από αυτό

- Αποτελεί την πιο απλή και στοιχειώδη κατασκευαστική λύση μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών γεφύρωσης του ίδιου ανοίγματος.
- Δεν απαιτεί εφέδρανα ή αρμούς συστολής-διαστολής
- Συνδυάζει τη σύγχρονη τεχνολογία χρησιμοποιώντας υψηλής αντοχής υλικά με την επιστήμη
- Εκμεταλλεύεται τις βασικές αρχές της ανάρτησης , όπως είναι γνωστές από τις καλωδιωτές ή κρεμαστές γέφυρες , με τη μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους τα καλώδια ανάρτησης διέρχονται μέσα από τη διατομή του καταστρώματος



Εικόνα 1.3 Γέφυρα stress ribbon με άνοιγμα 128 m και ύψος καταστρώματος 38 cm



Εικόνα 1.4 Γέφυρα stress ribbon σε υγρό περιβάλλον



Εικόνα 1.5 Ίδια γέφυρα stress ribbon σε ξηρές συνθήκες

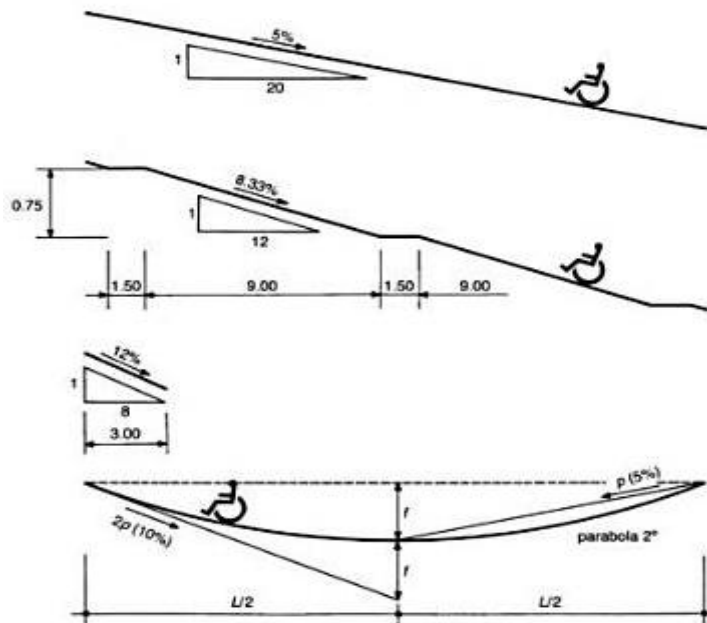


Εικόνα 1.6 Κατασκευή γέφυρας stress ribbon από προκατασκευασμένους σπονδύλους με τη βοήθεια γερανού

Σημαντικό όμως μειονέκτημα των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) είναι οι πολύ μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται και μεταφέρονται στα ακρόβαθρα. Οι δυνάμεις αυτές πρέπει να αναληφθούν από τις ακραίες στηρίξεις και να μεταφερθούν με ασφάλεια στο έδαφος. Η μειωμένη δυσκαμψία στην εγκάρσια διεύθυνση είναι επίσης ένα μειονέκτημα, που θα μπορούσε κανείς να αναγνωρίσει στις γέφυρες αυτού του είδους, όπως επίσης και οι μεγάλες μετατοπίσεις που οφείλονται σε πρόσθετα φορτία. Τέλος, οι γέφυρες stress ribbon είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε δυναμικές καταπονήσεις, λόγω της λεπτότητας της κατασκευής τους.

1.5 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Οι γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους χρησιμοποιούνται κυρίως από πεζούς ή οχήματα ελαφρού τύπου, όπως ποδήλατα. Έχει, επίσης, αναφερθεί ότι οι γέφυρες αυτού του είδους είναι κατάλληλες για μεγάλα ανοίγματα (υφιστάμενο κατασκευασμένο άνοιγμα 144 m) με μικρό ύψος διατομής (30 cm στη συγκεκριμένη γέφυρα). Η εφαρμογή τους, όμως, δεν περιορίζεται μόνο σε μεγάλα ανοίγματα αλλά και σε μικρότερα με μεγάλο συνολικό μήκος γεφύρωσης. Όταν το κώλυμα είναι τέτοιο που δεν επιτρέπει τη χρήση συμβατικών ικριωμάτων, η μέθοδος γεφύρωσης με φέροντα καλώδια είναι η πλέον αποτελεσματική, αφού η κατασκευή τις περισσότερες φορές γίνεται με προκατασκευασμένα στοιχεία, τα οποία ανεγείρονται με τη βοήθεια γερανού και τοποθετούνται στην κατάλληλη θέση μέσω των καλωδίων ανάρτησης. Οι πεζογέφυρες stress ribbon δεν εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου η διαμήκης κλίση υπερβαίνει κάποιες επιτρεπόμενες τιμές. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές διαμήκους κλίσης εξαρτώνται από την τοποθεσία της γέφυρας. Έτσι, αν η γέφυρα χρησιμοποιείται ως μονοπάτι σε βουνά η μέγιστη κλίση μπορεί να φτάσει μέχρι και 20%. Αντιθέτως, αν η γέφυρα τοποθετείται μέσα στον αστικό κλοιό, η κλίση πρέπει να είναι τέτοια που να καθιστά εφικτή την εξυπηρέτηση των ατόμων με ειδικές ανάγκες. Συνήθης απαίτηση είναι η κλίση σε κεκλιμένα επίπεδα (ράμπες) να μην υπερβαίνει το 20:1 (5%), επιτρέπεται όμως κλίση 12:1 (8.33%) για ανάβαση μικρότερη από 75 cm και οριζόντιο επίπεδο, πριν και μετά το κεκλιμένο, μήκους τουλάχιστον 1.5 m. Ορισμένες διατάξεις επιτρέπουν μέγιστη κλίση 1:8 (12.5%) για μικρούς αναβαθμούς (ράμπες) μήκους όχι μεγαλύτερου από 3 m [**εικόνα 1.7**].



Εικόνα 1.7 Περιορισμοί μέγιστης διαμήκους κλίσης για γέφυρες stress ribbon

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι γέφυρες stress ribbon έχουν μια μορφή αντίστροφου τόξου, που προσεγγίζει το σχήμα παραβολής δευτέρου βαθμού. Για παραβολή, λοιπόν, μήκους οριζόντιας προβολής L και βύθισης $f=0.02L$ η μέγιστη κλίση είναι $p_{max} = 8 \%$, ενώ η μέση κλίση είναι η μισή, $p_{avr} = 4 \%$, τέτοια ώστε η προσπάθεια που καταβάλλουν τα άτομα με ειδικές ανάγκες για να κινηθούν σε ένα παραβολικό κατάστρωμα να είναι η ίδια με αυτή που θα κατέβαλαν αν κινούνταν σε ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση 1:25.

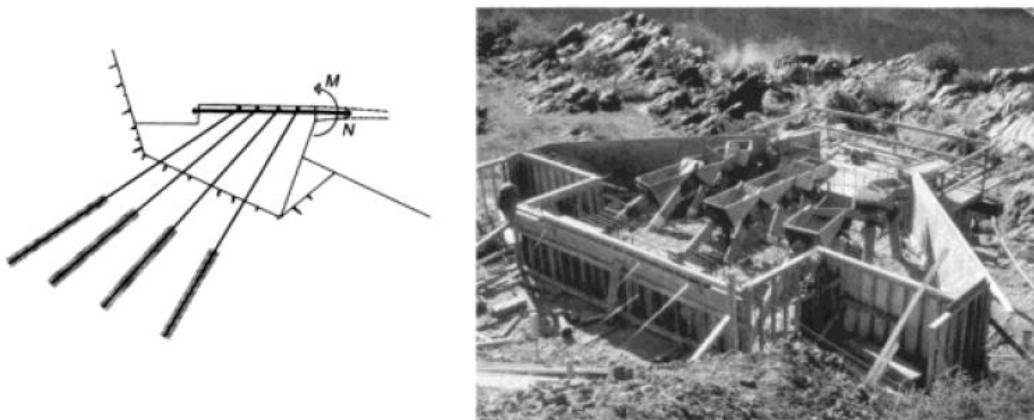
1.6 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΓΕΦΥΡΑΣ STRESS-RIBBON- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ-ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ

Η γέφυρα με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους αποτελείται από τρία (3) κύρια μέρη:

- Το σύστημα θεμελίωσης
- Τα μεσόβαθρα και ακρόβαθρα
- Το κατάστρωμα

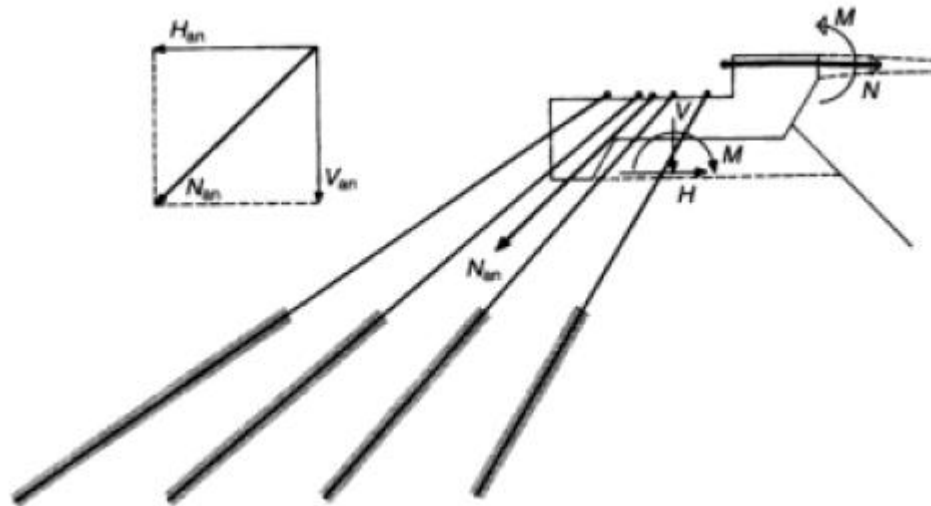
1.6.1 Σύστημα θεμελίωσης

Στις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους αναπτύσσονται μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις, οι οποίες καταλήγουν στα ακρόβαθρα. Τα ακρόβαθρα πρέπει να είναι σε θέση να αναλάβουν το μέγεθος αυτών των δυνάμεων και να τις μεταφέρουν με επιτυχία στο έδαφος. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται αγκύρια βράχου ή προεντεταμένα αγκύρια ανάλογα με το είδος του εδάφους. Δυστυχώς μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις ο υγιής βράχος βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια θεμελίωσης, ώστε η θεμελίωση να γίνεται όπως στην **εικόνα 1.8**.



Εικόνα 1.8 αριστερά: σχέδιο θεμελίωσης με αγκύρια βράχου
Δεξιά: αγκύρια βράχου στη γέφυρα Redding, Καλιφόρνια, Αμερική

Στις περισσότερες περιπτώσεις το σκληρό έδαφος βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος και έτσι η διάταξη των αγκυρίων βράχου στα ακρόβαθρα είναι όπως φαίνεται στην **εικόνα 1.9**.



Εικόνα 1.9 Αγκύρια βράχου σε μεγαλύτερα βάθη

Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαίος ο έλεγχος των εδαφικών πιέσεων , καθώς και της περίπτωσης ανατροπής ή ολίσθησης όχι μόνο για το μέγιστο φορτίο αλλά και για το φορτίο σε κάθε φάση της κατασκευής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αγκύρια βράχου είναι προεντεταμένα , γεγονός που σημαίνει ότι φορτίζουν τη θεμελίωση με μια έκκεντρη , επικλινή δύναμη , η οποία αναλύεται σε δύο συνιστώσες : μία οριζόντια και μία κατακόρυφη. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση προεντεταμένων αγκυρίων βράχου είναι η ύπαρξη εδάφους με ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα για την ανάληψη τόσο των κατακόρυφων δυνάμεων από την ανωδομή όσο και της κατακόρυφης συνιστώσας της δύναμης των αγκυρίων. Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολισθήσεως δίνεται τότε από τη **σχέση 1.1** :

$$SF = \frac{V \tan \varphi + c \cdot A}{H} = \frac{(V_q + V_{an}) \tan \varphi + c \cdot A}{H_q - H_{an}} \geq SF_0 \quad (1.1)$$

- όπου **SF** ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολισθήσεως
- SF₀** ο απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας έναντι ολισθήσεως
- V_q** η κατακόρυφη δύναμη από τα μόνιμα και κινητά φορτία της ανωδομής
- V_{an}** η κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης των αγκυρίων
- H_q** η οριζόντια δύναμη από τα μόνιμα και κινητά φορτία της ανωδομής
- H_{an}** η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης των αγκυρίων
- φ, c** η γωνία τριβής και η συνοχή του εδάφους
- A** η επιφάνεια κατά μήκος της οποίας γίνεται η ολίσθηση

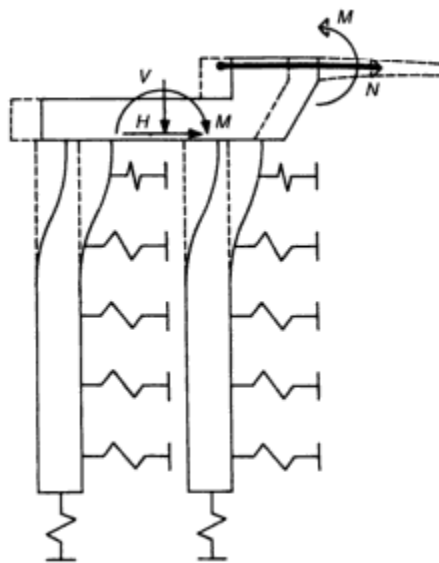
ΘΕΩΡΙΑ STRESS RIBBON

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολισθήσεως εξαρτάται από τους εθνικούς κανονισμούς , συνήθως όμως κυμαίνεται μεταξύ 1.5 και 2.0. Ο συντελεστής ασφαλείας , όπως αναφέρθηκε ήδη , πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε στάδιο της κατασκευής.

Λόγω της πολύ μεγάλης οριζόντιας συνιστώσας της δύναμης των αγκυρίων που είναι ικανή να προκαλέσει ολίσθηση σε περίπτωση προέντασης όλων των αγκυρίων ταυτόχρονα , η προένταση γίνεται σε δύο στάδια και ο συντελεστής ασφαλείας ελέγχεται σε κάθε ένα από τα παρακάτω στάδια :

- Προένταση του πρώτου μισού των αγκυρίων βράχου
- Κατασκευή του καταστρώματος
- Προένταση του δεύτερου μισού των αγκυρίων
- Λειτουργία της γέφυρας , πλήρες κινητό φορτίο και θερμοκρασιακές μεταβολές

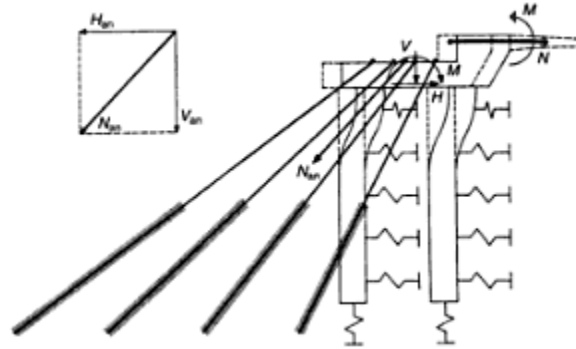
Εναλλακτική μέθοδος θεμελίωσης , σε περίπτωση που το έδαφος δεν μπορεί να αναλάβει με επιτυχία τις μεγάλες οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις , αποτελεί η χρήση εγχύτων πασσάλων [**εικόνα 1.10**]



Εικόνα 1.10 έγχυτοι πάσσαλοι για τη θεμελίωση γεφυρών stress ribbon

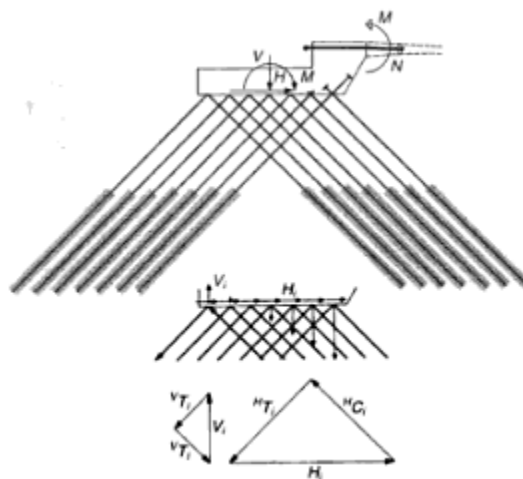
Αν και οι έγχυτοι πάσσαλοι εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση σε οριζόντια φορτία , οι οριζόντιες παραμορφώσεις είναι μεγάλες και πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στην ανάλυση. Οι ελαστικές οριζόντιες παραμορφώσεις μπορούν να μειωθούν όταν στην κατασκευαστική διαδικασία παρεμβάλλεται η προφόρτιση της κατασκευής πριν το κλείσιμο των αρμών με επιτόπου σκυρόδεμα. Παρ' όλα αυτά , με το πέρασμα των χρόνων , οι πλαστικές παραμορφώσεις μπορεί να προκαλέσουν αξιοσημείωτες οριζόντιες μετατοπίσεις στα ακρόβαθρα με αποτέλεσμα την αύξηση της βύθισης της γέφυρας stress ribbon.

Για το λόγο αυτό προτείνεται η λύση του συνδυασμού των αγκυρίων με τους έγχυτους πασσάλους, όπως στην **εικόνα 1.11**. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη σταδιακή τάνυση των αγκυρίων και τη συνεπαγόμενη οριζόντια μετακίνηση της θεμελίωσης.



Εικόνα 1.11 συνδυασμός αγκυρίων και εγχύτων πασσάλων για τη θεμελίωση stress ribbon

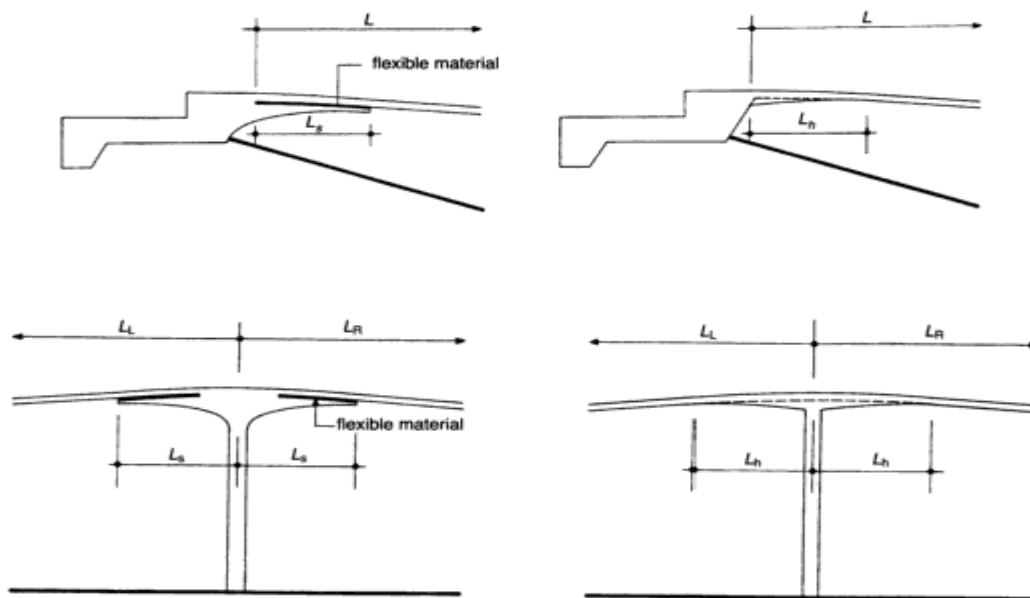
Στη φάση λειτουργίας η θεμελίωση μπορεί να μετακινηθεί οριζόντια από τη διεύθυνση της προέντασης στην αντίθετη κατεύθυνση από τα φορτία της ανωδομής με αποτέλεσμα το πρόσημο των τάσεων στα αγκύρια να μεταβάλλεται. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί και αυτό το πρόβλημα η λύση των διασταυρούμενων μικροπασσάλων, όπως φαίνεται στην **εικόνα 1.12**, είναι η πιο αποτελεσματική, αφού το φορτίο από την ανωδομή μεταφέρεται στο έδαφος μέσω εφελκυσμού και θλίψης. Η σειρά που καταπονείται περισσότερο σε εφελκυσμό είναι η τελευταία, όπου εκτός από την εφελκυστική συνιστώσα της οριζόντιας δύναμης ασκείται και μια εφελκυστική δύναμη που οφείλεται στο ανασήκωμα από την κατακόρυφη δύναμη και τη ροπή κάμψης.



Εικόνα 1.12 διασταυρούμενοι μικροπάσσαλοι

1.6.2 Μεσόβαθρα-Ακρόβαθρα

Το κατάστρωμα στις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους άλλες φορές κατασκευάζεται από προκατασκευασμένα στοιχεία και άλλες φορές με επιτόπου χύτευση σκυροδέματος. Η σύνδεση του καταστρώματος με τα ακρόβαθρα και τα μεσόβαθρα στις γέφυρες αυτές γίνεται είτε μονολιθικά (haunches) είτε με την παρεμβολή ενός εύκαμπτου υλικού (saddles), ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τη διαθέσιμη τεχνολογία [**εικόνα 1.13**].



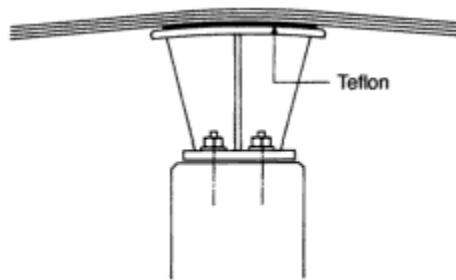
Εικόνα 1.13 Επάνω(ακρόβαθρα): Αριστερά: σύνδεση με εύκαμπτα μέλη, Δεξιά: μονολιθική στήριξη **Κάτω(μεσόβαθρα):** αριστερά: εύκαμπτη στήριξη, Δεξιά: άκαμπτη

Στην περίπτωση της μη μονολιθικής σύνδεσης, στην περιοχή της στήριξης όπου η καμπυλότητα είναι μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες περιοχές, τα προκατασκευασμένα στοιχεία έχουν μήκος ίσο με το ένα τρίτο του μήκους των τυπικών στοιχείων και κατασκευάζονται πριν την τοποθέτηση και τάνυση των καλωδίων ανάρτησης (bearing tendons). Τα στοιχεία που τοποθετούνται απ' ευθείας πάνω από το μεσόβαθρο στηρίζονται σε τσιμεντοκονίαμα, ενώ τα υπόλοιπα στην περιοχή της στήριξης τοποθετούνται πάνω σε λωρίδες νεοπρενίου [**εικόνα 1.14**]. Η σύνδεση του καταστρώματος με τα στοιχεία της περιοχής της μη μονολιθικής στήριξης γίνεται με τη βοήθεια οπλισμού.

Στην περίπτωση της μονολιθικής στήριξης με επιτόπου χύτευση σκυροδέματος όπου ο ξυλότυπος αναρτάται από τους προηγούμενους ήδη κατασκευασμένους σπονδύλους και το μεσόβαθρο, τα καλώδια ανάρτησης στηρίζονται σε μεταλλικά στοιχεία που πακτώνονται στο μεσόβαθρο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εύκολη προσαρμογή στη γεωμετρία του ήδη κατασκευασμένου καταστρώματος που δεν εξαρτάται μόνο από την αρχική τάνυση των τενόντων, το βάρος των προκατασκευασμένων σπονδύλων, αλλά και τη θερμοκρασία την ώρα της χύτευσης. Προκειμένου να μειωθούν οι δυνάμεις τριβής μεταξύ του μεταλλικού στοιχείου και των καλωδίων ανάρτησης χρησιμοποιούνται πλάκες από Teflon [εικόνα 1.15]. Η σταθεροποίηση του μεσόβαθρου γίνεται με προσωρινή αντηρίδα [εικόνα 1.16] { στην *εικόνα 1.17* δίνεται ο ορισμός της λέξης αντηρίδα και επισημαίνεται ο ορθός τρόπος γραφής της, δεδομένου ότι η λέξη αυτή χρησιμοποιείται πολλές φορές στο γραπτό λόγο ανορθόγραφα }. Η κατασκευή της περιοχής της στήριξης στην περίπτωση της μονολιθικής σύνδεσης μπορεί, επίσης, να γίνει με επιτόπου σκυρόδεμα που αυτή τη φορά χυτεύεται πριν την ανέγερση των σπονδύλων. Τότε, οι σωλήνες μέσα από τους οποίους περνούν τα καλώδια ανάρτησης (bearing tendons) είναι τέτοιοι που επιτρέπουν αλλαγή της κλίσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής του καταστρώματος. Σε αυτή την περίπτωση, ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη γεωμετρία των ήδη κατασκευασμένων στοιχείων για τη ρύθμιση της δύναμης των καλωδίων πριν το κλείσιμο των αρμών.



Εικόνα 1.14 περιοχή στήριξης σε μη μονολιθική σύνδεση βάθρου-καταστρώματος (Γέφυρα Grants Pass, Oregon, Αμερική)



Εικόνα 1.15 Μείωση τριβής με τη βοήθεια Teflon-περίπτωση μονολιθικής στήριξης



Εικόνα 1.16 Προσωρινή στήριξη βάθρου και ανάρτηση ζυλοτύπου από τα κατασκευασμένα στοιχεία και το βάθρο(γέφυρα Prague-Troja, Τσεχία)

www.greek-language.gr

Πιστοποίηση Βοήθεια Χάρτης Πλοήγησης Επικοινωνία

Νύδη για την Ελληνική γλώσσα

Νέα Ελληνική Γλώσσα

Αρχική Νέα Ελληνική Νεοελλ. Λογοτεχνία Μεσαιωνική Ελληνική Αρχαία Ελληνική Θεωρία & Ιστορία Ενμέρωση

Λεξικό της κοινής νεοελληνικής

ΑΒΓΔΕΖΗΘΙΚΛΜΝΞΟΠΡΣΤΥΦΧΨΩ

αντηρίδα Βρες

Επιλογές αναζήτησης

Αναζήτηση και στο σώμα των λημμάτων

Καλάθι

0 Προβολή Αδειασμα

Αναζήτηση για: αντηρίδα

1 εγγραφή

αντηρίδα η [andirída] **Ο26** : 1α. (αρχιτ.) στενός και επικλινής τοίχος που χτίζεται κάθετα σε άλλο μεγαλύτερο για να τον στηρίζει: *Εσωτερική / εξωτερική* ~. β. πρόχειρος πέτρινος τοίχος που χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του χώματος σε κατηφορικό έδαφος. γ. (τεχνολ.) οποιοδήποτε ξύλινο ή μεταλλικό δοκάρι που χρησιμοποιείται ως υποστήριγμα. 2. παραφυάδα. α. βουνό που έχει διαφορετική κατεύθυνση και έτσι προεξέχει από την κεντρική οροσειρά στην οποία ανήκει: *Οι αντηρίδες της Πίνδου*. β. βλαστός φυτού που φυτρώνει δίπλα στον κεντρικό από την ίδια ρίζα.

[λόγ.: 1: αρχ. *άντηρίς*, αιτ. *-ίδα* 2: σημδ. γαλλ. *contresfort*]

εικόνα 1.17 Σημασία και ορθή γραφή λέξης αντηρίδα

1.6.3 Κατάστρωμα

Το κατάστρωμα στις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) αποτελείται από τέσσερα (4) μέρη :

- Τα φέροντα καλώδια ή καλώδια ανάρτησης (bearing tendons)
- Τους προκατασκευασμένους σπονδύλους σκυροδέματος (precast segments)
- Το επιτόπου σκυρόδεμα δεύτερης φάσης (cast-in-place concrete)
- Τους τένοντες προέντασης (prestressing tendons)

1.6.3.1 Καλώδια ανάρτησης (bearing tendons)

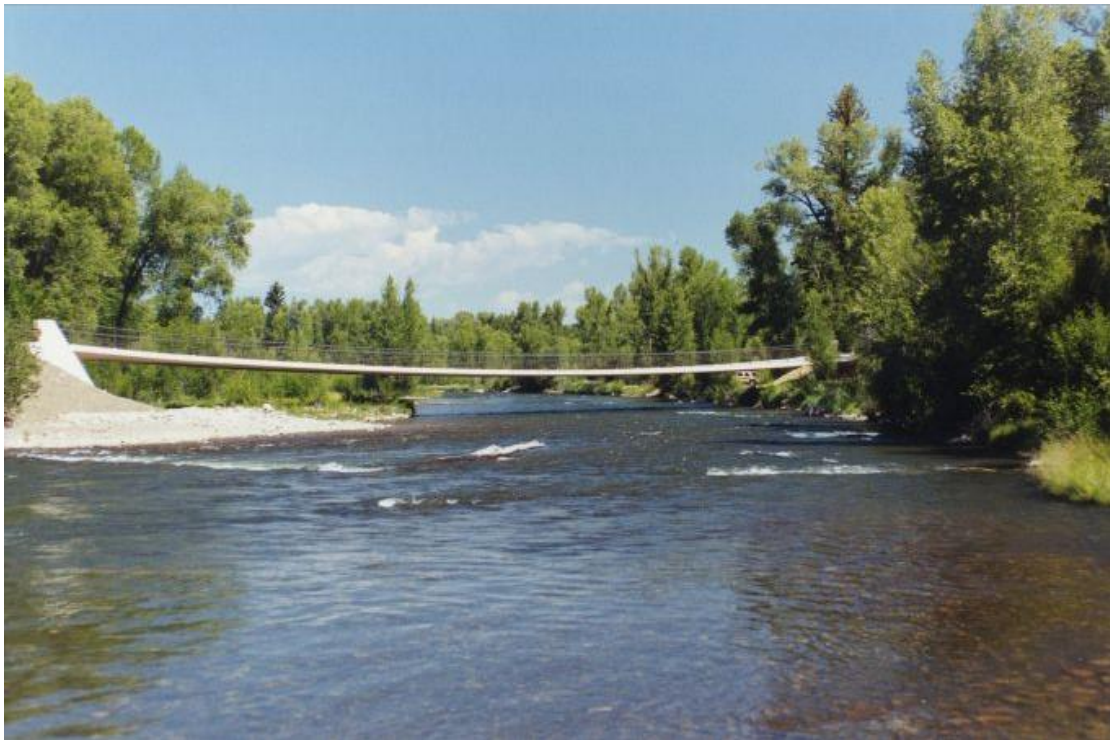
Βασικό συστατικό των γεφυρών stress ribbon είναι τα φέροντα καλώδια ή καλώδια ανάρτησης (bearing tendons). Ονομάζονται φέροντα , γιατί είναι αυτά που καλούνται να παραλάβουν το σύνολο των νεκρών φορτίων , δηλαδή το ίδιο βάρος τους , το βάρος των προκατασκευασμένων στοιχείων , το βάρος της πλάκας από σκυρόδεμα μετά την επιτόπου χύτευση και το βάρος των τενόντων προέντασης. Από την άλλη ονομάζονται καλώδια ανάρτησης , γιατί το κατάστρωμα αναρτάται από αυτά με έναν ιδιαίτερο και μοναδικό τρόπο που μοιάζει με τον τρόπο ανάρτησης των κρεμαστών γεφυρών με τη μόνη διαφορά ότι τα καλώδια ανάρτησης διέρχονται τώρα μέσα από το κατάστρωμα [**εικόνα 1.18**]

Τα καλώδια ανάρτησης είναι εύκαμπτοι φορείς που έχουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Η παραμορφωμένη εικόνα διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη με αποτέλεσμα οι εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και ροπών να γράφονται στην παραμορφωμένη κατάσταση των φορέων. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά των φερόντων καλωδίων είναι γεωμετρικά μη γραμμική. Οι φορείς αυτοί αναπτύσσουν μόνο εφελκυστικές εντάσεις κατά τον άξονα τους , ενώ δεν εμφανίζουν καμία αντίσταση σε κάμψη , διάτμηση ή θλίψη. Σε αντίθεση με τους δύσκαμπτους φορείς , όπου τα εξωτερικά φορτία αναλαμβάνονται με ανάπτυξη εσωτερικών εντάσεων , στους εύκαμπτους φορείς η δυνατότητα ανάληψης φορτίων οφείλεται στην παραμόρφωση τους , η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι τόσο μεγάλη , ώστε να μιλάμε για θεωρία μεγάλων μετατοπίσεων και μεγάλων παραμορφώσεων [**εικόνα 1.19**]

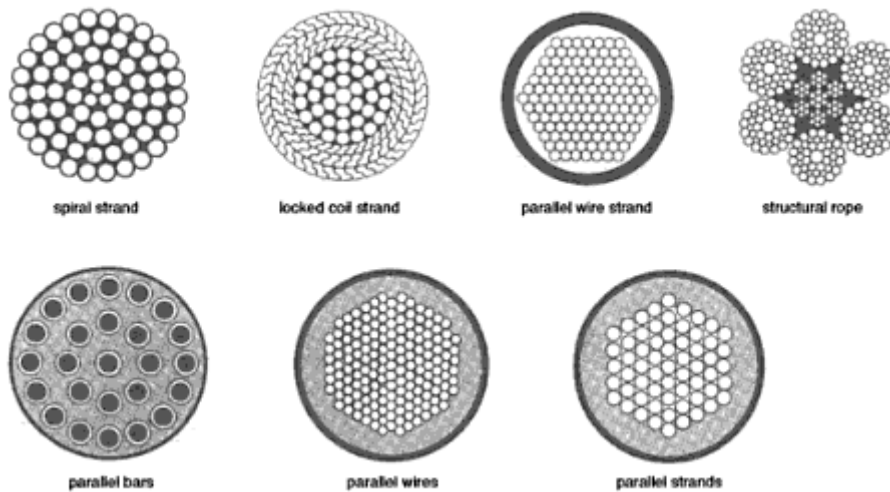
Οι συνήθεις τύποι των καλωδίων ανάρτησης έχουν τη μορφή της **εικόνας 1.20** και κατασκευάζονται κυρίως από χάλυβα. Μπορούν επίσης να κατασκευαστούν από σύνθετα υλικά ή προεντεταμένα μέλη σκυροδέματος. Περισσότερες λεπτομέρειες σε θέματα τεχνολογίας υλικών παρουσιάζονται στην ενότητα 2.5 Θέματα Τεχνολογίας του κεφαλαίου 2.



Εικόνα 1.18 Ανάρτηση καταστρώματος με καλώδια ανάρτησης στο εσωτερικό της διατομής (Γέφυρα stress ribbon, Redding, California, Αμερική)



Εικόνα 1.19 Εύκαμπτος φορέας γέφυρας stress ribbon, Colorado, Αμερική



Εικόνα 1.20 Μορφές καλωδίων ανάρτησης από χάλυβα

1.6.3.2 Προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι (precast segments)

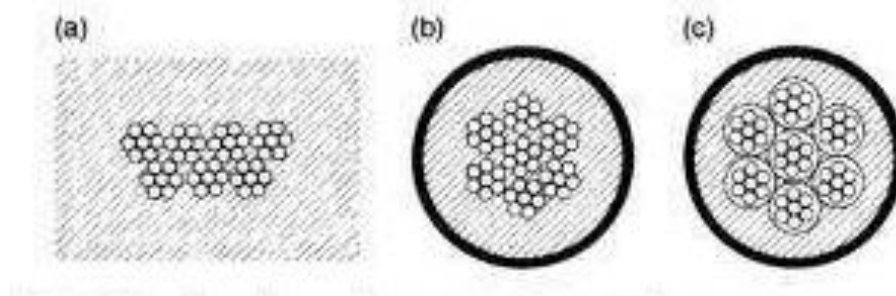
Μετά την ανάρτηση των καλωδίων ανάρτησης ακολουθεί η ανέγερση των προκατασκευασμένων σπονδύλων (precast segments). Οι σπόνδυλοι αυτοί είναι συνήθως από σκυρόδεμα, κατασκευάζονται σε πλήρες πλάτος και περιορισμένο μήκος. Άλλες φορές στηρίζονται, για την τοποθέτησή τους στο κατάλληλο σημείο, από τα φέροντα καλώδια της κατασκευής και άλλες φορές αναρτώνται από προσωρινά καλώδια ανάρτησης, τα οποία αφαιρούνται μετά την προέκταση του καταστρώματος. Τα φέροντα καλώδια μπορεί να τοποθετούνται εντός της διατομής ή εκτός, στα άκρα ή ομοιόμορφα κατανομημένα στη διατομή του καταστρώματος [εικόνες 1.22,1.23]. Οι προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι χρησιμεύουν ως καλούπι για τη χύτευση του σκυροδέματος της δεύτερης φάσης ή για την κατασκευή της σύμμικτης πλάκας. Τα καλώδια ανάρτησης αναρτώνται τα ίδια από σταθερά σημεία στα ακρόβαθρα με αποτέλεσμα, λόγω του βάρους τους αλλά και του μεγάλου μήκους που γεφυρώνουν, να παίρνουν το σχήμα μια αλυσοειδούς καμπύλης που προσεγγίζει την παραβολή δευτέρου βαθμού. Τότε, οι σπόνδυλοι αυτοί, κατά την προσαρμογή τους στα φέροντα καλώδια και λόγω του περιορισμένου μήκους τους ακολουθούν την καμπύλη αυτή σχηματίζοντας μια πολυγωνική γραμμή.

1.6.3.3 Επιτόπου σκυρόδεμα δεύτερης φάσης (cast-in-place concrete)

Για να ολοκληρωθεί η κατασκευή της γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) απαιτείται η επιτόπου χύτευση σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα εγχύεται χρησιμοποιώντας ως ξυλότυπο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τους προκατασκευασμένους σπονδύλους. Η χύτευση γίνεται σε όλο το μήκος της γέφυρας δημιουργώντας έτσι το δάπεδο και εξασφαλίζοντας τη συνέχεια για την εξυπηρέτηση των πεζών ή των ποδηλατιστών. Εκτός από την έγχυση σκυροδέματος για τη δημιουργία διαφράγματος, σκυρόδεμα εγχύεται και στους αρμούς μεταξύ των προκατασκευασμένων σπονδύλων, αλλά και στις υποδοχές της διατομής που μένουν ακάλυπτες. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η λειτουργία ενός ενιαίου φορέα χωρίς την απαίτηση αρμών στην πλάκα του καταστρώματος. Ο φορέας αυτός, μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, είναι σε θέση να παραλάβει εκτός από αξονικές, τέμνουσες δυνάμεις, αλλά και καμπτικές ροπές.

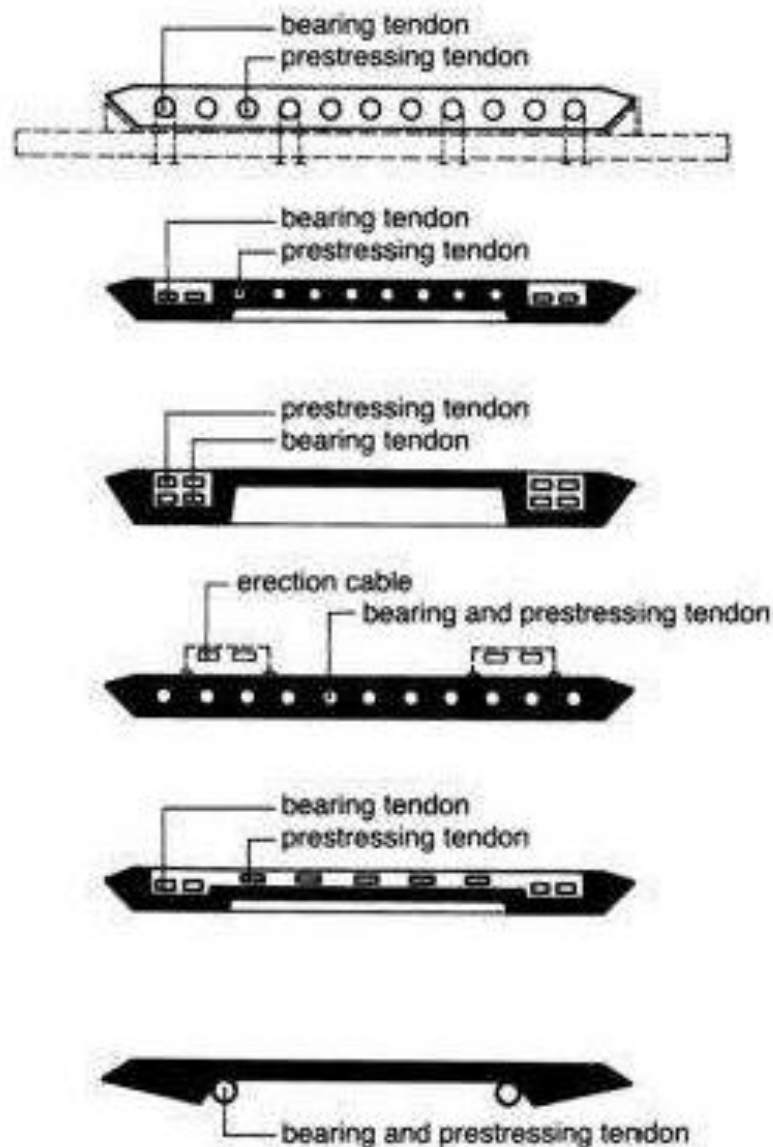
1.6.3.4 Τένοντες προέντασης (Prestressing tendons)

Στις γέφυρες stress ribbon πολύ σημαντική είναι και η λειτουργία των τενόντων προέντασης (prestressing tendons), αφού σε αυτούς οφείλεται η απόκτηση της απαιτούμενης δυσκαμψίας της κατασκευής, όπως και η εξασφάλιση της συνέχειας μετά τη χύτευση, σκλήρυνση και προένταση του σκυροδέματος του καταστρώματος. Όπως και τα καλώδια ανάρτησης έτσι και οι τένοντες προέντασης αποτελούνται από συρματοσχοίνα χάλυβα και παίρνουν τη μορφή της **εικόνας 1.21**. Συνήθως τοποθετούνται ομοιόμορφα στο πλάτος της διατομής στο σκυρόδεμα της δεύτερης φάσης [**εικόνα 1.22**]



Εικόνα 1.21 Μορφή φερόντων καλωδίων και τενόντων προέντασης

Μετά από αυτή τη συνοπτική περιγραφή των συστατικών μερών του καταστρώματος μιας τυπικής γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) παρουσιάζονται στην **εικόνα 1.22** οι τυπικές διατομές καταστρώματος που μπορεί να συναντήσει κανείς, όπου είναι εμφανή τα διάφορα μέρη του.



Εικόνα 1.22 Τυπικές διατομές καταστρώματος γεφυρών stress ribbon

Συνοψίζοντας , το κατάστρωμα των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους κατασκευάζεται συνήθως από προκατασκευασμένα στοιχεία ή , σε ειδικές περιπτώσεις , εξολοκλήρου από επιτόπου σκυρόδεμα με χρήση ξυλοτύπου. Σε κάθε περίπτωση , το κατάστρωμα πακτώνεται στα ακρόβαθρα και στηρίζεται από ενδιάμεσα βάθρα , όταν η γέφυρα αποτελείται από περισσότερα ανοίγματα [εικόνα 1.24]. Το κατάστρωμα κατασκευάζεται χωρίς καμία επίδραση (είτε περιβαλλοντική είτε λειτουργική) στο χώρο που πρόκειται να τοποθετηθεί. Οι σπόνδυλοι αναρτώνται από τα καλώδια ανάρτησης και κινούνται κατά μήκος αυτών στην κατάλληλη θέση. Η προένταση που επιβάλλεται μετά τη χύτευση της πλάκας του καταστρώματος ή οι αρμοί μεταξύ των προκατασκευασμένων σπονδύλων εξασφαλίζουν τη δομική ακεραιότητα του συνολικού καταστρώματος.



Εικόνα 1.23 προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι σε εξωτερικά καλώδια ανάρτησης



Εικόνα 1.24 Πάκτωση του καταστρώματος στα ακρόβαθρα, ποταμός Sacramento, Αμερική

1.7 ΜΟΡΦΕΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ-ΦΟΡΕΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μορφές των φορέων και οι αντίστοιχες μορφές στατικών συστημάτων για κάθε μορφή φορέα , αρχικά και εν συντομία για τις ολόσωμες γέφυρες και στη συνέχεια για τις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon).

1.7.1 ΟΛΟΣΩΜΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

1.7.1.1 ΓΕΦΥΡΕΣ ΜΟΡΦΗΣ ΔΟΚΟΥ

Στην οικογένεια αυτή ανήκουν τα εξής στατικά συστήματα:

- Αμφιέριστη δοκός με αρθρωτές στηρίξεις
- Σειρά αμφιερίστων δοκών με συνεχή πλάκα καταστρώματος (3 με 4 ανοίγματα).
- Δοκός Gerber
- ‘‘τραπέζια’’ προβόλων σε εναλλαγή με αναρτημένες δοκούς
- Συνεχής δοκός δύο η περισσότερων ανοιγμάτων

1.7.1.2 ΠΛΑΙΣΙΩΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

Μορφές στατικών συστημάτων:

- Τριαρθρωτά ισοστατικά πλαίσια ελεύθερα από εντάσεις που οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές ή υποχωρήσεις στηρίξεων
- Έκκεντρα τριαρθρωτά ισοστατικά πλαίσια με αμφιαρθρωτό στύλο
- Αμφιδιαρθρωτό πλαίσιο με ή χωρίς προεντεταμένο ελκυστήρα
- Διαρθρωτό πλαίσιο με πτερύγια και με κατακόρυφα ή λοξά βάθρα
- Αμφίπακτο πλαίσιο με ή χωρίς πτερύγια
- Κλειστό πλαίσιο για κάτω διαβάσεις σε δυσμενείς εδαφικές συνθήκες
- Διαρθρωτό πλαίσιο με σύστημα άντωσης με στήριξη άρθρωση ή ελαστική πάκτωση
- Πολύστυλα πλαίσια με άρθρωση ή πάκτωση στις στηρίξεις
- Πλαισιακή λειτουργία στα μεσόβραθα για την αποφυγή των κινητών εφεδράνων. Χρησιμοποιείται συχνά στις υψηλές κοιλαδογέφυρες

1.7.1.3 ΤΟΞΩΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

Μορφές στατικών συστημάτων:

- Τριαρθρωτό ισοστατικό τόξο με $l/f=5-12$ κατά την καμπύλη των πιέσεων
- Διαρθρωτό τόξο μία φορά υπερστατικό με $l/f=4-12$
- Αμφίπακτο τόξο 3 φορές υπερστατικό με $l/f=2-10$

1.7.1.4 ΚΡΕΜΑΣΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

Η κλασική μορφή κρεμαστής γέφυρας με παραβολικά καλώδια και κατακόρυφους αναρτήρες δεν προσφέρεται για ολόσωμες γέφυρες. Αντίθετα, η αυτοαγκυρούμενη κρεμαστή γέφυρα με λοξούς αναρτήρες (λειτουργία δικτυώματος) προσφέρεται για ελαφρά κινητά φορτία (π.χ. πεζογέφυρες)

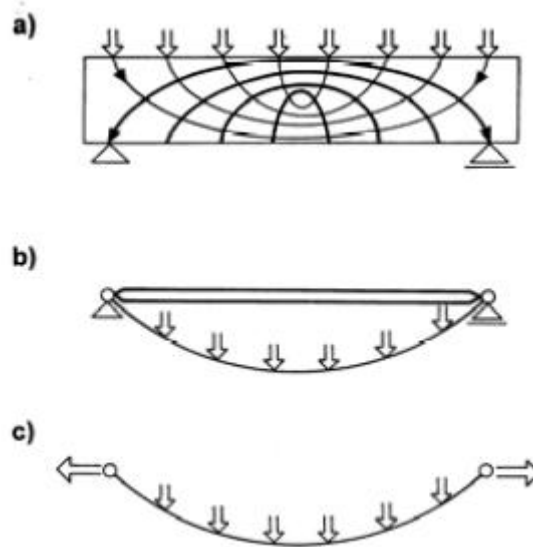
1.7.1.5 ΚΑΛΩΔΙΩΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

Το κατάστρωμα αναρτάται με λοξά καλώδια από πυλώνες. Τα καλώδια μπορεί να είναι λίγα και η απόσταση μεταξύ των σημείων ανάρτησης μεγάλη ή πολλά και η απόσταση μεταξύ των σημείων ανάρτησης μικρή. Στην πρώτη περίπτωση το στατικό σύστημα είναι δοκός με ενδιάμεσες στηρίξεις, ενώ στη δεύτερη το κατάστρωμα σχηματίζει το κάτω πέλμα και τα καλώδια το εφελκόμενο άνω πέλμα.

1.7.2 ΓΕΦΥΡΕΣ STRESS RIBBON

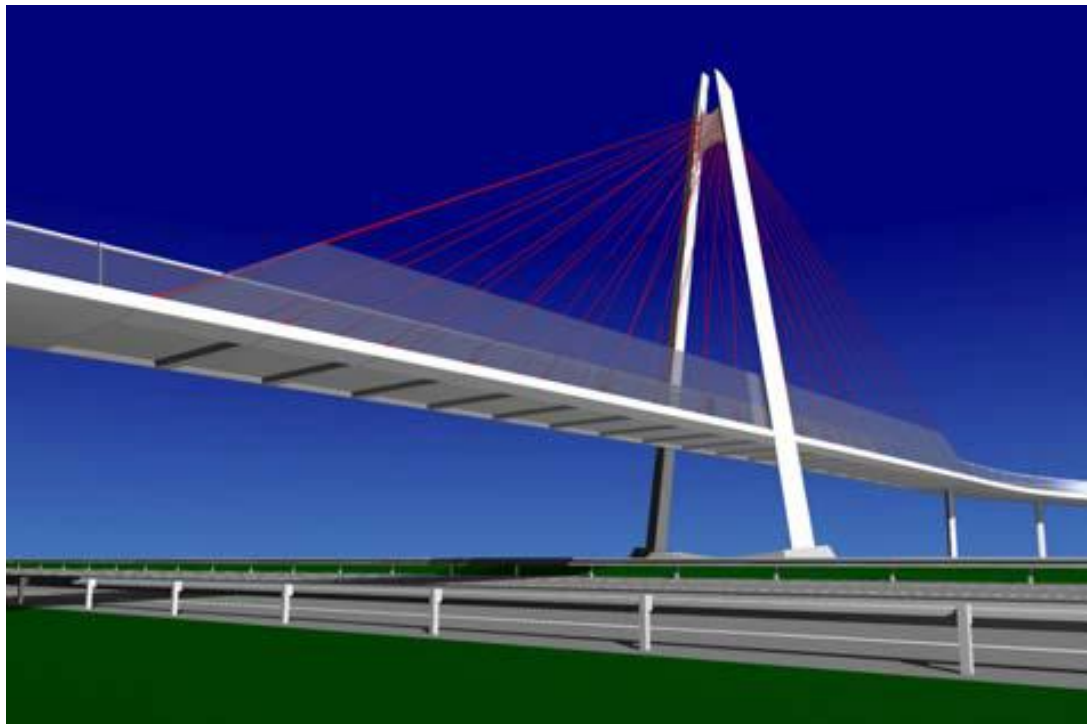
Οι γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους μπορεί να θεωρηθούν ολόσωμες ή μη, ανάλογα με τη μορφή τους. Σε κάθε περίπτωση, όμως, εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες με τις μορφές των φορέων ή τις μορφές των στατικών συστημάτων που αναπτύχθηκαν προηγουμένως. Έτσι, μπορεί να συναντήσει κανείς γέφυρες stress ribbon μορφής εύκαμπτης δοκού αμφιαρθρωτές ή αμφίπακτες ενός ανοίγματος ή συνεχείς δοκούς δύο ή περισσότερων ανοιγμάτων.

Οι γέφυρες stress ribbon είναι γέφυρες ανάρτησης, σαν τις κρεμαστές. Η ομορφιά της ανάρτησης προέρχεται από την οικονομικότητα του σχήματος, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 1.1**. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στην πάνω και κάτω ακραία ίνα της μεσαίας διατομής και ότι πολύ υλικό δε συνεισφέρει στην ανάληψη των εξωτερικών φορτίων. Για το λόγο αυτό, οι γέφυρες stress ribbon αξιοποιούν την εφελκυστική δυνατότητα των καλωδίων, περιορίζουν το υλικό και παίρνουν τόσο τη μορφή του **σχήματος 1.c**, στην περίπτωση όπου η θεμελίωση είναι ικανή να αναλάβει μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις, ή τη μορφή του **σχήματος 1.b**, όπου οι οριζόντιες δυνάμεις αναλαμβάνονται με τη βοήθεια ελκυστήρα.



Σχήμα 1.1 α)τροχιές κυρίων τάσεων σε αμφιέριστη δοκό υπό ομοιόμορφο φορτίο
 β)αυτοαγκυρούμενο καλώδιο , γ)εφελκνόμενο καλώδιο

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ταινιοδιάδρομος του καταστρώματος στις γέφυρες stress ribbon έχει μορφή παραβολής , όμως σε άλλες ειδικές περιπτώσεις μπορεί να συναντήσει κανείς και καταστρώματα stress ribbon γεφυρών που αναρτώνται από κεκλιμένα καλώδια , όπως αυτά των καλωδιωτών γεφυρών [εικόνα 1.25] ή κατακόρυφα , όπως αυτά των κρεμαστών γεφυρών [εικόνα 1.26]



Εικόνα 1.25 Γέφυρα I-5, Eugene, Oregon



Εικόνα 1.26 Γέφυρα McLoughlin, Oregon

Μια άλλη πιθανή μορφή φορέα stress ribbon είναι αυτή όπου το κατάστρωμα στηρίζεται σε τόξο είτε σχηματίζοντας ένα ανοιχτό σύστημα είτε ένα κλειστό αυτοαγκυρούμενο σύστημα [**εικόνα 1.27**]



Εικόνα 1.27 Γέφυρα στον ποταμό Svratka ,Τσεχία

Τέλος , οι γέφυρες stress ribbon μπορούν να έχουν μορφή ζιγκ-ζαγκ ή σταυροειδή μορφή σε κάτοψη , μπορεί να στηρίζονται με κεκλιμένες στηρίξεις και μπορεί να έχουν εξωτερικούς τένοντες για την απόδοση της απαιτούμενης δυσκαμψίας.

1.8 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

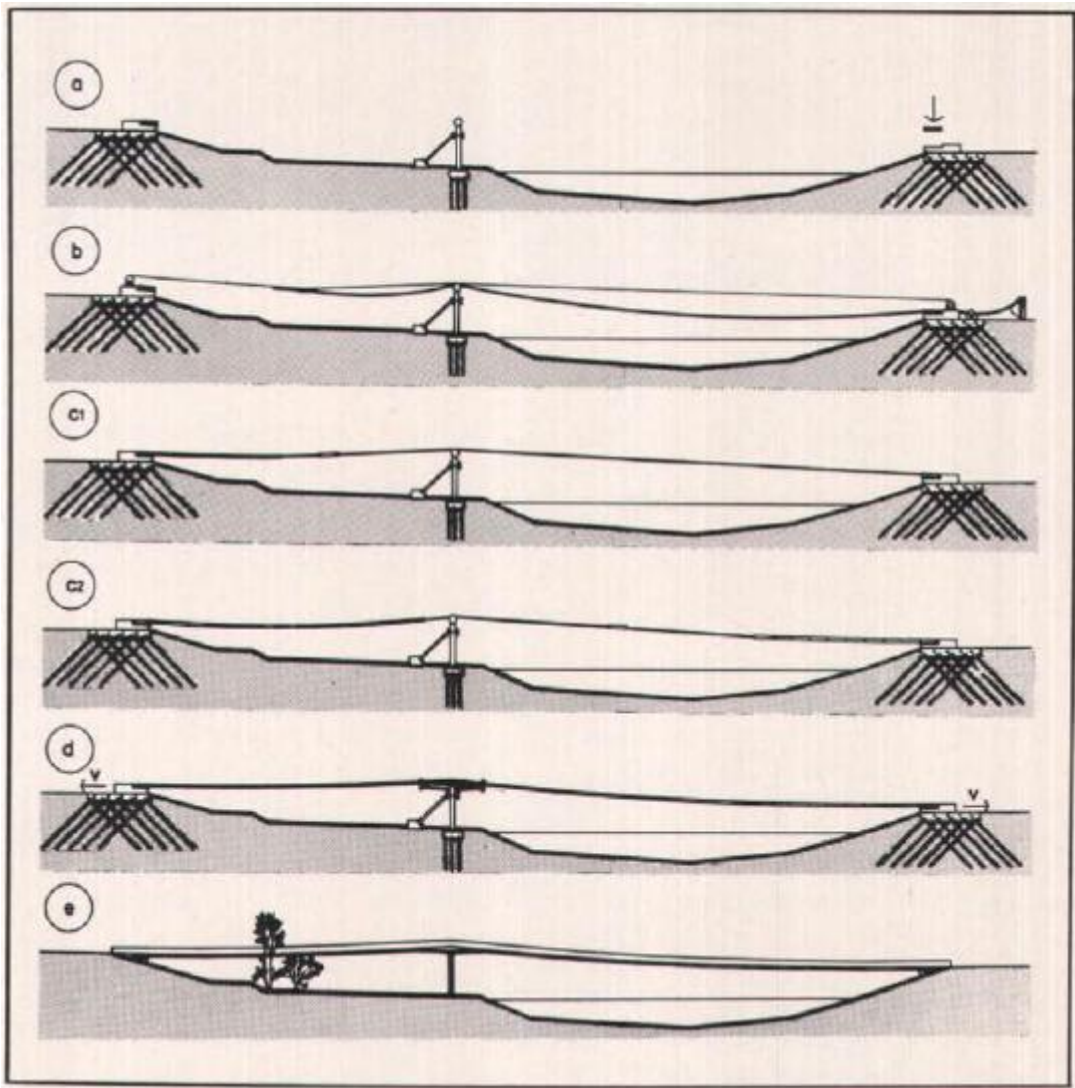
Καθοριστική για τη σωστή προσομοίωση και ανάλυση μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) είναι η γνώση και η κατανόηση της κατασκευαστικής ακολουθίας. Αρχικά κατασκευάζεται η υποδομή που περιλαμβάνει το σύστημα θεμελίωσης, τα ακρόβαθρα και τα μεσόβαθρα (αν υπάρχουν). Στη συνέχεια κατασκευάζεται η ανωδομή, δηλαδή το κατάστρωμα, το οποίο διαιρείται στα παρακάτω βήματα:

- Τοποθέτηση των ειδικών προκατασκευασμένων σπονδύλων της περιοχής των ακροβάθρων σε ελαστομεταλλικά εφέδρανα [**εικόνα 1.28**]. Στις άκρες των στοιχείων αυτών υπάρχουν υποδοχές από τις οποίες θα περάσουν αργότερα τα καλώδια ανάρτησης (bearing tendons). Στο βήμα αυτό κατασκευάζεται, επίσης, η προσωρινή μεταλλική αντηρίδα για τη σταθεροποίηση του μεσόβαθρου, όταν υπάρχει. [**εικόνα 1.29.a**]



Εικόνα 1.28 τοποθέτηση των ειδικών ακραίων σπονδύλων σε ελαστομεταλλικά εφέδρανα

- Ανέγερση φερόντων καλωδίων ή καλωδίων ανάρτησης με τη βοήθεια βαρούλκου (**βαρούλκο** < *αρχαία ελληνική βαρουλκός (μηχανή)* < *βάρος + έλκω* , *μηχανή για την έλξη μεγάλου βάρους*). Τα συρματόσχοινα ξετυλίγονται από τους ρόλους και επιβραδύνονται στα ακρόβαθρα με τη βοήθεια φρένου που εξασφαλίζει ότι όλα τα συρματόσχοινα έχουν το ίδιο μήκος. Κάθε ένα από τα καλώδια ανάρτησης συνδέεται με ένα βοηθητικό σχοινί που επιτρέπει την επιστροφή του σχοινιού έλξης [εικόνα 1.29.b]. Ύστερα από την ανάρτηση τους τα φέροντα καλώδια εντείνονται στην προδιαγεγραμμένη τάση [**εικόνα 1.30**]. Σε περίπτωση καλωδίων σε 2 στρώσεις μόνο η κατώτερη στρώση ανεγείρεται.
- Ανέγερση προκατασκευασμένων σπονδύλων (precast segments) με τη βοήθεια γερανού. Αρχικά ο σπόνδυλος τοποθετείται κάτω από τα καλώδια ανάρτησης ή , όπως αλλιώς αποκαλούνται , ταινιόδρομους. Στη συνέχεια , ο σπόνδυλος ανασηκώνεται μέχρις ότου τα καλώδια ανάρτησης έρθουν σε επαφή με την κάτω παρειά της υποδοχής του προκατασκευασμένου στοιχείου [εικόνα 1.31]. Τότε , τοποθετούνται στη θέση τους μικροί αναρτήρες οι οποίοι



Εικόνα 1.29 Διαδικασία κατασκευής καταστρώματος γέφυρας stress ribbon



Εικόνα 1.30 φέροντα καλώδια (bearing tendons)



Εικόνα 1.31 Ανέγερση προκατασκευασμένων σπονδύλων με γερανό και τοποθέτηση τους κάτω από τους ταινιοδιαδρόμους (πεζογέφυρα στο San Diego, California, Αμερική)

ασφαλίζουν με τη βοήθεια κοχλιωτών συνδέσεων. Ο σπόνδυλος έχει τώρα συνδεθεί σφιχτά με το σχοινί έλξης (hauling rope) που συνδέεται με το βοηθητικό σχοινί (auxiliary rope), ώστε να επιτρέπει την προς τα πίσω έλξη του πρώτου, και μεταφέρεται με τη βοήθεια βαρούλκου στην κατάλληλη θέση χρησιμοποιώντας ως οδηγό τους ταινιοδιαδρόμους [**εικόνα 1.32,1.33**]. Πριν τη σύνδεση του σπονδύλου με τους προηγούμενους τοποθετημένους σπονδύλους τοποθετούνται οι σωλήνες για τη σύζευξη των τενόντων προέντασης [**εικόνα 1.34**]. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την ανέγερση όλων των προκατασκευασμένων σπονδύλων [**εικόνα 1.29.c₁,c₂**]



Εικόνα 1.32 μεταφορά του προκατασκευασμένου σπονδύλου στην κατάλληλη θέση κατά μήκος των ταινιοδιαδρόμων με τη βοήθεια σχοινιού έλξης και βοηθητικού σχοινιού



Εικόνα 1.33 προκατασκευασμένος σπόνδυλος σε καλώδια ανάρτησης. Διακρίνεται το σχοινί έλξης στο κέντρο και το βοηθητικό σχοινί στο άκρο της διατομής



Εικόνα 1.34 τοποθέτηση σωλήνων για τη σύζευξη των τενόντων προέντασης στους αρμούς μεταξύ των προκατασκευασμένων σπονδύλων (γέφυρα Brno-Komín, Τσεχία)

- Σε γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) με δύο σειρές καλωδίων ανάρτησης , τώρα , μετά , δηλαδή , την ανέγερση όλων των σπονδύλων [εικόνα 1.35] , επιμηκύνεται και εντείνεται και η ανώτερη σειρά , ώστε το κατάστρωμα να πάρει την επιθυμητή γεωμετρία σχεδιασμού. Στη συνέχεια , αναρτάται ο ξυλότυπος για την κατασκευή της περιοχής της μονολιθικής στήριξης (haunch) [εικόνα 1.16] από τους γειτονικούς σπονδύλους και το μεσόβαθρο ή τα ακρόβαθρα [εικόνα 1.29.d] Αργότερα , τοποθετούνται οι τένοντες προέντασης και ο μη προεντεταμένος σπλισμός [εικόνα 1.36].

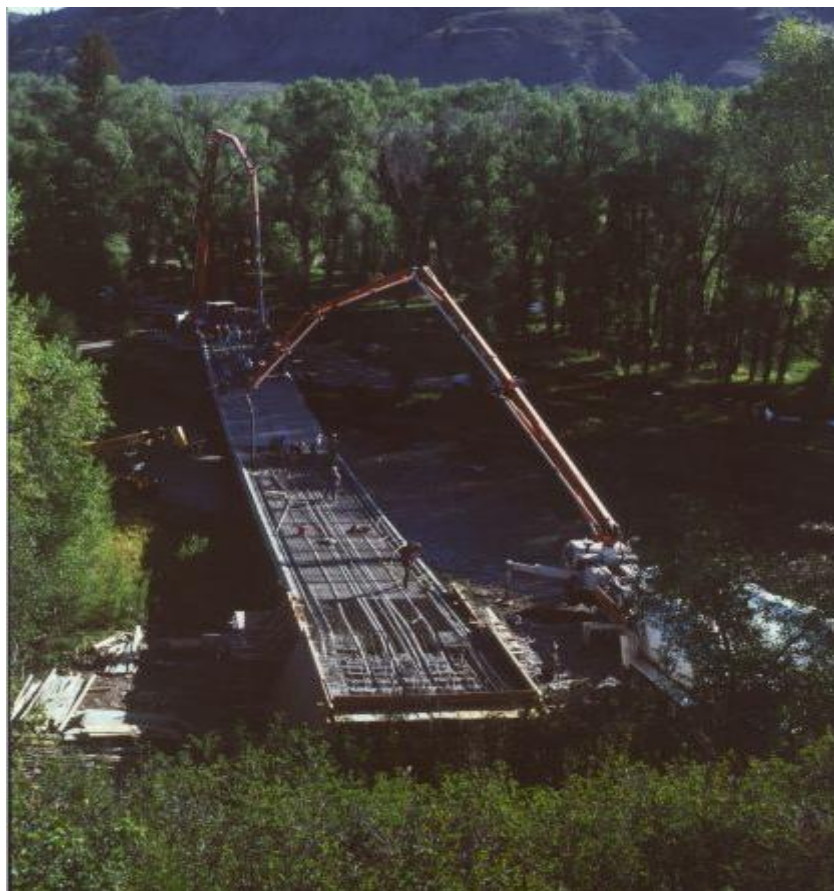


Εικόνα 1.35 Κατάστρωμα πεζογέφυρας Grants pass, Oregon, Αμερική μετά την ανέγερση όλων των σπονδύλων



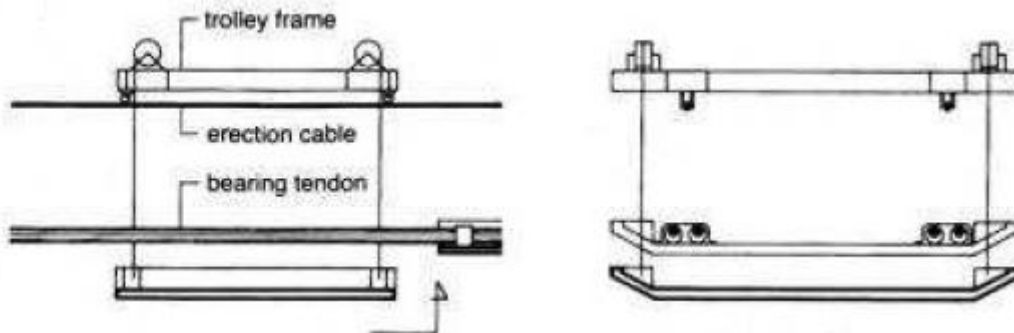
Εικόνα 1.36 Φέροντα καλώδια και τένοντες προέντασης

- Χύτευση σκυροδέματος δεύτερης φάσης στους αρμούς μεταξύ των προκατασκευασμένων σπονδύλων , στην περιοχή της μονολιθικής στήριξης και στις υποδοχές που φιλοξενούν τα καλώδια ανάρτησης ή ταινιοδιαδρόμους [εικόνα 1.37,1.29.e]. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί επιβραδυντής της εξώθερμης διαδικασίας σκλήρυνσης του σκυροδέματος μέχρι τη στιγμή που το σκυρόδεμα έχει εγχυθεί σε όλο το μήκος του καταστρώματος. Προκειμένου να μειωθούν οι επιδράσεις της συστολής ξηράνσεως , της θερμοκρασιακής πτώσης ή της τυχηματικής κίνησης των πεζών συνιστάται η μερική προένταση του καταστρώματος όσο το δυνατόν νωρίτερα. Όταν επιτευχθεί μια ελάχιστη αντοχή , η γέφυρα stress ribbon προεντίνεται στην πλήρη τάση σχεδιασμού.

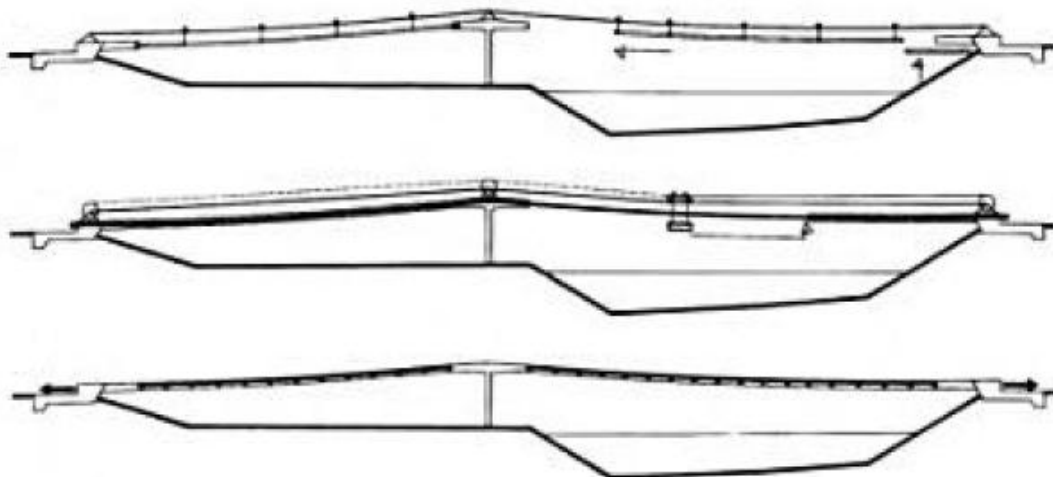


Εικόνα 1.37 επιτόπου χύτευση σκυροδέματος δεύτερης φάσης

Η διαδικασία κατασκευής διαφέρει λίγο από την προηγούμενη στην περίπτωση όπου οι ταινιοδιαδρόμοι περνούν μέσα από σωλήνες. Τότε , αρχικά χρησιμοποιείται ένα βοηθητικό καλώδιο που αγκυρώνεται στα ακρόβαθρα , αναρτά τους σωλήνες σε τμήματα και τους τοποθετεί στην κατάλληλη θέση. Μετά την ανέγερση των σωλήνων τα συρματόσχοινα των ταινιοδιαδρόμων προεντείνονται στην επιθυμητή τάση. Οι προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι σκυροδέματος ανεγείρονται είτε με τη βοήθεια γερανού , σε όλο το μήκος αν το άνοιγμα είναι μικρό , είτε με τη βοήθεια πλαισίου που στηρίζεται στο βοηθητικό καλώδιο [εικόνα 1.38,1.39]. Όπως και προηγουμένως οι σπόνδυλοι ανασηκώνονται ώστε να ακουμπήσουν τους ταινιοδιαδρόμους , ενώ ταυτόχρονα τοποθετούνται και ασφαλίζουν οι αναρτήρες. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ανεγερθούν όλοι οι σπόνδυλοι. Τότε , τοποθετείται ο προεντεταμένος και μη οπλισμός και γίνεται η χύτευση σκυροδέματος στους αρμούς , τις περιοχές των στηρίξεων και στις υποδοχές των ταινιοδιαδρόμων. Τέλος , αφού το σκυρόδεμα αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή προεντείνεται μέσω των τενόντων προέντασης.



Εικόνα 1.38 πλαίσιο και βοηθητικό καλώδιο ανέγερσης σπονδύλων



Εικόνα 1.39 εναλλακτική κατασκευή σε φάσεις stress ribbon με χρήση βοηθητικού καλωδίου και πλαισίου ανέγερσης σπονδύλων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ-ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΔΡΑΣΕΙΣ-ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ

Οι πεζογέφυρες σχεδιάζονται για ομοιόμορφα κινητά φορτία με μέγεθος περίπου ίσο ή και μεγαλύτερο από τις οδογέφυρες. Το βασικό ομοιόμορφο φορτίο, που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4 kN/m^2 και 5 kN/m^2 , μειώνεται ανάλογα με το μήκος και το πλάτος της γέφυρας. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα δομικά μέλη πρέπει να σχεδιάζονται για φορτία μεγάλης έντασης σε μικρές επιφάνειες και για φορτία μικρότερης έντασης σε μεγαλύτερες επιφάνειες. Παρ' όλα αυτά αν μια πεζογέφυρα εξυπηρετεί χρήστες στην περιοχή ενός αθλητικού γηπέδου, όπου σε ορισμένες καταστάσεις το πλήθος είναι πολυάριθμο, δεν πρέπει να γίνεται η μείωση του κινητού φορτίου. Επίσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και περιπτώσεις όπου το σύνολο των χρηστών βρίσκεται στη μία μεριά της γέφυρας για την παρακολούθηση ενός συναρπαστικού γεγονότος. Τέλος, οι πεζογέφυρες πρέπει να σχεδιάζονται και για φορτία έκτακτης ανάγκης, όπως ασθενοφόρα, πυροσβεστικά οχήματα, αστυνομικά οχήματα, οχήματα συντήρησης. Το βάρος ενός τέτοιου οχήματος κατανομημένο στην επιφάνεια του δεν υπερβαίνει τα 5 kN/m^2 , εφαρμόζεται όμως ως συγκεντρωμένο φορτίο στους τροχούς.

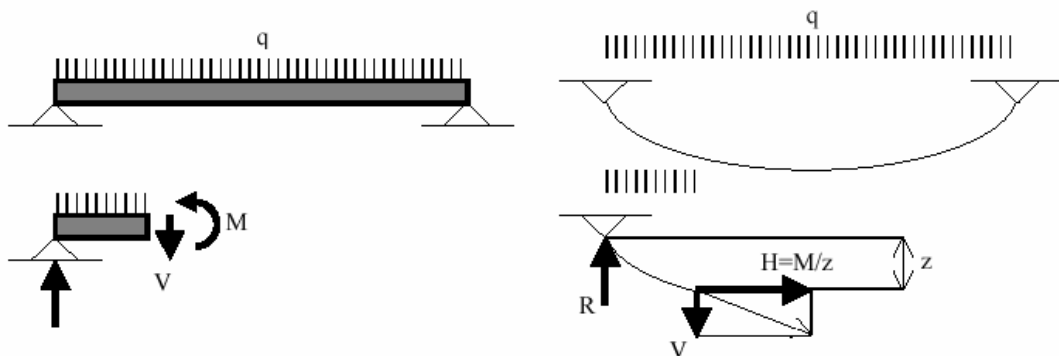


Εικόνα 2.1 Φορτίο πεζών στη φάση λειτουργίας της πεζογέφυρας stress ribbon Maidstone, Kent, Αγγλία.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

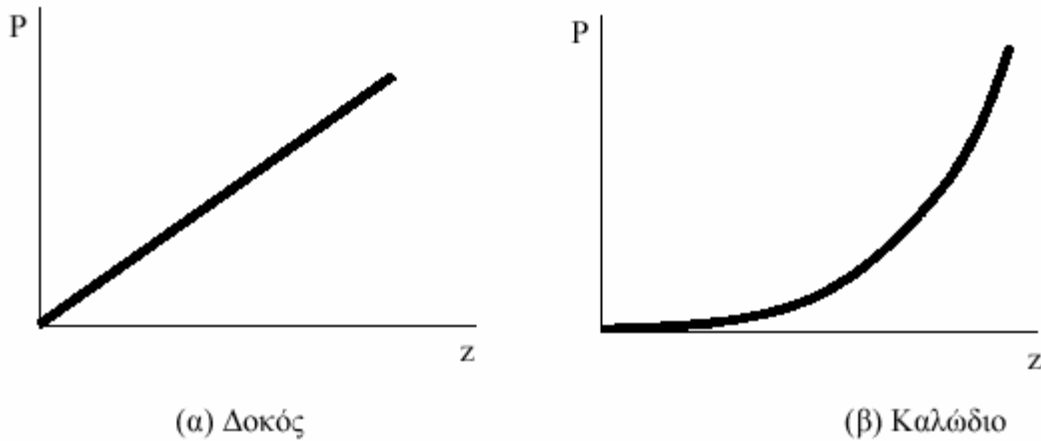
2.2.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ

Η ανάλυση μιας γέφυρας τύπου Stress Ribbon απαιτεί την προηγούμενη γνώση και τη βαθύτερη κατανόηση της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου καλωδίου. Με τον όρο καλώδιο εννοούμε το δομικό εκείνο στοιχείο το οποίο μεταφέρει στη θεμελίωση ή στο σύστημα ανάρτησης/στήριξης μόνο αξονικές εφελκυστικές δυνάμεις χωρίς να επιτρέπει τη θλίψη ή την κάμψη. Τα μηχανικά και αδρανειακά του χαρακτηριστικά οφείλονται κυρίως στη γεωμετρία της διατομής καθώς και στην παραγωγική διαδικασία που είναι υπεύθυνη για τη σημαντική εφελκυστική δυσκαμψία και τη μειωμένη διατμητική ή καμπτική δυσκαμψία ή αντίσταση σε λυγισμό. Η ανάλυση της έντασης από τα εξωτερικά φορτία επιτυγχάνεται μέσω της παραμόρφωσης του καλωδίου και όχι μέσω ανάπτυξης πρόσθετων τάσεων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υλικού και τη μη απαίτηση ειδικών σχημάτων διατομών όπως συμβαίνει στα καμπτόμενα μέλη. Πιο συγκεκριμένα η ροπή που αναπτύσσεται από τα εξωτερικά φορτία εξισορροπείται από την οριζόντια συνιστώσα της εφελκυστικής έντασης του καλωδίου πολλαπλασιαζόμενη με το κατακόρυφο βέλος από την απαραμόρφωτη στην παραμορφωμένη κατάσταση.



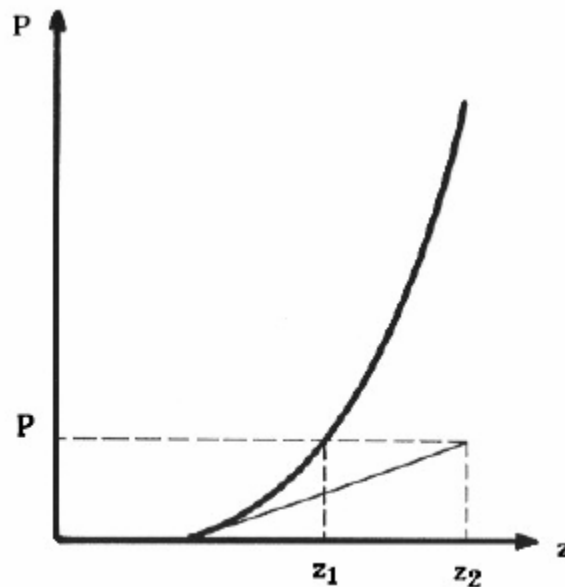
Σχήμα 2.1. μεταφορά δυνάμεων στη δοκό και το καλώδιο

Συνέπεια των μεγάλων μετατοπίσεων που υφίστανται οι καλωδιωτές κατασκευές όταν φορτίζονται είναι να διαφέρει σημαντικά η παραμορφωμένη από την απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα. Με δεδομένο ότι ο φορέας ισορροπεί υπό την επίδραση των φορτίων στην παραμορφωμένη γεωμετρία, προκύπτει η ανάγκη να γράφονται οι εξισώσεις καλωδιωτών φορέων στην παραμορφωμένη και όχι στην απαραμόρφωτη γεωμετρία. Η παραμορφωμένη γεωμετρία όμως δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Η επίλυση του προβλήματος στατικής ανάλυσης αυτών των φορέων απαιτεί επομένως επαναλήψεις. Ο δρόμος ισορροπίας που προκύπτει είναι καμπύλη και όχι ευθεία γραμμή, όπως στους φορείς που χαρακτηρίζονται από μικρές μετατοπίσεις. Επομένως δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας και δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι κλασσικές μέθοδοι στατικής ανάλυσης. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως γεωμετρική μη γραμμικότητα και είναι κύριο χαρακτηριστικό της στατικής συμπεριφοράς των εφελκυσόμενων κατασκευών.



Σχήμα 2.2. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης σε δοκό και καλώδιο

Αν αντί για την πραγματική, παραμορφωμένη γεωμετρία και το πραγματικό μητρώο δυσκαμψίας χρησιμοποιηθεί το αρχικό μητρώο δυσκαμψίας στην απαραμόρφωτη γεωμετρία αγνοώντας το φαινόμενο της γεωμετρικής μη γραμμικότητας τότε ο υπολογισμός της απόκρισης είναι λανθασμένος, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.3. Σφάλμα αγνοώντας τη μη γραμμικότητα

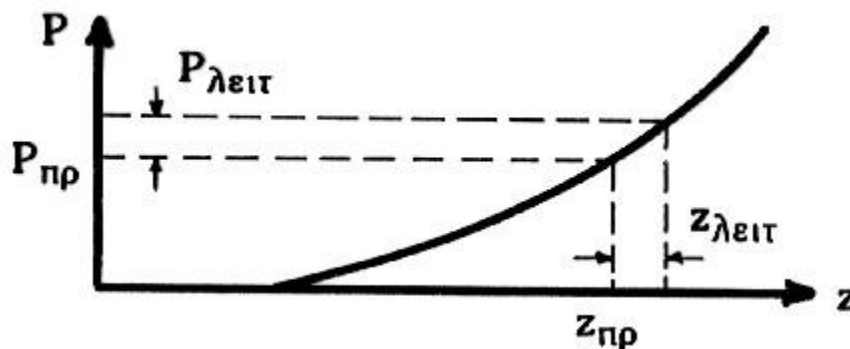
Εκτός από τη γεωμετρική μη γραμμικότητα υπάρχει και η μη γραμμικότητα του υλικού. Ωστόσο η συμπεριφορά του υλικού μπορεί να θεωρηθεί γραμμική στο εύρος των παραμορφώσεων και τάσεων που αναπτύσσονται.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παραμορφωμένη γεωμετρία είναι άγνωστη. Υπάρχουν παρ' όλα αυτά δύο δυνατές επιλογές για τον καθορισμό της γεωμετρίας:

α) να **οριστεί** η αρχική γεωμετρία κατά την οποία η κατασκευή είναι ελεύθερη τάσεων και η κινηματική συμπεριφορά της καθορίζεται από τους περιορισμούς που εισάγει ο τρόπος σύνδεσης των διαφόρων τμημάτων μεταξύ τους και να **προκύψει από ανάλυση** η γεωμετρία μετά την εφαρμογή της προέντασης. Ο όρος προένταση δηλώνει τη διαδικασία κατά την οποία η κατασκευή υποβάλλεται σε εξωτερικές δυνάμεις που τη μετακινούν σε μια νέα γεωμετρία εξαρτώμενη από την αρχική και από το μέγεθος της δύναμης με στόχο την αύξηση της δυσκαμψίας. Αυτή η λύση είναι κατάλληλη για εύκολη εργοστασιακή παραγωγή, αλλά συνήθως δε δίνει ακριβώς την επιθυμητή γεωμετρία λειτουργίας

β) να οριστεί η επιθυμητή γεωμετρία λειτουργίας (μετά την προένταση) και με αντίστροφη ανάλυση να προκύψει η αρχική γεωμετρία. Το μειονέκτημα είναι ότι πιθανόν να προκύψει αρχική γεωμετρία που είναι δύσκολο να παρασκευασθεί.

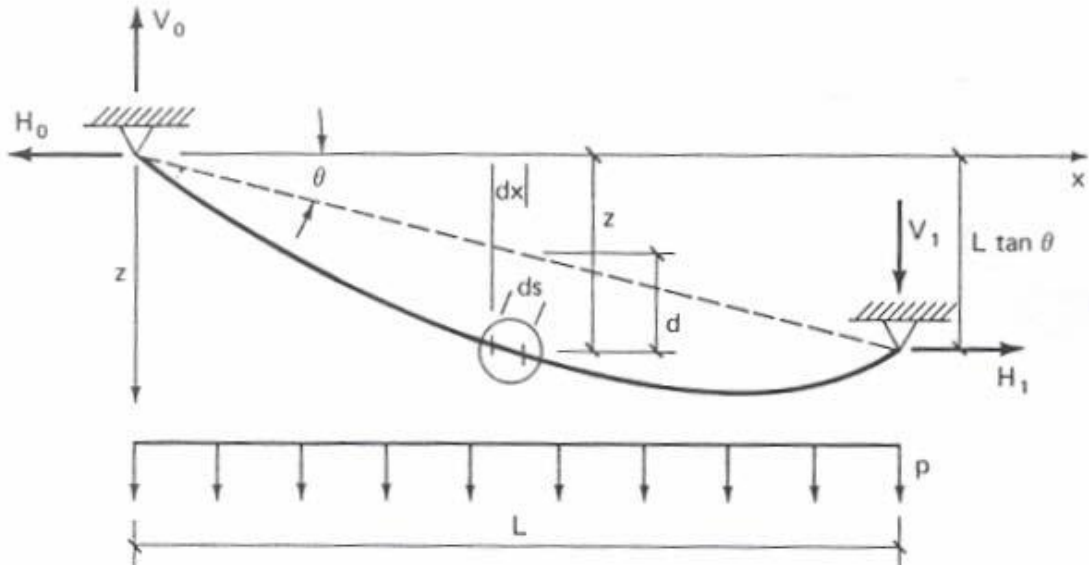
Στη φάση λειτουργίας ένα καλώδιο μπορεί να συμπεριφέρεται είτε γραμμικά είτε μη γραμμικά ανάλογα με το πόσο μεγάλα είναι τα φορτία λειτουργίας σε σύγκριση με τις δυνάμεις προέντασης.



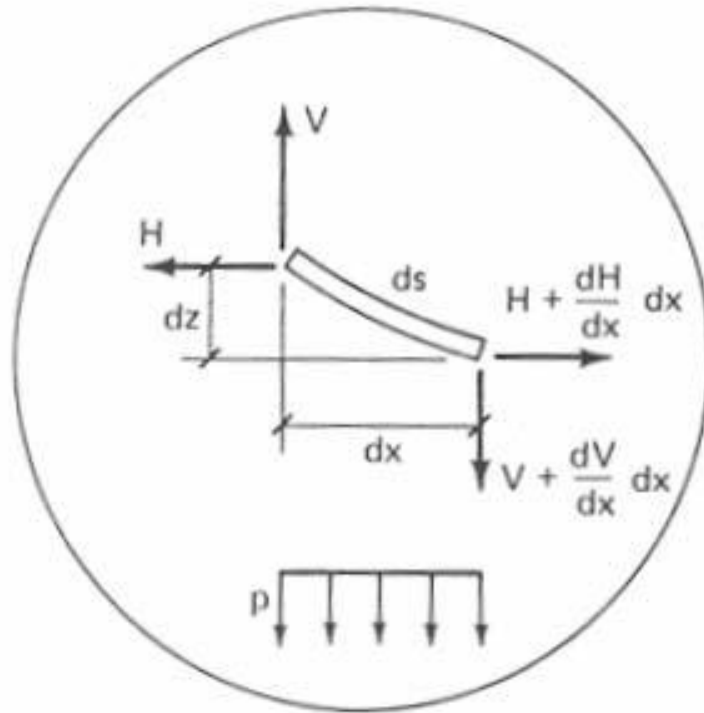
Σχήμα 2.4. Απόφαση για γραμμική ή μη συμπεριφορά

2.2.1.1 ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ

Έστω καλώδιο με αρχικό απαραμόρφωτο μήκος S_0 που γεφυρώνει οριζόντια απόσταση L . Ασκούμε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος της οριζόντιας προβολής του. Θεωρούμε ως ανεξάρτητη μεταβλητή την οριζόντια συντεταγμένη x και ως εξαρτημένες μεταβλητές την οριζόντια συνιστώσα H και την κατακόρυφη συνιστώσα V της έντασης T , το βέλος z και το παραμορφωμένο μήκος s του καλωδίου ως τη θέση x . Από την εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση λαμβάνουμε τα εξής :



Σχήμα 2.5. Αρχική, παραμορφωμένη γεωμετρία, φορτία, αντιδράσεις



Σχήμα 2.6. Δυνάμεις στο στοιχειώδες τμήμα

$$dH/dx=0 \rightarrow H=H_0 \quad (2.1)$$

$$dV/dx=-p \rightarrow V=V_0-p \cdot x \quad (2.2)$$

όπου H_0 και V_0 είναι η οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της έντασης T_0 στην αριστερή στήριξη αντίστοιχα, δηλαδή :

$$T_0 = \sqrt{H_0^2 + V_0^2} \quad (2.3)$$

Η συνολική ένταση σε τυχαία θέση δίνεται από τη σχέση :

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{H_0^2 + (V_0 - p \cdot x)^2} \quad (2.4)$$

Από εξισώσεις γεωμετρίας και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ένταση T είναι αξονική, και επομένως έχει διεύθυνση κατά την εφαπτομένη του παραμορφωμένου καλωδίου, έχουμε :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{V}{H} = \frac{V_0 - px}{H_0} \rightarrow z = \frac{x}{H_0} (V_0 - \frac{px}{2}) \quad (2.5)$$

$$\frac{ds}{dx} = \frac{T}{H} \rightarrow s = \frac{H_0}{2p} \left[\frac{V_0 T_0 - V_1 T_1}{H_0} + \log \left(\frac{T - V}{T_0 - V_0} \right) \right] \quad (2.6)$$

Οι σχέσεις αυτές προέκυψαν από ολοκλήρωση και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών : $z=0$ και $s=0$ για $x=0$, όπου επίσης $H=H_0$, $V=V_0$, $T=T_0$

Από τη συνοριακή συνθήκη στο δεξιό άκρο ($x=L$, $z=L \tan\theta$) :

$$V_0 = H_0 \tan\theta + \frac{pL}{2} \quad (2.7)$$

Και επομένως

$$V = H_0 \tan\theta + \frac{pl}{2} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \quad (2.8)$$

Η συνολική ένταση σε τυχαία θέση x είναι :

$$T = H_0 \sqrt{1 + \left[\tan\theta + \frac{pL}{2H_0} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right]^2} \quad (2.9)$$

Το βέλος z σε τυχαία θέση x προκύπτει :

$$z = x \tan\theta + \frac{pL(L-x)}{2H_0} = x \tan\theta + d \quad (2.10)$$

Παρατηρούμε ότι η κατακόρυφη απόσταση d μεταξύ της χορδής και του παραμορφωμένου καλωδίου είναι ίση με :

$$d = \frac{m_x}{H_0} \quad (2.11)$$

Όπου m_x είναι η ροπή της αντίστοιχης αμφιερίστου δοκού

Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος της ισοδύναμης αμφιέριστης δοκού υποθέτουμε ότι το βέλος στο μέσο του καλωδίου ($x=L/2$) είναι γνωστό ως ένα προκαθορισμένο ποσοστό του ανοίγματος δηλαδή : $dm = fL$ τότε η οριζόντια συνιστώσα της έντασης προκύπτει ως εξής:

$$dm = \frac{px}{2H_0} \left(L - \frac{L}{2} \right) \rightarrow H_0 = \frac{pL}{8f} = \frac{pL^2}{8dm} \quad (2.12)$$

Έτσι :

$$z = x \left[\tan\theta + 4f \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right] \quad (2.13)$$

$$V = \frac{pL}{2} \left(\frac{\tan\theta}{4f} + 1 - \frac{2x}{L} \right) \quad (2.14)$$

$$T = \frac{pL}{8f} \sqrt{1 + \left[\tan\theta + 4f \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right]^2} \quad (2.15)$$

Όταν δεν είναι γνωστή ούτε η οριζόντια συνιστώσα της έντασης H_0 ούτε το ούτε το βέλος σε κάποια θέση , τότε τα υπόλοιπα μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης πρέπει να προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας και τον καταστατικό νόμο του υλικού του καλωδίου. Υποθέτοντας ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι γραμμικά ελαστική , δηλαδή ισχύει ο νόμος του Hooke , έχουμε για το στοιχειώδες τμήμα του καλωδίου

$$\sigma = E\varepsilon \leftrightarrow \frac{T}{A} = E \frac{ds - ds_0}{ds_0} \leftrightarrow T = EA \left(\frac{ds - ds_0}{ds_0} \right) \quad (2.16)$$

Άρα

$$ds = ds_0 \left(1 + \frac{T}{EA} \right) \rightarrow \frac{ds}{dx} = \frac{ds_0}{dx} \left(1 + \frac{T}{EA} \right) = \frac{T}{H} \rightarrow \frac{ds_0}{dx} = \frac{\frac{T}{H}}{\left(1 + \frac{T}{EA} \right)} \quad (2.17)$$

Αντικαθιστώντας τις (1) και (9) στην τελευταία ισότητα της (17) και ολοκληρώνοντας για x από 0 έως L προκύπτει μία εξίσωση στο αριστερό μέλος της οποίας εμφανίζεται το γνωστό απαραμόρφωτο μήκος S_0 του καλωδίου και στο δεξιό μέλος μια συνάρτηση της οριζόντιας συνιστώσα της έντασης H_0 , δηλαδή προκύπτει αλγεβρική εξίσωση ως προς H_0 . Το πρόβλημα με αυτή την προσέγγιση είναι ότι η έκφραση του δεξιού μέλους της διαφορικής εξίσωσης είναι αρκετά πολύπλοκη , ώστε να μην υπάρχει αναλυτική λύση για το ολοκλήρωμα της. Είναι λοιπόν απαραίτητη η απλοποίηση της χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor , όπου:

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots \approx 1 - x, x \ll 1 \quad (2.18)$$

Συνήθως η ένταση του καλωδίου T είναι πολύ μικρότερη της εφελκυστικής του δυσκαμψίας EA , δηλαδή $\frac{T}{EA} \ll 1$, επομένως η ακριβής διαφορική εξίσωση

$$\frac{ds_0}{dx} = \frac{\frac{T}{H}}{\left(1 + \frac{T}{EA} \right)}$$

μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά

$$\frac{ds_0}{dx} = \frac{T}{H} \left(1 - \frac{T}{EA} \right) \quad (2.19)$$

Αντικαθιστώντας στην (19) τις σχέσεις (1) , (9) και $H_0 = \frac{pL}{8f}$ προκύπτει:

$$\frac{ds_0}{dx} = \sqrt{1 + [\tan\theta + 4f(1 - \frac{2x}{L})]^2} \left(1 - \frac{pL}{8fEA} \sqrt{1 + [\tan\theta + 4f(1 - \frac{2x}{L})]^2} \right) \quad (2.20)$$

Τώρα το δεξιό μέλος μπορεί να ολοκληρωθεί αναλυτικά ως προς x. Αντικαθιστώντας στην (20) τις σχέσεις $\rho = \frac{pL}{2AE}$ (2.21) , $v = \tan\theta + 4f(1 - 2x/L)$ (2.22) προκύπτει :

$$\frac{ds_0}{dx} = \sqrt{1 + v^2} \left(1 - \frac{\rho}{4f} \sqrt{1 + v^2} \right) \quad (2.23)$$

Ολοκληρώνοντας την (2.23) από $x=0$ έως $x=L$ προκύπτει η σχέση που δίνει το ολικό απαραμόρφωτο μήκος :

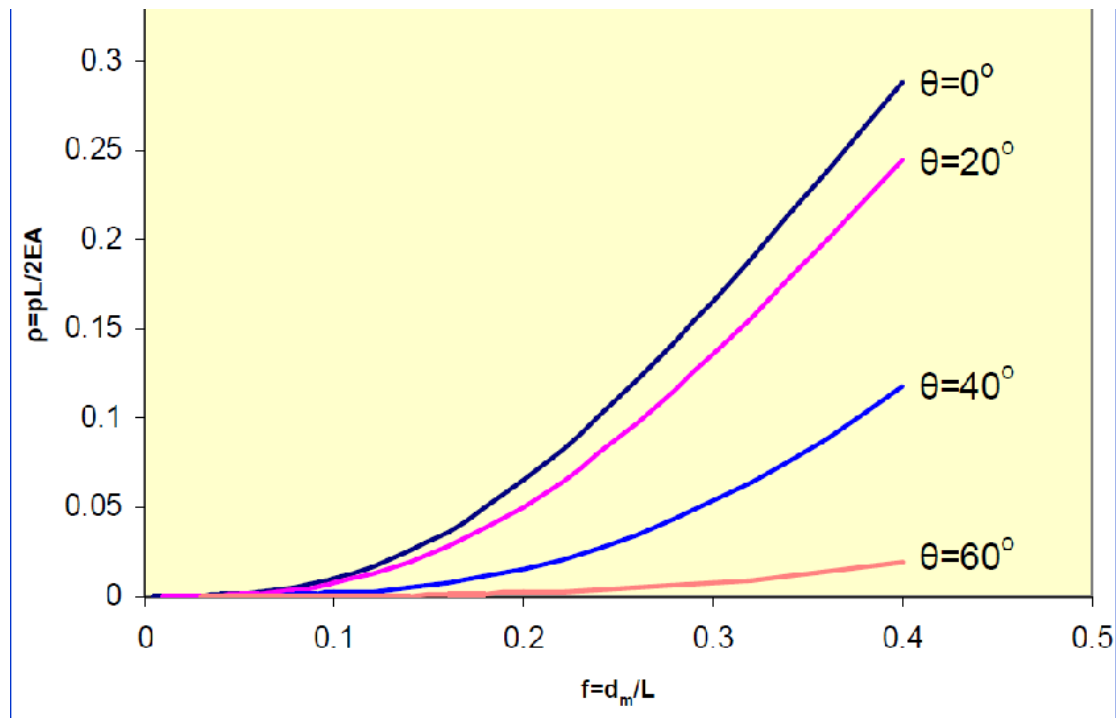
$$\begin{aligned} \frac{S_0}{L} = \frac{1}{16f} \left\{ \left[(v_0 \sqrt{1 + v_0^2} - v_1 \sqrt{1 + v_1^2}) + \log \left(\frac{v_0 + \sqrt{1 + v_0^2}}{v_1 + \sqrt{1 + v_1^2}} \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{\rho}{2f} \left[(v_1 - v_0) + \frac{v_1^3 - v_0^3}{3} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\text{Όπου } v_0 = v(x = 0) = \tan\theta + 4f \quad (2.25)$$

$$v_1 = v(x = L) = \tan\theta - 4f \quad (2.26)$$

Για την περίπτωση καλωδίου με στηρίξεις στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο :

$$\begin{aligned} \frac{S_0}{L} = \frac{1}{16f} \left\{ \left[8f \sqrt{1 + (4f)^2} + \log \left(\frac{\sqrt{1 + (4f)^2} + 4f}{\sqrt{1 + (4f)^2} - 4f} \right) \right] \right. \\ \left. - 4\rho \left(1 + \frac{(4f)^2}{3} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.27)$$



Σχήμα 2.7. Δρόμοι ισορροπίας

Στην περίπτωση του οριζόντιου καλωδίου και για μικρές τιμές του βέλους, δηλαδή $f \ll 1$, αν πολλαπλασιάσουμε τη σχέση (27) με $16f$ και την αναπτύξουμε σε σειρά Taylor προκύπτει:

$$16f \left(\frac{S_0}{L} \right) = -4\rho + 16f - \frac{64}{3}\rho f^2 + \frac{128}{3}f^3 - \frac{512}{5}f^5 + \frac{4096}{7}f^7 + \dots \quad (2.28)$$

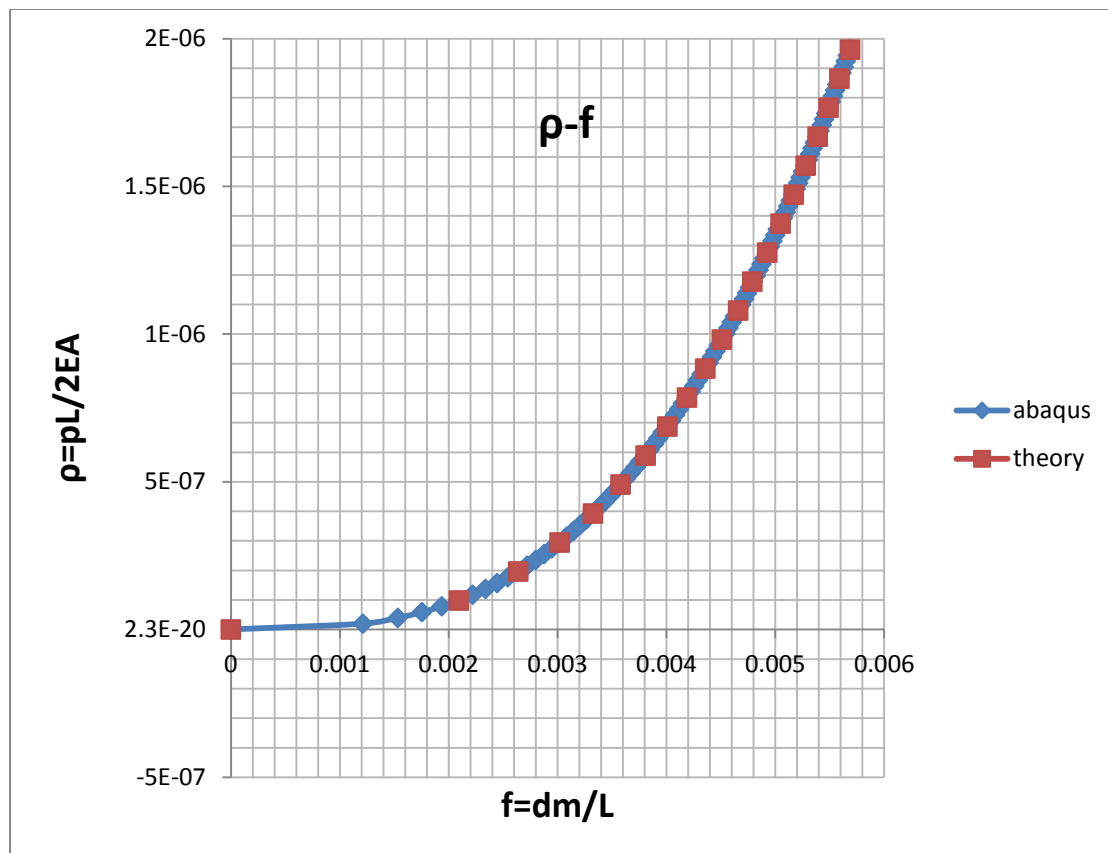
Αν αμεληθούν οι όροι 5^{ης} και ανώτερης τάξης, η σχέση αυτή είναι μια τριτοβάθμια εξίσωση ως προς f που μπορεί να γραφεί :

$$(4f)^3 - 2\rho(4f)^2 - 6 \left(\frac{S_0}{L} - 1 \right) (4f) - 6\rho = 0 \quad (2.29)$$

Η λύση αυτής της εξίσωσης μας δίνει το βέλος f αν είναι γνωστό το αρχικό μήκος S_0 του καλωδίου και το φορτίο ρ .

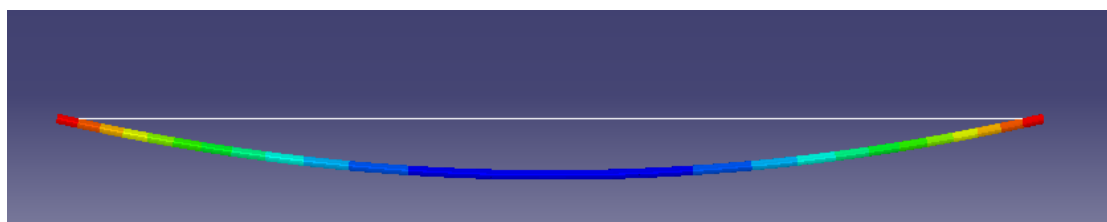
Για την ανάλυση της γεωμετρικά μη γραμμικής συμπεριφοράς των καλωδίων στην υπό μελέτη γέφυρα τύπου stress-ribbon χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Προκειμένου να διαπιστωθεί η εξοικείωση του χρήστη με το πρόγραμμα αλλά και αν υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης των καλωδίων με τη βοήθεια του Abaqus επιχειρείται η αναπαραγωγή της σχέσης (29) γραφικά και ύστερα η σύγκριση της γραφικής παράστασης της

σχέσης (29) με αυτή που προκύπτει από τα αποτελέσματα της ανάλυσης του καλωδίου με το Abaqus.



Σχήμα 2.8. Σύγκριση θεωρητικής και αριθμητικής καμπύλης

Είναι φανερό ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση των δύο καμπυλών, δηλαδή της θεωρητικής και αυτής που προκύπτει από ανάλυση με το Abaqus, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση καλωδίων. Στο παράδειγμα που χρησιμοποιείται γίνεται η υπόθεση ενός καλωδίου με συνολικό μήκος $L=10$ m, επιφάνεια $A=7.854 \cdot 10^{-5}$ το οποίο υπόκειται σε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κάθετα στον άξονα του ίσο με το ίδιο βάρος του καλωδίου. Όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του καλωδίου: $E=200$ GPa. Παρακάτω φαίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου και του απαραμόρφωτου φορέα, όπως προκύπτει από την ανάλυση με το Abaqus.



Σχήμα 2.9. Παραμορφωμένη και απαραμόρφωτη εικόνα καλωδίου υπό εγκάρσιο φορτίο κατά την οριζόντια προβολή με χρήση Abaqus

Εάν το καλώδιο είναι αρκετά δύσκαμπτο ώστε να θεωρηθεί μη εκτατό , τότε :

$EA \rightarrow \infty$ και επομένως $\rho=0$ και η γενική σχέση για το οριζόντιο καλώδιο

$$\frac{S_0}{L} = \frac{1}{16f} \left\{ 8f\sqrt{1 + (4f)^2} + \log \left(\frac{\sqrt{1 + (4f)^2} + 4f}{\sqrt{1 + (4f)^2} - 4f} \right) \right. \\ \left. - 4\rho \left(1 + \frac{(4f)^2}{3} \right) \right\} \quad (2.30)$$

γράφεται :

$$\frac{S_0}{L} = \frac{1}{16f} \left[8f\sqrt{1 + (4f)^2} + \log \left(\frac{\sqrt{1 + (4f)^2} + 4f}{\sqrt{1 + (4f)^2} - 4f} \right) \right] \quad (2.31)$$

Επίσης για μη εκτατό οριζόντιο καλώδιο η προσεγγιστική σχέση (2.31) γράφεται:

$$(4f)^2 - 6 \left(\frac{S_0}{L} - 1 \right) = 0 \quad (2.32)$$

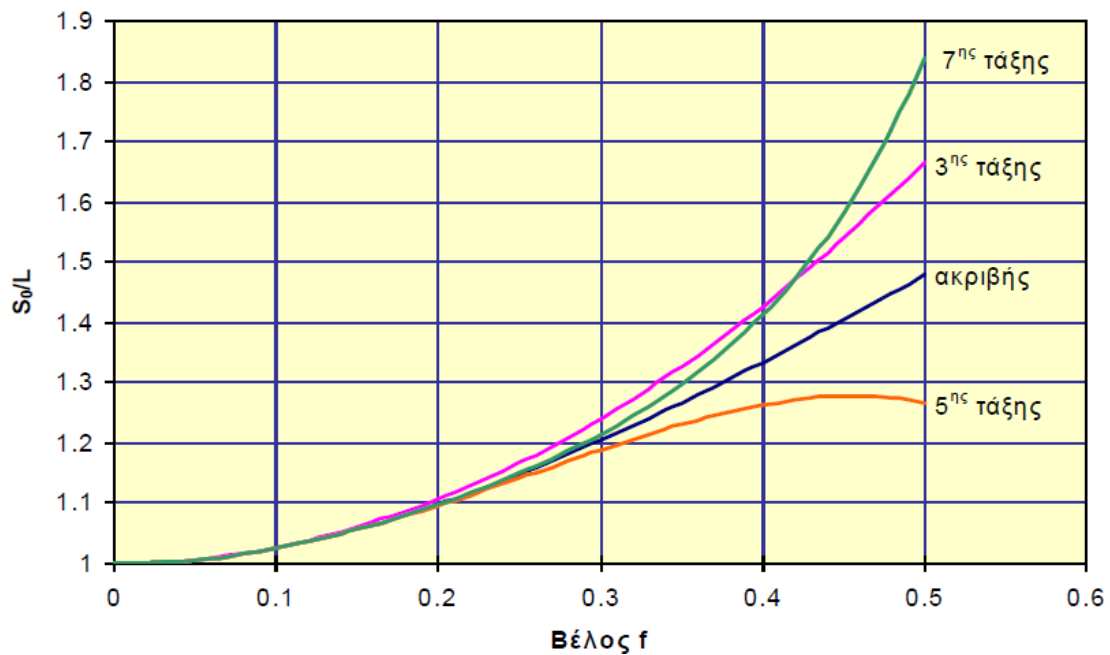
Η σχέση αυτή μπορεί να δώσει το βέλος για δεδομένο αρχικό μήκος:

$$f = \sqrt{\frac{3}{8} \left(\frac{S_0}{L} - 1 \right)} \quad (2.33)$$

ή εναλλακτικά το απαιτούμενο αρχικό μήκος για να αναπτυχθεί επιθυμητό βέλος:

$$\frac{S_0}{L} = 1 + \frac{8f^2}{3} \quad (2.34)$$

Ακριβέστερες εκφράσεις για την περίπτωση μεγαλύτερων βελών μπορούν να προκύψουν εάν κρατηθούν περισσότεροι όροι στο ανάπτυγμα Taylor



Σχήμα 2.10. Επίδραση ανώτερων όρων σειράς Taylor

Η προσεγγιστική λύση του βέλους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθούν προσεγγιστικές εκφράσεις της έντασης του καλωδίου με μέγιστη τιμή στα άκρα :

$$T = \frac{pL}{2} \sqrt{\frac{1}{6\left(\frac{S_0}{L} - 1\right)} + \left(1 - \frac{2x}{L}\right)^2} \quad (2.35)$$

$$T_{max} = \frac{pL}{2} \sqrt{\frac{1}{6\left(\frac{S_0}{L} - 1\right)} + 1} \quad (2.36)$$

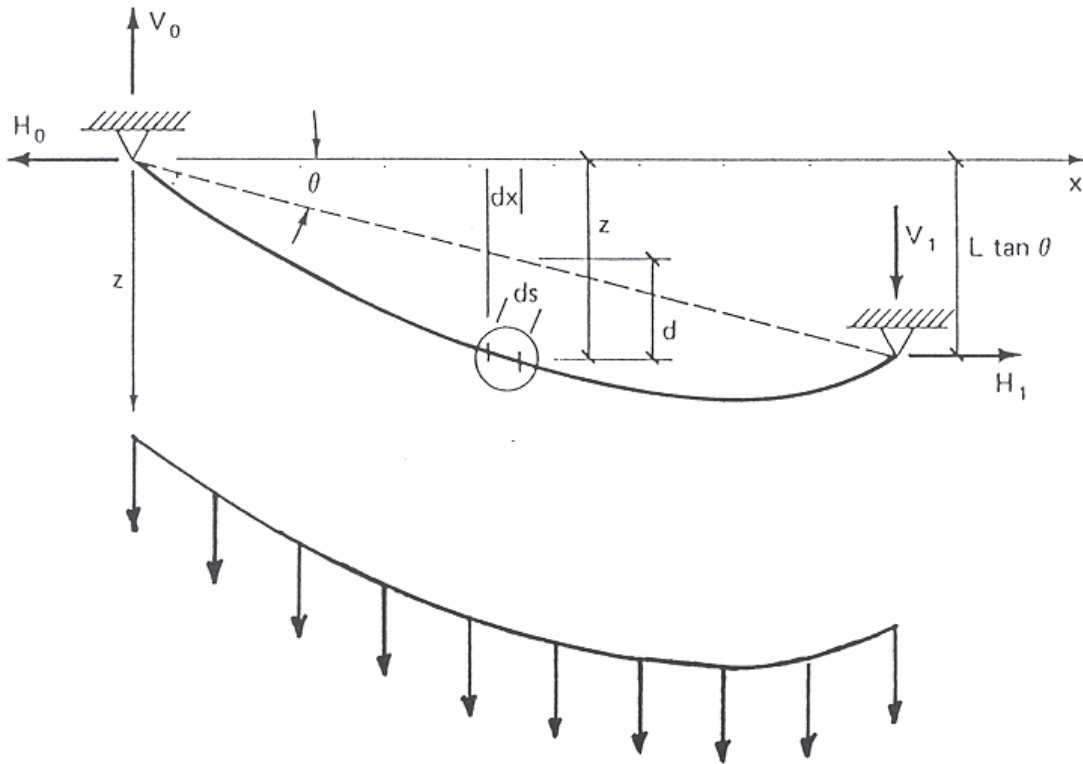
Για κεκλιμένο μη εκτατό καλώδιο οι αντίστοιχες σχέσεις είναι:

$$f = \sqrt{\frac{3S_0}{8L} - 1} - \frac{1}{2}(\tan\theta)^2 \quad (2.37)$$

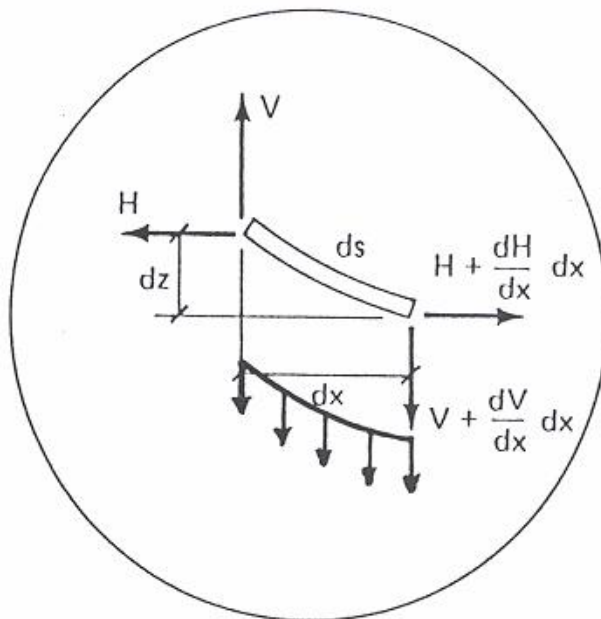
$$\frac{S_0}{L} = 1 + \frac{8}{3}f^2 + \frac{1}{2}(\tan\theta)^2 \quad (2.38)$$

2.2.1.2 ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΤΟΞΟΥ

Έστω καλώδιο με αρχικό απαραμόρφωτο μήκος S_0 που γεφυρώνει οριζόντια απόσταση L και επί του οποίου δρα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο p κατά μήκος του τόξου του.



Σχήμα 2.11. Παραμορφωμένος φορέας, αντιδράσεις, φορτίο κατά το τόξο



Σχήμα 2.12. Εσωτερικές δυνάμεις, φορτία στο στοιχειώδες τμήμα

ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ-ΜΕΛΕΤΗΣ

Ως ανεξάρτητη μεταβλητή λαμβάνεται το μήκος του τόξου s , μετρούμενο από το αριστερό άκρο του καλωδίου. Από εξισώσεις ισορροπίας οριζοντίων και κατακόρυφων δυνάμεων λαμβάνουμε αντίστοιχα:

$$dH/dx=0 \rightarrow H=H_0 \quad (2.39)$$

$$\frac{dV}{dx} = -q \frac{ds}{dx} \quad (2.40)$$

$$T_0 = \sqrt{H_0^2 + V_0^2} \quad (2.41)$$

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{H_0^2 + (V_0 - p \cdot x)^2} \quad (2.42)$$

Από εξισώσεις γεωμετρίας και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ένταση T είναι αξονική, και επομένως έχει διεύθυνση κατά την εφαπτομένη του παραμορφωμένου καλωδίου, έχουμε :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{V}{H_0} \rightarrow V = H_0 \frac{dz}{dx} \quad (2.43)$$

Παραγωγίζοντας ως προς x :

$$\frac{dV}{dx} = H_0 \frac{d^2z}{dx^2} \quad (2.44)$$

Για το μήκος του τόξου ισχύει :

$$ds^2 = dx^2 + dz^2 \quad (2.45)$$

Συνδυάζοντας τη σχέση ισορροπίας κατακόρυφων δυνάμεων (38) με τη σχέση συμβιβαστού (42) προκύπτει :

$$H_0 \frac{d^2z}{dx^2} = -q \frac{ds}{dx} = -q \frac{\sqrt{dx^2 + dz^2}}{dx} \rightarrow \frac{d^2z}{dx^2} + \frac{q}{H_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} = 0$$

$$(2.46)$$

Αυτή είναι η διαφορική εξίσωση ισορροπίας καλωδίου υπό το ίδιο βάρος του ή άλλο φορτίο ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος του τόξου του. Η λύση της διαφορικής είναι γνωστή ως αλυσοειδής καμπύλη, αφού περιγράφει το σχήμα που αποκτά μια αναρτημένη αλυσίδα υπό το ίδιο βάρος της. Υποθέτοντας ότι η οριζόντια συνιστώσα της έντασης H_0 είναι γνωστή το κατακόρυφο βέλος προκύπτει ως εξής:

$$z = c_2 - \frac{H_0 \cosh(-qx + q \frac{c_1}{H_0})}{q} \quad (2.47)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνοριακές συνθήκες $z(x=0)=0$, $z(x=L)=L \tan \theta$ προκύπτει:

$$z = \frac{H_0}{q} \left\{ \cosh(\gamma + \beta) - \cosh\left[\gamma + \beta \left(1 - \frac{2x}{L}\right)\right] \right\} \quad (2.48)$$

Όπου :

$$\beta = \frac{qL}{2H_0} \quad (2.49)$$

$$\gamma = \sinh^{-1}\left(\tan \theta \frac{\beta}{\sinh \beta}\right) \quad (2.50)$$

$$f = \frac{1}{2\beta} \left[\cosh(\gamma + \beta) - \cosh \gamma \right] \quad (2.51)$$

$$V = H_0 \sinh \left[\gamma + \beta \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \right] \quad (2.52)$$

$$T = H_0 \sqrt{1 + \sinh^2 \left[\gamma + \beta \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \right]} = H_0 \cosh \left[\gamma + \beta \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \right] \quad (2.53)$$

Όταν δεν είναι γνωστή ούτε η οριζόντια συνιστώσα της έντασης H_0 ούτε το βέλος σε κάποια θέση, τότε τα υπόλοιπα μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης πρέπει να προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας και τον καταστατικό νόμο του υλικού του καλωδίου. Υποθέτοντας ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι γραμμικά ελαστική, δηλαδή ισχύει ο νόμος του Hooke, προκύπτει για το στοιχειώδες τμήμα του καλωδίου :

$$\sigma = E \varepsilon \leftrightarrow \frac{T}{A} = E \frac{ds - ds_0}{ds_0} \leftrightarrow T = EA \left(\frac{ds - ds_0}{ds_0} \right) \quad (2.54)$$

$$ds = ds_0 \left(1 + \frac{T}{EA} \right) \rightarrow \frac{ds}{dx} = \frac{ds_0}{dx} \left(1 + \frac{T}{EA} \right) = \frac{T}{H_0} \quad (2.55)$$

Με την παραδοχή ότι $T \ll EA \rightarrow \frac{1}{1 + \frac{T}{EA}} \approx 1 - \frac{T}{EA}$ προκύπτει η διαφορική εξίσωση :

$$\frac{ds_0}{dx} = \frac{T}{H_0} - \frac{T^2}{H_0 EA} \quad (2.56)$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση έχει λύση :

$$s_0(x) = \frac{1}{8AE\beta} \left[-4\beta H_0 x + 4EAL \sinh(\beta + \gamma) - H_0 L \sinh(2\beta + 2\gamma) - 4EAL \sinh\left(\beta - \frac{2\beta x}{L} + \gamma\right) + H_0 L \sinh\left(2\beta - \frac{4\beta x}{L} + 2\gamma\right) \right] \quad (2.57)$$

Από τη συνθήκη $S_0(L) = S_0$ προκύπτει :

$$\frac{S_0}{L} = \frac{V_0 - V_1}{qL} - \frac{qL}{2AE} \left(\frac{H_0}{qL} + \frac{V_0 T_0 - V_L T_L}{qL} \right) \quad (2.58)$$

Όπου S_0 το ολικό απαραμόρφωτο μήκος και :

$$V_0 = V(0) = H_0 \sinh(\gamma + \beta) \quad (2.59)$$

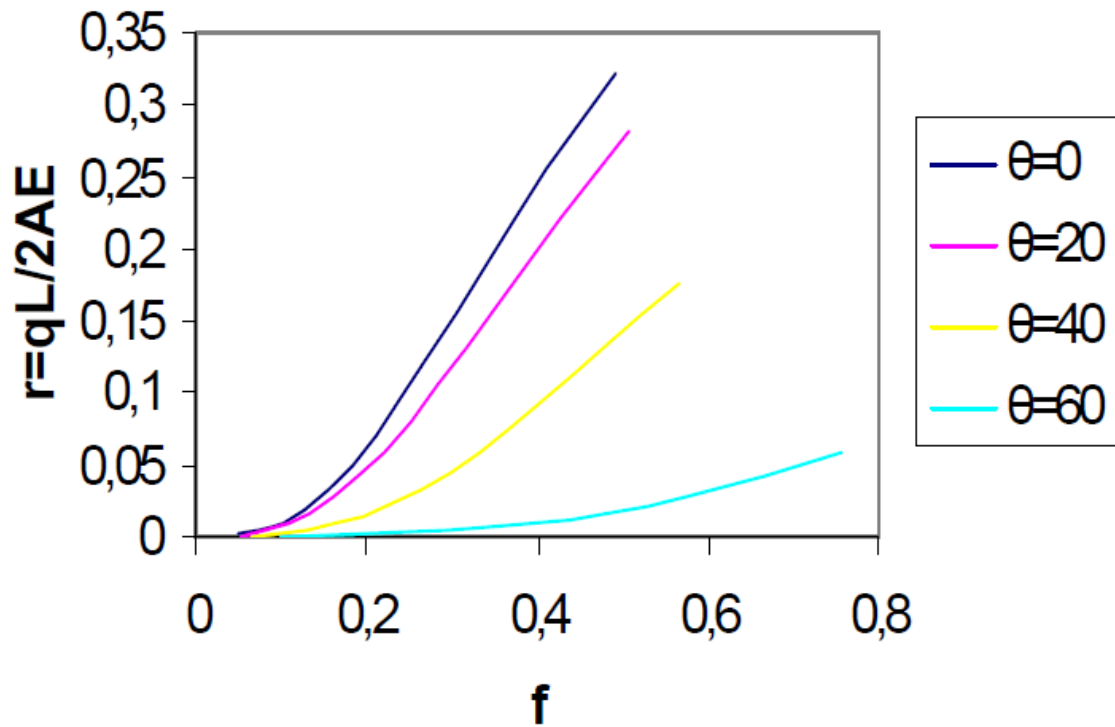
$$V_L = V(L) = H_0 \sinh(\gamma - \beta) \quad (2.60)$$

$$T_0 = T(0) = H_0 \cosh(\gamma + \beta) \quad (2.61)$$

$$T_L = T(L) = H_0 \cosh(\gamma - \beta) \quad (2.62)$$

Αν γνωρίζουμε το S_0 υπολογίζεται αριθμητικά η H_0 . Στη συνέχεια η κρέμαση στο μέσον μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$f = \frac{1}{2\beta} [\cosh(\gamma + \beta) - \cosh(\gamma) - \frac{1}{2} \tan \theta] \quad (2.63)$$



Σχήμα 2.13. Καμπύλες r-f για διάφορα θ

Στην ειδική περίπτωση όπου $\theta=0$ (οριζόντιο καλώδιο) :

$$z = \frac{H_0}{q} \left\{ \cosh \beta - \cosh \left[\beta \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \right\} \quad (2.64)$$

$$f = \frac{1}{2\beta} (\cosh \beta - 1) \quad (2.65)$$

$$V = H_0 \sinh \left[\beta \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad (2.66)$$

$$T = H_0 \cosh \left[\beta \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad (2.67)$$

$$\frac{S_0}{L} = \frac{\sinh \beta}{\beta} - \frac{qL}{4AE} \left(1 + \cosh \beta \frac{\sinh \beta}{\beta} \right) \quad (2.68)$$

Για μικρές τιμές της f η λύση προσεγγίζει αυτή ενός παραβολικού τμήματος.

2.2.2 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ-ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ

Η μέθοδος ανάλυσης γεφυρών stress ribbon που παρουσιάζεται προτάθηκε από τον καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Λεωνίδα Σταυρίδη. Βασισμένη στην αναλογία των γεφυρών αυτών με τις κρεμαστές γέφυρες, η μέθοδος αυτή οδηγεί στην εισαγωγή δύο αδιάστατων παραμέτρων για το σχεδιασμό τους: α) του λόγου πάχους προς το μήκος της γέφυρας και β) του λόγου εμβαδού προεντεταμένου οπλισμού προς το εμβαδό του σκυροδέματος.

Το γεγονός ότι κάτω από την επίδραση πρόσθετων κινητών φορτίων στις γέφυρες stress ribbon παρατηρούνται ίδιες μετατοπίσεις τόσο στους ταινιοδιαδρόμους όσο και στο κατάστρωμα που καθορίζονται από την αξονική δυστένεια του καλωδίου και την καμπτική δυσκαμψία του καταστρώματος αντίστοιχα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το σύστημα καλώδιο-κατάστρωμα (stress ribbon) συμπεριφέρεται ως ένα ισοδύναμο ιδεατό σύστημα ανάρτησης με ξεχωριστή θέση για το καλώδιο και τη δοκό του καταστρώματος. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει με την παραδοχή μηδενικής συνάφειας μεταξύ του καλωδίου και του περιβάλλοντος σκυροδέματος.

Αν f η βύθιση στο μέσο του ανοίγματος και L το μήκος του ανοίγματος τότε ως λόγος βύθισης ορίζεται ο λόγος f/L και συμβολίζεται με λ , δηλαδή:

$$\lambda = \frac{f}{L} \quad (2.69)$$

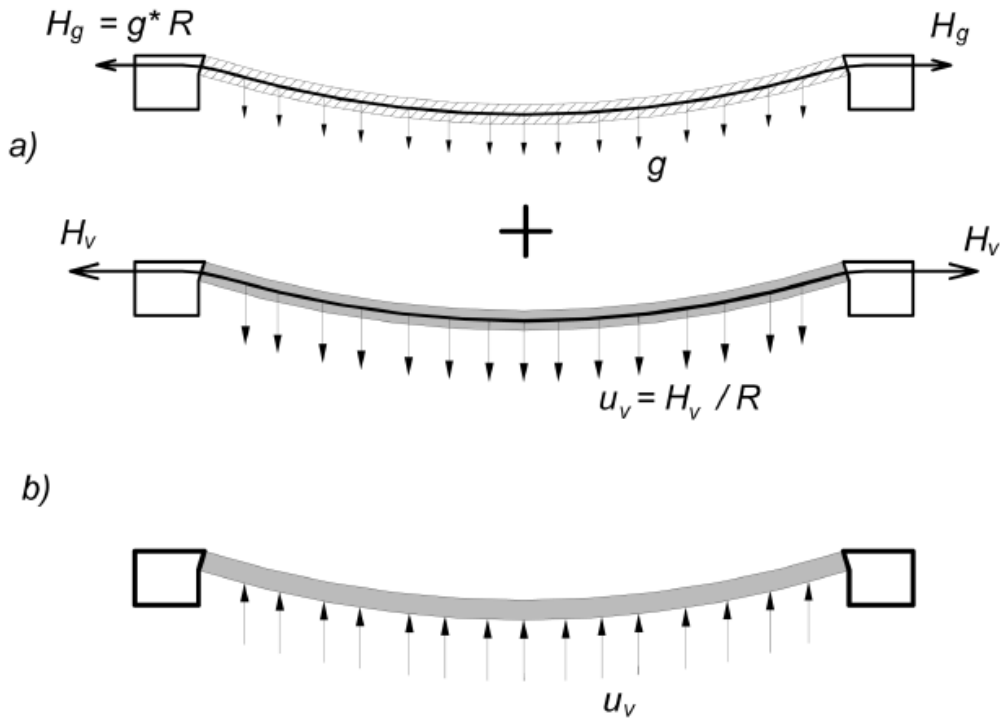
Ενώ η καμπυλότητα του καλωδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{R} = \frac{8\lambda}{L} \quad (2.70)$$

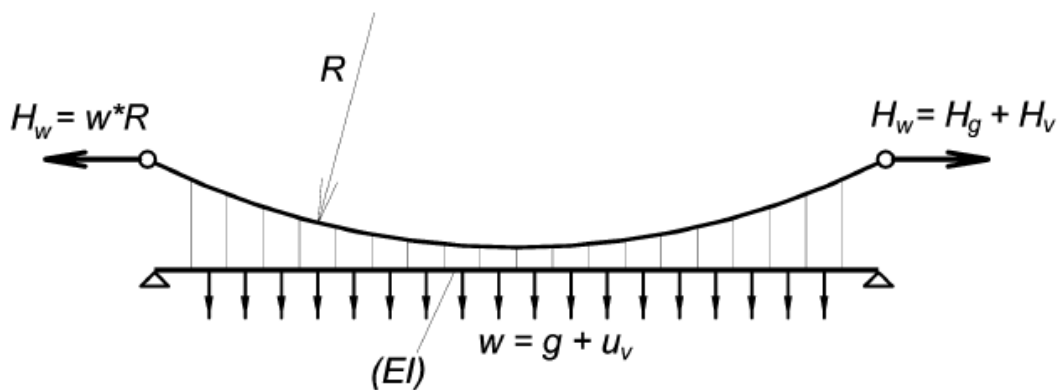
Η βύθιση δεν εξαρτάται μόνο από το ίδιο βάρος g του καταστρώματος που προκαλεί την αρχική οριζόντια δύναμη Hg στο καλώδιο, αλλά και από το πρόσθετο ομοιόμορφο φορτίο προς τα κάτω u_v που ασκείται στο καλώδιο λόγω της πρόσθετης δύναμης προέντασης H_v (σχήμα 2.14.a). Ισχύει:

$$u_v = \frac{H_v}{R} \quad (2.71)$$

Αυτό σημαίνει ότι στο ισοδύναμο σύστημα ανάρτησης το κατάστρωμα δέχεται συνολικό αρχικό ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $w=g+u_v$ [σχήμα 2.15], ενώ το καλώδιο δέχεται οριζόντια δύναμη Hw .



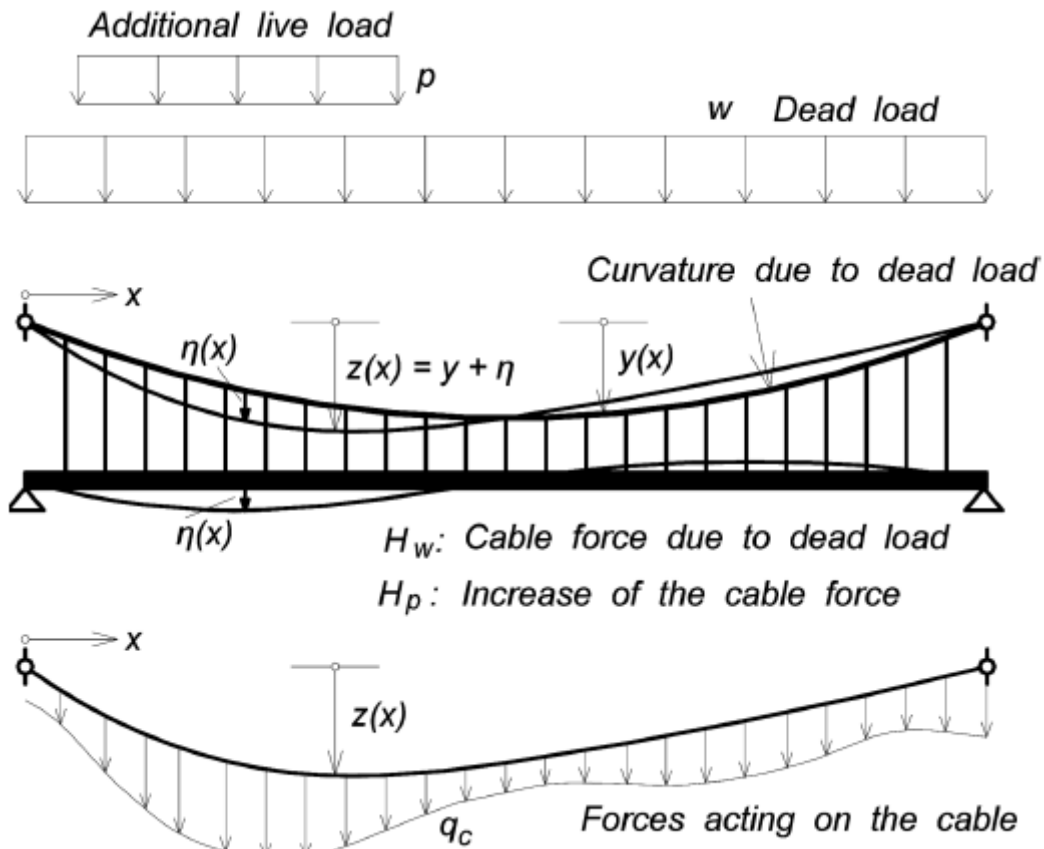
Σχήμα 2.14 α)αρχικές δράσεις στο καλώδιο β)δράσεις στο σκυρόδεμα



Σχήμα 2.15 ισοδύναμο σύστημα ανάρτησης υπό τα μόνιμα φορτία και την προένταση

Το ρόλο της καμπτικής δυσκαμψίας (EI) της δοκού του καταστρώματος στο ισοδύναμο σύστημα παίζουν στην πραγματική stress ribbon κατασκευή οι θλιπτικές τάσεις στη μορφή αντίστροφου τόξου του καταστρώματος διατομής $(b * t)$ που δημιουργούνται από την προένταση [σχήμα 2.14.β], όπου και b και t το μοναδιαίο πλάτος και πάχος.

Αν η αρχική γεωμετρία του καλωδίου στο ισοδύναμο σύστημα εκφράζεται ως συνάρτηση της θέσης x , έστω $y(x)$, και μετά την εφαρμογή του κινητού φορτίου p στη δοκό του ισοδύναμου συστήματος, η κοινή μετατόπιση καλωδίου-δοκού είναι $\eta(x)$ με συνεπακόλουθη αύξηση της οριζόντιας δύναμης κατά H_p [σχήμα 2.16], τότε η νέα γεωμετρία δίνεται από τη σχέση :



Σχήμα 2.16 Κοινή μετατόπιση καλωδίου και καταστρώματος και δυνάμεις στο καλώδιο στο ισοδύναμο σύστημα υπό την επίδραση κινητού φορτίου p στο μισό μήκος

$$z(x) = y(x) + \eta(x) \quad (2.72)$$

Από την εξίσωση ισορροπίας κατακόρυφων δυνάμεων το κατανεμημένο φορτίο είναι:

$$q_c(x) = -\frac{d^2z}{dx^2}(H_w + H_p) \quad (2.73)$$

όπου H_w η συνολική οριζόντια δύναμη στο καλώδιο λόγω μονίμων φορτίων w

Ισχύει
$$H_w = H_g + H_v = \frac{w \cdot L}{8\lambda} \quad (2.74)$$

Το συνολικό φορτίο που ασκείται στη δοκό είναι (σχήμα 2.17.a) :

$$q(x) = -q_c(x) + w + p \quad (2.75)$$

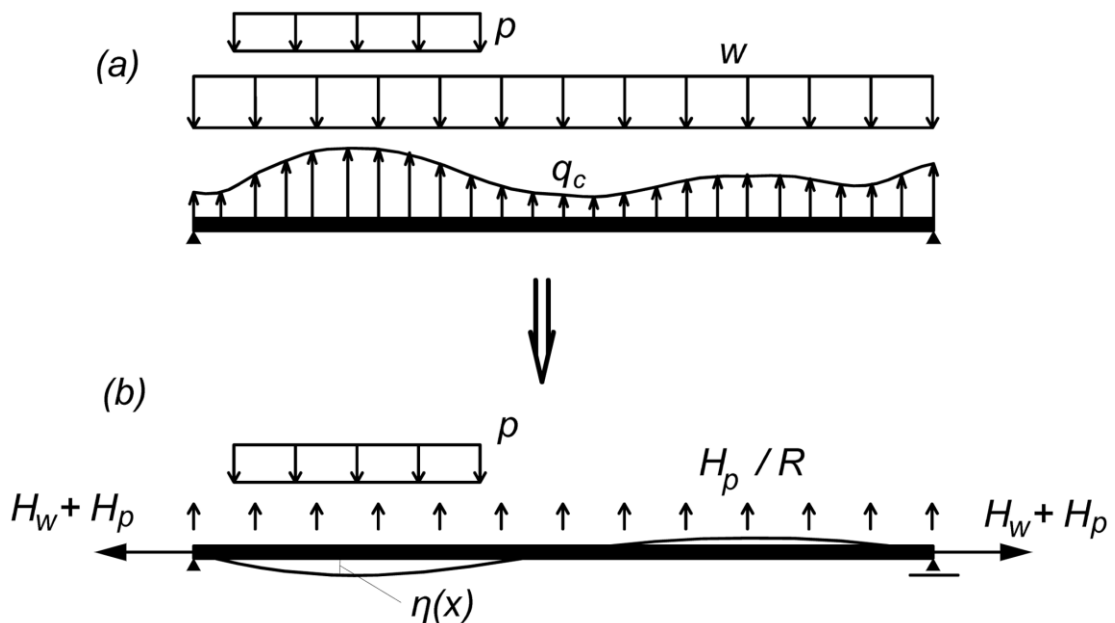
Το φορτίο στη δοκό σχετίζεται με τη μετατόπιση σύμφωνα με την θεωρία δοκού :

$$q(x) = EI \frac{d^4\eta}{dx^4} \quad (2.76)$$

Θεωρώντας $\frac{d^2y}{dx^2}$ ως την αρνητική καμπυλότητα του καλωδίου και χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες σχέσεις λαμβάνουμε :

$$EI \frac{d^4\eta}{dx^4} - \frac{d^2\eta}{dx^2} (H_w + H_p) = p - \frac{H_p}{R} \quad (2.77)$$

Η εξίσωση αυτή αναπαριστά την κλασσική διαφορική εξίσωση της θεωρίας παραμορφώσεων των κρεμαστών γεφυρών υπό την επίδραση μόνιμου φορτίου w . Σύμφωνα με τον κύριο Σταυρίδη (Σταυρίδης 2008) η σχέση 2.77 εκφράζει την εξίσωση μιας απλής δοκού με κατακόρυφο φορτίο $p - \frac{H_p}{R}$ υποκείμενης σε αξονική δύναμη $H_w + H_p$ σύμφωνα με τη θεωρία δευτέρας τάξης [σχήμα 2.17.b].



Σχήμα 2.17 α)φορτία στη δοκό του ισοδύναμου συστήματος β)φορτία στην ισοδύναμη δοκό κατά Σταυρίδη

Η αύξηση της οριζόντιας δύναμης του καλωδίου λόγω του κινητού φορτίου , H_p , σχετίζεται με την πρόσθετη μετατόπιση $\eta(x)$ για $\lambda=1/50=0.02$ με καλή ακρίβεια με τη σχέση :

$$\frac{H_p}{A_c E_c} L(1 + 8\lambda^2) = \frac{1}{R} \int_0^L \eta dx \quad (2.78)$$

Η μετατόπιση μιας απλής δοκού με κατανεμημένο φορτίο q και οριζόντια δύναμη H [σχήμα 2.18.a]δίνεται από τη σχέση (Timoshenko 1956) :

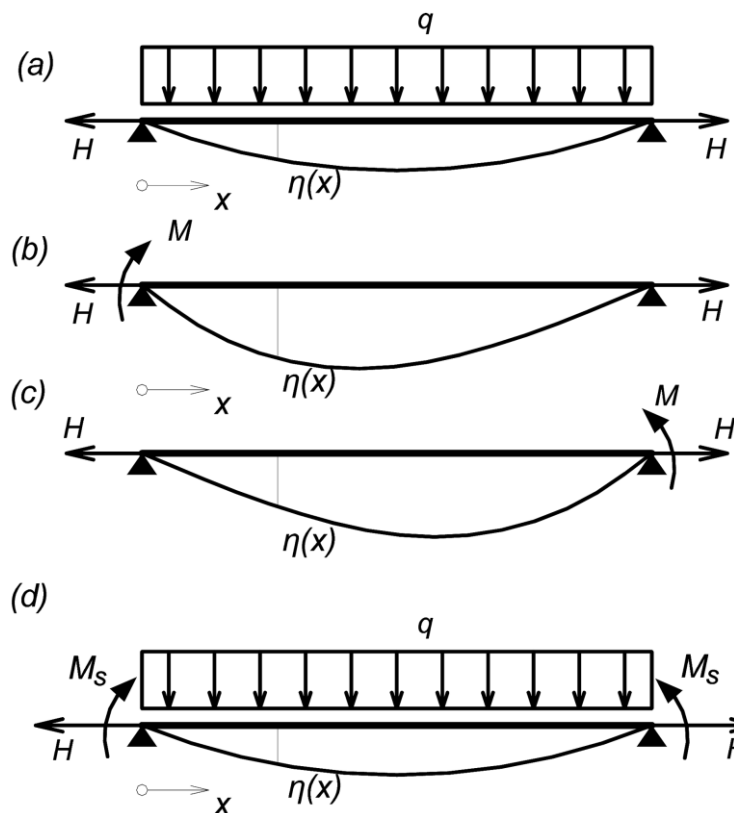
$$\eta(x) = \frac{q}{H} \left[\frac{\cosh\left(\frac{kL}{2} - kx\right)}{k^2 \cosh\left(\frac{kL}{2}\right)} - \frac{1}{k^2} + \frac{x(L-x)}{2} \right] \quad (2.79)$$

Ενώ με συγκεντρωμένη ροπή στη στήριξη αριστερά [σχήμα 2.18.b] δίνεται από τη σχέση :

$$\eta(x) = \frac{M}{H} \left[\frac{L-x}{L} - \frac{\sinh(kL-kx)}{\sinh(kL)} \right] \quad (2.80)$$

Αν στην παραπάνω σχέση αντικαταστήσουμε το x με το $L-x$ λαμβάνουμε τη μετατόπιση μιας απλής δοκού για κατανεμημένη ροπή δεξιά στη στήριξη [σχήμα 2.18.c]

$$k = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (2.81)$$



Σχήμα 2.18 εφελκυόμενη δοκός υπό εγκάρσιο φορτίο και ακραίες στηρίξεις

Το σύστημα των εξισώσεων (2.77) , (2.78) είναι ανεξάρτητο των συνοριακών συνθηκών και έτσι μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο για την περίπτωση αρθρωτών στηρίξεων όσο και πακτωμένων στηρίξεων. Κατά κανόνα , οι γέφυρες stress ribbon έχουν ένα βαθμό πακτώσεως και στα δύο άκρα , ώστε να περιορίζονται οι μετατοπίσεις και τα κοπωτικά φορτία σε σχέση με την περίπτωση αρθρωτών στηρίξεων.

Η απόκριση του ισοδύναμου συστήματος ανάρτησης (Σταυρίδης 2008) καθορίζεται από τις 3 γνωστές και τη 1 άγνωστη αδιάστατη παράμετρο που ακολουθούν :

$$G = \frac{H_w L^2}{EI}, \quad \gamma = \frac{p}{w}, \quad \varepsilon = \frac{H_w}{A_c E_c} \quad (2.82)$$

$$Z = \frac{H_p}{H_w} \quad (2.83)$$

Στην περίπτωση των αρθρωτών στηρίξεων η εξίσωση που προκύπτει δε λύνεται απ' ευθείας. Μια προσεγγιστική λύση για την άγνωστη παράμετρο μπορεί να δοθεί, όταν το κινητό φορτίο κατανέμεται σε όλο το μήκος της δοκού (Σταυρίδης 2009).

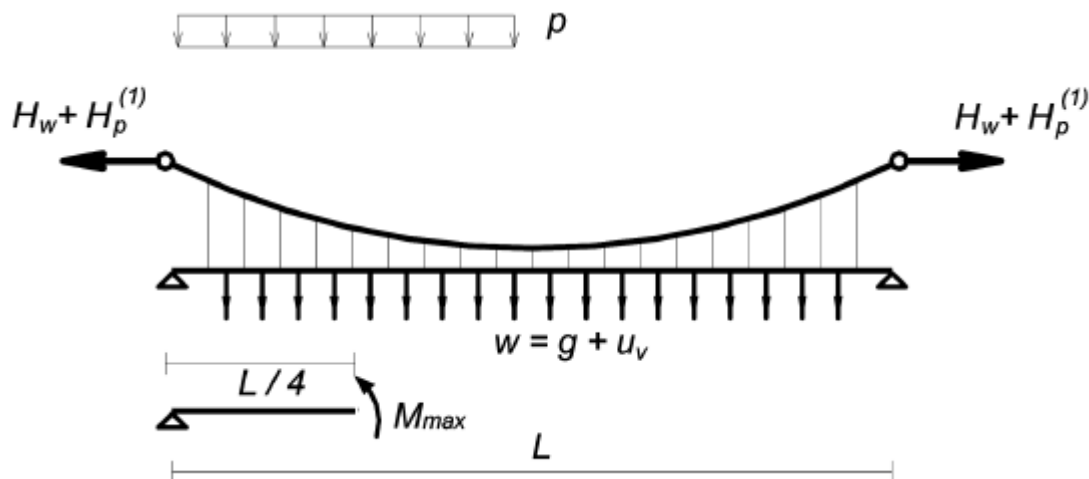
Η μέγιστη ροπή κάμψης και η μέγιστη μετατόπιση προκύπτει στο $L/4$ αν το φορτίο ασκηθεί στο μισό μήκος [σχήμα 2.19] και δίνονται από τις σχέσεις :

$$M_{max} = \left\{ \frac{8(\gamma - Z)}{D^2} \left[\frac{\cosh\left(\frac{D}{4}\right)}{\cosh\left(\frac{D}{2}\right)} - 1 \right] + \frac{8\gamma}{D^2} \left[\frac{1}{\cosh\left(\frac{D}{4}\right)} - 1 \right] \right\} M_w^0 \quad (2.84)$$

$$M_w^0 = \frac{wL^2}{8} \quad (2.85)$$

$$\frac{\eta_{max}}{L} = \frac{8\lambda(\gamma - Z)}{(Z + 1)D^2} \left[\frac{\cosh\left(\frac{D}{4}\right)}{\cosh\left(\frac{D}{2}\right)} + \frac{3D^2}{32} - 1 \right] + \frac{8\lambda\gamma}{(Z + 1)D^2} \left[\frac{1}{\cosh\left(\frac{D}{4}\right)} + \frac{D^2}{32} - 1 \right] \quad (2.86)$$

όπου
$$D = \sqrt{G(Z + 1)} \quad (2.87)$$



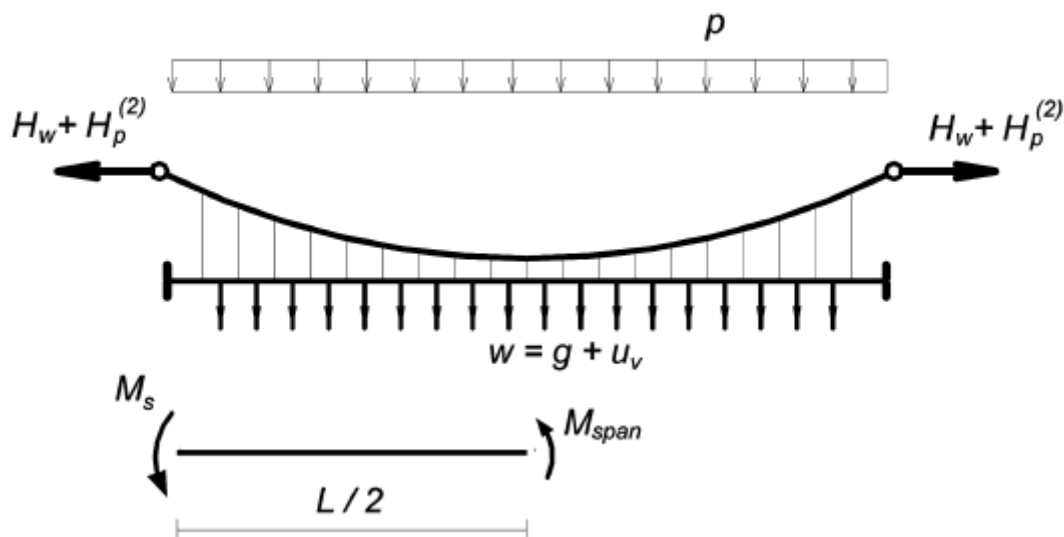
Σχήμα 2.19 Περίπτωση αρθρωτών στηρίξεων

Στην περίπτωση πακτωμένων στηρίξεων, όπου $dh/dx=0$ και για κατακόρυφο φορτίο p - H_p/R , οριζόντιο φορτίο H_w+H_p η αρνητική ροπή στη στήριξη δίνεται από τη σχέση :

$$M_s = wL^2 \frac{(Y-Z)}{D^2} \left[1 - \frac{D}{2 \tanh\left(\frac{D}{2}\right)} \right] \quad (2.88)$$

Η εξίσωση ως προς την άγνωστη παράμετρο Z δεν είναι απ' ευθείας επιλύσιμη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των διαδοχικών προσεγγίσεων, όπου ως αρχική τιμή Z_0 λαμβάνεται η τιμή από την περίπτωση αρθρωτών στηρίξεων. Τότε, η ροπή στο μέσο του ανοίγματος [σχήμα 2.20] δίνεται από τη σχέση :

$$M_{span} = wL^2 \frac{(Y-Z)}{D^2} \left[1 - \frac{D}{2 \sinh\left(\frac{D}{2}\right)} \right] \quad (2.89)$$



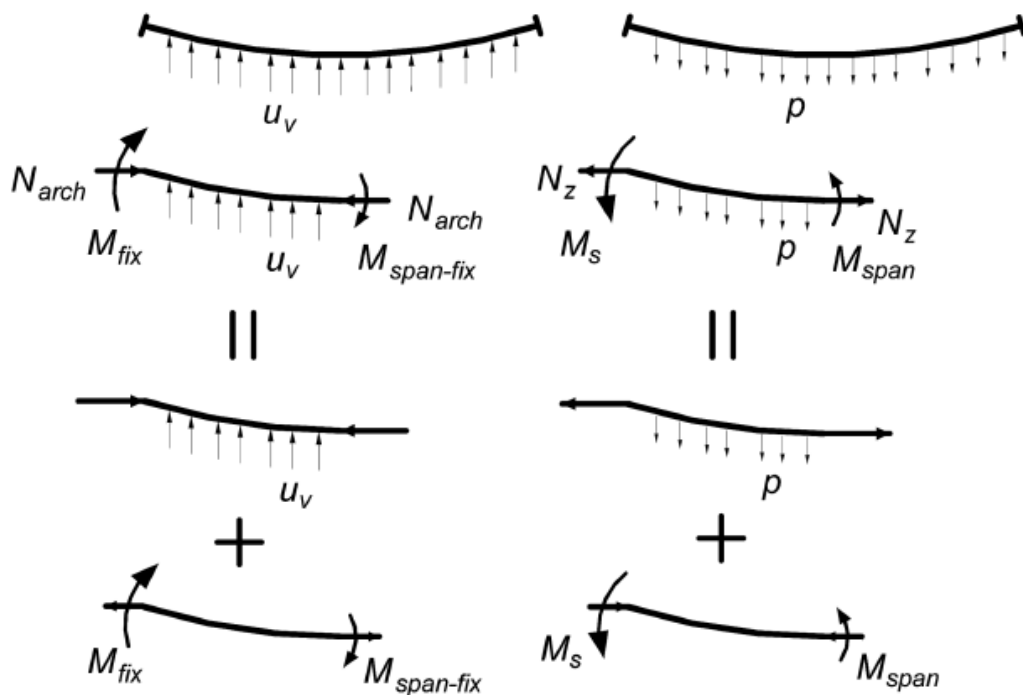
Σχήμα 2.20 Περίπτωση πακτωμένων στηρίξεων

Το φορτίο u_v που οφείλεται στην προένταση προκαλεί μια ροπή στην πάκτωση που εφελκύει τις κάτω ίνες, M_{fix} , [σχήμα 2.21] η οποία εξαρτάται από το λόγο βύθισης λ και το πάχος (Schlaich et al. 1996) και δίνεται (για $\lambda=0.02$) από τη σχέση :

$$M_{fix} = 200u_v t^2 \quad (2.90)$$

Η αντίστοιχη ροπή στο μέσο του ανοίγματος, $M_{span-fix}$ είναι η μισή. Η απομειωμένη ροπή στο πακτωμένο άκρο, M_{s-fix} , όπως και η ροπή στο άνοιγμα, $M_{max-span}$, προκύπτει από την υπέρθεση των M_s και M_{fix} και των M_{span} και $M_{span-fix}$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$M_{s-fix} = M_s + M_{fix}, \quad M_{max-span} = M_{span} - M_{span-fix} \quad (2.91)$$



Σχήμα 2.21 Ροπές στη στήριξη και στο άνοιγμα για φορτίο προέντασης (αριστερά) και για κινητό φορτίο(δεξιά)

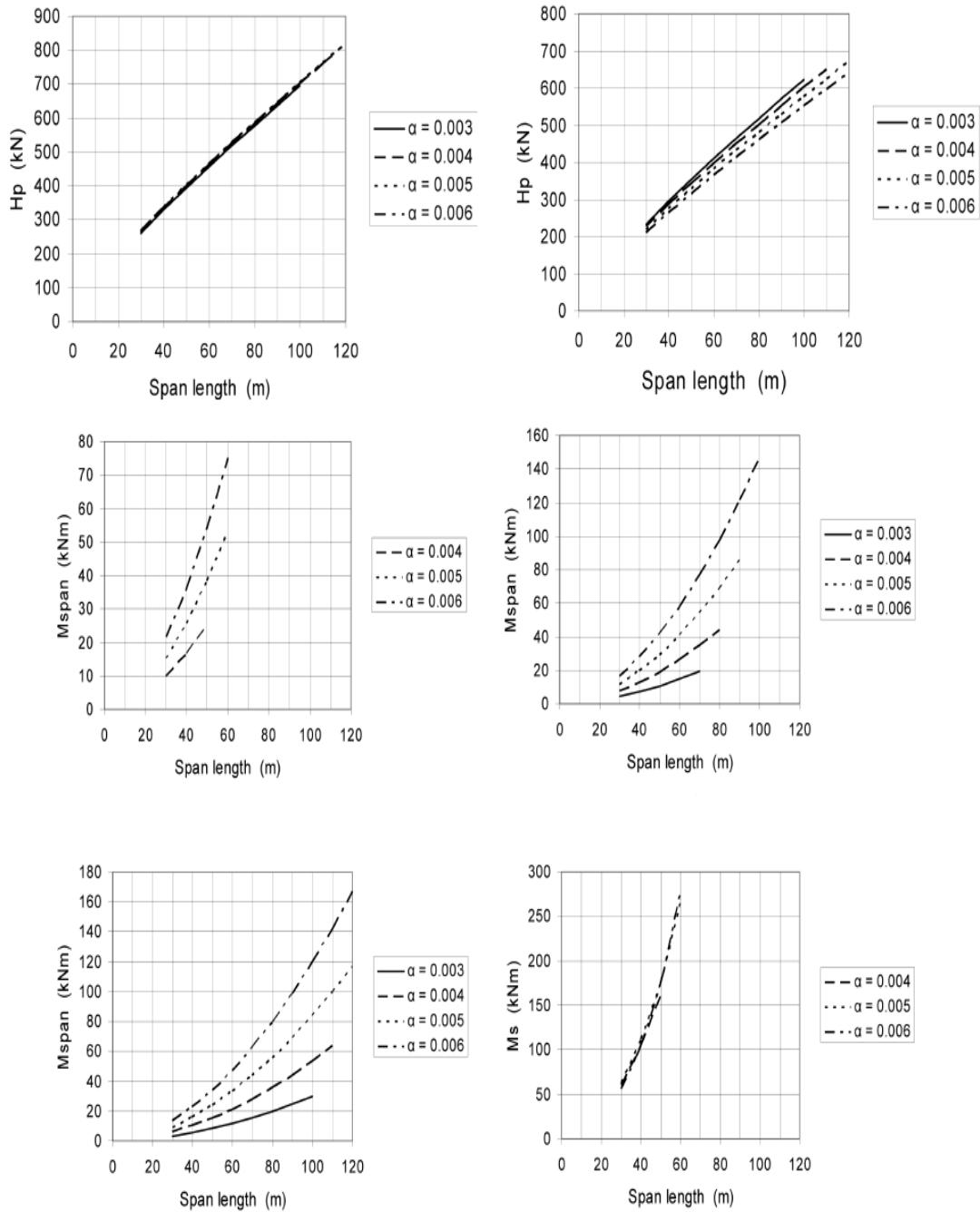
Αν εισαχθούν οι 2 αδιάστατες παράμετροι σχεδιασμού α) ο λόγος πάχους α και β) το ποσοστό του προεντεταμένου σπλισμού ρ που ορίζονται ως εξής:

$$\alpha = \frac{t}{L} \quad , \quad \rho = \frac{A_c}{bt} \quad (2.92)$$

και θεωρώντας γνωστό το κινητό φορτίο για άνοιγμα stress ribbon γέφυρας μήκους L μπορεί να ακολουθηθεί η παρακάτω αριθμητική διαδικασία ανάλυσης :

- Υπολογισμός των μονίμων φορτίων w και του φορτίου προέντασης u_v
- Υπολογισμός των 3 αδιάστατων παραμέτρων G , γ , ε
- Υπολογισμός της άγνωστης αδιάστατης παραμέτρου Z ανάλογα με τις συνθήκες στήριξης
- Υπολογισμός της μέγιστης ροπής στο άνοιγμα M_{max} ή της M_{s-fix} και $M_{max-span}$ στην περίπτωση αρθρωτών και πακτωμένων στήριξεων αντίστοιχα
- Υπολογισμός της αξονικής δύναμης λόγω του φορτίου u_v από την προένταση
- Υπολογισμός της συνολικής οριζόντιας δύναμης H ανάλογα με την περίπτωση στήριξης

Η μέθοδος αυτή ανάλυσης επιτρέπει , εκτός των άλλων , και την παραμετρική διερεύνηση των εντατικών μεγεθών και της μετατόπισης για διάφορα α και ρ , όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που ακολουθούν :

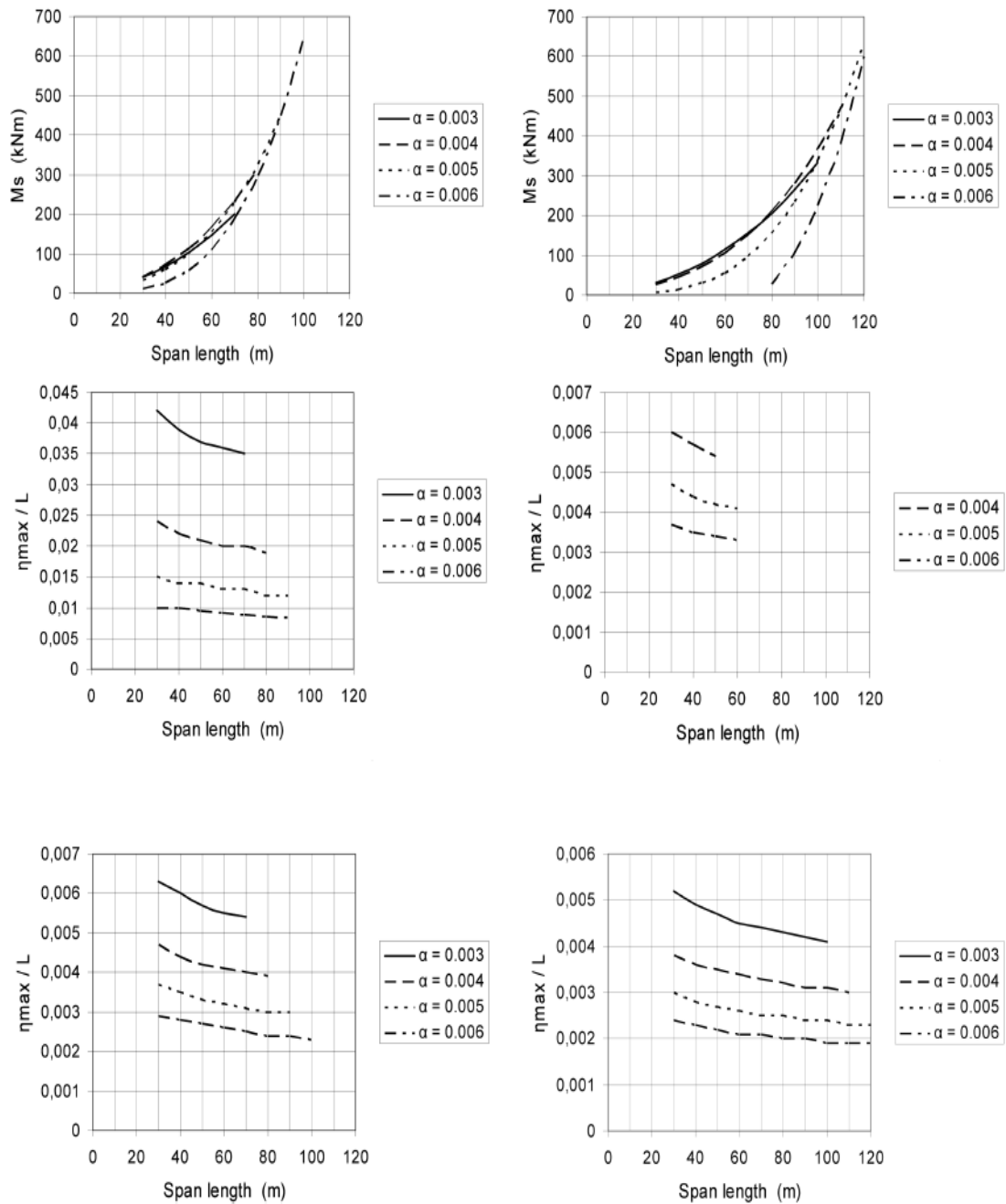


Σχήμα 2. 22

Επάνω: διάγραμμα Hp-L για $\rho=0.025$
αριστερά: αρθρωτές **Δεξιά:** πακτωμένες στηρίξεις

Μέση: Μέγιστη ροπή κάμψης
αριστερά: $\rho=0.015$ **δεξιά:** $\rho=0.020$

Κάτω αριστερά: Μέγιστη ροπή κάμψης για $\rho=0.025$
δεξιά: ροπή πάκτωσης $\rho=0.015$



Σχήμα 2.23

Επάνω: διάγραμμα M_s - L για πακτωμένες στηρίξεις
αριστερά: $\rho=0.020$ **Δεξιά:** $\rho=0.025$

Μέση: Μέγιστος λόγος μετατόπισης
αριστερά: αρθρωτές $\rho=0.020$ **δεξιά:** πακτωμένες $\rho=0.015$

Κάτω: Μέγιστος λόγος μετατόπισης για πακτωμένες στηρίξεις
αριστερά: $\rho=0.020$ **Δεξιά:** $\rho=0.025$

2.2.3 ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Εκτός από τις αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού (ανάλυση καλωδίου) και τις απλοποιημένες ή προσεγγιστικές αναλυτικές μεθόδους (μέθοδος του ισοδύναμου συστήματος ανάρτησης) υπάρχουν και οι εξελιγμένες αριθμητικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούν εμπορικά ή μη πακέτα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση του φορέα είτε σε δύο διαστάσεις είτε σε τρεις διαστάσεις. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιείται ο συνολικός φορέας σε μικρότερα στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων στα οποία εφαρμόζονται οι διαφορικές εξισώσεις συμβιβαστού εντάσεων - παραμορφώσεων. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτουν τα ζητούμενα αποτελέσματα, τα οποία στη συνέχεια επεκτείνονται στο σύνολο του φορέα. Προκειμένου να γίνουμε πιο ακριβείς σε ότι αφορά την ανάλυση μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) είναι απαραίτητη η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δεδομένου ότι πρέπει να λυθούν θέματα που αφορούν τη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων ανάρτησης η ταινιοδιαδρόμων, την κατασκευή σε φάσεις (για την οποία δεν υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις σε κάθε βήμα της κατασκευής) και τα φαινόμενα που εξελίσσονται με το χρόνο, όπως ερπυσμό, συστολή ξηράνσεως και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για την ανάλυση τόσο σε δύο όσο και σε τρεις διαστάσεις δύο διαφορετικών γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους. Η πρώτη αποτελεί πραγματική γέφυρα που σχεδιάστηκε από το Τεχνικό πανεπιστήμιο της Καταλονίας και αναλύθηκε από τους Cobo Del Arco και Aparicio. Η γέφυρα αυτή προσομοιώθηκε σε δύο διαστάσεις. Η δεύτερη αποτελεί μια τρισδιάστατη προσομοίωση μιας γέφυρας stress ribbon που βασίζεται σε μια πραγματική, κατασκευασμένη γέφυρα αυτού του είδους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται επίσης το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Sofistik για την ακριβέστερη προσομοίωση της επιβολής της προέντασης μέσω της ανάλυσης της γέφυρας stress ribbon που παρουσιάζεται στη δημοσίευση των Cobo del Arco και Aparicio.

Περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση Abaqus και Sofistik συγκεκριμένα για την ανάλυση γεφυρών stress ribbon παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Αριθμητική εφαρμογή, όπου αναλύονται οι τρεις προηγούμενες γέφυρες stress ribbon.

2.3 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην περίπτωση αρθρωτών στηρίξεων για τη διαστασιολόγηση της ορθογωνικής διατομής χρησιμοποιείται το ζεύγος τιμών M_{max} και N_c που αντιστοιχούν στο μέσο του ανοίγματος. Στην περίπτωση πακτωμένων στηρίξεων, χρησιμοποιείται το ζεύγος των εντατικών μεγεθών M_s και $N_{c,fix}$ για τη διατομή της στήριξης, ενώ το ζεύγος M_{max} και $N_{c,fix}$ για τη μεσαία διατομή (υπέρ της ασφαλείας).

Όσον αφορά στην προδιαστασιολόγηση της τελικής διατομής σκυροδέματος αυτή προσδιορίζεται από την απαίτηση να μην εμφανίζεται εφελκυσμός στη διατομή του μέσου του ανοίγματος υπό οποιοδήποτε συνδυασμό δράσεων.

Το εμβαδό των φερόντων καλωδίων ή καλωδίων ανάρτησης ή ταινιοδιαδρόμων (A_{s1}) προκύπτει από την απαίτηση η τάση του χάλυβα να μην υπερβαίνει το 40 % της μέγιστης τάσης του υλικού (f_{pu}). Αφού καθοριστεί δηλαδή το υλικό των συρματοσχοίνων με τα μηχανικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά αντοχής (π.χ. $E_s=195$ GPa και $f_{pk}/f_{pu} = 1700/1900$ MPa) αρκεί ο καθορισμός της δύναμης με την οποία τανύονται τα συρματόσχοινα. Η δύναμη αυτή προκύπτει γνωρίζοντας το συνολικό μόνιμο φορτίο που ασκείται στην κατασκευή και τη βύθιση που προδιαγράφεται να πάρει ο φορέας μετά την άσκηση αυτών των φορτίων, δίνεται δηλαδή από τη σχέση :

$$H_0 = \frac{gl^2}{8d_0} \quad (2.93)$$

όπου g το συνολικό μόνιμο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στην κατασκευή
 l το συνολικό μήκος της γέφυρας
 d_0 η προδιαγεγραμμένη βύθιση της μεσαίας διατομής. Ισχύει $d_0 > f$, όπου $f/l=1/50$

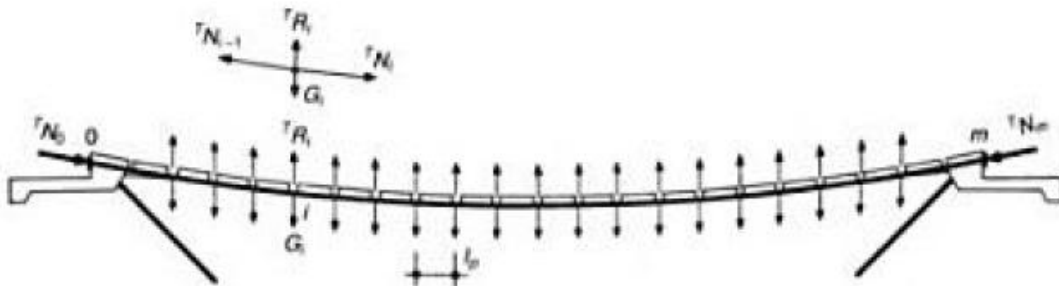
Διαιρώντας H_0/A_{s1} και εξισώνοντας με $0.4 f_{pu}$ προκύπτει το συνολικό απαιτούμενο εμβαδό των καλωδίων ανάρτησης. Κάνοντας χρήση κάποιου δεδομένου συστήματος προέντασης προκύπτει ο αριθμός των τενόντων και των συρματοσχοίνων ανά τένοντα με συγκεκριμένη διάμετρο.

Το εμβαδό των τενόντων προέντασης προκύπτει διαιρώντας τη γνωστή επιβαλλόμενη δύναμη προέντασης με την τάση λειτουργίας των συρματοσχοίνων. Η τάση λειτουργίας των συρματοσχοίνων αντιστοιχεί είτε στο 75 % του ορίου διαρροής του συρματόσχοινου (f_{pk}) είτε στο 65 % του ορίου θραύσης του συρματόσχοινου (f_{pu}).

2.4 ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΣΤΑΔΙΑ

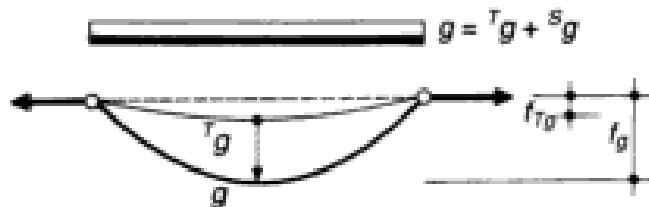
2.4.1 ΦΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το στατικό σύστημα μια γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους εξαρτάται από τη μορφή του φορέα και την κατασκευαστική ακολουθία. Στο **σχήμα 2.24** μελετάται μια γέφυρα stress ribbon από προκατασκευασμένους σπονδύλους και από σκυρόδεμα δεύτερης φάσης. Οι σπόνδυλοι αναρτώνται από τα καλώδια ανάρτησης και έχουν μήκος l_p .



Σχήμα 2.24 Απόκτηση δυσκαμψίας μέσω της φόρτισης του καλωδίου

Το βάρος g συνίσταται από το βάρος των ταινιοδιαδρόμων ^{BT}g (bearing tendons) , το βάρος των τενόντων προέντασης ^{PT}g (prestressing tendons) , το βάρος των προκατασκευασμένων σπονδύλων (precast segments) και το βάρος της πλάκας επιτόπου σκυροδέματος Sg . Θεωρούμε ότι το καλώδιο ακολουθεί τη γραμμή των πιέσεων των εξωτερικών φορτίων. Στη φάση κατασκευής , η αρχική βύθιση των ταινιοδιαδρόμων ή καλωδίων ανάρτησης μεταβάλλεται από f_T σε f_g μετά την τοποθέτηση των σπονδύλων και αμέσως μετά τη χύτευση του σκυροδέματος δεύτερης φάσης και τα καλώδια ανάρτησης αναλαμβάνουν το σύνολο του νεκρού φορτίου g [σχήμα 2.25]. Σε κάθε κόμβο i η δύναμη στα καλώδια ανάρτησης $^{TR}R_i$ εξισορροπεί το κατακόρυφο φορτίο $G_i=g \cdot l_p$ ενώ τα σώματα παγώσεως φορτίζονται με τις εφελκυστικές δυνάμεις $^{TN}N_o$ και $^{TN}N_m$.

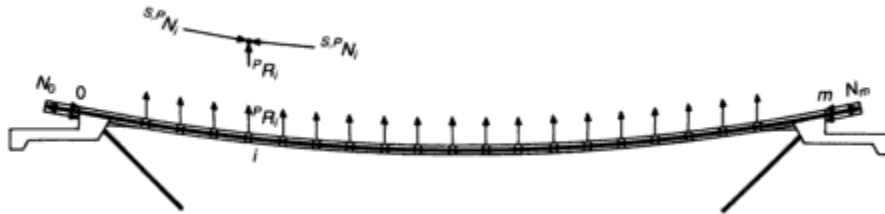


Σχήμα 2.25 φόρτιση και αντίστοιχη μετατόπιση γέφυρας stress ribbon

Όταν το σκυρόδεμα δεύτερης φάσης αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή , το σύμμικτο πλέον κατάστρωμα του ενιαίου φορέα προεντείνεται με τη βοήθεια των τενόντων προέντασης [σχήμα 2.26]. Αν E_{pc} , E_{cs} και E_s τα μέτρα ελαστικότητας των σπονδύλων , της πλάκας σκυροδέματος (μεταβλητά με το χρόνο) και των καλωδίων ανάρτησης-τενόντων προέντασης (σταθερά) αντίστοιχα και A_{pc} , A_{cs} , A_{BT} και A_{PT}

οι επιφάνειες των αντίστοιχων διατομών η ισοδύναμη επιφάνεια είναι :

$$A_e^P = A_{PC} + \frac{E_{CS}}{E_{PC}} A_{CS} + \frac{E_S}{E_{PC}} A_{BT} \quad (2.94)$$



Σχήμα 2.26 γέφυρα stress ribbon μετά την επιβολή της προέντασης

Με την επιβολή της προέντασης αναπτύσσονται ακτινικές δυνάμεις στους κόμβους P_{Ri} με αποτέλεσμα η κατασκευή stress ribbon να ανασηκώνεται από τη θέση f_g στη θέση f_{g+P} και έτσι εκτός από τη θλιπτική ένταση N_P δέχεται και εφελκυστικές δυνάμεις ΔN_{g+P} που αντιστοιχούν στη μείωση της βύθισης κατά Δf_{g+P}

$$\Delta N_{g+P} = N_{g+P} - N_g \quad (2.95)$$

$$\Delta f_{g+P} = f_{g+P} - f_g \quad (2.96)$$

η αξονική δύναμη που δίνεται από την παρακάτω σχέση κατανέμεται στους σπονδύλους, στην πλάκα και στα καλώδια ανάρτησης ανάλογα με τη δυσκαμψία (EA) τους :

$$N_{S,P} = -N_P + \Delta N_{g+P} \quad (2.97)$$

Τα σώματα παγιώσεως φορτίζονται τώρα από εφελκυστικές δυνάμεις N_0 και N_m που αντιστοιχούν στον εφελκυσμό μιας κατασκευής με βύθιση f_{g+P} .

Μετά την εκτέλεση τσιμεντενέσεων στους τένοντες προέντασης οι τελευταίοι γίνονται μέρος της σύμμικτης διατομής επιφάνειας A_e και μέτρου ελαστικότητας E_{PC} , ώστε :

$$A_e = A_{PC} + \frac{E_{CS}}{E_{PC}} A_{CS} + \frac{E_S}{E_{PC}} A_{BT} + \frac{E_S}{E_{PC}} A_{PT} \quad (2.98)$$

2.4.2 ΦΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα φορτία λειτουργίας αναλαμβάνονται από τη σύμμικτη διατομή που εντείνεται με αξονική δύναμη:

$$N_S = -N_P + \Delta N_q \quad (2.99)$$

$$\Delta N_q = N_q - N_g \quad (2.100)$$

όπου N_g η δύναμη στη γέφυρα stress ribbon που οφείλεται στο νεκρό φορτίο , το κινητό φορτίο , τις θερμοκρασιακές μεταβολές και την ανύψωση λόγω προέντασης. Η δύναμη N_s κατανέμεται στα μέλη ανάλογα με τη δυσκαμψία τους (EA). Εξαιτίας του ερπυσμού και της συστολής ξηράνσεως υπάρχει ανακατανομή των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ των μελών της σύνθετης διατομής του καταστρώματος. Το σκυρόδεμα συστέλλεται με αποτέλεσμα η γέφυρα stress ribbon να ανασηκώνεται από τη θέση f_{g+p} σε f_{g+p}^∞ που προκαλεί την τελική εφελκυστική δύναμη :

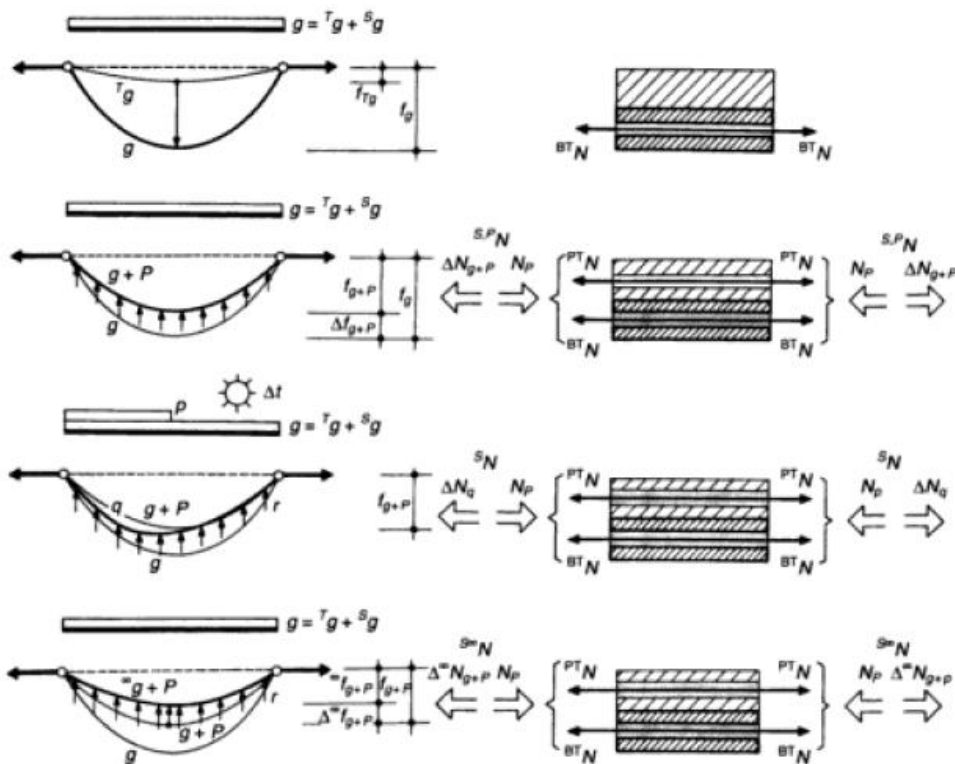
$$N_s^\infty = -N_p + \Delta^\infty N_{g+p} \quad (2.101)$$

$$\Delta^\infty N_{g+p} = N_{g+p} - N_g - N_{c+sh} \quad (2.102)$$

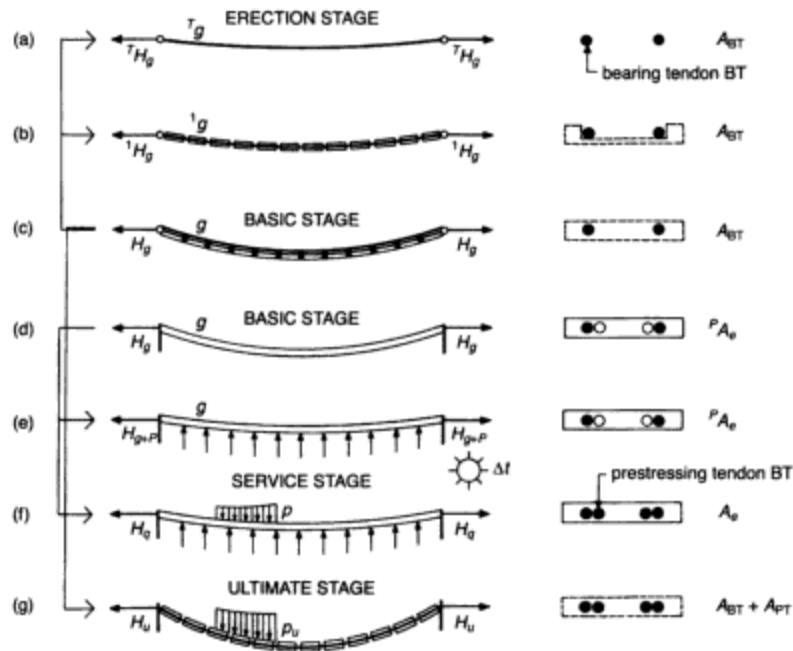
$$\Delta^\infty f_{g+p} = f_{g+p} - f_g - f_{c+sh} \quad (2.103)$$

Όλα τα φορτία λειτουργίας ασκούνται σε ένα φορέα με μειωμένη βύθιση και έτσι μεγαλύτερες εφελκυστικές δυνάμεις.

Οι φορτίσεις , οι μετατοπίσεις , οι τάσεις και η στατική λειτουργία σε όλες τις φάσεις κατασκευής και στη λειτουργικότητα συνοψίζονται στα **σχήματα 2.27 και 2.28**.



Σχήμα 2.27 φόρτιση , μετατόπιση και τάσεις στη stress ribbon κατασκευή μετά τη χύτευση , κατά την προένταση , με τα φορτία λειτουργίας και με την επίδραση του ερπυσμού και συστολής ξηράνσεως (με τη σειρά από πάνω προς τα κάτω)



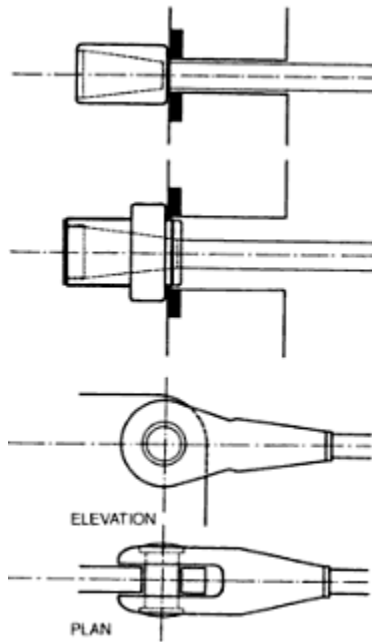
Σχήμα 2.28 Στατική λειτουργία και διατομή σε όλες τις φάσεις(κατασκευής, λειτουργικότητας, αστοχίας)

Είναι σημαντική η διάκριση ανάμεσα στην αρχική φάση της κατασκευής, όπου ο φορέας συμπεριφέρεται ως καλώδιο και στην τελική φάση κατά την λειτουργία όπου ο φορέας συμπεριφέρεται ως stress ribbon, δηλαδή ως ένας σύμμικτος φορέας στον οποίο αναπτύσσονται όχι μόνο αξονικές δυνάμεις αλλά και τέμνουσες και καμπτικές ροπές. Η αλλαγή του στατικού συστήματος από καλώδιο σε stress ribbon γίνεται μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος.

Όλοι οι υπολογισμοί σχεδιασμού ξεκινούν από το βασικό στάδιο [σχήμα 2.28.d]. Κατά την ανάλυση στη φάση κατασκευής η κατασκευή αποφορτίζεται μέχρις ότου τα καλώδια ανάρτησης αρχίζουν να εντείνονται. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται η απαιτούμενη δύναμη ανύψωσης. Ο μελετητής του έργου καθορίζει το σχήμα της κατασκευής μετά την επιβολή της προέντασης [σχήμα 2.28.e]. Το σχήμα αυτό εξαρτάται από τη μετατόπιση λόγω της προέντασης με αποτέλεσμα να χρειάζεται να εκτιμηθεί το βασικό στάδιο. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μετατόπιση της κατασκευής λόγω προέντασης και συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή. Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται μέχρις ότου προκύψει ικανοποιητική σύγκλιση τιμών. Το βασικό επίσης στάδιο είναι το αρχικό για κάθε είδους ανάλυση που αφορά τα φορτία λειτουργίας.

2.5 ΘΕΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ιδιαίτερα θέματα τεχνολογίας που αφορούν κυρίως τους τένοντες προέντασης αλλά και τα φέροντα καλώδια ή όπως αλλιώς ονομάζονται καλώδια ανάρτησης στις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon). Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 1.6.3.1 και 1.6.3.4 τα καλώδια ή οι τένοντες κατασκευάζονται είτε από τη βιομηχανία χάλυβα είτε από τη βιομηχανία προεντεταμένου σκυροδέματος. Η κατασκευή τους στην πρώτη περίπτωση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζουν με τους διάφορους τύπους υποδοχών που φαίνονται στην **εικόνα 2.2**



Εικόνα2.2 Αγκύρωση καλωδίων που κατασκευάζονται από τη βιομηχανία χάλυβα
Επάνω: απλή κυλινδρική υποδοχή, **Μέση:** Κυλινδρική υποδοχή με σπείρωμα και περικόχλιο, **Κάτω:** όψη και κάτοψη ανοιχτής υποδοχής

Προκειμένου να αποφευχθεί πρόσθετη μη μελετημένη έκταση των καλωδίων κατά την κατασκευή είναι σημαντικό αυτά να προεντείνονται. Η προένταση γίνεται χρησιμοποιώντας μια σειρά από ανακυκλικές φορτίσεις , τυπικά μεταξύ του 10% και 50 % του ορίου θραύσης του συρματόσχοινου , μέχρι την επίτευξη ενός σταθερού μέτρου ελαστικότητας. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στα φυλλάδια των κατασκευαστών : BRIDON , PFEIFER κ.α.

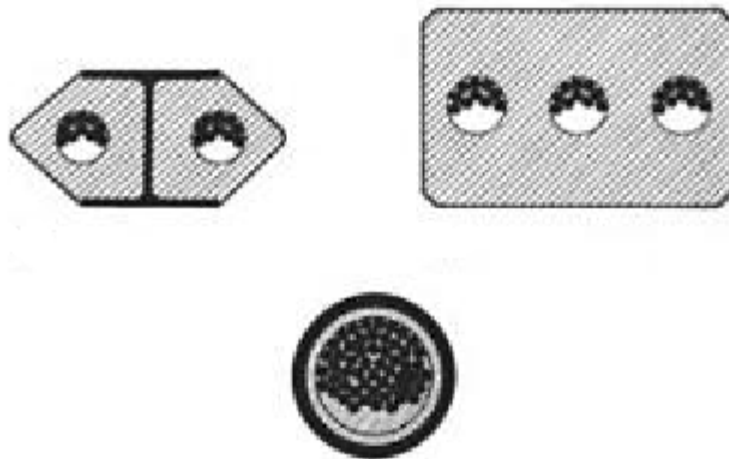
Στην περίπτωση κατασκευής των καλωδίων από τη βιομηχανία προεντεταμένου σκυροδέματος , οι τένοντες αποτελούνται συνήθως από προεντεταμένα χαλύβδινα συρματόσχοινα που ενεματώνονται σε σωλήνες από χάλυβα ή πολυαιθυλένιο (HDPE) ή από συρματόσχοινα με εποξειδική επίστρωση ή λιπασμένα συρματόσχοινα με πλαστική επικάλυψη που επίσης ενεματώνονται σε χαλυβδένιους ή πλαστικούς σωλήνες. Στην **εικόνα 2.3** παρουσιάζεται η αγκύρωση των τενόντων προέντασης , όταν αυτοί κατασκευάζονται από τη βιομηχανία προεντεταμένου σκυροδέματος.



Εικόνα 2.3 Αγκύρωση τενόντων προέντασης , όταν αυτοί κατασκευάζονται από τη βιομηχανία προέντασης

Η μορφή των τενόντων προέντασης σε αυτή την περίπτωση ποικίλει ανάλογα με το σύστημα προέντασης που χρησιμοποιείται. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στα φυλλάδια των κατασκευαστών : FREYSSINET , VSL , BBRV , DYWIDAG.

Τα εφελκύμενα μέλη που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν επίσης να κατασκευαστούν από σύμμικτα μέλη (δομικός χάλυβας – σκυρόδεμα ή συρματόσχοινα μέσα σε μεταλλικούς σωλήνες) ή μέλη από προεντεταμένο σκυρόδεμα [**εικόνα 2.4**]



Εικόνα 2.4 εφελκύμενα σύμμικτα μέλη ή μέλη από προεντεταμένο σκυρόδεμα

Πρόσφατα κατασκευάστηκαν στην Ελβετία και τη Γαλλία καλώδια από παράλληλα συρματόσχοινα από πολυμερή οπλισμένα με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced polymer – CFRP). Τα καλώδια αυτά είναι 7 φορές πιο ελαφρά από τα μεταλλικά καλώδια με την ίδια όμως φέρουσα ικανότητα. Επιπλέον , τα καλώδια αυτά είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και τις χημικές διεργασίες με αποτέλεσμα να μην απαιτείται κάποιο ειδικό ένεμα. Παρ’ όλα αυτά χρησιμοποιούνται ειδικές πλαστικές επιστρώσεις για προστασία από την ακτινοβολία και τη διάβρωση που προκαλείται από τον άνεμο.

Κατά τη χύτευση σκυροδέματος δεύτερης φάσης είναι να πιθανό να συμβούν διαμήκεις ρωγμές λόγω συστολής στη διεπιφάνεια με τους προκατασκευασμένους σπονδύλους. Για το λόγο αυτό η διεπιφάνεια προστατεύεται με μια αδιάβροχη στρώση.

Συνήθως οι ταινιοδιάδρομοι προστατεύονται από το μετεντεινόμενο σκυρόδεμα δεύτερης φάσης. Αν απαιτείται μεγαλύτερη προστασία ενεματώνονται μέσα σε σωλήνες από πολυαιθυλένιο , όπως τα συρματόσχοινα των τενόντων προέντασης.

2.6 ΘΕΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Οι πεζογέφυρες stress-ribbon έχουν μικρές ιδιοσυχνότητες και μικρή απόσβεση. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο έλεγχος της δυναμικής τους συμπεριφοράς από τη σκοπιά των ταλαντώσεων και της επίδρασης τους στους χρήστες, της απόκρισης σε φορτία ανέμου και σε σεισμογενείς περιοχές της απόκρισης σε σεισμικούς κραδασμούς.

➤ Ψυχολογική επίδραση των ταλαντώσεων στους χρήστες

Οι ταλαντώσεις του καταστώματος της γέφυρας προκαλούνται άλλοτε από το βάδισμα ή τρέξιμο των χρηστών και άλλοτε από τον άνεμο. Σε κάθε περίπτωση, όμως, είναι δυνατό να προκαλέσουν ανεπιθύμητα αισθήματα στους χρήστες. Σε ό,τι αφορά τους χρήστες η μέση συχνότητα κατά το περπάτημα είναι **2Hz**, ενώ κατά το τρέξιμο ή την αναπήδηση είναι **2.5 Hz**. [πίνακας 2.1] Προκειμένου να αποφευχθεί ο συντονισμός συνίσταται από ορισμένους κανονισμούς να αποφεύγονται πεζογέφυρες με ιδιοσυχνότητες μικρότερες από 3 Hz. Ωστόσο, οι περισσότερες γέφυρες stress-ribbon αλλά και αυτή που αναλύεται στην παρούσα διπλωματική έχουν θεμελιώδεις ιδιοσυχνότητες μικρότερες από 2 Hz, χωρίς όμως να έχει αναφερθεί κανένα παράπονο γι' αυτές. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι εκτός από τον έλεγχο των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων πρέπει να ελέγχεται και η ταχύτητα ή/και η επιτάχυνση του καταστώματος, όταν αυτό υπόκειται σε εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Συχνότητες	Συνολικό εύρος	Αργή κίνηση	Κανονική κίνηση	Γρήγορη κίνηση
Περπάτημα	1.4-2.4	1.4-1.7	1.7-2.2	2.2.-2.4
Τρέξιμο	1.9-3.3	1.9-2.2	2.2-2.7	2.7-3.3
Αναπήδηση	1.3-3.4	1.3-1.9	1.9-3.0	3.0-3.4

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές συχνοτήτων για περπάτημα, τρέξιμο ή αναπήδηση

Κατά την κίνηση των πεζών εκτός από την κατακόρυφη ταλάντωση προκαλείται και μια οριζόντια (εγκάρσια). Ο συντονισμός θεωρείται ότι επιτυγχάνεται όταν ταυτόχρονα η συχνότητα της κίνησης των χρηστών ταυτιστεί με την κατακόρυφη ιδιοσυχνότητα και η οριζόντια ιδιοσυχνότητα ταυτιστεί με τη μισή συχνότητα κίνησης των χρηστών.

Σε ό,τι αφορά την ταλάντωση που προκαλείται από τον άνεμο πρέπει να ελέγχεται η ταχύτητα και η επιτάχυνση του καταστώματος, όταν αυτό υπόκειται σε ταχύτητα ανέμου μικρότερη από 20 m/s (72 km/h), ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα από τους χρήστες. Η ροή ανέμου προκαλεί τόσο στρεπτικές όσο και καμπτικές ταλαντώσεις στην κατασκευή, οι οποίες κάτω από την επίδραση μικρών διακυμάνσεων στη γωνία του ανέμου μεταβάλλουν την ανύψωση του φορέα. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό ο λόγος των στρεπτικών προς τις καμπτικές συχνότητες πρέπει να είναι περίπου 2.5.

➤ Σεισμική απόκριση

Οι γέφυρες stress ribbon έχουν μικρές ιδιοσυχνότητες με αποτέλεσμα να μην είναι ευαίσθητες σε δυναμικές καταπονήσεις που προέρχονται από το σεισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι περισσότερο κρίσιμη είναι η οριζόντια δύναμη που προκαλείται από τα κινητά φορτία παρά από τα σεισμικά φορτία. Παρ' όλα αυτά και σε αυτές τις γέφυρες απαιτείται μια δυναμική σεισμική ανάλυση με την εφαρμογή φάσματος απόκρισης.

Οι γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους πρέπει να έχουν ευκαμψία, ώστε να επιτυγχάνουν μείωση των σεισμικών εντάσεων. Από την άλλη η δυσκαμψία τους πρέπει να είναι τέτοια που επιτρέπει άνετη διάβαση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ABAQUS

3. ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ABAQUS

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί , μία από τις ιδιαιτερότητες των γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) είναι η εξάρτηση τους από φαινόμενα που εξελίσσονται με το χρόνο , όπως ερπυσμό , συστολή ξηράνσεως και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο η συνοπτική περιγραφή της συστολής ξηράνσεως (ενότητα 3.1) και η εκτενής περιγραφή του ερπυσμού και της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος με το χρόνο (επόμενες ενότητες του κεφαλαίου). Πιο συγκεκριμένα, σε ό,τι αφορά τον ερπυσμό , περιγράφεται αρχικά η θεωρία υπολογισμού του συντελεστή ερπυσμού σύμφωνα με το CEB-FIP 1990 και στη συνέχεια η μέθοδο υπολογισμού των τάσεων λόγω ερπυσμού. Πρόκειται για 3 διαφορετικές μεθόδους α) τη μέθοδο του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας , η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν οι τάσεις στο σκυροδέμα δε διαφέρουν σημαντικά β) τη μέθοδο του ρυθμού ερπυστικών παραμορφώσεων , η οποία λαμβάνει υπόψη την ωρίμανση του σκυροδέματος και γ) τη μέθοδο της επαλληλίας ή υπέρθεσης , η οποία είναι πιο κοντά στην πραγματική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Προκειμένου στην αριθμητική εφαρμογή που ακολουθεί αργότερα να μπορεί να προσομοιωθεί με ακρίβεια ο ερπυσμός κάνοντας χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό οι 2 τρόποι προσομοίωσης του ερπυσμού με το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Πρόκειται α) για την εντολή ***CREEP** στο νόμο του υλικού με τις δύο επιλογές που προσφέρει. Όπως προκύπτει , όμως , από την προσομοίωση του απλού παραδείγματος μιας μονοδιάστατης ράβδου σκυροδέματος η εντολή αυτή δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την αποφόρτιση και κατά την αλλαγή της τάσης , γι' αυτό αναλύεται β) η εντολή ***RELAXATION TEST DATA** , η οποία δίνει ταυτόσημα σχεδόν αποτελέσματα με τη θεωρητική μέθοδο υπολογισμού των ερπυστικών τάσεων που είναι πιο κοντά στην πραγματική συμπεριφορά (μέθοδος της υπέρθεσης). Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εντολή ***RELAXATION TEST DATA** για την προσομοίωση του ερπυσμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για την ανάλυση μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon). Τέλος στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας ως συνάρτηση του χρόνου σύμφωνα με το CEB-FIP 1990.

3.1 Συστολή ξηράνσεως

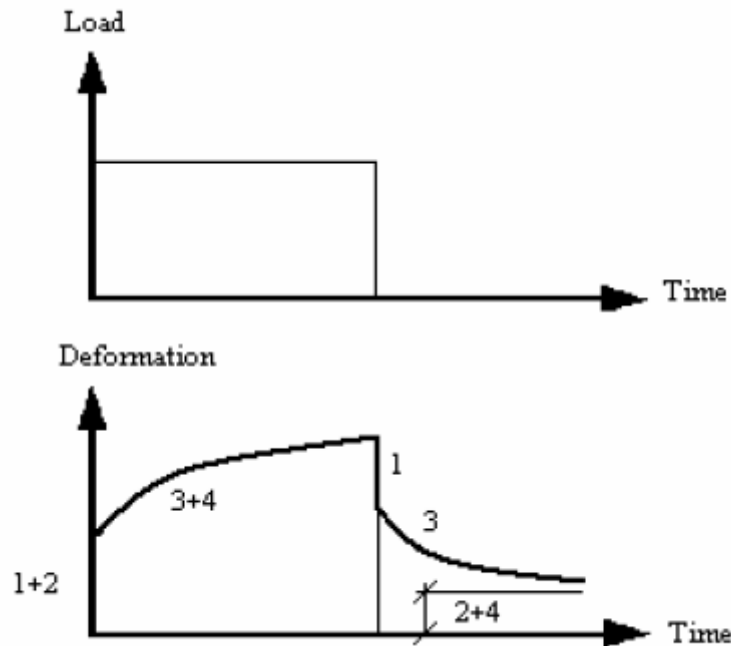
Το αποτέλεσμα της ξηράνσεως του σκυροδέματος στον αέρα του περιβάλλοντος είναι η συστολή. Εξαιτίας της παρεμπόδισης αυτής της δυνατότητας, της μείωσης δηλαδή του όγκου, από το περιβάλλον σκυρόδεμα, δημιουργούνται εσωτερικές εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα, που ενδεχομένως οδηγούν στην ανάπτυξη ρωγμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συστολή ξηράνσεως δεν εξαρτάται από τις επενεργούμενες τάσεις, αλλά από τη σχετική υγρασία, τις διαστάσεις του δοκιμίου, την ηλικία του σκυροδέματος κατά τη στιγμή της φόρτισης καθώς και τη σύσταση του σκυροδέματος.

Η συνολική παραμόρφωση συνίσταται από την παραμόρφωση κατά την εξάτμιση του νερού από το σκληρυμένο σκυρόδεμα και την παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης του σκυροδέματος, που οφείλεται στις χημικές αντιδράσεις που αναπτύσσονται από τις πρώτες μέρες μετά τη χύτευση. Το δεύτερο αυτό μέρος της παραμόρφωσης χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, ειδικά στην περίπτωση της επί τόπου χύτευσης σκυροδέματος δεύτερης φάσης σε ήδη σκληρυμένο σκυρόδεμα.

3.2 Ερπυσμός και χαλάρωση σκυροδέματος

Οι παραμορφώσεις που οφείλονται σε τάσεις διακρίνονται σε στιγμιαίες και χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι στιγμιαίες εμφανίζονται τη στιγμή της επιβολής του φορτίου και αν είναι αντιστρεπτές ονομάζονται ελαστικές, ενώ αν είναι μη αντιστρεπτές ονομάζονται πλαστικές. Αν το φορτίο εξακολουθεί να ασκείται στην κατασκευή τότε αναφερόμαστε σε χρονικά μεταβαλλόμενες παραμορφώσεις ή αλλιώς ερπυστικές παραμορφώσεις, οι οποίες αρχικά μεταβάλλονται με γρήγορο ρυθμό, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός μειώνεται, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 3.1**. Ο ερπυσμός του σκυροδέματος συνίσταται επίσης από ένα αντιστρεπτό μέρος που ονομάζεται ελαστικός ερπυσμός (delayed elastic creep) και από ένα μη αντιστρεπτό μέρος που ονομάζεται ιξώδης ερπυσμός (viscous creep) [**Πίνακας 3.1**]. Αν το σκυρόδεμα αποφορτιστεί, εμφανίζεται πρώτα μια στιγμιαία ελαστική επαναφορά της παραμόρφωσης και μια ελαστική χρονικά μεταβαλλόμενη επαναφορά της παραμόρφωσης. Φυσικά, εξαιτίας της ύπαρξης της πλαστικής στιγμιαίας παραμόρφωσης και της ιξώδους παραμόρφωσης παρατηρεί κανείς και απομένουσες παραμορφώσεις στην καμπύλη παραμορφώσεων-χρόνου [**Σχήμα 3.1**].

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο η παραμόρφωση αυξάνει υπό σταθερή τάση, ενώ χαλάρωση είναι το δυϊκό φαινόμενο, όπου παρατηρείται μείωση της αντοχής υπό σταθερό φορτίο. Τόσο ο ερπυσμός όσο και η χαλάρωση του σκυροδέματος εξαρτώνται από την υγρασία περιβάλλοντος, τις διαστάσεις, τη σύσταση του σκυροδέματος, την ηλικία του σκυροδέματος κατά τη φόρτιση, το μέγεθος της φόρτισης αλλά και τη διάρκεια επιβολής της.



Σχήμα 3.1 Μεταβολή των παραμορφώσεων με το χρόνο για σταθερό φορτίο

	Στιγμιαίες	Χρονικά μεταβαλλόμενες
Αντιστρεπτές	1. Ελαστικές	3. Ελαστικά ερπυστικές
Μη αντιστρεπτές	2. Πλαστικές	4. Ιξώδεις

Πίνακας 3.1 Διάκριση και χαρακτηρισμός παραμορφώσεων

3.2.1 Υπολογισμός του συντελεστή ερπυσμού

Ο συντελεστής ερπυσμού $\varphi(t, t_0)$ περιγράφει το μέγεθος των ερπυστικών παραμορφώσεων και ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής παραμόρφωσης προς τη στιγμιαία παραμόρφωση. [Για τον υπολογισμό του συντελεστή **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**]

Ο συντελεστής ερπυσμού υπολογίζεται σύμφωνα με το ρεολογικό μοντέλο του κώδικα CEB-FIP 1990 (Comité Euro-International du Beton – 1991) υποθέτοντας γραμμικό ερπυσμό, δηλαδή γραμμική σχέση μεταξύ των ερπυστικών παραμορφώσεων και της επιβαλλόμενης τάσης. Τότε το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται ως ωριμάζον γραμμικά ιξο-ελαστικό υλικό. Η παραδοχή αυτή ισχύει όταν οι θλιπτικές τάσεις στο σκυρόδεμα στην ηλικία t_0 της φόρτισης ικανοποιούν τη σχέση :

$$|\sigma_c| < 0.4 f_{cm}(t_0) \quad (3.1)$$

όπου σ_c η θλιπτική τάση στο σκυρόδεμα και $f_{cm}(t_0)$ η μέση αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη τη χρονική στιγμή t_0

Ο συντελεστής ερπυσμού $\varphi(t, t_0)$ υπολογίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (3.2)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (3.3)$$

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.46 \left(\frac{h}{100}\right)^3} \quad (3.4)$$

$$h = \frac{2A_c}{u} \quad (3.5)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{f_{cm}/10}} \quad (3.6)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} \quad (3.7)$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0.3} \quad (3.8)$$

$$\beta_H = 1.5(1 + (0.012 \times RH)^{18})h + 250 \leq 1500 \quad (3.9)$$

όπου φ_0 ο ονομαστικός συντελεστής ερπυσμού

$\beta_c(t, t_0)$ συντελεστής που περιγράφει την πρόοδο του ερπυσμού με το χρόνο μετά τη φόρτιση

φ_{RH} συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη σχετική υγρασία

$\beta(f_{cm})$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

$\beta(t_0)$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την ηλικία του σκυροδέματος κατά τη φόρτιση

RH η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος εκφρασμένη σε ποσοστό %

h η ονομαστική διάσταση του σκυροδέματος σε mm

A_c η επιφάνεια της διατομής του σκυροδέματος

u η περίμετρος του σκυροδέματος που έρχεται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος

f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος στην ηλικία των 28 ημερών σε MPa

t η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες τη θεωρούμενη στιγμή (χρόνος αναφοράς)

t_0 η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες τη στιγμή της φόρτισης

β_H συντελεστής που εξαρτάται από τη σχετική υγρασία και την ονομαστική διάσταση του σκυροδέματος

Σύμφωνα με το μοντέλο του κώδικα του CEB-FIP 1990 για τον υπολογισμό του συντελεστή ερπυσμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη , εκτός των άλλων , και το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται , αλλά και η επίδραση της αυξημένης ή μειωμένης , κατά περίπτωση, θερμοκρασίας. Στην παρούσα διπλωματική , ωστόσο , οι επιδράσεις αυτές θεωρούνται αμελητέες.

3.2.2 Μέθοδοι υπολογισμού των χρονικά μεταβαλλόμενων τάσεων λόγω ερπυσμού

Υπάρχουν 3 κύριες μέθοδοι για τον υπολογισμό των τάσεων που μεταβάλλονται με το χρόνο λόγω ερπυσμού : α) μέθοδος του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας , β) μέθοδος του ρυθμού ερπυστικών παραμορφώσεων , γ) μέθοδος της υπέρθεσης

3.2.2.1 Μέθοδος του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας (Effective Modulus Method – EM)

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μειώνεται σύμφωνα με τη **σχέση 3.10** , ώστε να θεωρεί κανείς ότι το υλικό είναι κρατυνόμενο ως προς τις παραμορφώσεις (strain hardening material). Αυτό σημαίνει ότι ο ερπυσμός εξαρτάται από τις προηγούμενα συσσωρευμένες ερπυστικές παραμορφώσεις σε περίπτωση μεταβολής της φόρτισης. Η μέθοδος αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση που οι τάσεις στο σκυρόδεμα δε διαφέρουν πολύ και όταν αμελείται η ωρίμανση του σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται εκτεταμένα για την πρόβλεψη των ερπυστικών παραμορφώσεων σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα ή για τον υπολογισμό του ερπυσμού σε λεπτά υποστρώματα.

Η μέθοδος δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση που οι τάσεις στο σκυρόδεμα διαφέρουν, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ερπυστικές παραμορφώσεις υπολογίζονται με βάση τις τελικές τάσεις στο σκυρόδεμα. Έτσι, όταν το επίπεδο των τάσεων αυξάνει οι παραμορφώσεις υπερεκτιμώνται, ενώ όταν το επίπεδο των τάσεων μειώνεται οι παραμορφώσεις υποεκτιμώνται.

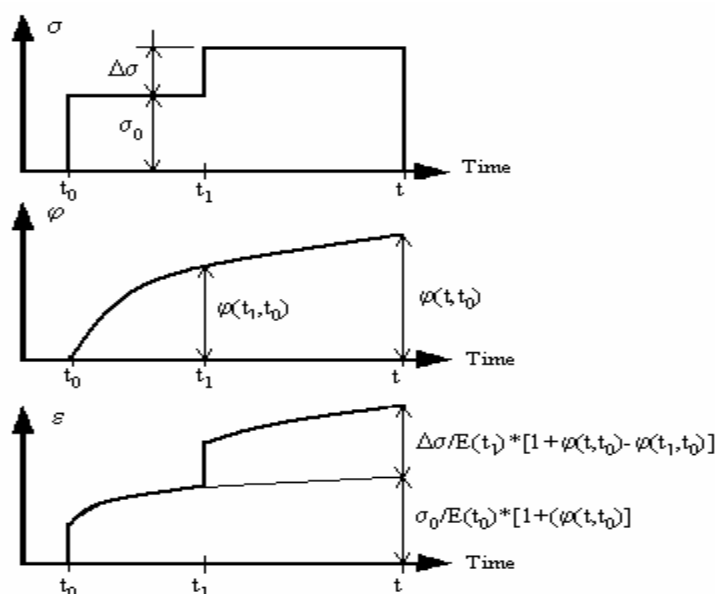
$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (3.10)$$

όπου $E_{c,eff}$ το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λόγω ερπυσμού

E_c το μέτρο ελαστικότητας κατά Young του σκυροδέματος

3.2.2.2 Μέθοδος του ρυθμού ερπυστικών παραμορφώσεων (Rate of Creep Method - RM)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι ο ρυθμός του ερπυσμού δεν εξαρτάται από την ηλικία του σκυροδέματος κατά τη φόρτιση, ώστε να θεωρεί κανείς ότι το υλικό είναι χρονικά κρατυνόμενο (time hardening material). Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή των τάσεων προκαλεί μεταβολή στις παραμορφώσεις που εξαρτάται μόνο από τη χρονική διαφορά με την πρώτη φόρτιση. Αρκεί τότε να είναι γνωστή μόνο μια ερπυστική καμπύλη, αυτή της πρώτης φόρτισης, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 3.2**.



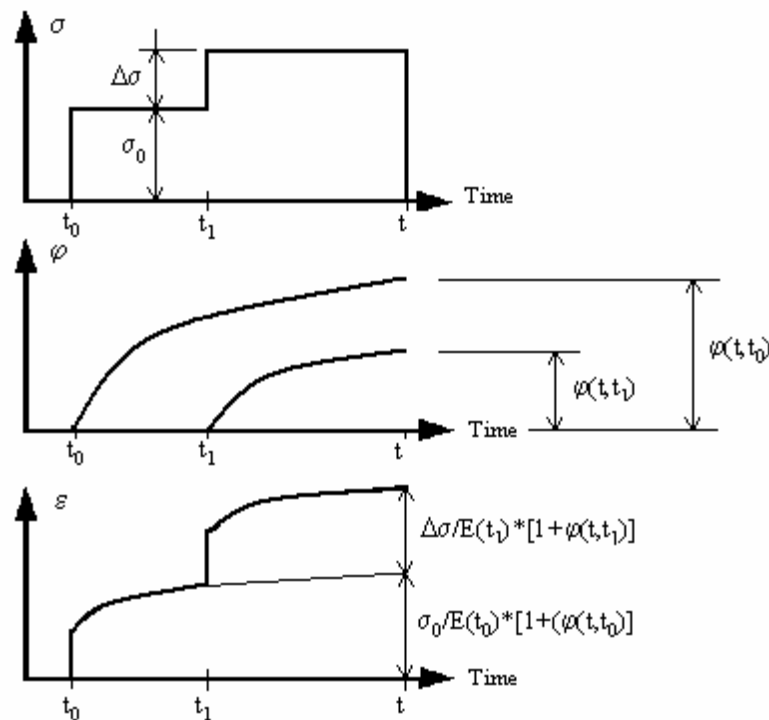
Σχήμα 3.2
 α) εξέλιξη τάσεων με το χρόνο για μεταβλητό φορτίο
 β) εξέλιξη ερπυστικού συντελεστή με το χρόνο
 γ) εξέλιξη παραμορφώσεων με το χρόνο για μεταβλητό φορτίο

Η μέθοδος αυτή υποεκτιμά τις παραμορφώσεις , όταν το σκυρόδεμα υπόκειται σε αυξητικά φορτία , λαμβάνει όμως υπόψη την ωρίμανση του σκυροδέματος σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο. Έτσι , αν συνδυαστούν οι δύο μέθοδοι μπορεί να υπολογιστεί το εύρος των ερπυστικών παραμορφώσεων. Ο υπολογισμός της ερπυστικής παραμόρφωσης γίνεται σύμφωνα με τη **σχέση 3.11** :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E(t_0)} [1 + \varphi(t, t_0)] + \frac{\Delta\sigma}{E(t_1)} [1 + \varphi(t, t_0) - \varphi(t_1, t_0)] \quad (3.11)$$

3.2.2.3 Μέθοδος της υπέρθεσης (Superposition Method)

Στην πραγματικότητα το σκυρόδεμα δεν είναι ούτε κρατυνόμενο ως προς τις παραμορφώσεις ούτε χρονικά κρατυνόμενο υλικό , αλλά κάτι ενδιάμεσο. Για το λόγο αυτό εισάγεται η μέθοδος της υπέρθεσης [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α] , που είναι το ενδιάμεσο των δυο προηγούμενων μεθόδων. Αν το επίπεδο της τάσης μεταβάλλεται υπολογίζονται δύο ερπυστικές καμπύλες για τις διαφορετικές ηλικίες του σκυροδέματος κατά τη φόρτιση t_0 και t_1 αντίστοιχα [**Σχήμα 3.3**] , οι οποίες στη συνέχεια επαλληλίζονται.



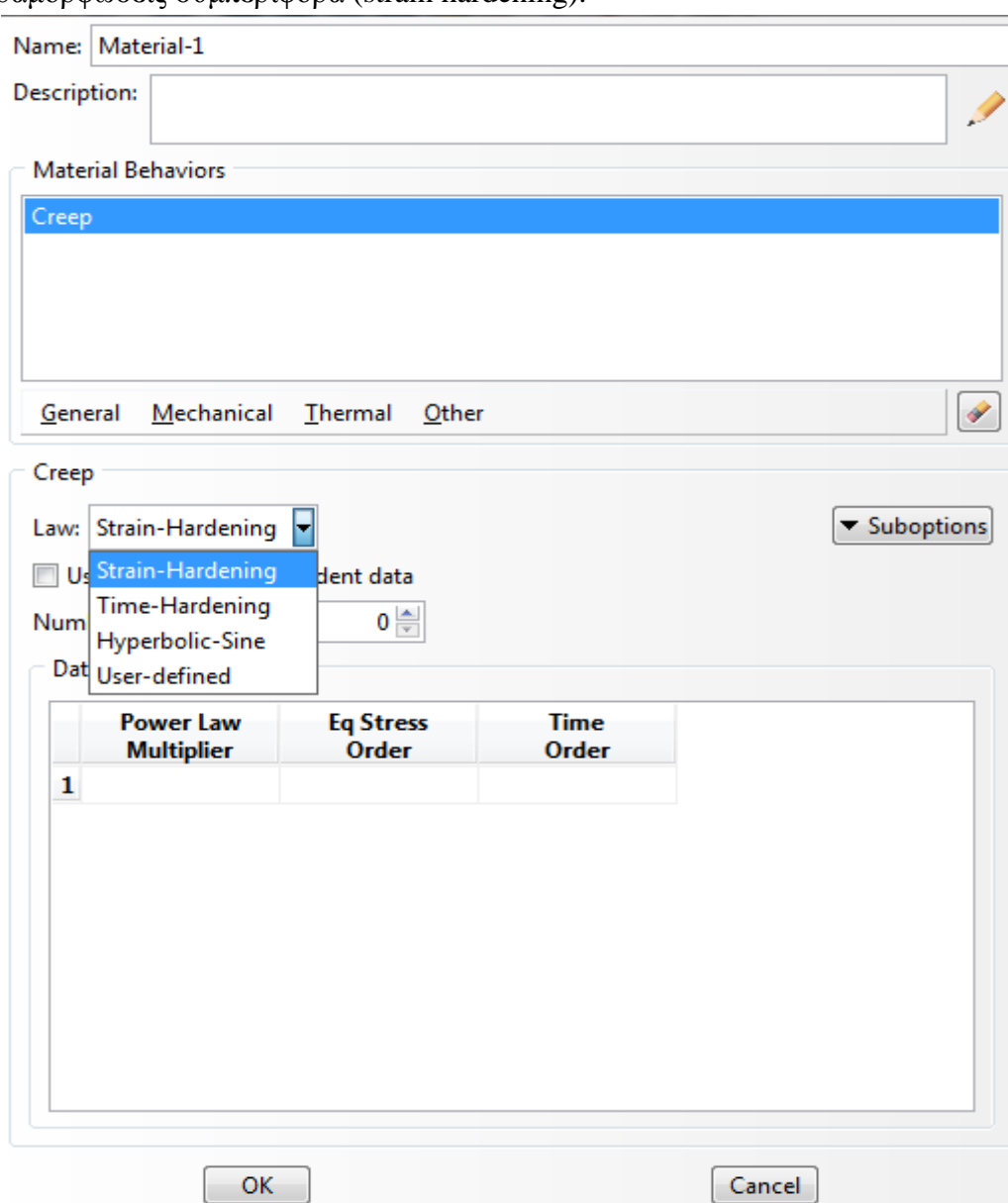
Σχήμα 3.3 Αρχή υπολογισμού των παραμορφώσεων με τη μέθοδο της υπέρθεσης

Η ερπυστική παραμόρφωση υπολογίζεται τώρα σύμφωνα με τη **σχέση 3.12** :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E(t_0)} [1 + \varphi(t, t_0)] + \frac{\Delta\sigma}{E(t_1)} [1 + \varphi(t, t_1)] \quad (3.12)$$

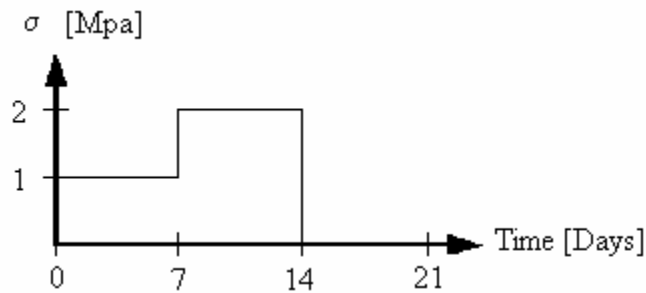
3.2.3 Εισαγωγή του ερπυσμού στο Abaqus με χρήση της εντολής *CREEP

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο ερπυσμός στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αρχικά γίνεται εφαρμογή της εντολής *CREEP στο νόμο του υλικού, το οποίο δίνει δύο δυνατότητες α) εκθετικό νόμο (power law) και β) νόμο υπερβολικού ημιτόνου (hyperbolic sine) [**Εικόνα 3.1**]. Ο νόμος υπερβολικού ημιτόνου απορρίπτεται λόγω της πολυπλοκότητας του και έτσι ερευνάται η δυνατότητα χρήσης του εκθετικού νόμου με τις δύο επιλογές που προσφέρει : α) υλικό με χρονικά κρατυνόμενη συμπεριφορά (time hardening) και β) υλικό με κρατυνόμενη ως προς τις παραμορφώσεις συμπεριφορά (strain hardening).



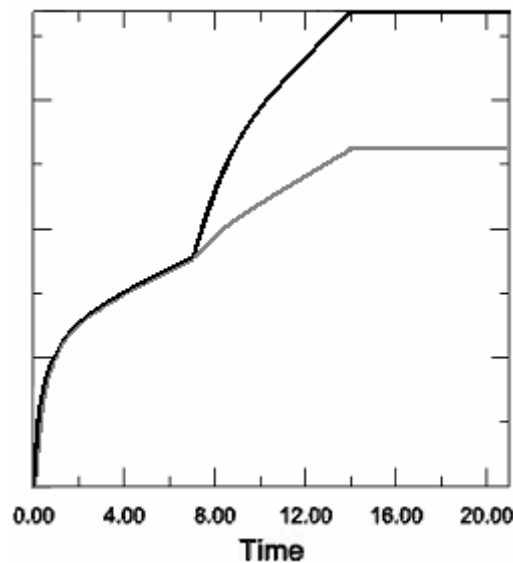
Εικόνα 3.1 Επιλογές στο νόμο του υλικού για τον υπολογισμό του ερπυσμού-εμπορικό πακέτο Abaqus, εντολή Creep

Προκειμένου να διαπιστωθεί η δυνατότητα χρήσης του εκθετικού νόμου με τις δύο εναλλακτικές του εξετάζεται ένα απλό παράδειγμα. Πρόκειται για μια μονοδιάστατη ράβδο από σκυρόδεμα υπό αξονική φόρτιση, σύμφωνα με το **σχήμα 3.4**.



Σχήμα 3.4 Ιστορία τάσεων για το απλό παράδειγμα στο Abaqus

Στο **σχήμα 3.5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανάλογα με το αν οι ερπυστικές παραμορφώσεις λήφθηκαν με υλικό time hardening (ισχνή γραμμή) ή με υλικό strain hardening (έντονη γραμμή)



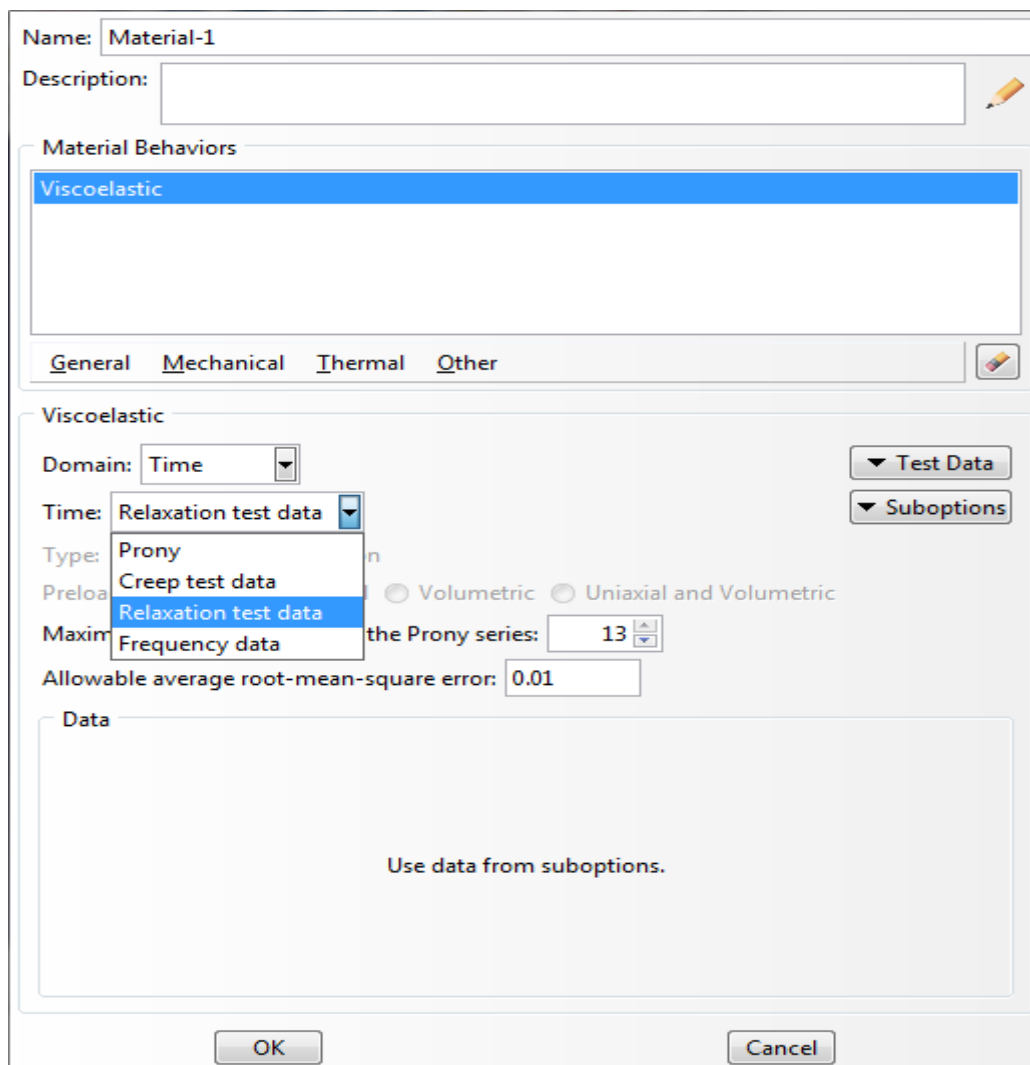
Σχήμα 3.5 ερπυστικές παραμορφώσεις από το Abaqus με time hardening (ισχνή γραμμή) και strain hardening (έντονη γραμμή)

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα προκύπτει α) ότι η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα εμφανίζεται μετά την αλλαγή της τάσης και β) ότι κατά την αποφόρτιση του σκυροδέματος τη 14 ημέρα κανένα από τα δύο μοντέλα δεν παρουσιάζει πτώση στις ερπυστικές παραμορφώσεις. Παρ' ότι παρατηρούνται ομοιότητες της μορφής της καμπύλης με strain hardening και time hardening με τις καμπύλες που προκύπτουν από τις μεθόδους RC και EM αντίστοιχα, καθ' ότι το σκυρόδεμα παρουσιάζει μια ενδιάμεση συμπεριφορά, αναζητείται άλλη μέθοδος προσομοίωσης του ερπυσμού

στο Abaqus πιο κοντά στη μέθοδο της υπέρθεσης. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε ήδη, η εντολή *CREEP δεν είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου οι τάσεις στο σκυρόδεμα ποικίλουν, ειδικά όταν στην ιστορία φόρτισης συμπεριλαμβάνεται και η αποφόρτιση.

3.2.4 Εισαγωγή του ερπυσμού στο Abaqus με χρήση της εντολής *RELAXATIONAL TEST DATA

Προκειμένου να προσομοιώσουμε τον ερπυσμό και τη χαλάρωση του σκυροδέματος με ένα πιο ακριβή τρόπο στο Abaqus χρησιμοποιούμε την εντολή Viscoelastic (στο νόμο του υλικού) στο πεδίο του χρόνου, σύμφωνα με την εικόνα 3.2. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2 ο χρόνος μπορεί να οριστεί με 3 διαφορετικούς τρόπους: α) Prony, β) δεδομένα από δοκιμή ερπυσμού, γ) δεδομένα από δοκιμή χαλάρωσης.



Εικόνα 3.2 Επιλογή του τύπου χρόνου για το υπολογισμό του ερπυσμού στο Abaqus

Επιλέγουμε να εργαστούμε με τον τρίτο τρόπο (relaxation test data), ο οποίος είναι και ο πιο απλός, αφού απαιτεί ως είσοδο στο πρόγραμμα Abaqus (εντολή combined test data) μόνο το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης $g_r(t)$ και το κανονικοποιημένο μέτρο συμπίεστικότητας (bulk module) $k_r(t)$, ως συναρτήσεις του χρόνου, σύμφωνα με τις σχέσεις **3.13**, **3.14**.

$$g_r(t) = \frac{G_r(t)}{G_0} = \frac{\frac{E_0}{2(1+\nu_0)(1+\varphi(t,t_0))}}{\frac{E_0}{2(1+\nu_0)}} = \frac{1}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (3.13)$$

$$k_r(t) = \frac{K_r(t)}{K_0} = \frac{\frac{E_0}{3(1-2\nu_0)(1+\varphi(t,t_0))}}{\frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}} = \frac{1}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (3.14)$$

όπου $G_r(t)$ το μέτρο διάτμησης κατά τη χαλάρωση ως συνάρτηση του χρόνου

$K_r(t)$ το μέτρο συμπίεστικότητας κατά τη χαλάρωση ως συνάρτηση του χρόνου

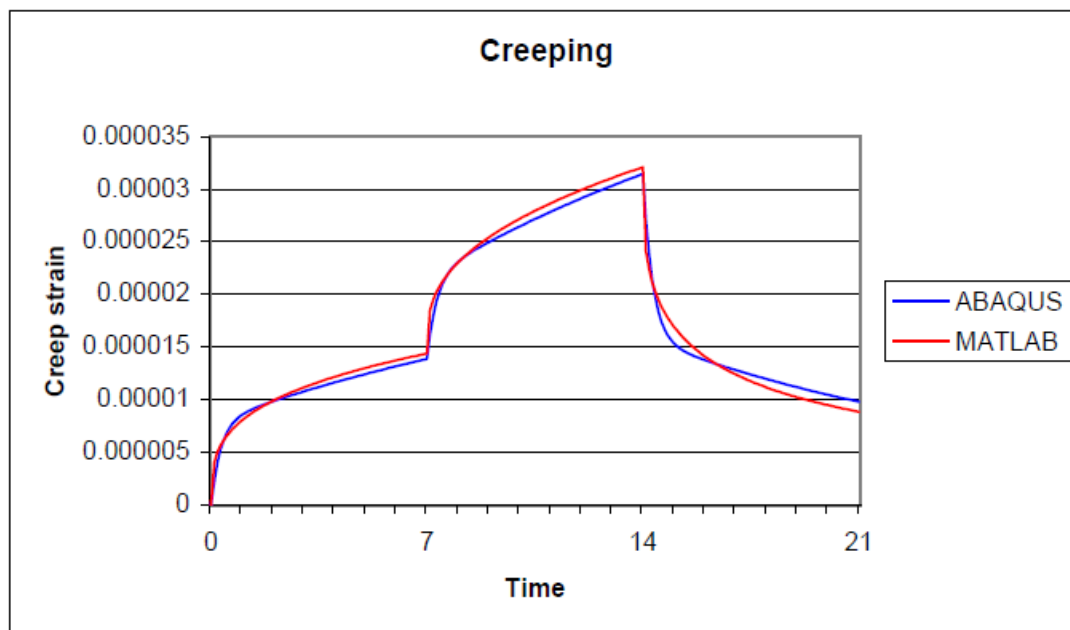
G_0 το στιγμιαίο μέτρο διάτμησης

K_0 το στιγμιαίο μέτρο συμπίεστικότητας

E_0 το στιγμιαίο μέτρο ελαστικότητας

ν_0 ο λόγος του Poisson (θεωρείται σταθερός στο χρόνο)

Προκειμένου να αξιολογήσουμε τη μέθοδο αυτή προσομοίωσης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για τον υπολογισμό του ερπυσμού και της χαλάρωσης του σκυροδέματος εξετάζεται πάλι το ίδιο απλό παράδειγμα με προηγουμένως. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα από την ανάλυση της μεθόδου της υπέρθεσης που πραγματοποιήθηκε στο Matlab[ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α] όπως φαίνεται και στο **σχήμα 3.6**. Παρατηρούμε ότι οι ερπυστικές παραμορφώσεις όπως προκύπτουν από το Abaqus σχεδόν συμπίπτουν με τις αναλυτικά υπολογιζόμενες από τη μέθοδο της υπέρθεσης με το Matlab. Οι μικροδιαφορές οφείλονται στην εισαγωγή των δεδομένων στην εντολή *COMBINED TEST DATA και στην προσέγγιση με τα ελάχιστα τετράγωνα. Παρατηρείται επίσης ότι κατά την αποφόρτιση οι παραμορφώσεις μειώνονται πλήρως σχεδόν μέχρι το μηδέν. Από την άλλη όμως δεν παρατηρείται αντιστρεπτό τμήμα στις παραμορφώσεις ούτε πλαστικό ούτε ιξώδες. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος αυτή κρίνεται η πιο κατάλληλη και είναι αυτή που χρησιμοποιείται τελικά.



Σχήμα 3.6 Ερπυστικές παραμορφώσεις από την ανάλυση στο Abaqus και στο Matlab

3.3 Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο

Όπως είναι φυσικό το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος αυξάνει με το χρόνο, κατά τη διαδικασία της συνεχούς ωρίμανσης του. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο παράγοντας αυτός επιχειρείται στην παρούσα διπλωματική εργασία η προσομοίωση αυτής της συμπεριφοράς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του Abaqus.

Η ωρίμανση του σκυροδέματος, δηλαδή η αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας με το χρόνο, οφείλεται στις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Αρχικά, ο ρυθμός ωρίμανσης είναι υψηλός, βαθμιαία, όμως, μειώνεται σε ένα πολύ χαμηλό ρυθμό, παρ' ότι η ωρίμανση του σκυροδέματος δε σταματάει ποτέ.

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας κατά Young γίνεται σύμφωνα με τον κώδικα 1990 του CEB-FIP, με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων (3.15-3.19):

$$E_c = a_E \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.15)$$

όπου E_c το μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 28 ημερών σε MPa

$$a_E = 2.15 * 10^4 \text{ (MPa)}$$

f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος 28 ημερών από μετρήσεις (MPa)

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές φορές το μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 28 ημερών είναι γνωστό και υπολογίζεται κάνοντας χρήση μόνο της χαρακτηριστικής αντοχής κυλίνδρου σκυροδέματος 28 ημερών σε θλίψη (ιδιαίτερα κατά το σχεδιασμό, όπως στην περίπτωση της γέφυρας που εξετάζεται) και όχι της μέσης, όπως προκύπτει από μετρήσεις. [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β]

Όταν πραγματοποιείται μόνο ελαστική ανάλυση, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αρχική πλαστική παραμόρφωση, μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τη σχέση :

$$E_{cs} = 0.85E_c \quad (3.16)$$

όπου E_{cs} το τέμνον μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή του σκυροδέματος

$$E_c(t) = \beta_E(t)E_{cs} \quad (3.17)$$

$$\beta_E(t) = (\beta_{cc}(t))^{0.5} \quad (3.18)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right)} \quad (3.19)$$

όπου $\beta_E(t)$ συντελεστής που εξαρτάται από την ηλικία του σκυροδέματος t

$\beta_{cc}(t)$ συντελεστής για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας ως συνάρτηση της ηλικίας του σκυροδέματος t

t η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες

$t_1 = 1$ σε ημέρες

s συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου

Σύμφωνα με τον κώδικα 1990 του CEB-FIP για τον υπολογισμό της εξέλιξης του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση τυχούσας αύξησης ή μείωσης της θερμοκρασίας. Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική εργασία τα φαινόμενα αυτά αμελούνται.

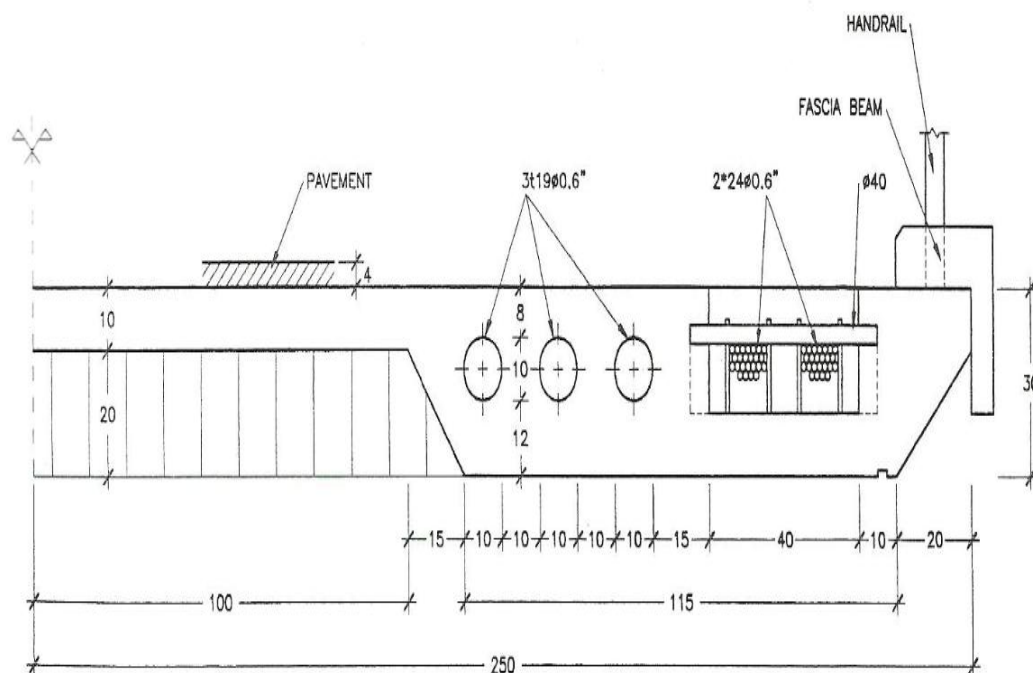
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφεται η θεωρία του ερπυσμού και ο τρόπος προσομοίωσης του στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus , ώστε στο κεφάλαιο αυτό , που αποτελεί την αριθμητική εφαρμογή , να εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης του σε συνδυασμό με την ολοκληρωμένη στατική ανάλυση σε δύο και τρεις διαστάσεις γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (Stress ribbon). Η αριθμητική εφαρμογή περιλαμβάνει την ανάλυση δύο γεφυρών με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους (stress ribbon) με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus σε δύο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα και την ανάλυση μιας τρίτης γέφυρας stress ribbon με το Sofistik. Η πρώτη γέφυρα περιγράφεται στο διαδίκτυο ως παράδειγμα στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων DIANA (<https://support.tnodiana.com/manuals/d944/Diana.html>) και χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία για την κατ' αρχάς αναπαραγωγή του σε δύο διαστάσεις στο Abaqus και στη συνέχεια για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα δύο λογισμικά. Από τη σύγκριση προκύπτει ικανοποιητική σύγκλιση αποτελεσμάτων γεγονός που δηλώνει τη δυνατότητα του Abaqus να επιλύει τέτοιου είδους προβλήματα , αλλά και την εξοικείωση του γράφοντα με το συγκεκριμένο λογισμικό για το συγκεκριμένο πρόβλημα ανάλυσης μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους , όπου πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη προσοχή στη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά των ταινιοδιαδρόμων , όπως και στην κατασκευή σε φάσεις. Προκειμένου να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην εξέλιξη των μετακινήσεων σε όλες τις φάσεις κατασκευής , αλλά και στις τάσεις και εντάσεις σε συγκεκριμένες φάσεις , όπως επίσης και στις ιδιομορφές και τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες προσομοιώνεται μια υποθετική γέφυρα stress ribbon σε τρεις διαστάσεις και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Πρόκειται για μια γέφυρα συνολικού μήκους 99 m , ενός ανοίγματος , η οποία δεν έχει κατασκευασθεί ή μελετηθεί , βασίζεται όμως στη γέφυρα που αναλύεται συχνά στο βιβλίο του Jiri Strasky " Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges " στις σελίδες 15,16,17,62,63,64. Η τελική διατομή έχει πλάτος 5 m και ύψος 0.30 m. Στο τρισδιάστατο αυτό προσομοίωμα λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα και η διαδικασία ενεργοποίησης στοιχείων επόμενης φάσης στο αντίστοιχο βήμα. Για την πληρότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης μιας γέφυρας με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους που αφορά τόσο την εξέλιξη των μετακινήσεων όσο και την εξέλιξη των καμπτικών ροπών σε όλο το μήκος της γέφυρας αλλά και της ροπής στο άνοιγμα συγκεκριμένα , την απόκριση σε φορτία ανέμου , την επίδραση του ερπυσμού , τις αναπτυσσόμενες τάσεις καθ' ύψος της διατομής και τις ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες προσομοιώνεται τέλος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων κάνοντας χρήση του λογισμικού Sofistik η γέφυρα stress ribbon που περιγράφεται στη δημοσίευση των Diego Cobo del Arco , Angel C. Aparicio , Antonio R. Mari με τίτλο "preliminary design of prestressed concrete stress ribbon bridge". Πρόκειται για μια πεζογέφυρα συνολικού μήκους 80 m με διατομή (5*0.3) m που βασίζεται στη stress ribbon γέφυρα πάνω από τον ποταμό Sacramento στην Καλιφόρνια της Αμερικής.

4.1 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ STRESS RIBBON ΜΕ ΧΡΗΣΗ ABAQUS

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το δισδιάστατο προσομοίωμα που βασίζεται στη γέφυρα stress ribbon που σχεδιάστηκε από το τεχνικό πανεπιστήμιο της Καταλονίας και περιγράφεται αναλυτικά από τους Cobo Del Arco και Aparicio Bengoechea, αναφέρεται δε στο διαδίκτυο ως παράδειγμα με το λογισμικό DIANA. Το προσομοίωμα έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus ώστε να ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα και η κατασκευή σε φάσεις και να αξιολογηθεί η δυνατότητα προσομοίωσης με το συγκεκριμένο πρόγραμμα με σύγκριση



Σχήμα 4.1 Λεπτομέρεια εξεταζόμενης ημιδιατομής (διαστάσεις σε cm)

4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

- $A_{sb} = 0.01344 \text{ m}^2$ (η συνολική επιφάνεια 4 καλωδίων ανάρτησης 24 συρματοσχοίνων $\Phi 0.6$ '')
- $A_{sp} = 0.01596 \text{ m}^2$ (η συνολική επιφάνεια 6 τενόντων προέντασης 19 συρματοσχοίνων $\Phi 0.6$ '')
- $A_c = 1.0 \text{ m}^2$ (η συνολική επιφάνεια των σπονδύλων της γέφυρας)
- $w = 5.0 \text{ m}$ (το πλάτος της γέφυρας)
- $l = 80 \text{ m}$ (το μήκος της γέφυρας)

4.1.2 Ανάλυση σε φάσεις

Η ανάλυση γίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά τη συμπεριφορά των καλωδίων ανάρτησης, όταν υπόκεινται στα νεκρά φορτία. Στη δεύτερη φάση, χρησιμοποιείται η παραμορφωμένη γεωμετρία των καλωδίων ως αρχική γεωμετρία για τους σπονδύλους της γέφυρας. Οι σπόνδυλοι συνδέονται με τα καλώδια ανάρτησης και το σύστημα προεντείνεται. Μεταξύ των τενόντων προέντασης και των σπονδύλων υπάρχει συνάφεια με αποτέλεσμα να ασκείται πρόσθετο εξωτερικό φορτίο.

➤ Φάση πρώτη

Στη φάση αυτή οι ταινιοδιάδρομοι ή καλώδια ανάρτησης αναρτώνται από τα ακρόβαθρα. Τα καλώδια υπόκεινται σε μια οριζόντια δράση που δίνει την απαιτούμενη κατακόρυφη μετατόπιση, όταν πάνω τους ασκούνται τα μόνιμα φορτία. Η οριζόντια δύναμη δίνεται από τη σχέση :

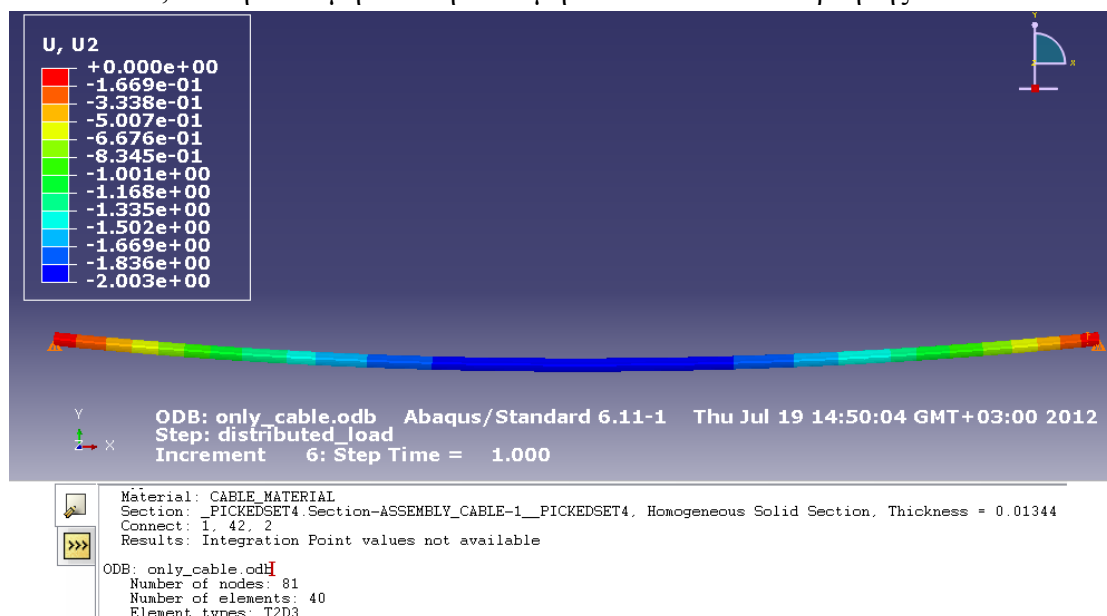
$$H_0 = \frac{q_0 l^2}{8f_0} = 1.03 * 10^7 N$$

όπου $q_0 = 2.575 * 10^4 N/m$ το ομοιόμορφα κατανεμημένο μόνιμο φορτίο

$f_0 = 2 m$ η απαιτούμενη βύθιση στο μέσο του ανοίγματος και

$l = 80 m$ το μήκος του ανοίγματος

Τα καλώδια ανάρτησης προσομοιώνονται ως 3-κομβικά στοιχεία δικτύωματος (three-node truss elements) **T2D3**, τα οποία όμως δέχονται μόνο εφελκυσμό, είναι δηλαδή στοιχεία καλωδίου. Η δυνατότητα αυτή δίνεται στο Abaqus με την εντολή ***NO COMPRESSION**. Τα στοιχεία αυτά είναι 40, ενώ το καθένα έχει μήκος 2 m και ενδιαμέσο κόμβο στο 1 m [**σχήμα 4.2**]. Το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα του καλωδίου, δηλαδή **E=200GPa**, ενώ η διατομή είναι η διατομή των καλωδίων ανάρτησης **Asb**.



Σχήμα 4.2 Συνοριακές συνθήκες και κατακόρυφες μετακινήσεις καλωδίου

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Σε ότι αφορά τις συνοριακές συνθήκες επιβάλλεται ως κινηματική δέσμευση άρθρωση στο αριστερό άκρο και κύλιση στο δεξιό, όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.2**. Η ανάλυση γίνεται σε 2 βήματα :

- Επιβολή οριζόντιας δύναμης $H_0=1.03 * 10^7 N$. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η επιβολή της οριζόντιας δύναμης από το πρώτο βήμα της πρώτης φάσης δεν αντιστοιχεί στην πραγματική κατασκευαστική ακολουθία. Ωστόσο, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη με σκοπό να δοθεί μια μικρή δυσκαμψία στα truss στοιχεία, ώστε να μπορούν να αναλάβουν φορτία κάθετα στον άξονα τους(καλώδια)
- Επιβολή συνολικού μόνιμου ομοιόμορφου φορτίου $q_0 = 2.575 * 10^4 N/m$

Η ανάλυση που πραγματοποιείται είναι μη γραμμική, δεδομένου ότι τα καλώδια διέπονται από γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά και στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS αυτό γίνεται με την εντολή ***NLGEOM**.

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.2** η μετακίνηση στο μέσο του ανοίγματος είναι 2.003 m πολύ κοντά στην αναμενόμενη τιμή των 2 m.

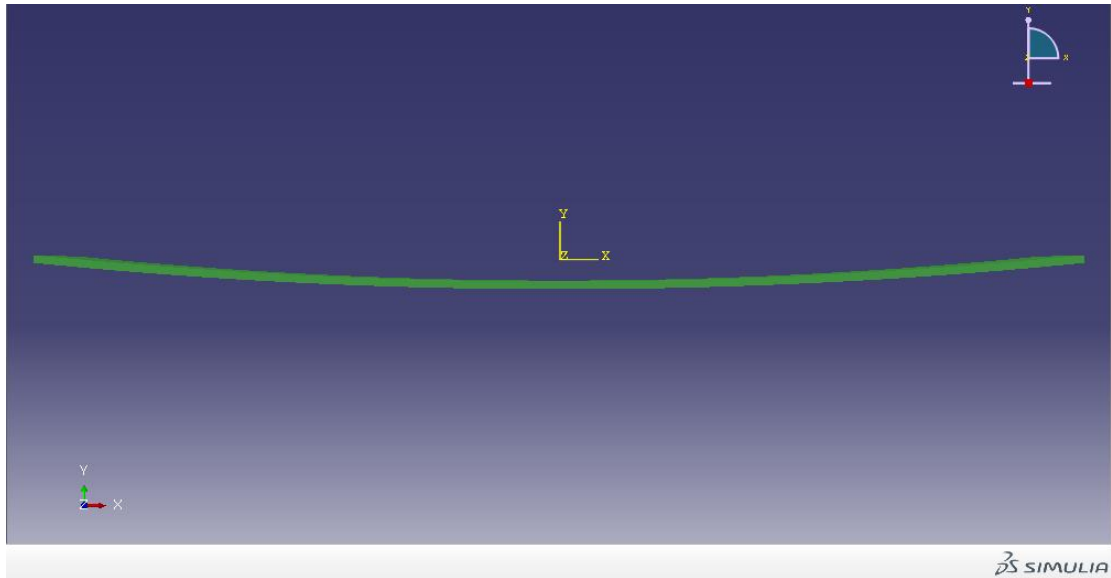
Σε ότι αφορά τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος αυτά έχουν μήκος 1 m και πλάτος 5 m. Το υλικό του σκυροδέματος έχει τις εξής ιδιότητες :

- Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος $E=35 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson $\nu=0.35$
- Συντελεστής θερμικής διαστολής $\alpha=10^{-5} (1/^{\circ}\text{C})$
- Σκυρόδεμα C30
- Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος $f_{cm}=35 \text{ MPa}$
- Ρεολογικό μοντέλο 1990, όπου $h = \frac{2A_c}{u} = 98 \text{ mm}$, $t_0 = 28 \text{ ημέρες}$, $RH = 60\%$

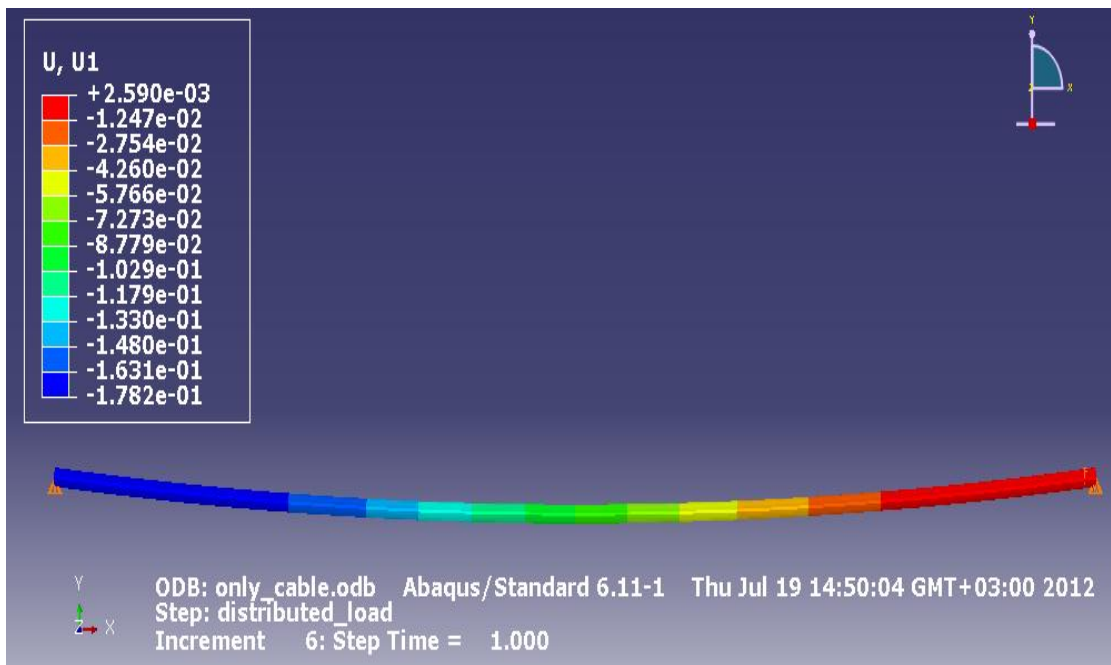
➤ Φάση δεύτερη

Στη φάση αυτή εισάγονται οι προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι σκυροδέματος, οι οποίοι προσομοιώνονται ως στοιχεία δοκού **B22** (3 κομβικά στοιχεία), όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.3**. Η αρχική γεωμετρία των στοιχείων δοκού ακολουθεί την παραμορφωμένη γεωμετρία των στοιχείων δικτύωματος της πρώτης φάσης. Ο τένοντας προέντασης τοποθετείται στο κέντρο βάρους των προκατασκευασμένων σπονδύλων και συνδέεται απ' ευθείας με τους κόμβους της δοκού. Μετά την τοποθέτηση των σπονδύλων το κενό στις θέσεις των καλωδίων ανάρτησης

καλύπτεται με σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να υπάρχει συνάφεια μεταξύ των 2 στοιχείων. Στο Abaqus αυτό γίνεται με την εντολή ***TIE**. Ο κόμβος της αριστερής στήριξης, που στην 1^η φάση δέχθηκε την οριζόντια δύναμη και μετατοπίστηκε κατά 17.82 cm [σχήμα 4.4], παραμένει στη δεύτερη φάση σε αυτή τη θέση και η στήριξη μετατρέπεται σε άρθρωση, δεσμεύουμε δηλαδή την οριζόντια κινητότητα.



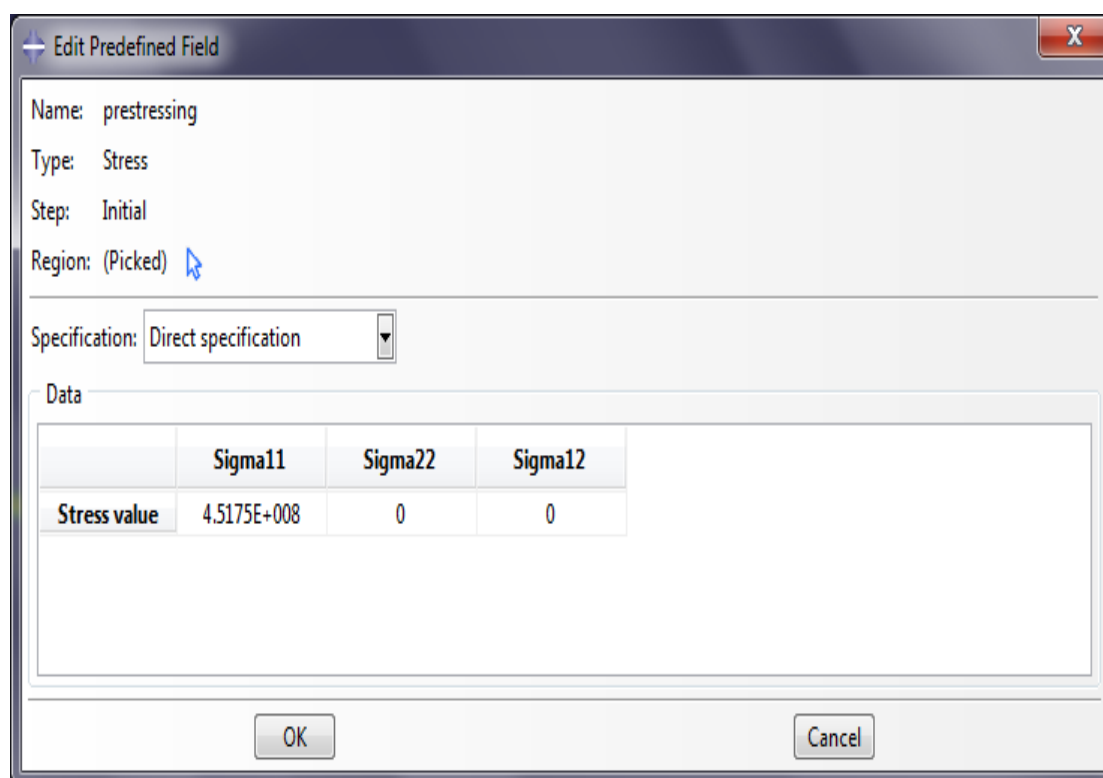
Σχήμα 4.3 Τα στοιχεία δοκού ακολουθούν την παραμορφωμένη γεωμετρία της πρώτης φάσης



Σχήμα 4.4 διάγραμμα οριζόντιων μετακινήσεων κατά μήκος του καλωδίου

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

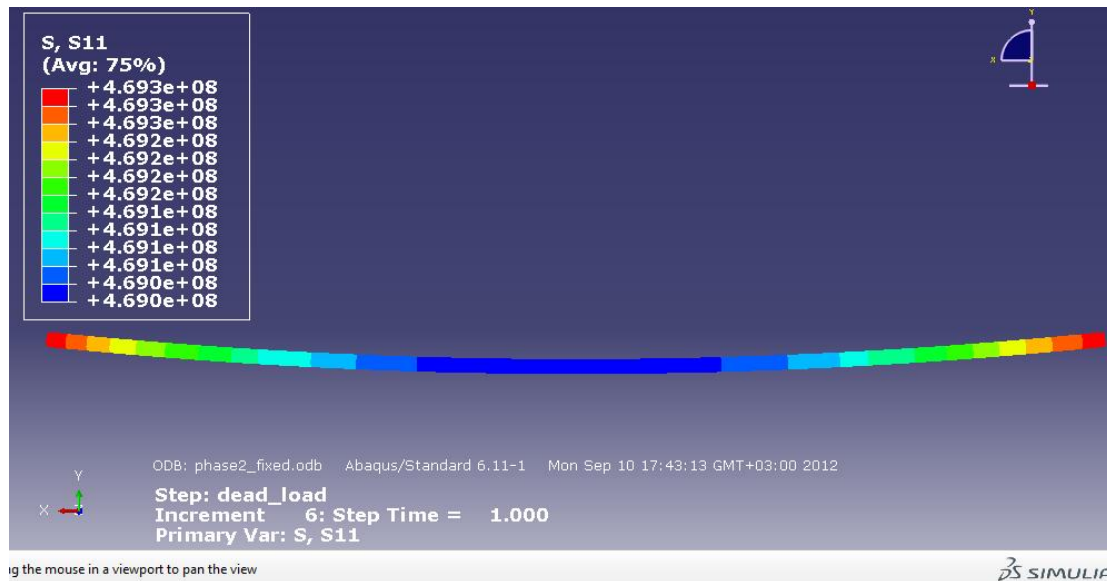
Στη φάση αυτή ορίζουμε 3 βήματα : α) την επιβολή του συνολικού μόνιμου ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου q_0 στα στοιχεία δοκού , β) την επιβολή δύναμης προέντασης των τενόντων προέντασης που ως μέγεθος ισούται με τη δύναμη προέντασης των καλωδίων ανάρτησης H_0 και γ) την επιβολή πρόσθετων κινητών φορτίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι , δεδομένου ότι οι στηρίξεις μετατρέπονται σε αρθρώσεις , η προένταση δεν είναι δυνατό να ασκηθεί ως δύναμη στο άκρο. Τότε η δύναμη αναλαμβάνεται ολόκληρη από τη στήριξη και έτσι δε λαμβάνουμε υπόψη μας τις επιδράσεις από την προένταση. Για το λόγο αυτό η εισαγωγή της προέντασης στο Abaqus γίνεται με την εντολή ***PREDEFINED FIELD** ως αρχική τάση των τενόντων προέντασης [σχήμα 4.5]. Ως επιφάνεια εδώ χρησιμοποιείται η συνολική επιφάνεια των τενόντων προέντασης , δηλαδή $A_{sp} = 0.01596 \text{ m}^2$.



Σχήμα 4.5 Εισαγωγή αρχικής τάσης στο Abaqus

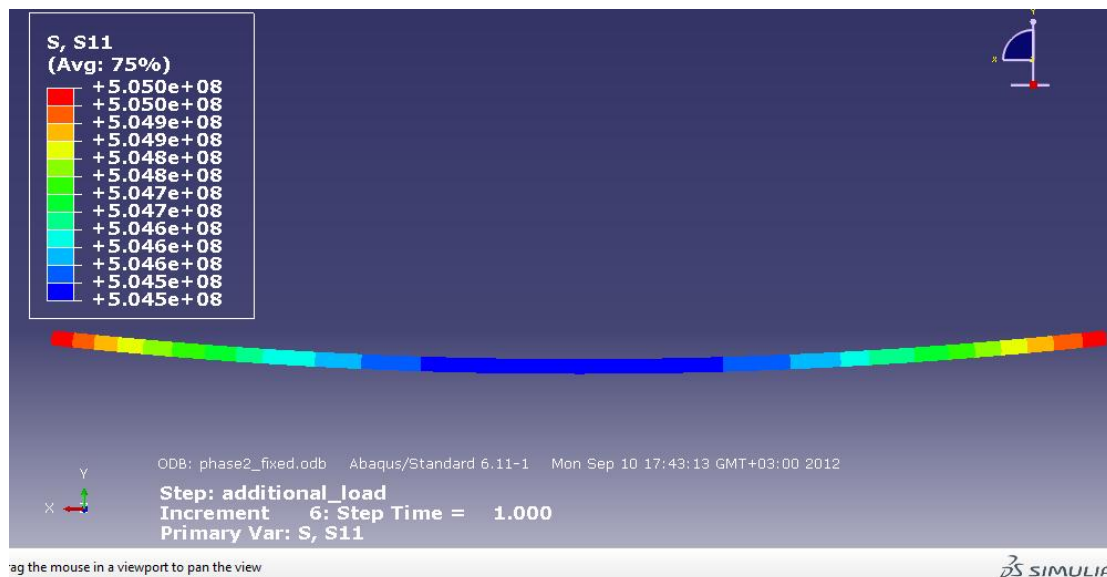
Στην προσομοίωση σε φάσεις τα εξωτερικά φορτία που είναι ενεργά σε μία φάση πρέπει να εφαρμοσθούν ξανά σε κάθε επόμενη φάση , αν είναι ακόμα ενεργά. Παρ' όλα αυτά , ο ταυυστής των εσωτερικών εντάσεων μένει αναλλοίωτος όταν εισάγουμε μια νέα φάση. Μιας και η ισορροπία ικανοποιήθηκε στο τέλος της 1^{ης} φάσης , το εξωτερικό φορτίο επιβάλλεται σε ένα μόνο επαυξητικό βήμα (increment). Στο παράδειγμα αυτό , γίνεται επαναεφαρμογή των εξωτερικών φορτίων , ώστε να ισορροπήσουν εκ νέου με τις εσωτερικές δυνάμεις στη δεύτερη φάση.

Στο **σχήμα 4.6** φαίνεται η κατανομή των τάσεων σ_{11} κατά μήκος του καλωδίου μετά την επιβολή των μονίμων φορτίων. Η τάση κυμαίνεται γύρω από την τιμή των **469 MPa**



Σχήμα 4.6 κατανομή των τάσεων σ_{11} κατά μήκος του καλωδίου μετά την επιβολή των μονίμων φορτίων

Στο **σχήμα 4.7** φαίνεται η κατανομή των τάσεων σ_{11} κατά μήκος του καλωδίου μετά την επιβολή των κινητών φορτίων. Η τάση κυμαίνεται γύρω από την τιμή των **505 MPa**

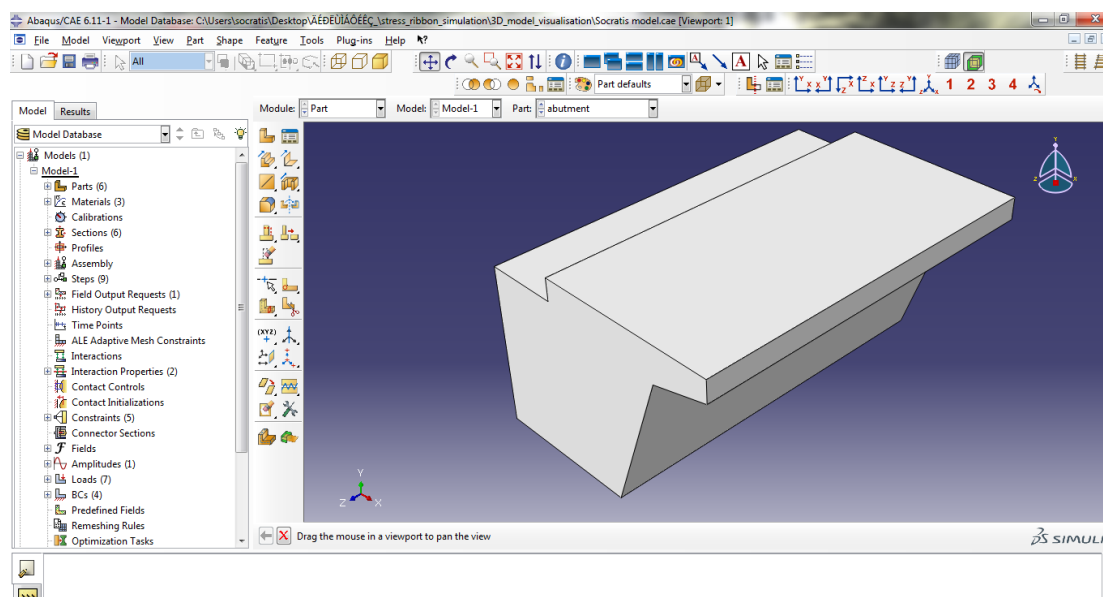


Σχήμα 4.7 κατανομή των τάσεων σ_{11} κατά μήκος του καλωδίου μετά την επιβολή των κινητών φορτίων

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση σχεδόν συμπίπτουν με τις τάσεις 454 MPa και 501 MPa αντίστοιχα που προκύπτουν από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Diana (<https://support.tnodiana.com/manuals/d944/Diana.html>), γεγονός που δηλώνει την εξοικείωση με το Abaqus αλλά και τη δυνατότητα του δεύτερου να επιλύει τέτοια θέματα.

4.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ STRESS RIBBON ΜΕ ΧΡΗΣΗ ABAQUS

Προκειμένου να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην εξέλιξη των τάσεων, των εντάσεων και των μετατοπίσεων κυρίως κατά τις φάσεις κατασκευής με τη σειρά που ασκούνται τα μόνιμα φορτία και να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η κατασκευαστική ακολουθία αναπτύσσεται ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα μιας γέφυρας stress ribbon που βασίζεται σε μια πραγματική γέφυρα αυτού του είδους. Ακολουθεί περιγραφή της ανάλυσης της γέφυρας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.



Σχήμα 4.8 γραφικό περιβάλλον Abaqus και γεωμετρία του ακρόβαθρου

4.2.1 PARTS (Καθορισμός της γεωμετρίας των επιμέρους στοιχείων)

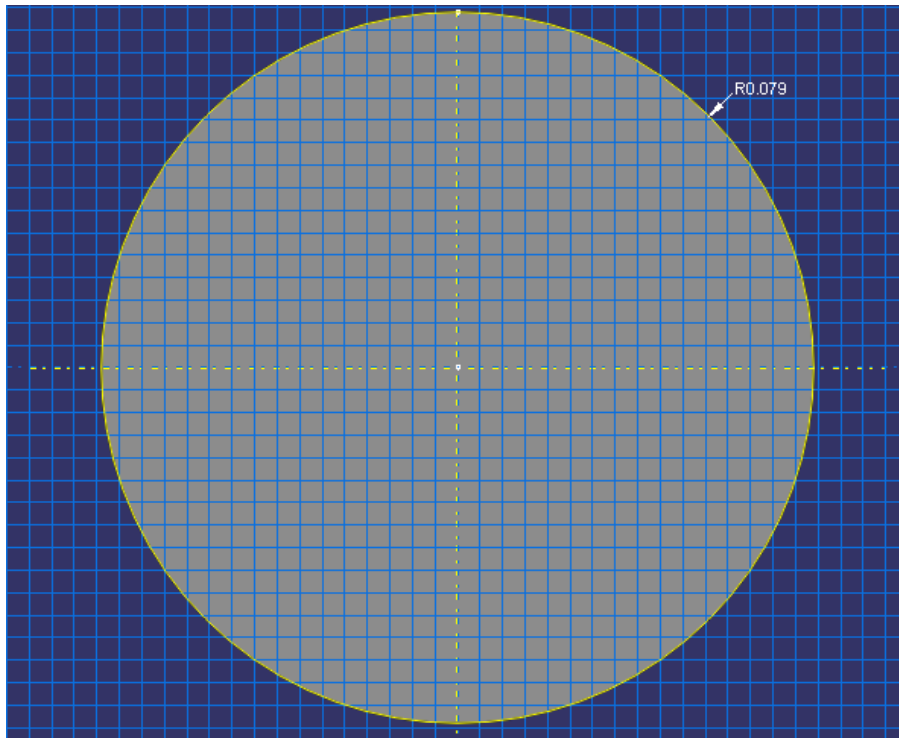
Α) 2 Ακρόβαθρα [σχήμα 4.8]

Β) 2 ισοδύναμοι ταινιοδιάδρομοι επιφάνειας κυκλικής διατομής $A_{BT(1)} = 0.0196 \text{ m}^2$ ο καθένας ($d_{eq} = 15.8 \text{ cm}$). Συνολική επιφάνεια ταινιοδιαδρόμων $A_{BT} = 0.0392 \text{ m}^2$ [σχήμα 4.9].

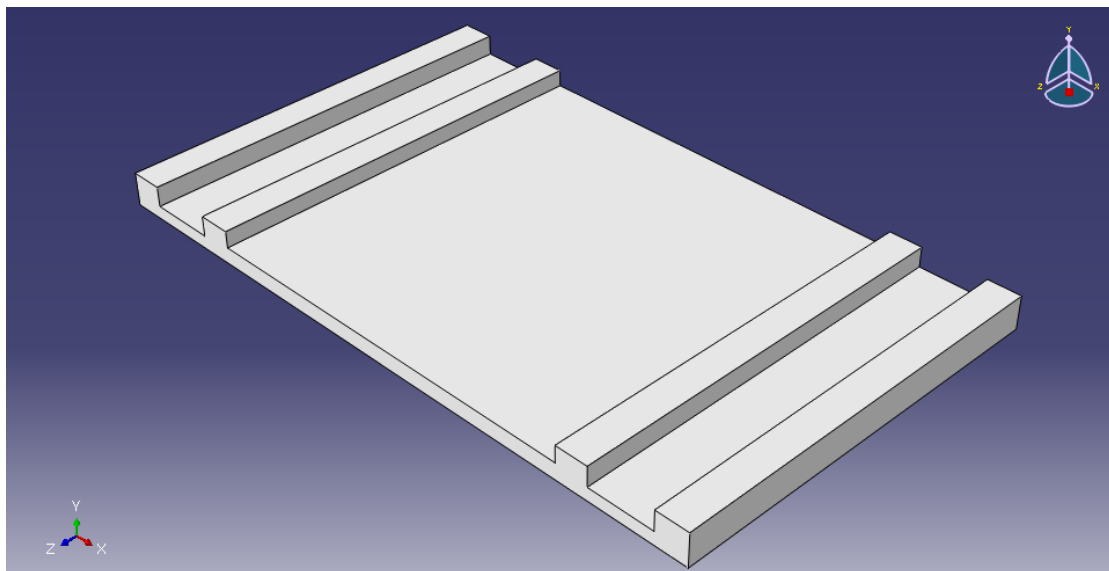
Γ) 33 προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι σκυροδέματος από 3 m ο καθένας (σύνολο 99 m) [σχήμα 4.10 , 4.11]

Δ) 2 ισοδύναμοι τένοντες προέντασης με διάμετρο 10 cm ο καθένας, δηλαδή $A_{PT(1)} = 0.00785 \text{ m}^2$ και $A_{PT} = 0.0157 \text{ m}^2$ [σχήμα 4.12]

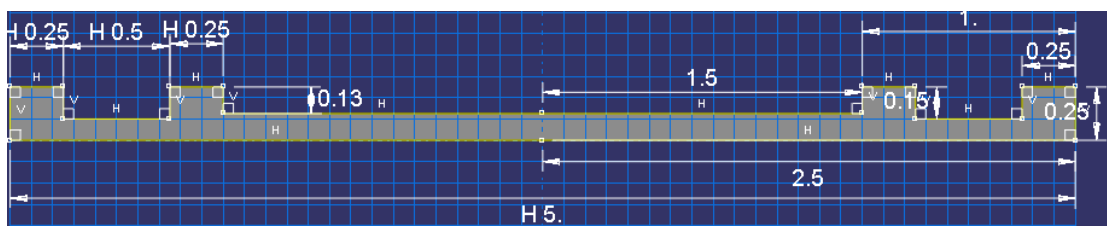
Ε) Πλάκα σκυροδέματος με επιτόπου σκυρόδεμα δεύτερης φάσης [σχήμα 4.13, 4.14]



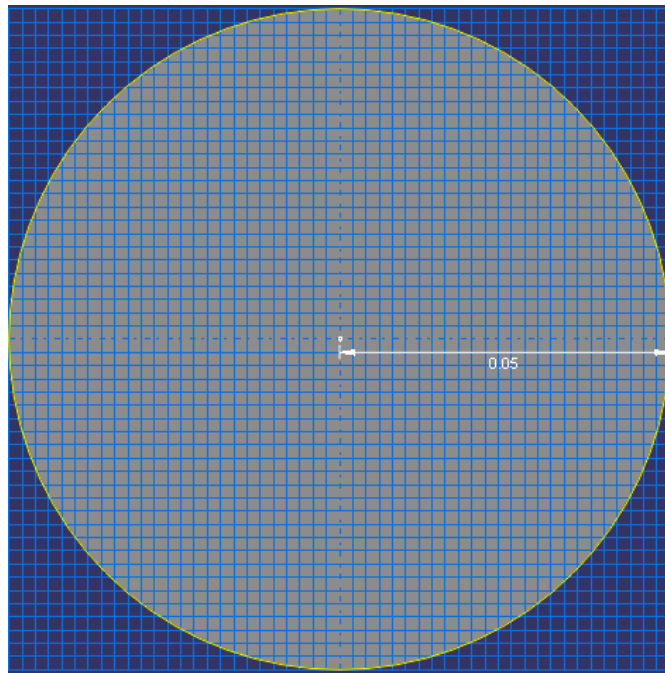
Σχήμα 4.9 Γεωμετρία ενός ισοδύναμου ταινιοδιαδρόμου



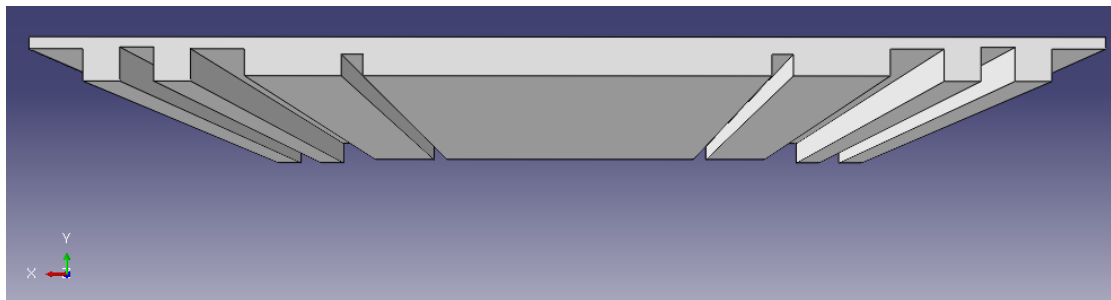
Σχήμα 4.10 Προοπτική εικόνα ενός προκατασκευασμένου σπονδύλου



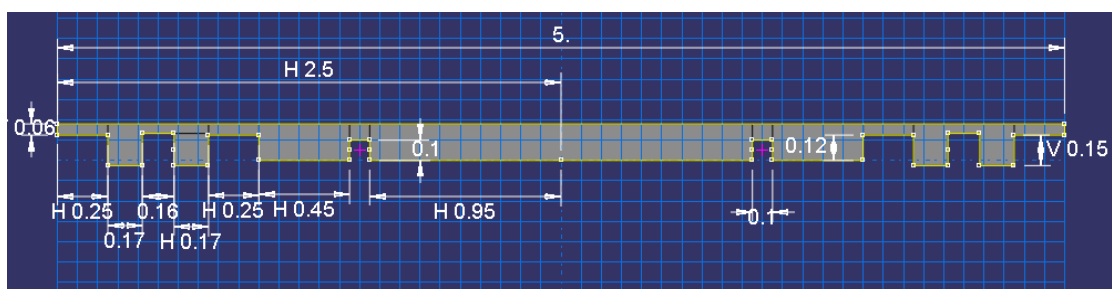
Σχήμα 4.11 Γεωμετρία διατομής προκατασκευασμένων σπονδύλων



Σχήμα 4.12 Γεωμετρία τένοντα προέντασης



Σχήμα 4.13 Προοπτική εικόνα της πλάκας επιτόπου σκυροδέματος δεύτερης φάσης



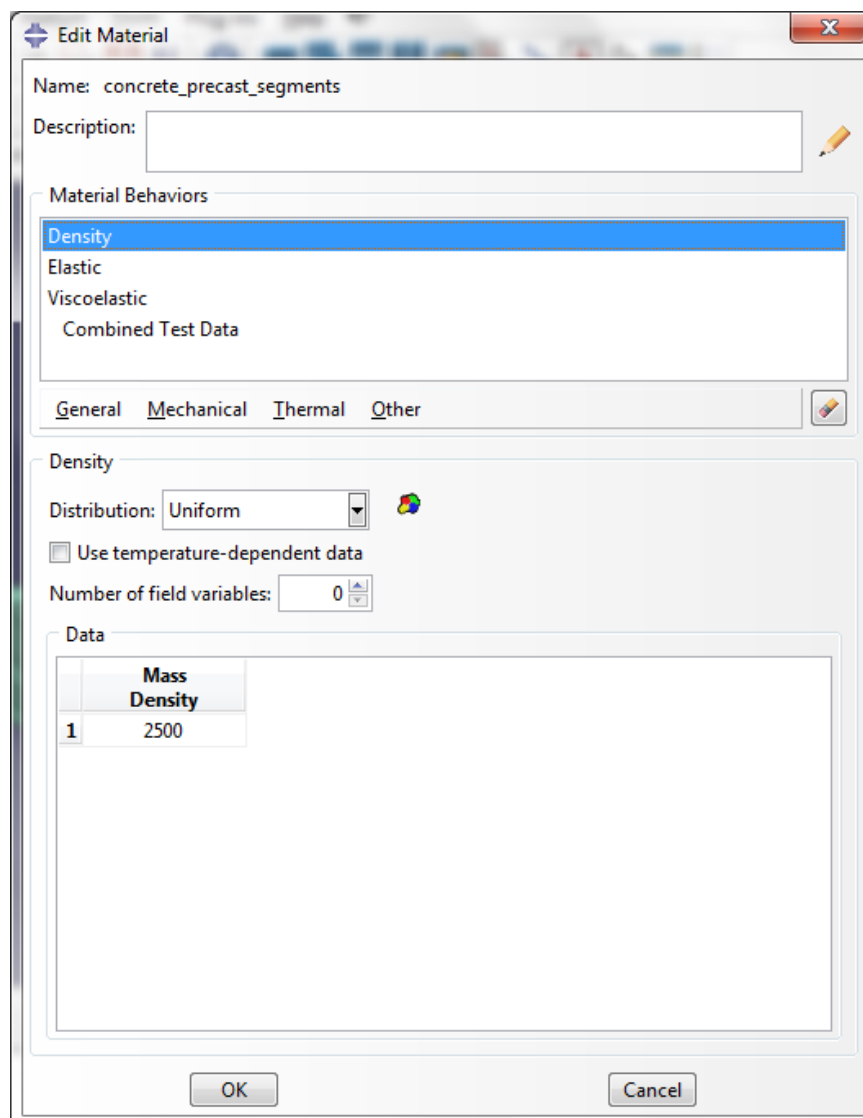
Σχήμα 4.14 γεωμετρία της πλάκας σκυροδέματος

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα μέρη της γέφυρας stress ribbon (parts) προσομοιώνονται στο Abaqus ως τρισδιάστατα (**3-D**), παραμορφώσιμα (**deformable**), συμπαγή στοιχεία. (**solid**)

4.2.2 MATERIALS (Καθορισμός του νόμου υλικού των επιμέρους μελών)

A) Σκυρόδεμα (τόσο των προκατασκευασμένων σπονδύλων όσο και της πλάκας)
[σχήμα 4.15]

- Πυκνότητα μάζας $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$
- Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή 28 ημερών $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας $E_{cm} = 38.5 \text{ GPa}$ (σταθερό για την ανάλυση που δεν περιλαμβάνει την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο)
- Λόγος του Poisson $\nu = 0.3$
- Viscoelastic , relaxation test data , combined test data για την ανάλυση του ερπυσμού

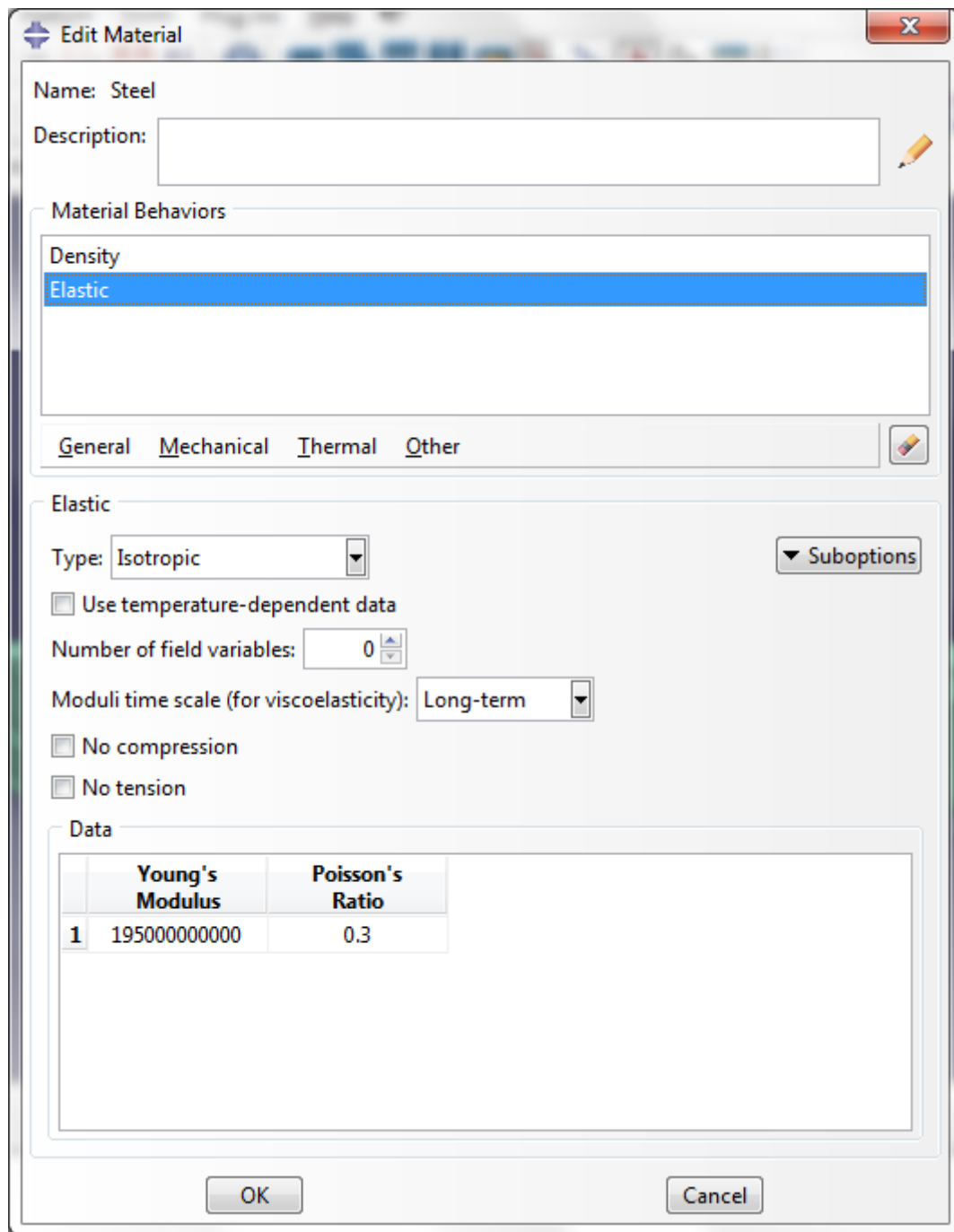


Σχήμα 4.15 Νόμος υλικού σκυροδέματος στο Abaqus

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Β) Χάλυβας (αφορά τόσο τους τένοντες προέντασης όσο και τα καλώδια ανάρτησης)
[σχήμα 4.16]

- $F_{pk}/f_{pu}=1700/1900$ MPa
- Πυκνότητα μάζας $\rho=7850$ kg/m³
- Μέτρο ελαστικότητας $E_s = 195$ GPa
- Λόγος του Poisson $\nu = 0.3$



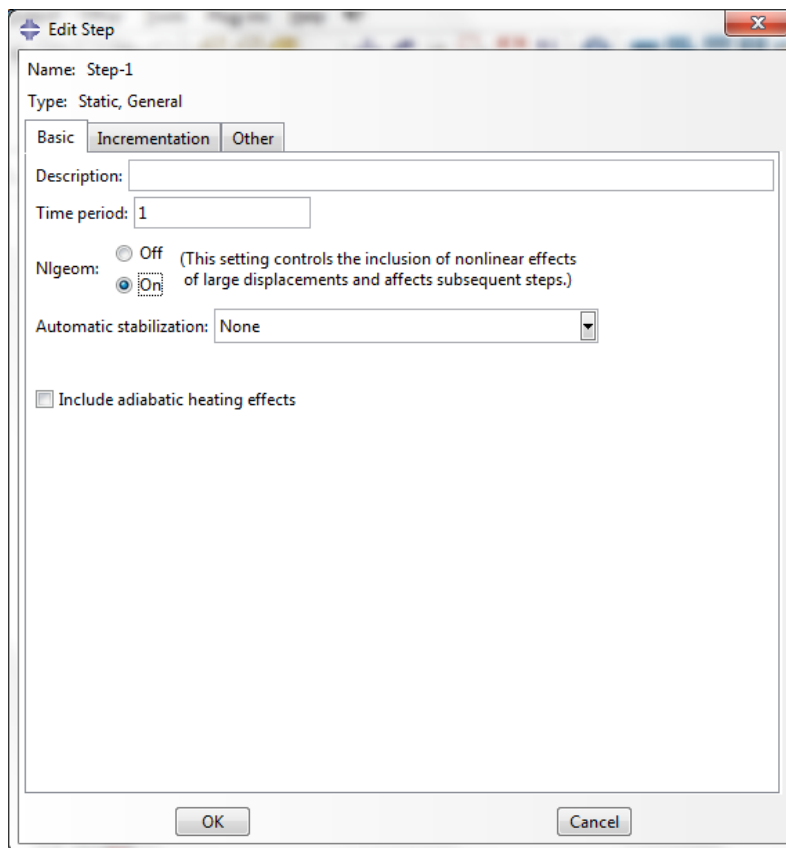
Σχήμα 4.16 Νόμος υλικού χάλυβα στο Abaqus

SECTIONS (Καθορισμός του είδους της διατομής των επιμέρους μελών)

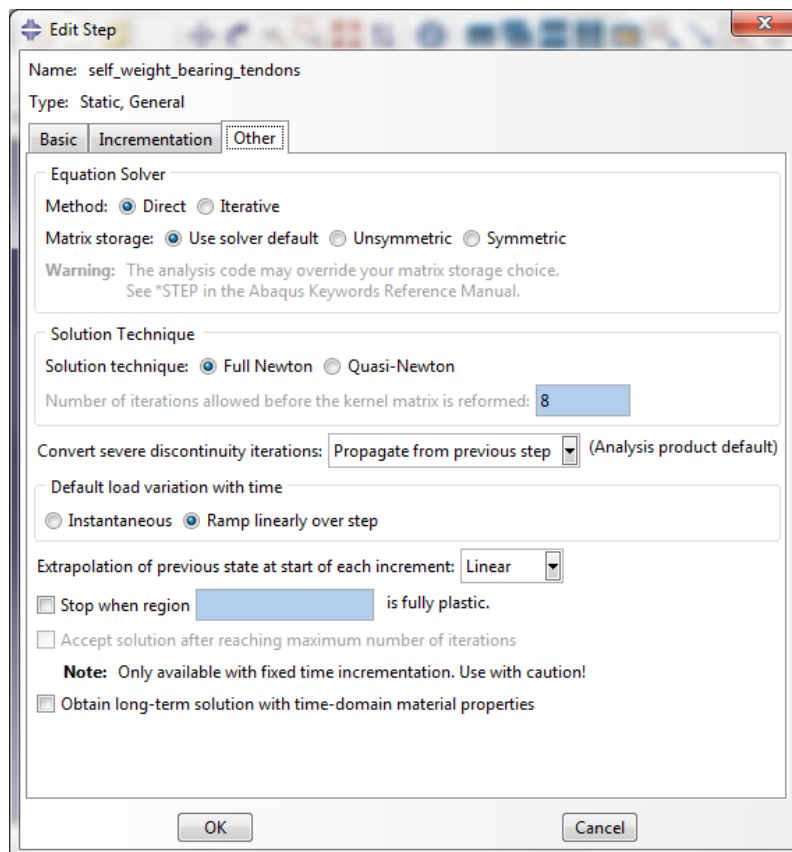
Στην τρισδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε όλα τα επιμέρους μέλη έχουν τις πραγματικές τους πεπερασμένες διαστάσεις με αποτέλεσμα η διατομή τους να προσομοιώνεται ως τρισδιάστατη και ομογενής (**solid , homogeneous**)

4.2.3 STEPS (Καθορισμός των βημάτων της ανάλυσης)

- **BHMA 1** : INITIAL(αρχικό) . Το βήμα αυτό υπάρχει πριν από κάθε άλλο βήμα στο Abaqus. Στο βήμα αυτό καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες , οι οποίες στη συνέχεια μεταβάλλονται ή μένουν αναλλοίωτες.
- **BHMA 2** : Ίδιο βάρος των ταινιοδιαδρόμων (self_weight_bearing_tendons). Στο βήμα αυτό τα καλώδια ανάρτησης δέχονται το φορτίο του βάρους τους. Είναι σημαντικό η επιλογή **Nlgeom** να είναι **On** , ώστε να ληφθεί υπόψη η ιδιαιτερότητα αυτού του είδους των γεφυρών. Πρόκειται για τη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων που απορρέει από τις μεγάλες μετατοπίσεις.[**σχήμα 4.17**] Στην περίπτωση που δε λαμβάνεται υπόψη ο ερπυσμός του σκυροδέματος και η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο η επιλογή **Time Period** τίθεται ίση με τη **μονάδα**. Σε ότι αφορά το maximum number of increments αυτό τίθεται μεγάλο ώστε να γίνουν οι απαιτούμενες επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση , ενώ το επαυξητικό βήμα (increment size) τίθεται μέσα σε κάποια όρια ελαχίστου –μεγίστου. Το ελάχιστο είναι μια μικρή τιμή , ενώ το μέγιστο ισούται το πολύ με την περίοδο. Τέλος σε ό,τι αφορά τη μέθοδο επίλυσης χρησιμοποιείται η απ' ευθείας (direct) και όχι η επαναληπτική (iterative) μέθοδος Full Newton [**σχήμα 4.18**]
- **BHMA 3** : Προένταση ταινιοδιαδρόμων ή αλλιώς καλωδίων ανάρτησης (prestressing_bearing_tendons). Στο βήμα αυτό ισχύουν όλα τα προηγούμενα του βήματος 2.
- **BHMA 4** : Ίδιο βάρος προκατασκευασμένων σπονδύλων και καλωδίου μετά την προένταση των ταινιοδιαδρόμων (self_weight_segments+cable). Στο βήμα αυτό ανεγείρονται οι προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι σκυροδέματος και φορτίζονται με πρόσθετο φορτίο το βάρος τους τα καλώδια ανάρτησης.
- **BHMA 5** : Ίδιο βάρος προκατασκευασμένων σπονδύλων και καλωδίου και σκυροδέματος δεύτερης φάσης (weight_of_cast_concrete+cable+segments). Στο βήμα αυτό τα φέροντα καλώδια ή ταινιοδιάδρομοι φορτίζονται επιπλέον με το βάρος της πλάκας από επιτόπου σκυρόδεμα.
- **BHMA 6** : Επίδραση ίδιου βάρους τενόντων προέντασης (weight_effect_prestressing_tendons).



Σχήμα 4.17 Επιλογή Nlgeom στο Abaqus



Σχήμα 4.18 Μέθοδος επίλυσης στο Abaqus

- **ΒΗΜΑ 7 :** προένταση των τενόντων προέντασης (prestressing of prestressing tendons). Στο βήμα αυτό , αφού το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή πραγματοποιείται η τάνυση των τενόντων προέντασης , ώστε η γέφυρα stress ribbon να πάρει την επιθυμητή γεωμετρία και να αποκτήσει την απαιτούμενη δυσκαμψία.
- **ΒΗΜΑ 8 :** Επιβολή κινητού φορτίου(live_load). Στο βήμα αυτό ισχύουν όλες οι προηγούμενες φορτίσεις με την προσθήκη του κινητού φορτίου στο σύμμικτο πλέον κατάστρωμα.

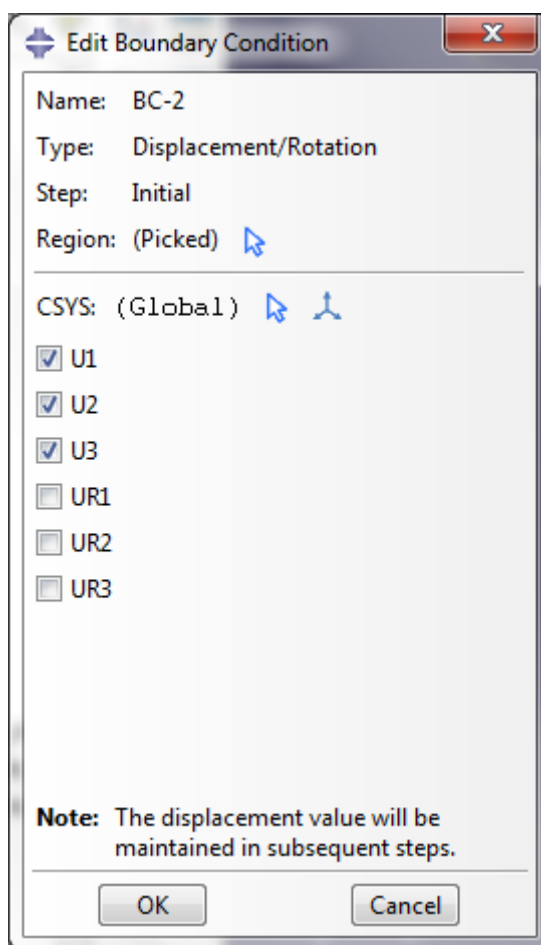
Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιούνται δύο διαφορετικές αναλύσεις στο τρισδιάστατο προσομοίωμα. Η πρώτη αφορά τη συμπεριφορά της γέφυρας χωρίς να ληφθεί υπόψη η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο και η δεύτερη αφορά τη μελέτη της επίδρασης της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας.

Αξίζει να σημειωθούν κάποιες δυσκολίες που προκύπτουν κατά την προσπάθεια προσομοίωσης της κατασκευαστικής ακολουθίας με τα βήματα της ανάλυσης που περιγράφηκαν προηγουμένως. Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης , στην προηγούμενη παραμορφωμένη γεωμετρία , των στοιχείων που ενεργοποιούνται σε μεταγενέστερο βήμα. Για παράδειγμα , είναι δύσκολο να ενεργοποιηθούν οι σπόνδυλοι στο βήμα 4 που φορτίζουν την κατασκευή και να ακολουθήσουν την παραμορφωμένη γεωμετρία του βήματος 3 , δηλαδή αυτή που προκύπτει μετά την προένταση των ταινιοδιαδρόμων. Έτσι αυτά τοποθετούνται από την αρχή. Η τοποθέτηση τους , όμως, από την αρχή μπορεί να μην προσθέτει φορτίο στην κατασκευή (καλώδια ανάρτησης), αφού αυτό ενεργοποιείται στο κατάλληλο βήμα (π.χ. βήμα 4) , συνεισφέρει όμως από την αρχή στη δυσκαμψία της κατασκευής (πέρα από τη δυσκαμψία που προσφέρουν τα καλώδια ανάρτησης) γεγονός που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα (τα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν από την αρχή). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα δισδιάστατο προσομοίωμα στο Abaqus , όπου τα διάφορα μέλη της κατασκευής (προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι , πλάκα σκυροδέματος δεύτερης φάσης πριν τη σκλήρυνση του) υπάρχουν όχι ως διατομές , αλλά ως φορτία στα καλώδια ανάρτησης. Η προσομοίωση αυτή ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα δεδομένου ότι στη φάση κατασκευής οι σπόνδυλοι είναι ασύνδετοι μεταξύ τους και δεν αναλαμβάνουν εντάσεις λόγω του μικρού τους μήκους και το σκυρόδεμα είναι νωπό. Αποτέλεσμα αυτού είναι απλώς να φορτίζουν την κατασκευή και να μη συνεισφέρουν στη δυσκαμψία. Από το δισδιάστατο αυτό προσομοίωμα προκύπτουν οι πραγματικές μετατοπίσεις με βάση την πραγματική δυσκαμψία (μόνο των καλωδίων). Οι μετατοπίσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του τρισδιάστατου μοντέλου. Και εδώ, όμως, εμφανίζεται μια δυσκολία που απορρέει από τη μη δυνατότητα ανάληψης φορτίων εγκάρσιων στον άξονα τους των στοιχείων δικτύωματος που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των καλωδίων με το Abaqus χωρίς να προηγηθεί μια τάνυση για την απόκτηση κάποιας δυσκαμψίας. Για το λόγο αυτό αναπτύσσεται και τρίτο τρισδιάστατο μοντέλο στο Abaqus που

περιλαμβάνει μόνο τα καλώδια ανάρτησης , ενώ τα υπόλοιπα μέλη φορτίζουν απλώς την κατασκευή και δε συνεισφέρουν στη συνολική δυσκαμψία της κατασκευής.

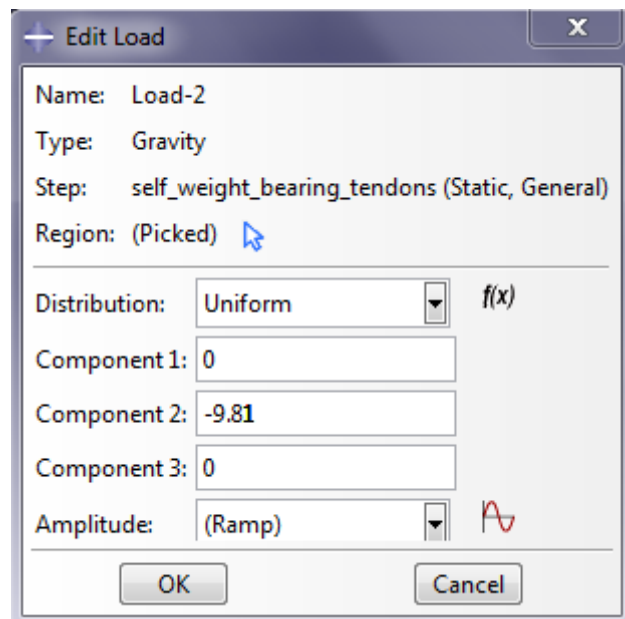
4.2.4 **LOADS και BOUNDARY CONDITIONS** (Καθορισμός των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών σε κάθε βήμα της ανάλυσης)

- **ΒΗΜΑ 1** : στο βήμα αυτό καθορίζονται μόνο οι συνοριακές συνθήκες. Πρόκειται για αρθρώσεις και στα δύο άκρα της γέφυρας, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.19**



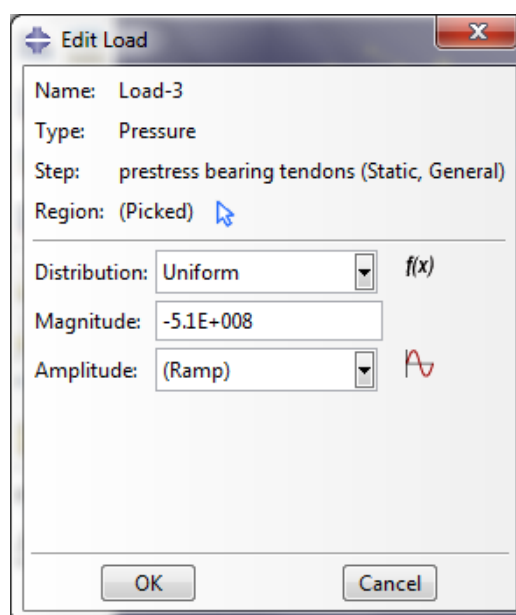
Σχήμα 4.19 Επιβολή συνοριακών συνθηκών άρθρωσης στο Abaqus

- **ΒΗΜΑ 2** : Στο βήμα αυτό τα καλώδια ανάρτησης αναλαμβάνουν το ίδιο βάρος τους. Στο Abaqus η δυνατότητα αυτή δίνεται μέσω της εντολής **GRAVITY** [σχήμα 4.20]. Η τιμή επιτάχυνσης της βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκε βαθμονομήθηκε με το τρισδιάστατο μοντέλο που περιλαμβάνει μόνο τα καλώδια. Σε ό,τι αφορά στις συνθήκες στήριξης αυτές συνεχίζουν να είναι αρθρώσεις.



Σχήμα 4.20 Φόρτιση ταινιοδιαδρόμων με το ίδιο βάρος τους στο Abaqus

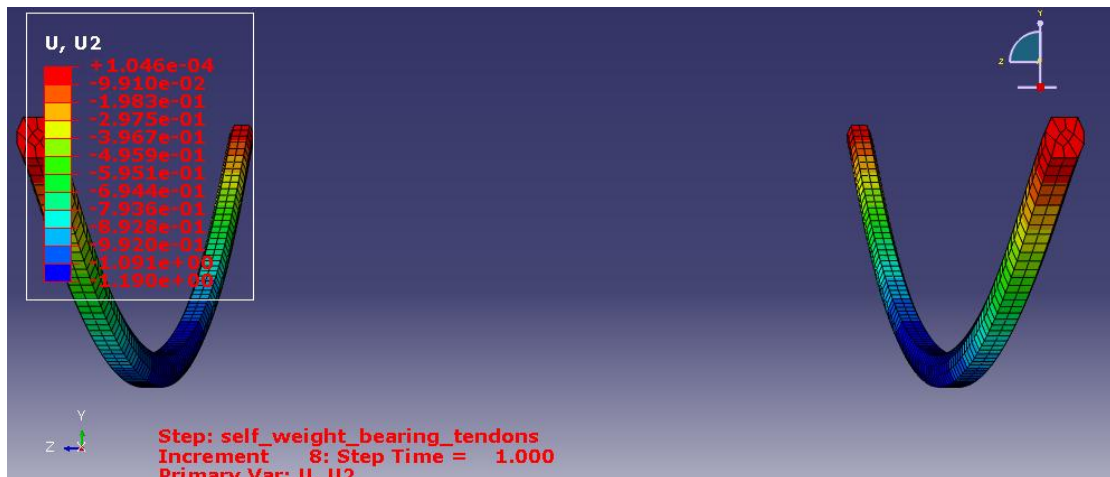
- ΒΗΜΑ 3 :** Στο βήμα αυτό το ίδιο βάρος των καλωδίων ανάρτησης συνεχίζει να ασκείται με την πραγματική τιμή του [σχήμα 4.20] , ενώ ταυτόχρονα επιβάλλεται σε αυτά μια δύναμη προέντασης. Η δύναμη προέντασης των ταινιοδιαδρόμων είναι γνωστή και προσδιορίζεται από τη σχέση που συνδέει το συνολικό μόνιμο φορτίο με την προδιαγεγραμμένη βύθιση . Η προένταση επιβάλλεται ως πίεση στα τρισδιάστατα στοιχεία των καλωδίων και ισούται με την τιμή $510 \text{ MPa} \sim 10 \text{ MN/ ταινιοδιάδρομο} (\sim 0.3 \cdot 1900 \text{ MPa})$ [σχήμα 4.21]. Όσον αφορά στις στηρίξεις , το ένα άκρο παραμένει ως άρθρωση , ενώ το δεύτερο μετατρέπεται σε κύλιση για να υπάρχει η δυνατότητα προέντασης στο άκρο αυτό.



Σχήμα 4.21 Επιβολή προέντασης με τη μορφή πίεσης στους ταινιοδιαδρόμους

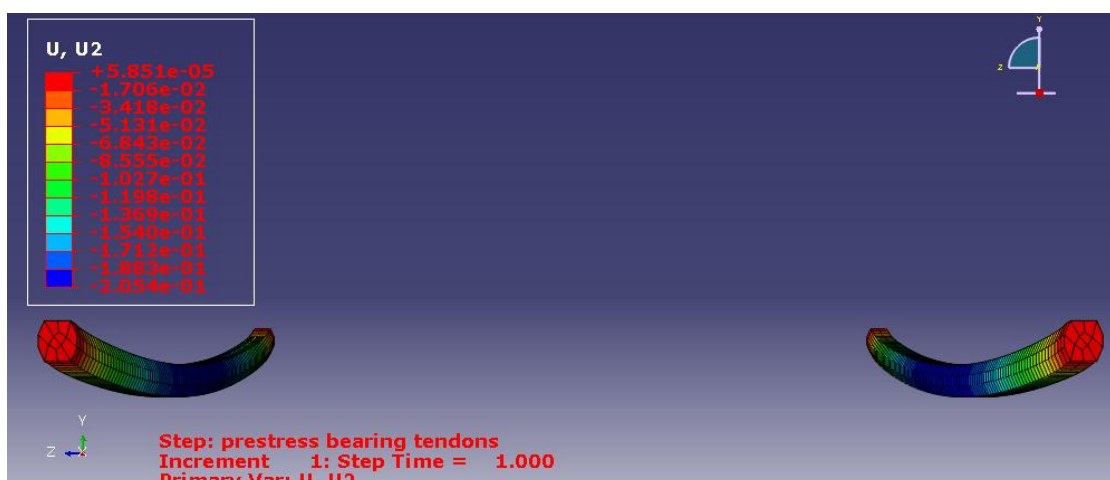
- **ΒΗΜΑ 4** : Στο βήμα αυτό τα καλώδια ανάρτησης φορτίζονται επιπλέον με το ίδιο βάρος των προκατασκευασμένων σπονδύλων. Οι προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι εμφανίζονται , στην πραγματικότητα , για πρώτη φορά στην κατασκευή στο βήμα αυτό. Εφαρμόζονται όμως στην παραμορφωμένη γεωμετρία του βήματος 3. Το γεγονός ότι ανεγείρονται σε πλήρες πλάτος , αλλά περιορισμένο μήκος με τη βοήθεια γερανού κάτω από τους ταινιοδιαδρόμους επιβάλλει τα στοιχεία αυτά να είναι άτονα. Τα στοιχεία αυτά δεν αναλαμβάνουν κανενός είδους ένταση , έχουν δηλαδή μηδενική δυσκαμψία. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόζεται στα καλώδια βαθμονομείται με βάση το δισδιάστατο μοντέλο. Σε ό,τι αφορά τη δύναμη προέντασης αυτή συνεχίζει να ασκείται στο βήμα αυτό , ενώ επιπλέον προστίθεται η βαρύτητα με την τιμή 9.81 m/s^2 στους προκατασκευασμένους σπονδύλους. Και σε αυτή την περίπτωση η εισαγωγή της βαρύτητας γίνεται με την εντολή **GRAVITY** , ενώ οι συνοριακές συνθήκες είναι κύλιση στο ένα άκρο κα άρθρωση στο άλλο.
- **ΒΗΜΑ 5** : στο βήμα αυτό επιβάλλεται το φορτίο του σκυροδέματος δεύτερης φάσης με τιμή 9.81 m/s^2 ταυτόχρονα με το ίδιο βάρος των προκατασκευασμένων σπονδύλων που έχει την ίδια τιμή. Το βάρος των καλωδίων βαθμονομείται με βάση το δισδιάστατο μοντέλο. Η προένταση των ταινιοδιαδρόμων συνεχίζει να ασκείται. Η γέφυρα έχει τις ίδιες συνθήκες στήριξης με προηγούμενως.
- **ΒΗΜΑ 6** : στο βήμα αυτό η μόνη διαφορά είναι η επίδραση του ιδίου βάρους των τενόντων προέντασης. Τα υπόλοιπα φορτία και οι συνθήκες στήριξης παραμένουν ίδια.
- **ΒΗΜΑ 7** : Στο βήμα αυτό επιβάλλεται η προένταση των τενόντων προέντασης , ώστε το κατάστρωμα να πάρει την επιθυμητή γεωμετρία σχεδιασμού. Η γεωμετρία αυτή καθορίζεται από το σχεδιαστή έτσι ώστε μετά την επιβολή των κινητών φορτίων η διαμήκης κλίση να μην υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή , δηλαδή 8% , και ταυτόχρονα το κατάστρωμα να έχει την απαιτούμενη δυσκαμψία. Γίνεται σαφές , λοιπόν , ότι η δύναμη προέντασης των τενόντων προέντασης προσδιορίζεται επαναληπτικά. Όλα τα φορτία παραμένουν ίδια με το προηγούμενο βήμα , καθώς επίσης και οι συνοριακές συνθήκες. Η τάση στους τένοντες προέντασης είναι τελικά 600 MPa.
- **ΒΗΜΑ 8** : Στο βήμα αυτό επιβάλλεται κινητό φορτίο 20 kN/m με τη μορφή πίεσης στο κατάστρωμα που ισούται με $20/5=4 \text{ kN/m}^2$.

4.2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
4.2.5.1 ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ

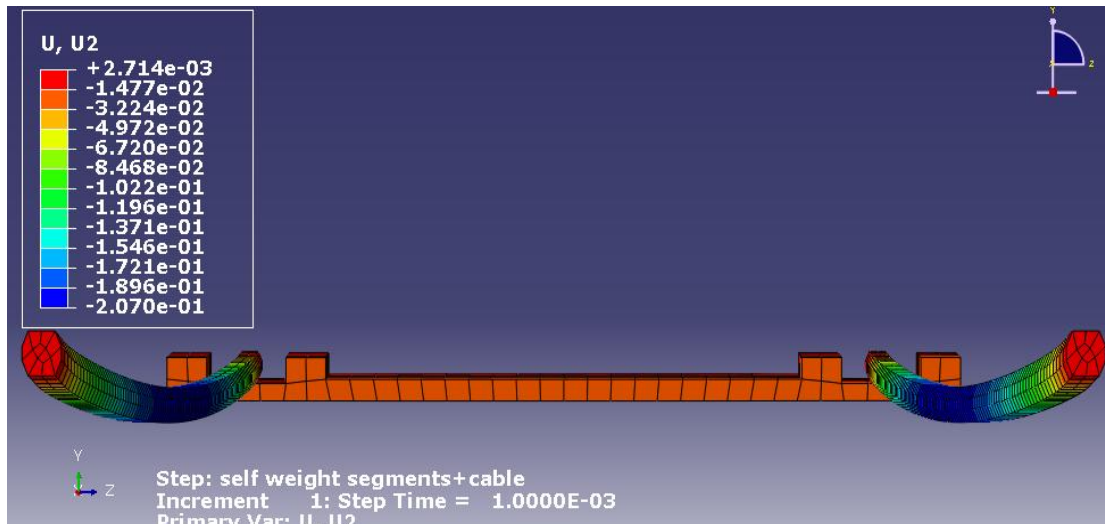


Σχήμα 4.22 Κατανομή κατά μήκος των καλωδίων των κατακόρυφων μετατοπίσεων που οφείλονται στο ίδιο βάρος τους

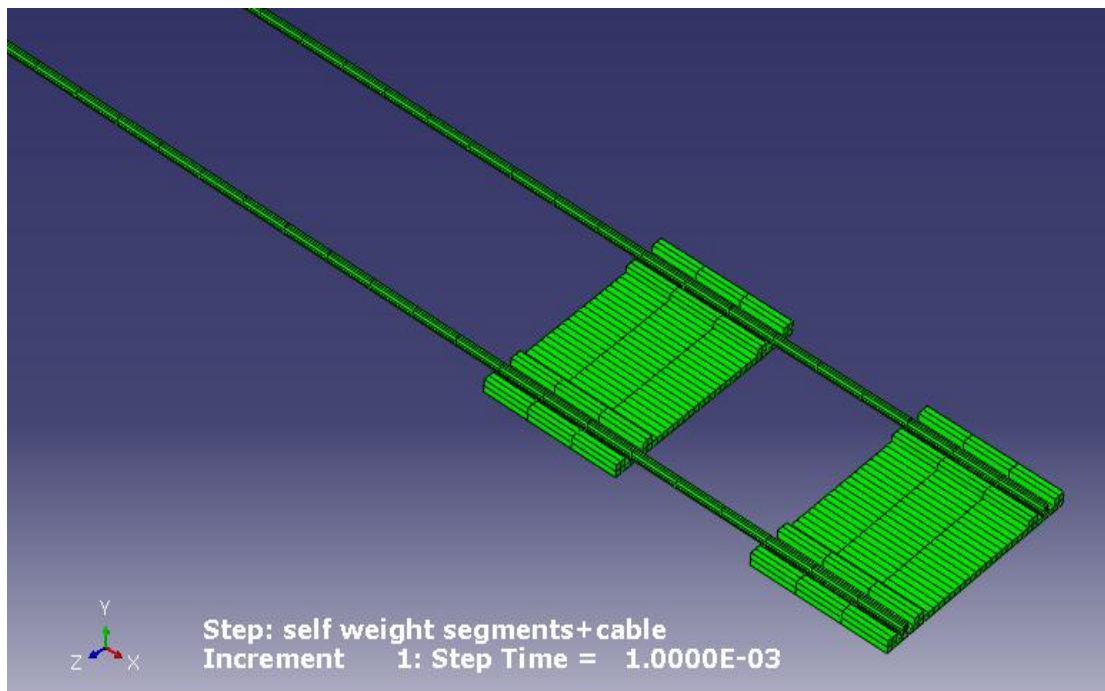
Στο **σχήμα 4.22** παρουσιάζεται η απόκριση σε όρους κατακόρυφων μετατοπίσεων των ταινιοδιαδρόμων , όταν αυτά φορτίζονται με το ίδιο βάρος τους. Παρατηρείται ότι λόγω του μεγάλου μήκους τους (**99 m**) η βύθιση στο μέσο του ανοίγματος είναι πολύ μεγάλη (**1.19 m**). Αυτός είναι και ο λόγος που απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων στις γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους και εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων ανάλυσης , όπως με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο **σχήμα 4.23** φαίνεται η επίδραση της προέντασης των ταινιοδιαδρόμων. Παρατηρείται , όπως είναι αναμενόμενο , μια ανύψωση σε σχέση με το προηγούμενο βήμα της κατασκευαστικής ακολουθίας , σε σχέση όμως με την αρχική οριζόντια θέση τους , τα καλώδια ανάρτησης εξακολουθούν να έχουν μία βύθιση.



Σχήμα 4.23 Κατανομή κατά μήκος των καλωδίων των κατακόρυφων μετατοπίσεων μετά την προένταση

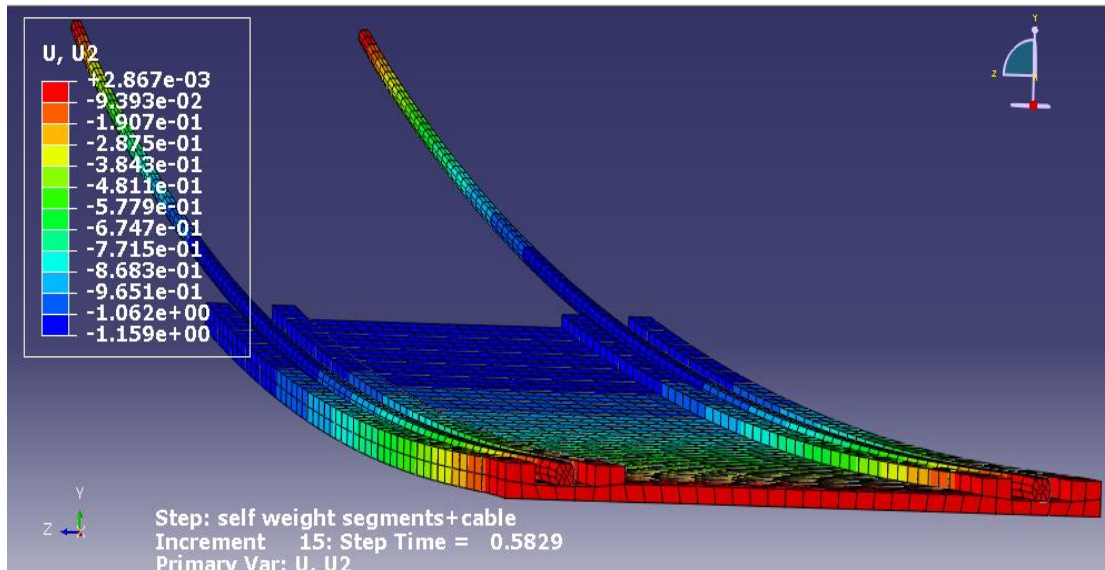


Σχήμα 4.24 Εικόνα παραμορφωμένου καλωδίου και ανέγερση πρώτου προκατασκευασμένου σπονδύλου (τομή κατά πλάτος)



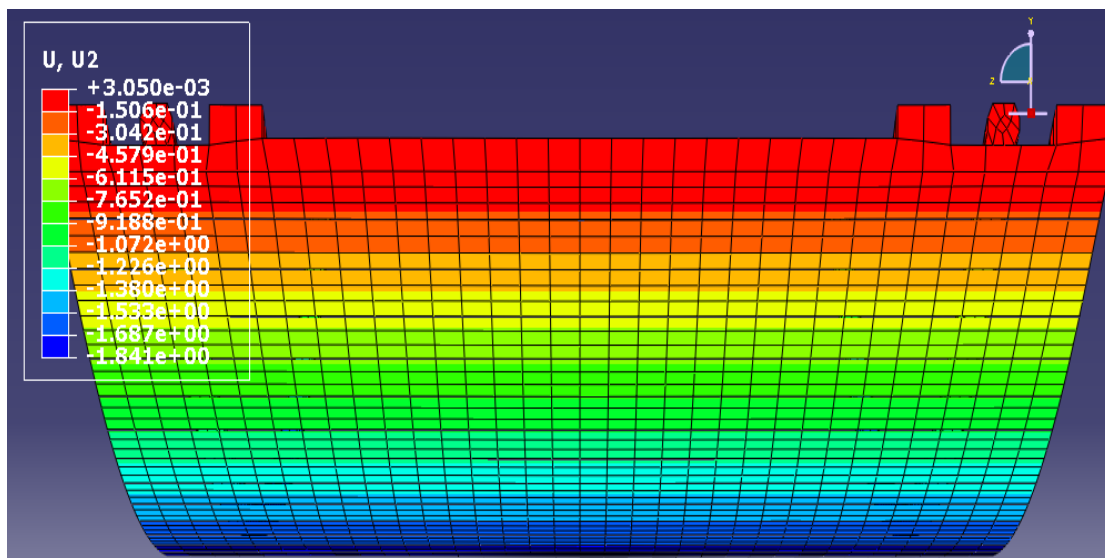
Σχήμα 4.25 Φάση ανέγερσης προκατασκευασμένων σπονδύλων

Το **σχήμα 4.24** αποτελεί την εικόνα του παραμορφωμένου καλωδίου, όπως έχει προκύψει μετά την επιβολή της προέντασης των ταινιοδιαδρόμων. Στην παραμορφωμένη αυτή εικόνα προσαρμίζονται ένας ένας οι προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι με τη βοήθεια γερανού. Το **σχήμα 4.25** δείχνει την πορεία της κατασκευαστικής ακολουθίας με την ανέγερση περισσότερων προκατασκευασμένων σπονδύλων.

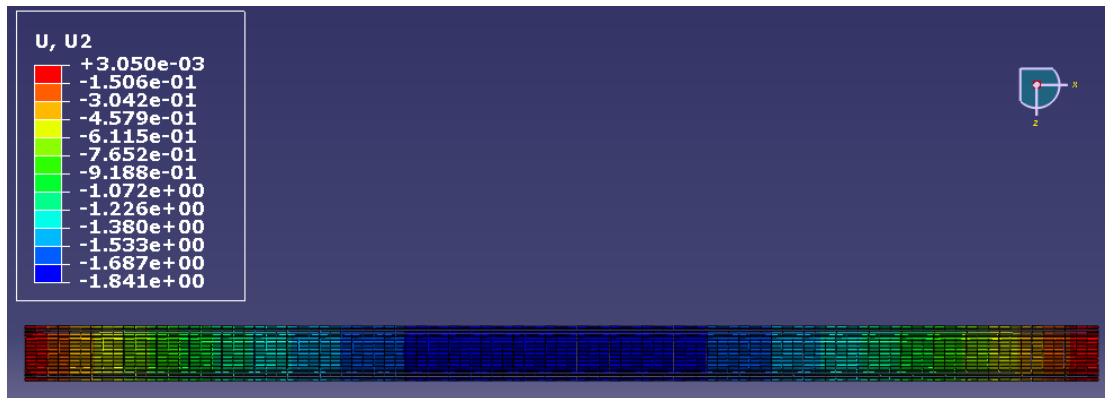


Σχήμα 4.26 Προοπτική εικόνα παραμορφωμένων καλωδίων με περισσότερους προκατασκευασμένους σπονδύλους στη φάση κατασκευής

Στο **σχήμα 4.26** παρουσιάζεται η κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια ανέγερσης των προκατασκευασμένων σπονδύλων , ενώ στα **σχήματα 4.27,4.28** η εικόνα της διατομής μετά την ανέγερση όλων των σπονδύλων.

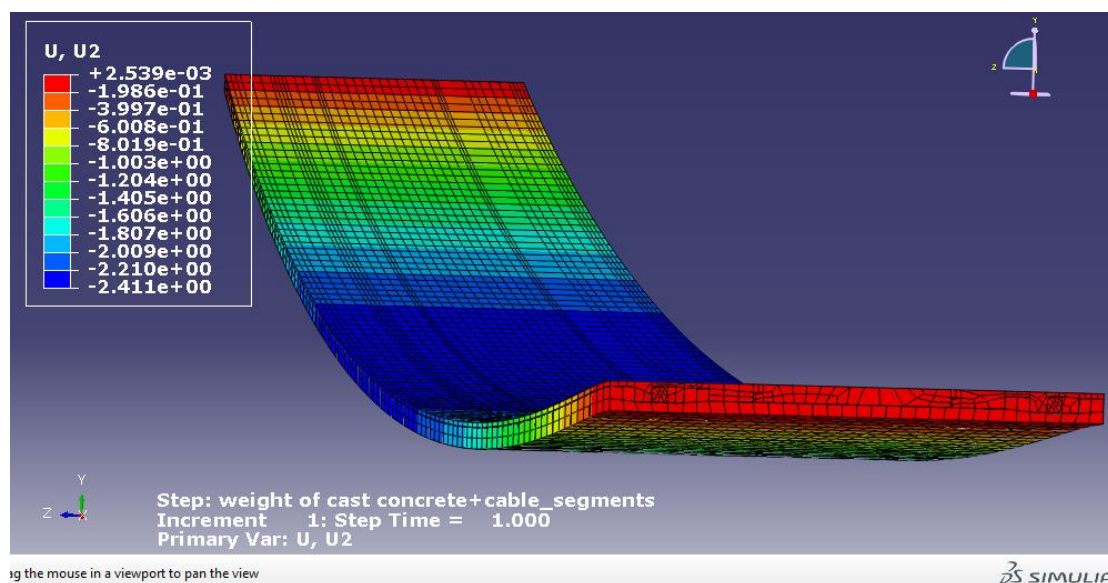


Σχήμα 4.27 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων μετά την πλήρη ανέγερση όλων των σπονδύλων

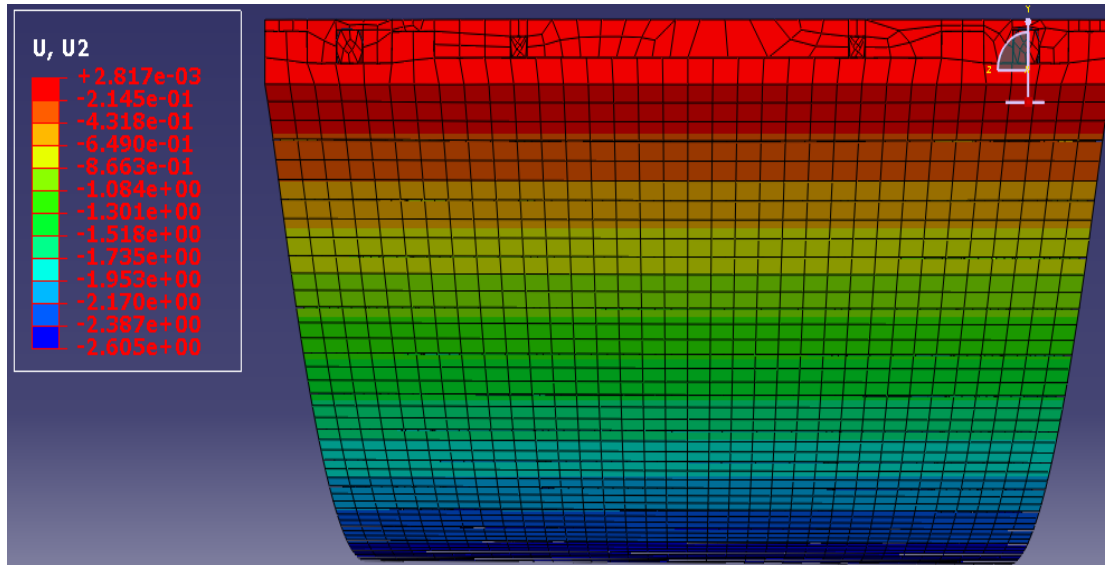


Σχήμα 4.28 Κάτοψη γέφυρας και κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων μετά την πλήρη ανέγερση όλων των προκατασκευασμένων σπονδύλων

Μετά την ανέγερση των προκατασκευασμένων σπονδύλων ακολουθεί η επιτόπου χύτευση του σκυροδέματος δεύτερης φάσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η περαιτέρω αύξηση της βύθισης της μεσαίας διατομής, που, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.29**, αγγίζει την τιμή των 2.41 m

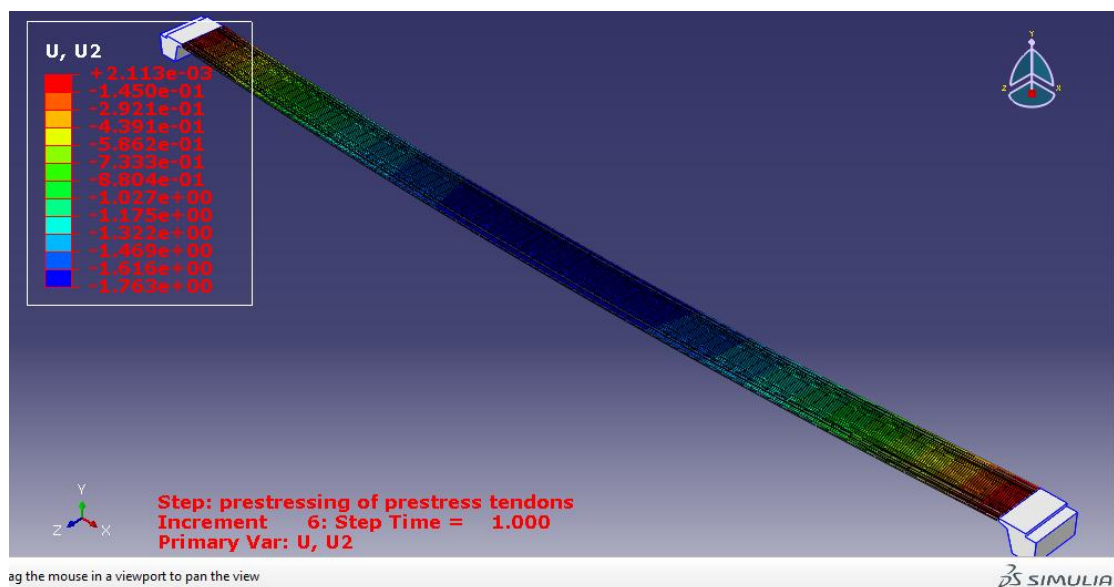


Σχήμα 4.29 Κατανομή της βύθισης μετά την επιτόπου χύτευση σκυροδέματος δεύτερης φάσης



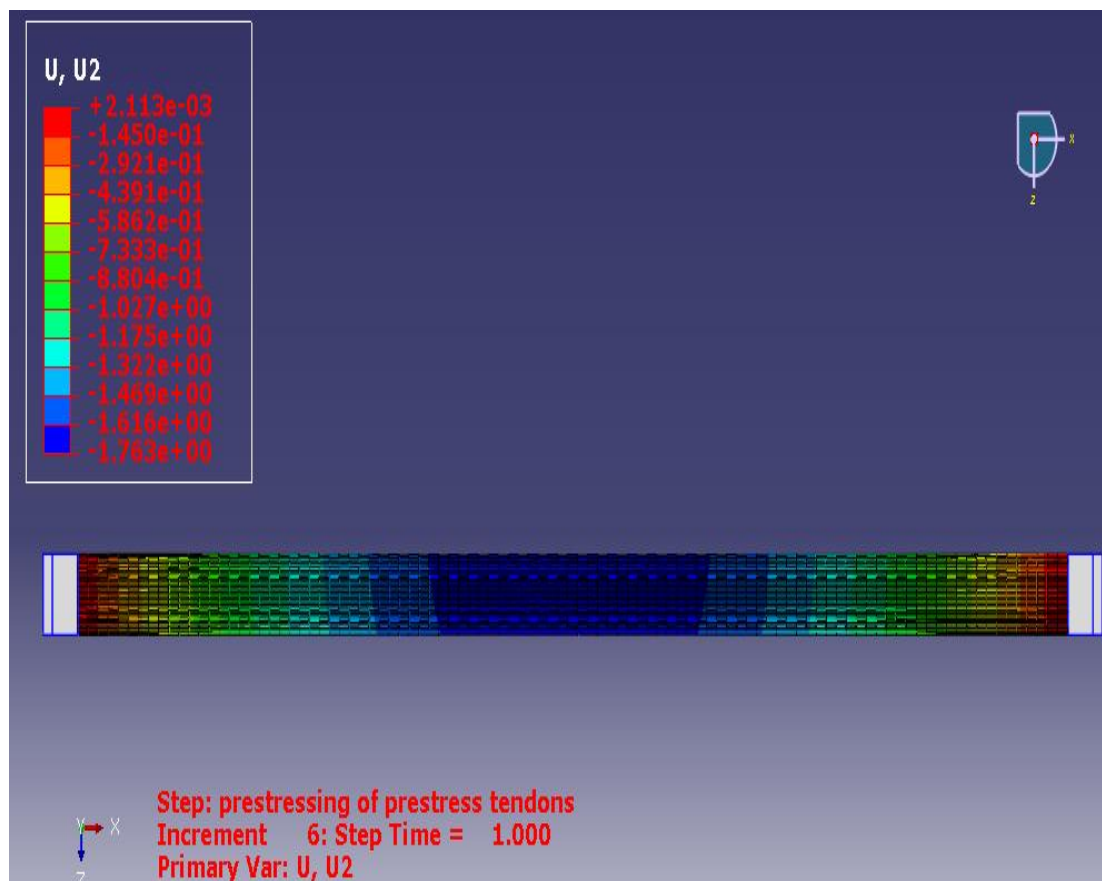
Σχήμα 4.30 Επίδραση του ίδιου βάρους των τενόντων προέντασης

Στο **σχήμα 4.30** φαίνεται η επίδραση του ίδιου βάρους των τενόντων προέντασης, το οποίο δεν είναι αμελητέο, λόγω του μεγάλου μήκους των τενόντων. Όπως αποτυπώνεται στην παραπάνω εικόνα η βύθιση στη μεσαία διατομή είναι τώρα **2.605 m** έναντι 2.411 m στο προηγούμενο βήμα. Παρατηρείται δηλαδή μια επιπλέον κατακόρυφη μετατόπιση των **19.4 cm**. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η βύθιση που αναμενόταν ήταν περίπου 2.5 m, αφού αυτή καθόρισε τη δύναμη προέντασης των ταινιοδιαδρόμων. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι για τον υπολογισμό της οριζόντιας δύναμης δεν ελήφθη υπόψη το ίδιο βάρος των τενόντων προέντασης.



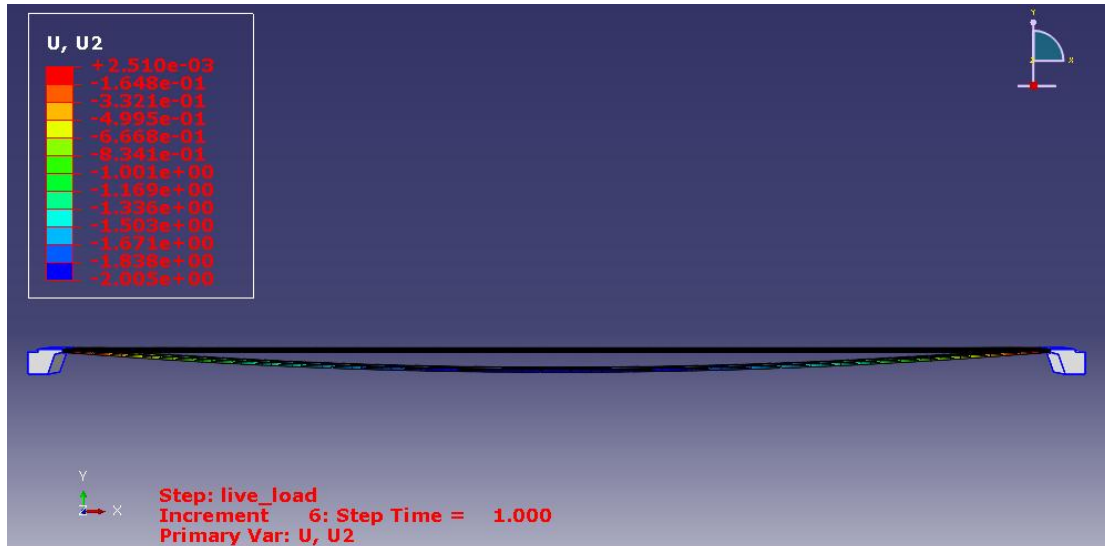
Σχήμα 4.31 εικόνα κατακόρυφων μετατοπίσεων stress ribbon μετά την προένταση των τενόντων προέντασης

Στο **σχήμα 4.31** φαίνεται η ανύψωση από την προηγούμενη παραμορφωμένη κατάσταση. Μετά την προένταση των τενόντων προέντασης με τη δεδομένη δύναμη που εξασφαλίζει την απαιτούμενη δυσκαμψία, αλλά και την απαίτηση μετά την επιβολή των πρόσθετων φορτίων η διαμήκης κλίση να μην υπερβαίνει τη μέγιστη, το βέλος κάμψης της μεσαίας διατομής βρίσκεται **1.763 m** κάτω από την αρχική ευθύγραμμη θέση των καλωδίων ανάρτησης.



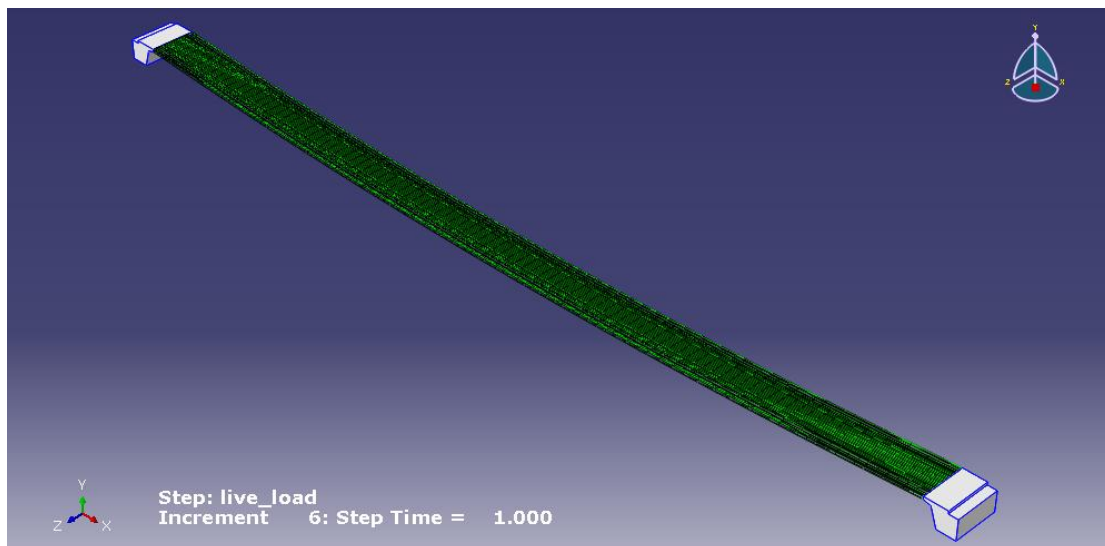
Σχήμα 4.32 Κάτοψη γέφυρας stress ribbon μετά την επιβολή της προέντασης των τενόντων προέντασης

Η κάτοψη της γέφυρας stress ribbon μαζί με τις τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων στο βήμα της επιβολής της προέντασης φαίνονται στο **σχήμα 4.32**. αξίζει να σημειωθεί ότι η ανύψωση μετά την επιβολή της προέντασης είναι περίπου 84 cm.

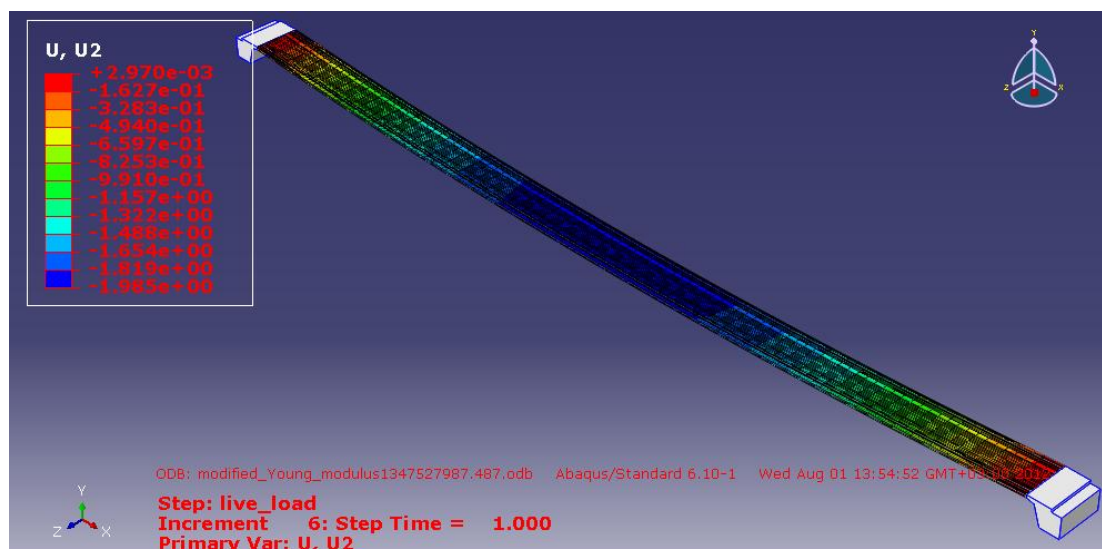


Σχήμα 4.33 Όψη γέφυρας stress ribbon μετά την επιβολή των πρόσθετων κινητών φορτίων συγκρινόμενη με την αρχική της μορφή

Στο **σχήμα 4.33** φαίνεται το τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Στο βήμα αυτό πρέπει η διαμήκης κλίση , ή με άλλα λόγια ο λόγος βύθισης μεσαίας διατομής προς το μήκος , να μην υπερβαίνουν μια μέγιστη τιμή. Στην εξεταζόμενη περίπτωση η μέγιστη βύθιση δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή $f=(1/50)*l=(1/50)*99=1.98$ m. Από το **σχήμα 4.33** παρατηρούμε ότι η βύθιση της μεσαίας διατομής είναι περίπου 2 m , το οποίο είναι μέσα στα όρια του επιτρεπτού. Τέλος , στο **σχήμα 4.34** παρουσιάζεται η ίδια κατάσταση σε προοπτικό.



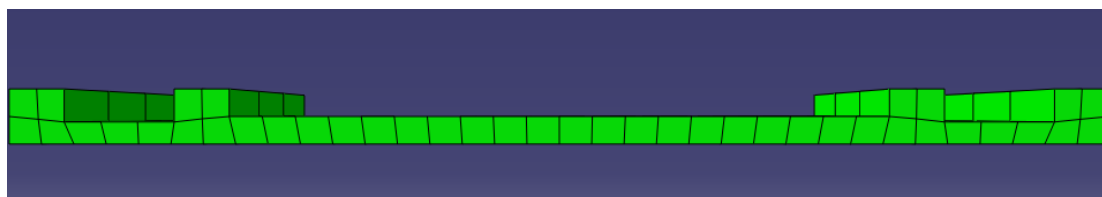
Σχήμα 4.34 Προοπτική εικόνα παραμορφωμένης γεωμετρίας γέφυρας stress ribbon



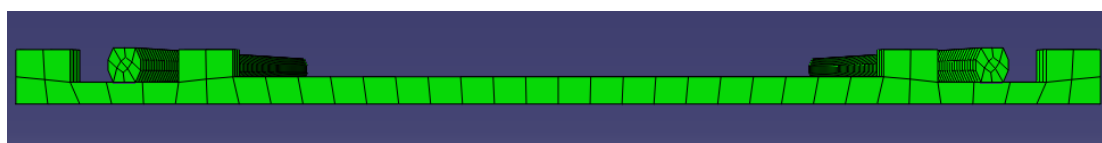
Σχήμα 4.35 Προοπτική εικόνα παραμορφωμένης γεωμετρίας γέφυρας stress ribbon μετά την επιβολή των κινητών φορτίων λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος

Από την ανάλυση της γέφυρας stress-ribbon που λαμβάνει υπόψη την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος με το χρόνο προκύπτει η εικόνα της μετατόπισης του **σχήματος 4.35**. Παρατηρείται μια μείωση της βύθισης κατά 2 cm της μεσαίας διατομής (1.98 m έναντι 2 m) σε σχέση με την ανάλυση χωρίς αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μετά την επιβολή των κινητών φορτίων (βραχυπρόθεσμη ανάλυση)

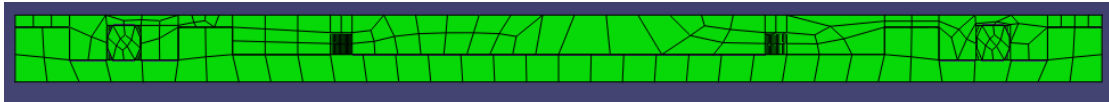
4.2.5.2 ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΟΣ ΚΑΝΑΒΟΣ ΣΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



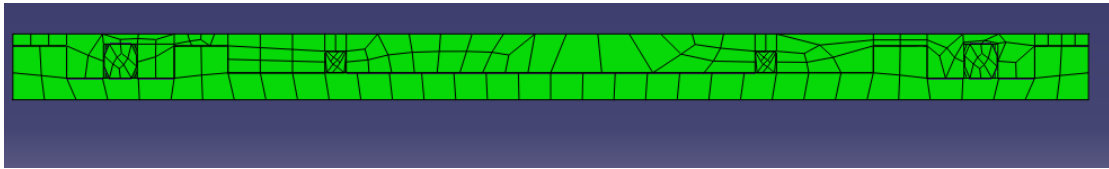
Σχήμα 4.36 Προκατασκευασμένος σπόνδυλος



Σχήμα 4.37 Προκατασκευασμένος σπόνδυλος και ταινιοδιάδρομοι

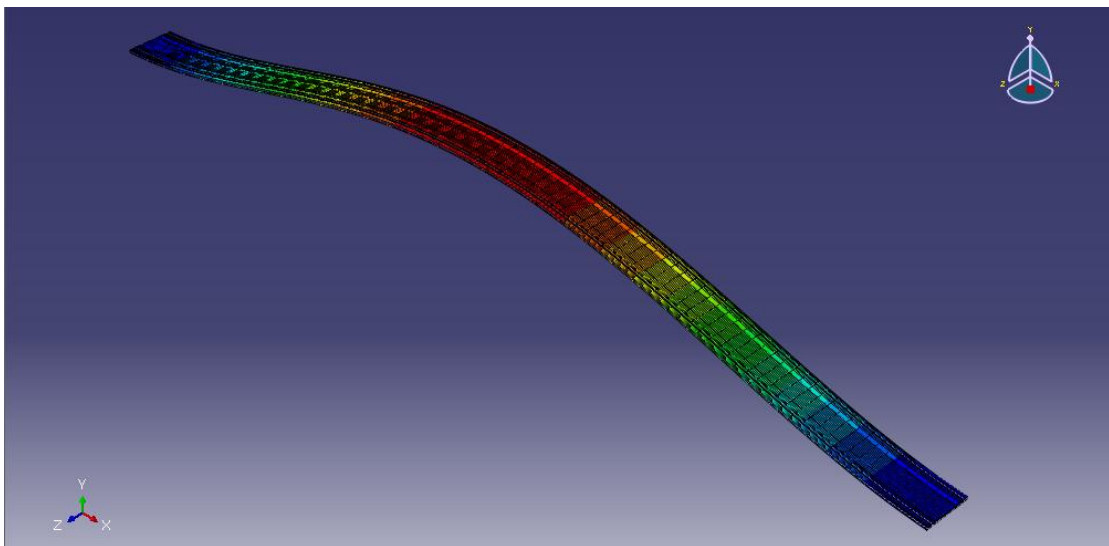


Σχήμα 4.38 Προκατασκευασμένος σπόνδυλος και ταινιοδιάδρομοι μαζί με την πλάκα από επιτόπου σκυρόδεμα

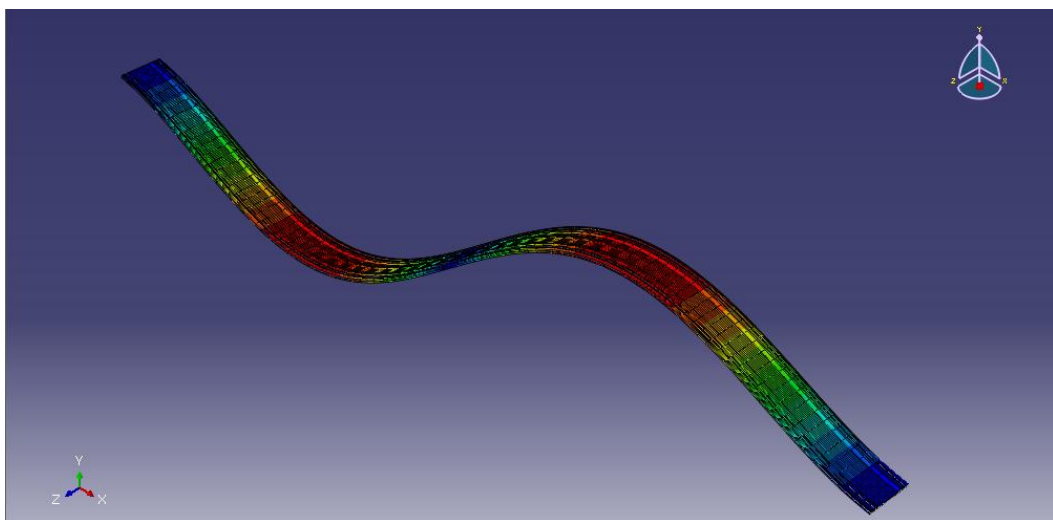


Σχήμα 4.39 Τελική μορφή διατομής με τους τένοντες προέντασης

4.2.5.3 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ



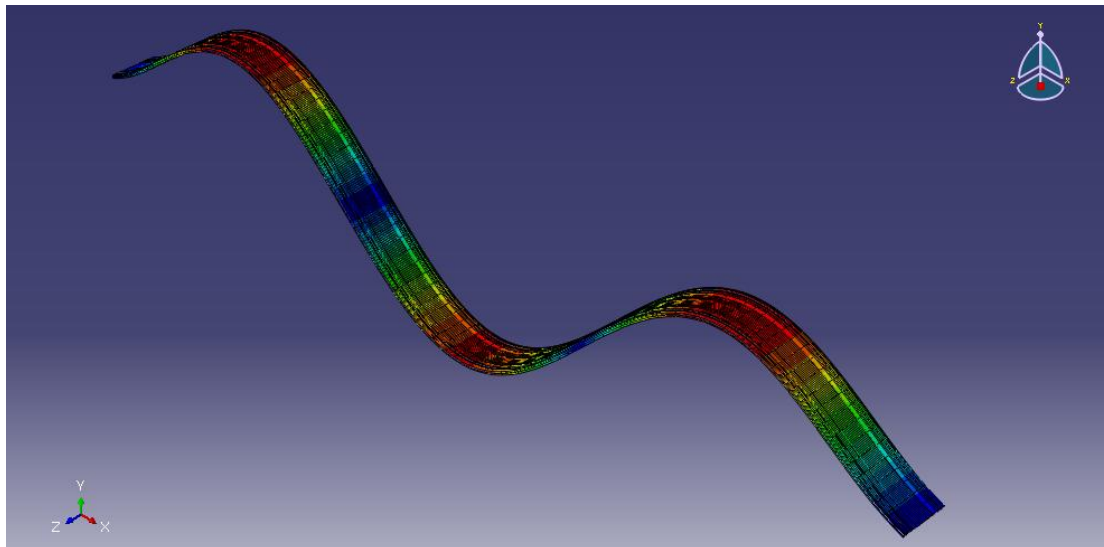
Σχήμα 4.40 1^η ιδιομορφή- κατακόρυφη



Σχήμα 4.41 2^η ιδιομορφή- κατακόρυφη

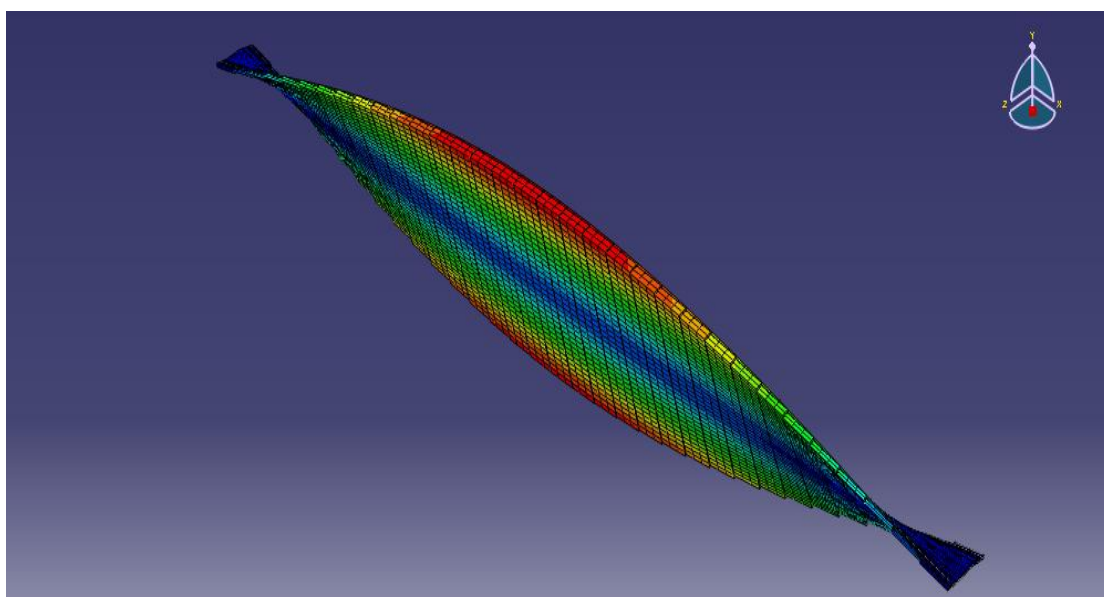
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.40** η πρώτη ιδιομορφή είναι κατακόρυφη και δεν έχει κανένα σημείο μηδενισμού με την οριζόντια γραμμή που ενώνει τα δύο άκρα, αντίθετα με τη δεύτερη που εμφανίζει ένα σημείο μηδενισμού με τον οριζόντιο άξονα. Και η δεύτερη ιδιομορφή είναι κατακόρυφη [**σχήμα 4.41**]



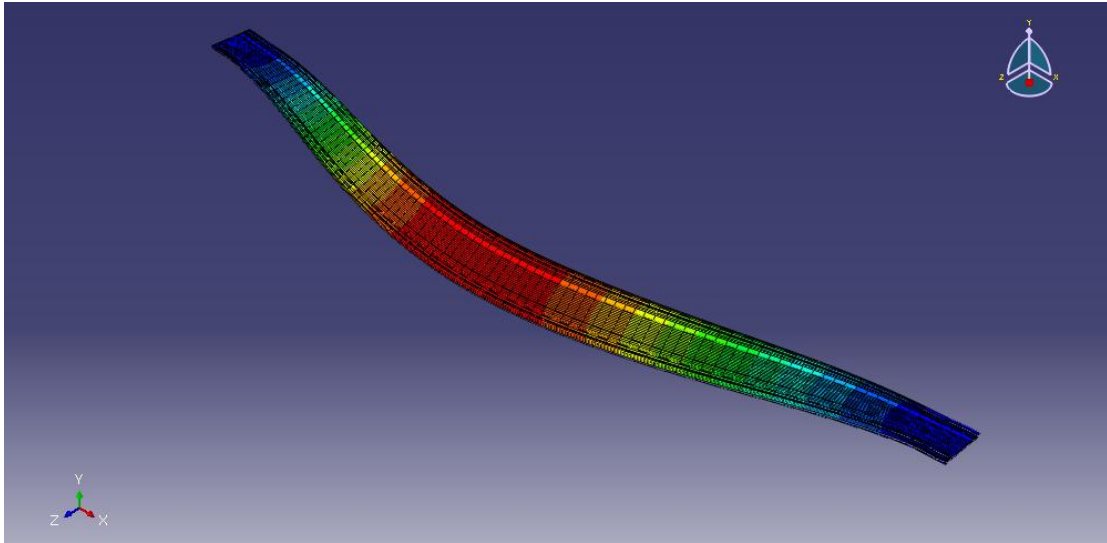
Σχήμα 4.42 3^η ιδιομορφή- κατακόρυφη

Στο **σχήμα 4.42** φαίνεται η 3^η ιδιομορφή που και αυτή είναι κατακόρυφη και έχει δύο σημεία μηδενισμού με την οριζόντια γραμμή.

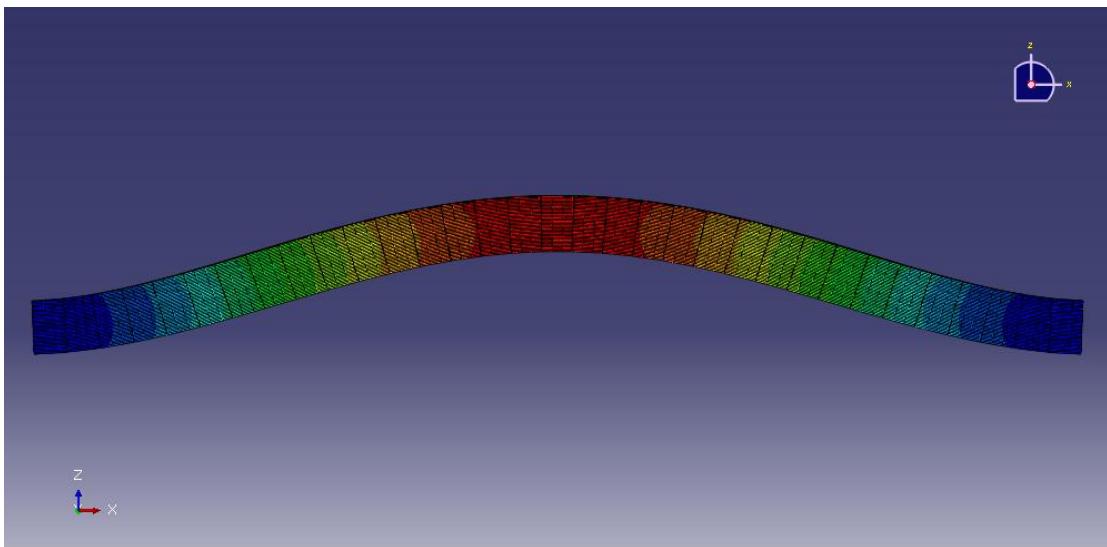


Σχήμα 4.43 9^η ιδιομορφή-1^η στρεπτική

Στο **σχήμα 4.43** παρουσιάζεται η πρώτη στρεπτική ιδιομορφή που είναι η 9 ιδιομορφή στη σειρά.



Σχήμα 4.44 6^η ιδιομορφή-1^η πλευρική



Σχήμα 4.45 6^η ιδιομορφή-1^η πλευρική(κάτοψη)

Στα **σχήματα 4.44 , 4.45** παρουσιάζεται η 1^η πλευρική ιδιομορφή σε προοπτική εικόνα και σε κάτοψη αντίστοιχα. Η ιδιομορφή αυτή εμφανίζεται 9 κατά σειρά.

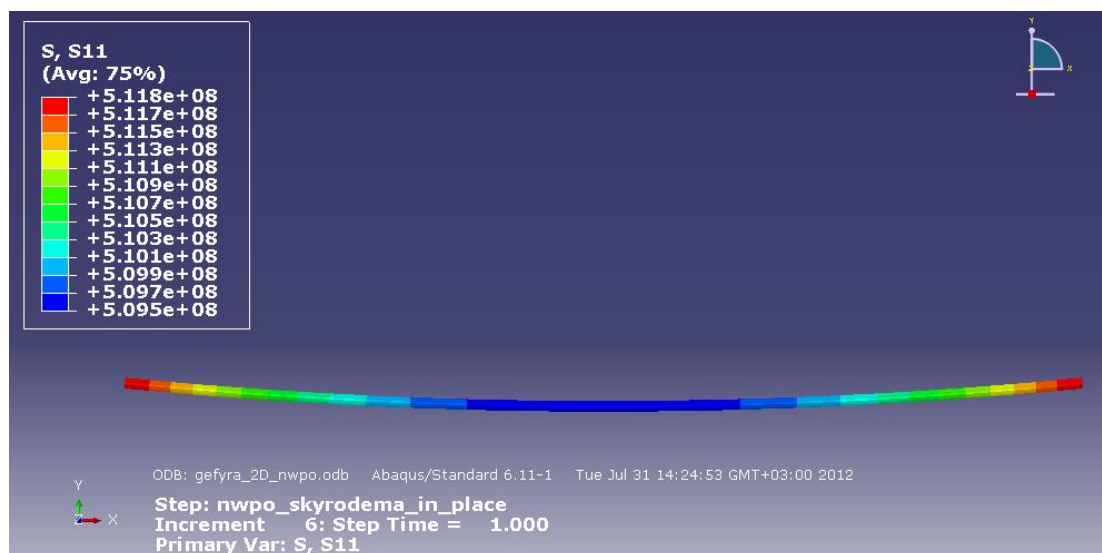
ΕΙΔΟΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ	ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
1 ^Η ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ	1	0.8733
2 ^Η ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ	2	0.9311
1 ^Η ΠΛΕΥΡΙΚΗ	6	1.5550
1 ^Η ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ	9	2.5450

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Παρατηρούμε ότι τόσο η πρώτη ιδιομορφή όσο και οι επόμενες (μέχρι την 8 ιδιομορφή) εμφανίζουν συχνότητες μικρότερες από 2-2.5 Hz (συχνότητες βαδίσματος και τρεξίματος αντίστοιχα). Ως εκ τούτου μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι αποκλείεται ο συντονισμός. Παρ' ότι η πρώτη στρεπτική ιδιομορφή εμφανίζει συχνότητα 2.545 Hz θεωρείται ότι δεν είναι ικανή να προκαλέσει συντονισμό, αφού εμφανίζεται 9 στη σειρά με μικρό συντελεστή ιδιομορφικής συμμετοχής.

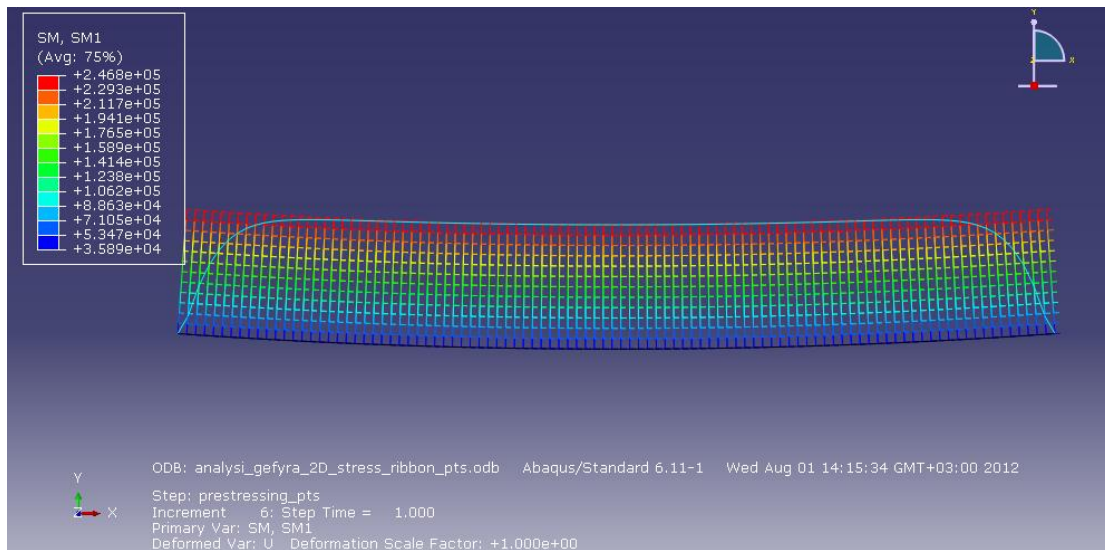
Συγκρίνοντας τις ιδιοσυχνότητες μεταξύ τους παρατηρούμε επίσης ότι ο λόγος μεταξύ της πρώτης πλευρικής (1.555 Hz) και της πρώτης καμπτικής (0.8733 Hz) είναι ίσος με 1.8 περίπου, ενώ ο λόγος μεταξύ της πρώτης στρεπτικής και της πρώτης καμπτικής είναι ίσος με $2.545/0.8733=2.9 > 2.5$ μέσα στα όρια του επιτρεπτού.

4.2.5.4 ΤΑΣΕΙΣ-ΕΝΤΑΣΕΙΣ



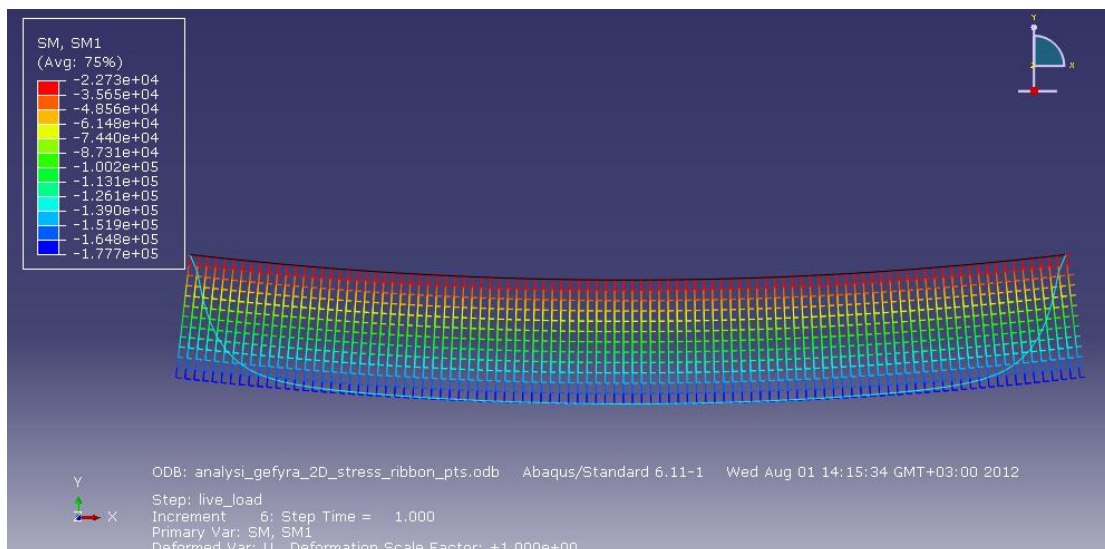
Σχήμα 4.46 Κατανομή τάσεων κατά μήκος του ταινιοδιαδρόμου μετά την επιτόπου χύτευση σκυροδέματος-συμπεριφορά καλωδίου

Στο **σχήμα 4.46** φαίνεται η διαμήκης τάση στο καλώδιο ανάρτησης μετά την επιβολή του συνόλου των μονίμων φορτίων και της προέντασης των ταινιοδιαδρόμων. Παρατηρούμε ότι η τάση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 509.5 MPa και 511.8 MPa. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι το σκυρόδεμα είναι ακόμα νωπό και έτσι δεν έχει αποκατασταθεί η συνέχεια. Επομένως ο φορέας συνεχίζει να συμπεριφέρεται ως καλώδιο.



Σχήμα 4.47 Κατανομή καμπτικής ροπής κατά μήκος του φορέα μετά την επιβολή της προέντασης

Στο **σχήμα 4.47** παρουσιάζεται το διάγραμμα της καμπτικής ροπής κατά μήκος του φορέα μετά την επιβολή της προέντασης. Είναι εμφανές ότι η προένταση δημιουργεί αρνητικές ροπές στον αμφιέρειστο φορέα της τάξης των -250 kNm . Στην περίπτωση όμως επιβολής των κινητών φορτίων αργότερα οι ροπές αλλάζουν πρόσημο και η μέγιστη τιμή τους στο μέσο του ανοίγματος γίνεται περίπου 180 kNm .



Σχήμα 4.48 Κατανομή καμπτικής ροπής κατά μήκος του φορέα μετά την επιβολή των κινητών φορτίων

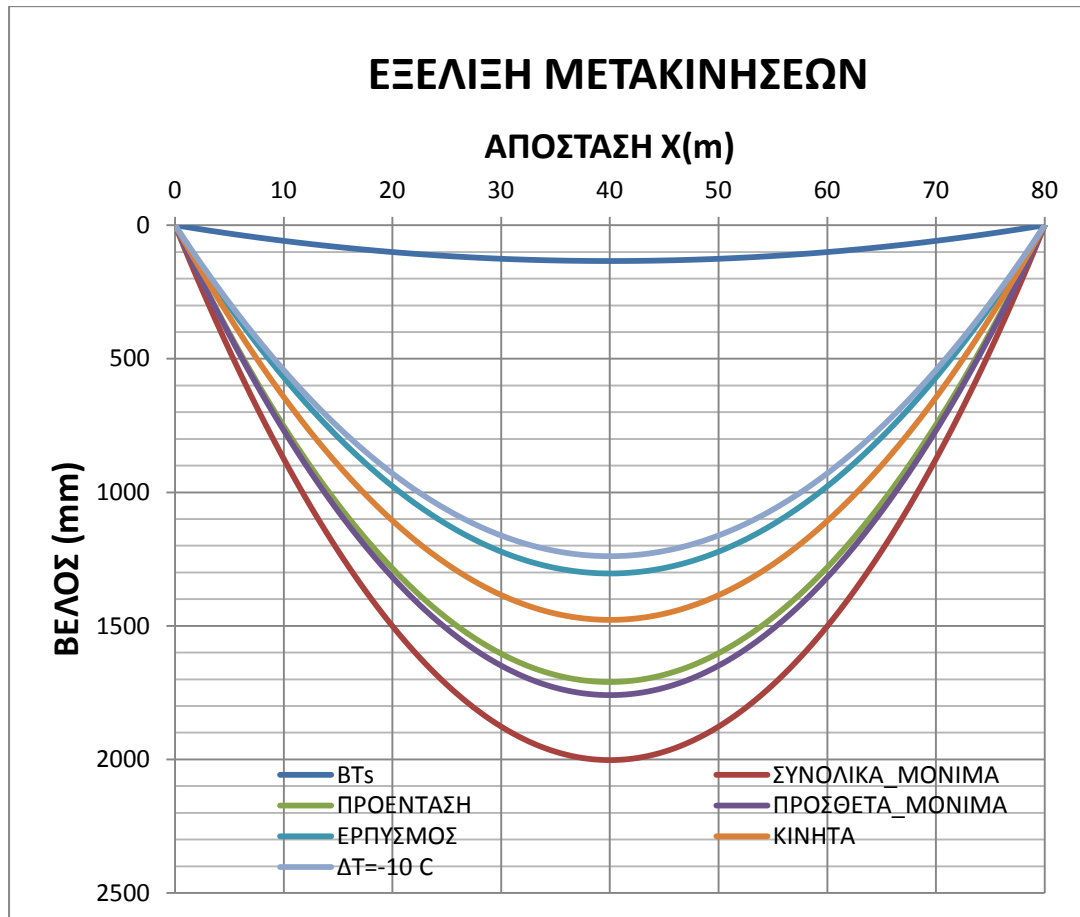
4.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ STRESS RIBBON ΜΕ ΤΟ SOFISTIK

4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται συνοπτικά το μοντέλο που προσομοιώνεται με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Sofistik. Πρόκειται για μια πεζογέφυρα ενός ανοίγματος και **συνολικού μήκους 80 m**, η οποία δεν έχει κατασκευαστεί ούτε μελετηθεί για να κατασκευαστεί. Στην πραγματικότητα η γέφυρα αυτή παρουσιάζεται στη δημοσίευση των Cobo Del Arco, Aparicio και Mari με τίτλο *‘Preliminary Design of prestressed concrete Stress Ribbon Bridge’* και όπως αναφέρεται σχετικά είναι βασισμένη στην κατασκευασμένη γέφυρα stress ribbon πάνω από τον ποταμό Sacramento στην Καλιφόρνια της Αμερικής. Η γέφυρα αυτή επιλέγεται να αναλυθεί με το λογισμικό Sofistik για να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τη βιβλιογραφία και να παρουσιαστούν με μεγαλύτερη πληρότητα από τις μέχρι τώρα αριθμητικές εφαρμογές. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στην ανάλυση αυτή είναι τα αποτελέσματα που αφορούν την εξέλιξη των μετακινήσεων, την εξέλιξη των καμπτικών ροπών κατά μήκος του φορέα αλλά και στο μέσο του ανοίγματος συγκεκριμένα, την εξέλιξη της αξονικής δύναμης του ταινιοδιαδρόμου, την εξέλιξη της οριζόντιας δύναμης στη στήριξη, την απόκριση της γέφυρας σε φορτία ανέμου σύμφωνα με το **EN 1991-1-4**, την απόκριση σε όρους ιδιομορφών και αντίστοιχων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής, τον υπολογισμό των τάσεων καθ' ύψος της μεσαίας διατομής, αλλά και σε όλο το μήκος της γέφυρας. Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, συνίσταται δηλαδή στη διακριτοποίηση του φορέα σε στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων, όπου επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις συμβιβαστού εντάσεων-μετακινήσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιείται η *‘μάσκα’* CSM-Construction Stage Manager στο Sofistik προκειμένου να γίνει η ανάλυση της κατασκευαστικής ακολουθίας. Η κατασκευαστική ακολουθία περιλαμβάνει στο παράδειγμα αυτό 1) την προένταση των ταινιοδιαδρόμων, 2) την επιβολή του βάρους των σπονδύλων-συνολικά μόνιμα, 3) τη σκλήρυνση του φορέα, 4) την επιβολή προέντασης στους τένοντες προέντασης, 5) την επιβολή πρόσθετων μόνιμων φορτίων από το πεζοδρόμιο και τα κιγκλιδώματα, 6) την επίδραση του ερπυσμού, 7) την επιβολή των κινητών φορτίων και 8) την επιβολή ομοιόμορφης πτώσης θερμοκρασίας κατά 10 C. Στα πρώτα δύο βήματα ο φορέας αποτελείται από 2 ισοδύναμα καλώδια στις άκρες της διατομής που απέχουν 4 m μεταξύ τους (**σχήμα 4.1**), προσομοιώνονται με την εντολή CABL στο Sofistik και διακριτοποιούνται ανά 1 m. Στο τρίτο βήμα και ύστερα προσαρμόζεται στα καλώδια η δοκός με άκαμπτες συνδέσεις. Η δοκός έχει τη γεωμετρία του **σχήματος 4.1** και διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής. Και αυτή διακριτοποιείται ανά 1 m. οι συνοριακές συνθήκες που επικρατούν σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης είναι αρθρώσεις. Το σκυρόδεμα είναι κατηγορίας **C35** με **E=35 GPa**, ενώ ο χάλυβας είναι κατηγορία; **1700/1900 MPa** με **E=200 GPa**.

4.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

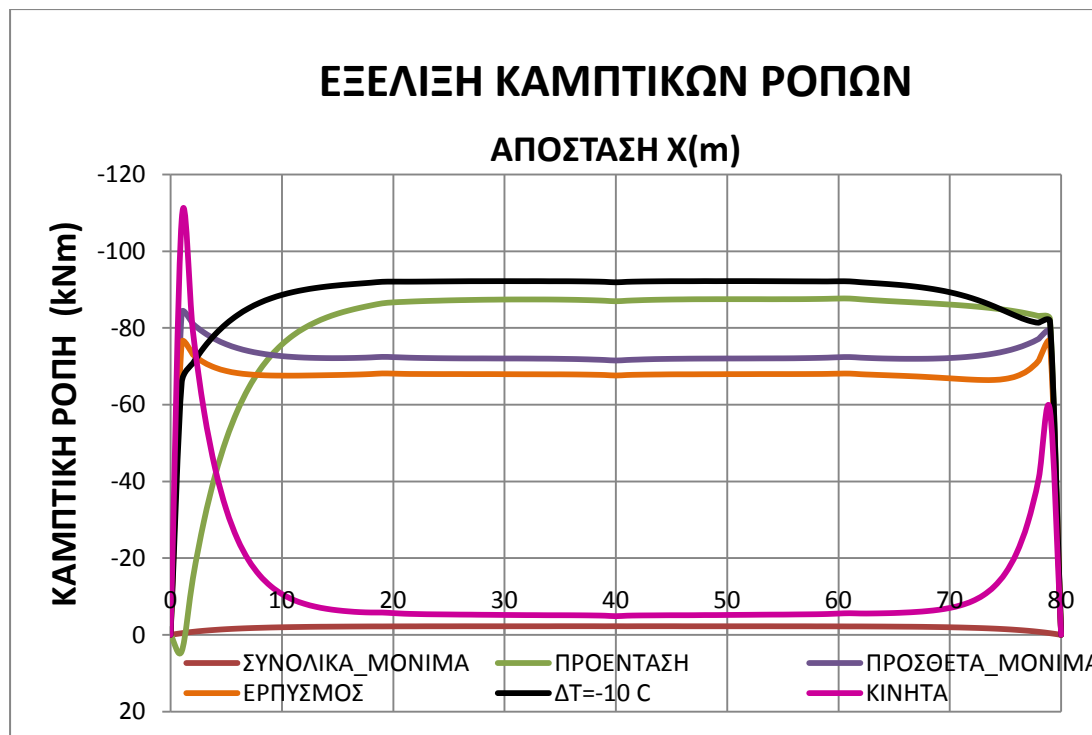
4.3.2.1 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ



Σχήμα 4.49 Εξέλιξη μετακινήσεων κατά μήκος του φορέα

Είναι εμφανές στο **σχήμα 4.49** ότι η συμπεριφορά των καλωδίων είναι μη γραμμική, αφού παρατηρούνται μετακινήσεις μέχρι και 2 m, στο μέσο του ανοίγματος μετά την επιβολή του συνόλου των μονίμων φορτίων. Παρατηρούμε επίσης ότι το βέλος στη μεσαία διατομή δεν υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή 1.6 m που αντιστοιχεί σε λόγο $f/l=1/50$ στην τελική φάση, δηλαδή με τα κινητά φορτία στη λειτουργία. Από το **σχήμα 4.49** γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο ερπυσμός οδηγεί σε μείωση του βέλους σε κάθε διατομή σε σχέση με την προηγούμενη κατάσταση, ο φορέας δηλαδή ανυψώνεται. Ο φορέας έχει ήδη ανυψωθεί προηγουμένως, όταν επιβάλλεται η προένταση των τενόντων προέντασης, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά με την πράσινη γραμμή στο παραπάνω διάγραμμα.

4.3.2.2 ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ



Σχήμα 4.50 Εξέλιξη καμπτικών ροπών κατά μήκος του φορέα



Σχήμα 4.51 Εξέλιξη ροπής μεσαίας διατομής στα βήματα της φόρτισης

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.50** και **4.51** η εγκάρσια καμπτική ροπή εμφανίζεται στο φορέα στο τρίτο βήμα , τη στιγμή δηλαδή που επιβάλλονται στο σκληρυμένο φορέα τα νεκρά φορτία από το βάρος των σπονδύλων και του σκυροδέματος δεύτερης φάσης , με μικρή όμως τιμή. Πρακτικά , μεγάλες ροπές δημιουργούνται στο φορέα από την προένταση των τενόντων προέντασης , που όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.50** ,

είναι και αρνητικές. Το πρόσημο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι πρόκειται για έναν αμφιέρειστο φορέα , όπου τα αντιφορτία από την προένταση αντιστρατεύονται την βαρύτητα. Η τιμή στο μέσο του ανοίγματος στην περίπτωση αυτή είναι περίπου -87 kNm. Συγκρίνοντας την τιμή αυτή με την τιμή που παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία , δηλαδή στη δημοσίευση των Cobo Del Arco , Aparicio και Antonio Mari , όπως επίσης και την τιμή στο 8 βήμα , δηλαδή μετά την επιβολή θερμοκρασιακής πτώσης 10 °C , όπου η ροπή είναι περίπου -92 kNm με την αντίστοιχη στη βιβλιογραφία προκύπτει ότι ο λόγος είναι σταθερός (87/113~76/92~0.8) με αποτέλεσμα να γίνεται η θεώρηση ότι η διαφορά οφείλεται στο είδος των συνοριακών συνθηκών. Οι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές ροπής που φαίνονται στα πρώτα και τελευταία m κατά μήκος της γέφυρας [σχήμα 4.50] οφείλονται σε θέματα της αριθμητικής επίλυσης , αφορούν το τσάκισμα των τενόντων προέντασης και μπορούν να μην λαμβάνονται υπόψη. Η επιβολή των πρόσθετων μόνιμων φορτίων από το πεζοδρόμιο και τα κιγκλιδώματα και ο ερπυσμός , δηλαδή τα βήματα 5 και 6 , δημιουργούν εφελκυστικά φορτία στην κατασκευή με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πρόσθετων θετικών ροπών που απομειώνουν τις αρνητικές ροπές , όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα σχήματα 4.50 και 4.51. Το ίδιο συμβαίνει και με το βήμα 7 , δηλαδή με την επιβολή των κινητών φορτίων , όπου τότε παρατηρούμε σχεδόν μηδενισμό των ροπών.

4.3.2.3 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ



Σχήμα 4.52 Εξέλιξη αξονικής δύναμης ταινιοδιαδρόμου

ΒΗΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Ncable,hing
1	ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΒTs	3160
2	ΝΕΚΡΑ_ΦΟΡΤΙΑ	5401.5
3	ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ	5400.6
4	ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΡTs	4908.4
5	ΠΡΟΣΘΕΤΑ_MONIMA	5001
6	ΕΡΠΥΣΜΟΣ	4849.4
7	ΚΙΝΗΤΑ	5116.4
8	ΔT=-10 C	4758.5

Πίνακας 4.1 Βήματα φόρτισης , περιγραφή και αξονική δύναμη στο καλώδιο

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.52** η αξονική δύναμη του καλωδίου στα βήματα 4-7 , δηλαδή από την επιβολή της προέντασης μέχρι την επιβολή των κινητών φορτίων στο φορέα , είναι περίπου σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι οι ταινιοδιάδρομοι αναλαμβάνουν τα εξωτερικά φορτία αναπτύσσοντας μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις και όχι με την ανάπτυξη έντασης. Οι μικροδιαφορές οφείλονται στην αλλαγή της γεωμετρίας των καλωδίων από τη φόρτιση. Η ένταση των ταινιοδιαδρόμων , όπως φαίνεται , καθορίζεται στα πρώτα βήματα , όπου αυτά λειτουργούν μόνα τους και αναλαμβάνουν το σύνολο του φορτίου δηλαδή πριν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος. Ο εφελκυσμός που προκύπτει από την προένταση τους επιτείνεται με την επιβολή των νεκρών φορτίων , γρήγορα όμως η τιμή αυτή μειώνεται με την επιβολή της προέντασης στους τένοντες προέντασης. Η μείωση αυτή οφείλεται στην θλίψη που κυριαρχεί στο φορέα μετά την προένταση και κατανέμεται στα διάφορα μέλη της διατομής ανάλογα με την ακαμψία τους. Αξίζει επίσης να σημειωθεί η επίδραση του ερπυσμού και της πτώσης θερμοκρασίας στη μείωση της αξονικής δύναμης του ταινιοδιαδρόμου , αφού και στις δύο περιπτώσεις ο ταινιοδιάδρομος μαζί με το φορέα συνολικά ανασηκώνονται και ο φορέας βραχύνεται [για την εικόνα του παραμορφωμένου φορέα και την επί αυτού αξονική δύναμη του ταινιοδιαδρόμου δες ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ]

4.3.2.4 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗ ΣΤΗΡΙΞΗ

ΒΗΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Hs,tot (kN)
1	ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΒTs	6320
2	ΝΕΚΡΑ_ΦΟΡΤΙΑ	10750
3	ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ	10750
4	ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΡTs	12628
5	ΠΡΟΣΘΕΤΑ_MONIMA	14952
6	ΕΡΠΥΣΜΟΣ	20184
7	ΚΙΝΗΤΑ	28570
8	ΔT=-10 C	21270

Πίνακας 4.2 Βήματα φόρτισης , περιγραφή και οριζόντια δύναμη στη στήριξη

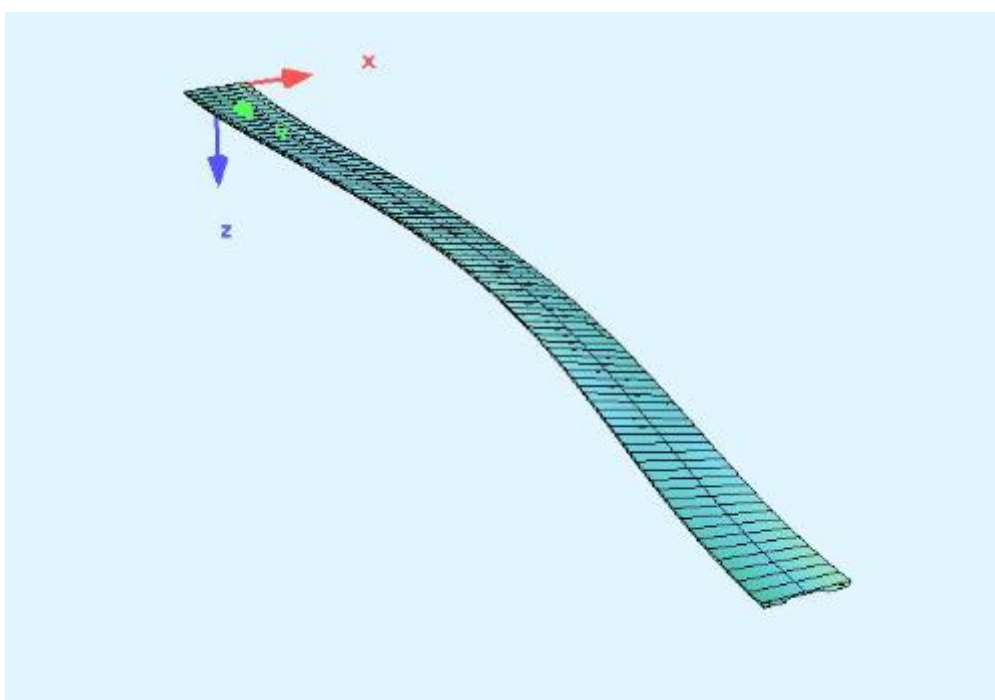


Σχήμα 4.53 Εξέλιξη οριζόντιας δύναμης στήριξης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέλιξη της οριζόντιας δύναμης στη στήριξη, όπως αποτυπώνεται στο **σχήμα 4.53**. Παρατηρείται στο σχήμα αυτό μια συνεχώς αυξανόμενη τιμή οριζόντιας δύναμης στη στήριξη από το πρώτο βήμα που αντιστοιχεί στην επιβολή της προέντασης στους ταινιοδιαδρόμους μέχρι την επιβολή των κινητών φορτίων. Η μόνη πτωτική κίνηση παρατηρείται στο 8 βήμα που αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη μείωση θερμοκρασίας κατά 10°C και οφείλεται στην αλλαγή προσήμου στην ένταση (από εφελκυσμό σε θλίψη). Αξίζει να σημειωθεί η τιμή της οριζόντιας δύναμης στη στήριξη μετά την επιβολή των νεκρών φορτίων. Η τιμή αυτή είναι 10750 kN και αντιστοιχεί στην επιθυμητή τιμή, όταν είναι γνωστό το σύνολο των νεκρών φορτίων και το επιθυμητό βέλος στην κατασκευή πριν την επιβολή της προέντασης. Η μικροδιαφορά σε σχέση με την τιμή των 10000 kN που αναφέρεται στη βιβλιογραφία οφείλεται στη μικροδιαφορά στη θεώρηση του ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου που ασκείται στην κατασκευή (25.875 kN/m αντί για 25 kN). Η προένταση παρ' ότι θλίβει το φορέα οδηγεί σε μείωση του βέλους που συνεπάγεται μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις στη στήριξη σε σχέση με την προηγούμενη κατάσταση (βήμα 4). Παρόμοιο είναι και το συμπέρασμα για τον ερπυσμό. Συγκρίνοντας την τιμή της οριζόντιας δύναμης στη στήριξη μετά την επιβολή της προέντασης των τενόντων προέντασης και την επιβολή των πρόσθετων μόνιμων φορτίων (14 952 kN) με την αντίστοιχη από τη βιβλιογραφία (14900 kN) παρατηρείται σχεδόν ταύτιση αποτελεσμάτων. Ομοίως και για το βήμα μετά τον ερπυσμό (20 184 kN έναντι 18 300 kN στη βιβλιογραφία). Οι μικροδιαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι οι τιμές στη βιβλιογραφία έχουν προκύψει αναλυτικά και είναι βασισμένες σε παραδοχές, ενώ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όλοι οι υπολογισμοί γίνονται αριθμητικά.

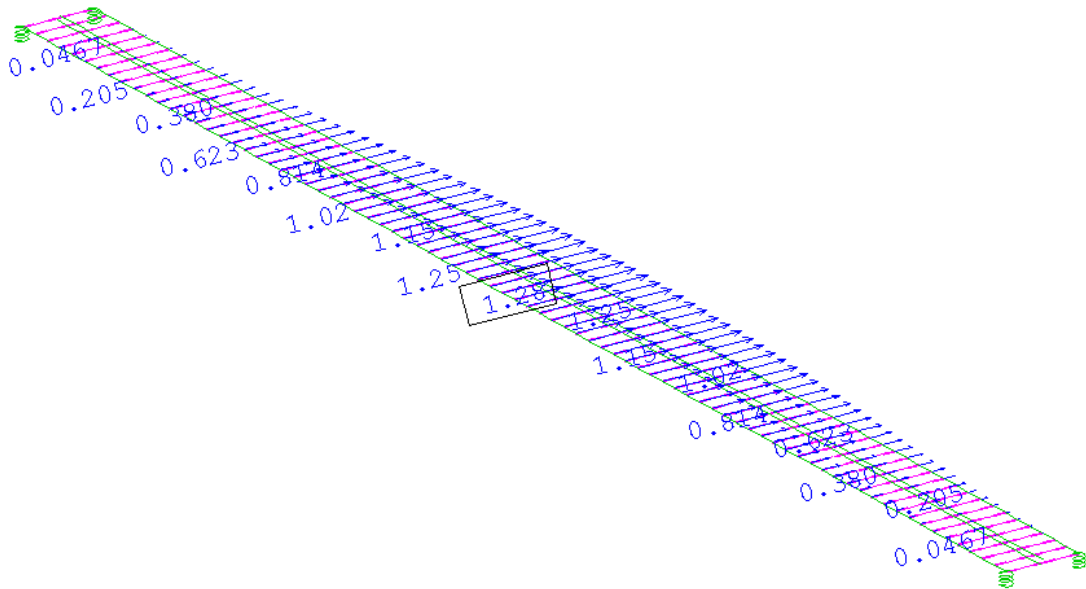
4.3.2.5 ΑΝΕΜΟΣ

Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα γέφυρας stress ribbon που εξετάζεται με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Sofistik γίνεται εφαρμογή πλευρικού φορτίου ανέμου σύμφωνα με το **EN 1991-1-4** για θεμελιώδη τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου 27 m/s , ύψος κατασκευής 1.25 m (λαμβάνοντας υπόψη κιγκλιδώματα ύψους 1.0 m και ύψος διατομής 0.25 m). Η περιοχή είναι κατηγορίας 1. Από τους υπολογισμούς προκύπτει πίεση ανέμου 0.90 kN/m^2 στο μεγαλύτερο μήκος της γέφυρας , δηλαδή στα 75 από τα 80 συνολικά m της γέφυρας. Λαμβάνεται υπόψη μια ομοιόμορφη πλευρική πίεση σε όλο το μήκος του καταστρώματος ίση με 1.0 kN/m^2 και τα αποτελέσματα της φόρτισης φαίνονται στα **σχήματα 4.54** και **4.55**.



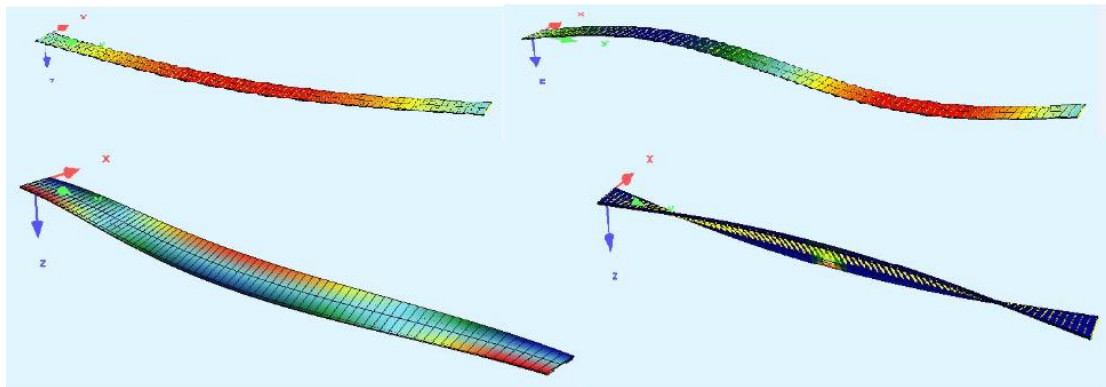
Σχήμα 4.54 Εικόνα φορέα που υπόκειται σε φορτίο ανέμου στο Sofistik

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.55** η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση συμβαίνει στη μεσαία διατομή και έχει την τιμή 1.28 mm. Η τιμή αυτή είναι αμελητέα και μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι δεν προκαλεί μεγάλες επιπτώσεις στην κατασκευή. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι ο άνεμος είναι ένα δυναμικό φαινόμενο , όμως στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται στατικά.



Σχήμα 4.55 οριζόντιες μετατοπίσεις φορέα stress ribbon σε πλευρικό φορτίο ανέμου

4.3.2.6 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ-ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ



Σχήμα 4.56 1^η, 2^η, 7^η, 9^η ιδιομορφή αντίστοιχα από αριστερά προς τα δεξιά

ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ	ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ
1	0.312	3.205
2	0.677	1.477
3	1.138	0.879
4	1.721	0.581
5	2.439	0.410
6	3.303	0.303
7	3.473	0.288
8	4.318	0.232
9	4.559	0.219

Πίνακας 4.3 9 πρώτες ιδιομορφές με τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Παρατηρούμε ότι μέχρι την 4^η ιδιομορφή η ιδιοσυχνότητα είναι μικρότερη από 2 Hz , ενώ μέχρι την 5^η η ιδιοσυχνότητα είναι μικρότερη από 2.5 Hz που είναι οι μέσες συχνότητες κατά το βάδισμα και το τρέξιμο αντίστοιχα. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι αν κάποια από τις ιδιομορφές αυτές είναι κυρίαρχη για διέγερση που οφείλεται στους πεζούς είναι σίγουρο ότι δε θα έχουμε συντονισμό. Δεν μπορούμε βέβαια να εξάγουμε άμεσο συμπέρασμα αν δε γνωρίζουμε το συντελεστή ιδιομορφικής συμμετοχής για τη συγκεκριμένη διέγερση. Από την ανάλυση προκύπτει επίσης αυτό που αναφέρεται στη βιβλιογραφία , ότι δηλαδή οι ιδιοσυχνότητες αυτής της κατασκευής είναι μικρές , συνήθως μικρότερες από 2-2.5 Hz παρά τις συστάσεις του κανονισμού για κατασκευή πεζογεφυρών με ιδιοσυχνότητες μεγαλύτερες από 3 Hz. Παρατηρούμε επιπλέον ότι ο λόγος της πρώτης στρεπτικής προς την πρώτη καμπτική είναι πολύ μεγαλύτερος από 2.5 , οπότε επιβεβαιώνεται ότι δεν υπάρχει κίνδυνος από τον άνεμο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Από τη δυναμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για κατακόρυφο και εγκάρσιο σεισμό σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ για κατηγορία εδάφους II , δηλαδή επιτάχυνση εδάφους 0.24 g προέκυψε ότι στον κατακόρυφο σεισμό ενεργοποιείται η πρώτη ιδιομορφή , που είναι και η πρώτη κατακόρυφη με ιδιοσυχνότητα 0.312 Hz , ιδιοπερίοδο 3.205 s και συντελεστή συμμετοχής 81.1% , ενώ στον εγκάρσιο κυρίαρχη ιδιομορφή είναι η 7^η , δηλαδή η πρώτη πλευρική με ιδιοσυχνότητα 3.473 Hz , ιδιοπερίοδο 0.288 s και συντελεστή συμμετοχής 68.9%.

4.3.2.7 ΤΑΣΕΙΣ

ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΔΟΚΟ (Mpa)					
ΒΗΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΝΩ ΙΝΑ	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΙΝΑ	ΚΑΤΩ ΙΝΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ
1	ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΒTs	-	-	-	-
2	ΝΕΚΡΑ ΦΟΡΤΙΑ	-	-	-	-
3	ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ	-	-	-	-
4	ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΡTs	-12.2	-13.4	-15.7	-14.0
5	ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΜΟΝΙΜΑ	-10.6	-11.5	-13.5	-12.1
6	ΕΡΠΥΣΜΟΣ	-2.26	-3.05	-4.64	-3.5
7	ΚΙΝΗΤΑ	3.89	3.89	3.89	3.9
8	ΔΤ=-10 C	-0.719	-1.83	-4.06	-2.4

Πίνακας 4.4 Βήματα , Περιγραφή , τάσεις καθ' ύψος της διατομής σε κάθε βήμα

Όπως φαίνεται στον **πίνακα 4.4** οι τάσεις στη μεσαία διατομή τόσο καθ' ύψος όσο και σε κάθε βήμα της ανάλυσης είναι θλιπτικές εκτός από την περίπτωση της επιβολής των κινητών φορτίων. Τη στιγμή της επιβολής των κινητών φορτίων η μέση τάση στο σκυρόδεμα είναι περίπου 4 MPa , δηλαδή περίπου 10 % τη θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος , τάση που επιτρέπεται στην περίπτωση της περιορισμένης προέντασης [για κατανομή κατά μήκος δεξ **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**] .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ
ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι γέφυρες stress ribbon είναι εύκαμπτες , αναλαμβάνουν δηλαδή τα εξωτερικά φορτία μέσω μεγάλων μετατοπίσεων
- Είναι απλές , όμορφες κατασκευές που ικανοποιούν όλες ταυτόχρονα τις απαιτήσεις σχεδιασμού : ασφάλεια , οικονομία , περιβάλλον , αισθητική , ανθεκτικότητα σε διάρκεια
- Οι γέφυρες με προεντεταμένους ταινιοδιαδρόμους έχουν 3 ιδιαιτερότητες κατά την ανάλυση τους : τη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά , την κατασκευή σε φάσεις και την επιρροή των φαινομένων που εξελίσσονται με το χρόνο , όπως ερπυσμό , συστολή ξηράνσεως
- Είναι αξιόπιστη η ανάλυση του ερπυσμού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος Abaqus , όπως φαίνεται και από το απλό παράδειγμα που αναπτύσσεται και του οποίου τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή της θεωρίας της υπέρθεσης στο Matlab
- Είναι αξιόπιστη η παρακολούθηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το δισδιάστατο μοντέλο γέφυρας stress ribbon που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus δεδομένου ότι τα αποτελέσματα του συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν για το ίδιο ακριβώς παράδειγμα με το λογισμικό DIANA
- Είναι αξιόπιστη η παρακολούθηση των μετακινήσεων που προκύπτουν από το τρισδιάστατο προσομοίωμα γέφυρας stress ribbon σε όλες τις φάσεις κατασκευής δεδομένου ότι έχει γίνει βαθμονόμηση του προσομοιώματος με τη βοήθεια α) ενός δισδιάστατου που λαμβάνει υπόψη του τη συνεισφορά των στοιχείων επόμενης φάσης μόνο στη φόρτιση της αρχικής διατομής των καλωδίων ανάρτησης και β) ενός τρισδιάστατου που περιλαμβάνει μόνο τα καλώδια ανάρτησης
- Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus είναι δύσκολη ή αδύνατη η προσομοίωση της κατασκευής σε φάσεις , δηλαδή η ενεργοποίηση διατομών σε επόμενα βήματα της ανάλυσης και μάλιστα ακολουθώντας την παραμορφωμένη γεωμετρία του προηγούμενου βήματος. Για το λόγο αυτό οι διατομές αυτές ενεργοποιούνται από την αρχή. Τότε , όμως , προσφέρουν μια δυσκαμψία στην κατασκευή ήδη από την αρχή , η οποία στην πραγματικότητα δεν υπάρχει. Είναι απαραίτητη , λοιπόν , η βαθμονόμηση με ένα δισδιάστατο προσομοίωμα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

- Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus δε γίνεται με άμεσο τρόπο η προσομοίωση της προέντασης , όπως συμβαίνει με άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. Sofistik) , απαιτείται δηλαδή ένας έμμεσος τρόπος προσομοίωσης , ο οποίος δεν είναι και τόσο αξιόπιστος.
- Όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα της ανάλυσης το κινητό φορτίο στις γέφυρες stress ribbon είναι μεγάλο ποσοστό των μονίμων φορτίων , γεγονός που σημαίνει μεγάλη απόδοση υλικού που οφείλεται στη μορφή του φορέα ή/και στο στατικό του σύστημα.
- Ο ερπυσμός οδηγεί σε ανύψωση του φορέα και όχι σε περαιτέρω βύθιση
- Το διάγραμμα των καμπτικών ροπών είναι σε όλες σχεδόν τις φάσεις αρνητικό
- Η επιρροή του ανέμου στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι αμελητέα
- Παρατηρείται εφελκυσμός στη μεσαία διατομή , όμως αυτός είναι επιτρεπτός στην περίπτωση της περιορισμένης προέντασης
- Ο φορέας εμφανίζει μικρές ιδιοσυχνότητες. Παρά τις συστάσεις από τους κανονισμούς κατασκευάζεται με ιδιοσυχνότητες μικρότερες από 3 Hz
- Σε κατακόρυφη σεισμική διέγερση ενεργοποιείται η πρώτη κατακόρυφη ιδιομορφή που είναι και η πρώτη ιδιομορφή με συντελεστή συμμετοχής 81.1%
- Σε εγκάρσια σεισμική διέγερση κυρίαρχη είναι η 7^η ιδιομορφή που είναι και η πρώτη πλευρική με συντελεστή συμμετοχής 68.9%

5.2 ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

- Μελέτη και ανάλυση σε μεγαλύτερο βάθος της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας , όταν αυτή υποβάλλεται σε φορτία ανέμου και σε σεισμικές καταπονήσεις. Επιβολή δυναμικής και όχι στατικής φόρτισης.
- Παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης σε όρους μετακινήσεων , εντάσεων , αντιδράσεων στήριξης και τάσεων , για διαφορετικά πάχη καταστρώματος
- Παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης σε όρους μετακινήσεων , εντάσεων , αντιδράσεων στήριξης και τάσεων , για διαφορετικό ποσοστό προεντεταμένου οπλισμού

- Παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης σε όρους μετακινήσεων , εντάσεων , αντιδράσεων στήριξης και τάσεων , για διαφορετικό λόγο επιφάνειας ταινιοδιαδρόμων προς επιφάνεια τενόντων προέντασης
- Βελτιστοποίηση διατομής με κριτήριο τόσο τις εντάσεις όσο και τη δυναμική απόκριση σε φορτία ανέμου
- Βελτιστοποίηση περιοχής στήριξης για τον περιορισμό των εντάσεων
- Μελέτη διαφορετικών φορέων και διαφορετικών στατικών συστημάτων με στόχο την εξέταση ανάληψης βαρύτερων φορτίων
- Μελέτη στην οριακή κατάσταση αστοχίας με ελαστοπλαστικούς νόμους υλικών

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Leonhardt, F., Ολόσωμες κατασκευές , 6. Ολόσωμες γέφυρες , Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας (2010)
- [2] Τάσσιος, Θ., Πλαϊνης, Π., Σιγάλας, Ι., Εισαγωγή στη γεφυροποιία (Πρόχειρες σημειώσεις του μαθήματος 8^{ου} εξαμήνου) , Εκδόσεις Ε.Μ.Π. (1997)
- [3] Strasky, J., Stress ribbon and cable supported pedestrian bridges, Εκδόσεις Thomas Telford (2005)
- [4] Cobo del Arco, D., Aparicio, A., Mari, A., Preliminary Design of prestressed concrete stress ribbon bridge, Journal of Bridge Engineering , Vol.6, No. 4, pp. 234-242, July/August, (2001)
- [5] Kasuga, A., Development of a new bridge construction method using suspension structures, Structural Concrete, Journal of the fib, Vol.12, No. 2, pp. 65-75, (2011)
- [6] Strasky, J., Stefan, P., Necas, R., Footbridge across the River Svatka in Brno, Czech Republic, Structural Concrete, Journal of the fib, Vol.12, No. 2, pp. 76-81, (2011)
- [7] Strasky, J., Necas, R., Kolacek, J., Dynamic response of concrete footbridges, Structural Concrete, Journal of the fib, Vol.13, No. 2, pp. 109-118, (2012)
- [8] Agrawal, R., Stress ribbon bridges, The Structural Engineer, Vol.87, No. 22, pp. 22-27, November (2009)
- [9] Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges, Appendix A-Deformational Characteristics of Suspended Cables, pp. 147-158
- [10] Imai, K., Frangopol, D., Response Prediction of Geometrically Nonlinear Structures, Journal of Structural Engineering , Vol.126, No. 11, pp. 1348-1355, November (2000)
- [11] Lake Hodges Stress Ribbon Bridge, by T.Y Lin International, 4D Journal ,pp.1-8, Εκδόσεις Larsa, Μάιος (2010)
- [12] Strasky, J., Stress Ribbon and Arch Pedestrian Bridges, ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges, pp. 38-45
- [13] Yoshioka, T., The latest technologies of prestressed concrete bridges in Japan, pp.72-86
- [14] Aso, T., Uno, K., Fujimoto, Y., Okazaki, H., Watanabe, M., Dynamic characteristics and earthquake response analysis of three span continuous stress ribbon bridge, 12th World Conference in Earthquake Engineering (2000)

- [15] Strasky, J., Precast Stress Ribbon Pedestrian Bridges In Czechoslovakia, PCI Journal, pp. 52-73, Μάιος-Ιούνιος (1987)
- [16] Strasky, J., Recent Development in Design of Stress Ribbon Bridges, Concrete Bridge Conference(2004)
- [17] Schlaich, J., Engelsmann, S., Stress Ribbon Concrete Bridges, Structural Engineering International 4/96, pp. 271-274
- [18] Caetano, E., Cuncha, A., Modal identification and Finite Element updating of a Stress Ribbon Foot- Bridge
- [19] Kulhavy, T., Stress ribbon bridges stiffened by arches or cables, 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest (1998)
- [20] Stavridis, L., Evaluation of static response in stress-ribbon concrete pedestrian bridges, Structural Engineering and Mechanics, Vol.34, No.2, (2010)
- [21] Tanaka, T., Yoshimura, T., Gimsing, N., Mizuta, Y., Kang, W.-H., Sudo, M., Shinohara, T., Harada, T., A study on improving the design of hybrid stress-ribbon bridges and their aerodynamic stability, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002)
- [22] Strasky, J., Stress-ribbon pedestrian bridges supported or suspended on arches, Chinese-Croatian Joint Colloquium Long Arch Bridges, pp. 135-148, (2008)
- [23] Strasky, J., Bollman, J., Necas, R., Kolacek, J., Willamette river bridge, Eugene, Oregon, USA, fib Symposium Prague (2011), Topic 3: Poster Session
- [24] Kalafatic, I., Radic, J., Savor, Z., Analysis of Stress-ribbon bridges, Gradevinar Vol. 61, No.9, pp. 827-836 , (2009)
- [25] Wang, P.-H., Tang, T., Zheng, H., Analysis of Cable-stayed bridges during construction by cantilever methods, Computers and Structures 82, pp. 329-346, (2004)
- [26] Nonlinear Kinematics and Compliance Simulation of automobiles, Abaqus Technology Brief, (2010)
- [27] Abaqus Beam Tutorial
- [28] Lee, Z., Chang, K., Loh, C., Chen, C., Chou, C., The cable and structure analysis of an earthquake damaged Cable-stayed bridge, Gi-Lu Cable-stayed bridge,
- [29] Kang, T., Huang, Y., Computer Modeling of Post-tensioned structures, 4-th International Conference on Computer Modeling and Simulation, IPCSIT, Vol. 22 (2012)

- [30] Canovic, S., Goncalves., J., Modeling of the response of the new Svinesund Bridge, FE Analysis of the arch launching, Master's thesis in the International Master's program Structural Engineering (2005)
- [31] Arzoumanidis, S., Bieniek, M., Finite Element Analysis of Suspension Bridges, Computers and Structures, Vol.21, No.6, pp. 1237-1253, (1985)
- [32] Mang, H., Meschke, G., Nonlinear Finite Element Analysis of reinforced and prestressed concrete structures , Journal of Structural Engineering, Vol.13, pp. 211-226, Απρίλιος (1991)
- [33] Kanok-Nukulchai, W., Hong, G., Nonlinear Modeling of Cable-Stayed Bridges, Journal of Constructions and Steel Research, Vol.26, pp. 249-266, (1993)
- [34] Example: Creating a model of an overhead hoist with Abaqus/CAE
- [35] Kanok-Nukulchai, W., Yiu, P., Brotton, D., Mathematical Modeling of Cable-stayed Bridges, Structural Engineering International 2/92, pp. 108-113
- [36] Stavridis, L., A simplified analysis of the behavior of suspension bridges under live load, Structural Engineering and Mechanics, Vol.30, No.5, (2008)
- [37] Huang, Y., Kang, T., Ramseyer, C., Rha, C., Background to multi-scale modeling of unbounded post-tensioned concrete structures, International Journal of Theoretical and applied multiscale mechanics, Vol.1, No.3, pp. 219-235,(2010)
- [38] Τάσσιος, Θ., Αρχαιοελληνική γεφυροποιΐα
- [39] Irvine, M., Cable Structures , Εκδόσεις Dover
- [40] Γαντές, Χ., Διαδικτυακές σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος Σχεδιασμός καλωδιωτών κατασκευών και μεμβρανών

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- [41] <http://en.structurae.de/structures/stype/index.cfm?id=1046>
- [42] http://en.wikipedia.org/wiki/Stressed_ribbon_bridge
- [43] <http://www.shp.eu/en/strasky-husty-a-partneri/projects/bridges/pedestrian-bridges/stress-ribbon-bridges/>
- [44] <http://users.ntua.gr/chgantes/cables-membranes.shtml>

Α. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
fx >> %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%
%% ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΤΛΑΒ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ %%
%% ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ %%
%% Comité Euro-International du Béton (1991) %%
%% %%
%% ΠΡΟΓΡΑΜΑΤΙΣΤΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟΝ %%
%% ΗΛΙΟΠΟΥΛΟ ΣΩΚΡΑΤΗ %%
%% %%
%% ΑΘΗΝΑ © %%
%% %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
%% ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΡΠΥΣΜΟΥ:
%% ΗΛΙΚΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ. [Days]
t0=1;
%% ΗΛΙΚΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ. [Days]
t=22;
%% ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ. [Days]
deltat=0.1;
%% ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ. [%]
RH=75;
% h=2*Ac/u;
h=0.704;
% ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΔΟΚΙΜΕΣ (ΑΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ). [MPa]
fc=[96.6, 91.0, 83.4, 80.1, 97.1, 90.5, 93.4, 97.1]; %
%% ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΕΔΟΜΕΝΑ:
%% ΤΑΣΗ [Pa]
sigma=1E6;
%% ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΤΑΣΗ [Pa]
deltasigma1=1e6;
%% ΗΛΙΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΤΑΣΗΣ [Days]
t1=8;
%% ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΤΑΣΗ (ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗ) [Pa]
deltasigma2=-2e6;
%% ΗΛΙΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΤΑΣΗΣ [Days]
t2=15;
%% Young's modulus. [Pa]
Ec=2.2326E10;
%% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΡΠΥΣΜΟΥ:
T=(t0:deltat:t)';
T0=1*(ones(size(t)));
fcm=mean(fc);
Bt0=1/(0.1+t0^0.2);
Bfcm=5.3/(fcm/10)^0.5;
FiRH=1+(1-(RH/100))/(0.46*(h/0.1)^3);
Fi0=FiRH*Bfcm*Bt0;
bh=150*(1+(1.2*RH/100)^18)*h/0.1+250;
if bh>1500
bh=1500;

```

```

end
BH=bh*(ones(size(T)));
Bc=((T-T0)/(BH+(T-T0))).^0.3;
Fi=Fi0*Bc;
%% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
%% ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΜΕΧΡΙ ΤΟ ΤΕΛΟΣ.
T1=(t0:deltat:t);
%% ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΑΛΛΑΓΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΟ ΤΕΛΟΣ.
T2=(t1:deltat:t);
%% ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΑΛΛΑΓΗ ΤΑΣΗΣ.
T3=(t0:deltat:t1-deltat);
%% ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΑΛΛΑΓΗ ΤΑΣΗΣ.
T4=(t0:deltat:t2-deltat);
%% ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΑΛΛΑΓΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΟ ΤΕΛΟΣ.
T5=(t2:deltat:t);
SIGMA1=sigma*(ones(size(T1)))';
SIGMA2=[zeros(size(T3)) deltasigma1*(ones(size(T2)))]';
SIGMA3=[zeros(size(T4)) deltasigma2*(ones(size(T5)))]';
epscc1=SIGMA1.*Fi/Ec;
Fi2=[zeros(size(T3)) Fi(1:size(T2,2))]'';
epscc2=SIGMA2.*Fi2/Ec;
Fi3=[zeros(size(T4)) Fi(1:size(T5,2))]'';
epscc3=SIGMA3.*Fi3/Ec;
epsccctot=epscc1+epscc2+epscc3
tplot=(0:deltat:t-1)';
plot(tplot,epsccctot),hold on

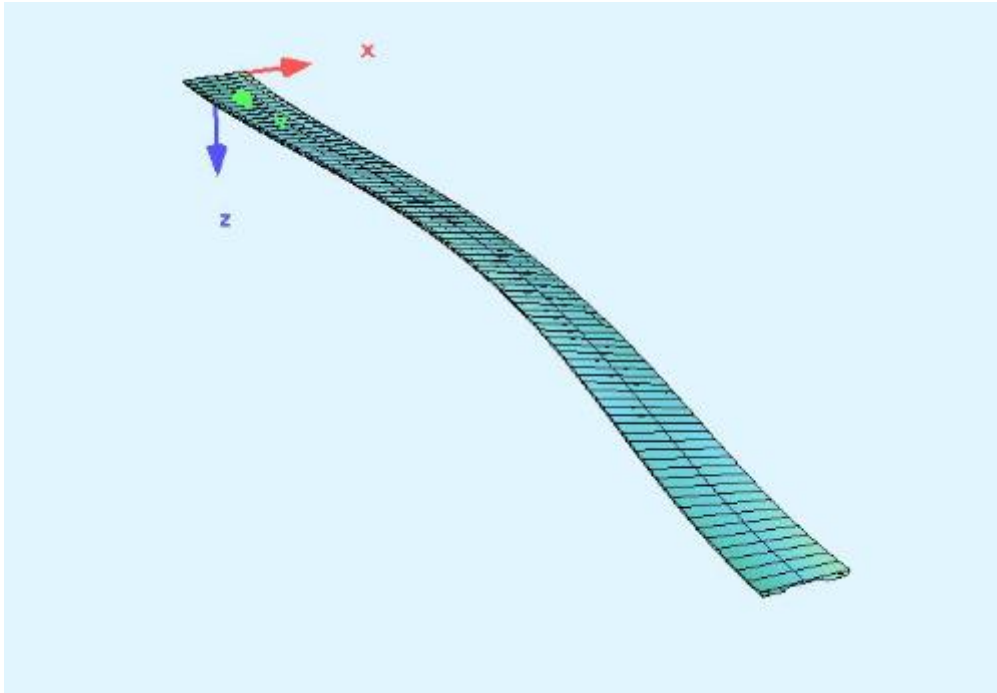
```

Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

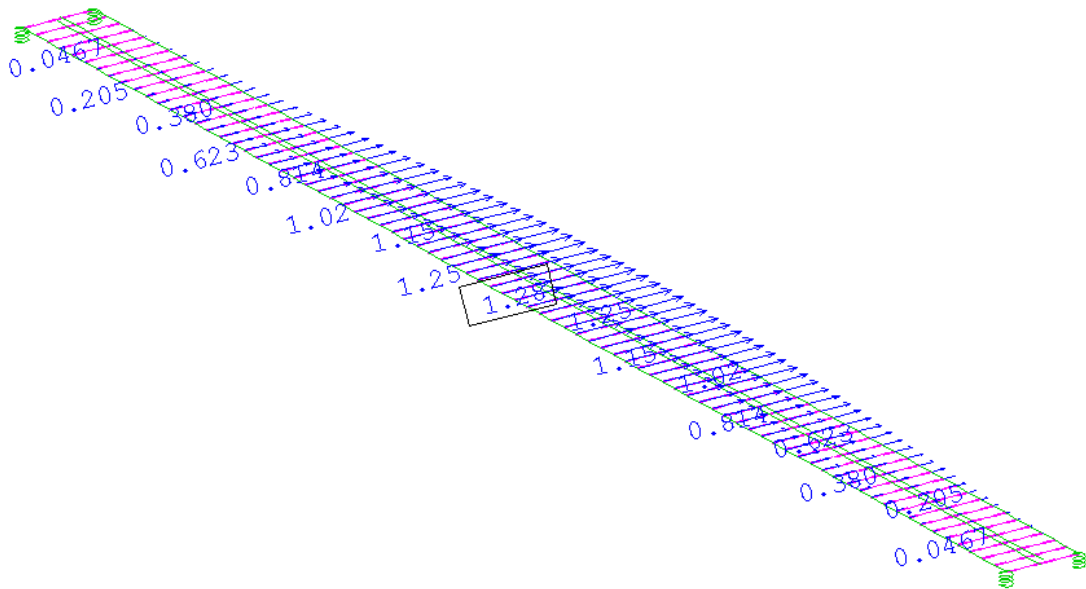
```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

%% %%
%% ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MATLAB ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ%%
%% ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ Comité Euro-International du Béton (1991). %%
%% %%
%% ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΗΚΕ ΑΠΟ: %%
%% ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ %%
%% %%
%% ΑΘΗΝΑ 2012 © %%
%% %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
%% ΔΕΔΟΜΕΝΑ:
t=1:500;
s=0.25;
%% ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
%% ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (ΑΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ)
x=[96.6, 91.0, 83.4, 80.1, 97.1, 90.5, 93.4, 97.1];
%% ΣΤΑΘΕΡΕΣ:
alfae=2.15*10^10;
fcm0=10*10^6;
%% ΑΝΑΛΥΣΗ:
fcm=mean(x)*10^6;
ec=alfae*(fcm/fcm0)^(1/3);
ecs=0.85*ec;
t1=ones(size(t));
s1=s*t1;
betacct=exp(s1.*(1-sqrt(28./(t./t1))));
betaet=sqrt(betacct);
ect=betaet*ecs
plot(t, ect);hold on
```

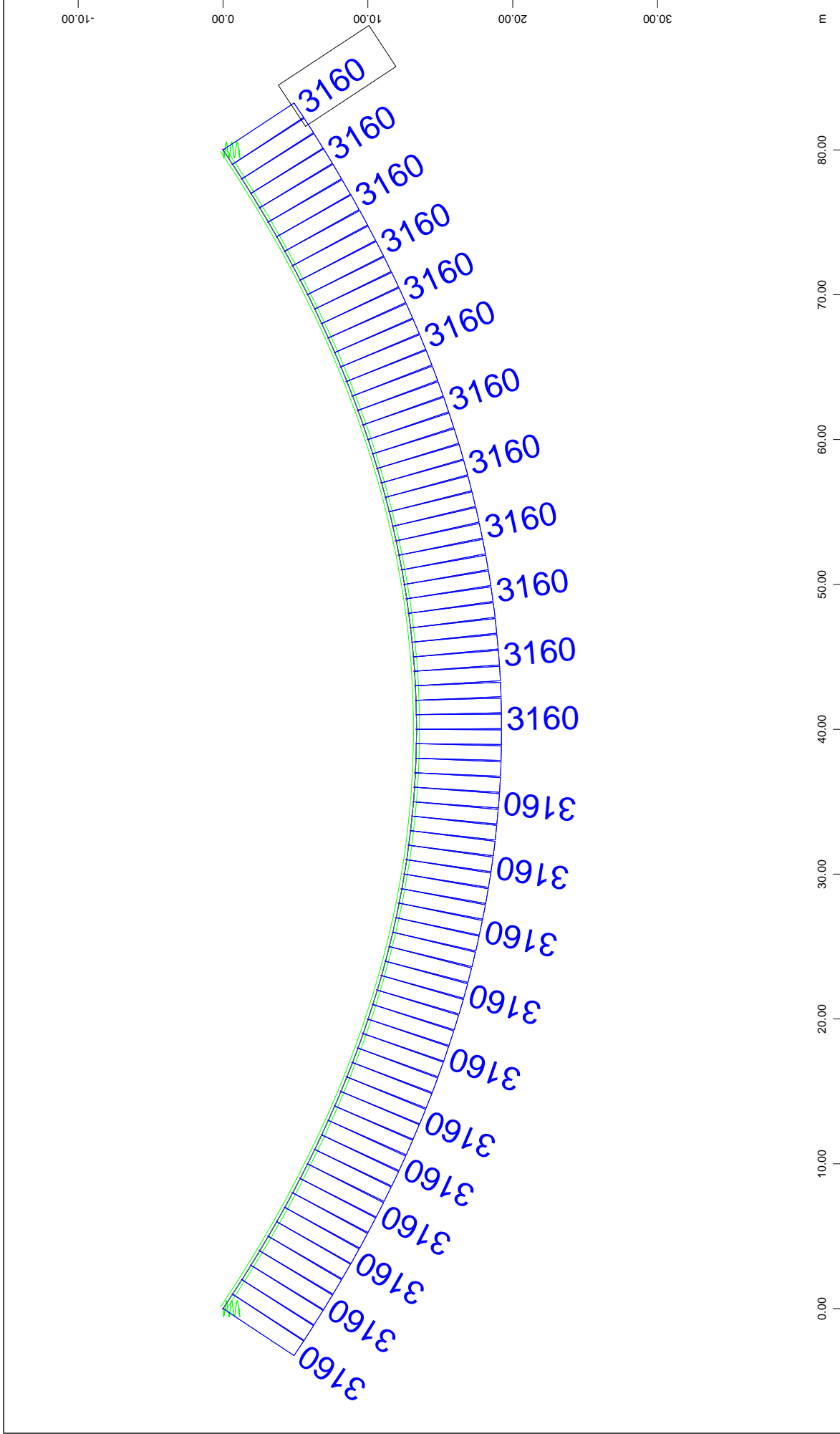
Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ SOFISTIK



Εικόνα φορέα που υπόκειται σε φορτίο ανέμου στο Sofistik



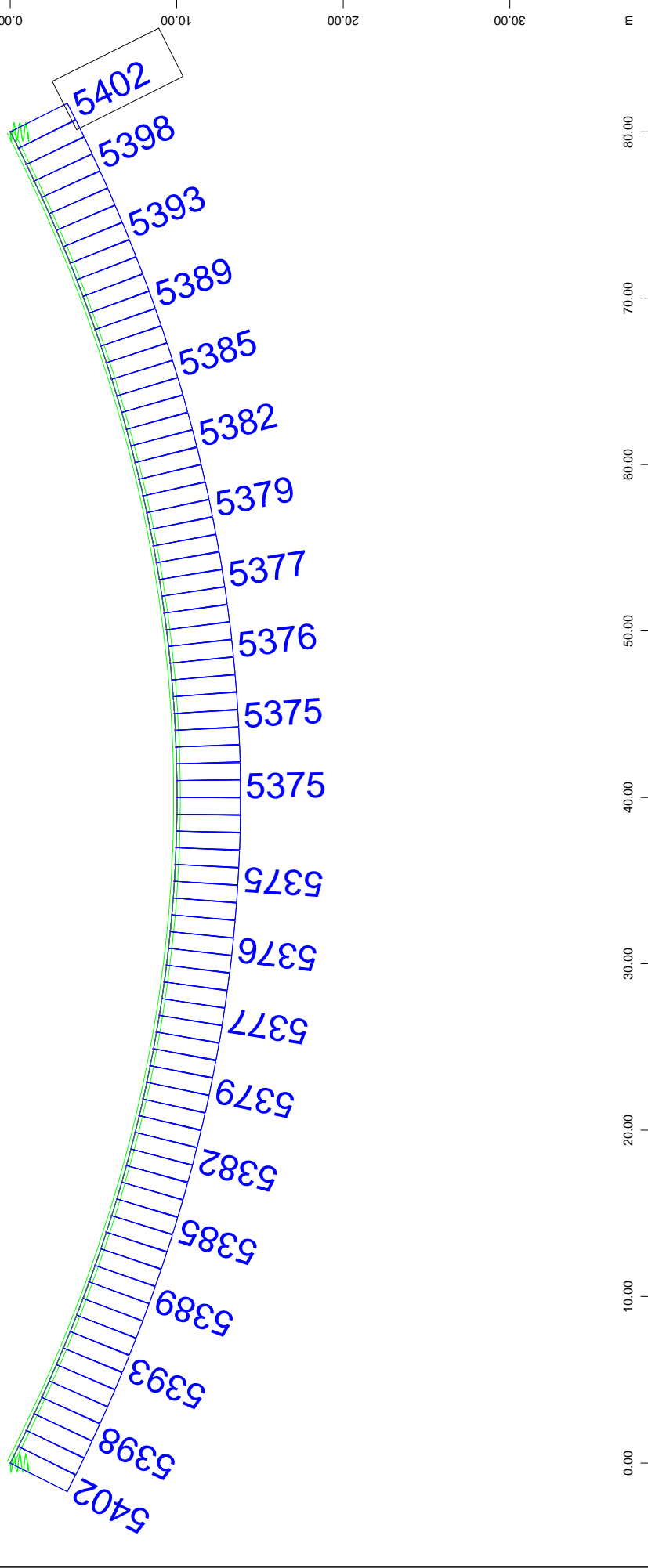
οριζόντιες μετατοπίσεις φορέα stress ribbon σε πλευρικό φορτίο ανέμου



Deformed Structure from LC 4010 DL-Cable Enlarged by 100.0
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4010 DL-Cable , 1 cm 3D = 2000. kN (Max=3160.)

X-Y
Z

Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces

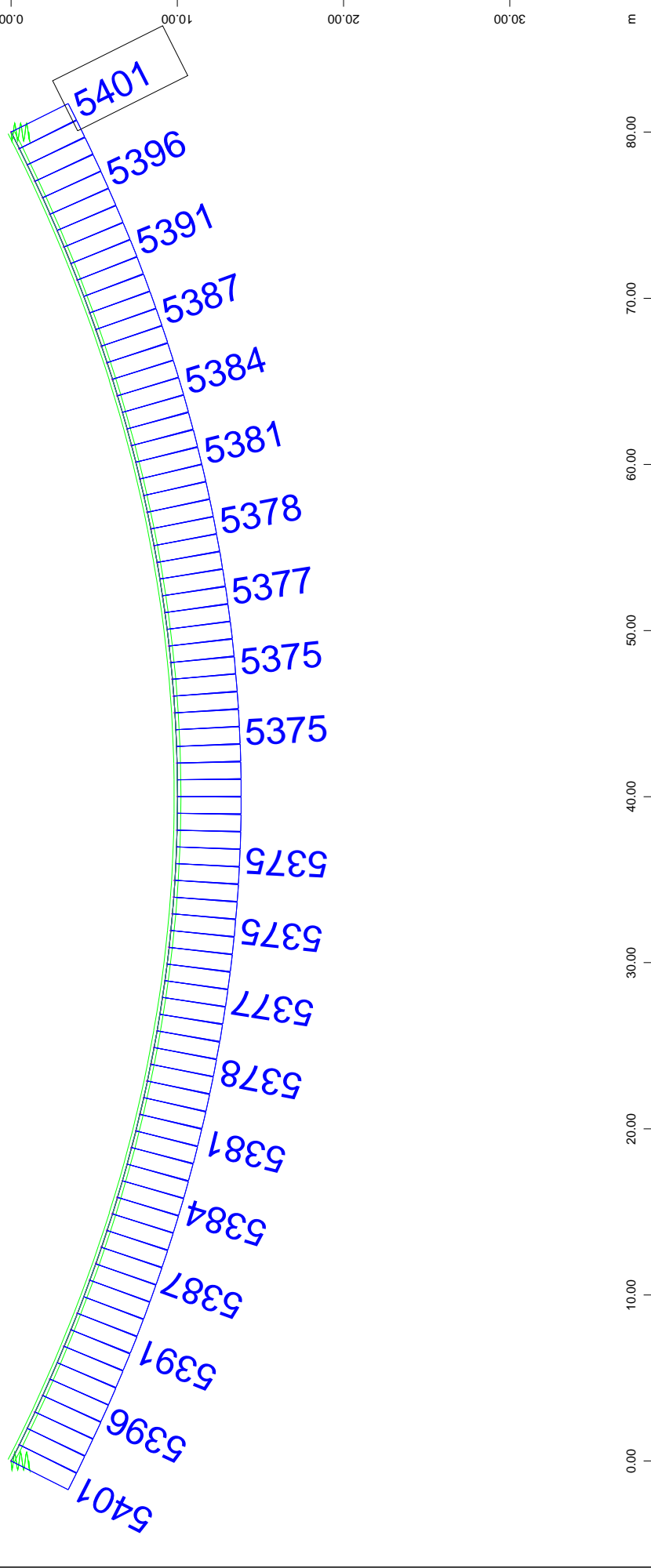


M 1 : 355

Deformed Structure from LC 4019 DECK-DL Enlarged by 5.00
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4019 DECK-DL , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=5402.)

X-Y
Z

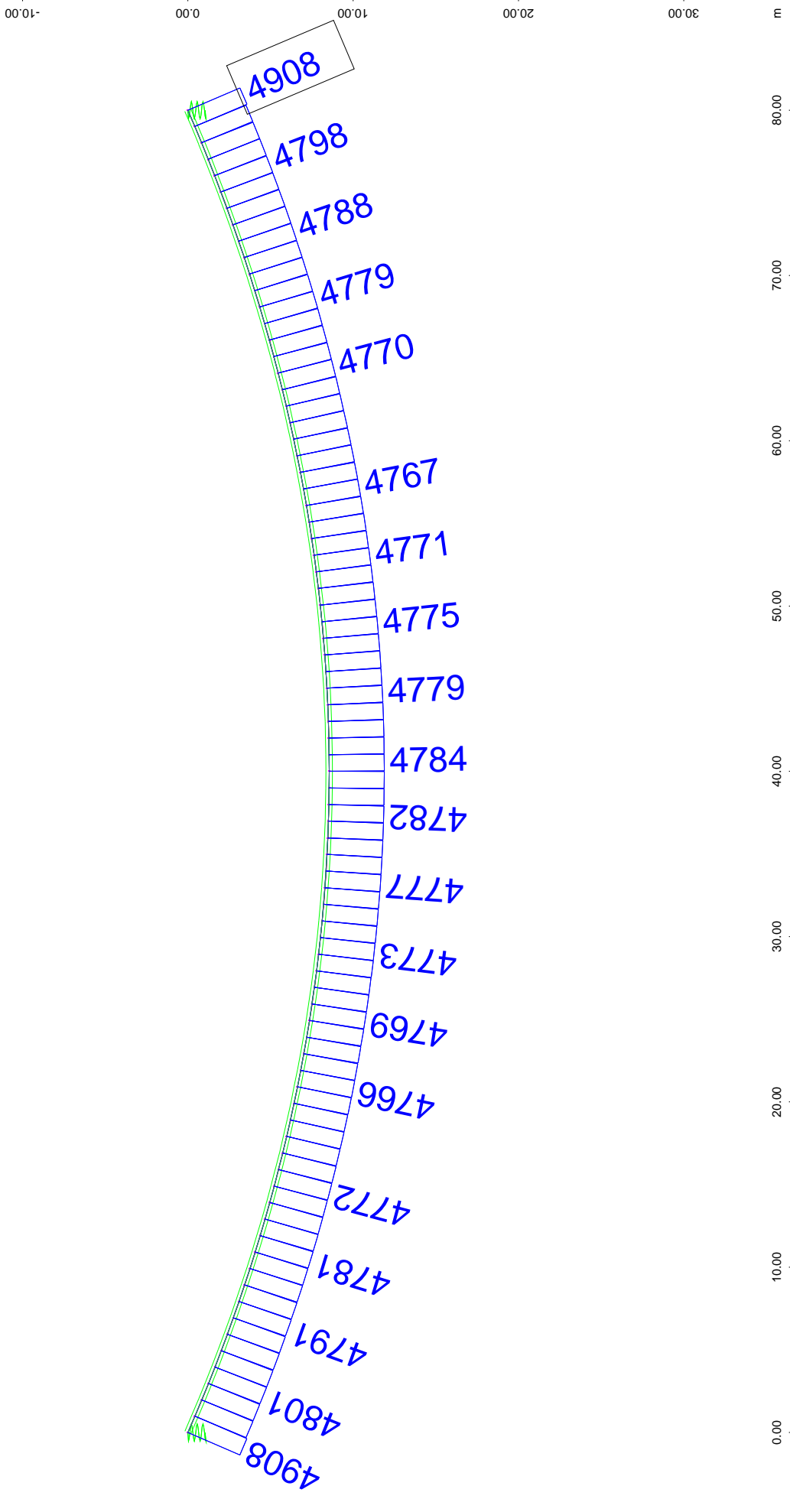
Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces



M 1 : 356

Deformed Structure from LC 4020 Girder-2 Enlarged by 5.00
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4020 Girder-2 , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=5401.)

Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces

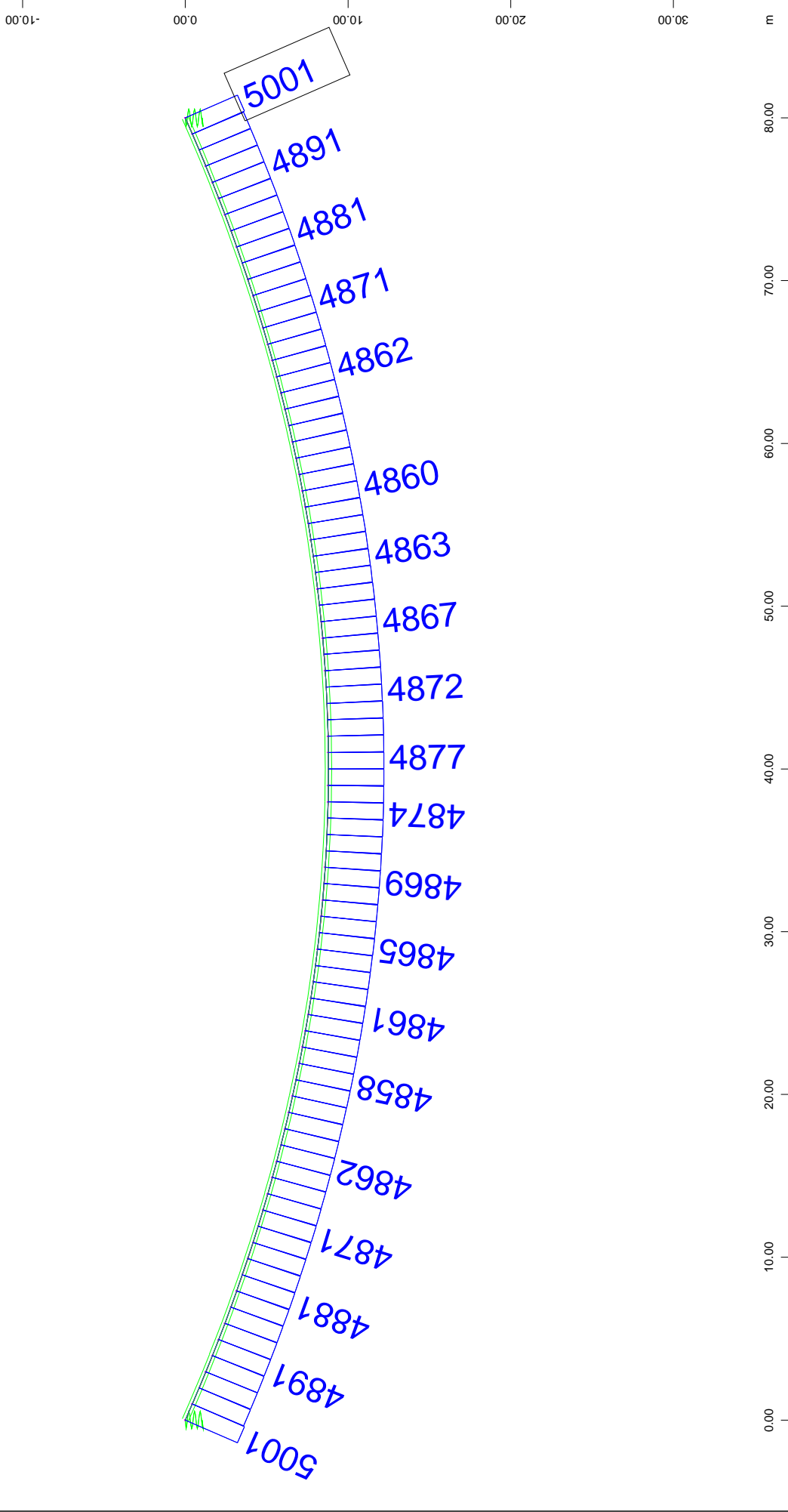


M 1 : 349

Deformed Structure from LC 4021 Prestress Enlarged by 5.00
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4021 Prestress , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=4908.)

X - Y
Z

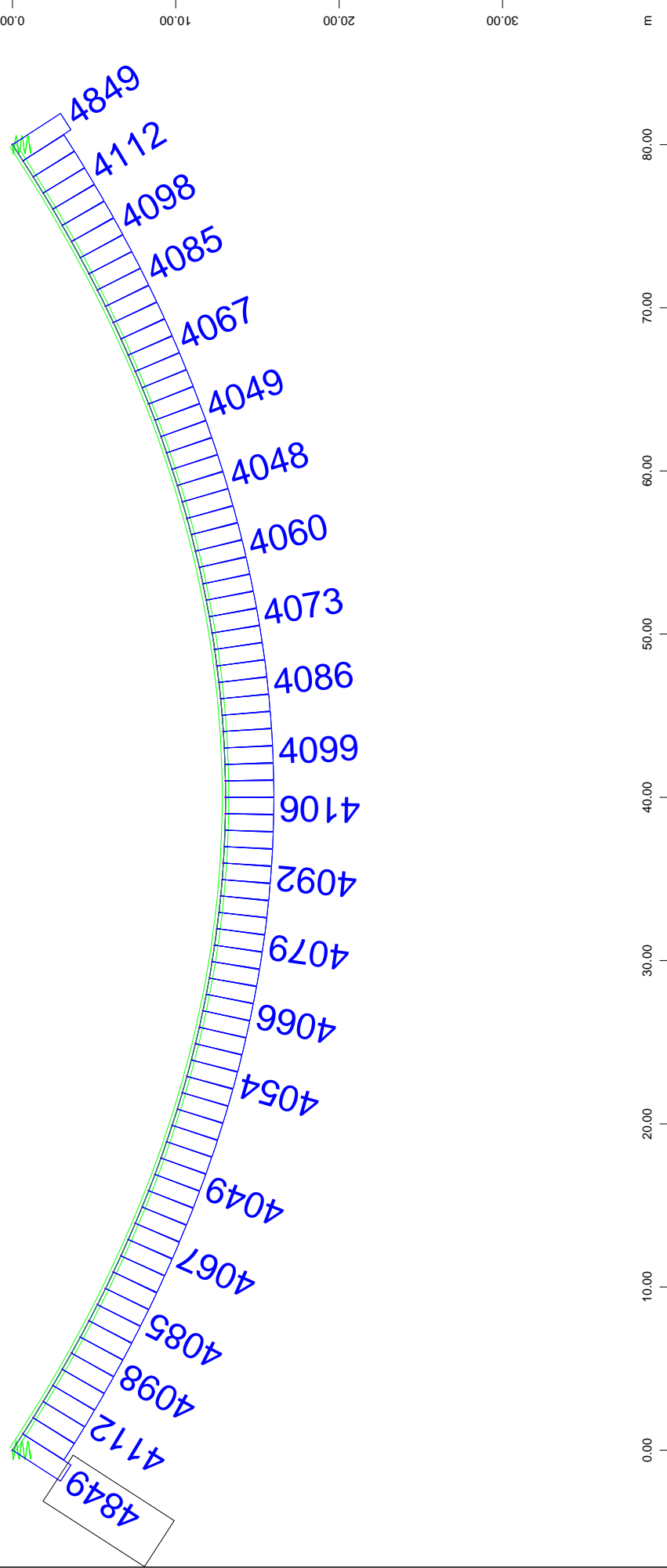
Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces



Deformed Structure from LC 4022 SDL Enlarged by 5.00
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4022 SDL , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=5001.)

X - Y
Z

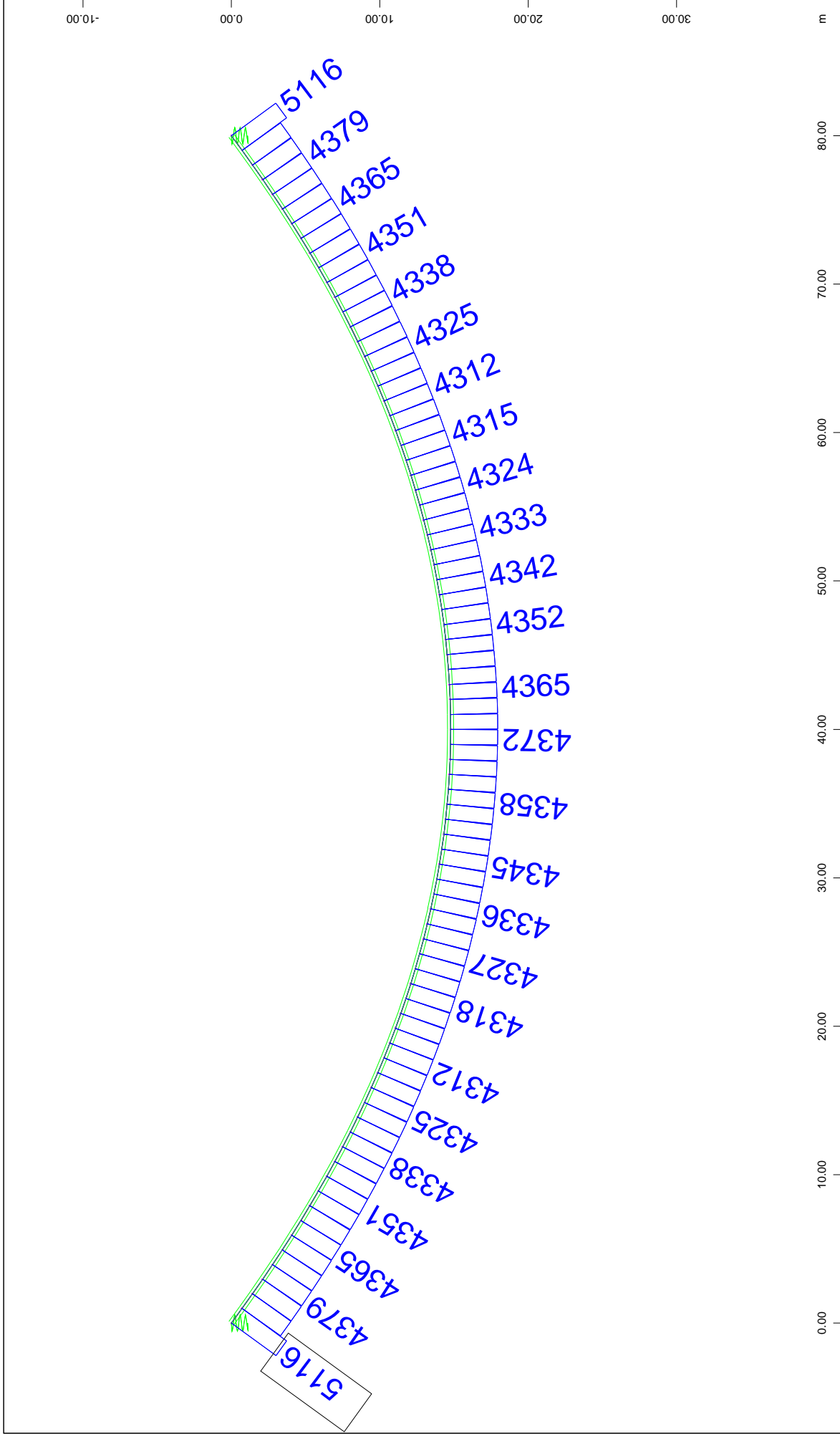
Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces



Deformed Structure from LC 4042 Creep-1 Enlarged by 10.0
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4042 Creep-1 , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=4849.)
M 1 : 362

X - Y
Z

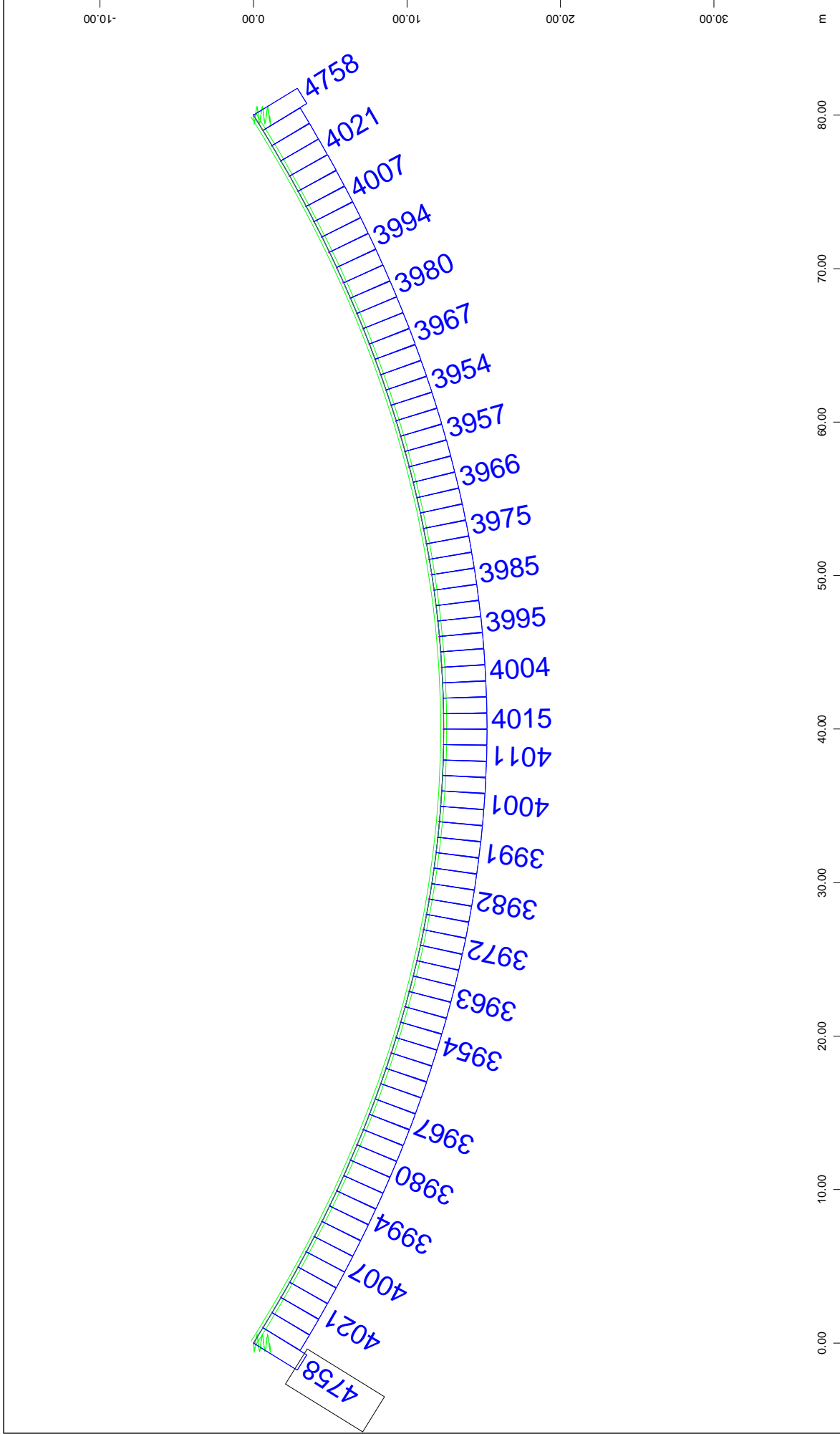
Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces



Deformed Structure from LC 4043 KINH7A Enlarged by 10.0
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4043 KINH7A , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=5116.)
M 1 : 364

X-Y
Z

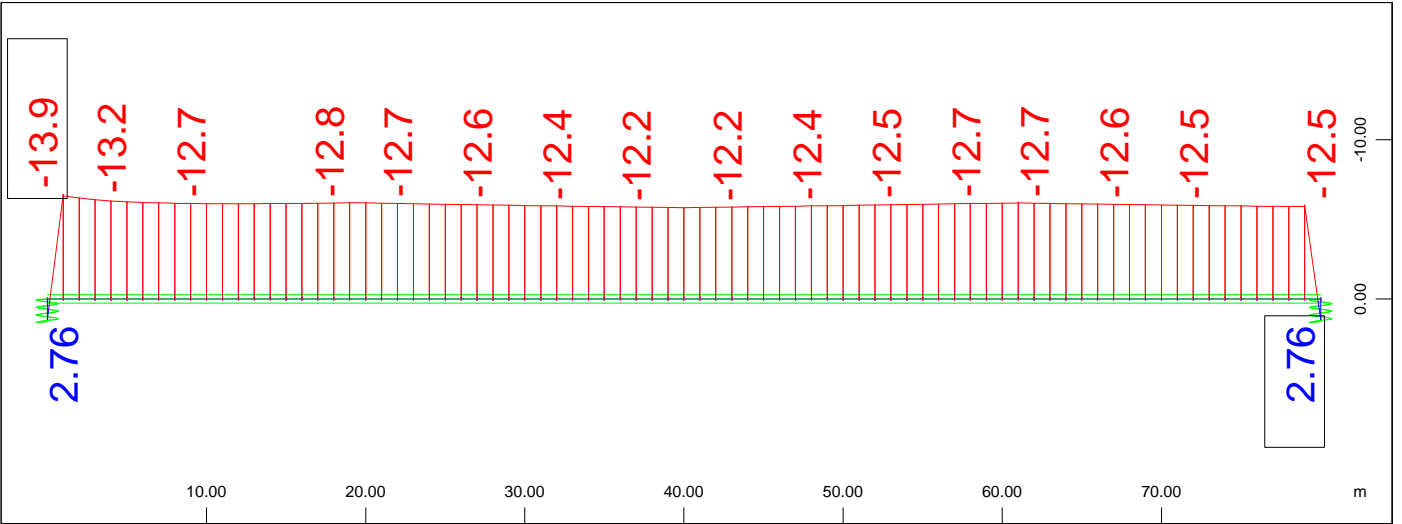
Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces



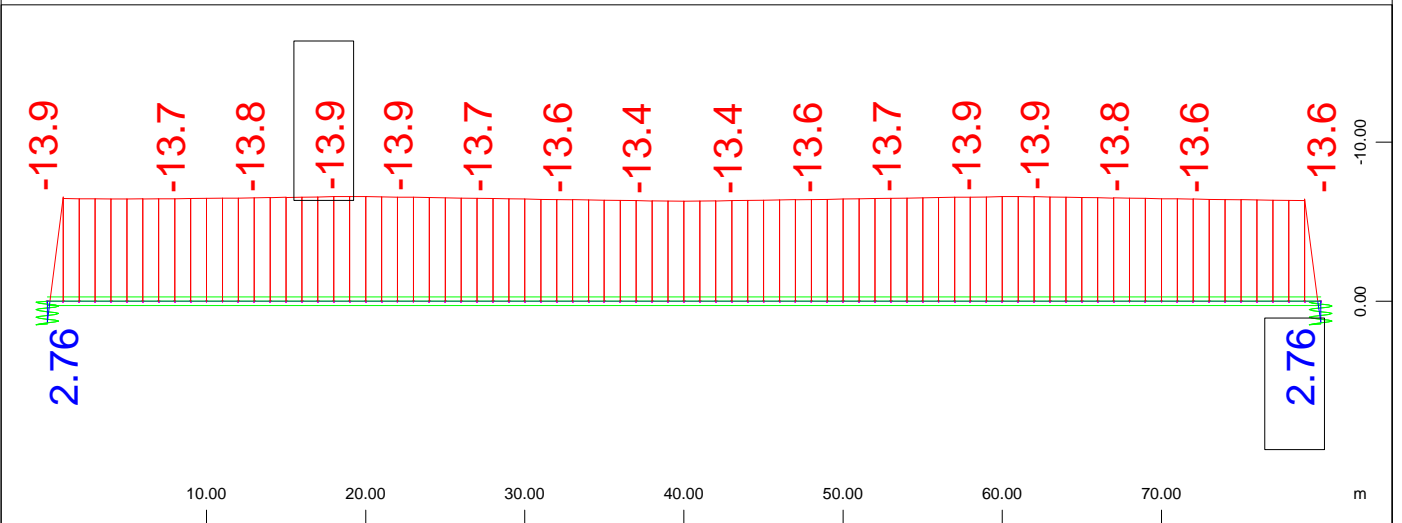
Deformed Structure from LC 4044 DT=-10 Enlarged by 10.0
Cable Elements , Normal force Nx, nonlinear Loadcase 4044 DT=-10 , 1 cm 3D = 5000. kN (Max=4758.)
M 1 : 352

X - Y
Z

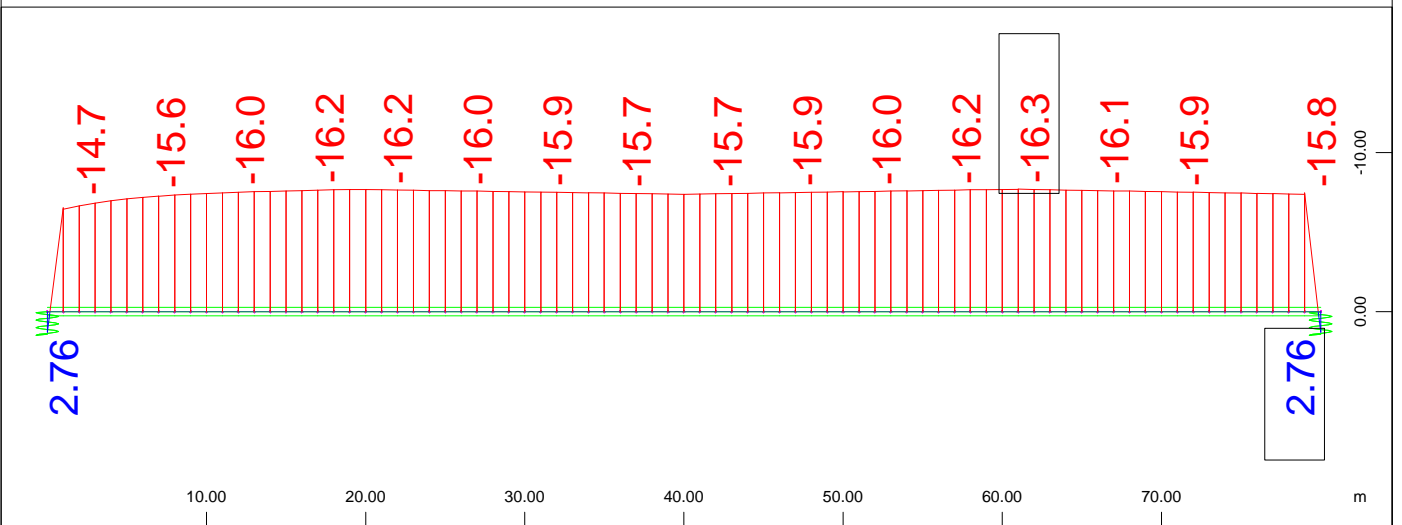
Stress Ribbon Ex.
Cable deformation And Normal Forces



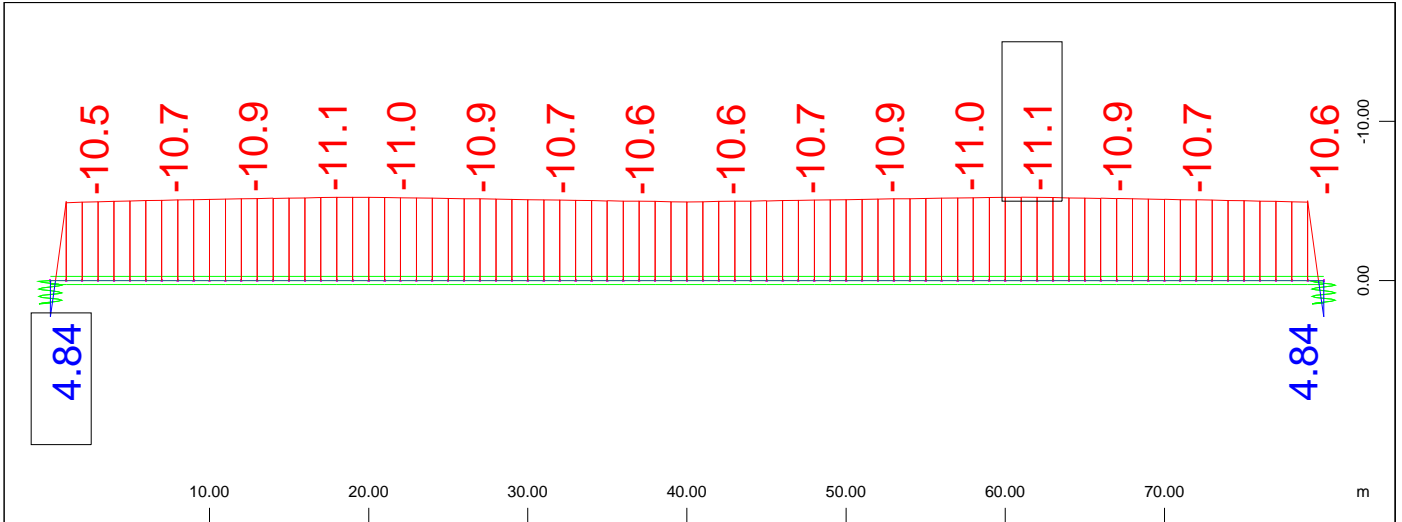
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2021 21 Prestress, Point o1 , 1 cm 3D = M 1 : 474
 10.0 MPa (Min=-13.9) (Max=2.76)



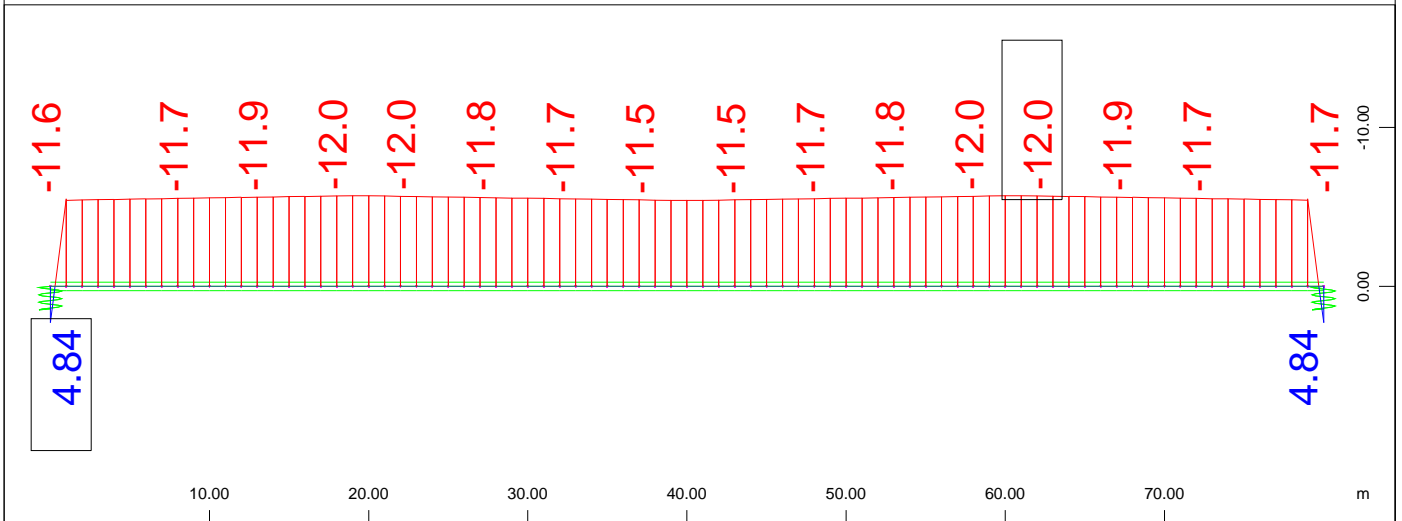
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2021 21 Prestress, Point u1 , 1 cm 3D = M 1 : 474
 10.0 MPa (Min=-13.9) (Max=2.76)



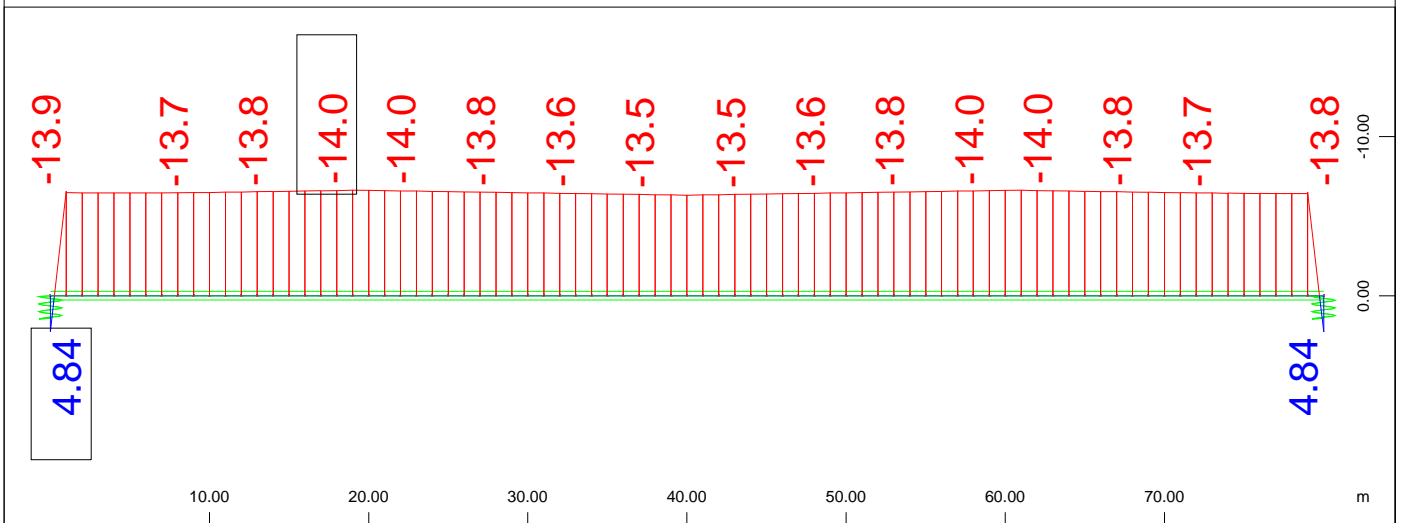
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2021 21 Prestress, Point u2 , 1 cm 3D = M 1 : 474
 10.0 MPa (Min=-16.3) (Max=2.76)



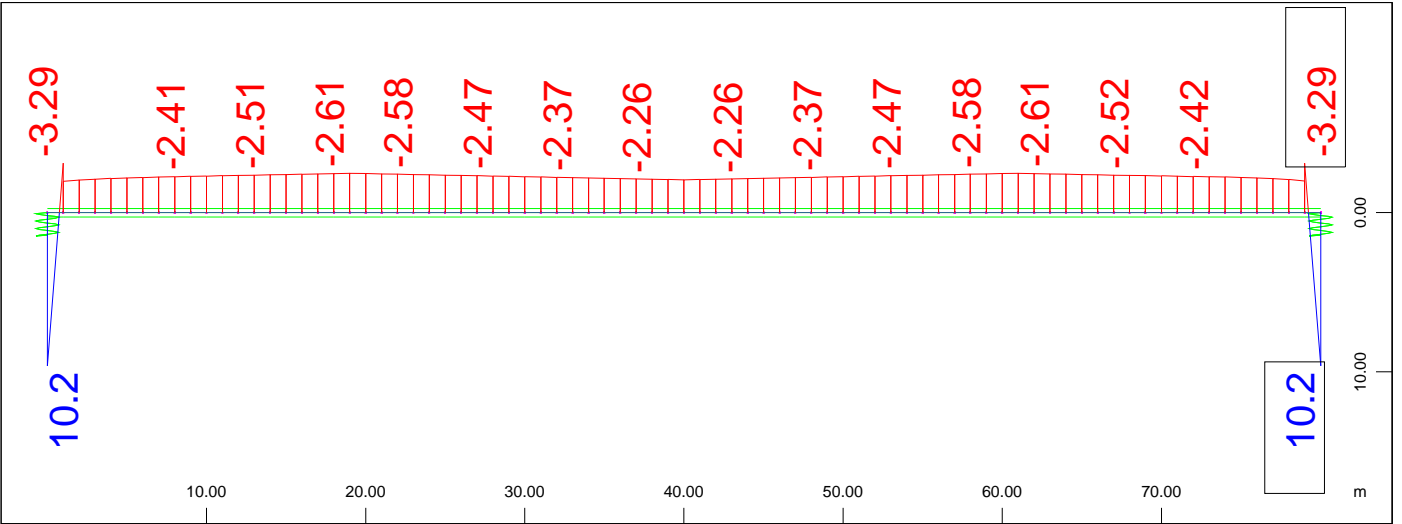
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2022 22 SDL, Point o1 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Min=-11.1) (Max=4.84) M 1 : 474



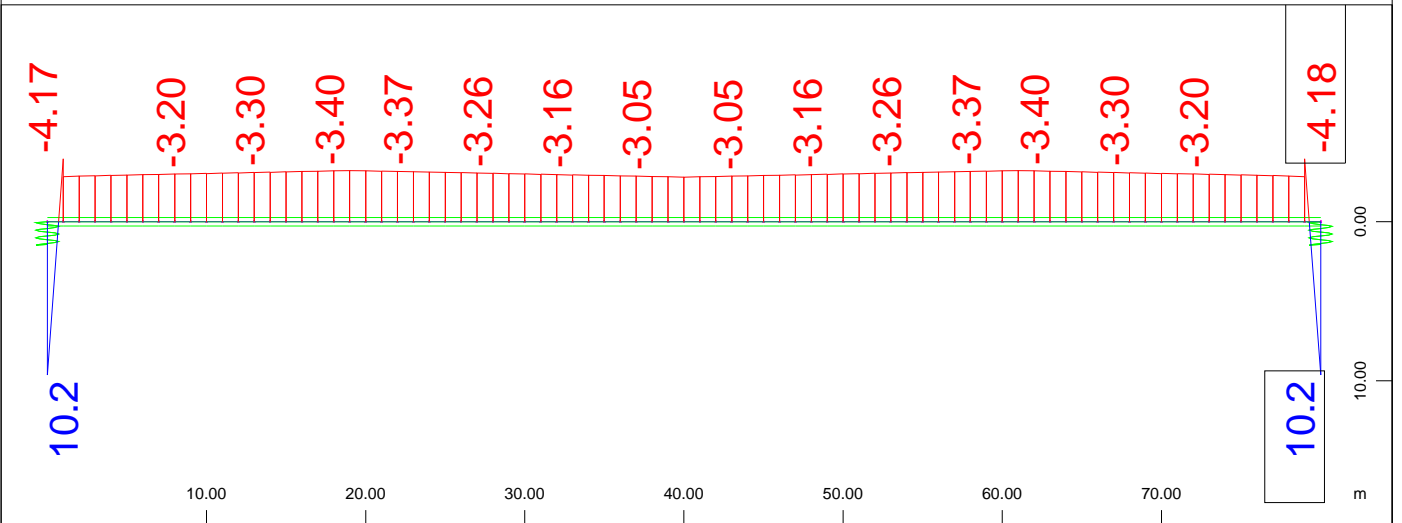
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2022 22 SDL, Point u1 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Min=-12.0) (Max=4.84) M 1 : 474



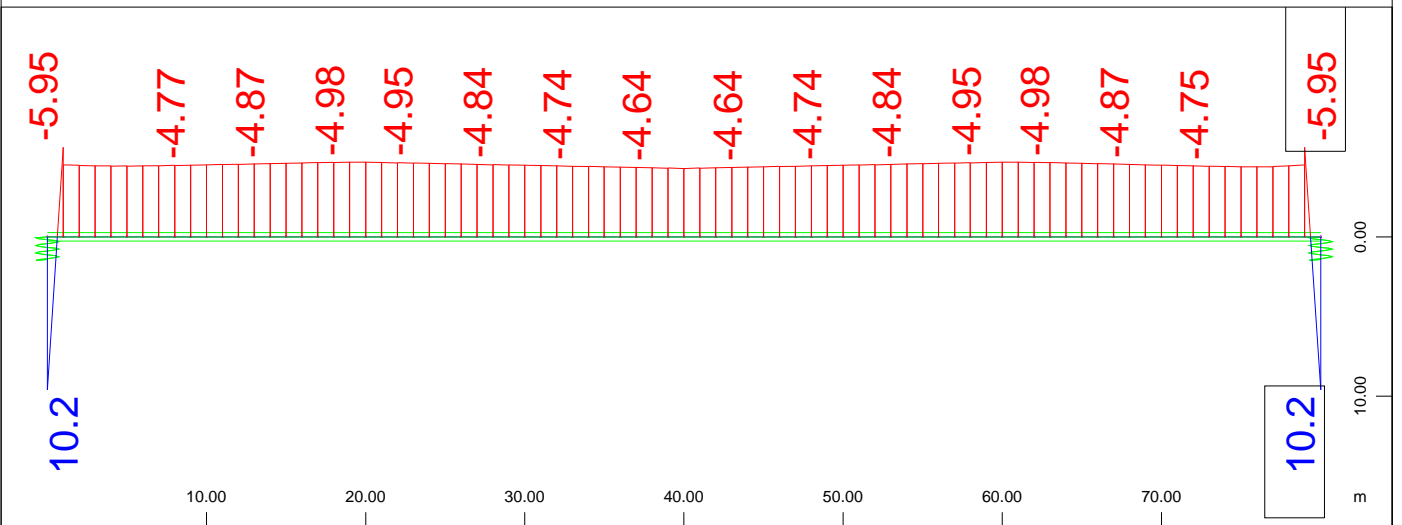
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2022 22 SDL, Point u2 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Min=-14.0) (Max=4.84) M 1 : 474



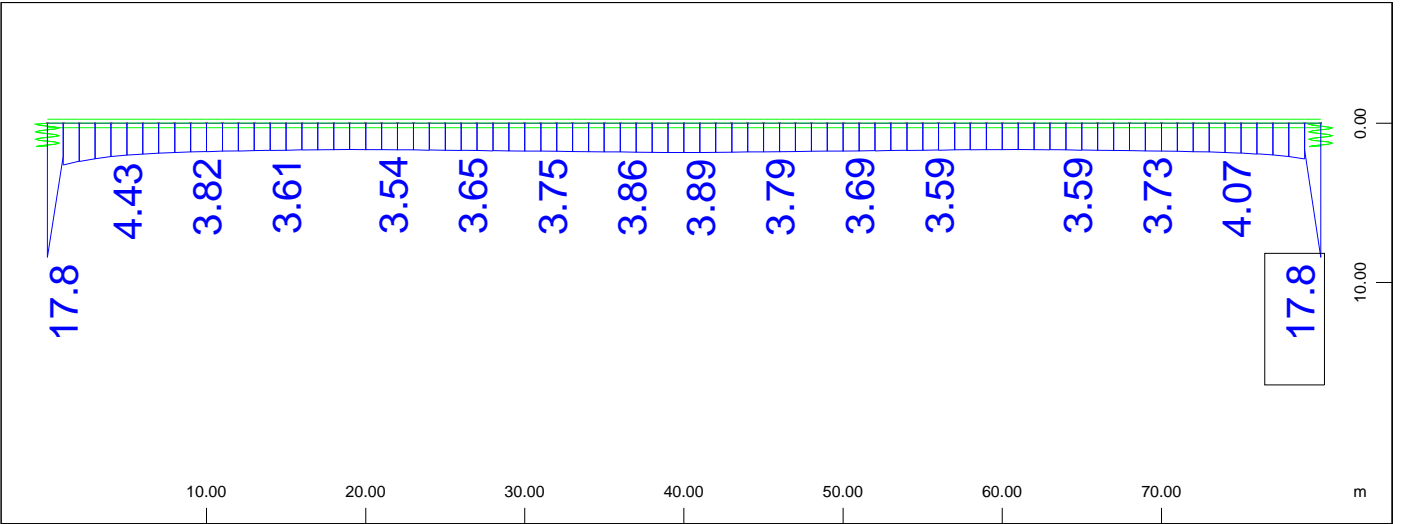
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2042 42 Creep-1, Point o1 , 1 cm 3D = 5.00 MPa (Min=-3.29) (Max=10.2) M 1 : 474



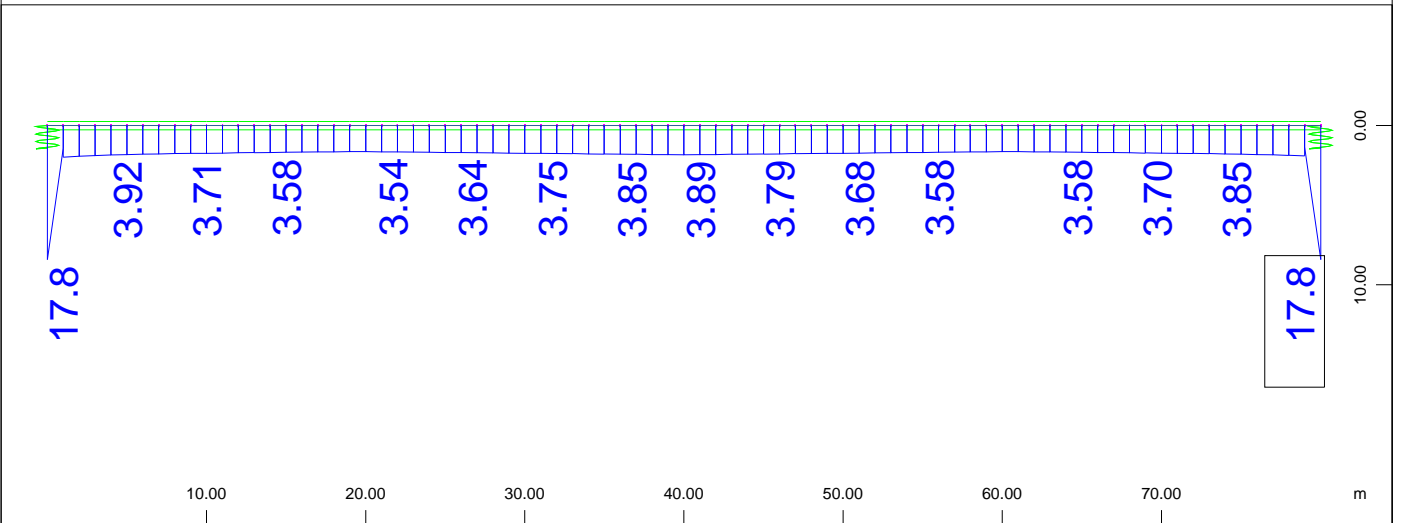
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2042 42 Creep-1, Point u1 , 1 cm 3D = 5.00 MPa (Min=-4.18) (Max=10.2) M 1 : 474



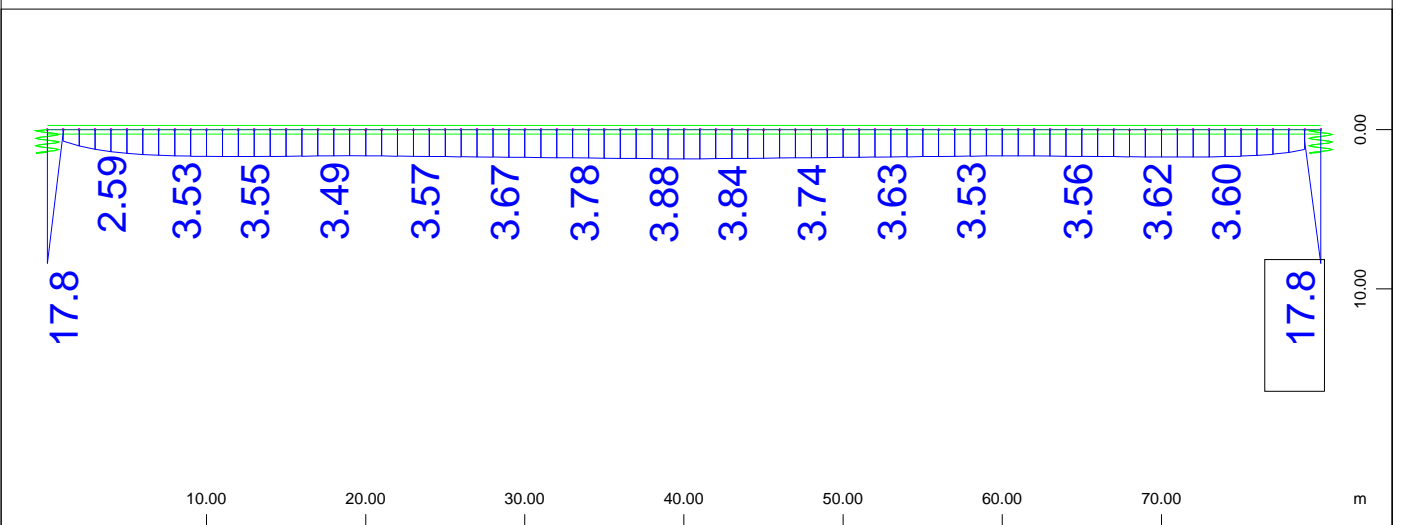
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2042 42 Creep-1, Point u2 , 1 cm 3D = 5.00 MPa (Min=-5.95) (Max=10.2) M 1 : 474



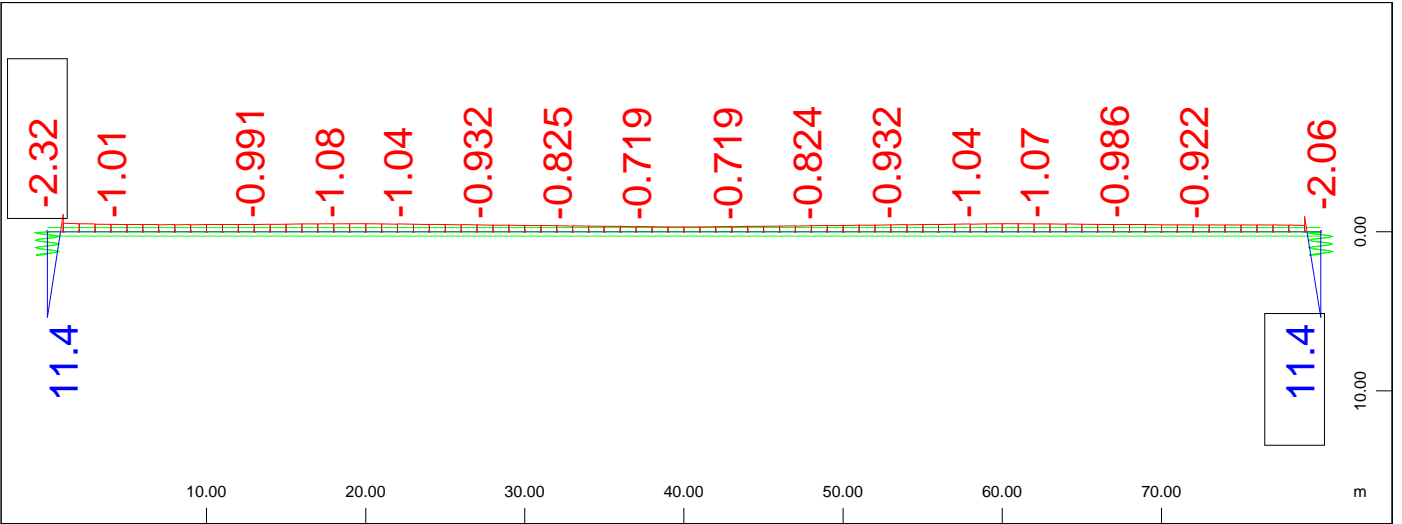
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2043 43 KINHTA, Point o1 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Max=17.8) M 1 : 474



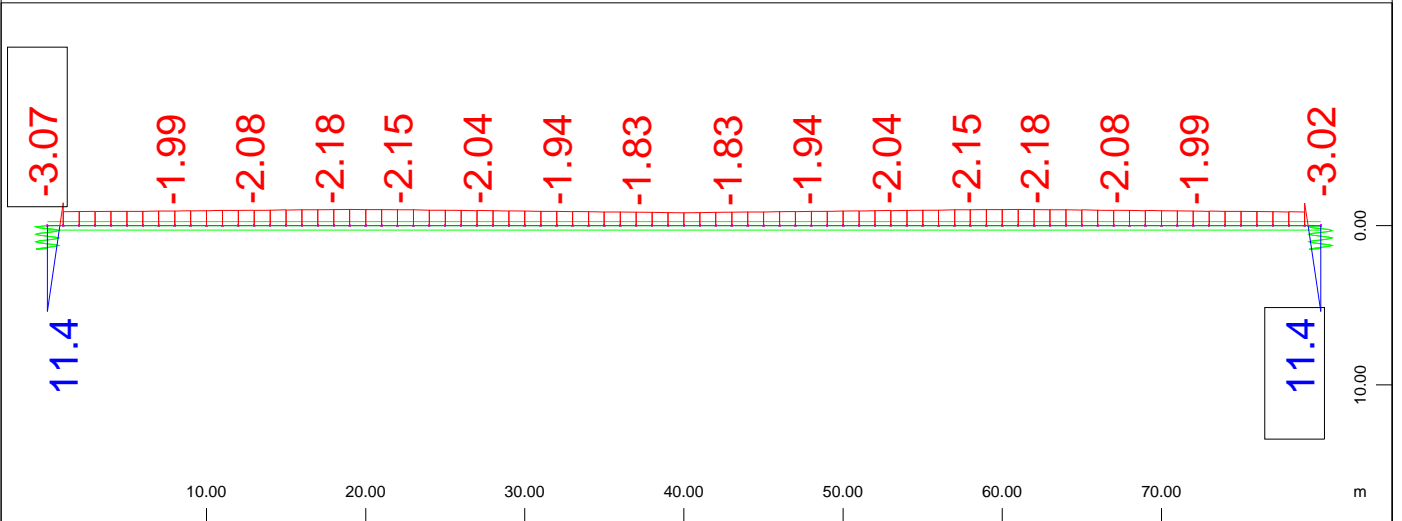
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2043 43 KINHTA, Point u1 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Max=17.8) M 1 : 474



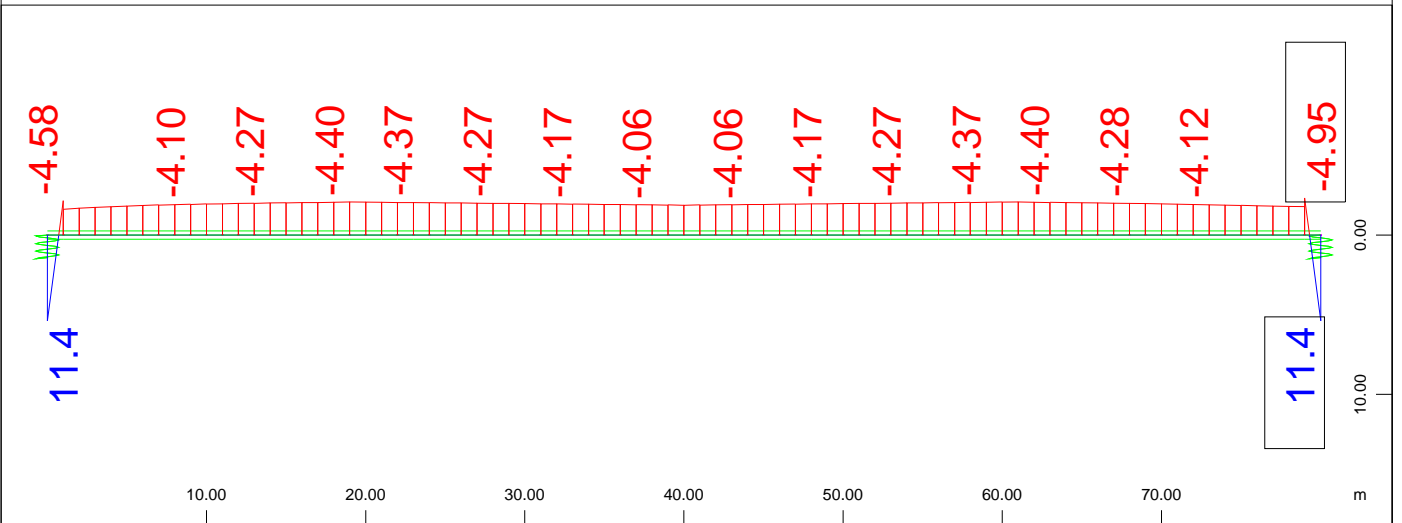
Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2043 43 KINHTA, Point u2 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Max=17.8) M 1 : 474



Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2044 44 DT=-10, Point o1 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Min=-2.32) (Max=11.4) M 1 : 474



Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2044 44 DT=-10, Point u1 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Min=-3.07) (Max=11.4) M 1 : 474



Beam Elements , Maximum tensile stress, Design Case 2044 44 DT=-10, Point u2 , 1 cm 3D = 10.0 MPa (Min=-4.95) (Max=11.4) M 1 : 474