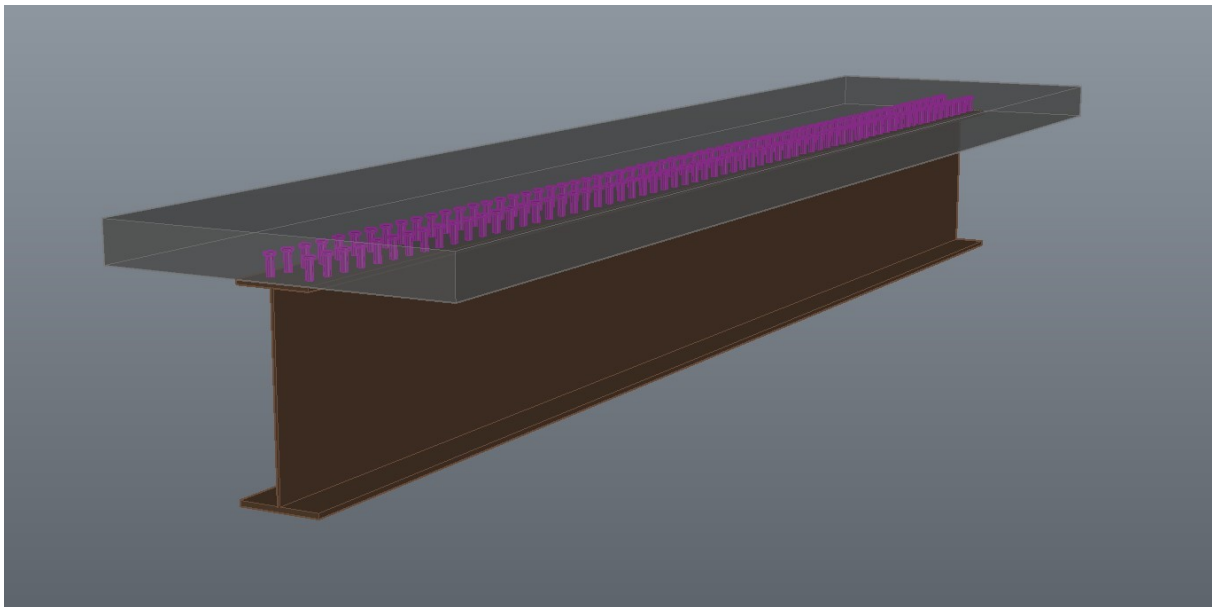




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΜΗ ΓΡΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία
Ευστράτιος Χατζίκος

EMK ΔΕ 2022/24

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

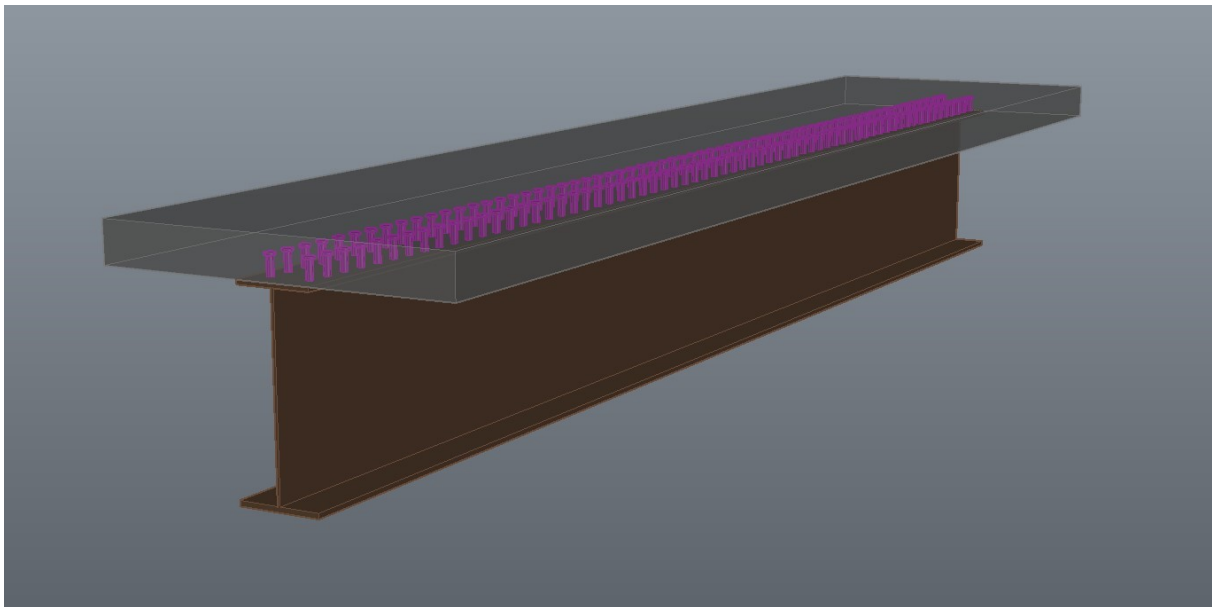
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία
Ευστράτιος Χατζίκος

EMK ΔΕ 2022/24

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022

Copyright © Ευστράτιος Χατζίκος, 2022
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Efstratios Chatzikos, 2022
All Rights Reserved

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

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

Ευστράτιος Χατζίκος (2022)

Μη Γραμμική Προσομοίωση Απόκρισης Διατμητικών Ήλων σε Πρόγραμμα Στατικής Ανάλυσης
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2022/24
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Efstratios Chatzikos (2022)

Nonlinear Modelling of the Response of Shear Studs in a Static Analysis Program
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2022/24
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Παύλο Θανόπουλο για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για όλες τις γνώσεις, υποδείξεις και συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μη φειδόμενος κόπου και χρόνου.

Θα ήθελα επίσης να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλο το εκπαιδευτικό προσωπικό της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην σύζυγο μου και τα παιδιά μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου καθώς και στους γονείς μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει έως τώρα.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2022/24

Μη Γραμμική Προσομοίωση Απόκρισης Διατμητικών Ήλων σε Πρόγραμμα Στατικής Ανάλυσης

Ευστράτιος Χατζίκος

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατμητική σύνδεση μεταξύ πλάκας σκυροδέματος και σιδηροδοκού σε μία σύμμικτη δοκό αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές συνιστώσες των συμμίκτων κατασκευών μιας και εξασφαλίζει την σύμμικτη λειτουργία σκυροδέματος και δομικού χάλυβα. Παρά την σπουδαιότητα της, τα υπάρχοντα προγράμματα στατικής ανάλυσης κατασκευών δεν διαθέτουν έναν εύκολο τρόπο ακριβούς προσομοίωσης των διατμητικών συνδέσμων, κυρίως λόγω της μη γραμμικότητας που την χαρακτηρίζει. Η έλλειψη αυτή έχει ως αποτέλεσμα η διαστασιολόγηση των διατμητικών συνδέσμων και ο έλεγχος της διατμητικής σύνδεσης σε μία σύμμικτη δοκό να γίνεται με χρήση αναλυτικών σχέσεων χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα να προσομοιωθεί η πραγματική συμπεριφορά των διατμητικών συνδέσμων και η αλληλεπίδραση τους με την πλάκα σκυροδέματος και την σιδηροδοκό.

Την έλλειψη αυτή επιχειρεί να καλύψει η παρούσα διπλωματική εργασία. Σε αυτήν εξετάζεται κατά πόσο θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν πιο σύνθετα προσομοιώματα μιας σύμμικτης κατασκευής, στα οποία οι διατμητικοί ήλοι κεφαλής προσομοιώνονται με μη γραμμικά ελατήρια.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του προτεινόμενου προσομοιώματος, εξετάστηκαν τρία παραδείγματα. Στο πρώτο εξετάστηκε μία αμφιέριστη σύμμικτη δοκός γέφυρας, στο δεύτερο μία αμφιέριστη σύμμικτη δοκός οικοδομικού έργου και στο τρίτο μία σύμμικτη γέφυρα.

Στα παραδείγματα αυτά τοποθετούνται μη γραμμικά ελατήρια ανά καθορισμένες αποστάσεις (συγκεκριμένα 0,5 m), τα οποία συνδέουν την μεταλλική διατομή με την πλάκα σκυροδέματος. Προκειμένου να προσομοιωθεί τόσο η λειτουργία όσο και οι ιδιότητες των διατμητικών ήλων, προσδίδεται στα ελατήρια γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία στην κατά μήκος τους διεύθυνση (κατακόρυφη). Στην εγκάρσια διεύθυνση των ελατηρίων (οριζόντια) τους προσδίδεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με δυσκαμψία και οριακή αντοχή που καθορίζονται από τις ιδιότητες των διατμητικών ήλων που υφίστανται στο εξεταζόμενο μήκος.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αντίστοιχων μοντέλων με θεώρηση ενιαίας διατομής πλάκας σκυροδέματος και σιδηροδοκού προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της εξεταζόμενης προσομοίωσης. Τα πλεονεκτήματα του προσομοιώματος είναι η πιο εποπτική κατανομή των διατμητικών δυνάμεων κατά μήκος των συμμίκτων μελών και η δυνατότητα διερεύνησης της συμπεριφοράς σε περιπτώσεις που δεν καλύπτονται από τον κανονισμό.



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



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2022/24

Nonlinear Modelling of the Response of Shear Studs in a Static Analysis Program

Efstratios Chatzikos

Supervisor: Pavlos Thanopoulos, Assistant Professor NTUA

ABSTRACT

The shear connection between a concrete slab and a steel beam in a composite beam is one of the most important aspects of composite structures since it ensures the composite function of concrete and structural steel. Despite its importance, existing structural static analysis programs lack an easy way to accurately model shear connectors, mainly due to their nonlinear behaviour. This deficiency results in the dimensioning of shear connectors and the design of shear connection in a composite beam being performed using analytical equations without the possibility of modelling the actual behaviour of shear connectors and their interaction with the concrete slab and the steel beam.

This deficiency is attempted to be addressed in this Diploma Thesis. It examines whether it would be possible to apply more complex models of a composite structure, in which headed shear studs are simulated with nonlinear springs.

In order to evaluate the credibility of the proposed model, three examples have been taken into consideration. In the first one, a simply supported composite beam of a bridge has been examined; in the second one, a simply supported composite beam of a building and in the third one, a composite bridge.

In these examples, nonlinear springs are placed at fixed intervals (specifically 0.5 m), which connect the steel section to the concrete slab. In order to model both the function and the properties of the shear studs, the springs are given linear elastic behaviour with very high stiffness in the longitudinal (vertical) direction. In the transverse (horizontal) direction of the springs, they shall be given elastoplastic behaviour with stiffness and ultimate strength determined by the properties of the shear studs along the length under consideration.

The results obtained are compared with the results of corresponding models considering a uniform cross-section consisting of the composite slab and steel beam in order to evaluate the reliability of the proposed model. The advantages of the model are a more supervisory distribution of shear forces along the length of the composite members and the possibility to investigate the behaviour in cases not covered by the regulations.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	1
1.2	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2.1	Σύμμικτη δοκός γέφυρας.....	2
1.2.2	Σύμμικτη δοκός οικοδομικού έργου	2
1.2.3	Παράδειγμα σύμμικτης γέφυρας.....	3
1.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	3
2	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΔΟΚΩΝ	5
2.1	Εισαγωγή.....	5
2.2	Προσδιορισμός διαμήκους διάτμησης.....	6
2.2.1	Πλαστική ανάλυση	6
2.2.2	Ελαστική ανάλυση	7
2.2.3	Ελαστοπλαστική ανάλυση.....	8
2.3	Διατμητικοί σύνδεσμοι	9
2.3.1	Διατμητικοί ήλοι κεφαλής	9
2.3.2	Αγκύρια από ράβδους οπλισμού σκυροδέματος.....	11
2.3.3	Συμπαγείς σύνδεσμοι	12
2.3.4	Γωνιακά σε συμπαγείς πλάκες.....	13
2.3.5	Σύνδεση τριβής με προεντεταμένους κοχλίες.....	13
2.3.6	Διάτρητα ελάσματα (Perfobond)	14
2.4	Απαιτούμενος αριθμός και κατανομή διατμητικών συνδέσμων κατά μήκος της δοκού.....	15
2.4.1	Πλήρης διατμητική σύνδεση	15
2.4.2	Μερική διατμητική σύνδεση.....	16
2.5	Έλεγχος της πλάκας σκυροδέματος σε διαμήκη διάτμηση.....	17
3	ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΗ ΔΟΚΟ ΓΕΦΥΡΑΣ	21
3.1	Εισαγωγή.....	21
3.2	Μόρφωση προσομοιωμάτων	23
3.2.1	Ιδιότητες υλικών.....	23
3.2.2	Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων	25
3.2.3	Στηρίξεις φορέα.....	26
3.2.4	Μοντέλο ενιαίας διατομής.....	27
3.2.5	Μοντέλο ιδεατής διατομής.....	28
3.2.6	Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις	29
3.2.7	Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων	30
3.2.8	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων	31
3.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	34

3.3.1	Μέγιστα βέλη σύμμικτης δοκού γέφυρας	35
3.3.2	Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού γέφυρας	42
3.3.3	Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού γέφυρας	49
3.4	Συμπεράσματα	55
4	ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΗ ΔΟΚΟ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ	57
4.1	Εισαγωγή.....	57
4.2	Μόρφωση προσομοιωμάτων	58
4.2.1	Ιδιότητες υλικών	58
4.2.2	Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων	60
4.2.3	Στηρίξεις φορέα	60
4.2.4	Μοντέλο ενιαίας διατομής.....	61
4.2.5	Μοντέλο ιδεατής διατομής.....	62
4.2.6	Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις	63
4.2.7	Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων	64
4.2.8	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων	64
4.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	66
4.3.1	Μέγιστα βέλη σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου	67
4.3.2	Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου.....	69
4.3.3	Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου.....	71
4.4	Συμπεράσματα	72
5	ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΗ ΓΕΦΥΡΑ	75
5.1	Εισαγωγή.....	75
5.2	Μόρφωση προσομοιωμάτων	76
5.2.1	Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων	76
5.2.2	Στηρίξεις φορέα	78
5.2.3	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων	79
5.2.4	Μοντέλο ενιαίας διατομής.....	80
5.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	81
5.3.1	Μέγιστα βέλη σύμμικτης γέφυρας	82
5.3.2	Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκών σύμμικτης γέφυρας.....	84
5.3.3	Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης γέφυρας.....	87
5.3.4	Διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για τον τυχηματικό συνδυασμό	88
5.3.5	Διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για την σεισμική φόρτιση.....	89
5.4	Συμπεράσματα	90
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93

7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΜΗΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	97

ΕΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Άνω όρια $k_{t,max}$ για τον μειωτικό συντελεστή k_t (από EN 1994-1-1:2004)	10
Πίνακας 3-1: Τιμές και θέσεις εφαρμογής φορτίων	25
Πίνακας 3-2: Συνδυασμοί φορτίσεων	25
Πίνακας 3-3: Τιμές οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίων	33
Πίνακας 3-4: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης δοκού γέφυρας που αναλύθηκαν	35
Πίνακας 3-5: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 1 έως 4	36
Πίνακας 3-6: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 5-8	36
Πίνακας 3-7: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 9-12	37
Πίνακας 3-8: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 13-16	38
Πίνακας 3-9: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 17-20	39
Πίνακας 3-10: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 21-24	40
Πίνακας 3-11: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 1 έως 4	43
Πίνακας 3-12: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 5-8	43
Πίνακας 3-13: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 9-12	44
Πίνακας 3-14: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 13-16	45
Πίνακας 3-15: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 17-20	46
Πίνακας 3-16: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 21-24	47
Πίνακας 3-17: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 5-8	50
Πίνακας 3-18: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 9-12	50
Πίνακας 3-19: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 13-16	51
Πίνακας 3-20: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 17-20	52

Πίνακας 3-21: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 21-24	53
Πίνακας 4-1: Συνδυασμοί φορτίσεων	60
Πίνακας 4-2: Τιμές οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίων.....	65
Πίνακας 4-3: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης δοκού που αναλύθηκαν	66
Πίνακας 4-4: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 1 έως 4	67
Πίνακας 4-5: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5 έως 7	67
Πίνακας 4-6: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 8 έως 10	67
Πίνακας 4-7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 1 έως 4.....	69
Πίνακας 4-8: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5 έως 7.....	69
Πίνακας 4-9: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 8 έως 10.....	69
Πίνακας 4-10: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5-7.....	71
Πίνακας 4-11: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 8-10	71
Πίνακας 5-1: Τιμές φορτίων κυκλοφορίας σύμφωνα με την πρότυπη φόρτιση 1	77
Πίνακας 5-2: Συνδυασμοί φορτίσεων	78
Πίνακας 5-3: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης γέφυρας που αναλύθηκαν.....	81
Πίνακας 5-4: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 1 και 2.....	82
Πίνακας 5-5: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης γέφυρας και μεταβολή τους ως προς τα μοντέλα 1 και 2 για τα μοντέλα 3 και 4.....	83
Πίνακας 5-6: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 1 και 2.....	84
Πίνακας 5-7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας και μεταβολή τους ως προς τα μοντέλα 1 και 2 για τα μοντέλα 3 και 4	85
Πίνακας 5-8: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 3 και 4.....	87
Πίνακας A-1: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης δοκού γέφυρας που αναλύθηκαν για τον καθορισμό της τιμής της δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους	97
Πίνακας A-2: Σύγκριση μέγιστων βελών (σε mm) των μοντέλων 5 και 6 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους.....	97
Πίνακας A-3: Σύγκριση μέγιστων βελών (σε mm) των μοντέλων 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους.....	98

Πίνακας A-4: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών τάσεων (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού των μοντέλων 5 και 6 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους	99
Πίνακας A-5: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών τάσεων (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού των μοντέλων 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους	100
Πίνακας A-6: Σύγκριση μέγιστων διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων των μοντέλων 5 και 6 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας στη διαμήκη διεύθυνση τους	101
Πίνακας A-7: Σύγκριση μέγιστων διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων των μοντέλων 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας στη διαμήκη διεύθυνση τους	102

ΕΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας	2
Σχήμα 1-2: Διατομή σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου.....	3
Σχήμα 1-3: Τυπική διατομή σύμμικτης γέφυρας.....	3
Σχήμα 2-1: Κατακόρυφη και διαμήκης διάτμηση (από Βάγιας, 2018)	5
Σχήμα 2-2: (α) πλήρης, (β) μερική και (γ) μηδενική διατμητική σύνδεση (από Βάγιας, 2018).....	6
Σχήμα 2-3: Ισορροπία οριζόντιων δυνάμεων τμημάτων δοκού (από Βάγιας, 2018).....	7
Σχήμα 2-4: Διαμήκης διάτμηση σε περιοχές με ανελαστική συμπεριφορά (από Βάγιας, 2018)	8
Σχήμα 2-5: Διαστάσεις συνήθως διατμητικών ήλων κεφαλής σε mm (από Βάγιας, 2018).....	9
Σχήμα 2-6: Αγκύρια από ράβδους οπλισμού σκυροδέματος (από Βάγιας, 2018)	11
Σχήμα 2-7: Τύποι συμπαγών συνδέσμων και γεωμετρικοί περιορισμοί (από Βάγιας, 2018).....	12
Σχήμα 2-8: Γωνιακά ως διατμητικοί σύνδεσμοι και κατασκευαστικές τους απαιτήσεις (από Βάγιας, 2018)	13
Σχήμα 2-9: Σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες (από Βάγιας, 2018).....	13
Σχήμα 2-10: Διάτρητο έλασμα (από Βάγιας, 2018).....	14
Σχήμα 2-11: Τομές ελέγχου της διαμήκου διάτμησης (από Βάγιας, 2018).....	17
Σχήμα 3-1: Διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας	21
Σχήμα 3-2: Ιδιότητες δομικού χάλυβα S 355	23
Σχήμα 3-3: Αντοχή δομικού χάλυβα S 355	23
Σχήμα 3-4: Ιδιότητες σκυροδέματος C 30/37	24
Σχήμα 3-5: Αντοχή σκυροδέματος C 30/37	24
Σχήμα 3-6: Συνθήκες στήριξης άρθρωσης φορέα.....	26
Σχήμα 3-7: Συνθήκες στήριξης κύλισης φορέα.....	26
Σχήμα 3-8: Ενιαία διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020	27
Σχήμα 3-9: 3D απεικόνιση μοντέλου ενιαίας διατομής στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	27
Σχήμα 3-10: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο ιδεατής διατομής σύμμικτης δοκού γέφυρας	28
Σχήμα 3-11: 3D απεικόνιση μοντέλου ιδεατής διατομής στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	29
Σχήμα 3-12: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις	29
Σχήμα 3-13: Εισαγωγή κινηματικών δεσμεύσεων μεταξύ σιδηροδοκού και πλάκας σκυροδέματος	30
Σχήμα 3-14: Ιδιότητες γραμμικού ελατηρίου στην διαμήκη διεύθυνση	30
Σχήμα 3-15: Ιδιότητες γραμμικού ελατηρίου στην εγκάρσια διεύθυνση	31
Σχήμα 3-16: Δέσμευση στροφής περί τον άξονα x στην πλάκα σκυροδέματος.....	31

Σχήμα 3-17: Εισαγωγή οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	33
Σχήμα 3-18: Κώδικας δημιουργίας φόρτισης για μεμονωμένο φορτίο στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	34
Σχήμα 3-19: Κώδικας δημιουργίας συνδυασμού φορτίσεων στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020	34
Σχήμα 3-20: Κώδικας μη γραμμικής ανάλυσης στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	34
Σχήμα 3-21: Βέλη σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1023	41
Σχήμα 3-22: Μέση τιμή των $\Delta\delta_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας	42
Σχήμα 3-23: Μέση τιμή των $\Delta\delta_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.....	42
Σχήμα 3-24: Εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1023	48
Σχήμα 3-25: Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας	49
Σχήμα 3-26: Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.....	49
Σχήμα 3-27: Διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 14 και την φόρτιση 1031	54
Σχήμα 3-28: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1031 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας.....	54
Σχήμα 3-29: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1031 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας	55
Σχήμα 4-1: Διατομή σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου.....	57
Σχήμα 4-2: Ιδιότητες δομικού χάλυβα S 275	58
Σχήμα 4-3: Αντοχή δομικού χάλυβα S 275	59
Σχήμα 4-4: Ιδιότητες σκυροδέματος C 25/30	59
Σχήμα 4-5: Αντοχή σκυροδέματος C 25/30	60
Σχήμα 4-6: Συνθήκες στήριξης άρθρωσης φορέα	61
Σχήμα 4-7: Συνθήκες στήριξης κύλισης φορέα.....	61
Σχήμα 4-8: Ενιαία διατομή σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	62
Σχήμα 4-9: 3D απεικόνιση μοντέλου ενιαίας διατομής στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	62
Σχήμα 4-10: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο ιδεατής διατομής σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου	63
Σχήμα 4-11: 3D απεικόνιση μοντέλου ιδεατής διατομής στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	63
Σχήμα 4-12: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις	63
Σχήμα 4-13: Εισαγωγή οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	66

Σχήμα 4-14: Βέλη σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1005	68
Σχήμα 4-15: Μέση τιμή των $\Delta\delta_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας	68
Σχήμα 4-16: Μέση τιμή των $\Delta\delta_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.....	68
Σχήμα 4-17: Εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1005	70
Σχήμα 4-18: Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας	70
Σχήμα 4-19: Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.....	70
Σχήμα 4-20: Διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 9 και την φόρτιση 1005	71
Σχήμα 4-21: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1005 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας.....	72
Σχήμα 4-22: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1005 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας	72
Σχήμα 5-1: Τυπική διατομή σύμμικτης γέφυρας.....	75
Σχήμα 5-2: Ιδιότητες ελατηρίων στις στηρίξεις	78
Σχήμα 5-3: Δέσμευση στροφής περί τον άξονα x.....	79
Σχήμα 5-4: 3D απεικόνιση μοντέλου γέφυρας με μη γραμμικά ελατήρια στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020	80
Σχήμα 5-5: Ενιαία διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020	80
Σχήμα 5-6: Ρυθμίσεις ορθότροπης συμπεριφοράς επιφανειακών στοιχείων πλάκας σκυροδέματος.....	81
Σχήμα 5-7: 3D απεικόνιση μοντέλου γέφυρας με ενιαία διατομή στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020.....	81
Σχήμα 5-8: Βέλη σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1034.....	84
Σχήμα 5-9: Εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκών σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1034	86
Σχήμα 5-10: Διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1030	88
Σχήμα 5-11: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση y για τον τυχαίο συνδυασμό	88
Σχήμα 5-12: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση x για τον τυχαίο συνδυασμό	89
Σχήμα 5-13: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση y για την σεισμική φόρτιση	89
Σχήμα 5-14: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση x για την σεισμική φόρτιση	90

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξεύρεση και επαρκής τεκμηρίωση ενός τρόπου προσομοίωσης διατμητικών συνδέσμων σε ένα τυπικό πρόγραμμα στατικής ανάλυσης του εμπορίου. Οι διατμητικοί σύνδεσμοι χρησιμοποιούνται για την διατμητική σύνδεση της μεταλλικής διατομής και της πλάκας σκυροδέματος σε μια σύμμικτη δοκό. Στο πλαίσιο της προσομοίωσης διατμητικών συνδέσμων εξετάστηκε η προσομοίωση διατμητικών ήλων στο πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών SOFiSTiK 2020.

Η υπόψη προσομοίωση έγινε με τοποθέτηση κατακόρυφων ελατηρίων ανά 0,50 m τα οποία συνδέουν την μεταλλική διατομή με την πλάκα σκυροδέματος. Προκειμένου να προσομοιωθεί τόσο η λειτουργία όσο και οι ιδιότητες των διατμητικών ήλων, προσδίδεται στα ελατήρια γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία στην αξονική τους διεύθυνση, ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση προσδίδεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με δυσκαμψία και οριακή αντοχή τα αντίστοιχα της ομάδας των διατμητικών ήλων που έχουν τοποθετηθεί σε μήκος 0,5 m.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η τεκμηρίωση της προσομοίωσης των διατμητικών ήλων με ελατήρια πραγματοποιήθηκε με τον έλεγχο δύο διαφορετικών μοντέλων συμμίκτων δοκών. Το πρώτο μοντέλο, αφορά σε σύμμικτη δοκό γέφυρας ενώ το δεύτερο μοντέλο αφορά σε σύμμικτη δοκό οικοδομικού έργου. Τα αποτελέσματα επίλυσης του κάθε μοντέλου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την επίλυση του ίδιου φορέα με την κλασσική θεώρηση της ενιαίας διατομής. Αφού διαπιστώθηκε η επαρκής σύγκλιση των αποτελεσμάτων των θεωρητικών μοντέλων με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης των διατμητικών ήλων με ελατήρια, η υπόψη προσομοίωση εφαρμόστηκε και σε ένα μοντέλο σύμμικτης γέφυρας. Αναλυτικότερα τα εξεταζόμενα αντικείμενα ανά κεφάλαιο έχουν ως ακολούθως:

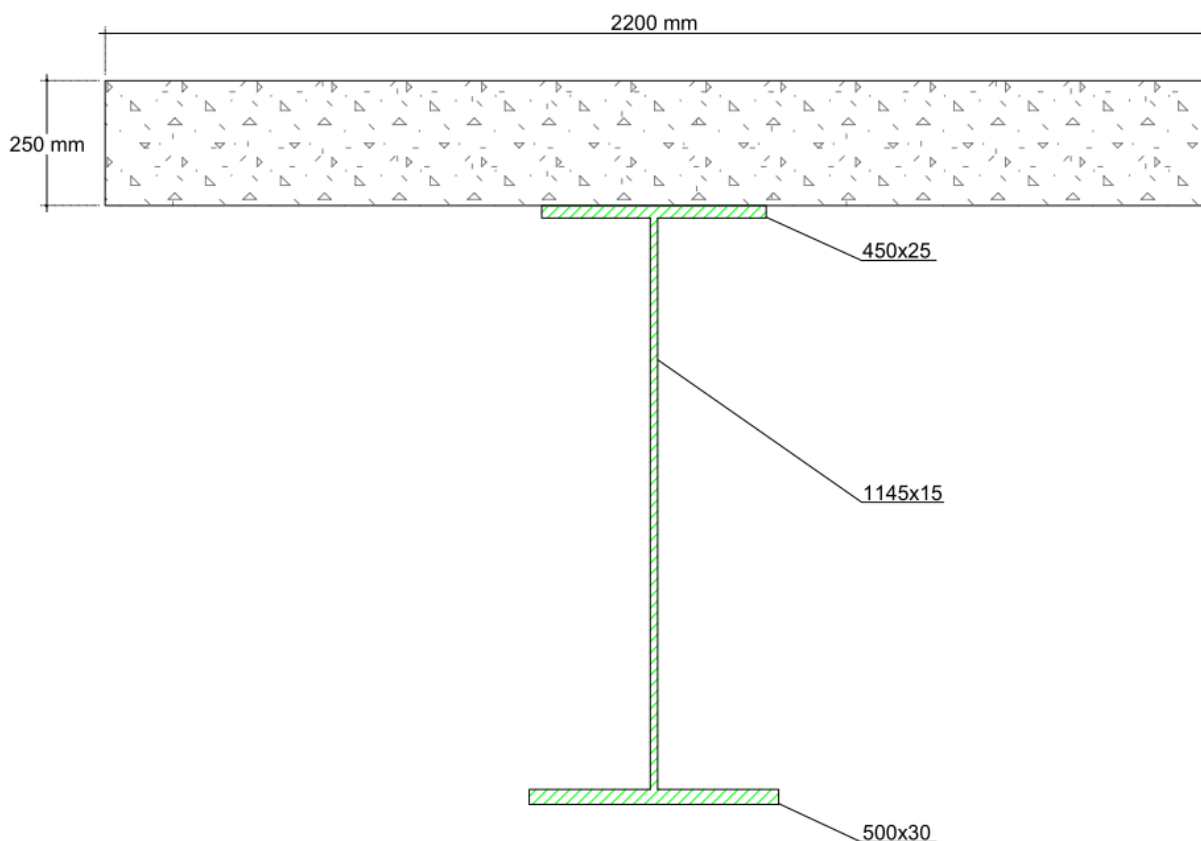
- Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια θεωρητική ανασκόπηση της διατμητικής σύνδεσης συμμίκτων δοκών καθώς επίσης και της μεθόδου υπολογισμού της διατμητικής δυσκαμψίας των διατμητικών ήλων όπως αυτή προτάθηκε από τους He et al.[12].
- Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο της σύμμικτης δοκού γέφυρας.
- Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου.

- Στο 5^ο κεφάλαιο εφαρμόζεται το μοντέλο προσομοίωσης σε ένα παράδειγμα σύμμικτης γέφυρας.
- Στο 6^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.
- Στο παράρτημα Α παρουσιάζεται η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την βέλτιστη επιλογή της τιμής της δυσκαμψίας στη κατακόρυφη διεύθυνση των μη γραμμικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Στις επόμενες υποπαραγράφους παρατίθενται λεπτομέρειες των μοντέλων που αναλύονται στα κεφάλαια 3 έως 5.

1.2.1 Σύμμικτη δοκός γέφυρας

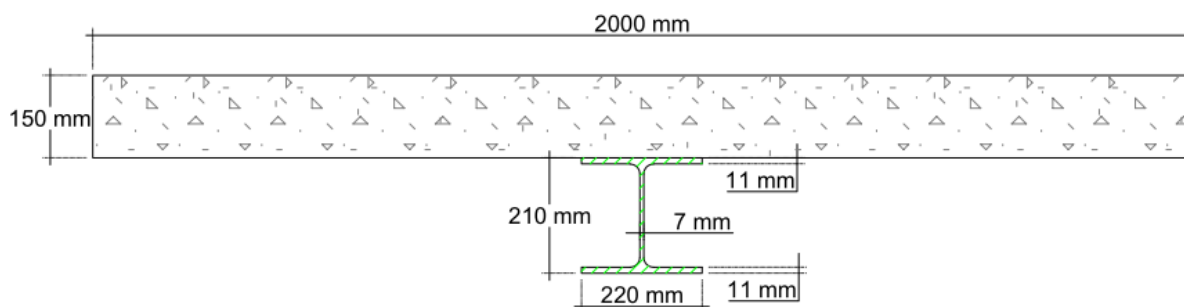
Το μοντέλο της σύμμικτης δοκού γέφυρας αποτελείται από μία αμφιέριστη σύμμικτη δοκό μήκους 24 m. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πλάτος 2.200 mm και πάχος 250 mm και επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C 30/37. Για την μεταλλική διατομή επιλέχθηκε χάλυβας ποιότητας S 355. Το άνω πέλμα της μεταλλικής διατομής έχει διαστάσεις 450 mm · 25 mm, το κάτω πέλμα 500 mm · 30 mm και ο κορμός 1.145 mm · 15 mm. Στο Σχήμα 1-1 δίνεται η διατομή της σύμμικτης δοκού γέφυρας.



Σχήμα 1-1: Διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας

1.2.2 Σύμμικτη δοκός οικοδομικού έργου

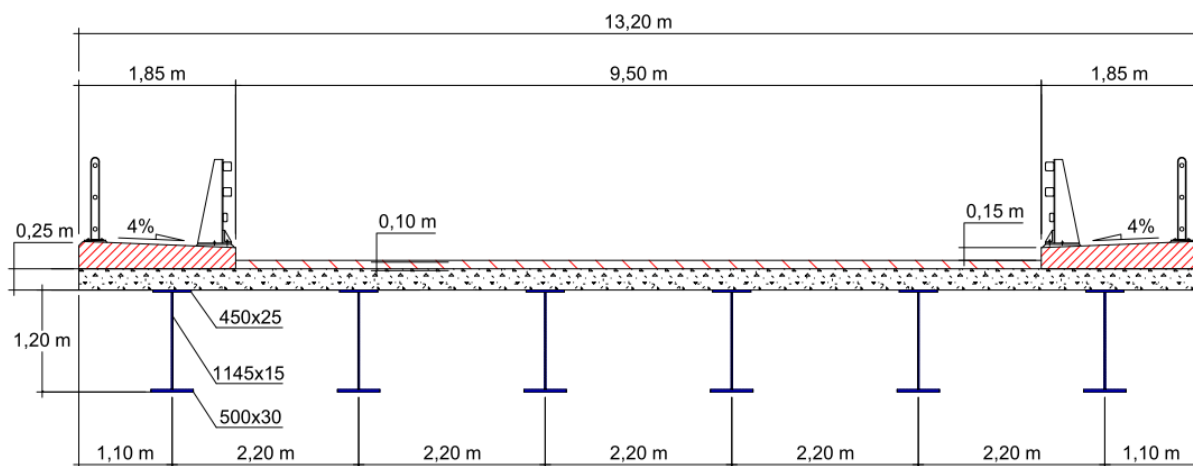
Το μοντέλο της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου αποτελείται από μία αμφιέριστη δοκό μήκους 8 m. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πλάτος 2.000 mm και πάχος 150 mm και επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C 25/30. Για την μεταλλική διατομή επιλέχθηκε η πρότυπη διατομή HEA 220 και χάλυβας ποιότητας S 275. Στο Σχήμα 1-2 παρουσιάζεται η διατομή της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου.



Σχήμα 1-2: Διατομή σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου

1.2.3 Παράδειγμα σύμμικτης γέφυρας

Για τον πληρέστερο έλεγχο της προσομοίωσης των διατμητικών ήλων με μη γραμμικά ελατήρια, αλλά και για την διερεύνηση των δυνατοτήτων της μεθόδου, θεωρήθηκε σκόπιμη η εφαρμογή της υπόψη προσομοίωσης και σε ένα μοντέλο σύμμικτης γέφυρας. Η τυπική διατομή της υπόψη γέφυρας αποτελείται από 6 σύμμικτες δοκούς ίδιες με αυτήν που περιγράφεται στην §1.2.1. Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 24 m ενώ το πλάτος της 13,2 m. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πλάτος 13,2 m και πάχος 250 mm και επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C 30/37. Για τις μεταλλικές διατομές επιλέχθηκε χάλυβας ποιότητας S 355. Το άνω πέλμα κάθε μεταλλικής διατομής έχει διαστάσεις 450 mm · 25 mm, το κάτω πέλμα 500 mm · 30 mm και ο κορμός 1.145 mm · 15 mm. Άνωθεν της πλάκας σκυροδέματος και σε πλάτος 9,50 m υφίστανται ασφαλτική στρώση πάχους 100 mm. Εκατέρωθεν της ασφαλτικής στρώσης υφίστανται πεζοδρόμια από σκυρόδεμα, μεταβλητού πάχους και με κλίση 4% προς το εσωτερικό της διατομής. Το ελάχιστο πάχος τους ανέρχεται σε 250 mm. Σε κάθε πεζοδρόμιο εδράζεται προς την εξωτερική τους πλευρά κιγκλίδωμα πεζών και προς την εσωτερική τους πλευρά σύστημα αναχαίτισης οχημάτων. Στο Σχήμα 1-3 παρουσιάζεται η τυπική διατομή της εξεταζόμενης γέφυρας.



Σχήμα 1-3: Τυπική διατομή σύμμικτης γέφυρας

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα τα βιβλία των μαθημάτων «Γεφυροποιία Ι» (Βάγιας κ.α. [1]) και «Σύμμικτες κατασκευές» (Βάγιας [2]). Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν από το EN 1992-1-1 [6] και από το EN 1993-1-1 [7] για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα αντίστοιχα. Για τις βασικές αρχές σχεδιασμού που τηρήθηκαν κατά την επίλυση των μοντέλων, ελήφθησαν υπόψη το EN 1990 [4] καθώς και τα ερμηνευτικά σχόλια επί του υπόψη κανονισμού από τον Ερμόπουλο [3]. Κατά την μόρφωση και ανάλυση των μοντέλων

χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς το EN 1994-1-1 [8] και EN 1994-2 [9] ενώ τα φορτία κυκλοφορίας της γέφυρας ελήφθησαν από το EN 1991-2 [5] λαμβάνοντας υπόψη τα ερμηνευτικά σχόλια επί των υπόψη φορτίων όπως διατυπώθηκαν από τον Ερμόπουλο [3] και τους Βάγια κ.α. [1]. Για τον έλεγχο της σύμμικτης γέφυρας έναντι σεισμικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν το EN 1998-1 [10] και το EN 1998-2 [11]. Τέλος για τον υπολογισμό της διατμητικής δυσκαμψίας των διατμητικών ήλων χρησιμοποιήθηκε η σχέση που προτάθηκε από τους He et al [12].

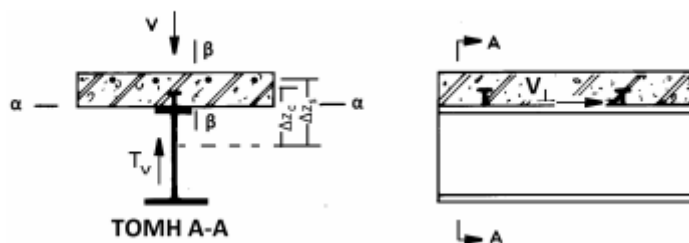
2 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Μια σύμμικτη δοκός αποτελείται από μία πλάκα σκυροδέματος και μία χαλύβδινη διατομή. Η πλάκα σκυροδέματος μπορεί να τοποθετείται πάνω σε ένα χαλυβδόφυλλο ή να εδράζεται απευθείας στην χαλύβδινη διατομή. Προκειμένου να επιτευχθεί η σύμμικτη λειτουργία της δοκού, απαιτείται η σύνδεση της πλάκας σκυροδέματος και της χαλύβδινης διατομής με μηχανικά μέσα τα οποία ονομάζονται διατμητικοί σύνδεσμοι. Οι διατμητικοί σύνδεσμοι:

- Αναλαμβάνουν την παραλαβή της διατμητικής ροής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια μεταξύ χαλύβδινης διατομής και σκυροδέματος.
- Εμποδίζουν την ολίσθηση μεταξύ των δύο στοιχείων και
- εξασφαλίζουν την κοινή σύμμικτη λειτουργία.

Η διάτμηση οφείλεται στις τέμνουσες δυνάμεις V και στην στρέψη, αν υπάρχει στρεπτική ροπή. Στον φορέα αναπτύσσονται δύο είδη διατμήσεων, η κατακόρυφη διάτμηση T_v και η διαμήκης διάτμηση T_l (Σχήμα 2-1). Η πρώτη εξασφαλίζει την συνθήκη ισορροπίας των δυνάμεων ως προς τον κατακόρυφο άξονα ενώ η δεύτερη απαιτείται για λόγους συμβιβαστού των παραμορφώσεων μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος.

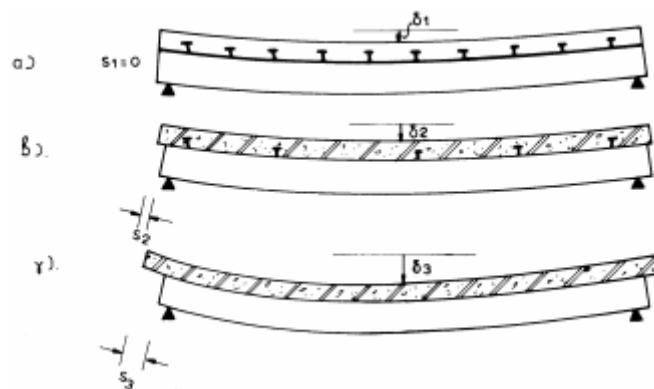


Σχήμα 2-1: Κατακόρυφη και διαμήκης διάτμηση (από Βάγιας, 2018)

Οι διατμητικοί σύνδεσμοι παραλαμβάνουν την διαμήκη διάτμηση που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια χάλυβα – σκυροδέματος (τομή α-α στο Σχήμα 2-1) ενώ την διαμήκη διάτμηση που αναπτύσσεται στα εξέχοντα τμήματα της πλάκας παραλαμβάνουν το σκυρόδεμα και ο εγκάρσιος οπλισμός της πλάκας (τομή β-β στο Σχήμα 2-1).

Ανάλογα με το πλήθος των τοποθετούμενων διατμητικών συνδέσμων διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις διατμητικής σύνδεσης:

- Πλήρης διατμητική σύνδεση: Τοποθετείται επαρκής αριθμός διατμητικών συνδέσμων ώστε να παραληφθεί όλη η διαμήκης διάτμηση. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει σχετική ολίσθηση μεταξύ χαλύβδινης διατομής και πλάκας σκυροδέματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2 (α).
- Μερική διατμητική σύνδεση: Τοποθετούνται λιγότεροι διατμητικοί σύνδεσμοι από αυτούς που απαιτούνται για πλήρη διατμητική σύνδεση. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται σχετική ολίσθηση μεταξύ χαλύβδινης διατομής και πλάκας σκυροδέματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2 (β), η οποία όμως είναι μικρότερη από αυτήν που θα εμφανιζόταν απουσία διατμητικών συνδέσμων [Σχήμα 2-2 (γ)].



Σχήμα 2-2: (α) πλήρης, (β) μερική και (γ) μηδενική διατμητική σύνδεση (από Βάγιας, 2018)

Για να επιτευχθεί η διατμητική σύνδεση μιας σύμμικτης δοκού απαιτείται να πραγματοποιηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Προσδιορισμός της διαμήκουσ διάτμησης.
- Επιλογή τύπου διατμητικών συνδέσμων και προσδιορισμός της αντοχής τους.
- Επιλογή πλήρους ή μερικής διατμητικής σύνδεσης και προσδιορισμός του απαιτούμενου αριθμού συνδέσμων.
- Κατανομή των διατμητικών συνδέσμων κατά μήκος της δοκού.
- Έλεγχος της πλάκας σκυροδέματος σε διαμήκη διάτμηση.

Τα παραπάνω βήματα παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

2.2 Προσδιορισμός διαμήκουσ διάτμησης

Η διαμήκουσ διάτμηση μπορεί να υπολογιστεί είτε με πλαστική ανάλυση είτε με ελαστική ανάλυση είτε με ελαστοπλαστική ανάλυση.

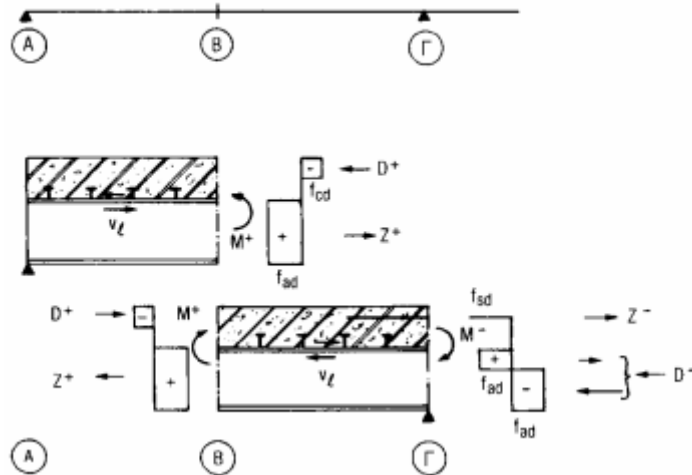
2.2.1 Πλαστική ανάλυση

Για να προσδιορίσουμε την διαμήκη διάτμηση με πλαστική ανάλυση θα πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να αναφερόμαστε σε οικοδομικό έργο.
- Οι εξεταζόμενες σύμμικτες διατομές να είναι κατηγορίας 1 ή 2.

- Οι διατμητικοί σύνδεσμοι να έχουν όλκιμη συμπεριφορά.
- Να εξετάζεται η οριακή κατάσταση αστοχίας (όχι κόπωσης).

Για τον προσδιορισμό της διαμήκου διάτμησης εξετάζεται η ισορροπία εντός τμήματος της δοκού, στα άκρα του οποίου υπάρχει είτε μηδενική ροπή (Α), είτε θετική ροπή (Β), είτε αρνητική ροπή (Γ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Ισορροπία οριζόντιων δυνάμεων τμημάτων δοκού (από Βάγιας, 2018)

Στο τμήμα ΑΒ μεταξύ μηδενικών και θετικών ροών η διαμήκης διάτμηση δίνεται από την εξ. (2-1).

$$V_l = \Sigma T_l = D^+ = Z^+ \quad (2-1)$$

Σε τμήμα ΒΓ μεταξύ θετικών και αρνητικών ροών η διαμήκης διάτμηση δίνεται από την εξ. (2-2).

$$V_l = \Sigma T_l = D^+ + Z^- = Z^+ + Z^- \quad (2-2)$$

Τέλος σε τμήμα ΓΔ μεταξύ αρνητικών και μηδενικών ροών (περίπτωση προβόλων) η διαμήκης διάτμηση δίνεται από την εξ. (2-3).

$$V_l = \Sigma T_l = Z^- \quad (2-3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:

$D^+ = A_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}$ Η θλιπτική δύναμη σκυροδέματος και οπλισμού πλάκας για θετική ροπή $M_{pl,Rd}^+$,

$Z^+ = A_a \cdot f_{ya}$ Η εφελκυστική δύναμη σιδηροδοκού για θετική ροπή $M_{pl,Rd}^+$,

$Z^- = A_s \cdot f_{sd}$ Η εφελκυστική δύναμη οπλισμού πλάκας για αρνητική ροπή $M_{pl,Rd}^-$,

$A_c =$ Το εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος,

$A_s =$ Το εμβαδόν της διατομής των οπλισμών και

$A_a =$ Το εμβαδόν της διατομής της σιδηροδοκού.

2.2.2 Ελαστική ανάλυση

Η ελαστική ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις δοκών όπου η δρώσα ροπή σχεδιασμού M_{Ed} είναι μικρότερη ή ίση από την ελαστική ροπή αντοχής $M_{el,Rd}$. Σε αυτή την περίπτωση,

λόγω των επιβαλλόμενων τεμνουσών δυνάμεων, αναπτύσσεται σε κάθε οριζόντια ή κατακόρυφη τομή διατμητική ροή η οποία δίνεται από την εξ. (2-4).

$$v_l = \frac{V_{Ed} \cdot S_c}{I_1} \quad (2-4)$$

όπου:

- v_l : Η διατμητική ροή (δύναμη ανά μονάδα μήκους),
 V_{Ed} : Η δρώσα τέμνουσα δύναμη,
 I_1 : Η ροπή αδρανείας της αρηγμάτωτης διατομής και
 S_c : Η στατική ροπή της πλάκας σκυροδέματος ως προς το κέντρο βάρους της σύμμικτης διατομής η οποία δίνεται από την εξ. (2-5).

$$S_c = \frac{A_c}{\eta} \cdot \Delta z_c + A_s \cdot \Delta z_s \quad (2-5)$$

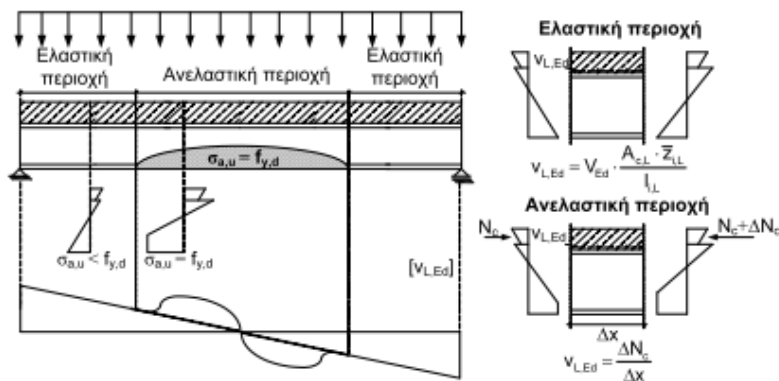
όπου:

- Δz_c και Δz_s : Οι αποστάσεις των κέντρων βάρους πλάκας σκυροδέματος και οπλισμού από το κέντρο βάρους της σύμμικτης διατομής αντιστοίχως.

Η διαμήκης διάτμηση υπολογίζεται με διαδοχική ολοκλήρωση της διαμήκου ροής εντός των κρίσιμων μηκών της δοκού. Ως κρίσιμα μήκη μιας σύμμικτης δοκού λαμβάνονται τα τμήματα μεταξύ διαδοχικών χαρακτηριστικών διατομών δηλαδή διατομών όπου είτε έχουμε μηδενισμό των τεμνουσών δυνάμεων, είτε αλλαγή της διατομής της σύμμικτης δοκού είτε τέλος επιβολή συγκεντρωμένων φορτίων.

2.2.3 Ελαστοπλαστική ανάλυση

Όταν έχουμε διατομές κατηγορίας 1 ή 2 και για την οριακή κατάσταση αστοχίας επιτρέπεται η δρώσα ροπή M_{Ed} να είναι μεγαλύτερη της ελαστικής $M_{el,Rd}$. Στην περίπτωση αυτή τμήματα της διατομής συμπεριφέρονται ανελαστικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4: Διαμήκης διάτμηση σε περιοχές με ανελαστική συμπεριφορά (από Βάγιας, 2018)

Στην ανελαστική περιοχή η διαμήκης διάτμηση εντός μήκους Δx δίνεται από την εξ. (2-6).

$$V_l = \frac{\Delta N_{c+s}}{\Delta x} \quad (2-6)$$

Οι δυνάμεις N της εξ. (2-6) βρίσκονται με ολοκλήρωση των διαγραμμάτων τάσεων ή προσεγγιστικά ως εξής:

- Στην ελαστική ροπή M_{el} η δύναμη είναι N_{el} .

- Για ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής ροπής $M_{pl,Rd}$ η μέγιστη δύναμη είναι N_f .
- Για δρώσα ροπή M_{Ed} μεταξύ των M_{el} και $M_{pl,Rd}$ εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή και η δύναμη N δίνεται από την εξ. (2-7):

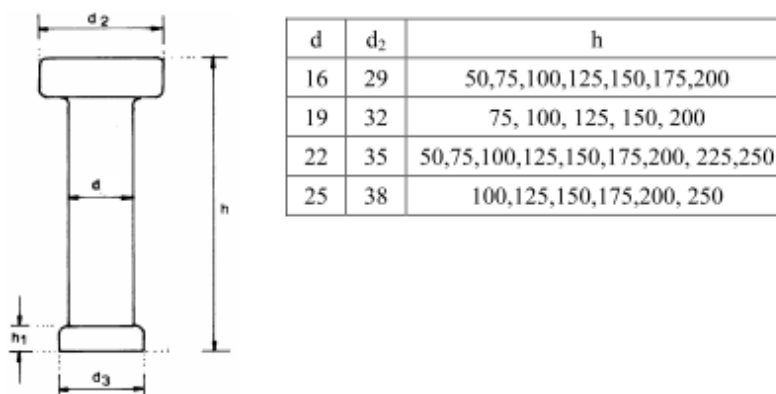
$$N = N_{el} + \frac{M_{Ed} - M_{el}}{M_{pl,Rd} - M_{el}} \cdot (N_f - N_{el}) \quad (2-7)$$

2.3 Διατμητικοί σύνδεσμοι

Οι διατμητικοί σύνδεσμοι είναι μηχανικά μέσα τα οποία συνδέουν την πλάκα σκυροδέματος και την χαλύβδινη διατομή εξασφαλίζοντας την σύμμικτη λειτουργία της δοκού. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι διατμητικών συνδέσμων καθώς και οι εξισώσεις υπολογισμού της οριακής αντοχής τους P_{Rd} .

2.3.1 Διατμητικοί ήλοι κεφαλής

Οι διατμητικοί ήλοι κεφαλής αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο διατμητικών συνδέσμων. Η ύπαρξη της κεφαλής του ήλου δεν επιτρέπει την αποκόλληση της πλάκας σκυροδέματος από την σιδηροδοκό. Στο Σχήμα 2-5 δίνονται σε mm οι διαστάσεις των διατμητικών ήλων που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα.



Σχήμα 2-5: Διαστάσεις συνήθως διατμητικών ήλων κεφαλής σε mm (από Βάγιας, 2018)

Κατ' ελάχιστον θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Ύψος ήλου $h \geq 3 \cdot d$.
- Διάμετρος κεφαλής $d_2 \geq 1,5 \cdot d$.
- Ύψος κεφαλής $\geq 0,4 \cdot d$.

Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει ένας ήλος εξαρτάται από την αντοχή του ήλου σε διάτμηση και από την αντοχή του σκυροδέματος σε «σύνθλιψη άντυγας». Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο η οριακή αντοχή P_{Rd} του ήλου εντός συμπαγούς πλάκας σκυροδέματος δίνεται από την ελάχιστη τιμή των εξ. (2-8) και (2-9).

$$P_{Rd} = 0,8 \cdot f_u \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) / \gamma_v \quad (2-8)$$

$$P_{Rd} = 0,29 \cdot a \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} / \gamma_v \quad (2-9)$$

όπου:

d = διάμετρος κορμού του ήλου,

f_u = ονομαστική τιμή εφελκυστικής αντοχής του ήλου ≤ 500 MPa,

f_{ck}, E_{cm} = θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος,

$a = 0,2 \cdot \left(\frac{h}{d} + 1\right)$ για $3 \leq \frac{h}{d} \leq 4$,

$a = 1$ για $4 \leq \frac{h}{d}$,

h = ύψος ήλου και

$\gamma_v = 1,25$ επιμέρους συντελεστής ασφαλείας.

Σε περίπτωση που δεν έχουμε συμπαγή πλάκα αλλά σύμμικτη πλάκα από τραπεζοειδές χαλυβδόφυλλο και πλάκα σκυροδέματος τότε η οριακή αντοχή P_{Rd} του ήλου δίνεται από την ελάχιστη τιμή των εξ. (2-8) και (2-9) πολλαπλασιασμένη με έναν μειωτικό συντελεστή. Ο υπόψη μειωτικός συντελεστής εξαρτάται από την διεύθυνση των αυλακώσεων των χαλυβδόφυλλων σε σχέση με την διεύθυνση της δοκού. Συγκεκριμένα:

- Για χαλυβδόφυλλα με αυλακώσεις παράλληλες στην δοκό ο μειωτικός συντελεστής k_l δίνεται από την εξ. (2-10).

$$k_l = 0,6 \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1\right) \leq 1 \quad (2-10)$$

όπου:

b_0 = μέσο πλάτος αυλακώσεων τουλάχιστον ίσο με 50 mm,

h_p = ύψος μεταλλικού φύλλου και

h_{sc} = ύψος διατμητικού ήλου $\leq h_p + 75$ mm.

- Για χαλυβδόφυλλα με αυλακώσεις κάθετες στην δοκό ο μειωτικός συντελεστής k_t δίνεται από την εξ. (2-11).

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{N_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1\right) \leq 1 \quad (2-11)$$

όπου N_r ο αριθμός των διατμητικών ήλων σε κάθε αυλάκωση στη σύνδεση με τη δοκό. Πάντοτε πρέπει να τοποθετείται τουλάχιστον ένας ήλος σε κάθε αυλάκωση πάνω από τη δοκό αλλά το N_r θα λαμβάνεται πάντα ≤ 2 . Ο συντελεστής k_t δεν θα πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερος από την τιμή $k_{t,max}$ όπως την δίνει ο Πίνακας 2-1:

Πίνακας 2-1: Άνω όρια $k_{t,max}$ για τον μειωτικό συντελεστή k_t (από EN 1994-1-1:2004)

Αριθμός διατμητικών ήλων ανά νεύρωση	Πάχος t του χαλύβδινου φύλλου (mm)	Ήλοι με διάμετρο μέχρι 20 mm και συγκολλημένοι διά μέσου του χαλυβδόφυλλου	Χαλυβδόφυλλο με σπές και ήλοι διαμέτρου 19 mm ή 22 mm
$N_r=1$	$\leq 1,0$	0,85	0,75
	$> 1,0$	1,0	0,75
$N_r=2$	$\leq 1,0$	0,70	0,60
	$> 1,0$	0,8	0,60

- Η αντοχή ακραίων ήλων συγκολλημένων διαμέσου χαλυβδόφυλλων δίνεται από την ελάχιστη τιμή των εξ. (2-8) και (2-9) αλλά θα πρέπει να είναι μικρότερη της αντοχής $P_{pb,Rd}$ των χαλυβδόφυλλων σε σύνθλιψη η οποία δίνεται από την εξ. (2-12).

$$P_{pb,Rd} = k_{\phi} \cdot d \cdot t \cdot f_{yp,d} \quad (2-12)$$

όπου:

$$k_{\phi} = 1 + \frac{a}{d_{d0}} \leq 6$$

d_{d0} = διάμετρος ραφής στη βάση του ήλου λαμβανομένη 1,10 φορές τη διάμετρο του ήλου,

a = απόσταση του τελευταίου ήλου από την άκρη του χαλυβδόφυλλου και

t = πάχος του χαλυβδόφυλλου.

Κατά την προσομοίωση των διατμητικών συνδέσεων με ελατήρια στην παρούσα Διπλωματική έγινε χρήση αποκλειστικά διατμητικών ήλων κεφαλής, καθώς είναι η πλέον συνήθεις στην πράξη. Η διατμητική δυσκαμψία k_s των ήλων υπολογίζεται από την εξ. (2-13) όπως αυτή προτάθηκε από τους He et al [12].

$$k_s = C \cdot d \cdot E_{cm}^{\frac{3}{4}} \cdot E_a^{\frac{1}{4}} \quad (2-13)$$

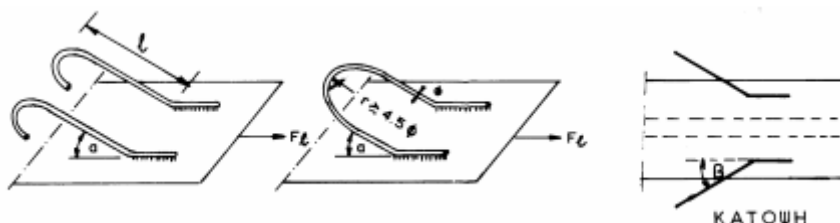
όπου:

$C = 0,374$ και

E_a = Το μέτρο ελαστικότητας του δομικού χάλυβα.

2.3.2 Αγκύρια από ράβδους οπλισμού σκυροδέματος

Κατασκευάζονται από ράβδους οπλισμού σκυροδέματος οι οποίες κάμπτονται ώστε να σχηματιστεί άγκιστρο ή αναβολέας στο ένα άκρο τους ενώ το άλλο συγκολλάται στο πέλαμα της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6: Αγκύρια από ράβδους οπλισμού σκυροδέματος (από Βάγιας, 2018)

Η οριακή αντοχή P_{Rd} μιας επαρκώς αγκυρωμένης ράβδου οπλισμού δίνεται από την εξ. (2-14).

$$P_{Rd} = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{\sqrt{1 + \sin^2 a}} \cdot \cos \beta \quad (2-14)$$

όπου:

A_s = διατομή της ράβδου,

f_{sd} = τάση σχεδιασμού της ράβδου και

a, β = γωνίες κλίσης των αγκυριών σε όψη και κάτοψη σύμφωνα με το Σχήμα 2-6.

Για να θεωρείται επαρκής η αγκύρωση της ράβδου θα πρέπει το μήκος αγκύρωσης της l_b να είναι ίσο με την τιμή που δίνεται από την εξ. (2-15).

$$l_b = 0,7 \cdot \frac{\Phi}{4} \cdot \frac{f_{sd}}{f_{bd}} \quad (2-15)$$

όπου:

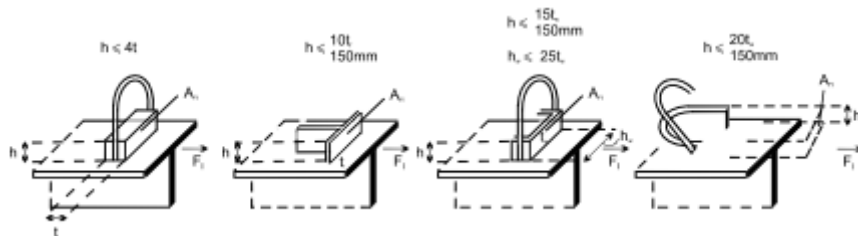
Φ = διάμετρος της ράβδου,

$f_{bd} = \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} \cdot 2,25$ = οριακή τάση συνάφειας για νευροχάλυβες και

$f_{ctk0,05}$ = εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος.

2.3.3 Συμπαγείς σύνδεσμοι

Συμπαγείς σύνδεσμοι καλούνται οι σύνδεσμοι οι οποίοι είναι αρκούντως άκαμπτοι ώστε η κατανομή των τάσεων στο μέτωπο τους να είναι ομοιόμορφη. Μπορούν να συνδυαστούν με αγκύρια ή αναβολείς όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7: Τύποι συμπαγών συνδέσμων και γεωμετρικοί περιορισμοί (από Βάγιας, 2018)

Η οριακή αντοχή P_{Rd} ενός συμπαγούς συνδέσμου εξαρτάται μόνο από το σκυρόδεμα και δίνεται από την εξ. (2-16).

$$P_{Rd} = \eta \cdot A_{f1} \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad (2-16)$$

όπου:

$$\eta = \sqrt{A_{f2} / A_{f1}} \leq 2,5 \text{ για κανονικό σκυρόδεμα ή} \\ \leq 2,0 \text{ για ελαφροσκυρόδεμα,}$$

A_{f1} = μετωπική επιφάνεια συνδέσμου,

A_{f2} = μετωπική επιφάνεια συνδέσμου αυξημένη με κλίση 1:5 μέχρι τον επόμενο σύνδεσμο, όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο η επιφάνεια του σκυροδέματος,

$$\gamma_c = 1,5 .$$

Για συνδυασμό συμπαγών συνδέσμων με αγκύρια ή αναβολείς η συνολική οριακή αντοχή P_{Rd} δίνεται από την εξ. (2-17) για αγκύρια και από την εξ. (2-18) για αναβολείς.

$$P_{Rd} = P_{Rd1} + 0,5 \cdot P_{Rd2} \quad (2-17)$$

$$P_{Rd} = P_{Rd1} + 0,7 \cdot P_{Rd2} \quad (2-18)$$

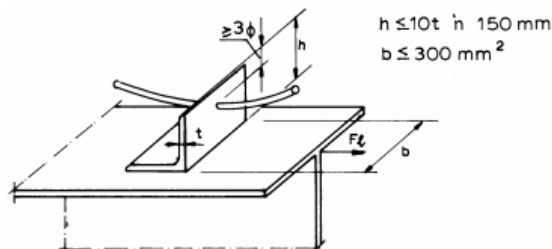
όπου:

P_{Rd1} = αντοχή συμπαγούς συνδέσμου από εξ. (2-16) και

P_{Rd2} = αντοχή αγκυρίου ή αναβολέα από εξ. (2-14).

2.3.4 Γωνιακά σε συμπαγείς πλάκες

Τα γωνιακά δεν θεωρούνται άκαμπτοι σύνδεσμοι διότι λόγω ευκαμψίας των μελών τους δεν προκαλούν πλήρως ομοιόμορφη κατανομή τάσεων στο σκυροδέμα. Στο Σχήμα 2-8 φαίνεται ο τρόπος τοποθέτησης των γωνιακών καθώς και οι κατασκευαστικές απαιτήσεις τους.



Σχήμα 2-8: Γωνιακά ως διατμητικοί σύνδεσμοι και κατασκευαστικές τους απαιτήσεις (από Βάγιας, 2018)

Η οριακή αντοχή P_{Rd} ενός γωνιακού συνδέσμου δυσκαμψίας δίνεται από την εξ. (2-19).

$$P_{Rd} = 10 \cdot b \cdot h^3 \cdot f_{ck}^3 / \gamma_v \quad (2-19)$$

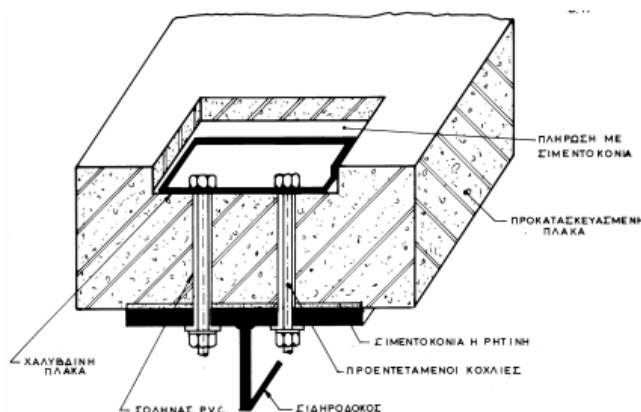
όπου b , h το πλάτος και το ύψος του γωνιακού συνδέσμου δυσκαμψίας σε mm.

Για την παρεμπόδιση της αποκόλλησης της πλάκας από τη σιδηροδοκό πρέπει να τοποθετείται οπλισμός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-8, ο οποίος θα πρέπει να έχει ελάχιστο εμβαδό A_s που δίνεται από την εξ. (2-20).

$$A_s = \frac{\pi \cdot \Phi^2}{4} \geq \frac{0,1 \cdot P_{Rd}}{f_{sd}} \quad (2-20)$$

2.3.5 Σύνδεση τριβής με προεντεταμένους κοχλίες

Οι προεντεταμένοι κοχλίες τοποθετούνται ως διατμητικοί σύνδεσμοι σε σύμμικτες δοκούς στις οποίες η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία. Οι προεντεταμένοι κοχλίες τοποθετούνται εντός φωλιών των προκατασκευασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9. Οι φωλιές καθώς και οι εγκάρσιοι και διαμήκεις αρμοί γεμίζονται με μη συρρικνούμενο κονίαμα μετά την προένταση των κοχλίων. Ειδικά για τους εγκάρσιους αρμούς, οι οποίοι παραλαμβάνουν την θλιπτική δύναμη της σύμμικτης δοκού, ενδέχεται να απαιτείται η πλήρωση τους με ρητίνη. Ανάμεσα στις προκατασκευασμένες πλάκες και στην σιδηροδοκό μπορεί να παρεμβάλλεται στρώση τσιμεντοκονίας ή ρητίνης ειδικά αν πρόκειται για έργο γεφυροποιίας. Οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται είναι υψηλής αντοχής ποιότητας 8.8 ή 10.9.



Σχήμα 2-9: Σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες (από Βάγιας, 2018)

Στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας η μεταφορά της διαμήκουσ διάτμησης γίνεται μέσω τριβής. Σε αυτή την περίπτωση κάθε προεντεταμένος κοχλίας παραλαμβάνει δύναμη τριβής P_{Rd} που δίνεται από την εξ. (2-21).

$$P_{Rd} = \mu \cdot F_{pr} / \gamma_v \quad (2-21)$$

όπου:

F_{pr} = κατά 40% μειωμένη δύναμη προέντασης F_p (εκτός αν εφαρμοστεί συμπληρωματική προένταση),

μ = συντελεστής τριβής χάλυβα – σκυροδέματος

= 0,50 για πέλματα σιδηροδοκού πάχους τουλάχιστον 10 mm

= 0,55 για πέλματα σιδηροδοκού πάχους τουλάχιστον 15 mm αμμοβολημένα χωρίς σκουριά,

γ_v = 1,0 επιμέρους συντελεστής ασφαλείας στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας,

$F_p = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ = πλήρης τιμή της δύναμης προέντασης,

f_{ub} = εφελκυστική αντοχή χάλυβα κοχλίας και

A_s = εμβαδό τάσεων κοχλίας.

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας η μεταφορά της διαμήκουσ διάτμησης γίνεται είτε μέσω τριβής είτε μέσω άντυγας σύμφωνα με την μελέτη. Στην πρώτη περίπτωση κάθε προεντεταμένος κοχλίας παραλαμβάνει δύναμη τριβής P_{Rd} που δίνεται από την εξ. (2-21), λαμβάνοντας όμως τον επιμέρους συντελεστή ασφαλείας $\gamma_v = 1,25$. Στην δεύτερη περίπτωση κάθε προεντεταμένος κοχλίας παραλαμβάνει δύναμη τριβής P_{Rd} που ισούται με το ελάχιστο της αντοχής του κοχλίας σε διάτμηση και της αντοχής του σκυροδέματος σε «σύνθλιψη άντυγας». Η αντοχή του κοχλίας σε διάτμηση δίνεται από την εξ. (2-22).

$$P_{Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_v} \quad (2-22)$$

όπου:

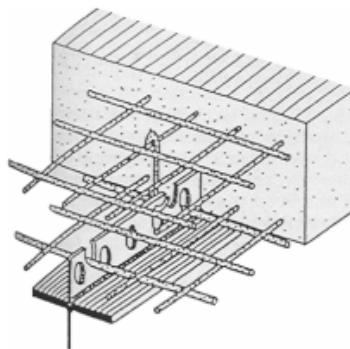
A = εμβαδόν κορμού κοχλίας και

$\gamma_v = 1,25$ επιμέρους συντελεστής ασφαλείας στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Η αντοχή του σκυροδέματος σε «σύνθλιψη άντυγας», όπως έχει αναφερθεί ήδη, δίνεται από την εξ. (2-9).

2.3.6 Διάτρητα ελάσματα (Perfobond)

Σε αυτή την περίπτωση η διατμητική σύνδεση επιτυγχάνεται με συγκόλληση στο πέλμα της σιδηροδοκού ενός διάτρητου ελάσματος (Σχήμα 2-10). Από τις οπές του ελάσματος διέρχεται ο οπλισμός της πλάκας.



Σχήμα 2-10: Διάτρητο έλασμα (από Βάγιας, 2018)

Η διατμητική δύναμη αντοχής σχεδιασμού ανά μονάδα μήκους ενός διάτρητου ελάσματος δίνεται από την εξ. (2-23)

$$P_{Rd} = (-68 + 12,4 \cdot f_{ck} + 797 \cdot A_s) / \gamma_v \quad (2-23)$$

όπου:

P_{Rd} σε N/mm ≤ 1000 N/mm για S 235 και ≤ 1500 για S 355,

f_{ck} = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σε MPa (N/mm²),

A_s = εμβαδόν εγκάρσιου οπλισμού σε mm²/mm και

$\gamma_v = 1,4$.

2.4 Απαιτούμενος αριθμός και κατανομή διατμητικών συνδέσμων κατά μήκος της δοκού

Προκειμένου να υπολογιστεί ο απαιτούμενος αριθμός διατμητικών συνδέσμων και να καθοριστεί η κατανομή τους κατά μήκος της δοκού θα πρέπει προηγουμένως να αποφασισθεί αν θα πραγματοποιηθεί πλήρης ή μερική διατμητική σύνδεση. Οι υπόψη δύο περιπτώσεις περιγράφονται στις επόμενες υποπαραγράφους.

2.4.1 Πλήρης διατμητική σύνδεση

Στην πλήρη διατμητική σύνδεση τοποθετούνται τόσο διατμητικοί σύνδεσμοι ώστε να παραλαμβάνουν πλήρως την διαμήκη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια μεταξύ πλάκας σκυροδέματος και σιδηροδοκού. Η υπόψη διαμήκης διατμητική δύναμη ισούται με την ελάχιστη μεταξύ της πλαστικής εφελκυστικής δύναμης $N_{pl,a}$ της σιδηροδοκού και της πλαστικής θλιπτικής δύναμης $N_{pl,c}$ της πλάκας σκυροδέματος. Εάν επιλέξουμε πλήρη διατμητική δύναμη τότε η σύμμικτη δοκός μπορεί να αναπτύξει την πλήρη πλαστική ροπή αντοχής της. Ο συνολικός αριθμός n_f των διατμητικών συνδέσμων που απαιτούνται για πλήρη διατμητική σύνδεση δίνεται από την εξ. (2-24).

$$n_f = \frac{\min\{N_{pl,a}; N_{pl,c}\}}{P_{Rd}} \quad (2-24)$$

όπου:

$$N_{pl,a} = A_a \cdot f_{yd} ,$$

$$N_{pl,c} = A_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd} ,$$

P_{Rd} = Αντοχή αναλόγως του διατμητικού συνδέσμου όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 2.3.

Η κατανομή των συνδέσμων κατά μήκος της δοκού μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Ελαστική κατανομή: Η κατανομή των συνδέσμων δυσκαμψίας εντός ενός κρίσιμου μήκους γίνεται κατ' αναλογία του διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων, πυκνώνοντας τους σε περιοχές όπου έχουμε μεγάλες τέμνουσες δυνάμεις και αραιώνοντας τους σε περιοχές με μικρές τέμνουσες δυνάμεις. Γί αυτόν τον τρόπο κατανομής δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ολκιμότητας των ήλων.
- Πλαστική κατανομή: Περιλαμβάνει ομοιόμορφη κατανομή των διατμητικών συνδέσμων εντός ενός κρίσιμου μήκους. Προϋπόθεση εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η χρήση όλκιμων συνδέσμων σε οικοδομικά έργα. Για να εφαρμόσουμε την ομοιόμορφη πλαστική κατανομή κατά μήκος γειτονικών χαρακτηριστικών μηκών μιας δοκού πρέπει:
 - Να χρησιμοποιούνται όλκιμοι ήλοι κεφαλής ($16 \text{ mm} \leq 22 \text{ mm}$ και $h \geq 4 \cdot d$),
 - Οι διατομές να είναι κατηγορίας 1 ή 2 και

- Ο λόγος της πλαστικής ροπής της σύμμικτης διατομής $M_{pl,Rd}$ προς την πλαστική ροπή της σιδηροδοκού $M_{pl,a,Rd}$ να μην υπερβαίνει το 2,5 ($M_{pl,Rd} \leq 2,5 \cdot M_{pl,a,Rd}$).
- Ελαστοπλαστική κατανομή: Πρόκειται για κατανομή μεταξύ της ελαστικής και της πλαστικής. Στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού τοποθετείται διπλάσιος αριθμός διατμητικών συνδέσμων σε σχέση με το μεσαίο τρίτο του μήκους της.

2.4.2 Μερική διατμητική σύνδεση

Στις περιπτώσεις όπου η δρώσα ροπή M_{Ed} είναι μικρότερη από την πλαστική ροπή $M_{pl,Rd}$ επιτρέπεται, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, να τοποθετηθεί μικρότερος αριθμός διατμητικών συνδέσμων από αυτούς που απαιτούνται για πλήρη διατμητική σύνδεση. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μερική διατμητική σύνδεση. Κατά την μερική διατμητική σύνδεση δεν παραλαμβάνεται πλήρως η διαμήκης διατμητική δύναμη και εμφανίζεται μερική ολίσθηση μεταξύ πλάκας σκυροδέματος και σιδηροδοκού. Το ποσοστό διατμητικής σύνδεσης δίνεται από την εξ. (2-25).

$$\eta = n/n_f \quad (2-25)$$

όπου:

n = υπάρχων αριθμός συνδέσμων εντός ενός κρίσιμου μήκους του φορέα και

n_f = απαιτούμενος αριθμός συνδέσμων για πλήρη διατμητική σύνδεση.

Μερική διατμητική σύνδεση επιτρέπεται μόνο στις περιοχές θετικών ροπών. Στις περιοχές αρνητικών ροπών εφαρμόζεται υποχρεωτικά πλήρης διατμητική σύνδεση. Για να εφαρμοστεί μερική διατμητική σύνδεση πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να αφορά οικοδομικό έργο,
- Οι σύμμικτες διατομές να είναι κατηγορίας 1 ή 2,
- Οι διατμητικοί σύνδεσμοι να έχουν όγκιμη συμπεριφορά,
- Να ελέγχεται η οριακή κατάσταση αστοχίας (όχι κόπωσης).

Το ελάχιστο ποσοστό διατμητικής σύνδεσης η που δύναται να ληφθεί εξαρτάται από το μήκος της σιδηροδοκού καθώς και τη σεισμικότητα της περιοχής του έργου. Συγκεκριμένα:

- Για σιδηροδοκούς με ίσα πέλματα ισχύουν οι εξ. (2-26) και (2-27).

$$L_e \leq 25 \text{ m } \eta \geq 1 - \left(\frac{355}{f_y} \right) \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e) \text{ αλλά } \eta \geq 0,4 \quad (2-26)$$

$$L_e > 25 \text{ m } \eta = 1 \quad (2-27)$$

- Για σιδηροδοκούς με εμβαδόν κάτω πέλματος το πολύ τριπλάσιο του εμβαδού του άνω πέλματος ισχύουν οι εξ. (2-28) και (2-29).

$$L_e \leq 20 \text{ m } \eta \geq 1 - \left(\frac{355}{f_y} \right) \cdot (0,30 - 0,015 \cdot L_e) \text{ αλλά } \eta \geq 0,4 \quad (2-28)$$

$$L_e > 20 \text{ m } \eta = 1 \quad (2-29)$$

- Για κύριες δοκούς σε σεισμικές περιοχές πρέπει $\eta \geq 0,8$.

Η οριακή ροπή συμμίκτων δοκών κατηγορίας 1 και 2 με μερική διατμητική σύνδεση δίνεται από την εξ. (2-30).

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + \eta \cdot (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}) \quad (2-30)$$

Η μερική διατμητική σύνδεση δεν επηρεάζει μόνο την αντοχή σε κάμψη αλλά και τη δυσκαμψία, λόγω σχετικής ολίσθησης σιδηροδοκού – σκυροδέματος. Τα αυξημένα βέλη δίνονται από την εξ. (2-31) για δοκούς με ενδιάμεσες στηρίξεις στη φάση κατασκευής και από την εξ. (2-32) για δοκούς χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις στη φάση κατασκευής.

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1 + 0,5 \cdot (1 - \eta) \cdot \left(\frac{\delta_a}{\delta_c} - 1 \right) \quad (2-31)$$

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1 + 0,3 \cdot (1 - \eta) \cdot \left(\frac{\delta_a}{\delta_c} - 1 \right) \quad (2-32)$$

όπου:

δ = βέλος δοκού με μερική διατμητική σύνδεση,

δ_c = βέλος δοκού με πλήρη διατμητική σύνδεση και

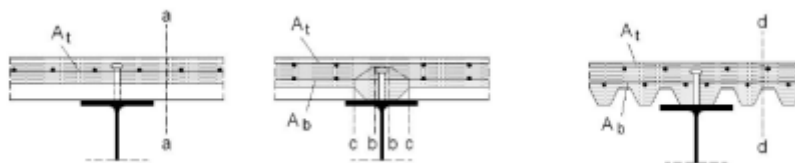
δ_a = βέλος της σιδηροδοκού μόνο.

Ο λόγος του βέλους δ_a της σιδηροδοκού μόνο προς το βέλος δ_e της δοκού με πλήρη διατμητική σύνδεση ισούται με τον λόγο της ροπής αδρανείας I_e της ισοδύναμης διατομής προς τη ροπή αδρανείας I_a της σιδηροδοκού σύμφωνα με την εξ. (2-33).

$$\frac{\delta_a}{\delta_c} = \frac{I_e}{I_a} \quad (2-33)$$

2.5 Έλεγχος της πλάκας σκυροδέματος σε διαμήκη διάτμηση

Η διατμητική ροή μεταφέρεται από την πλάκα σκυροδέματος στους διατμητικούς ήλους και στη συνέχεια στη σιδηροδοκό. Κατά τη μεταφορά από την πλάκα στους ήλους αναπτύσσεται διαμήκης διάτμηση σε διάφορες τομές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-11. Ο έλεγχος της ασφαλούς παραλαβής της παραπάνω διάτμησης γίνεται στην οριακή κατάσταση αστοχίας.



Σχήμα 2-11: Τομές ελέγχου της διαμήκουσ διάτμησης (από Βάγιας, 2018)

Η δρώσα διατμητική ροή στις τομές a-a και d-d δίνεται για θλιβόμενο πέλμα από την εξ. (2-34) και για εφελκυσμένο πέλμα από την εξ. (2-35).

$$V_{Ic,Ed} = V_{I,Ed} \cdot \frac{A_{cp,eff}}{A_{c,tot,eff}} \quad (2-34)$$

$$V_{Ic,Ed} = V_{I,Ed} \cdot \frac{A_{sp}}{A_{s,tot}} \quad (2-35)$$

όπου:

$A_{cp,eff}$ και A_{sp} = Τα εμβαδά των αποκοπτόμενων διατομών σκυροδέματος και οπλισμού και

$A_{c,tot,eff}$ και $A_{s,tot}$ = Τα συνολικά εμβαδά των διατομών σκυροδέματος και οπλισμού.

Στις τομές b-b και c-c περί τους ήλους η διατμητική ροή είναι ίση με το σύνολο της δρώσας ροής [εξ. (2-36)].

$$V_{Ic,Ed} = V_{I,Ed} \quad (2-36)$$

Σε χαλυβδόφυλλα κάθετα στην δοκό δεν εξετάζονται τομές τύπου b-b.

Η εξασκούμενη δρώσα διατμητική ροή παραλαμβάνεται από τους λοξούς θλιπτήρες του σκυροδέματος και τους ελκυστήρες του εγκάρσιου οπλισμού της πλάκας.

Η αντοχή των λοξών θλιπτήρων δίνεται από την εξ. (2-37).

$$V_{c,Rd} = \frac{0,75 \cdot L_v \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (2-37)$$

όπου:

L_v = Μήκος τομής a-a ή b-b ή c-c ή d-d.

Οι γωνίες κλίσης του θλιπτήρα είναι:

- $\cot\theta = 1,2$ για το θλιβόμενο πέλμα και
- $\cot\theta = 1,0$ για το εφελκυσμένο πέλμα.

Η ανίσωση ελέγχου για το σκυρόδεμα είναι:

$$V_{Ic,Ed} \leq V_{c,Rd} \quad (2-38)$$

Η αντοχή των εγκάρσιων οπλισμών που διέρχονται από την τομή δίνεται από την εξ. (2-39).

$$V_{s,Rd} = \frac{A_{sf}}{S_f} \cdot f_{sd} \cdot \cot\theta \quad (2-39)$$

όπου ο λόγος A_{sf}/S_f αφορά τα εμβαδά του οπλισμού τα οποία διέρχονται από την εκάστοτε τομή.

Στην περίπτωση οικοδομικού έργου με συνεχές χαλυβδόφυλλο κάθετο στη δοκό και συνδεδεμένο με διατμητικούς ήλους με το άνω πέλμα της, επιτρέπεται να ληφθεί υπόψη η συμβολή του στην παραλαβή της διαμήκου διάτμησης. Σε αυτή την περίπτωση η συνολική αντοχή οπλισμού και φύλλου δίνεται από την εξ. (2-40).

$$V_{s+p,Rd} = \left(\frac{A_{sf}}{S_f} \cdot f_{sd} + A_p \cdot f_{yp,d} \right) \cdot \cot\theta \quad (2-40)$$

όπου:

A_p = το εμβαδόν του χαλυβδόφυλλου ανά μονάδα μήκους της δοκού και

$f_{yp,d}$ = τάση σχεδιασμού χάλυβα χαλυβδόφυλλου.

Αν το κάθετο στη δοκό χαλυβδόφυλλο δεν είναι συνεχές, ο όρος $A_p \cdot f_{yp,d}$ αντικαθίσταται από τον όρο:

$$P_{b,Rd}/s \leq A_p \cdot f_{yp,d} \quad (2-41)$$

όπου:

$P_{pb,Rb}$ = αντοχή του ήλου συγκολλημένου διαμέσου του φύλλου, εξ. (2-12) και

s = απόσταση μεταξύ ήλων.

Η ανίσωση ελέγχου για τον οπλισμό είναι:

$$V_{lc,Ed} \leq V_{s,Rd} \text{ ή } V_{s+p,Rd} \quad (2-42)$$

Τέλος πρέπει να ελέγχεται το ελάχιστο ποσοστό εγκάρσιων οπλισμών που διέρχονται από την εκάστοτε τομή. Το ελάχιστο αυτό ποσοστό δίνεται από την εξ. (2-43).

$$\rho_{\min} = \frac{A_{sf}}{s_f \cdot h_c} = 0,16 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{ys}} \quad (2-43)$$

όπου:

h_c = το πάχος της πλάκας σκυροδέματος,

f_{ctm} = η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και

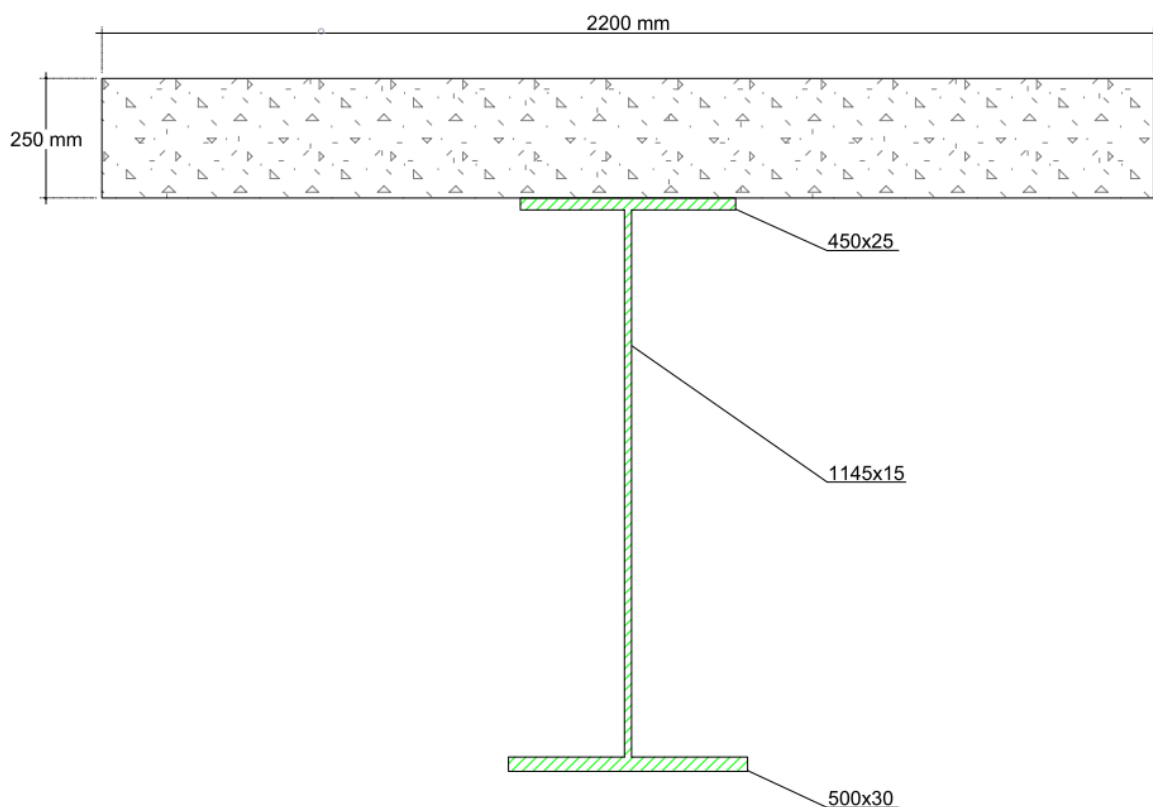
f_{ys} = η χαρακτηριστική αντοχή του χάλυβα σκυροδέματος.

Για σύμμικτες πλάκες με χαλυβδόφυλλα, ο ελάχιστος οπλισμός αναφέρεται στο εμβαδόν του σκυροδέματος πάνω από το φύλλο.

3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΗ ΔΟΚΟ ΓΕΦΥΡΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Η πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης διατμητικών ήλων σε πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών πραγματοποιήθηκε σε ένα μοντέλο σύμμικτης δοκού γέφυρας. Το πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το SOFiSTiK 2020. Η διατομή της σύμμικτης δοκού γέφυρας περιγράφεται στην §1.2.1. Για την πληρότητα του κειμένου τα βασικά της χαρακτηριστικά επαναλαμβάνονται στην παρούσα παράγραφο και η διατομή της δίνεται στο Σχήμα 3-1 .



Σχήμα 3-1: Διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας

Το μοντέλο της σύμμικτης δοκού γέφυρας αποτελείται από μία αμφιέριστη σύμμικτη δοκό μήκους 24 m. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πλάτος 2.200 mm και πάχος 250 mm και επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C 30/37. Για την μεταλλική διατομή επιλέχθηκε χάλυβας ποιότητας S 355. Το άνω πέλμα της μεταλλικής διατομής έχει διαστάσεις 450 mm · 25 mm, το κάτω πέλμα 500 mm · 30 mm και ο κορμός 1.145 mm · 15 mm.

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο κεφάλαιο, η προσομοίωση των διατμητικών ήλων έγινε με τοποθέτηση ελατηρίων ανά 0,50 m τα οποία συνδέουν την μεταλλική διατομή με την πλάκα σκυροδέματος. Προκειμένου να προσομοιωθεί τόσο η λειτουργία όσο και οι ιδιότητες των διατμητικών ήλων, προσδίδεται στα ελατήρια γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία στην αξονική τους διεύθυνση, ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση τους προσδίδεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με δυσκαμψία και οριακή αντοχή τα αντίστοιχα της ομάδας των διατμητικών ήλων που έχουν τοποθετηθεί σε μήκος 0,5 m.

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν και να αξιολογηθεί το κατά πόσο η υπόψη προσομοίωση είναι αξιόπιστη, μορφώθηκαν τα παρακάτω μοντέλα:

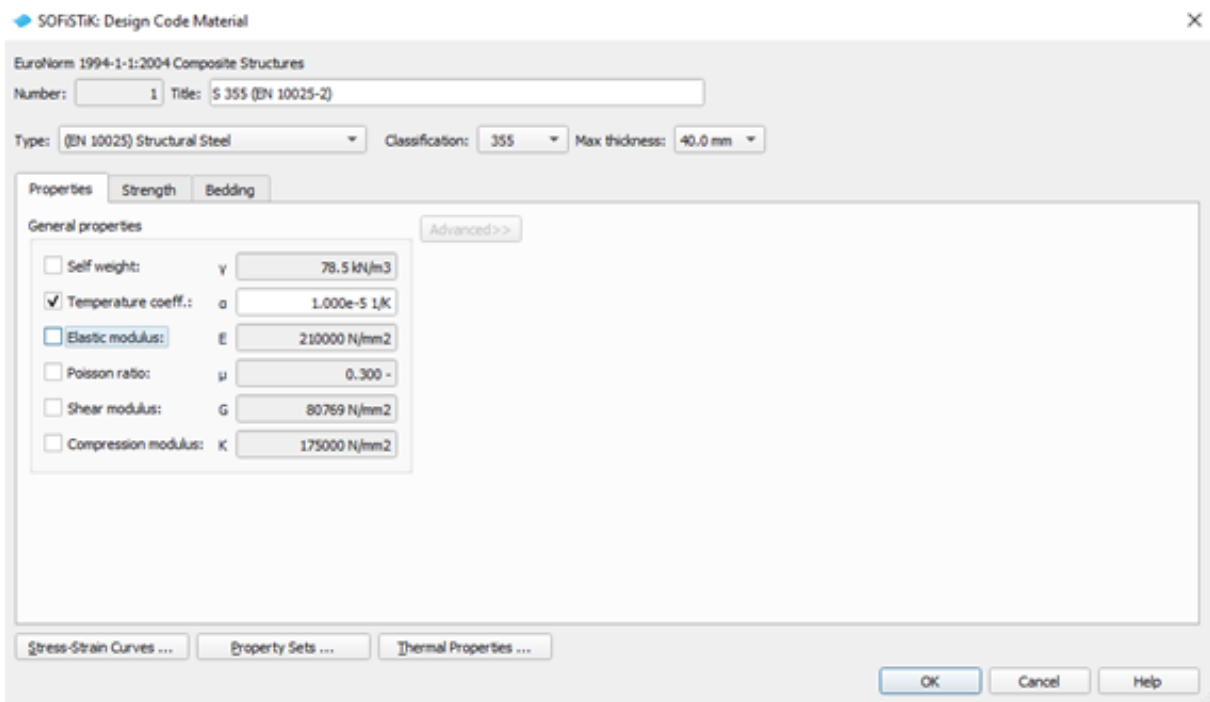
- Μοντέλο ενιαίας διατομής, στο οποίο πλάκα σκυροδέματος και σιδηροδοκός εισάγονται ως ενιαία διατομή.
- Μοντέλο ιδεατής διατομής, στο οποίο πλάκα σκυροδέματος και σιδηροδοκός εισάγονται ως ανεξάρτητα στοιχεία. Η πλάκα σκυροδέματος εισάγεται ως επιφανειακό στοιχείο και η σιδηροδοκός ως γραμμικό στοιχείο. Για να εξασφαλισθεί η σύμμικτη λειτουργία πλάκας και σιδηροδοκού τα υπόψη στοιχεία έχουν κοινό κόμβο εισαγωγής.
- Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις, στο οποίο πλάκα σκυροδέματος και σιδηροδοκός εισάγονται ως ανεξάρτητα στοιχεία όπως προηγουμένων, η σύνδεση τους όμως γίνεται με άκαμπτες κινηματικές δεσμεύσεις τοποθετημένες ανά 0,5 m.
- Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων, στο οποίο οι κινηματικές δεσμεύσεις του προηγούμενου μοντέλου αντικαθίστανται από ελατήρια τα οποία έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6$ kN/m) τόσο στην διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση.
- Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων, στο οποίο τα εγκάρσια γραμμικά ελατήρια του προηγούμενου μοντέλου αντικαθίστανται με μη γραμμικά ελατήρια. Ως αποτέλεσμα, τα αξονικά ελατήρια εξακολουθούν να είναι γραμμικώς ελαστικά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6$ kN/m), στην εγκάρσια διεύθυνση όμως συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά με δυσκαμψία και οριακή αντοχή τα αντίστοιχα της ομάδας των διατμητικών ήλων που έχουν τοποθετηθεί σε μήκος 0,5 m. Η τιμή της δυσκαμψίας στην κατακόρυφη διεύθυνση των μη γραμμικών ελατηρίων επιλέχθηκε κατόπιν διερεύνησης, η οποία παρουσιάζεται στο παράρτημα Α. Για το υπόψη μοντέλο εξετάστηκαν δύο διαφορετικές παραλλαγές. Στην πρώτη τα ελατήρια συνέδεαν την άνω ίνα της σιδηροδοκού με την άνω ίνα της πλάκας σκυροδέματος (μήκος ελατηρίου ίσο με το πάχος της πλάκας) και στη δεύτερη την άνω ίνα της σιδηροδοκού με την μεσαία ίνα της πλάκας σκυροδέματος (μήκος ελατηρίου ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας). Επίσης δοκιμάστηκαν διάφορα σενάρια όσον αφορά τον αριθμό και την κατανομή των διατμητικών ήλων. Συνολικά εξετάστηκαν είκοσι διαφορετικά σενάρια του υπόψη μοντέλου.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται, όσο το δυνατόν περιεκτικά, η μόρφωση των προαναφερθέντων μοντέλων καθώς και ενδεικτικά αποτελέσματα από την ανάλυση τους. Στην τελευταία παράγραφο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

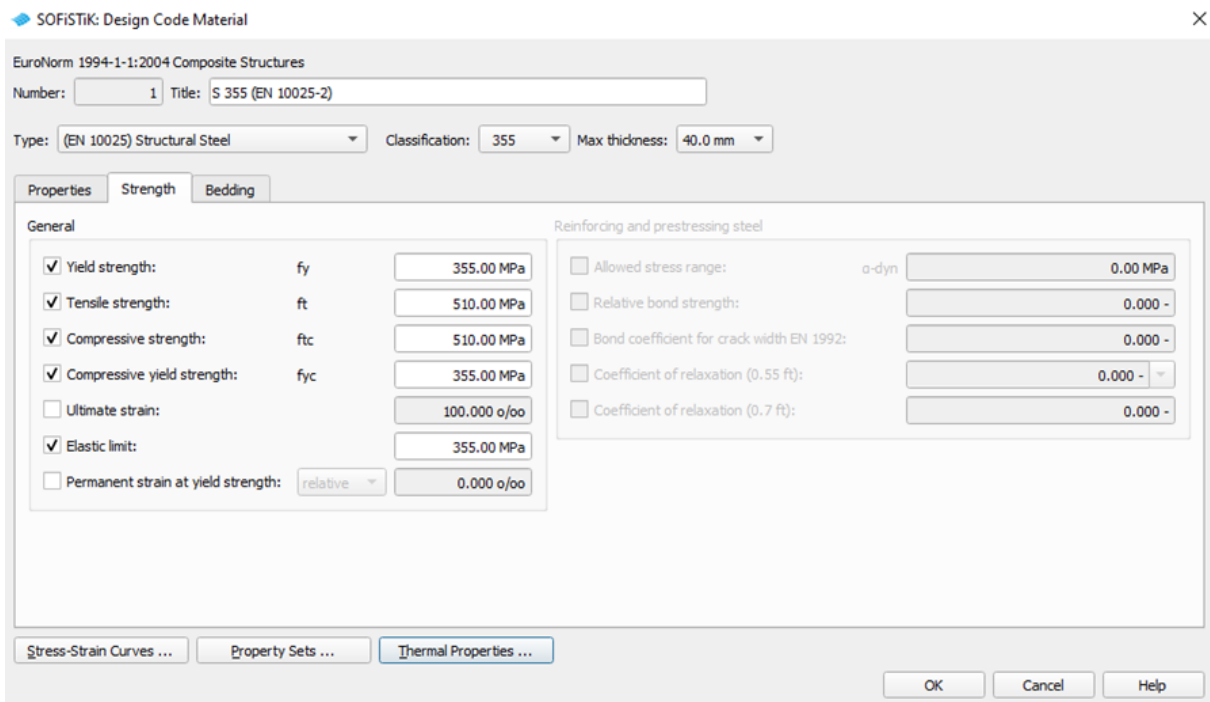
3.2 Μόρφωση προσομοιωμάτων

3.2.1 Ιδιότητες υλικών

Ως βασικά υλικά ορίστηκαν ο δομικός χάλυβας S 355 και το σκυρόδεμα ποιότητας C 30/37. Οι ιδιότητες του δομικού χάλυβα ελήφθησαν από το EN 1993-1-1 [7] και παρατίθενται στο Σχήμα 3-2 και στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-2: Ιδιότητες δομικού χάλυβα S 355



Σχήμα 3-3: Αντοχή δομικού χάλυβα S 355

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος ελήφθησαν από το EN 1992-1-1 [6] και φαίνονται στο Σχήμα 3-4 και στο Σχήμα 3-5.

SOFiSTiK: Design Code Material

EuroNorm 1994-1-1:2004 Composite Structures

Number: 2 Title: C 30/37 N (EN 1992)

Type: (EN 1992) Standard Concrete Classification: 30 Kind of Cement: normal hardening

Properties Strength Bedding

General properties Advanced >>

<input type="checkbox"/>	Self weight:	γ	25.0 kN/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Density:	ρ	2500.0 kg/m ³
<input type="checkbox"/>	Temperature coeff.:	α	1.000e-5 1/K
<input checked="" type="checkbox"/>	Elastic modulus:	E	33000 N/mm ²
<input type="checkbox"/>	Poisson ratio:	μ	0.200 -
<input type="checkbox"/>	Shear modulus:	G	13750 N/mm ²
<input type="checkbox"/>	Compression modulus:	K	18333 N/mm ²

Stress-Strain Curves ... Property Sets ... Thermal Properties ... Creep, Shrinkage ...

OK Cancel Help

Σχήμα 3-4: Ιδιότητες σκυροδέματος C 30/37

SOFiSTiK: Design Code Material

EuroNorm 1994-1-1:2004 Composite Structures

Number: 2 Title: C 30/37 N (EN 1992)

Type: (EN 1992) Standard Concrete Classification: 30 Kind of Cement: normal hardening

Properties Strength Bedding

Strength

<input type="checkbox"/>	Effective strength:	f_c	25.50 MPa
<input type="checkbox"/>	Tensile strength:	f_{ctm}	2.90 MPa
<input type="checkbox"/>	Lower fractile value of tensile strength:	$f_{ctk,0.5}$	2.03 MPa
<input type="checkbox"/>	Fatigue strength:	$f_{cd,fat}$	14.96 MPa
<input type="checkbox"/>	Design bond strength:	f_{bd}	3.04 MPa
<input type="checkbox"/>	Mean strength:	f_{cm}	38.00 MPa
<input type="checkbox"/>	Modulus of elasticity for service:	E	34478 N/mm ²
<input type="checkbox"/>	Fracture energy:		140.502 N/m

Tensile Stresses in Stress-Strain Curves

<input type="checkbox"/>	Design tensile strength:	f_{td}	1.35 MPa
<input type="checkbox"/>	Tensile strength after cracking:	f_{eqr}	0.00 MPa
<input type="checkbox"/>	Ultimate tensile strength:	f_{eqt}	0.00 MPa

Friction in cracks: 0.200 -

Stress-Strain Curves ... Property Sets ... Thermal Properties ... Creep, Shrinkage ...

OK Cancel Help

Σχήμα 3-5: Αντοχή σκυροδέματος C 30/37

3.2.2 Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων

Τα φορτία που εισάγονται στον φορέα δεν ανταποκρίνονται σε ακριβή φορτία συγκεκριμένης φόρτισης αλλά πρόκειται για ενδεικτικά φορτία προκειμένου να εξετασθεί η συμπεριφορά του φορέα. Οι κατηγορίες φορτίων που δημιουργούνται είναι:

- Μόνιμο φορτίο (G) ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο το μήκος του φορέα.
- Φορτίο κυκλοφορίας UDL ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο το μήκος του φορέα.
- Συγκεντρωμένο φορτίο κυκλοφορίας TS σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις της δοκού ώστε να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση των εντατικών μεγεθών.

Ο Πίνακας 3-1 περιέχει τις τιμές και τις θέσεις εφαρμογής των φορτίων.

Πίνακας 3-1: Τιμές και θέσεις εφαρμογής φορτίων

A/A	Όνομα φορτίου	Τιμή φορτίου	Μον. μέτρησης	Θέση επιβολής φορτίου
1	G	15,0	kN/m	Σε όλο το μήκος του φορέα
2	TS 12	265,0	kN	Στο μέσο του φορέα
3	TS 0.5	265,0	kN	Σε απόσταση 0,5 m από το άκρο του φορέα
4	TS 1.0	265,0	kN	Σε απόσταση 1,0 m από το άκρο του φορέα
5	TS 1.5	265,0	kN	Σε απόσταση 1,5 m από το άκρο του φορέα
6	TS 2.0	265,0	kN	Σε απόσταση 2,0 m από το άκρο του φορέα
7	TS 2.5	265,0	kN	Σε απόσταση 2,5 m από το άκρο του φορέα
8	TS 3.0	265,0	kN	Σε απόσταση 3,0 m από το άκρο του φορέα
9	TS 3.5	265,0	kN	Σε απόσταση 3,5 m από το άκρο του φορέα
10	TS 4.0	265,0	kN	Σε απόσταση 4,0 m από το άκρο του φορέα
11	TS 4.5	265,0	kN	Σε απόσταση 4,5 m από το άκρο του φορέα
12	UDL	12,5	kN/m	Σε όλο το μήκος του φορέα

Εκτός από τις 12 μεμονωμένες φορτίσεις που δημιουργούνται για κάθε ένα φορτίο (Πίνακας 3-1) δημιουργούνται επιπλέον είκοσι συνδυασμοί φορτίσεων. Οι πρώτοι δέκα αναφέρονται στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας και καθένας τους συνδυάζει το μόνιμο φορτίο και το φορτίο κυκλοφορίας UDL με ένα από τα φορτία κυκλοφορίας TS. Οι υπόλοιποι δέκα συνδυασμοί αναφέρονται στην οριακή κατάσταση αστοχίας και σε αυτούς τα φορτία συνδυάζονται με τον ίδιο τρόπο αλλά πολλαπλασιασμένα με τον συντελεστή $\gamma = 1,35$. Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει τους συνδυασμούς φορτίσεων που δημιουργήθηκαν.

Πίνακας 3-2: Συνδυασμοί φορτίσεων

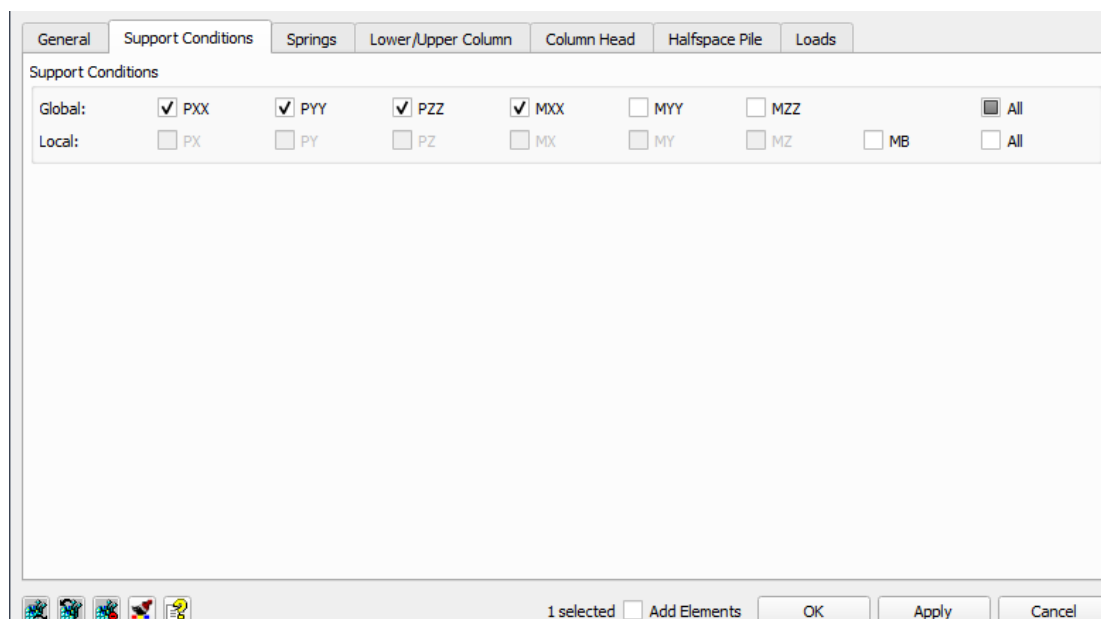
A/A	Αριθμός φόρτισης	Ονομασία φόρτισης
1	1013	G + TS 12 + UDL
2	1014	G + TS 0,5 + UDL
3	1015	G + TS 1,0 + UDL
4	1016	G + TS 1,5 + UDL
5	1017	G + TS 2,0 + UDL
6	1018	G + TS 2,5 + UDL
7	1019	G + TS 3,0 + UDL
8	1020	G + TS 3,5 + UDL
9	1021	G + TS 4,0 + UDL
10	1022	G + TS 4,5 + UDL
11	1023	1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL
12	1024	1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL
13	1025	1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL
14	1026	1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL
15	1027	1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL
16	1028	1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL
17	1029	1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL
18	1030	1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL

Πίνακας 3-2 (συνέχεια)

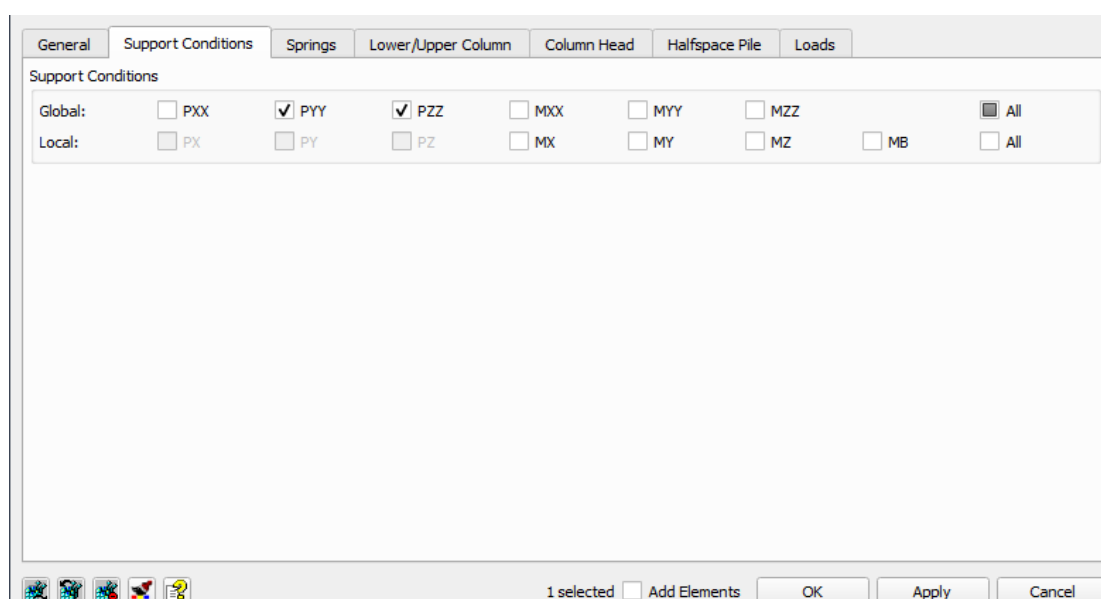
A/A	Αριθμός φόρτισης	Ονομασία φόρτισης
19	1031	1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL
20	1032	1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL

3.2.3 Στήριξεις φορέα

Για να υλοποιηθεί η αμφιέριστη στήριξη του φορέα εισάγεται άρθρωση με δέσμευση και της στροφής περί τον άξονα x στο ένα άκρο και κύλιση στο άλλο άκρο. Η δέσμευση στροφής εισάγεται προκειμένου να αποφευχθεί η στροφή της δοκού γύρω από τον διαμήκη άξονα, κίνηση η οποία θα δημιουργούσε μηχανισμό, ο οποίος μπορεί να παρατηρηθεί σε μια πραγματική κατασκευή λόγω των συνδεδόμενων στοιχείων. Στο Σχήμα 3-6 δίνονται οι συνθήκες στήριξης της άρθρωσης και στο Σχήμα 3-7 οι συνθήκες στήριξης της κύλισης του φορέα.



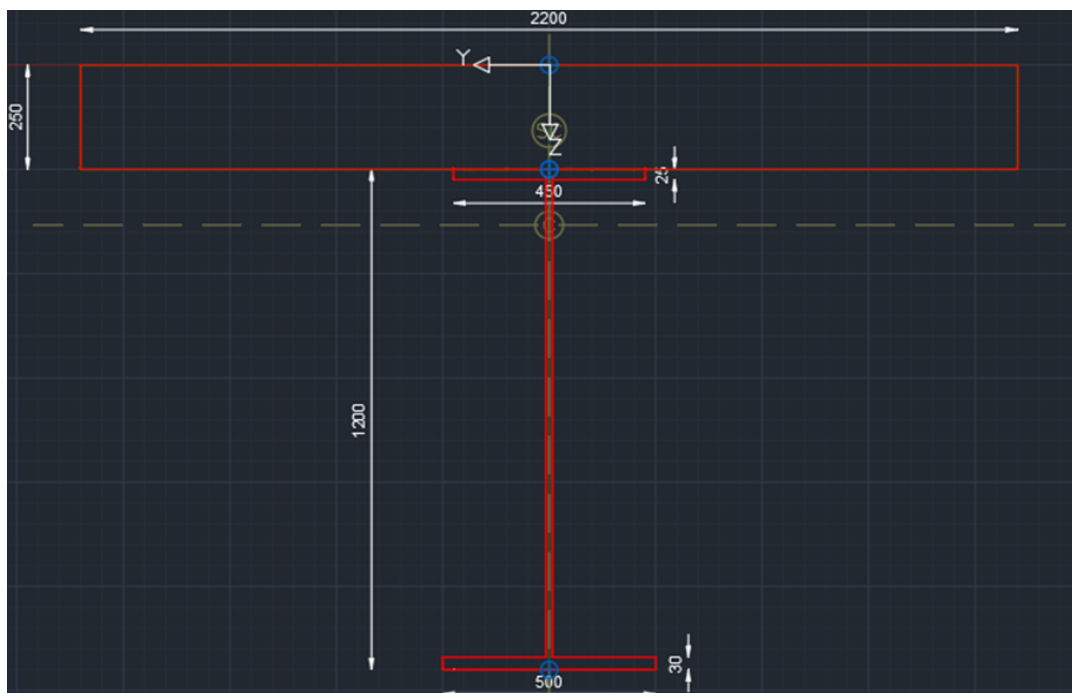
Σχήμα 3-6: Συνθήκες στήριξης άρθρωσης φορέα



Σχήμα 3-7: Συνθήκες στήριξης κύλισης φορέα

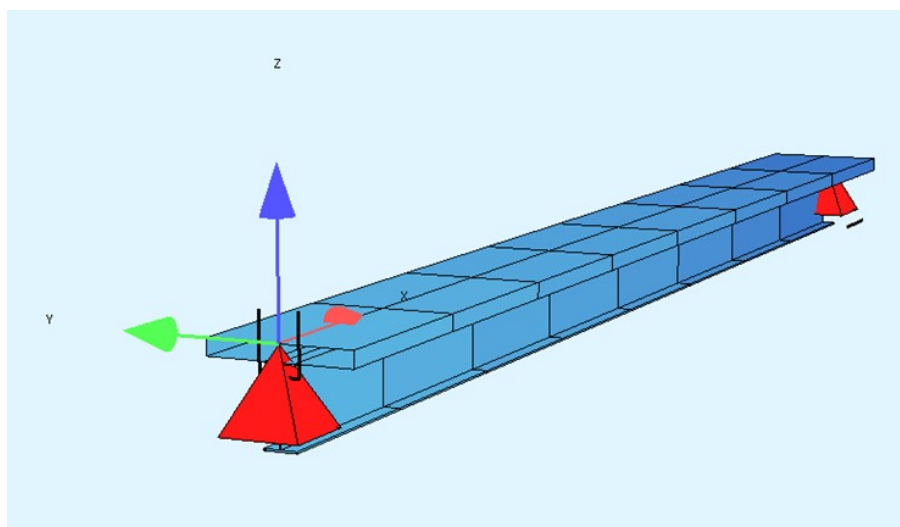
3.2.4 Μοντέλο ενιαίας διατομής

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, στο μοντέλο της ενιαίας διατομής δημιουργείται μια ενιαία διατομή η οποία περιλαμβάνει τόσο την πλάκα σκυροδέματος όσο και την σιδηροδοκό. Ως κύριο υλικό για την διατομή καθορίζεται ο δομικός χάλυβας S 355. Στην πλάκα σκυροδέματος προσδίδεται ως υλικό το σκυρόδεμα ποιότητας C 30/37 ενώ στην δοκό ο δομικός χάλυβας S 355. Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται η ενιαία διατομή όπως εισήχθη στο πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών SOFiSTiK 2020.



Σχήμα 3-8: Ενιαία διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

Αφού ορίστηκε η διατομή στην συνέχεια δημιουργείται η δοκός μήκους 24 m. Η δοκός ορίστηκε ως έκκεντρη με σημείο εισαγωγής της διατομής στο μοντέλο το μέσο της άνω ίνας της πλάκας σκυροδέματος (αρχή του τοπικού συστήματος αξόνων γOz της διατομής στο Σχήμα 3-8). Στο Σχήμα 3-9 παρουσιάζεται μια 3D απεικόνιση του μοντέλου ενιαίας διατομής στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020. Για την ανάλυση του φορέα επιλέγεται η γραμμική – ελαστική μέθοδος ανάλυσης.



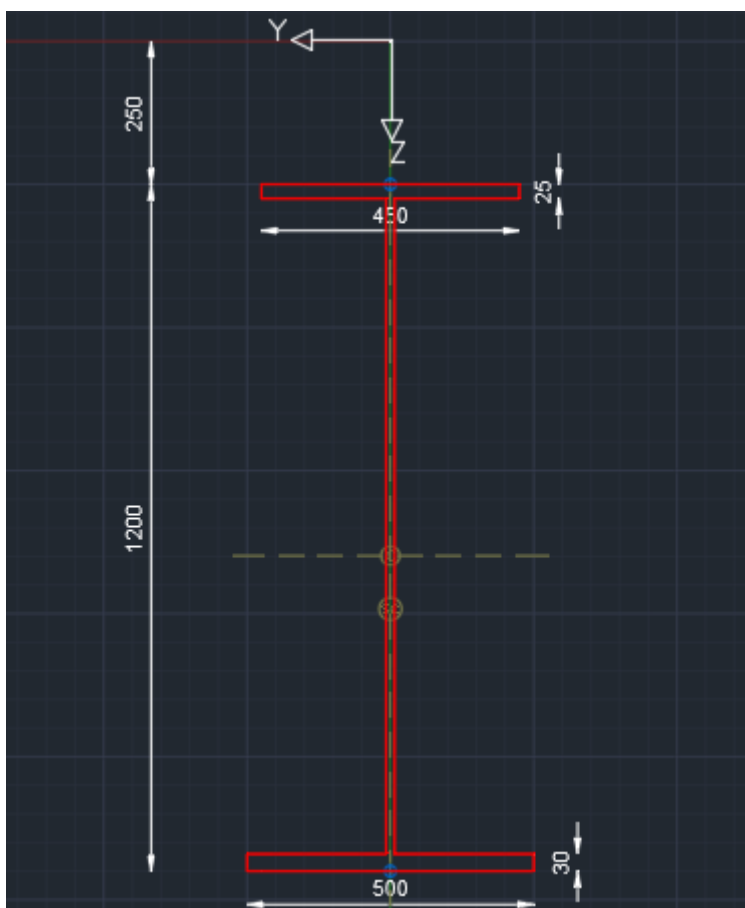
Σχήμα 3-9: 3D απεικόνιση μοντέλου ενιαίας διατομής στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

3.2.5 Μοντέλο ιδεατής διατομής

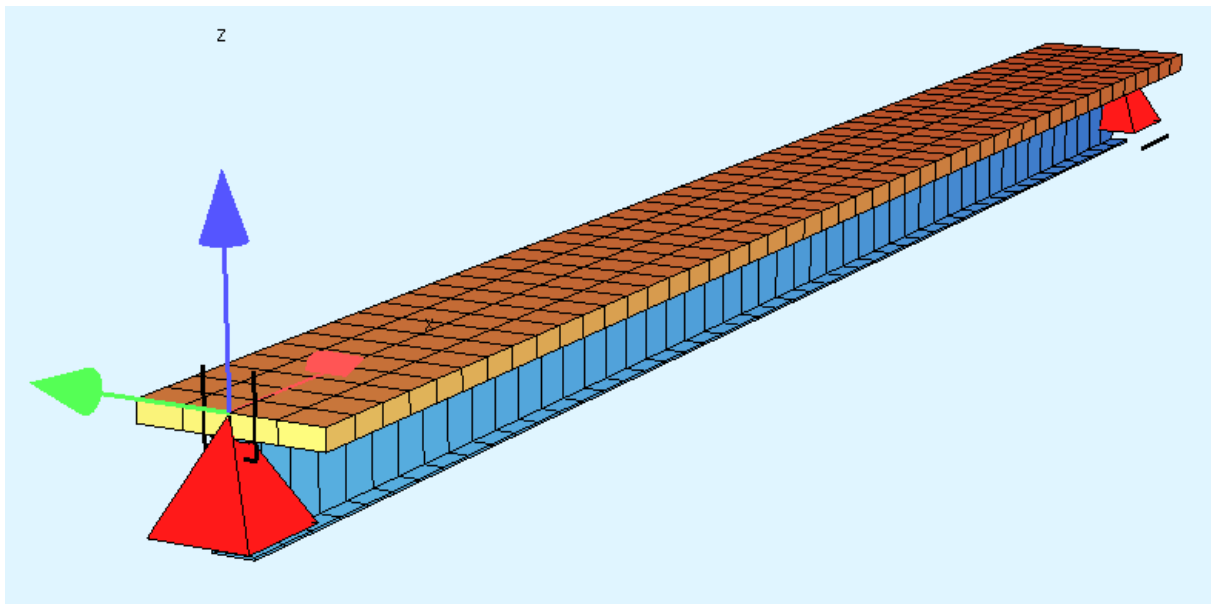
Το μοντέλο της ιδεατής διατομής προκύπτει από το μοντέλο της ενιαίας διατομής με την εφαρμογή των παρακάτω τροποποιήσεων:

- Για να δημιουργηθεί η διατομή της σιδηροδοκού ως μεμονωμένο στοιχείο διαγράφεται από την ενιαία διατομή η πλάκα σκυροδέματος διατηρώντας όμως το ίδιο σημείο εισαγωγής της διατομής (μέσο της άνω ίνας της πλάκας σκυροδέματος) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10 . Ορίζεται ως μέγιστο μήκος των δημιουργούμενων πεπερασμένων στοιχείων τα 0,5 m, οπότε και δημιουργείται ένας αρκετά λεπτομερής κάναβος σε σχέση με το μήκος της δοκού.
- Η πλάκα σκυροδέματος εισάγεται ως επιφανειακό στοιχείο πάχους 250 mm. Ως επιφάνεια εισαγωγής ορίζεται η άνω επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος. Με αυτόν τον τρόπο τόσο η πλάκα σκυροδέματος όσο και η σιδηροδοκός εισάγονται με κόμβους που βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Τα πεπερασμένα στοιχεία που θα δημιουργηθούν ορίζονται να έχουν διαστάσεις 0,5 m · 0,5 m ώστε να υπάρχει ταύτιση των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων της σιδηροδοκού με τους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων της πλάκας σκυροδέματος. Εισάγοντας τα δύο στοιχεία στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο και εξασφαλίζοντας την ταύτιση των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων τους επιτυγχάνεται η κινηματική τους δέσμευση και επομένως η σύμμικτη λειτουργία του φορέα.

Στο Σχήμα 3-11 παρουσιάζεται μια 3D απεικόνιση του μοντέλου ιδεατής διατομής στο πρόγραμμα SIFISTIC 2020. Και αυτό το μοντέλο αναλύθηκε με την γραμμική – ελαστική μέθοδο.



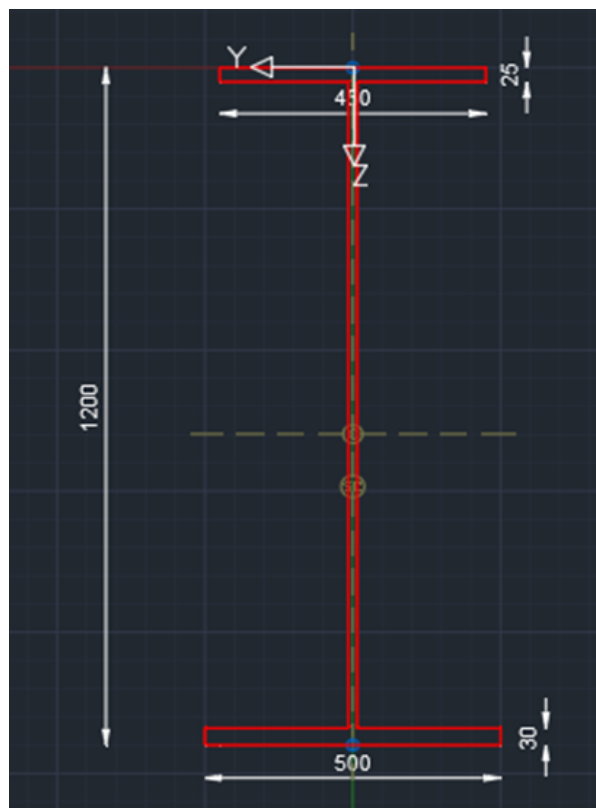
Σχήμα 3-10: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο ιδεατής διατομής σύμμικτης δοκού γέφυρας



Σχήμα 3-11: 3D απεικόνιση μοντέλου ιδεατής διατομής στο πρόγραμμα SOFISTiK 2020

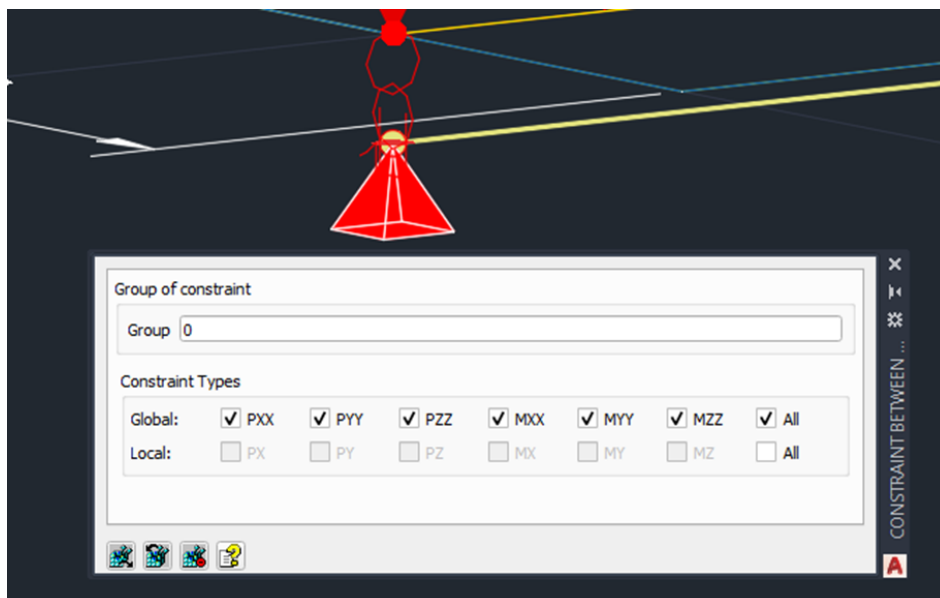
3.2.6 Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις

Και σε αυτό το μοντέλο η πλάκα σκυροδέματος εισάγεται ως επιφανειακό στοιχείο και η σιδηροδοκός ως γραμμικό στοιχείο. Η διατομή της σιδηροδοκού τροποποιείται ώστε το σημείο εισαγωγής της να είναι πλέον το μέσο της άνω ίνας της όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-12. Για να τοποθετηθεί η σιδηροδοκός στην σωστή θέση ως προς την πλάκα σκυροδέματος θα πρέπει να εισαχθεί σε απόσταση 250 mm από το επίπεδο εισαγωγής του επιφανειακού στοιχείου πλάκας.



Σχήμα 3-12: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις

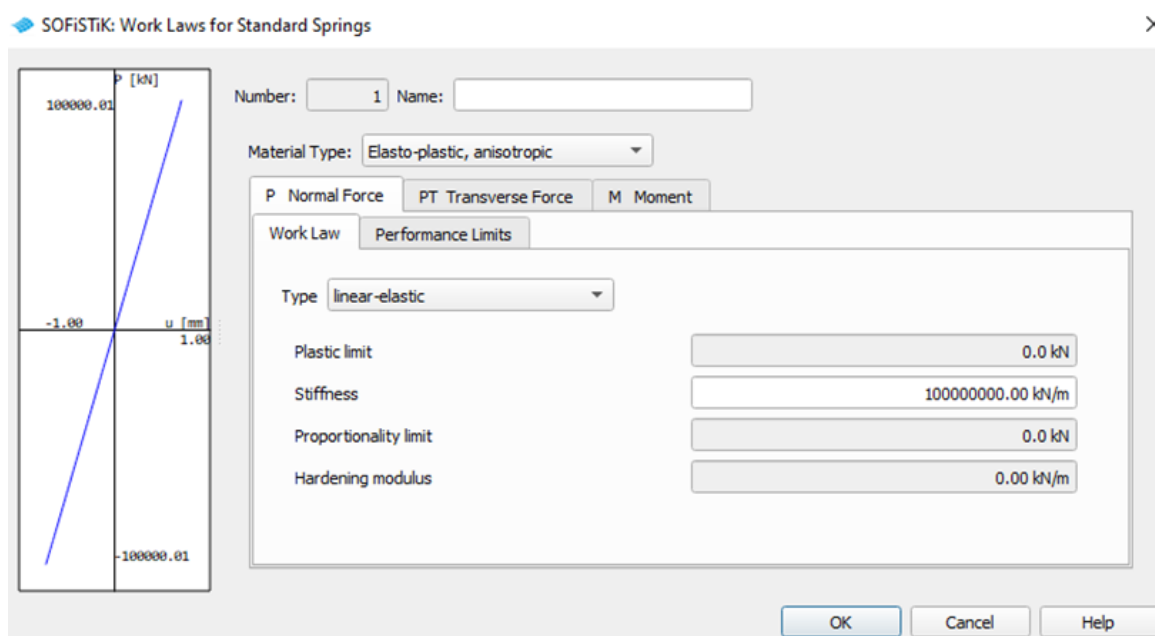
Για να εξασφαλιστεί η σύνδεση και η σύμμικτη λειτουργία της πλάκας σκυροδέματος και της σιδηροδοκού εισάγονται ανά 0,5 m κινηματικές δεσμεύσεις (Point Constraints) μεταξύ τους, δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 3-13). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείτε ένα «στερεό σώμα», το οποίο προσομοιώνει την επιπεδότητα της διατομής. Ως μέθοδος ανάλυσης επιλέγεται και σε αυτήν την περίπτωση η γραμμική-ελαστική.



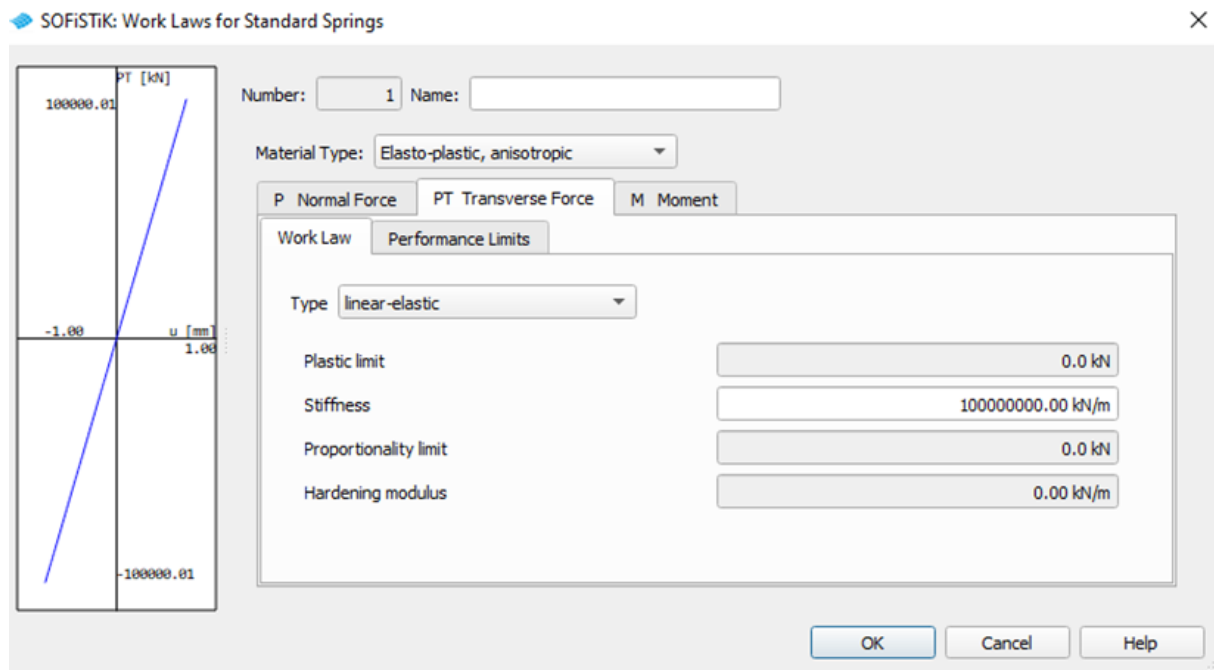
Σχήμα 3-13: Εισαγωγή κινηματικών δεσμεύσεων μεταξύ σιδηροδοκού και πλάκας σκυροδέματος

3.2.7 Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων

Το μοντέλο των γραμμικών ελατηρίων προκύπτει από το προηγούμενο μοντέλο με αντικατάσταση των κινηματικών δεσμεύσεων από ελατήρια. Τα ελατήρια αυτά έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6$ kN/m) τόσο στην διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση (Σχήμα 3-14 και Σχήμα 3-15). Μια τόσο μεγάλη, πρακτικώς άπειρη, δυσκαμψία αντιστοιχεί σε κινηματική δέσμευση.

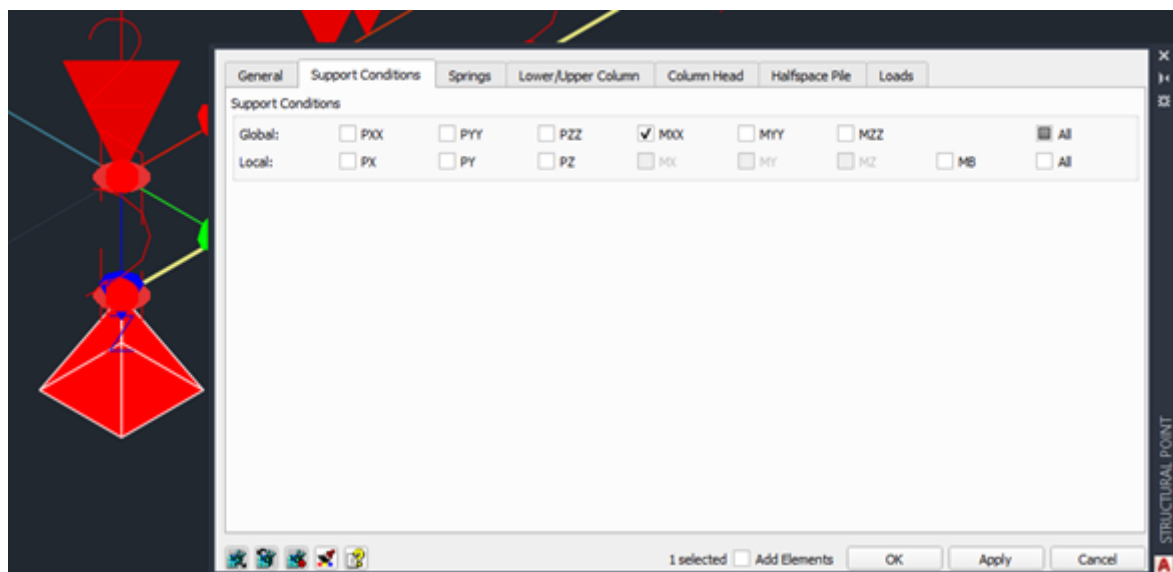


Σχήμα 3-14: Ιδιότητες γραμμικού ελατηρίου στην διαμήκη διεύθυνση



Σχήμα 3-15: Ιδιότητες γραμμικού ελατηρίου στην εγκάρσια διεύθυνση

Για να αποφευχθεί η στροφή της πλάκας σκυροδέματος περί τον άξονα x τοποθετείται επιπλέον μία στήριξη. Η στήριξη τοποθετείται στον κόμβο που συνδέει την πλάκα σκυροδέματος με το πέρας του πρώτου ελατηρίου και σε αυτήν δεσμεύεται η στροφή περί τον άξονα x (Σχήμα 3-16). Και αυτό το μοντέλο αναλύεται με την γραμμική-ελαστική μέθοδο.



Σχήμα 3-16: Δέσμευση στροφής περί τον άξονα x στην πλάκα σκυροδέματος

3.2.8 Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων

Στο μοντέλο αυτό τα ελατήρια εξακολουθούν να έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6$ kN/m) στην διαμήκη διεύθυνση (Σχήμα 3-14), στην εγκάρσια διεύθυνση όμως συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά με δυσκαμψία και όριο διαρροής τα αντίστοιχα της ομάδας των διατμητικών ήλων που έχουν τοποθετηθεί σε μήκος 0,5 m.

Για την διατμητική σύνδεση σιδηροδοκού και πλάκας σκυροδέματος θα χρησιμοποιηθούν διατμητικοί ήλοι κεφαλής Φ19, κατηγορίας S 235 J2 + C 450 με $f_y = 350$ MPa και $f_u = 450$ MPa ενώ το ύψος τους επιλέγεται να είναι $h = 200$ mm.

Η οριακή αντοχή του ενός ήλου δίνεται από την ελάχιστη τιμή των εξ. (2-8) και (2-9) και είναι:

$$P_{Rd} = \min \left\{ 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right)}{Y_v}, 0,29 \cdot a \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm} / Y_v} \right\}$$

$$\text{όπου } a = \begin{cases} 0,2 \cdot \left(\frac{h}{d} + 1\right) & \text{για } 3 \leq \frac{h}{d} \leq 4 \\ 1 & \text{για } 4 < \frac{h}{d} \end{cases} \Rightarrow a = 1$$

Επομένως:

$$P_{Rd} = \min\{81,7 \text{ kN}, 83,3 \text{ kN}\} \Rightarrow P_{Rd} = 81,7 \text{ kN}$$

Η διατμητική δυσκαμψία του ενός διατμητικού ήλου δίνεται από την εξ. (2-13) (He et al [12]) και είναι:

$$k_s = C \cdot d \cdot E_{cm}^{\frac{3}{4}} \cdot E_a^{\frac{1}{4}}$$

όπου $C = 0,374$ και επομένως:

$$k_s = 372.447,9 \text{ kN/m}$$

Η οριακή αντοχή $P_{y,spring}$ του ενός ελατηρίου δίνεται από την εξ. (3-1).

$$P_{y,spring} = n \cdot P_{Rd} \cdot \frac{l_{spring}}{l_{stud}} \quad (3-1)$$

όπου:

n = Ο αριθμός ήλων ανά διατομή

l_{spring} = Η απόσταση μεταξύ των ελατηρίων και

l_{stud} = Η απόσταση μεταξύ των ήλων.

Όλοι οι διατμητικοί σύνδεσμοι υπόκεινται στην ίδια μετατόπιση δ και επομένως συνδέονται εν παραλλήλω. Κατ' αντιστοιχία με την εξ.(3-1) η δύναμη P_{spring} του ενός ελατηρίου δίνεται από την εξ. (3-2).

$$P_{spring} = n \cdot P_{stud} \cdot \frac{l_{spring}}{l_{stud}} \quad (3-2)$$

όπου P_{stud} η δύναμη του ενός ήλου.

Λόγω της εν παραλλήλω σύνδεσης των διατμητικών ήλων και κατ' επέκταση των ελατηρίων ισχύει:

$$k_s = \frac{P_{stud}}{\delta} \text{ και } k_{spring} = \frac{P_{spring}}{\delta}$$

και επομένως:

$$k_{spring} = \frac{n \cdot P_{stud} \cdot \frac{l_{spring}}{l_{stud}}}{\delta} \Rightarrow k_{spring} = \frac{n \cdot k_s \cdot \delta \cdot \frac{l_{spring}}{l_{stud}}}{\delta} \Rightarrow k_{spring} = n \cdot k_s \cdot \frac{l_{spring}}{l_{stud}}$$

Συνεπώς η διατμητική δυσκαμψία k_{spring} του ενός ελατηρίου δίνεται από την εξ. (3-3).

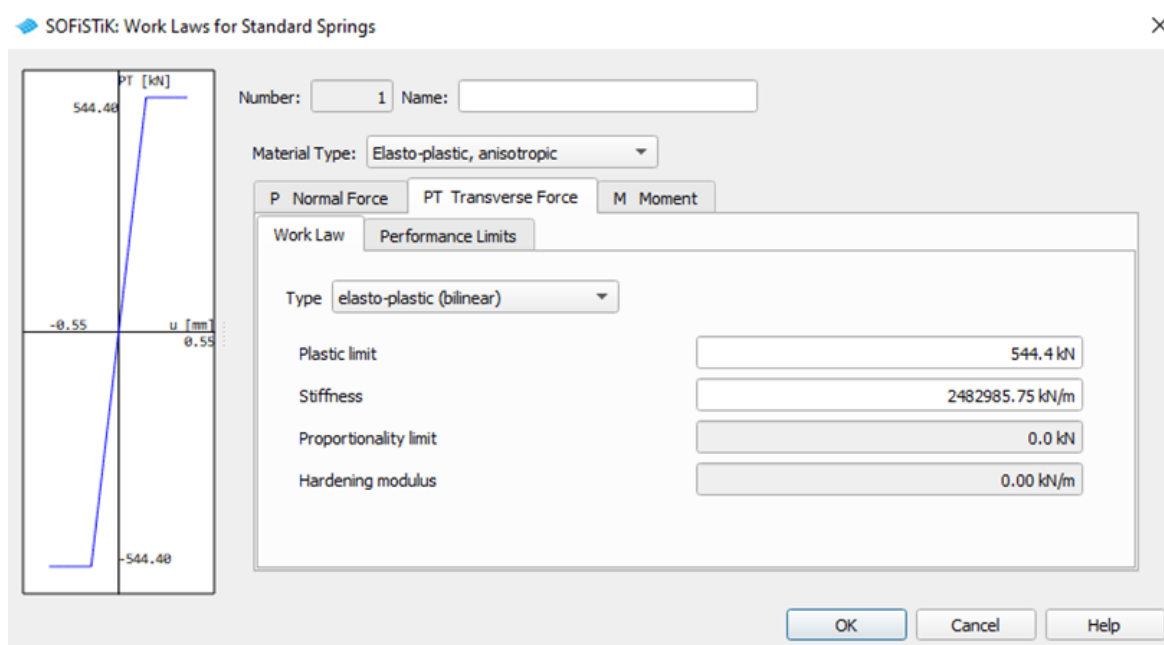
$$k_{spring} = n \cdot k_s \cdot \frac{I_{spring}}{I_{stud}} \quad (3-3)$$

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγική παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια όσον αφορά τον αριθμό και την κατανομή των διατμητικών ήλων. Σε όλα τα υπόψη σενάρια επιλέχθηκε να τοποθετηθούν δύο ήλοι σε κάθε διατομή ($n = 2$). Συγκεκριμένα εξετάστηκαν πέντε σενάρια στα οποία επιλέχθηκε ομοιόμορφη πλαστική κατανομή των διατμητικών ήλων σε αποστάσεις 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm και 350 mm. Στη συνέχεια εξετάστηκαν επιπλέον πέντε σενάρια στα οποία οι διατμητικοί ήλοι τοποθετήθηκαν με ελαστοπλαστική κατανομή. Συγκεκριμένα στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού οι διατμητικοί ήλοι τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις όπως προηγουμένως ενώ στο μεσαίο τρίτο σε διπλάσιες αποστάσεις. Ο Πίνακας 3-3 παρουσιάζει την οριακή αντοχή και την διατμητική δυσκαμψία των ελατηρίων για κάθε μία διαφορετική κατανομή των ήλων. Οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στις τιμές των υπόψη μεγεθών στα ακραία και στο μεσαίο τρίτο του μήκους της δοκού αντίστοιχα. Στα σενάρια όπου έχουμε ομοιόμορφη πλαστική κατανομή των ήλων δεν δίνονται τιμές μεγεθών για το μεσαίο τρίτο του μήκους της δοκού.

Πίνακας 3-3: Τιμές οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίων

A/A	Κατανομή ήλων (mm)	$P_{y,spring,1}$ (kN)	$P_{y,spring,2}$ (kN)	$k_{spring,1}$ (kN/m)	$k_{spring,2}$ (kN/m)
1	2Φ19/150	544,4	-	2.482.985,75	-
2	2Φ19/200	408,3	-	1.862.239,29	-
3	2Φ19/250	326,6	-	1.489.791,43	-
4	2Φ19/300	272,2	-	1.241.492,86	-
5	2Φ19/150	233,3	-	1.064.136,74	-
6	2Φ19/150 & 2Φ19/300	544,4	272,2	2.482.985,75	1.241.492,86
7	2Φ19/200 & 2Φ19/400	408,3	204,1	1.862.239,29	931.119,65
8	2Φ19/250 & 2Φ19/500	326,6	163,3	1.489.791,43	744.895,72
9	2Φ19/300 & 2Φ19/600	272,2	136,1	1.241.492,86	620.746,43
10	2Φ19/350 & 2Φ19/700	233,3	116,7	1.064.136,74	532.068,37

Στο Σχήμα 3-17 δίνεται ενδεικτικά η εισαγωγή της οριακής αντοχής και της διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020 για κατανομή διατμητικών ήλων 2Φ19/150.



Σχήμα 3-17: Εισαγωγή οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

Για κάθε ένα από τα υπόψη δέκα διαφορετικά σενάρια εξετάστηκαν δύο διαφορετικές παραλλαγές:

- Στην πρώτη η πλάκα σκυροδέματος εισάγεται ως προς οριζόντιο επίπεδο που ταυτίζεται με το άνω οριζόντιο επίπεδο της . Σε αυτή την περίπτωση το μήκος των ελατηρίων ταυτίζεται με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος (250 mm).
- Στην δεύτερη η πλάκα σκυροδέματος εισάγεται ως προς οριζόντιο επίπεδο που ταυτίζεται με το οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της . Σε αυτή την περίπτωση το μήκος των ελατηρίων ταυτίζεται με το μισό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος (125 mm).

Αυτό γίνεται προκειμένου να αποσαφηνισθεί αν έχει σημαντική συμβολή το ύψος του ήλου και κατ' επέκταση το μήκος του ελατηρίου στα τελικά αποτελέσματα.

Για το μοντέλο των μη γραμμικών ελατηρίων δημιουργήθηκαν επομένως είκοσι διαφορετικά σενάρια. Τα σενάρια αυτά αναλύθηκαν με μη γραμμική ανάλυση. Συγκεκριμένα σε περιβάλλον text editor του SSD του SOFiSTiK 2020 δημιουργήθηκε μια νέα εργασία η οποία περιείχε τον αναγκαίο κώδικα τόσο για τους συνδυασμούς φορτίσεων όσο και για την μη γραμμική ανάλυση τους. Στο Σχήμα 3-18 δίνεται ένα παράδειγμα από τον κώδικα για την δημιουργία φόρτισης για μεμονωμένο φορτίο, στο Σχήμα 3-19 αντίστοιχο παράδειγμα για δημιουργία συνδυασμού φορτίσεων και στο Σχήμα 3-20 ένα παράδειγμα από τον κώδικα για την μη γραμμική ανάλυση ενός συνδυασμού φορτίσεων.

```
+PROG SOFILOAD urs:10.1 $ Combine Loads
HEAD Combine Loads
PAGE UNII 0
LC 1001 TYPE (D) TITL 'G'
COPY no 1 fact 1.0          $ 1: G Uniform Distributed
```

Σχήμα 3-18: Κώδικας δημιουργίας φόρτισης για μεμονωμένο φορτίο στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

```
LC 1032 TYPE (D) TITL '1.35G+1.35TS 4.5+1.35UDL'
COPY 1 1.35          $ 1: G Uniform Distributed
COPY 11 1.35         $ 11: TS 4.5 Concentrated
COPY 12 1.35         $ 12: UDL Concentrated
END
```

Σχήμα 3-19: Κώδικας δημιουργίας συνδυασμού φορτίσεων στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

```
+PROG ASE urs:11.1 $ Analysis of Combined Loads
HEAD Analysis of Combined Loads
PAGE UNII 0
CTRL OPT WARP VAL 0
CTRL ITER 1
SYST PROB th3 ITER 60
$ECHO SPRI EXTR
LC 1001
END
```

Σχήμα 3-20: Κώδικας μη γραμμικής ανάλυσης στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα της ανάλυσης των μοντέλων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης δοκού, οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνας της σιδηροδοκού και οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις των ελατηρίων για κάθε μοντέλο. Για την ευχερέστερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων ο Πίνακας 3-4 παρουσιάζει την αντιστοιχία του ονόματος κάθε μοντέλου με την περιγραφή του.

Πίνακας 3-4: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης δοκού γέφυρας που αναλύθηκαν

A/A	Μοντέλο	Περιγραφή
1	Μοντέλο 1	Μοντέλο ενιαίας διατομής
2	Μοντέλο 2	Μοντέλο ιδεατής διατομής
3	Μοντέλο 3	Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις
4	Μοντέλο 4	Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων
5	Μοντέλο 5	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/150
6	Μοντέλο 6	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/150
7	Μοντέλο 7	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/200
8	Μοντέλο 8	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/200
9	Μοντέλο 9	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/250
10	Μοντέλο 10	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/250
11	Μοντέλο 11	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/300
12	Μοντέλο 12	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/300
13	Μοντέλο 13	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350
14	Μοντέλο 14	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350
15	Μοντέλο 15	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/150 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/300 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
16	Μοντέλο 16	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/150 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/300 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
17	Μοντέλο 17	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/200 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/400 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
18	Μοντέλο 18	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/200 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/400 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
19	Μοντέλο 19	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/250 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/500 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
20	Μοντέλο 20	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/250 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/500 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
21	Μοντέλο 21	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/300 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/600 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
22	Μοντέλο 22	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/300 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/600 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
23	Μοντέλο 23	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/700 στο μεσαίο τρίτο της δοκού
24	Μοντέλο 24	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350 στα ακραία τρίτα του μήκους της δοκού και 2Φ19/700 στο μεσαίο τρίτο της δοκού

3.3.1 Μέγιστα βέλη σύμμικτης δοκού γέφυρας

Στους Πίνακες 3-5 έως 3-10 παρουσιάζονται τα μέγιστα βέλη σε mm της σύμμικτης δοκού γέφυρας. Για όλα τα μοντέλα μη γραμμικών ελατηρίων (μοντέλα 5 έως 24) δίνεται και η % διαφορά των μέγιστων

βελών ως προς τα βέλη του μοντέλου της ενιαίας διατομής (μοντέλο 1), σύμφωνα με την εξ. (3-4). Επίσης δίνονται η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή των εν λόγω διαφορών για κάθε μοντέλο.

$$\Delta\delta_i (\%) = \frac{\delta_1 - \delta_i}{\delta_1} \cdot 100 \quad (3-4)$$

όπου:

$\Delta\delta_i$ = % μεταβολή του μέγιστου βέλους του μοντέλου i ως προς το μοντέλο 1,

δ_1 = μέγιστο βέλος μοντέλου 1 και

δ_i = μέγιστο βέλος μοντέλου i ($i = 5$ έως 24).

Πίνακας 3-5: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 1 έως 4

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
1	1001 G	11,4	11,4	11,4	11,6
2	1002 TS 12	13,7	13,5	13,6	13,9
3	1003 TS 0.5	0,8	0,9	0,9	0,9
4	1004 TS 1.0	1,7	1,7	1,7	1,7
5	1005 TS 1.5	2,6	2,6	2,6	2,6
6	1006 TS 2.0	3,4	3,4	3,4	3,5
7	1007 TS 2.5	4,2	4,2	4,2	4,3
8	1008 TS 3.0	5,0	5,0	5,0	5,1
9	1009 TS 3.5	5,8	5,8	5,8	5,9
10	1010 TS 4.0	6,5	6,6	6,6	6,7
11	1011 TS 4.5	7,3	7,3	7,4	7,5
12	1012 UDL	9,5	9,5	9,5	9,7
13	1013 G + TS 12 + UDL	34,6	34,4	34,5	35,2
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	21,8	21,7	21,7	22,1
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	22,6	22,5	22,6	23,0
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	23,5	23,3	23,4	23,8
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	24,3	24,2	24,2	24,6
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	25,1	25,0	25,0	25,5
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	25,9	25,8	25,8	26,3
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	26,6	26,6	26,6	27,1
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	27,4	27,3	27,4	27,8
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	28,1	28,1	28,1	28,6
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	46,8	46,4	46,6	47,5
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	29,4	29,3	29,4	29,9
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	30,5	30,4	30,5	31,0
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	31,7	31,5	31,6	32,1
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	32,8	32,6	32,7	33,3
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	33,9	33,7	33,8	34,4
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	34,9	34,8	34,9	35,5
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	36,0	35,8	35,9	36,5
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	37,0	36,9	37,0	37,6
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	38,0	37,9	38,0	38,6

Πίνακας 3-6: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 5-8

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7		Μοντέλο 8	
		Τιμή	$\Delta\delta_5$	Τιμή	$\Delta\delta_6$	Τιμή	$\Delta\delta_7$	Τιμή	$\Delta\delta_8$
1	1001 G	11,7	-2,6%	11,7	-2,6%	11,8	-3,5%	11,7	-2,6%
2	1002 TS 12	14,1	-2,9%	14,0	-2,2%	14,1	-2,9%	14,0	-2,2%
3	1003 TS 0.5	0,9	-6,4%	0,9	-5,8%	0,9	-6,8%	0,9	-6,0%
4	1004 TS 1.0	1,8	-4,1%	1,8	-3,6%	1,8	-4,7%	1,8	-4,1%
5	1005 TS 1.5	2,6	-3,1%	2,6	-2,7%	2,6	-3,5%	2,6	-3,1%

Πίνακας 3-6 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7		Μοντέλο 8	
		Τιμή	Δδ ₅	Τιμή	Δδ ₆	Τιμή	Δδ ₇	Τιμή	Δδ ₈
6	1006 TS 2.0	3,5	-2,6%	3,5	-2,1%	3,5	-2,9%	3,5	-2,3%
7	1007 TS 2.5	4,4	-2,6%	4,3	-1,9%	4,4	-2,8%	4,3	-2,4%
8	1008 TS 3.0	5,2	-3,4%	5,2	-2,8%	5,2	-3,8%	5,2	-3,2%
9	1009 TS 3.5	6,0	-4,0%	6,0	-3,3%	6,0	-4,3%	6,0	-3,6%
10	1010 TS 4.0	6,8	-3,8%	6,8	-3,2%	6,8	-4,1%	6,8	-3,5%
11	1011 TS 4.5	7,6	-3,7%	7,5	-3,0%	7,6	-4,0%	7,5	-3,4%
12	1012 UDL	9,8	-2,6%	9,7	-2,0%	9,8	-2,9%	9,8	-2,4%
13	1013 G + TS 12 + UDL	35,6	-2,9%	35,4	-2,3%	35,7	-3,2%	35,5	-2,6%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	22,4	-2,8%	22,2	-1,8%	22,5	-3,2%	22,3	-2,3%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	23,2	-2,7%	23,1	-2,2%	23,3	-3,1%	23,2	-2,7%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	24,1	-2,6%	23,9	-1,7%	24,2	-3,0%	24,0	-2,1%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	24,9	-2,5%	24,8	-2,1%	25,0	-2,9%	24,9	-2,5%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	25,7	-2,4%	25,6	-2,0%	25,8	-2,8%	25,7	-2,4%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	26,6	-2,7%	26,4	-1,9%	26,7	-3,1%	26,5	-2,3%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	27,4	-3,0%	27,2	-2,3%	27,5	-3,4%	27,3	-2,6%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	28,2	-2,9%	28,0	-2,2%	28,3	-3,3%	28,1	-2,6%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	28,9	-2,8%	28,8	-2,5%	29,0	-3,2%	28,9	-2,8%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,1	-2,8%	47,8	-2,1%	48,3	-3,2%	48,0	-2,6%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,2	-2,7%	30,0	-2,0%	30,3	-3,1%	30,1	-2,4%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,4	-3,0%	31,2	-2,3%	31,5	-3,3%	31,3	-2,6%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,5	-2,5%	32,3	-1,9%	32,6	-2,8%	32,4	-2,2%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	33,6	-2,4%	33,4	-1,8%	33,7	-2,7%	33,6	-2,4%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	34,8	-2,7%	34,6	-2,1%	34,9	-2,9%	34,7	-2,4%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	35,9	-2,9%	35,7	-2,3%	36,0	-3,2%	35,8	-2,6%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,0	-2,8%	36,7	-1,9%	37,1	-3,1%	36,9	-2,5%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,0	-2,7%	37,8	-2,2%	38,1	-3,0%	37,9	-2,4%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,0	-2,6%	38,8	-2,1%	39,2	-3,2%	39,0	-2,6%
Μέση τιμή των Δδ _i		-	-3,0%	-	-2,4%	-	-3,4%	-	-2,8%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _i		-	-6,4%	-	-5,8%	-	-6,8%	-	-6,0%

Πίνακας 3-7: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 9-12

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 9		Μοντέλο 10		Μοντέλο 11		Μοντέλο 12	
		Τιμή	Δδ ₉	Τιμή	Δδ ₁₀	Τιμή	Δδ ₁₁	Τιμή	Δδ ₁₂
1	1001 G	11,8	-3,5%	11,8	-3,5%	11,9	-4,4%	11,8	-3,5%
2	1002 TS 12	14,2	-3,6%	14,1	-2,9%	14,2	-3,6%	14,1	-2,9%
3	1003 TS 0.5	0,9	-7,0%	0,9	-6,4%	0,9	-7,4%	0,9	-6,8%
4	1004 TS 1.0	1,8	-4,7%	1,8	-4,1%	1,8	-5,3%	1,8	-4,7%
5	1005 TS 1.5	2,7	-3,9%	2,6	-3,5%	2,7	-4,3%	2,6	-3,5%
6	1006 TS 2.0	3,5	-3,2%	3,5	-2,6%	3,5	-3,5%	3,5	-2,9%
7	1007 TS 2.5	4,4	-3,3%	4,4	-2,6%	4,4	-3,5%	4,4	-3,1%
8	1008 TS 3.0	5,2	-4,2%	5,2	-3,6%	5,2	-4,4%	5,2	-4,0%
9	1009 TS 3.5	6,0	-4,7%	6,0	-4,0%	6,1	-5,0%	6,0	-4,5%
10	1010 TS 4.0	6,8	-4,6%	6,8	-4,0%	6,9	-4,9%	6,8	-4,3%
11	1011 TS 4.5	7,6	-4,4%	7,6	-3,8%	7,6	-4,8%	7,6	-4,1%

Πίνακας 3-7 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 9		Μοντέλο 10		Μοντέλο 11		Μοντέλο 12	
		Τιμή	Δδ ₉	Τιμή	Δδ ₁₀	Τιμή	Δδ ₁₁	Τιμή	Δδ ₁₂
12	1012 UDL	9,9	-3,4%	9,8	-2,7%	9,9	-3,7%	9,8	-3,1%
13	1013 G + TS 12 + UDL	35,9	-3,8%	35,7	-3,2%	36,0	-4,0%	35,8	-3,5%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	22,5	-3,2%	22,4	-2,8%	22,6	-3,7%	22,5	-3,2%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	23,4	-3,5%	23,3	-3,1%	23,5	-4,0%	23,3	-3,1%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	24,2	-3,0%	24,1	-2,6%	24,3	-3,4%	24,2	-3,0%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	25,1	-3,3%	24,9	-2,5%	25,2	-3,7%	25,0	-2,9%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	25,9	-3,2%	25,8	-2,8%	26,0	-3,6%	25,9	-3,2%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	26,7	-3,1%	26,6	-2,7%	26,8	-3,5%	26,7	-3,1%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	27,6	-3,8%	27,4	-3,0%	27,7	-4,1%	27,5	-3,4%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	28,3	-3,3%	28,2	-2,9%	28,4	-3,6%	28,3	-3,3%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	29,1	-3,6%	29,0	-3,2%	29,2	-3,9%	29,1	-3,6%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,4	-3,4%	48,1	-2,8%	48,6	-3,8%	48,3	-3,2%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,4	-3,4%	30,2	-2,7%	30,5	-3,7%	30,4	-3,4%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,6	-3,6%	31,4	-3,0%	31,7	-3,9%	31,5	-3,3%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,7	-3,2%	32,5	-2,5%	32,8	-3,5%	32,7	-3,2%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	33,9	-3,4%	33,7	-2,7%	34,0	-3,7%	33,8	-3,0%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	35,0	-3,2%	34,8	-2,7%	35,1	-3,5%	34,9	-2,9%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	36,1	-3,4%	35,9	-2,9%	36,2	-3,7%	36,0	-3,2%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,2	-3,3%	37,0	-2,8%	37,3	-3,6%	37,1	-3,1%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,3	-3,5%	38,1	-3,0%	38,4	-3,8%	38,2	-3,2%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,3	-3,4%	39,1	-2,9%	39,4	-3,7%	39,2	-3,2%
Μέση τιμή των Δδ _i		-	-3,7%	-	-3,1%	-	-4,0%	-	-3,5%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _i		-	-7,0%	-	-6,4%	-	-7,4%	-	-6,8%

Πίνακας 3-8: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 13-16

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13		Μοντέλο 14		Μοντέλο 15		Μοντέλο 16	
		Τιμή	Δδ ₁₃	Τιμή	Δδ ₁₄	Τιμή	Δδ ₁₅	Τιμή	Δδ ₁₆
1	1001 G	11,9	-4,4%	11,8	-3,5%	11,7	-2,6%	11,7	-2,6%
2	1002 TS 12	14,3	-4,4%	14,2	-3,6%	14,1	-2,9%	14,0	-2,2%
3	1003 TS 0.5	0,9	-7,7%	0,9	-7,1%	0,9	-6,5%	0,9	-5,9%
4	1004 TS 1.0	1,8	-5,3%	1,8	-4,7%	1,8	-4,1%	1,8	-3,6%
5	1005 TS 1.5	2,7	-4,7%	2,7	-3,9%	2,6	-3,5%	2,6	-2,7%
6	1006 TS 2.0	3,5	-3,8%	3,5	-3,2%	3,5	-2,6%	3,5	-2,1%
7	1007 TS 2.5	4,4	-4,0%	4,4	-3,3%	4,4	-2,6%	4,3	-2,1%
8	1008 TS 3.0	5,3	-4,8%	5,2	-4,2%	5,2	-3,6%	5,2	-3,0%
9	1009 TS 3.5	6,1	-5,4%	6,1	-4,9%	6,0	-4,0%	6,0	-3,5%
10	1010 TS 4.0	6,9	-5,4%	6,9	-4,7%	6,8	-4,0%	6,8	-3,4%
11	1011 TS 4.5	7,7	-5,1%	7,6	-4,5%	7,6	-3,7%	7,5	-3,2%
12	1012 UDL	9,9	-4,1%	9,9	-3,5%	9,8	-2,7%	9,7	-2,1%
13	1013 G + TS 12 + UDL	36,1	-4,3%	35,9	-3,8%	35,7	-3,2%	35,4	-2,3%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	22,7	-4,1%	22,6	-3,7%	22,4	-2,8%	22,3	-2,3%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	23,5	-4,0%	23,4	-3,5%	23,2	-2,7%	23,1	-2,2%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	24,4	-3,8%	24,3	-3,4%	24,1	-2,6%	23,9	-1,7%

Πίνακας 3-8 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13		Μοντέλο 14		Μοντέλο 15		Μοντέλο 16	
		Τιμή	Δδ ₁₃	Τιμή	Δδ ₁₄	Τιμή	Δδ ₁₅	Τιμή	Δδ ₁₆
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	25,3	-4,1%	25,1	-3,3%	24,9	-2,5%	24,8	-2,1%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	26,1	-4,0%	26,0	-3,6%	25,8	-2,8%	25,6	-2,0%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	26,9	-3,9%	26,8	-3,5%	26,6	-2,7%	26,4	-1,9%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	27,7	-4,1%	27,6	-3,8%	27,4	-3,0%	27,2	-2,3%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	28,5	-4,0%	28,4	-3,6%	28,2	-2,9%	28,0	-2,2%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	29,3	-4,3%	29,2	-3,9%	28,9	-2,8%	28,8	-2,5%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,8	-4,3%	48,5	-3,6%	48,1	-2,8%	47,9	-2,4%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,6	-4,1%	30,5	-3,7%	30,2	-2,7%	30,1	-2,4%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,8	-4,3%	31,6	-3,6%	31,4	-3,0%	31,2	-2,3%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,9	-3,8%	32,8	-3,5%	32,5	-2,5%	32,3	-1,9%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	34,1	-4,0%	33,9	-3,4%	33,7	-2,7%	33,5	-2,1%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	35,2	-3,8%	35,0	-3,2%	34,8	-2,7%	34,6	-2,1%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	36,4	-4,3%	36,2	-3,7%	35,9	-2,9%	35,7	-2,3%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,5	-4,2%	37,3	-3,6%	37,0	-2,8%	36,8	-2,2%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,6	-4,3%	38,4	-3,8%	38,0	-2,7%	37,8	-2,2%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,6	-4,2%	39,4	-3,7%	39,1	-2,9%	38,8	-2,1%
Μέση τιμή των Δδ _i		-	-4,4%	-	-3,8%	-	-3,1%	-	-2,5%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _i		-	-7,7%	-	-7,1%	-	-6,5%	-	-5,9%

Πίνακας 3-9: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 17-20

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 17		Μοντέλο 18		Μοντέλο 19		Μοντέλο 20	
		Τιμή	Δδ ₁₇	Τιμή	Δδ ₁₈	Τιμή	Δδ ₁₉	Τιμή	Δδ ₂₀
1	1001 G	11,8	-3,5%	11,7	-2,6%	11,8	-3,5%	11,8	-3,5%
2	1002 TS 12	14,2	-3,6%	14,1	-2,9%	14,2	-3,6%	14,1	-2,9%
3	1003 TS 0.5	0,9	-6,9%	0,9	-6,3%	0,9	-7,2%	0,9	-6,6%
4	1004 TS 1.0	1,8	-4,7%	1,8	-4,1%	1,8	-5,3%	1,8	-4,7%
5	1005 TS 1.5	2,7	-3,9%	2,6	-3,1%	2,7	-4,3%	2,6	-3,5%
6	1006 TS 2.0	3,5	-2,9%	3,5	-2,3%	3,5	-3,5%	3,5	-2,9%
7	1007 TS 2.5	4,4	-3,1%	4,3	-2,4%	4,4	-3,3%	4,4	-2,8%
8	1008 TS 3.0	5,2	-4,0%	5,2	-3,4%	5,2	-4,4%	5,2	-3,8%
9	1009 TS 3.5	6,0	-4,5%	6,0	-3,8%	6,1	-4,9%	6,0	-4,2%
10	1010 TS 4.0	6,8	-4,3%	6,8	-3,7%	6,9	-4,7%	6,8	-4,1%
11	1011 TS 4.5	7,6	-4,1%	7,6	-3,6%	7,6	-4,5%	7,6	-4,0%
12	1012 UDL	9,8	-3,1%	9,8	-2,5%	9,9	-3,5%	9,8	-2,9%
13	1013 G + TS 12 + UDL	35,8	-3,5%	35,6	-2,9%	35,9	-3,8%	35,7	-3,2%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	22,5	-3,2%	22,3	-2,3%	22,6	-3,7%	22,4	-2,8%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	23,3	-3,1%	23,2	-2,7%	23,4	-3,5%	23,3	-3,1%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	24,2	-3,0%	24,0	-2,1%	24,3	-3,4%	24,1	-2,6%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	25,0	-2,9%	24,9	-2,5%	25,1	-3,3%	25,0	-2,9%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	25,9	-3,2%	25,7	-2,4%	25,9	-3,2%	25,8	-2,8%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	26,7	-3,1%	26,5	-2,3%	26,8	-3,5%	26,6	-2,7%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	27,5	-3,4%	27,3	-2,6%	27,6	-3,8%	27,4	-3,0%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	28,3	-3,3%	28,1	-2,6%	28,4	-3,6%	28,2	-2,9%

Πίνακας 3-9 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 17		Μοντέλο 18		Μοντέλο 19		Μοντέλο 20	
		Τιμή	Δδ ₁₇	Τιμή	Δδ ₁₈	Τιμή	Δδ ₁₉	Τιμή	Δδ ₂₀
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	29,0	-3,2%	28,9	-2,8%	29,1	-3,6%	29,0	-3,2%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,3	-3,2%	48,1	-2,8%	48,5	-3,6%	48,3	-3,2%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,3	-3,1%	30,2	-2,7%	30,5	-3,7%	30,3	-3,1%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,5	-3,3%	31,3	-2,6%	31,6	-3,6%	31,4	-3,0%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,6	-2,8%	32,5	-2,5%	32,8	-3,5%	32,6	-2,8%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	33,8	-3,0%	33,6	-2,4%	33,9	-3,4%	33,7	-2,7%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	34,9	-2,9%	34,7	-2,4%	35,0	-3,2%	34,8	-2,7%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	36,0	-3,2%	35,8	-2,6%	36,2	-3,7%	36,0	-3,2%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,1	-3,1%	36,9	-2,5%	37,2	-3,3%	37,0	-2,8%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,2	-3,2%	38,0	-2,7%	38,3	-3,5%	38,1	-3,0%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,2	-3,2%	39,0	-2,6%	39,4	-3,7%	39,1	-2,9%
Μέση τιμή των Δδ _i		-	-3,5%	-	-2,9%	-	-3,9%	-	-3,3%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _i		-	-6,9%	-	-6,3%	-	-7,2%	-	-6,6%

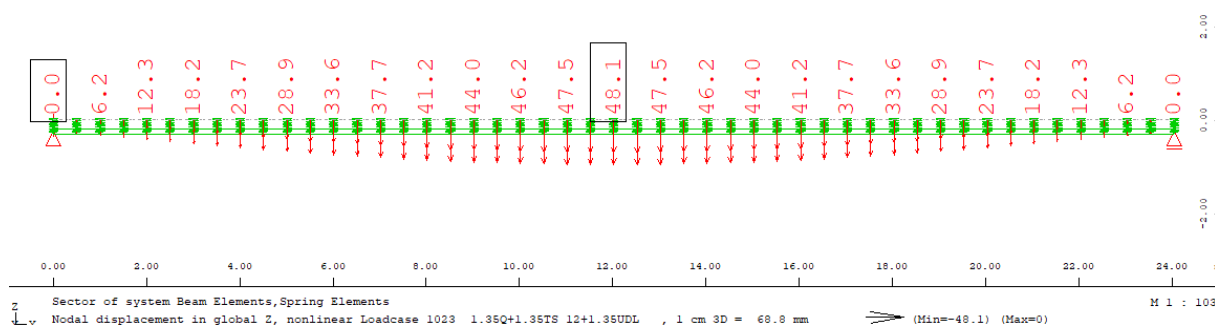
Πίνακας 3-10: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 21-24

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 21		Μοντέλο 22		Μοντέλο 23		Μοντέλο 24	
		Τιμή	Δδ ₂₁	Τιμή	Δδ ₂₂	Τιμή	Δδ ₂₃	Τιμή	Δδ ₂₄
1	1001 G	11,9	-4,4%	11,8	-3,5%	11,9	-4,4%	11,9	-4,4%
2	1002 TS 12	14,3	-4,4%	14,2	-3,6%	14,4	-5,1%	14,3	-4,4%
3	1003 TS 0.5	0,9	-7,6%	0,9	-7,0%	0,9	-8,0%	0,9	-7,4%
4	1004 TS 1.0	1,8	-5,3%	1,8	-4,7%	1,8	-5,9%	1,8	-5,3%
5	1005 TS 1.5	2,7	-4,7%	2,7	-3,9%	2,7	-5,1%	2,7	-4,3%
6	1006 TS 2.0	3,5	-3,8%	3,5	-3,2%	3,6	-4,1%	3,5	-3,5%
7	1007 TS 2.5	4,4	-3,8%	4,4	-3,3%	4,4	-4,2%	4,4	-3,5%
8	1008 TS 3.0	5,2	-4,6%	5,2	-4,2%	5,3	-5,0%	5,2	-4,6%
9	1009 TS 3.5	6,1	-5,2%	6,0	-4,7%	6,1	-5,5%	6,1	-5,0%
10	1010 TS 4.0	6,9	-5,0%	6,8	-4,6%	6,9	-5,5%	6,9	-4,9%
11	1011 TS 4.5	7,7	-4,9%	7,6	-4,4%	7,7	-5,3%	7,6	-4,8%
12	1012 UDL	9,9	-3,9%	9,8	-3,3%	9,9	-4,3%	9,9	-3,7%
13	1013 G + TS 12 + UDL	36,1	-4,3%	35,9	-3,8%	36,2	-4,6%	36,0	-4,0%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	22,6	-3,7%	22,5	-3,2%	22,7	-4,1%	22,6	-3,7%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	23,5	-4,0%	23,4	-3,5%	23,6	-4,4%	23,5	-4,0%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	24,3	-3,4%	24,2	-3,0%	24,4	-3,8%	24,3	-3,4%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	25,2	-3,7%	25,1	-3,3%	25,3	-4,1%	25,2	-3,7%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	26,0	-3,6%	25,9	-3,2%	26,1	-4,0%	26,0	-3,6%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	26,9	-3,9%	26,7	-3,1%	27,0	-4,2%	26,8	-3,5%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	27,7	-4,1%	27,5	-3,4%	27,8	-4,5%	27,6	-3,8%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	28,5	-4,0%	28,3	-3,3%	28,6	-4,4%	28,4	-3,6%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	29,3	-4,3%	29,1	-3,6%	29,4	-4,6%	29,2	-3,9%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,7	-4,1%	48,4	-3,4%	48,9	-4,5%	48,6	-3,8%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,6	-4,1%	30,4	-3,4%	30,7	-4,4%	30,5	-3,7%

Πίνακας 3-10 (συνέχεια)

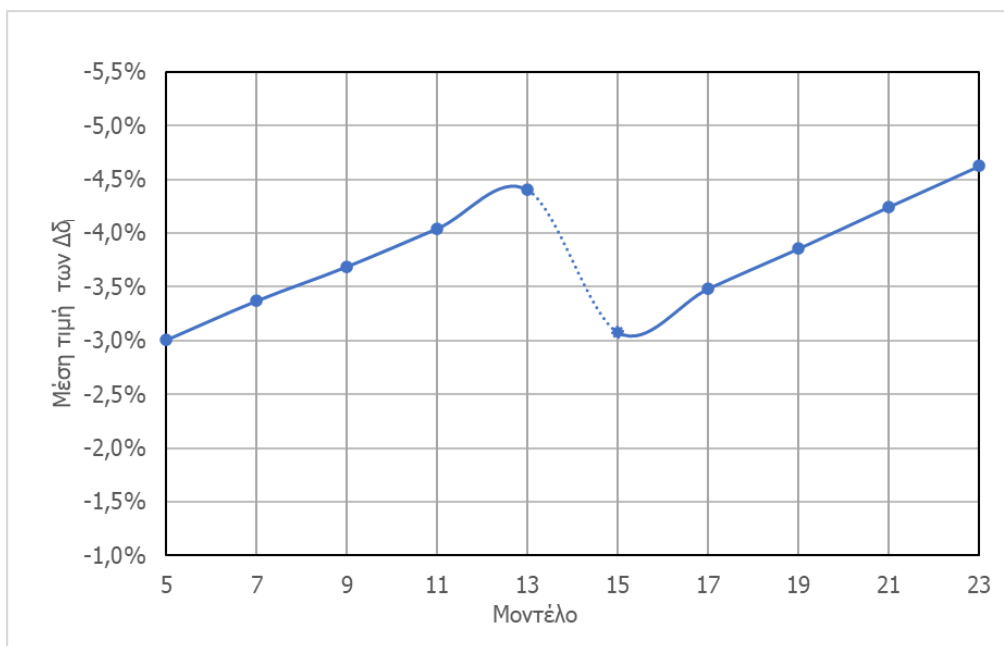
Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 21		Μοντέλο 22		Μοντέλο 23		Μοντέλο 24	
		Τιμή	$\Delta\delta_{21}$	Τιμή	$\Delta\delta_{22}$	Τιμή	$\Delta\delta_{23}$	Τιμή	$\Delta\delta_{24}$
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,7	-3,9%	31,6	-3,6%	31,8	-4,3%	31,7	-3,9%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,9	-3,8%	32,7	-3,2%	33,0	-4,1%	32,8	-3,5%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	34,0	-3,7%	33,8	-3,0%	34,1	-4,0%	34,0	-3,7%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	35,2	-3,8%	35,0	-3,2%	35,3	-4,1%	35,1	-3,5%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	36,3	-4,0%	36,1	-3,4%	36,4	-4,3%	36,2	-3,7%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,4	-3,9%	37,2	-3,3%	37,5	-4,2%	37,3	-3,6%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,5	-4,1%	38,2	-3,2%	38,6	-4,3%	38,4	-3,8%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,5	-3,9%	39,3	-3,4%	39,7	-4,5%	39,4	-3,7%
Μέση τιμή των $\Delta\delta_i$		-	-3,5%	-	-2,9%	-	-3,9%	-	-3,3%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των $\Delta\delta_i$		-	-6,9%	-	-6,3%	-	-7,2%	-	-6,6%

Στο Σχήμα 3-21 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα βέλη της σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1023 (1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL).

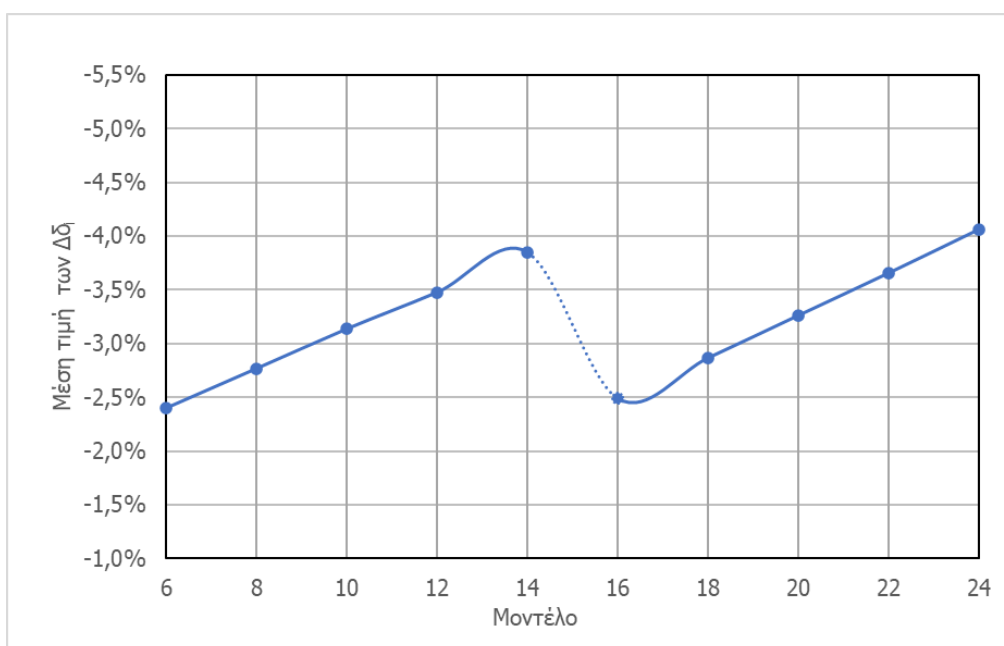


Σχήμα 3-21: Βέλη σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1023

Για τον εποπτικότερο έλεγχο των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 3-22 δίνεται το διάγραμμα των μέσων τιμών των $\Delta\delta_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας και στο Σχήμα 3-23 το αντίστοιχο διάγραμμα για τα μοντέλα με μήκος μη γραμμικών ελατηρίων ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.



Σχήμα 3-22: Μέση τιμή των Δδ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας



Σχήμα 3-23: Μέση τιμή των Δδ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας

3.3.2 Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού γέφυρας

Στους Πίνακες 3-11 έως 3-16 παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις σε MPa της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας. Για όλα τα μοντέλα μη γραμμικών ελατηρίων (μοντέλα 5 έως 24) δίνεται και η % διαφορά των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων ως προς τις αντίστοιχες του μοντέλου της ενιαίας διατομής (μοντέλο 1), σύμφωνα με την εξ. (3-5). Επίσης δίνονται η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή των εν λόγω διαφορών για κάθε μοντέλο.

$$\Delta\sigma_i (\%) = \frac{\sigma_1 - \sigma_i}{\sigma_1} \cdot 100 \quad (3-5)$$

όπου:

$\Delta\sigma_i$ = % μεταβολή μέγιστης εφελκυστικής τάσης κάτω ίνας σιδηροδοκού του μοντέλου i ως προς το μοντέλο 1,

σ_1 = μέγιστη εφελκυστική τάση κάτω ίνας σιδηροδοκού μοντέλου 1 και

σ_i = μέγιστη εφελκυστική τάση κάτω ίνας σιδηροδοκού μοντέλου i ($i = 5$ έως 24).

Πίνακας 3-11: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 1 έως 4

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
1	1001 G	40,3	40,3	40,3	40,3
2	1002 TS 12	59,4	59,3	59,3	59,2
3	1003 TS 0.5	4,3	4,9	4,9	5,2
4	1004 TS 1.0	8,7	9,5	9,5	9,8
5	1005 TS 1.5	13,0	13,9	13,8	14,2
6	1006 TS 2.0	17,3	18,1	18,1	18,4
7	1007 TS 2.5	21,6	22,1	22,0	22,4
8	1008 TS 3.0	26,0	25,9	25,9	26,2
9	1009 TS 3.5	26,0	29,5	29,4	29,7
10	1010 TS 4.0	29,7	32,9	32,9	33,1
11	1011 TS 4.5	33,4	36,1	36,0	36,3
12	1012 UDL	33,6	33,6	33,6	33,6
13	1013 G + TS 12 + UDL	133,3	133,2	133,2	133,2
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	76,4	76,4	76,4	76,4
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	78,9	79,0	79,0	79,0
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	81,4	81,5	81,6	81,6
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	83,8	84,2	84,2	84,2
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	86,3	86,8	86,9	86,8
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	88,8	89,5	89,6	89,5
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	91,3	92,3	92,3	92,3
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	94,1	95,1	95,1	95,1
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	97,2	97,9	97,9	97,9
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	180,0	179,8	179,9	179,8
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,2	103,2	103,2	103,2
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	106,5	106,6	106,7	106,6
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	109,8	110,1	110,1	110,1
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	113,2	113,6	113,7	113,6
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	116,5	117,2	117,3	117,2
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	119,9	120,8	120,9	120,9
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	123,2	124,6	124,6	124,6
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	127,0	128,3	128,4	128,4
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	131,2	132,1	132,2	132,2

Πίνακας 3-12: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 5-8

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7		Μοντέλο 8	
		Τιμή	$\Delta\sigma_5$	Τιμή	$\Delta\sigma_6$	Τιμή	$\Delta\sigma_7$	Τιμή	$\Delta\sigma_8$
1	1001 G	40,4	-0,2%	40,4	-0,2%	40,5	-0,5%	40,4	-0,2%
2	1002 TS 12	59,8	-0,7%	59,6	-0,3%	59,9	-0,8%	59,8	-0,7%
3	1003 TS 0.5	5,2	-20,3%	5,1	-16,6%	5,2	-21,0%	5,1	-17,6%
4	1004 TS 1.0	10,1	-16,6%	9,9	-14,3%	10,2	-17,8%	10,0	-15,2%
5	1005 TS 1.5	14,6	-12,3%	14,4	-10,8%	14,7	-13,1%	14,5	-11,5%
6	1006 TS 2.0	18,9	-9,2%	18,7	-8,1%	19,0	-9,8%	18,8	-8,7%

Πίνακας 3-12 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7		Μοντέλο 8	
		Τιμή	Δσ ₅	Τιμή	Δσ ₆	Τιμή	Δσ ₇	Τιμή	Δσ ₈
7	1007 TS 2.5	22,9	-6,0%	22,7	-5,1%	23,0	-6,5%	22,8	-5,6%
8	1008 TS 3.0	26,7	-2,7%	26,5	-1,9%	26,8	-3,1%	26,6	-2,3%
9	1009 TS 3.5	30,3	-16,5%	30,1	-15,8%	30,4	-16,9%	30,2	-16,2%
10	1010 TS 4.0	33,7	-13,5%	33,5	-12,8%	33,8	-13,8%	33,6	-13,1%
11	1011 TS 4.5	36,9	-10,5%	36,7	-9,9%	37,0	-10,8%	36,8	-10,2%
12	1012 UDL	33,7	-0,3%	33,7	-0,3%	33,7	-0,3%	33,7	-0,3%
13	1013 G + TS 12 + UDL	133,9	-0,5%	133,7	-0,3%	134,1	-0,6%	133,9	-0,5%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	76,6	-0,3%	76,6	-0,3%	76,7	-0,4%	76,6	-0,3%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	79,1	-0,3%	79,1	-0,3%	79,2	-0,4%	79,2	-0,4%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	81,7	-0,4%	81,7	-0,4%	81,8	-0,5%	81,7	-0,4%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	84,3	-0,6%	84,3	-0,6%	84,4	-0,7%	84,4	-0,7%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	87,0	-0,8%	87,0	-0,8%	87,0	-0,8%	87,0	-0,8%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	89,7	-1,0%	89,7	-1,0%	89,7	-1,0%	89,7	-1,0%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	92,4	-1,2%	92,4	-1,2%	92,5	-1,3%	92,5	-1,3%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	95,2	-1,2%	95,2	-1,2%	95,3	-1,3%	95,2	-1,2%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	98,1	-0,9%	98,0	-0,8%	98,1	-0,9%	98,1	-0,9%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	180,8	-0,4%	180,5	-0,3%	181,0	-0,6%	180,8	-0,4%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,4	-0,2%	103,4	-0,2%	103,5	-0,3%	103,4	-0,2%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	106,8	-0,3%	106,8	-0,3%	106,9	-0,4%	106,9	-0,4%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,3	-0,5%	110,3	-0,5%	110,4	-0,5%	110,4	-0,5%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	113,9	-0,6%	113,8	-0,5%	113,9	-0,6%	113,9	-0,6%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	117,4	-0,8%	117,4	-0,8%	117,5	-0,9%	117,5	-0,9%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,1	-1,0%	121,0	-0,9%	121,2	-1,1%	121,1	-1,0%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	124,8	-1,3%	124,8	-1,3%	124,9	-1,4%	124,8	-1,3%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	128,6	-1,3%	128,5	-1,2%	128,6	-1,3%	128,6	-1,3%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,4	-0,9%	132,3	-0,8%	132,4	-0,9%	132,4	-0,9%
Μέση τιμή των Δσ _i		-	-3,9%	-	-3,4%	-	-4,1%	-	-3,6%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δσ _i		-	-20,3%	-	-16,6%	-	-21,0%	-	-17,6%

Πίνακας 3-13: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε ΜΡα) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 9-12

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 9		Μοντέλο 10		Μοντέλο 11		Μοντέλο 12	
		Τιμή	Δσ ₉	Τιμή	Δσ ₁₀	Τιμή	Δσ ₁₁	Τιμή	Δσ ₁₂
1	1001 G	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%
2	1002 TS 12	60,0	-1,0%	59,9	-0,8%	60,2	-1,3%	60,0	-1,0%
3	1003 TS 0.5	5,3	-21,5%	5,1	-18,2%	5,3	-21,7%	5,2	-18,9%
4	1004 TS 1.0	10,2	-17,8%	10,0	-15,5%	10,3	-18,9%	10,1	-16,6%
5	1005 TS 1.5	14,8	-13,8%	14,6	-12,3%	14,9	-14,6%	14,7	-13,1%
6	1006 TS 2.0	19,1	-10,4%	18,9	-9,2%	19,2	-11,0%	19,0	-9,8%
7	1007 TS 2.5	23,1	-6,9%	22,9	-6,0%	23,2	-7,4%	23,0	-6,5%
8	1008 TS 3.0	27,0	-3,8%	26,8	-3,1%	27,1	-4,2%	26,9	-3,5%
9	1009 TS 3.5	30,5	-17,3%	30,4	-16,9%	30,7	-18,1%	30,5	-17,3%
10	1010 TS 4.0	33,9	-14,1%	33,8	-13,8%	34,1	-14,8%	33,9	-14,1%
11	1011 TS 4.5	37,1	-11,1%	36,9	-10,5%	37,2	-11,4%	37,1	-11,1%

Πίνακας 3-13 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 9		Μοντέλο 10		Μοντέλο 11		Μοντέλο 12	
		Τιμή	Δσ ₉	Τιμή	Δσ ₁₀	Τιμή	Δσ ₁₁	Τιμή	Δσ ₁₂
12	1012 UDL	33,7	-0,3%	33,7	-0,3%	33,8	-0,6%	33,7	-0,3%
13	1013 G + TS 12 + UDL	134,3	-0,8%	134,1	-0,6%	134,4	-0,8%	134,3	-0,8%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	76,7	-0,4%	76,7	-0,4%	76,8	-0,5%	76,7	-0,4%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	79,2	-0,4%	79,2	-0,4%	79,3	-0,5%	79,3	-0,5%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	81,8	-0,5%	81,8	-0,5%	81,9	-0,6%	81,8	-0,5%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	84,4	-0,7%	84,4	-0,7%	84,5	-0,8%	84,5	-0,8%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	87,1	-0,9%	87,1	-0,9%	87,2	-1,0%	87,1	-0,9%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	89,8	-1,1%	89,8	-1,1%	89,9	-1,2%	89,8	-1,1%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	92,6	-1,4%	92,5	-1,3%	92,6	-1,4%	92,6	-1,4%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	95,3	-1,3%	95,3	-1,3%	95,4	-1,4%	95,4	-1,4%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	98,2	-1,0%	98,1	-0,9%	98,2	-1,0%	98,2	-1,0%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	181,3	-0,7%	181,0	-0,6%	181,5	-0,8%	181,3	-0,7%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,6	-0,4%	103,5	-0,3%	103,6	-0,4%	103,6	-0,4%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	107,0	-0,5%	106,9	-0,4%	107,1	-0,6%	107,0	-0,5%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,5	-0,6%	110,4	-0,5%	110,5	-0,6%	110,5	-0,6%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	114,0	-0,7%	113,9	-0,6%	114,1	-0,8%	114,0	-0,7%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	117,6	-0,9%	117,5	-0,9%	117,7	-1,0%	117,6	-0,9%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,2	-1,1%	121,2	-1,1%	121,3	-1,2%	121,3	-1,2%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	124,9	-1,4%	124,9	-1,4%	125,0	-1,5%	125,0	-1,5%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	128,7	-1,3%	128,7	-1,3%	128,8	-1,4%	128,7	-1,3%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,5	-1,0%	132,5	-1,0%	132,6	-1,1%	132,5	-1,0%
Μέση τιμή των Δσ _i		-	-4,2%	-	-3,9%	-	-4,5%	-	-4,1%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δσ _i		-	-21,5%	-	-18,2%	-	-21,7%	-	-18,9%

Πίνακας 3-14: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 13-16

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13		Μοντέλο 14		Μοντέλο 15		Μοντέλο 16	
		Τιμή	Δσ ₁₃	Τιμή	Δσ ₁₄	Τιμή	Δσ ₁₅	Τιμή	Δσ ₁₆
1	1001 G	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%
2	1002 TS 12	60,3	-1,5%	60,2	-1,3%	60,1	-1,2%	60,0	-1,0%
3	1003 TS 0.5	5,3	-22,2%	5,2	-19,6%	5,2	-20,3%	5,1	-16,6%
4	1004 TS 1.0	10,3	-18,9%	10,2	-17,8%	10,1	-16,6%	9,9	-14,3%
5	1005 TS 1.5	14,9	-14,6%	14,8	-13,8%	14,6	-12,3%	14,4	-10,8%
6	1006 TS 2.0	19,3	-11,6%	19,1	-10,4%	18,9	-9,2%	18,7	-8,1%
7	1007 TS 2.5	23,3	-7,9%	23,1	-6,9%	22,9	-6,0%	22,7	-5,1%
8	1008 TS 3.0	27,2	-4,6%	27,0	-3,8%	26,7	-2,7%	26,5	-1,9%
9	1009 TS 3.5	30,8	-18,5%	30,6	-17,7%	30,3	-16,5%	30,1	-15,8%
10	1010 TS 4.0	34,2	-15,2%	34,0	-14,5%	33,7	-13,5%	33,5	-12,8%
11	1011 TS 4.5	37,3	-11,7%	37,2	-11,4%	36,9	-10,5%	36,7	-9,9%
12	1012 UDL	33,8	-0,6%	33,8	-0,6%	33,7	-0,3%	33,7	-0,3%
13	1013 Q + TS 12 + UDL	134,6	-1,0%	134,5	-0,9%	134,4	-0,8%	134,2	-0,7%
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	76,8	-0,5%	76,8	-0,5%	76,7	-0,4%	76,7	-0,4%
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	79,4	-0,6%	79,3	-0,5%	79,3	-0,5%	79,2	-0,4%
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	81,9	-0,6%	81,9	-0,6%	81,9	-0,6%	81,8	-0,5%

Πίνακας 3-14 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13		Μοντέλο 14		Μοντέλο 15		Μοντέλο 16	
		Τιμή	Δσ ₁₃	Τιμή	Δσ ₁₄	Τιμή	Δσ ₁₅	Τιμή	Δσ ₁₆
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	84,5	-0,8%	84,5	-0,8%	84,5	-0,8%	84,4	-0,7%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	87,2	-1,0%	87,2	-1,0%	87,1	-0,9%	87,1	-0,9%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	89,9	-1,2%	89,9	-1,2%	89,8	-1,1%	89,8	-1,1%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	92,7	-1,5%	92,6	-1,4%	92,6	-1,4%	92,5	-1,3%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	95,4	-1,4%	95,4	-1,4%	95,4	-1,4%	95,3	-1,3%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	98,3	-1,1%	98,2	-1,0%	98,2	-1,0%	98,1	-0,9%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	181,7	-0,9%	181,5	-0,8%	181,4	-0,8%	181,2	-0,7%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,7	-0,5%	103,6	-0,4%	103,6	-0,4%	103,5	-0,3%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	107,1	-0,6%	107,1	-0,6%	107,0	-0,5%	107,0	-0,5%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,6	-0,7%	110,6	-0,7%	110,5	-0,6%	110,5	-0,6%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	114,1	-0,8%	114,1	-0,8%	114,0	-0,7%	114,0	-0,7%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	117,7	-1,0%	117,7	-1,0%	117,6	-0,9%	117,6	-0,9%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,4	-1,3%	121,3	-1,2%	121,3	-1,2%	121,2	-1,1%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	125,1	-1,5%	125,0	-1,5%	125,0	-1,5%	124,9	-1,4%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	128,9	-1,5%	128,8	-1,4%	128,7	-1,3%	128,7	-1,3%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,7	-1,1%	132,6	-1,1%	132,5	-1,0%	132,5	-1,0%
Μέση τιμή των Δσ _i		-	-4,6%	-	-4,3%	-	-4,0%	-	-3,6%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δσ _i		-	-22,2%	-	-19,6%	-	-20,3%	-	-16,6%

Πίνακας 3-15: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 17-20

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 17		Μοντέλο 18		Μοντέλο 19		Μοντέλο 20	
		Τιμή	Δσ ₁₇	Τιμή	Δσ ₁₈	Τιμή	Δσ ₁₉	Τιμή	Δσ ₂₀
1	1001 G	40,5	-0,5%	40,5	-0,5%	40,6	-0,7%	40,6	-0,7%
2	1002 TS 12	60,3	-1,5%	60,2	-1,3%	60,5	-1,9%	60,4	-1,7%
3	1003 TS 0.5	5,2	-21,0%	5,1	-17,6%	5,3	-21,5%	5,1	-18,2%
4	1004 TS 1.0	10,2	-17,8%	10,0	-15,2%	10,2	-17,8%	10,0	-15,5%
5	1005 TS 1.5	14,7	-13,1%	14,5	-11,5%	14,8	-13,8%	14,6	-12,3%
6	1006 TS 2.0	19,0	-9,8%	18,8	-8,7%	19,1	-10,4%	18,9	-9,2%
7	1007 TS 2.5	23,0	-6,5%	22,8	-5,6%	23,1	-6,9%	22,9	-6,0%
8	1008 TS 3.0	26,8	-3,1%	26,6	-2,3%	27,0	-3,8%	26,8	-3,1%
9	1009 TS 3.5	30,4	-16,9%	30,2	-16,2%	30,5	-17,3%	30,4	-16,9%
10	1010 TS 4.0	33,8	-13,8%	33,6	-13,1%	33,9	-14,1%	33,8	-13,8%
11	1011 TS 4.5	37,0	-10,8%	36,8	-10,2%	37,1	-11,1%	36,9	-10,5%

Πίνακας 3-15 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 17		Μοντέλο 18		Μοντέλο 19		Μοντέλο 20	
		Τιμή	Δσ ₁₇	Τιμή	Δσ ₁₈	Τιμή	Δσ ₁₉	Τιμή	Δσ ₂₀
12	1012 UDL	33,8	-0,6%	33,8	-0,6%	33,8	-0,6%	33,8	-0,6%
13	1013 G + TS 12 + UDL	134,7	-1,1%	134,5	-0,9%	134,9	-1,2%	134,8	-1,1%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	76,8	-0,5%	76,8	-0,5%	76,9	-0,7%	76,9	-0,7%
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	79,4	-0,6%	79,3	-0,5%	79,4	-0,6%	79,4	-0,6%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	81,9	-0,6%	81,9	-0,6%	82,0	-0,7%	82,0	-0,7%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	84,5	-0,8%	84,5	-0,8%	84,6	-1,0%	84,6	-1,0%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	87,2	-1,0%	87,2	-1,0%	87,3	-1,2%	87,3	-1,2%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	89,9	-1,2%	89,9	-1,2%	90,0	-1,4%	90,0	-1,4%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	92,6	-1,4%	92,6	-1,4%	92,7	-1,5%	92,7	-1,5%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	95,4	-1,4%	95,4	-1,4%	95,5	-1,5%	95,5	-1,5%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	98,3	-1,1%	98,2	-1,0%	98,3	-1,1%	98,3	-1,1%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	181,8	-1,0%	181,6	-0,9%	182,1	-1,2%	182,0	-1,1%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,7	-0,5%	103,7	-0,5%	103,8	-0,6%	103,8	-0,6%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	107,1	-0,6%	107,1	-0,6%	107,2	-0,7%	107,2	-0,7%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,6	-0,7%	110,6	-0,7%	110,7	-0,8%	110,7	-0,8%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	114,1	-0,8%	114,1	-0,8%	114,2	-0,9%	114,2	-0,9%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	117,7	-1,0%	117,7	-1,0%	117,9	-1,2%	117,8	-1,1%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,4	-1,3%	121,3	-1,2%	121,5	-1,3%	121,4	-1,3%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	125,1	-1,5%	125,0	-1,5%	125,2	-1,6%	125,1	-1,5%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	128,9	-1,5%	128,8	-1,4%	129,0	-1,6%	128,9	-1,5%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,6	-1,1%	132,6	-1,1%	132,8	-1,2%	132,7	-1,1%
Μέση τιμή των Δσ _i		-	-4,2%	-	-3,8%	-	-4,4%	-	-4,1%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δσ _i		-	-22,2%	-	-17,6%	-	-21,5%	-	-18,2%

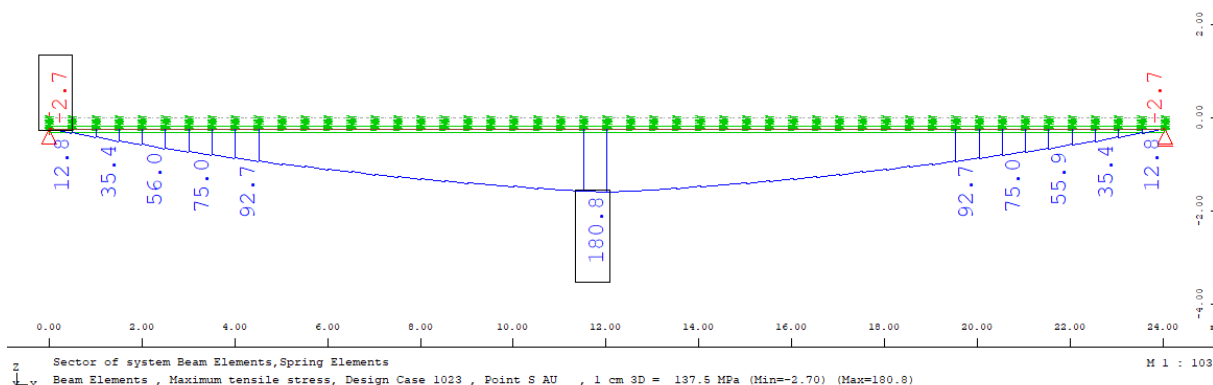
Πίνακας 3-16: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε ΜΡα) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας και μεταβολή τους ως προς το μοντέλο 1 για τα μοντέλα 21-24

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 21		Μοντέλο 22		Μοντέλο 23		Μοντέλο 24	
		Τιμή	Δσ ₂₁	Τιμή	Δσ ₂₂	Τιμή	Δσ ₂₃	Τιμή	Δσ ₂₄
1	1001 G	40,6	-0,7%	40,6	-0,7%	40,7	-1,0%	40,6	-0,7%
2	1002 TS 12	60,6	-2,0%	60,6	-2,0%	60,8	-2,4%	60,7	-2,2%
3	1003 TS 0.5	5,3	-21,7%	5,2	-18,9%	5,3	-22,2%	5,2	-19,6%
4	1004 TS 1.0	10,3	-18,9%	10,1	-16,6%	10,3	-18,9%	10,2	-17,8%
5	1005 TS 1.5	14,9	-14,6%	14,7	-13,1%	14,9	-14,6%	14,8	-13,8%
6	1006 TS 2.0	19,2	-11,0%	19,0	-9,8%	19,3	-11,6%	19,1	-10,4%
7	1007 TS 2.5	23,2	-7,4%	23,1	-6,9%	23,3	-7,9%	23,1	-6,9%
8	1008 TS 3.0	27,1	-4,2%	26,9	-3,5%	27,2	-4,6%	27,0	-3,8%
9	1009 TS 3.5	30,7	-18,1%	30,5	-17,3%	30,8	-18,5%	30,6	-17,7%
10	1010 TS 4.0	34,1	-14,8%	33,9	-14,1%	34,2	-15,2%	34,0	-14,5%
11	1011 TS 4.5	37,2	-11,4%	37,1	-11,1%	37,3	-11,7%	37,2	-11,4%
12	1012 UDL	33,9	-0,9%	33,8	-0,6%	33,9	-0,9%	33,9	-0,9%
13	1013 G + TS 12 + UDL	135,2	-1,4%	135,0	-1,3%	135,4	-1,6%	135,2	-1,4%
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	77,0	-0,8%	76,9	-0,7%	77,1	-0,9%	77,0	-0,8%

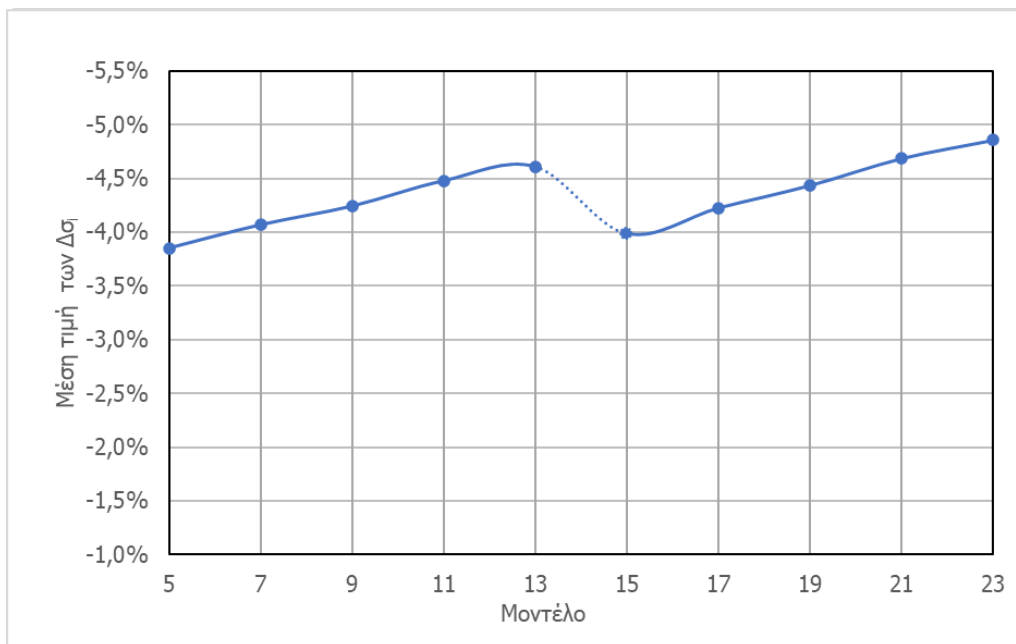
Πίνακας 3-16 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 21		Μοντέλο 22		Μοντέλο 23		Μοντέλο 24	
		Τιμή	$\Delta\sigma_{21}$	Τιμή	$\Delta\sigma_{22}$	Τιμή	$\Delta\sigma_{23}$	Τιμή	$\Delta\sigma_{24}$
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	79,5	-0,8%	79,5	-0,8%	79,6	-0,9%	79,6	-0,9%
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	82,1	-0,9%	82,1	-0,9%	82,2	-1,0%	82,1	-0,9%
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	84,7	-1,1%	84,7	-1,1%	84,8	-1,2%	84,7	-1,1%
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	87,4	-1,3%	87,3	-1,2%	87,4	-1,3%	87,4	-1,3%
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	90,1	-1,5%	90,0	-1,4%	90,2	-1,6%	90,1	-1,5%
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	92,8	-1,6%	92,8	-1,6%	92,9	-1,8%	92,8	-1,6%
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	95,6	-1,6%	95,6	-1,6%	95,7	-1,7%	95,6	-1,6%
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	98,4	-1,2%	98,4	-1,2%	98,5	-1,3%	98,5	-1,3%
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	182,5	-1,4%	182,3	-1,3%	182,7	-1,5%	182,6	-1,4%
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,9	-0,7%	103,9	-0,7%	104,0	-0,8%	104,0	-0,8%
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	107,3	-0,8%	107,3	-0,8%	107,4	-0,8%	107,4	-0,8%
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,8	-0,9%	110,8	-0,9%	110,9	-1,0%	110,9	-1,0%
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	114,3	-1,0%	114,3	-1,0%	114,4	-1,1%	114,4	-1,1%
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	118,0	-1,3%	117,9	-1,2%	118,1	-1,4%	118,0	-1,3%
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,6	-1,4%	121,5	-1,3%	121,7	-1,5%	121,7	-1,5%
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	125,3	-1,7%	125,2	-1,6%	125,4	-1,8%	125,3	-1,7%
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	129,1	-1,7%	129,0	-1,6%	129,2	-1,7%	129,1	-1,7%
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,9	-1,3%	132,8	-1,2%	133,0	-1,4%	132,9	-1,3%
Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$		-	-4,7%	-	-4,3%	-	-4,9%	-	-4,5%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των $\Delta\sigma_i$		-	-21,7%	-	-18,9%	-	-22,2%	-	-19,6%

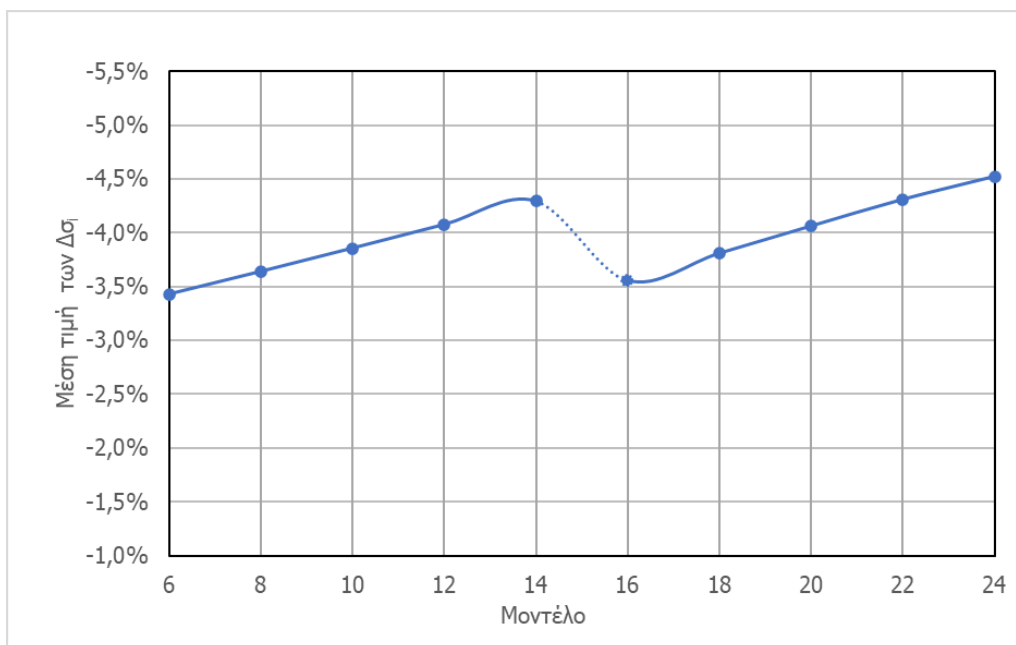
Στο Σχήμα 3-24 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1023 (1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL). Για τον εποπτικότερο έλεγχο των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 3-25 δίνεται το διάγραμμα των μέσων τιμών των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας και στο Σχήμα 3-26 το αντίστοιχο διάγραμμα για τα μοντέλα με μήκος μη γραμμικών ελατηρίων ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.



Σχήμα 3-24: Εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1023



Σχήμα 3-25: Μέση τιμή των Δσ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας



Σχήμα 3-26: Μέση τιμή των Δσ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας

3.3.3 Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού γέφυρας

Στους Πίνακες 3-17 έως 3-21 παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 5-24.

Πίνακας 3-17: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 5-8

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7		Μοντέλο 8	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G	59,7	544,4	59,8	544,4	59,0	408,3	59,1	408,3
2	1002 TS 12	52,0		52,0		51,9			
3	1003 TS 0.5	31,2		39,2		29,7			
4	1004 TS 1.0	53,5		59,6		50,4			
5	1005 TS 1.5	66,6		70,1		63,7			
6	1006 TS 2.0	73,1		75,3		70,8			
7	1007 TS 2.5	77,7		79,1		75,4			
8	1008 TS 3.0	80,0		81,5		78,1			
9	1009 TS 3.5	82,0		82,9		80,1			
10	1010 TS 4.0	82,3		82,8		80,7			
11	1011 TS 4.5	81,4		81,7		80,1			
12	1012 UDL	49,7		49,9		49,1			
13	1013 G + TS 12 + UDL	160,3		160,6		158,6			
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	132,7		134,7		130,1			
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	157,2		164,6		153,2			
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	170,1		174,9		166,3			
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	180,1		182,9		176,1			
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	185,6		187,1		182,1			
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	189,4		191,2		185,6			
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	191,4		192,6		188,1			
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	191,6		192,4		188,7			
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	190,7		191,3		188,1			
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	216,3		216,8		214,0			
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	179,0		181,6		175,4			
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	211,9		221,9		206,5			
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	229,2		235,8		224,1			
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	243,1		246,7		237,6			
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	250,4		252,5		245,6			
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	255,6		258,1		250,5			
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	258,3		259,9		253,8			
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	258,5		259,6		254,6			
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	257,4		258,2		253,8			

Πίνακας 3-18: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 9-12

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 9		Μοντέλο 10		Μοντέλο 11		Μοντέλο 12	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G	58,4	326,6	58,6	326,6	57,9	272,2	58,0	272,2
2	1002 TS 12	51,9		51,9		51,8			
3	1003 TS 0.5	28,4		34,6		27,2			
4	1004 TS 1.0	48,0		52,7		46,0			
5	1005 TS 1.5	61,2		64,3		59,2			
6	1006 TS 2.0	68,8		70,8		67,0			

Πίνακας 3-18 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 9		Μοντέλο 10		Μοντέλο 11		Μοντέλο 12	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
7	1007 TS 2.5	73,4	326,6	74,8	326,6	71,6	272,2	73,0	272,2
8	1008 TS 3.0	76,5		77,3		75,0		75,9	
9	1009 TS 3.5	78,3		79,3		76,8		77,7	
10	1010 TS 4.0	79,3		79,9		78,0		78,6	
11	1011 TS 4.5	79,0		79,4		78,0		78,4	
12	1012 UDL	48,6		48,8		48,2		48,4	
13	1013 G + TS 12 + UDL	157,2		157,6		156,0		156,4	
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	128,1		130,0		126,5		128,4	
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	150,1		156,0		147,7		153,0	
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	163,3		167,4		160,8		164,7	
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	172,9		175,5		170,1		172,6	
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	179,1		180,8		176,5		178,3	
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	182,4		184,2		179,9		181,4	
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	185,2		186,5		182,8		184,0	
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	186,2		187,1		183,9		184,9	
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	185,9		186,6		183,9		184,6	
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	212,1		212,6		210,5		211,0	
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	172,8		175,4		170,6		173,1	
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	202,4		210,3		199,1		206,3	
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	220,0		225,7		216,7		221,9	
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	233,2		236,7		229,4		232,8	
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	241,6		243,9		238,1		240,4	
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	246,2	248,7	242,7	244,9				
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	250,0	251,7	246,6	248,3				
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	251,2	252,4	248,2	249,5				
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	250,8	251,8	248,1	249,1				

Πίνακας 3-19: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 13-16

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13		Μοντέλο 14		Μοντέλο 15		Μοντέλο 16	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G	57,4	233,3	57,6	233,3	59,7	544,4	59,8	544,4
2	1002 TS 12	51,7		51,8		63,3		63,1	
3	1003 TS 0.5	26,2		31,4		31,2		39,2	
4	1004 TS 1.0	44,3		48,2		53,5		59,6	
5	1005 TS 1.5	57,4		60,1		66,6		70,1	
6	1006 TS 2.0	65,4		67,3		73,1		75,3	
7	1007 TS 2.5	70,0		71,4		77,7		79,1	
8	1008 TS 3.0	73,7		74,6		80,0		81,5	
9	1009 TS 3.5	75,4		76,3		82,0		82,9	
10	1010 TS 4.0	76,9		77,5		82,2		82,8	
11	1011 TS 4.5	77,1		77,5		81,4		81,7	
12	1012 UDL	47,9		48,0		49,7		49,9	
13	1013 G + TS 12 + UDL	155,0		155,4		160,3		160,7	

Πίνακας 3-19 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13		Μοντέλο 14		Μοντέλο 15		Μοντέλο 16	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	125,1	233,3	126,9	233,3	132,7	544,4	134,7	544,4
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	145,6		150,5		157,2		164,6	
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	158,6		162,3		170,1		174,9	
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	167,6		170,1		180,1		182,9	
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	174,3		176,0		185,6		187,1	
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	177,9		179,1		189,4		191,2	
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	180,5		181,8		191,4		192,6	
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	182,0		182,9		191,6		192,4	
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	182,1		182,9		190,7		191,3	
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	209,1		209,7		216,3		216,8	
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	168,8		171,2		179,0		181,6	
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	196,2		202,9		211,9		221,9	
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	213,7		218,7		229,2		235,8	
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	226,1		229,4		243,1		246,7	
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	233,3		233,3		250,4		252,6	
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	233,3		233,3		255,6		258,1	
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	233,3		233,3		258,3		259,9	
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	233,3		233,3		258,5		259,6	
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	233,3		233,3		257,4		258,2	

Πίνακας 3-20: Μέγιστες διαμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 17-20

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 17		Μοντέλο 18		Μοντέλο 19		Μοντέλο 20	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G	59,0	408,3	59,1	408,3	58,4	326,6	58,6	326,6
2	1002 TS 12	63,3		63,2		63,0		63,0	
3	1003 TS 0.5	29,7		36,7		28,4		34,6	
4	1004 TS 1.0	50,4		55,7		48,0		52,7	
5	1005 TS 1.5	63,7		66,9		61,2		64,3	
6	1006 TS 2.0	70,8		72,9		68,8		70,8	
7	1007 TS 2.5	75,4		76,8		73,4		74,8	
8	1008 TS 3.0	78,1		79,1		76,5		77,3	
9	1009 TS 3.5	80,1		81,0		78,3		79,3	
10	1010 TS 4.0	80,7		81,2		79,3		79,9	
11	1011 TS 4.5	80,1		80,5		79,0		79,4	
12	1012 UDL	49,1		49,3		48,7		48,8	
13	1013 G + TS 12 + UDL	158,6		159,0		157,2		157,6	
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	130,1		132,0		128,1		130,0	
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	153,2		159,7		150,2		156,0	
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	166,3		170,8		163,3		167,5	
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	176,2		178,8		172,9		175,5	
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	182,1		183,7		179,1		180,8	
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	185,6		187,4		182,4		184,2	
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	188,1		189,3		185,2		186,5	

Πίνακας 3-20 (συνέχεια)

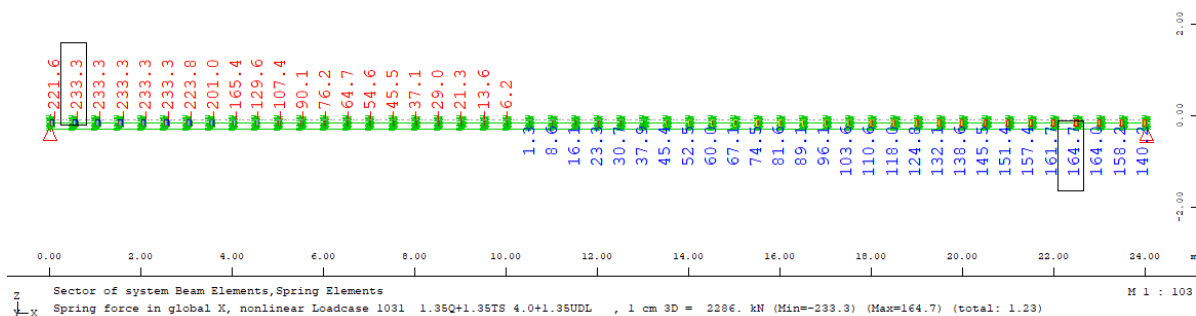
Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 17		Μοντέλο 18		Μοντέλο 19		Μοντέλο 20	
		Τιμή	P _{y,spr}	Τιμή	P _{y,spr}	Τιμή	P _{y,spr}	Τιμή	P _{y,spr}
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	188,7	408,3	189,5	408,3	186,2	326,6	187,1	326,6
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	188,1		188,8		185,9		186,6	
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	214,0		214,5		212,1		212,6	
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	175,4		178,1		172,8		175,4	
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	206,5		215,3		202,4		210,3	
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	224,1		230,2		220,0		225,7	
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	237,6		241,3		233,2		236,7	
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	245,6		247,8		241,6		243,9	
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	250,5		253,0		246,2		248,7	
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	253,8		255,5		250,0		251,7	
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	254,6		255,8		251,2		252,4	
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	253,8		254,7		250,8		251,8	

Πίνακας 3-21: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τα μοντέλα 21-24

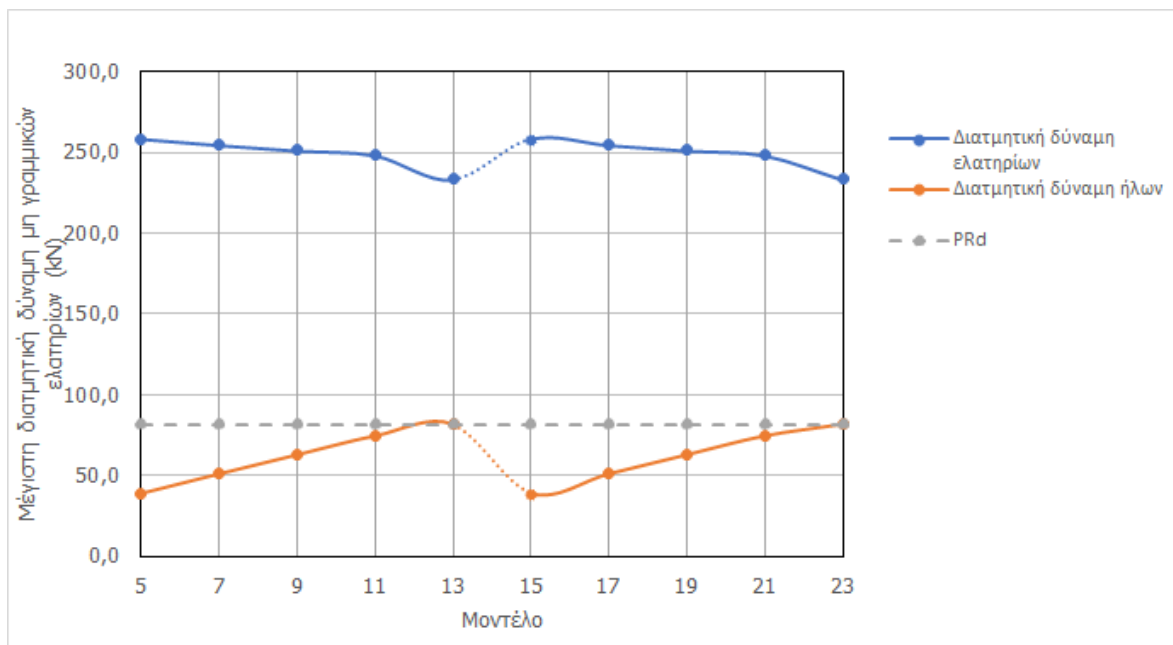
Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 21		Μοντέλο 22		Μοντέλο 23		Μοντέλο 24	
		Τιμή	P _{y,spr}	Τιμή	P _{y,spr}	Τιμή	P _{y,spr}	Τιμή	P _{y,spr}
1	1001 G	57,9	272,2	58,1	272,2	57,4	233,3	57,6	233,3
2	1002 TS 12	62,5		62,5		61,9		61,9	
3	1003 TS 0.5	27,2		32,9		26,2		31,4	
4	1004 TS 1.0	46,0		50,2		44,3		48,2	
5	1005 TS 1.5	59,2		62,0		57,4		60,1	
6	1006 TS 2.0	67,0		69,0		65,4		67,3	
7	1007 TS 2.5	71,6		73,0		70,0		71,4	
8	1008 TS 3.0	75,0		75,9		73,7		74,6	
9	1009 TS 3.5	76,8		77,7		75,4		76,3	
10	1010 TS 4.0	78,0		78,6		76,8		77,5	
11	1011 TS 4.5	78,0		78,4		77,0		77,5	
12	1012 UDL	48,2		48,4		47,9		48,0	
13	1013 G + TS 12 + UDL	156,1		156,5		155,1		155,5	
14	1014 G + TS 0,5 + UDL	126,5		128,4		125,2		127,0	
15	1015 G + TS 1,0 + UDL	147,7		153,0		145,6		150,5	
16	1016 G + TS 1,5 + UDL	160,8		164,7		158,6		162,3	
17	1017 G + TS 2,0 + UDL	170,1		172,6		167,6		170,1	
18	1018 G + TS 2,5 + UDL	176,5		178,3		174,3		176,0	
19	1019 G + TS 3,0 + UDL	179,9		181,5		177,9		179,1	
20	1020 G + TS 3,5 + UDL	182,8		184,0		180,5		181,8	
21	1021 G + TS 4,0 + UDL	184,0		184,9		182,0		182,9	
22	1022 G + TS 4,5 + UDL	183,9		184,7		182,2		182,9	
23	1023 1,35G + 1,35TS 12 + 1,35UDL	210,6		211,1		209,2		209,8	
24	1024 1,35G + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	170,6		173,1		168,8		171,2	
25	1025 1,35G + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	199,1		206,3		196,3		202,9	

Πίνακας 3-21 (συνέχεια)

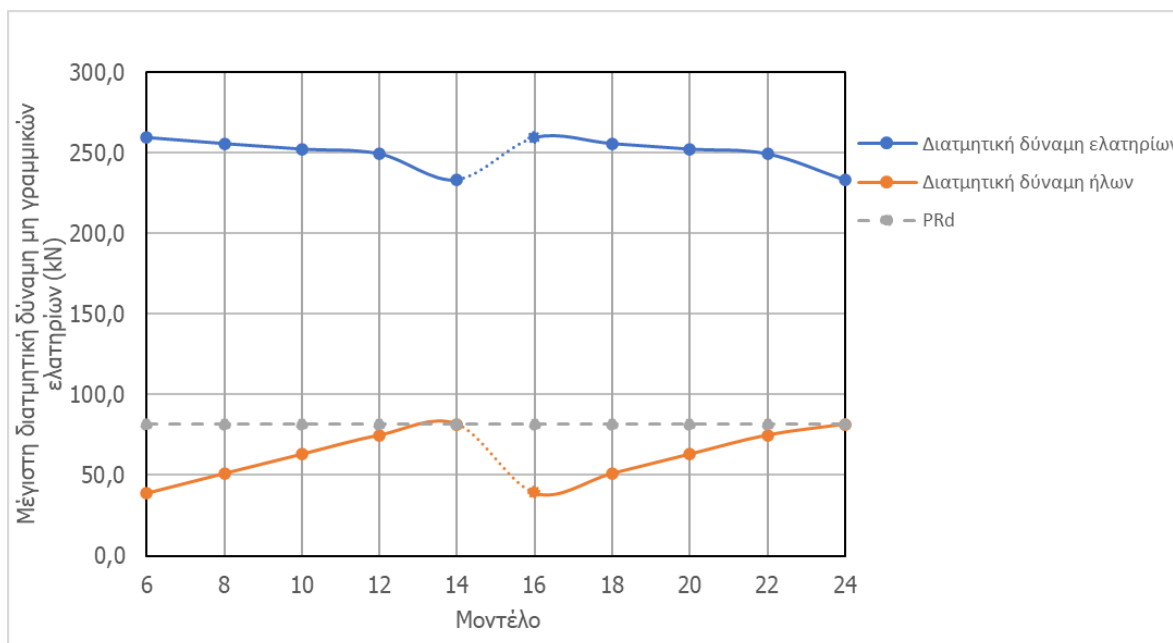
Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 21		Μοντέλο 22		Μοντέλο 23		Μοντέλο 24	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
26	1026 1,35G + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	216,7	272,2	222,0	272,2	213,7	233,3	218,7	233,3
27	1027 1,35G + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	229,4		232,8		226,1		229,4	
28	1028 1,35G + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	238,1		240,4		233,3		233,3	
29	1029 1,35G + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	242,7		244,9		233,3		233,3	
30	1030 1,35G + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	246,6		248,3		233,3		233,3	
31	1031 1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	248,2		249,5		233,3		233,3	
32	1032 1,35G + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	248,2		249,1		233,3		233,3	



Σχήμα 3-27: Διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 14 και την φόρτιση 1031



Σχήμα 3-28: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1031 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας



Σχήμα 3-29: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1031 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας

Στο Σχήμα 3-27 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 14 και την φόρτιση 1031 (1,35G + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL). Για την ίδια φόρτιση δίνεται στο Σχήμα 3-28 το διάγραμμα των μέγιστων διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για τα μοντέλα εκείνα στα οποία το ύψος των ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας και στο Σχήμα 3-29 το αντίστοιχο διάγραμμα για τα μοντέλα με μήκος μη γραμμικών ελατηρίων ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.

3.4 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση του φορέα προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Συγκρίνοντας τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης δοκού και τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα της σιδηροδοκού ανάμεσα στο μοντέλο 1 (μοντέλο ενιαίας διατομής) και στα μοντέλα με μη γραμμικά ελατήρια διαπιστώνεται μια πάρα πολύ καλή σύγκλιση. Κατά κανόνα η % μεταβολή είναι μικρότερη του 5%. Οι εξαιρέσεις αφορούν μεμονωμένες φορτίσεις συγκεντρωμένων φορτίων TS, όπου ιδιαίτερα για τις μέγιστες τάσεις οι % μεταβολές φτάνουν μέχρι και λίγο πάνω από το 20%. Τέτοιες μεταβολές δικαιολογούνται από το γεγονός ότι αναφέρονται σε φορτίσεις συγκεντρωμένων φορτίων όπου η χρήση πεπερασμένων στοιχείων δικαιολογεί την εμφάνιση τοπικά αρκετά μεγαλύτερων τάσεων. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι αντίστοιχα αυξημένες παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τις ίδιες φορτίσεις και στα μοντέλα 2 έως 4 όπου πάλι η πλάκα σκυροδέματος προσομοιώνεται ως επιφανειακό στοιχείο με πεπερασμένα στοιχεία. Στους συνδυασμούς φορτίσεων OKL και OKA οι υπόψη μεταβολές δεν υπερβαίνουν το 5%.
- Το μήκος των ελατηρίων (ίσο με το πάχος της πλάκας ή το ήμισυ αυτού) διαφοροποιεί τα μέγιστα βέλη και τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα της σιδηροδοκού κατά λιγότερο του 1%. Επομένως η επιρροή του ύψους των διατμητικών ήλων και του πάχους της πλάκας δεν κρίνονται σημαντικοί παράγοντες, γεγονός που διευκολύνει την προσομοίωση.
- Αξιολογώντας την κατανομή των διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων διαπιστώνεται ότι όσο πλησιάζουμε τις στηρίξεις τόσο οι διατμητικές δυνάμεις των ήλων αυξάνονται, μέχρι να μεγιστοποιηθεί σε κάποιο σημείο η θέση του οποίου

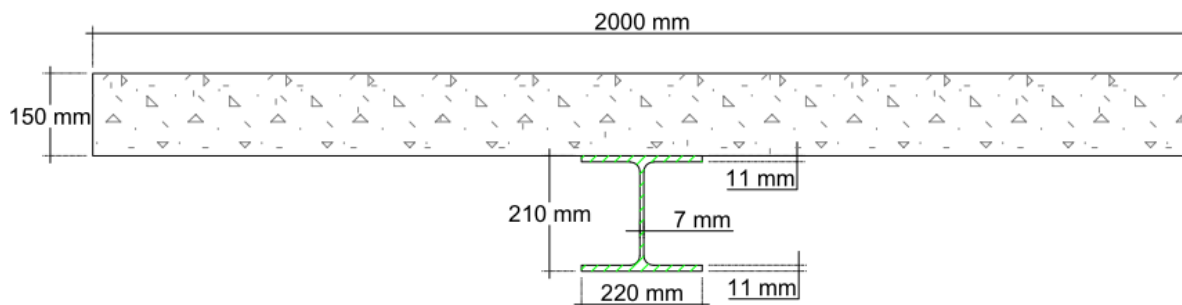
εξαρτάται από την ύπαρξη στον εξεταζόμενο συνδυασμό φορτίων κυκλοφορίας TS. Όσο πιο απομακρυσμένα από την στήριξη επιβάλλονται τα υπόψη φορτία τόσο πιο απομακρυσμένη είναι και η θέση μεγιστοποίησης της διατμητικής δύναμης των ελατηρίων.

- Όσο αραιώνεται η κατανομή των ήλων μειώνεται η διατμητική δυσκαμψία των ελατηρίων και για το λόγο αυτό μειώνονται ελαφρώς οι διατμητικές δυνάμεις των ελατηρίων. Μόνη εξαίρεση τα ακραία ελατήρια των οποίων οι διατμητικές δυνάμεις αυξάνονται προκειμένου να εξισορροπήσουν τις παραπάνω μειώσεις.
- Όταν ορισμένα ελατήρια για συγκεκριμένες φορτίσεις (Μοντέλα 13, 14 23 και 24 για τις φορτίσεις 1028 έως 1032) φθάσουν την δύναμη διαρροής δεν παραλαμβάνουν επιπλέον δυνάμεις. Οι επιπλέον δυνάμεις παραλαμβάνονται από τα αμέσως επόμενα ελατήρια τα οποία παρουσιάζουν αύξηση της διατμητικής τους δύναμης σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη κατανομή διατμητικών ήλων.
- Όσο αραιώνεται η κατανομή των ήλων θα έπρεπε να αυξάνονται σημαντικά τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης δοκού. Συγκρίνοντας τα μέγιστα βέλη των μοντέλων 5 και 6 με τα αντίστοιχα των μοντέλων 13, 14, 23 και 24 διαπιστώνεται μία αύξηση των μέγιστων βελών της τάξεως του 1 με 2% η οποία σε καμία περίπτωση δεν είναι η αναμενόμενη. Ακόμα και για τις φορτίσεις όπου έχουμε διαρροή των μη γραμμικών ελατηρίων η αύξηση των μέγιστων βελών πάλι δεν ξεπερνά το 2%.

4 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΗ ΔΟΚΟ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Μετά την προσπάθεια προσομοίωσης διατμητικών ήλων σε σύμμικτη δοκό γέφυρας επιχειρήθηκε να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη δοκιμή σε σύμμικτη δοκό οικοδομικού έργου. Η διατομή της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου περιγράφεται στην §1.2.2. Για την διευκόλυνση του αναγνώστη τα βασικά της χαρακτηριστικά επαναλαμβάνονται στην παρούσα παράγραφο και η διατομή της δίνεται στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Διατομή σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου

Το προσομοίωμα της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου αποτελείται από μία αμφιέριστη σύμμικτη δοκό μήκους 8 m. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πλάτος 2.000 mm και πάχος 150 mm και επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C 25/30. Για την μεταλλική διατομή επιλέχθηκε η πρότυπη διατομή HEA 220 και χάλυβας ποιότητας S 275.

Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, η προσομοίωση των διατμητικών ήλων έγινε με τοποθέτηση ελατηρίων ανά 0,50 m τα οποία συνδέουν την μεταλλική διατομή με την πλάκα σκυροδέματος. Προκειμένου να προσομοιωθεί τόσο η λειτουργία όσο και οι ιδιότητες των διατμητικών ήλων, προσδίδεται στα ελατήρια γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία στην κατά μήκος τους διεύθυνση ($100 \cdot 10^6$ kN/m), ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση τους προσδίδεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με δυσκαμψία και οριακή αντοχή τα αντίστοιχα της ομάδας των διατμητικών ήλων που έχουν τοποθετηθεί σε μήκος 0,5 m.

Τα μοντέλα που μορφώθηκαν είναι αντίστοιχα με τα μοντέλα που μορφώθηκαν για την σύμμικτη δοκό γέφυρας. Αυτά είναι:

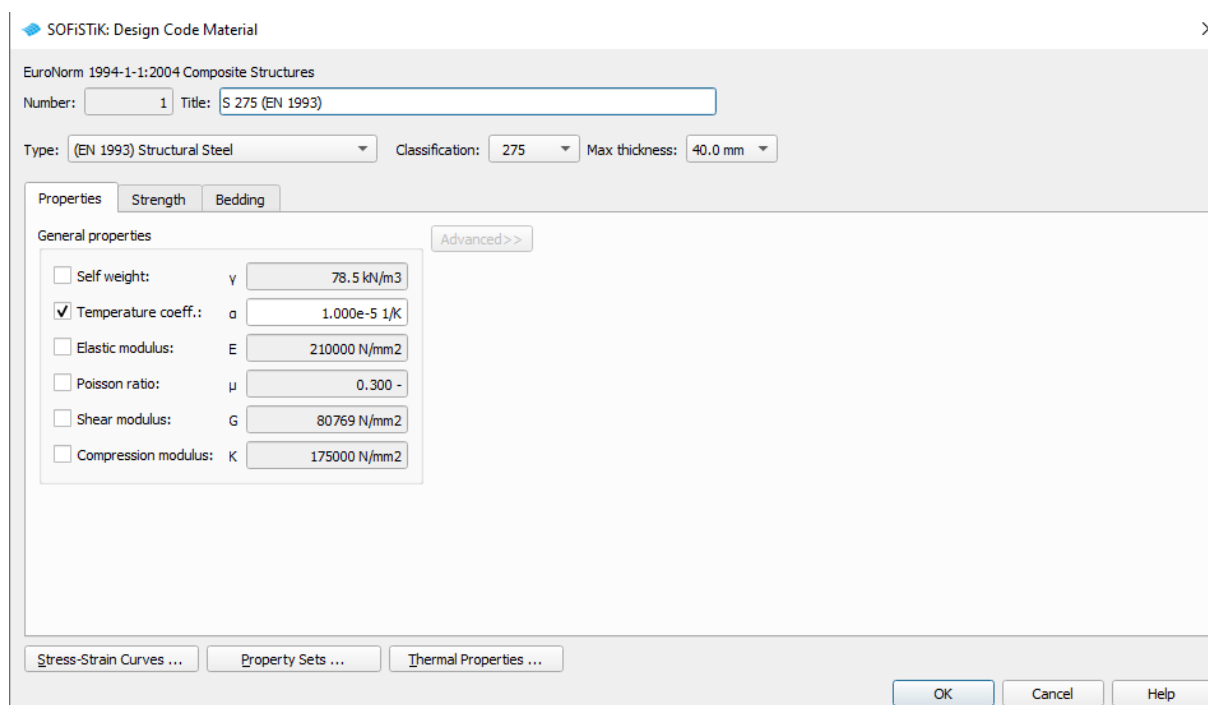
- Το μοντέλο ενιαίας διατομής.
- Το μοντέλο ιδεατής διατομής.
- Το μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις.
- Το μοντέλο γραμμικών ελατηρίων.
- Τα μοντέλα των μη γραμμικών ελατηρίων.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η μόρφωση των παραπάνω μοντέλων, παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα και παρατίθενται και ορισμένα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των υπόψη μοντέλων.

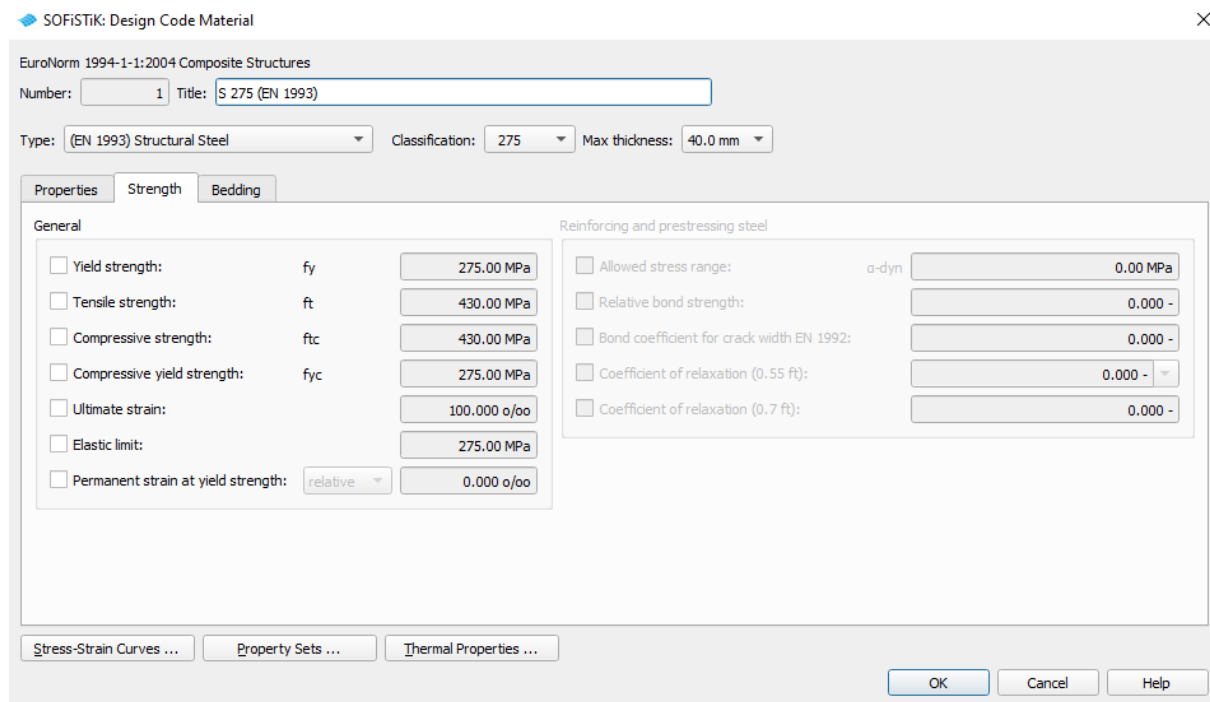
4.2 Μόρφωση προσομοιωμάτων

4.2.1 Ιδιότητες υλικών

Ως βασικά υλικά ορίστηκαν ο δομικός χάλυβας S 275 και το σκυρόδεμα ποιότητας C 25/30. Οι ιδιότητες του δομικού χάλυβα ελήφθησαν από το EN 1993-1-1 [7] και παρατίθενται στο Σχήμα 4-2 και στο Σχήμα 4-3.

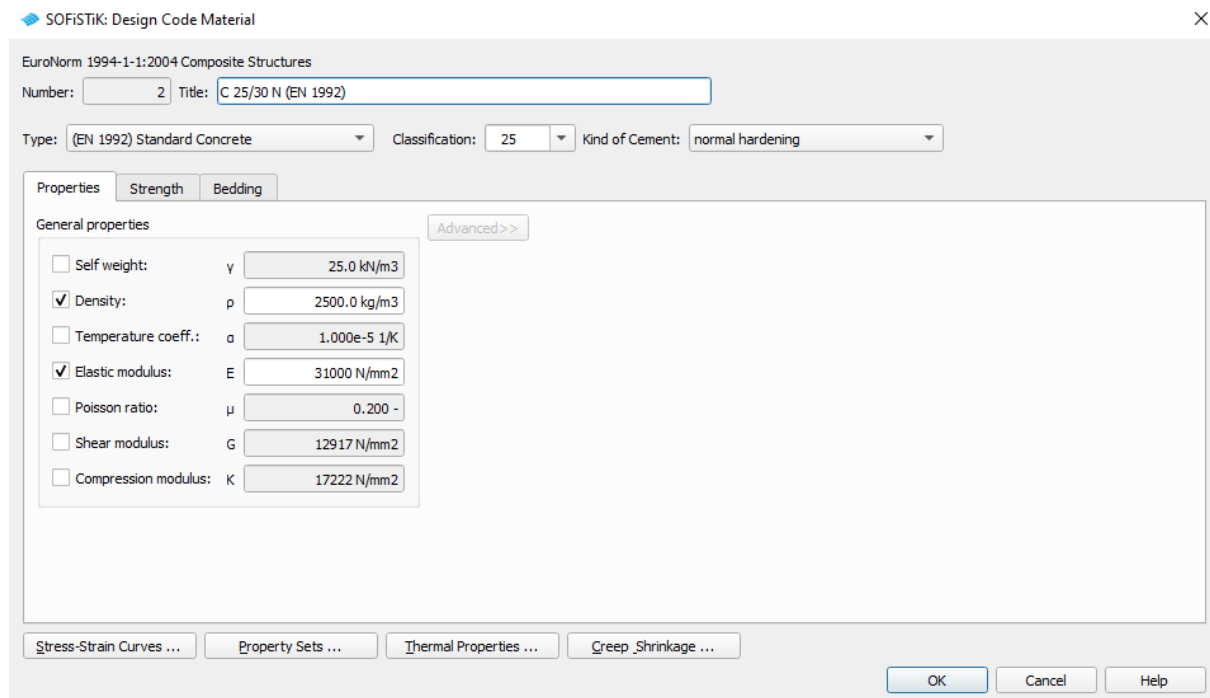


Σχήμα 4-2: Ιδιότητες δομικού χάλυβα S 275



Σχήμα 4-3: Αντοχή δομικού χάλυβα S 275

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος ελήφθησαν από το EN 1992-1-1 [6] και φαίνονται στο Σχήμα 4-4 και στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-4: Ιδιότητες σκυροδέματος C 25/30

SOFiSTiK Design Code Material

EuroNorm 1994-1-1:2004 Composite Structures

Number: 2 Title: C 25/30 N (EN 1992)

Type: (EN 1992) Standard Concrete Classification: 25 Kind of Cement: normal hardening

Properties Strength Bedding

Strength

- Effective strength: f_c 25.00 MPa
- Tensile strength: f_{ctm} 2.56 MPa
- Lower fractile value of tensile strength: $f_{ctk,0.5}$ 1.80 MPa
- Fatigue strength: $f_{cd, fat}$ 12.75 MPa
- Design bond strength: f_{bd} 2.69 MPa
- Mean strength: f_{cm} 33.00 MPa
- Modulus of elasticity for service: E 33050 N/mm²
- Fracture energy: 136.979 N/m

Tensile Stresses in Stress-Strain Curves

- Design tensile strength: f_{td} 1.20 MPa
- Tensile strength after cracking: f_{eqr} 0.00 MPa
- Ultimate tensile strength: f_{eet} 0.00 MPa
- Friction in cracks: 0.200 -

Stress-Strain Curves ... Property Sets ... Thermal Properties ... Creep, Shrinkage ...

OK Cancel Help

Σχήμα 4-5: Αντοχή σκυροδέματος C 25/30

4.2.2 Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων

Δημιουργήθηκαν οι παρακάτω κατηγορίες φορτίων:

- Μόνιμο φορτίο (G) το οποίο περιλαμβάνει το πραγματικό ίδιο βάρος του φορέα. Το ίδιο βάρος του φορέα υπολογίστηκε σε 8 kN/m.
- Πρόσθετο μόνιμο φορτίο (GAD) το οποίο ελήφθη 2 kN/m² και αντιστοιχεί σε ένα ομοιόμορφο γραμμικά καταμεμημένο φορτίο 4 kN/m αν αναχθεί ανά τρέχον μέτρο δοκού και
- Κινητό φορτίο (Q) το οποίο ελήφθη 5 kN/m² και αντιστοιχεί σε ένα ομοιόμορφο γραμμικά καταμεμημένο φορτίο 10 kN/m αν αναχθεί ανά τρέχον μέτρο δοκού.

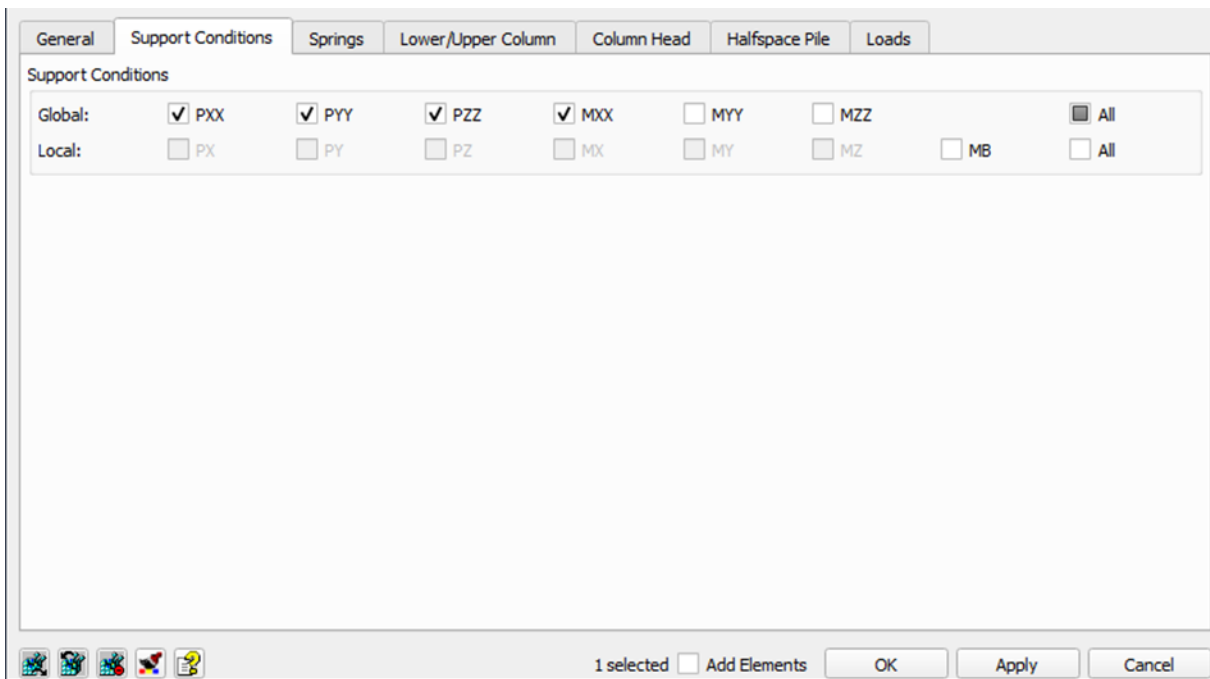
Εκτός από τις 3 μεμονωμένες φορτίσεις που δημιουργούνται για κάθε ένα φορτίο, δημιουργούνται δύο επιπλέον συνδυασμοί φορτίσεων. Ο πρώτος αναφέρεται στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας και συνδυάζει τις τρεις παραπάνω φορτίσεις με συντελεστή $\gamma=1,00$, ενώ ο άλλος συνδυασμός αναφέρεται στην οριακή κατάσταση αστοχίας και συνδυάζει τις τρεις φορτίσεις με συντελεστή $\gamma = 1,35$. Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει τους συνδυασμούς φορτίσεων που δημιουργήθηκαν.

Πίνακας 4-1: Συνδυασμοί φορτίσεων

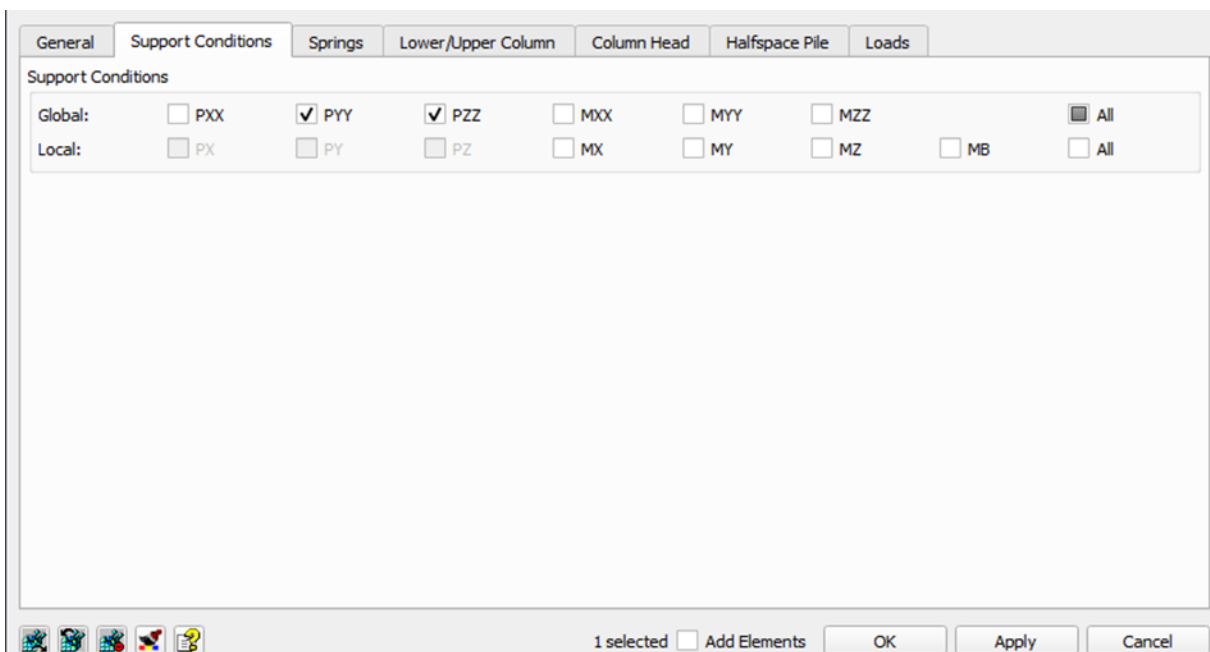
A/A	Αριθμός φόρτισης	Ονομασία φόρτισης
1	1004	G+GAD+Q
2	1005	1,35G + 1,35GAD + 1,35Q

4.2.3 Στηρίξεις φορέα

Όπως και στην σύμμικτη δοκό γέφυρας έτσι και σε αυτό το παράδειγμα, εισάγεται στο ένα άκρο του φορέα άρθρωση με ταυτόχρονη δέσμευση της στροφής περί τον άξονα x (Σχήμα 4-6) ενώ στο άλλο άκρο εισάγεται κύλιση (Σχήμα 4-7).



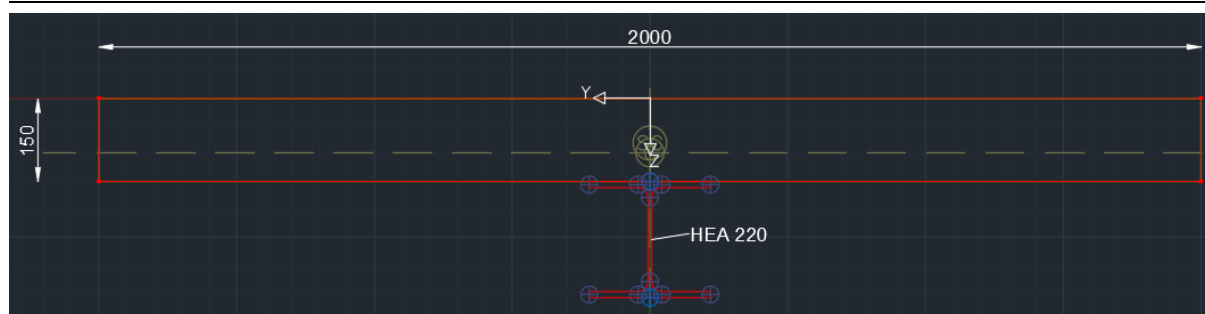
Σχήμα 4-6: Συνθήκες στήριξης άρθρωσης φορέα



Σχήμα 4-7: Συνθήκες στήριξης κύλισης φορέα

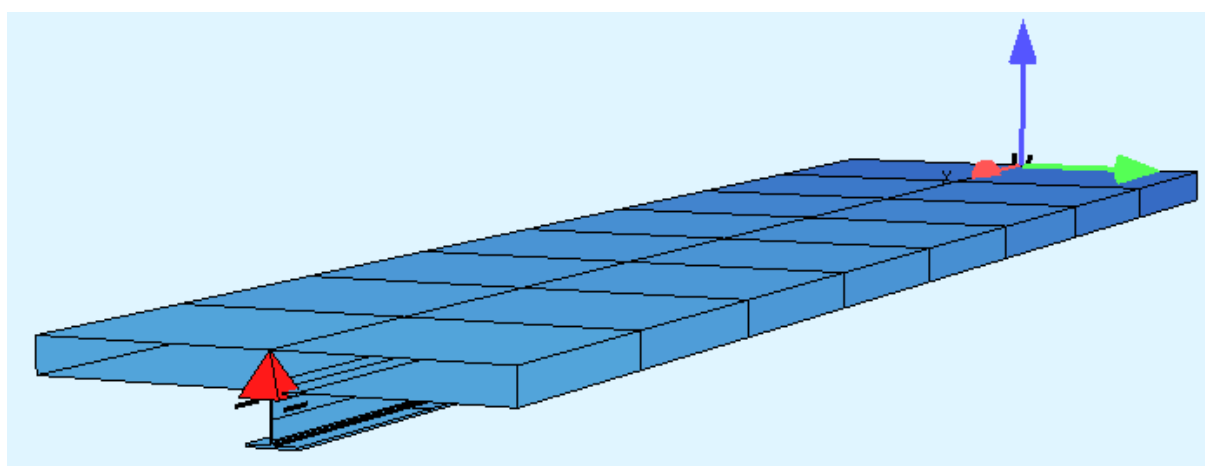
4.2.4 Μοντέλο ενιαίας διατομής

Δημιουργείται μια ενιαία διατομή η οποία περιλαμβάνει τόσο την πλάκα σκυροδέματος όσο και την σιδηροδοκό. Ως κύριο υλικό για την διατομή καθορίζεται ο δομικός χάλυβας S 275. Στην πλάκα σκυροδέματος προσδίδεται ως υλικό το σκυρόδεμα ποιότητας C 20/25 ενώ στην δοκό ο δομικός χάλυβας S 275. Στο Σχήμα 4-8 παρουσιάζεται η ενιαία διατομή όπως εισήχθη στο πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών SOFISTIK 2020.



Σχήμα 4-8: Ενιαία διατομή σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου στο πρόγραμμα SOFISTiK 2020

Στη συνέχεια με χρήση της παραπάνω διατομής δημιουργείται ο φορέας της δοκού με μήκος 8 m. Η δοκός εισάγεται έκκεντρα με σημείο εισαγωγής την αρχή του τοπικού συστήματος αξόνων γOz της ενιαίας διατομής (Σχήμα 4-8). Στο Σχήμα 4-9 παρουσιάζεται μια 3D απεικόνιση του μοντέλου ενιαίας διατομής στο πρόγραμμα SOFISTiK 2020. Το μοντέλο αναλύθηκε με γραμμική – ελαστική μέθοδος.



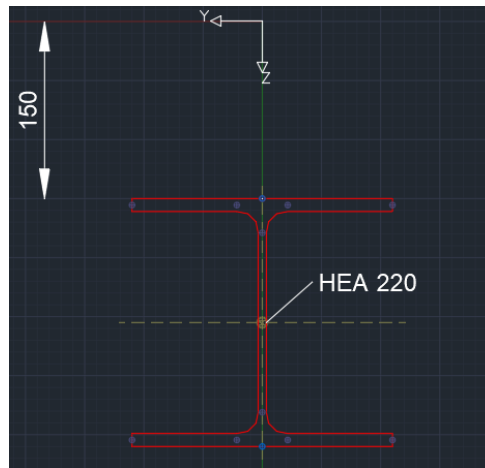
Σχήμα 4-9: 3D απεικόνιση μοντέλου ενιαίας διατομής στο πρόγραμμα SOFISTiK 2020

4.2.5 Μοντέλο ιδεατής διατομής

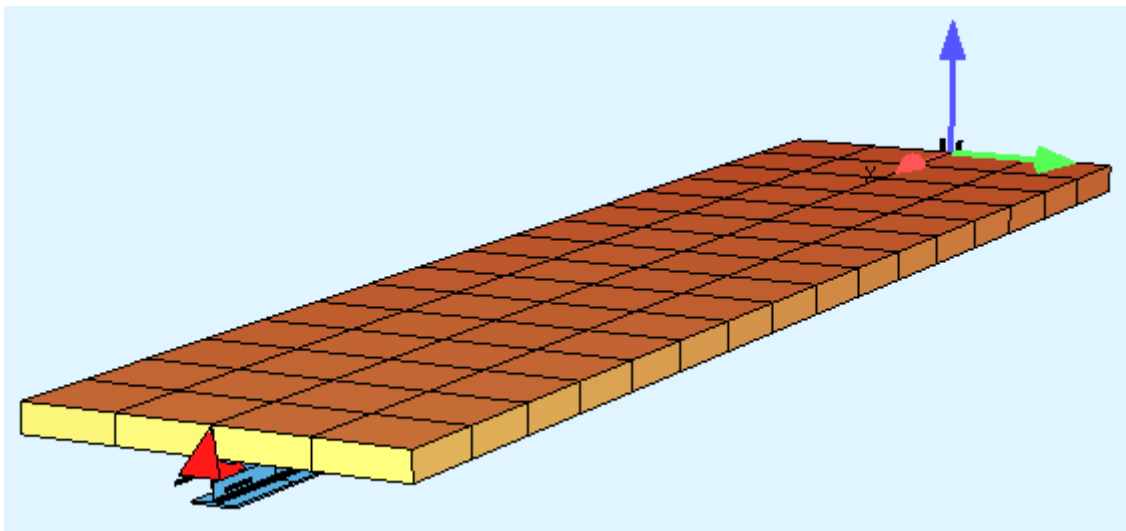
Για να δημιουργηθεί το μοντέλο της ιδεατής διατομής πραγματοποιούνται στο μοντέλο της ενιαίας διατομής οι παρακάτω τροποποιήσεις:

- Διαγράφεται από την ενιαία διατομή η πλάκα σκυροδέματος και διατηρείται μόνο η σιδηροδοκός με το ίδιο όμως σημείο εισαγωγής (αρχή του τοπικού συστήματος αξόνων γOz) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-10. Τα πεπερασμένα στοιχεία που θα δημιουργηθούν αυτόματα καθορίζεται να έχουν μέγιστο μήκος τα 0,5 m.
- Η πλάκα σκυροδέματος εισάγεται ως επιφανειακό στοιχείο πάχους 150 mm ενώ οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που θα δημιουργηθούν ορίζεται να είναι 0,5 m · 0,5 m. Η άνω επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος καθορίζεται ως επίπεδο εισαγωγής. Με αυτόν τον τρόπο πλάκα σκυροδέματος και σιδηροδοκός εισάγονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο ενώ ταυτόχρονα υπάρχει και ταύτιση των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων τους. Οι δύο αυτές συνθήκες εξασφαλίζουν την κινηματική δέσμευση των στοιχείων και επομένως τη σύμμικτη λειτουργία του φορέα.

Στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζεται μια 3D απεικόνιση του μοντέλου ιδεατής διατομής στο πρόγραμμα SOFISTiK 2020. Και αυτό το μοντέλο αναλύθηκε με την γραμμική – ελαστική μέθοδο.



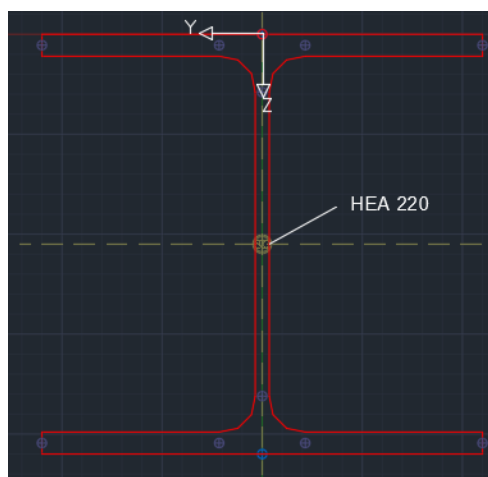
Σχήμα 4-10: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο ιδεατής διατομής σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου



Σχήμα 4-11: 3D απεικόνιση μοντέλου ιδεατής διατομής στο πρόγραμμα SOFISTIK 2020

4.2.6 Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις

Η διατομή της σιδηροδοκού τροποποιείται ώστε να έχει σημείο εισαγωγής το μέσο της άνω ίνας της όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-12 (αρχή του τοπικού συστήματος αξόνων $\gamma O z$).



Σχήμα 4-12: Διατομή σιδηροδοκού στο μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις

Η σιδηροδοκός εισάγεται ως γραμμικό στοιχείο σε απόσταση 150 mm από την άνω επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος η οποία εξακολουθεί να εισάγεται ως επιφανειακό στοιχείο. Όπως και στο αντίστοιχο μοντέλο της σύμμικτης δοκού γέφυρας έτσι και εδώ εισάγονται ανά 0,5 m κινηματικές δεσμεύσεις (Point Constraints) μεταξύ σιδηροδοκού και πλάκα σκυροδέματος δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 3-13). Και αυτό το μοντέλο αναλύεται με την γραμμική-ελαστική μέθοδο.

4.2.7 Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων

Οι κινηματικές δεσμεύσεις του προηγούμενου μοντέλου αντικαθίστανται από ελατήρια τα οποία τόσο στην διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6$ kN/m) όπως ακριβώς και στο αντίστοιχο μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου. Οι ιδιότητες των γραμμικών ελατηρίων δίνονται στο Σχήμα 3-14 για την διαμήκη διεύθυνση και στο Σχήμα 3-15 για την εγκάρσια διεύθυνση. Και εδώ τοποθετείται στο ένα άκρο της πλάκας σκυροδέματος μία επιπλέον στήριξη στην οποία δεσμεύεται η στροφή περί τον άξονα x (Σχήμα 3-16). Ως μέθοδος ανάλυσης επιλέγεται και πάλι η γραμμική-ελαστική.

4.2.8 Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων

Επιλέγεται και σε αυτό το μοντέλο για την διαμήκη διεύθυνση των ελατηρίων γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6$ kN/m) ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση τους επιλέγεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με δυσκαμψία και όριο διαρροής τα αντίστοιχα της ομάδας των διατμητικών ήλων που έχουν τοποθετηθεί σε μήκος 0,5 m.

Για την διατμητική σύνδεση σιδηροδοκού και πλάκας σκυροδέματος θα χρησιμοποιηθούν διατμητικοί ήλοι κεφαλής Φ16, κατηγορίας S 235 J2 + C 450 με $f_y = 350$ MPa και $f_u = 450$ MPa ενώ το ύψος τους επιλέγεται να είναι $h = 100$ mm.

Η οριακή αντοχή του ενός ήλου δίνεται από την ελάχιστη τιμή των εξ. (2-8) και (2-9) και είναι:

$$P_{Rd} = \min \left\{ 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)}{Y_v}, 0,29 \cdot a \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} / Y_v \right\}$$

$$\text{όπου } a = \begin{cases} 0,2 \cdot \left(\frac{h}{d} + 1 \right) & \text{για } 3 \leq \frac{h}{d} \leq 4 \\ 1 & \text{για } 4 < \frac{h}{d} \end{cases} \Rightarrow a = 1$$

Επομένως:

$$P_{Rd} = \min\{57,9 \text{ kN}, 52,3 \text{ kN}\} \Rightarrow P_{Rd} = 52,3 \text{ kN}$$

Η διατμητική δυσκαμψία του ενός διατμητικού ήλου δίνεται από την εξ. (2-13) (He et al [12]) και είναι:

$$k_s = C \cdot d \cdot E_{cm}^{\frac{3}{4}} \cdot E_a^{\frac{1}{4}}$$

όπου $C = 0,374$ και επομένως:

$$k_s = 299.273,1 \text{ kN/m}$$

Η οριακή αντοχή $P_{y, \text{spring}}$ και η διατμητική δυσκαμψία k_{spring} του ενός ελατηρίου δίνονται από την εξ. (3-1) και την εξ. (3-3) αντίστοιχα.

Συνολικά εξετάστηκαν 3 διαφορετικά σενάρια του μοντέλου των μη γραμμικών ελατηρίων . όσον αφορά τον αριθμό και την κατανομή των διατμητικών ήλων και για κάθε ένα σενάριο εξετάστηκαν δύο

διαφορετικές παραλλαγές όσον αφορά το μήκος των ελατηρίων. Στο πρώτο σενάριο επιλέχθηκε να ελεγχθεί η πλήρης διατμητική σύνδεση της δοκού ενώ στα άλλα δύο ελέγχθηκε η μερική διατμητική της σύνδεση με διαφορετικό κάθε φορά ποσοστό διατμητικής σύνδεσης.

Ο συνολικός αριθμός n_f των διατμητικών συνδέσεων που απαιτούνται για πλήρη διατμητική σύνδεση δίνεται από την εξ. (2-24) και είναι:

$$n_f = \frac{\min\{N_{pl,a}; N_{pl,c}\}}{P_{Rd}}$$

όπου:

$$N_{pl,a} = A_a \cdot f_{yd} = 1.768,3 \text{ kN}$$

$$N_{pl,c} = A_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = 4.250,0 \text{ kN}$$

$$P_{Rd} = 52,3 \text{ kN}$$

Επομένως $n_f=34$ διατμητικοί ήλοι. Ο αριθμός αυτός αναφέρεται στο κρίσιμο μήκος της δοκού το οποίο ισούται με το ήμισυ του συνολικού μήκους της δοκού. Επομένως συνολικά σε όλη την σύμμικτη δοκό θα πρέπει να τοποθετηθούν κατ' ελάχιστον 68 διατμητικοί ήλοι. Οι διατμητικοί ήλοι θα τοποθετηθούν ανά δύο σε κάθε διατομή ($n=2$) με ομοιόμορφη πλαστική κατανομή. Επομένως η μέγιστη μεταξύ τους απόσταση είναι 23,5 cm. Επιλέχθηκε τελικώς η τοποθέτηση διατμητικών ήλων 2Φ16/200. Για το πρώτο σενάριο μερικής διατμητικής σύνδεσης επιλέχθηκε να τοποθετηθούν διατμητικοί ήλοι 2Φ16/350 το οποίο αντιστοιχεί σε ποσοστό διατμητικής σύνδεσης 67,2% και για το δεύτερο σενάριο μερικής διατμητικής σύνδεσης επιλέχθηκε να τοποθετηθούν διατμητικοί ήλοι 2Φ16/450 το οποίο αντιστοιχεί σε ποσοστό διατμητικής σύνδεσης 52,3%. Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει την οριακή αντοχή και την διατμητική δυσκαμψία των ελατηρίων για κάθε μία διαφορετική κατανομή των ήλων.

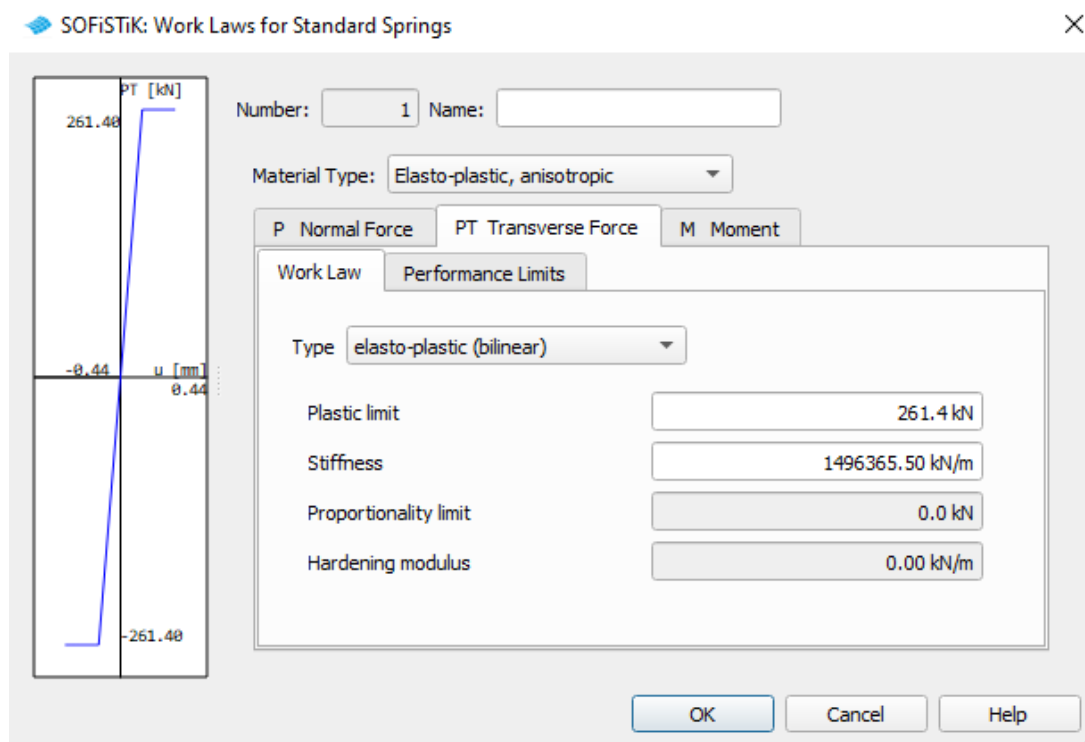
Πίνακας 4-2: Τιμές οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίων

A/A	Κατανομή ήλων (mm)	$P_{y,spring}$ (kN)	k_{spring} (kN/m)
1	2Φ16/200	261,4	1.496.365,49
2	2Φ16/350	149,4	855.065,99-
3	2Φ16/450	116,2	665.051,33

Στο Σχήμα 4-13 δίνεται ενδεικτικά η εισαγωγή της οριακής αντοχής και της διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020 για κατανομή διατμητικών ήλων 2Φ19/200.

Για κάθε ένα από τα προηγούμενα σενάρια εξετάστηκαν δύο διαφορετικές παραλλαγές όσον αφορά το μήκος των ελατηρίων. Στην πρώτη παραλλαγή το μήκος των ελατηρίων ελήφθη ίσο με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος (150 mm) ενώ στην δεύτερη ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος (75 mm). Αυτό επετεύχθη τροποποιώντας το επίπεδο εισαγωγής της πλάκας σκυροδέματος από την άνω επιφάνεια της πλάκας στην μέση επιφάνεια της. Συνολικά επομένως εξετάστηκαν έξι διαφορετικά σενάρια του μοντέλου των μη γραμμικών ελατηρίων

Τα υπόψη σενάρια αναλύθηκαν με μη γραμμική ανάλυση. Τόσο η δημιουργία των φορτίσεων όσο και η μη γραμμική ανάλυση τους έτρεξαν με κώδικα σε περιβάλλον text editor του SSD του SOFiSTiK 2020. Ο κώδικας που δημιουργήθηκε είναι αντίστοιχος με τον κώδικα της σύμμικτης δοκού γέφυρας όπως δίνεται στο Σχήμα 3-18 για την δημιουργία φόρτισης για μεμονωμένο φορτίο, στο Σχήμα 3-19 για δημιουργία συνδυασμού φορτίσεων και στο Σχήμα 3-20 για την μη γραμμική ανάλυση ενός συνδυασμού φορτίσεων.



Σχήμα 4-13: Εισαγωγή οριακής αντοχής και διατμητικής δυσκαμψίας ελατηρίου στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα της ανάλυσης των μοντέλων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης δοκού, οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνας της σιδηροδοκού και οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων για κάθε μοντέλο. Για την ευχερέστερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει την αντιστοιχία του ονόματος κάθε μοντέλου με την περιγραφή του.

Πίνακας 4-3: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης δοκού που αναλύθηκαν

A/A	Μοντέλο	Περιγραφή
1	Μοντέλο 1	Μοντέλο ενιαίας διατομής
2	Μοντέλο 2	Μοντέλο ιδεατής διατομής
3	Μοντέλο 3	Μοντέλο με κινηματικές δεσμεύσεις
4	Μοντέλο 4	Μοντέλο γραμμικών ελατηρίων
5	Μοντέλο 5	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/200
6	Μοντέλο 6	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/200
7	Μοντέλο 7	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350
8	Μοντέλο 8	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350
9	Μοντέλο 9	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/450
10	Μοντέλο 10	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/450

4.3.1 Μέγιστα βέλη σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου

Στους Πίνακες 4-4 έως 4-6 παρουσιάζονται τα μέγιστα βέλη σε mm της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου. Για όλα τα μοντέλα μη γραμμικών ελατηρίων (μοντέλα 5 έως 10) δίνεται και η % διαφορά των μέγιστων βελών ως προς τα βέλη του μοντέλου της ενιαίας διατομής (μοντέλο 1), σύμφωνα με την εξ. (3-4). Επίσης δίνονται η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή των εν λόγω διαφορών για κάθε μοντέλο.

Πίνακας 4-4: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 1 έως 4

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
1	1001 G	6,6	6,6	6,6	6,8
2	1002 GAD	3,3	3,3	3,3	3,4
3	1003 Q	8,2	8,3	8,2	8,5
4	1004 G+GAD+Q	18,0	18,2	18,1	18,6
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	25,6	25,7	25,7	26,4

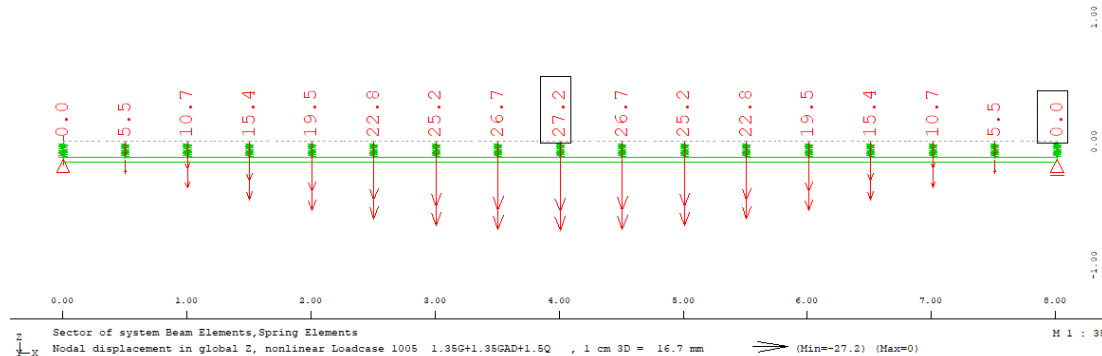
Πίνακας 4-5: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5 έως 7

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7	
		Τιμή	Δδ ₅	Τιμή	Δδ ₆	Τιμή	Δδ ₇
1	1001 G	7,0	-6,3%	6,9	-4,9%	7,1	-8,4%
2	1002 GAD	3,5	-6,1%	3,4	-4,9%	3,6	-8,2%
3	1003 Q	8,7	-6,3%	8,6	-4,9%	8,9	-8,3%
4	1004 G+GAD+Q	19,2	-6,7%	18,9	-5,0%	19,5	-8,3%
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	27,2	-6,2%	26,9	-5,1%	27,7	-8,2%
Μέση τιμή των Δδ _i		-	-6,3%	-	-4,9%	-	-8,3%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _i		-	-6,7%	-	-5,1%	-	-8,4%

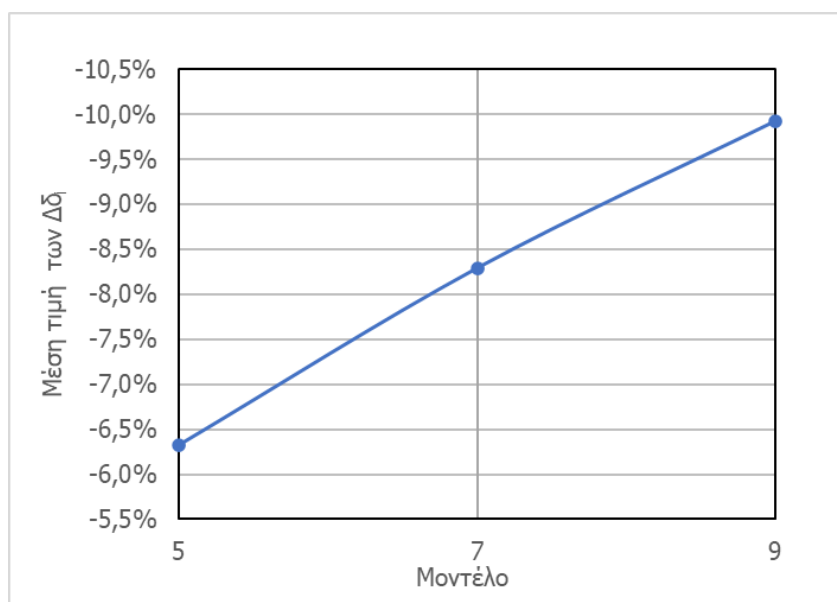
Πίνακας 4-6: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 8 έως 10

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 8		Μοντέλο 9		Μοντέλο 10	
		Τιμή	Δδ ₈	Τιμή	Δδ ₉	Τιμή	Δδ ₁₀
1	1001 G	7,0	-7,0%	7,2	-9,6%	7,1	-8,2%
2	1002 GAD	3,5	-6,7%	3,6	-9,5%	3,6	-8,2%
3	1003 Q	8,8	-7,0%	9,0	-9,6%	8,9	-8,3%
4	1004 G+GAD+Q	19,3	-7,2%	19,8	-10,0%	19,5	-8,3%
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	27,4	-7,0%	28,4	-10,9%	28,2	-10,2%
Μέση τιμή των Δδ _i		-	-7,0%	-	-9,9%	-	-8,7%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _i		-	-7,2%	-	-10,9%	-	-10,2%

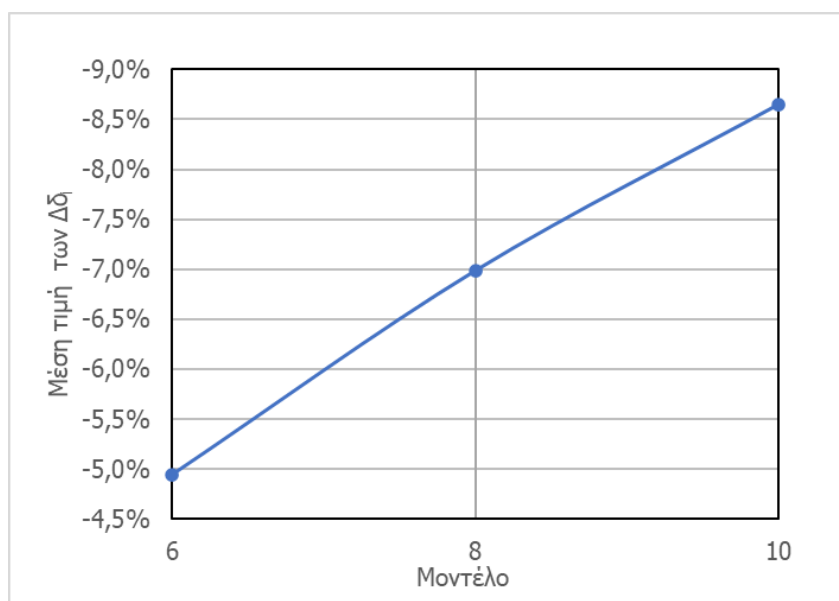
Στο Σχήμα 4-14 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα βέλη της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1005 (1,35G + 1,35GAD + 1,35Q). Για τον εποπτικότερο έλεγχο των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 4-15 δίνεται το διάγραμμα των μέσων τιμών των Δδ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας και στο Σχήμα 4-16 το αντίστοιχο διάγραμμα για τα μοντέλα με μήκος μη γραμμικών ελατηρίων ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.



Σχήμα 4-14: Βέλη σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1005



Σχήμα 4-15: Μέση τιμή των Δδ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας



Σχήμα 4-16: Μέση τιμή των Δδ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας

4.3.2 Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου

Στους Πίνακες 4-7 έως 4-9 παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις σε MPa της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου. Για όλα τα μοντέλα μη γραμμικών ελατηρίων (μοντέλα 5 έως 10) δίνεται και η % διαφορά των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων ως προς τις αντίστοιχες του μοντέλου της ενιαίας διατομής (μοντέλο 1), σύμφωνα με την εξ. (3-5). Επίσης δίνονται η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή των εν λόγω διαφορών για κάθε μοντέλο.

Πίνακας 4-7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 1 έως 4

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
1	1001 G	52,6	52,0	52,1	52,0
2	1002 GAD	26,3	26,0	26,1	26,0
3	1003 Q	65,7	65,1	65,2	65,0
4	1004 G+GAD+Q	144,5	143,1	143,3	142,9
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	205,0	203,0	203,3	202,7

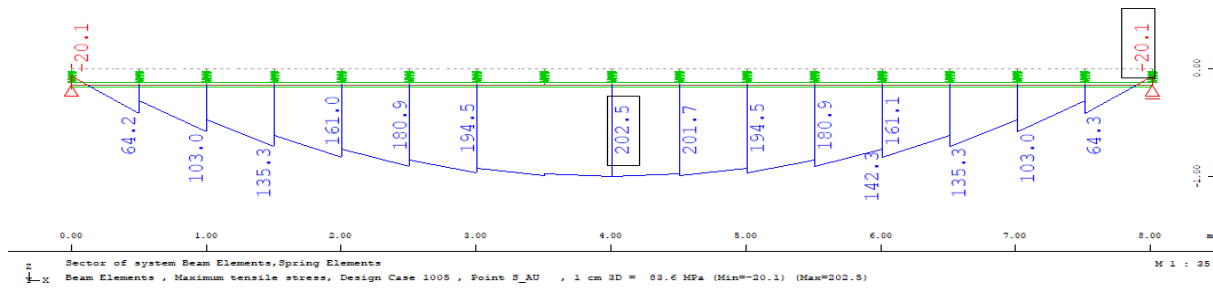
Πίνακας 4-8: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5 έως 7

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7	
		Τιμή	Δδ ₅	Τιμή	Δδ ₆	Τιμή	Δδ ₇
1	1001 G	51,9	1,3%	52,0	1,1%	51,8	1,5%
2	1002 GAD	25,9	1,5%	26,0	1,1%	25,9	1,5%
3	1003 Q	64,9	1,2%	65,0	1,1%	64,8	1,4%
4	1004 G+GAD+Q	142,8	1,2%	142,9	1,1%	142,6	1,3%
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	202,5	1,2%	202,7	1,1%	202,3	1,3%
Μέση τιμή των Δσ _i		-	1,3%	-	1,1%	-	1,4%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δσ _i		-	1,5%	-	1,1%	-	1,5%

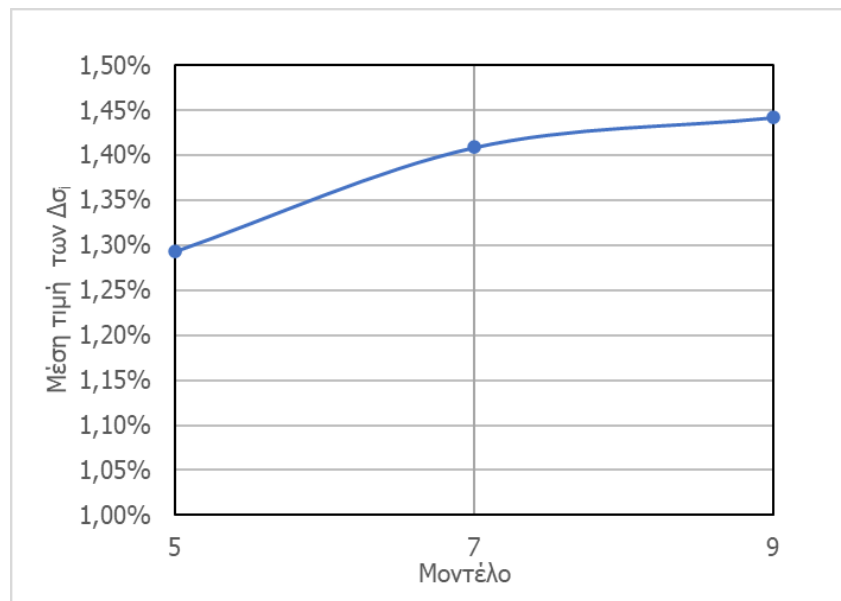
Πίνακας 4-9: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 8 έως 10

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 8		Μοντέλο 9		Μοντέλο 10	
		Τιμή	Δδ ₈	Τιμή	Δδ ₉	Τιμή	Δδ ₁₀
1	1001 G	51,9	1,3%	51,8	1,5%	51,9	1,3%
2	1002 GAD	25,9	1,5%	25,9	1,5%	25,9	1,5%
3	1003 Q	64,9	1,2%	64,8	1,4%	64,8	1,4%
4	1004 G+GAD+Q	142,8	1,2%	142,5	1,4%	142,7	1,2%
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	202,5	1,2%	202,1	1,4%	202,3	1,3%
Μέση τιμή των Δσ _i		-	1,3%	-	1,4%	-	1,4%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δσ _i		-	1,5%	-	1,5%	-	1,5%

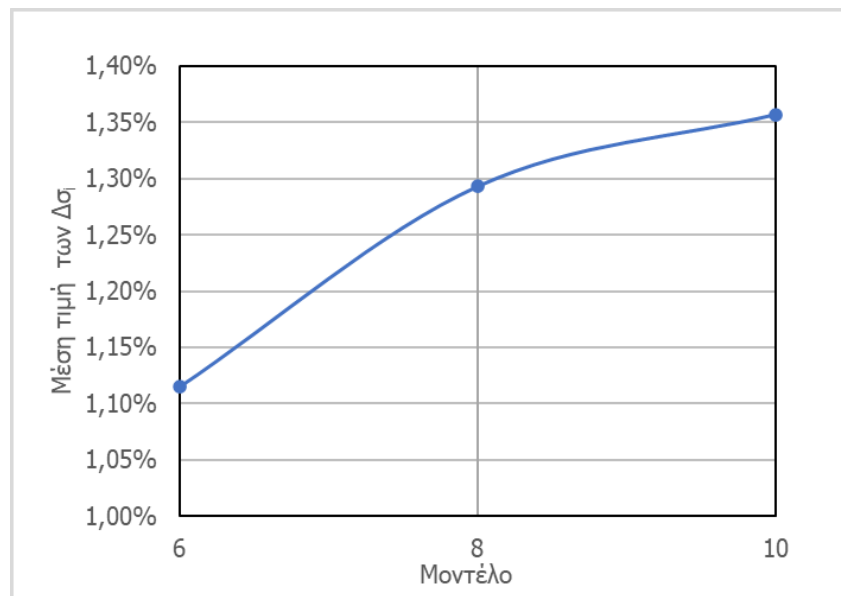
Στο Σχήμα 4-17 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνας της σιδηροδοκού της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1005 (1,35G + 1,35GAD + 1,35Q). Για τον εποπτικότερο έλεγχο των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 4-18 δίνεται το διάγραμμα των μέσων τιμών των Δσ_i για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας και στο Σχήμα 4-19 το αντίστοιχο διάγραμμα για τα μοντέλα με μήκος μη γραμμικών ελατηρίων ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.



Σχήμα 4-17: Εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκού σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 5 και την φόρτιση 1005



Σχήμα 4-18: Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας



Σχήμα 4-19: Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$ για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των μη γραμμικών ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας

4.3.3 Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου

Ο Πίνακας 4-10 και ο Πίνακας 4-11 παρουσιάζουν τις μέγιστες διατμητικές δυνάμεις σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5-10

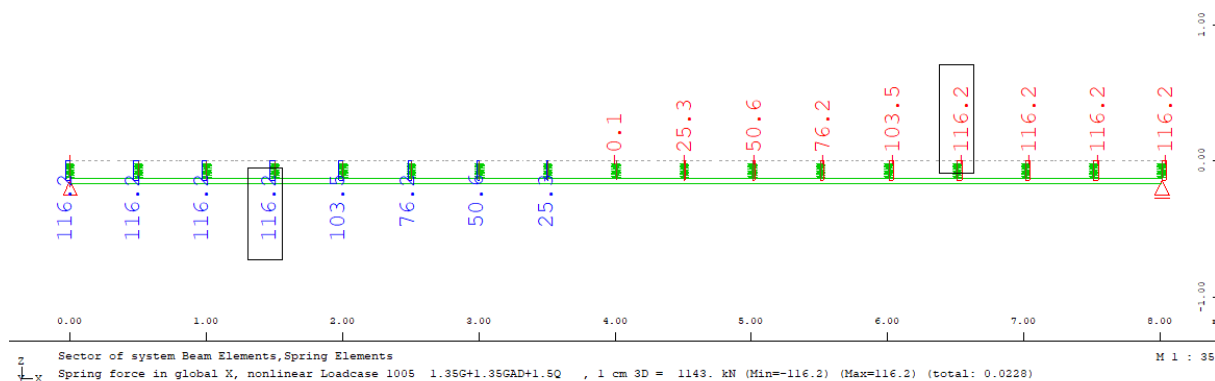
Πίνακας 4-10: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 5-7

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 5		Μοντέλο 6		Μοντέλο 7	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G	38,0	261,4	37,8	261,4	36,3	149,4
2	1002 GAD	19,0		18,9		18,2	
3	1003 Q	47,6		47,3		45,4	
4	1004 G+GAD+Q	104,5		103,9		99,7	
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	148,1		147,3		141,3	

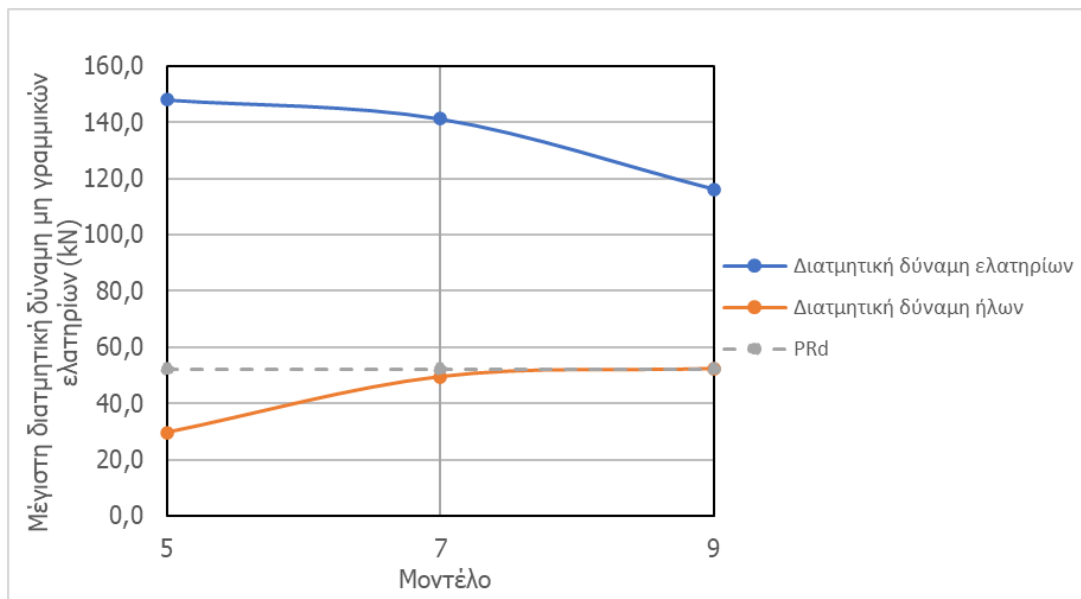
Πίνακας 4-11: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για τα μοντέλα 8-10

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 8		Μοντέλο 9		Μοντέλο 10	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G	36,2	149,4	35,5	116,2	35,4	116,2
2	1002 GAD	18,1		17,7		17,7	
3	1003 Q	45,2		44,3		44,2	
4	1004 G+GAD+Q	99,4		97,4		97,2	
5	1005 1,35G + 1,35GAD + 1,35Q	140,8		116,2		116,2	

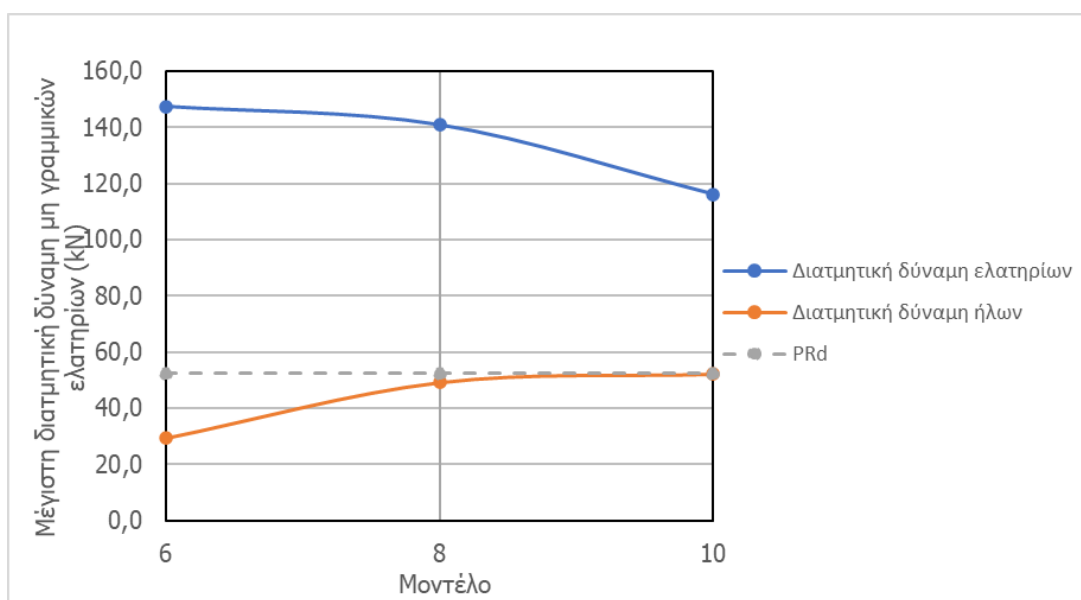
Στο Σχήμα 4-20 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 9 και την φόρτιση 1005 (1,35G + 1,35GAD + 1,35Q). Για την ίδια φόρτιση δίνεται στο Σχήμα 4-21 το διάγραμμα των μέγιστων διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για τα μοντέλα εκείνα στα οποία το ύψος των ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας και στο Σχήμα 4-22 το αντίστοιχο διάγραμμα για τα μοντέλα με μήκος μη γραμμικών ελατηρίων ίσο με το ήμισυ του πάχους της πλάκας.



Σχήμα 4-20: Διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου για το μοντέλο 9 και την φόρτιση 1005



Σχήμα 4-21: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1005 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το πάχος της πλάκας



Σχήμα 4-22: Μέγιστη διατμητική δύναμη σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων και των διατμητικών ήλων για την φόρτιση 1005 και για τα μοντέλα στα οποία το μήκος των ελατηρίων ισούται με το ήμισυ του πάχους της πλάκας

4.4 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση του φορέα εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Συγκρίνοντας τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης δοκού ανάμεσα στο μοντέλο 1 (μοντέλο ενιαίας διατομής) και στο μοντέλο 5 (μοντέλο πλήρους διατμητικής σύνδεσης με μη γραμμικά ελατήρια μήκους ίσο με το πάχος της πλάκας) διαπιστώνεται μια μεταβολή της τάξεως του 6,5%. Η αντίστοιχη μεταβολή για το μοντέλο 6 (μοντέλο πλήρους διατμητικής σύνδεσης με μη γραμμικά ελατήρια μήκους ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας) κυμαίνεται περίπου στο 5%. Για τα μοντέλα 7 έως 10 στα οποία έχουμε μερική διατμητική σύνδεση η αντίστοιχη μεταβολή αυξάνεται. Συγκεκριμένα για το μοντέλο 7 κυμαίνεται λίγο πάνω από το 8%, για το μοντέλο 8 κυμαίνεται στο 7%, για το μοντέλο 9

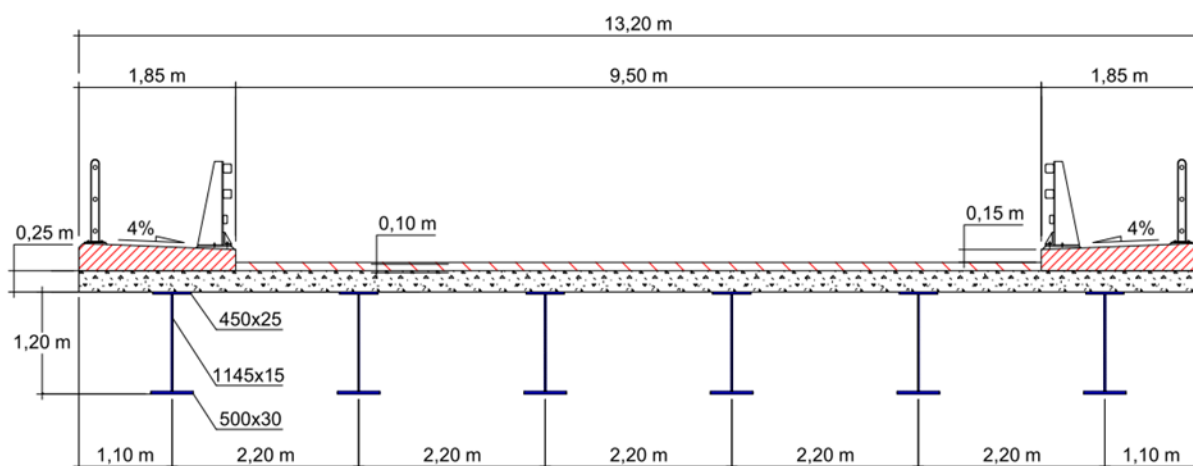
κυμαίνεται στο 10% ενώ για το μοντέλο 10 κυμαίνεται λίγο πάνω από το 8% πλην της φόρτισης 1005 όπου η υπόψη μεταβολή είναι 10,2%. Για τα μοντέλα πλήρους διατμητικής σύνδεσης οι παραπάνω μεταβολές κρίνονται ικανοποιητικές και ικανές να επιβεβαιώσουν την αξιοπιστία της προσομοίωσης. Στα μοντέλα όμως μερικής διατμητικής σύνδεσης οι παραπάνω μεταβολές θα έπρεπε να ήταν αρκετά μεγαλύτερες. Ο λόγος του βέλους δοκού με μερική διατμητική σύνδεση προς το βέλος της ίδιας δοκού με πλήρη διατμητική σύνδεση δίνεται από την εξ. (2-31). Για μερική διατμητική σύνδεση σε ποσοστό 67,2% ο υπόψη λόγος ισούται με 1,8 ενώ οι αντίστοιχοι λόγοι λαμβάνοντας υπόψη τα μέγιστα βέλη των μοντέλων 5-7 και 6-8 είναι 1,02. Αντίστοιχα για μερική διατμητική σύνδεση σε ποσοστό 52,3% ο υπόψη λόγος ισούται με 2,2 ενώ οι αντίστοιχοι λόγοι λαμβάνοντας υπόψη τα μέγιστα βέλη των μοντέλων 5-9 και 6-10 είναι 1,03 για τις φορτίσεις 1001 έως 1004 ενώ για την φόρτιση 1005 είναι 1,04 για το ζεύγος μοντέλων 5-9 και 1,05 για το ζεύγος μοντέλων 6-10. Η διαφορά ανάμεσα στα μέγιστα βέλη που προέκυψαν από την ανάλυση σε σύγκριση με αυτά που αναμένονταν σύμφωνα με την εξ. (2-31) είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα είτε η προσομοίωση μας να μην είναι ακριβής είτε η παραπάνω εξίσωση να είναι αρκετά συντηρητική.

- Συγκρίνοντας τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα της σιδηροδοκού ανάμεσα στο μοντέλο 1 (μοντέλο ενιαίας διατομής) και στα μοντέλα με μη γραμμικά ελατήρια διαπιστώνεται μια πάρα πολύ καλή σύγκλιση. Η μεταβολή κυμαίνεται από 1,1 έως 1,5%. Οι παραπάνω μεταβολές κρίνονται ικανοποιητικές και ικανές να επιβεβαιώσουν την αξιοπιστία της προσομοίωσης.
- Το μήκος των ελατηρίων (ίσο με το πάχος της πλάκας ή το ήμισυ αυτού) διαφοροποιεί τα μέγιστα βέλη κατά 1 έως 1,5% ενώ τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα της σιδηροδοκού κατά 0,1 έως 0,2%. Επομένως η ακριβής προσομοίωση του ύψους των διατμητικών ήλων δεν κρίνεται σημαντική.
- Αξιολογώντας την κατανομή των διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων διαπιστώνεται ότι όσο πλησιάζουμε τις στηρίξεις τόσο οι διατμητικές δυνάμεις των ήλων αυξάνονται, ακολουθούν δηλαδή την κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων. Μόνο τα ελατήρια άνωθεν των στηρίξεων αναλαμβάνουν μικρότερες διατμητικές δυνάμεις από τα αμέσως επόμενα τους (Σχήμα 4-20) και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια επιρροής τους είναι η μισή απ' ότι των υπολοίπων ελατηρίων.
- Όσο αραιώνεται η κατανομή των ήλων μειώνεται η διατμητική δυσκαμψία των ελατηρίων και για το λόγο αυτό μειώνονται ελαφρώς οι διατμητικές δυνάμεις των ελατηρίων. Μόνη εξαίρεση τα ακραία ελατήρια των οποίων οι διατμητικές δυνάμεις αυξάνονται προκειμένου να εξισορροπήσουν τις παραπάνω μειώσεις.
- Όταν ορισμένα ελατήρια για συγκεκριμένες φορτίσεις (Μοντέλα 9 και 10 για την φόρτιση 1005) φθάσουν την δύναμη διαρροής δεν παραλαμβάνουν επιπλέον δυνάμεις. Οι επιπλέον δυνάμεις παραλαμβάνονται από τα αμέσως επόμενα ελατήρια τα οποία παρουσιάζουν αύξηση της διατμητικής τους δύναμης σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη κατανομή διατμητικών ήλων.

5 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΗ ΓΕΦΥΡΑ

5.1 Εισαγωγή

Μετά την προσπάθεια προσομοίωσης διατμητικών ήλων στα μοντέλα συμμίκτων δοκών γέφυρας και οικοδομικού έργου, πραγματοποιήθηκε παρόμοια προσπάθεια σε ένα παράδειγμα σύμμικτης γέφυρας. Η διατομή της σύμμικτης δοκού οικοδομικού έργου περιγράφεται στην §1.2.3. Για την πληρότητα του κειμένου τα βασικά της χαρακτηριστικά επαναλαμβάνονται στην παρούσα παράγραφο και η τυπική διατομή της δίνεται στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Τυπική διατομή σύμμικτης γέφυρας

Η υπόψη γέφυρα αποτελείται από 6 σύμμικτες δοκούς ίδιες με αυτές που αναλύθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο. Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 24 m ενώ το πλάτος της 13,2 m. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πλάτος 13,2 m και πάχος 250 mm και επιλέχθηκε ποιότητα σκυροδέματος C 30/37. Για τις μεταλλικές διατομές επιλέχθηκε χάλυβας ποιότητας S 355. Το άνω πέλμα κάθε μεταλλικής διατομής έχει διαστάσεις 450 mm · 25 mm, το κάτω πέλμα 500 mm · 30 mm και ο κορμός 1.145 mm · 15 mm. Άνωθεν της πλάκας σκυροδέματος και σε πλάτος 9,50 m υφίστανται ασφαλτική στρώση πάχους 100 mm. Εκατέρωθεν της ασφαλτικής στρώσης υφίστανται πεζοδρόμια από σκυρόδεμα, μεταβλητού πάχους και με κλίση 4% προς το εσωτερικό της διατομής. Το ελάχιστο πάχος τους ανέρχεται σε 250 mm. Σε κάθε

πεζοδρόμιο εδράζεται προς την εξωτερική τους πλευρά κιγκλιδωμα πεζών και προς την εσωτερική τους πλευρά σύστημα αναχαίτισης οχημάτων.

Για την αξιολόγηση της υπόψη προσομοίωσης μορφώθηκαν τα παρακάτω δύο μοντέλα:

- Μοντέλο ενιαίας διατομής στο οποίο οι έξι σύμμικτες δοκοί εισάγονται ως ενιαίες διατομές πλάκας σκυροδέματος και σιδηροδοκού.
- Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων, στο οποίο η πλάκα σκυροδέματος και η σιδηροδοκός κάθε μίας σύμμικτης δοκού εισάγονται ως ξεχωριστά στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μη γραμμικά ελατήρια όπως ακριβώς στα προηγούμενα δύο παραδείγματα.

Για κάθε ένα από τα δύο αυτά μοντέλα εξετάστηκαν δύο παραλλαγές όσον αφορά την θέση της ονομαστικής λωρίδας Νο 1 των φορτίων κυκλοφορίας TS. Στην πρώτη παραλλαγή η λωρίδα κυκλοφορίας τοποθετείται στην άκρη ενώ στην δεύτερη κεντρικά.

Ως βασικά υλικά ορίστηκαν τα ίδια με το παράδειγμα σύμμικτης δοκού γέφυρας. Συγκεκριμένα ορίστηκαν ο δομικός χάλυβας S 355 και το σκυρόδεμα ποιότητας C 30/37, οι ιδιότητες των οποίων δίνονται στο Σχήμα 3-2 και στο Σχήμα 3-3 για τον δομικό χάλυβα και στο Σχήμα 3-4 και στο Σχήμα 3-5 για το σκυρόδεμα.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται η μόρφωση των προαναφερθέντων μοντέλων καθώς και ενδεικτικά αποτελέσματα από την ανάλυση τους. Στην τελευταία παράγραφο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

5.2 Μόρφωση προσομοιωμάτων

5.2.1 Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων

Οι κατηγορίες φορτίων που δημιουργήθηκαν είναι οι παρακάτω:

- Μόνιμο φορτίο (G_1 Self Weight) το οποίο περιλαμβάνει το ίδιο βάρος της πλάκας σκυροδέματος και των σιδηροδοκών. Το ίδιο βάρος του φορέα υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα.
- Πρόσθετο μόνιμο φορτίο (G_2 Superimposed) το οποίο περιλαμβάνει τα πρόσθετα μόνιμα φορτία των ασφαλτικών στρώσεων, των πεζοδρομίων, των κιγκλιδωμάτων και των στηθαίων ασφαλείας. Οι ασφαλικές στρώσεις επιβάλλουν ομοιόμορφο επιφανειακά κατανεμημένο φορτίο $0,10 \text{ m} \cdot 24 \text{ kN/m}^3 = 2,4 \text{ kN/m}^2$. Τα πεζοδρόμια επιβάλλουν ανομοιόμορφο (τραπεζοειδές) επιφανειακά κατανεμημένο φορτίο με τιμή $0,25 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 6,25 \text{ kN/m}^2$ στις εσωτερικές παρειές και $0,324 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 8,10 \text{ kN/m}^2$ στις εξωτερικές παρειές, όπου $0,324 \text{ m}$ το ύψος του πεζοδρομίου εξωτερικά. Τα κιγκλιδώματα και τα στηθαία ασφαλείας επιβάλλουν ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία στις θέσεις πάκτωσης τους με τιμή $0,5$ και 1 kN/m αντίστοιχα.
- Κινητό φορτίο πεζοδρομίων ($q_{fk,comb}$) το οποίο επιβάλλεται ομοιόμορφα κατανεμημένα στην επιφάνεια των πεζοδρομίων και ισούται με 3 kN/m^2 .
- Κινητά φορτία κυκλοφορίας σύμφωνα με την πρότυπη φόρτιση 1 (LM 1). Το πλάτος του καταστρώματος της γέφυρας είναι $9,50 \text{ m}$ το οποίο σημαίνει ότι θα έχουμε τρεις λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3 m η καθεμία και εναπομένουσα επιφάνεια $0,5 \text{ m}$. Η πρότυπη φόρτιση 1 περιλαμβάνει δύο επιμέρους φορτίσεις:
 - Διαξονικά συγκεντρωμένα φορτία TS μεγέθους $q_i \cdot Q_k$ ανά άξονα. Στο παράδειγμα μας επιλέχθηκε τα υπόψη φορτία να θεωρηθούν ομοιόμορφα κατανεμημένα εντός της επιφάνειας επαφής διαστάσεων $0,40 \text{ m} \cdot 0,40 \text{ m}$ λαμβάνοντας υπόψη τη διάχυση τους με γωνία 45° μέσω της ασφαλικής επίστρωσης και έως το μέσο της πλάκας σκυροδέματος. Η τελική επιφάνεια επιβολής είναι $0,85 \text{ m} \cdot 0,85 \text{ m}$ και αναφέρεται σε κάθε έναν τροχό. Σε κάθε μία τέτοια

επιφάνεια επιβάλλεται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που αντιστοιχεί στο μισό του φορτίου άξονα Q_{ik} . Τα κέντρα των παραπάνω επιφανειών απέχουν 1,20 m στην διαμήκη διεύθυνση και 2,00 m στην εγκάρσια για κάθε όχημα. Κατά την εγκάρσια διεύθυνση τοποθετούνται κεντρικά σε κάθε μία από τις τρεις λωρίδες κυκλοφορίας. Κατά την διαμήκη διεύθυνση επιλέχθηκε να τοποθετηθούν σε 10 χαρακτηριστικές θέσεις. Σε κάθε τέτοια φόρτιση μετά τον δείκτη TS δίνεται η απόσταση του μέσου του οχήματος από την αρχή της γέφυρας. Για παράδειγμα η φόρτιση TS 1.5 αναφέρεται στην τοποθέτηση του οχήματος κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μέση του οχήματος να απέχει 1,5 m από την αρχή της γέφυρας. Ο συντελεστής a_{qi} ελήφθη ίσος με την μονάδα.

- Ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία UDL, μεγέθους $a_{qi} \cdot q_k$. Ο συντελεστής a_{qi} ελήφθη ίσος με την μονάδα.

Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τις τιμές φορτίων κυκλοφορίας σύμφωνα με την πρότυπη φόρτιση 1. Οι τιμές των φορτίων άξονα Q_{ik} έχουν αναχθεί στις επιφάνειες επιβολής.

Πίνακας 5-1: Τιμές φορτίων κυκλοφορίας σύμφωνα με την πρότυπη φόρτιση 1

A/A	Θέση	Σύστημα TS	Σύστημα UDL
		Φορτία τροχού Q_{ik} [kN/m ²]	Q_{ik} [kN/m ²]
1	Λωρίδα αριθμός 1	207,6	9
2	Λωρίδα αριθμός 2	138,4	2,5
3	Λωρίδα αριθμός 3	69,2	2,5
4	Απομένουσα επιφάνεια	0	2,5

– Τυχηματική δράση πρόσκρουσης οχήματος σε στηθαίο ασφαλείας. Θεωρήθηκε στηθαίο ασφαλείας κατηγορίας A το οποίο αντιστοιχεί σε οριζόντια δύναμη 100 kN. Η δράση αυτή ελήφθη να ενεργεί στο δυσμενέστερο σημείο το οποίο είναι το μέσο της γέφυρας στην κατά την διαμήκη διεύθυνση. Η δράση αυτή περιλαμβάνει δύο επιμέρους φορτίσεις:

- Οριζόντια δύναμη 100 kN η οποία εφαρμόζεται σε μήκος 50 cm και σε απόσταση 1,0 m από την επιφάνεια της ασφαλικής στρώσης. Η δύναμη αυτή μεταφέρεται στο μέσο του πάχους της πλάκας σκυροδέματος, το οποίο απέχει απόσταση 1,225 m από το ύψος επιβολής της, και προκύπτει ένα ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο 200 kN/m (=100 kN/0,5 m) και ως μία ομοιόμορφα κατανεμημένη ροπή 245 kNm/m (=200kN/m · 1,225 m). Η παραπάνω φόρτιση συμβολίζεται ως H_{acc} .
- Διαξονικά κατακόρυφα συγκεντρωμένα φορτία TS μεγέθους $0,75 \cdot a_{qi} \cdot Q_{1k}$ ανά άξονα. Και σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται τα παραπάνω φορτία να δρουν ως ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία σε επιφάνεια 0,85 m·0,85 m. Ο συντελεστής a_{qi} ελήφθη ίσος με την μονάδα ενώ η δύναμη Q_{1k} είναι 150 kN σε κάθε τροχό. Το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που προκύπτει για κάθε έναν τροχό είναι 155,7 kN/m². Το όχημα τοποθετείται κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε τέτοια θέση ώστε να εφάπτεται του στηθαίου ασφαλείας ενώ κατά την διαμήκη διεύθυνση σε θέση ώστε το μέσο του να βρίσκεται στο μέσο της γέφυρας. Η παραπάνω φόρτιση συμβολίζεται ως TS 12.0 acc.

– Σεισμική φόρτιση. Η γέφυρα αναλύθηκε με το ελαστικό φάσμα απόκρισης για ζώνη επικινδυνότητας Z3 ($a_{gR} = 0,36 \cdot g$), κατηγορία σπουδαιότητας II ($\gamma_I = 1,0$) και κατηγορία εδάφους A. Ο συνδυασμός των ιδιομορφών έγινε με την μέθοδο CQC ενώ ο συνδυασμός των σεισμικών συνιστωσών στις διευθύνσεις x και y με την μέθοδο SRSS. Η σεισμική φόρτιση συνδυάζεται μόνο με τα μόνιμα και τα πρόσθετα μόνιμα φορτία τα οποία για το σεισμικό συνδυασμό έχουν συντελεστή $\gamma = 1$.

Εκτός από τις 17 μεμονωμένες φορτίσεις που δημιουργήθηκαν για κάθε ένα φορτίο, προέκυψαν και 21 συνδυασμοί φορτίσεων. Από τους συνδυασμούς αυτούς οι δέκα αναφέρονται στην Οριακή Κατάσταση

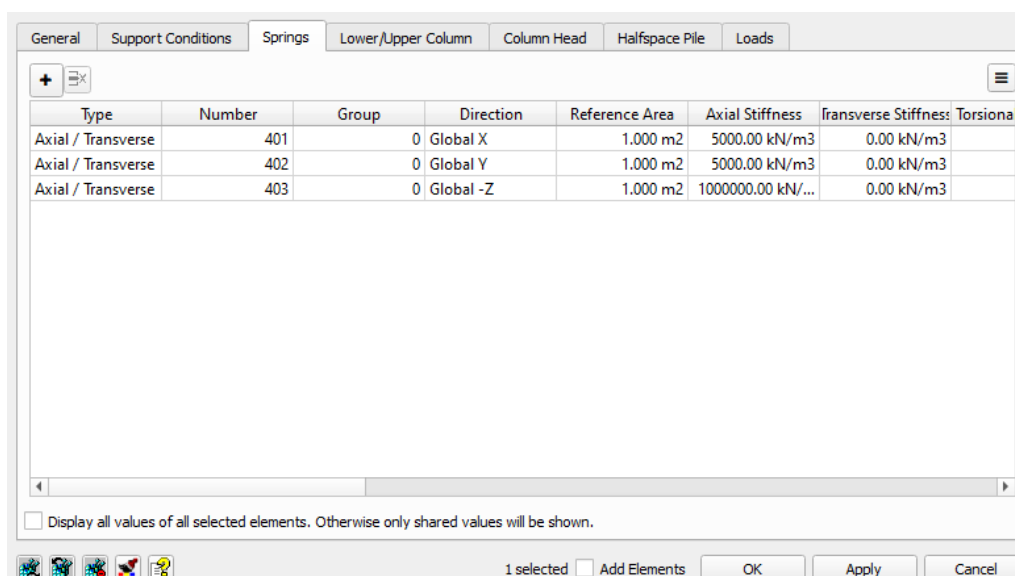
Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), οι επόμενοι δέκα αναφέρονται στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και ο τελευταίος είναι τυχηματικός συνδυασμός. Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τους συνδυασμούς φορτίσεων που δημιουργήθηκαν.

Πίνακας 5-2: Συνδυασμοί φορτίσεων

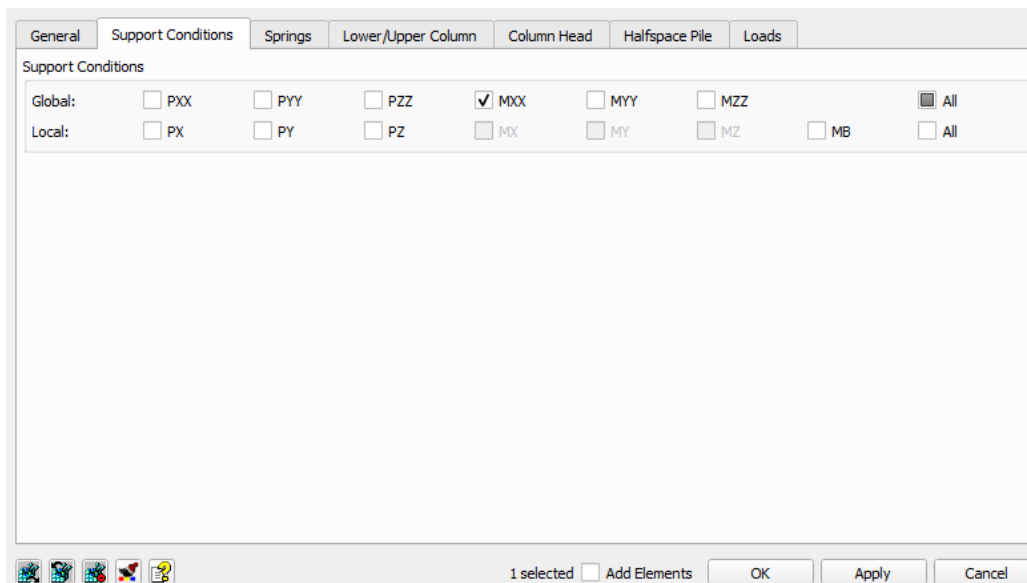
A/A	Αριθμός φόρτισης	Ονομασία φόρτισης
1	1015	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1
2	1016	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5
3	1017	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0
4	1018	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5
5	1019	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0
6	1020	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5
7	1021	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0
8	1022	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5
9	1023	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0
10	1024	G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0
11	1025	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1)
12	1026	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5)
13	1027	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0)
14	1028	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5)
15	1029	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0)
16	1030	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5)
17	1031	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0)
18	1032	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5)
19	1033	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0)
20	1034	1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0)
21	1037	G 1+G 2+1,25(H _{acc} +TS 12.0 acc)

5.2.2 Στηριξεις φορέα

Θεωρήθηκε ότι η γέφυρα εδράζεται επί ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Η προσομοίωση των εφεδράνων γίνεται με εισαγωγή στηριξεων στα δύο άκρα κάθε σύμμικτης δοκού στις οποίες δεν δεσμεύονται οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας αλλά τοποθετούνται ελατήρια με δυσκαμψία 5.000 kN/m στις διευθύνσεις x και y και 1.000.000 kN/m στην διεύθυνση -z. Στο ένα άκρο κάθε σύμμικτης δοκού δεσμεύεται και η στροφή περί τον άξονα x προκειμένου να αποφευχθεί η εκτός επιπέδου στρέψη της. Στο Σχήμα 5-2 δίνονται οι ιδιότητες των ελατηρίων που τοποθετήθηκαν στις στηριξεις και στο Σχήμα 5-3 η δέσμευση της στροφής περί τον άξονα x.



Σχήμα 5-2: Ιδιότητες ελατηρίων στις στηριξεις



Σχήμα 5-3: Δέσμευση στροφής περί τον άξονα x

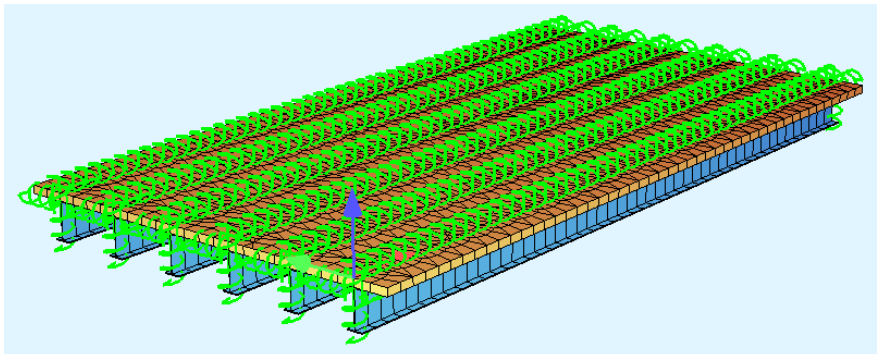
5.2.3 Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων

Για την μόρφωση του υπόψη μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η σύμμικτη δοκός του μοντέλου 16 όπως αυτό αναλύθηκε στο παράδειγμα της σύμμικτης δοκού γέφυρας στο 3^ο κεφάλαιο. Στην υπόψη δοκό προσομοιώνονται με μη γραμμικά ελατήρια διατμητικοί ήλοι 2Φ19/150 στα ακραία τρίτα του μήκους της και 2Φ19/300 στο μεσαίο τρίτο του μήκους της (ελαστοπλαστική κατανομή ήλων). Οι διατμητικοί ήλοι είναι κατηγορίας S 235 J2 + C 450 με $f_y = 350 \text{ MPa}$ και $f_u = 450 \text{ MPa}$ και έχουν ύψος $h = 200 \text{ mm}$. Τα μη γραμμικά ελατήρια έχουν μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας (125 mm). Στην διαμήκη διεύθυνση τους έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με πάρα πολύ μεγάλη δυσκαμψία ($100 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$). Στην εγκάρσια διεύθυνση τους συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά με δυσκαμψία $k_{\text{spring},1} = 2.482.985,75 \text{ kN/m}$ στα ακραία τρίτα και $k_{\text{spring},2} = 1.241.492,86 \text{ kN/m}$ στο μεσαίο τρίτο της δοκού και όριο διαρροής $P_{y,\text{sprin},1} = 544,4 \text{ kN}$ στα ακραία τρίτα και $P_{y,\text{sprin},2} = 272,2 \text{ kN}$ στο μεσαίο τρίτο αντίστοιχα.

Για να δημιουργηθεί ο φορέας της γέφυρας αντιγράφεται η υπόψη σύμμικτη δοκός 5 φορές και σε αποστάσεις 2,2 m, 4,4 m, 6,6 m, 8,8 m και 11,0 m αφού πρώτα τροποποιηθούν οι στηρίξεις σύμφωνα με τα αναγραφόμενα στην §5.2.2. Η ύπαρξη κοινών κόμβων στα άκρα των πεπερασμένων στοιχείων των πλακών σκυροδέματος εξασφαλίζει την σύνδεση των πλακών μεταξύ τους. Έτσι καθίσταται δυνατή και η εισαγωγή όλων των επιφανειακών φορτίων στις πραγματικές επιφάνειες εφαρμογής τους. Οι μεμονωμένες φορτίσεις πλην της σεισμικής, οι συνδυασμοί φορτίσεων καθώς και η μη γραμμική ανάλυση του φορέα εκτελούνται με κατάλληλο κώδικα ο οποίος συντάχθηκε σε περιβάλλον text editor του SSD του SOFiSTiK 2020. Η σεισμική φόρτιση εκτελείται με την εργασία Earthquake του προγράμματος.

Για το μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων δημιουργήθηκαν δύο παραλλαγές. Στην πρώτη η λωρίδα κυκλοφορίας No 1 τοποθετήθηκε στο άκρο των ασφαλτικών στρώσεων ακολουθούμενη κατά σειρά από τις λωρίδες κυκλοφορίες No 2 και No 3 ενώ στην δεύτερη τοποθετήθηκε στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων με τις λωρίδες No 2 και No 3 εκατέρωθεν της.

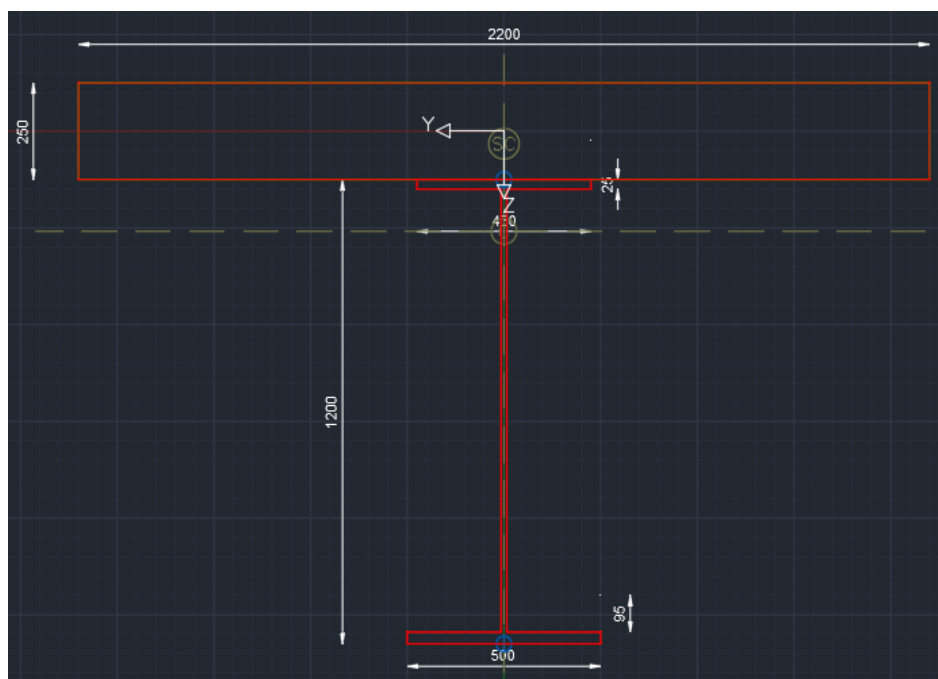
Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται μια 3D απεικόνιση του μοντέλου γέφυρας με μη γραμμικά ελατήρια.



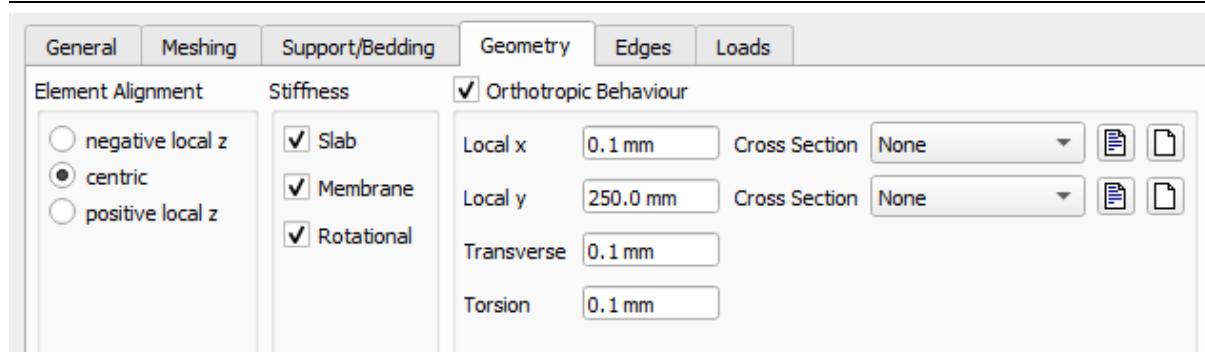
Σχήμα 5-4: 3D απεικόνιση μοντέλου γέφυρας με μη γραμμικά ελατήρια στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

5.2.4 Μοντέλο ενιαίας διατομής

Από το προηγούμενο μοντέλο διαγράφονται τα μη γραμμικά ελατήρια και τροποποιείται η διατομή της σιδηροδοκού εισάγοντας στην άνω ίνα της την διατομή της πλάκας σκυροδέματος με πλάτος 2.200 mm, πάχος 250 mm και υλικό σκυρόδεμα C 30/37. Η σύμμικτη διατομή μετακινείται ώστε να έχει ως σημείο εισαγωγής (αρχή του τοπικού συστήματος αξόνων γOz της διατομής) το μέσο της πλάκας σκυροδέματος. Στο Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται η ενιαία διατομή όπως εισήχθη στο πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών SOFiSTiK 2020. Προκειμένου οι σύμμικτες δοκοί να τοποθετηθούν στη σωστή τους θέση, μετακινούνται κατά $-0,125$ m κατά τον καθολικό άξονα z. Εισάγοντας στον φορέα μας τις σύμμικτες δοκούς ως ενιαίες διατομές παύουν να υπάρχουν επιφανειακά στοιχεία ικανά να παραλάβουν τόσο τις επιφανειακές φορτίσεις όσο και τις γραμμικές που δεν εφαρμόζονται ακριβώς άνωθεν των γραμμικών στοιχείων των συμμικτων δοκών. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η παραλαβή και διανομή όλων των φορτίων στις σύμμικτες δοκούς δεν διαγράφονται τα επιφανειακά στοιχεία πλάκας αλλά τροποποιούνται ώστε να παρουσιάζουν ορθότροπη συμπεριφορά. Έτσι ορίζεται στην εγκάρσια διεύθυνση τους (τοπικός άξονας γ) να έχουν το πάχος της πλάκας σκυροδέματος, ώστε να μεταφέρουν τα φορτία από τις επιφάνειες εφαρμογής τους στις σύμμικτες δοκούς, ενώ στις υπόλοιπες διευθύνσεις δίνεται ένα πάρα πολύ μικρό πάχος (πρακτικά μηδενικό) ώστε να παραμένουν ανενεργά. Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις ορθότροπης συμπεριφοράς των επιφανειακών στοιχείων πλάκας σκυροδέματος.



Σχήμα 5-5: Ενιαία διατομή σύμμικτης δοκού γέφυρας στο πρόγραμμα SOFiSTiK 2020

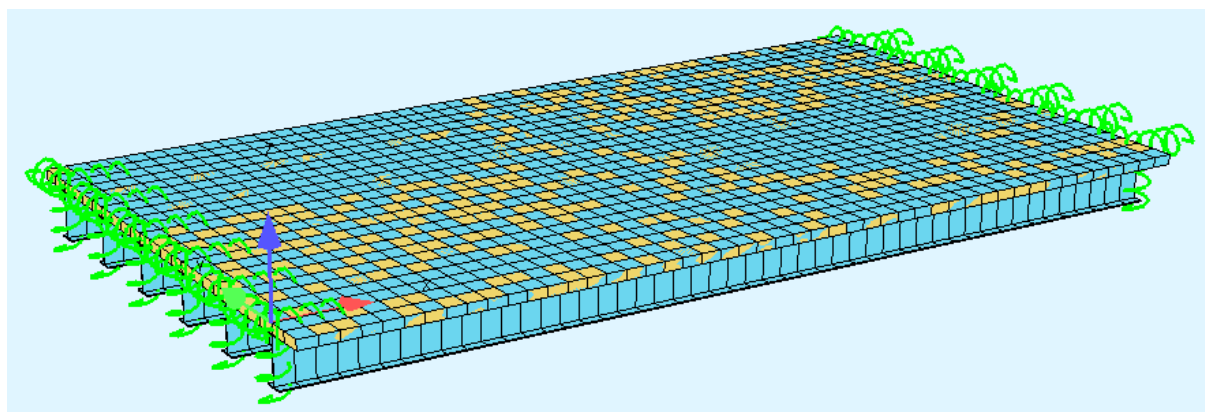


Σχήμα 5-6: Ρυθμίσεις ορθότροπης συμπεριφοράς επιφανειακών στοιχείων πλάκας σκυροδέματος

Ο φορέας θα αναλυθεί με την γραμμική – ελαστική μέθοδο. Η γραμμική ανάλυση του φορέα, οι συνδυασμοί φορτίσεων, η ανάλυση των συνδυασμών και η σεισμική φόρτιση εκτελούνται εισάγοντας τις αντίστοιχες διεργασίες στο SSD του SOFISTIK 2020.

Και σε αυτό το μοντέλο δημιουργούνται δύο παραλλαγές όσον αφορά τις θέσεις των λωρίδων κυκλοφορίας κατ' αντιστοιχία με το μοντέλο των μη γραμμικών ελατηρίων.

Στο Σχήμα 5-7 παρουσιάζεται σε 3D απεικόνιση το μοντέλο γέφυρας με ενιαία διατομή.



Σχήμα 5-7: 3D απεικόνιση μοντέλου γέφυρας με ενιαία διατομή στο πρόγραμμα SOFISTIK 2020

5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα της ανάλυσης των μοντέλων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης γέφυρας, οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνας των σιδηροδοκών και οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις των ελατηρίων για κάθε μοντέλο. Επιπροσθέτως θα παρουσιαστούν οι κατανομές των διατμητικών δυνάμεων των ελατηρίων τόσο στην διαμήκη διεύθυνση της γέφυρας όσο και στην εγκάρσια για τον τυχηματικό και τον σεισμικό συνδυασμό φόρτισης στο μοντέλο των μη γραμμικών ελατηρίων. Για την ευχερέστερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει την αντιστοιχία του ονόματος κάθε μοντέλου με την περιγραφή του.

Πίνακας 5-3: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης γέφυρας που αναλύθηκαν

A/A	Μοντέλο	Περιγραφή
1	Μοντέλο 1	Μοντέλο ενιαίας διατομής – Λωρίδα κυκλοφορίας Νο 1 στο άκρο
2	Μοντέλο 2	Μοντέλο ενιαίας διατομής – Λωρίδα κυκλοφορίας Νο 1 στο μέσο
3	Μοντέλο 3	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων – Λωρίδα κυκλοφορίας Νο 1 στο άκρο
4	Μοντέλο 4	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων – Λωρίδα κυκλοφορίας Νο 1 στο μέσο

5.3.1 Μέγιστα βέλη σύμμικτης γέφυρας

Ο Πίνακας 5-4 και ο Πίνακας 5-5 παρουσιάζουν τα μέγιστα βέλη σε mm της σύμμικτης γέφυρας. Για τα μοντέλα 3 και 4 με μη γραμμικά ελατήρια δίνεται και η % διαφορά των μέγιστων βελών ως προς τα αντίστοιχα των μοντέλων 1 και 2, σύμφωνα με την εξ. (5-1). Επίσης δίνονται η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή των εν λόγω διαφορών για κάθε μοντέλο.

$$\Delta\delta_{ij} (\%) = \frac{\delta_j - \delta_i}{\delta_j} \cdot 100 \quad (5-1)$$

όπου:

$\Delta\delta_{ij}$ = % μεταβολή του μέγιστου βέλους του μοντέλου i ως προς το μοντέλο j,

δ_j = μέγιστο βέλος μοντέλου j (j= 1 ή 2) και

δ_i = μέγιστο βέλος μοντέλου i (i = 3 ή 4).

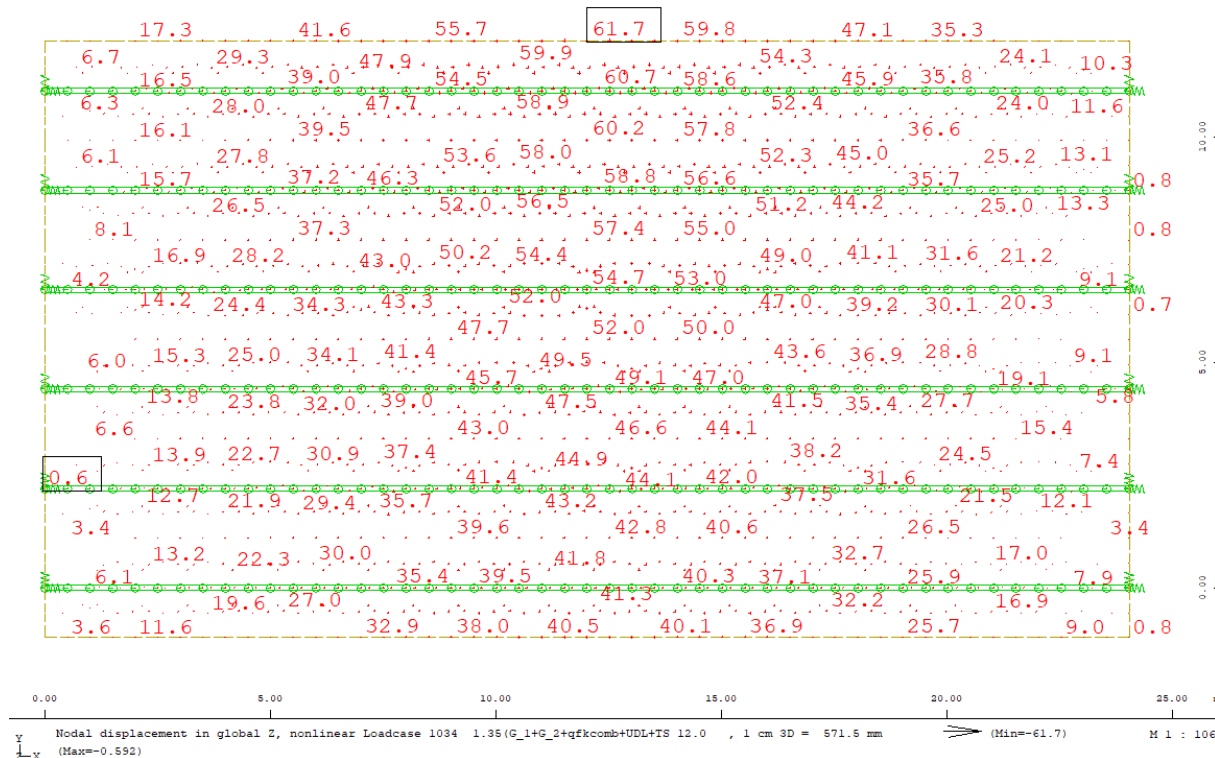
Πίνακας 5-4: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 1 και 2

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2
1	1001 G_1 Self Weight	13,7	13,7
2	1002 G_2 Superimposed	10,4	10,4
3	1003 $q_{fk,comb}$	3,3	3,3
4	1004 UDL	8,2	8,4
5	1005 TS 1.1	5,6	4,4
6	1006 TS 1.5	6,3	5,2
7	1007 TS 2.0	7,0	5,8
8	1008 TS 2.5	7,8	6,5
9	1009 TS 3.0	8,6	7,3
10	1010 TS 3.5	9,4	8,2
11	1011 TS 4.0	10,3	9,0
12	1012 TS 4.5	11,2	9,9
13	1013 TS 8.0	16,8	15,3
14	1014 TS 12.0	19,3	17,7
15	1015 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.1	35,5	30,6
16	1016 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.5	36,0	31,0
17	1017 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.0	36,7	31,4
18	1018 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.5	37,3	31,9
19	1019 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.0	37,9	32,3
20	1020 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.5	38,5	33,1
21	1021 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.0	39,1	33,9
22	1022 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.5	39,7	34,7
23	1023 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 8.0	42,8	39,7
24	1024 G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 12.0	47,8	44,6
25	1025 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.1)	47,9	41,3
26	1026 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.5)	48,6	41,8
27	1027 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.0)	49,5	42,4
28	1028 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.5)	50,4	43,0
29	1029 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.0)	51,2	43,6
30	1030 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.5)	52,0	44,6
31	1031 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.0)	52,8	45,7
32	1032 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.5)	53,5	46,8
33	1033 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 8.0)	57,7	53,6
34	1034 1,35(G_1+G_2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 12.0)	64,6	60,2
35	1035 H_{acc}	1,74	1,74
36	1036 TS 12.0 acc	11,2	11,2
37	1037 G_1+G_2+1,25(H_{acc} +TS 12.0 acc)	37,1	37,1

Πίνακας 5-5: Μέγιστα βέλη (σε mm) της σύμμικτης γέφυρας και μεταβολή τους ως προς τα μοντέλα 1 και 2 για τα μοντέλα 3 και 4

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 3		Μοντέλο 4	
		Τιμή	Δδ ₃₁	Τιμή	Δδ ₄₂
1	1001 G 1 Self Weight	14,1	-2,92%	14,1	-2,92%
2	1002 G 2 Superimposed	10,2	1,92%	10,2	1,92%
3	1003 q _{fk,comb}	3,1	4,56%	3,1	4,56%
4	1004 UDL	7,9	3,41%	7,8	7,03%
5	1005 TS 1.1	2,2	61,22%	2,2	51,02%
6	1006 TS 1.5	2,9	54,75%	2,9	44,68%
7	1007 TS 2.0	3,7	46,49%	3,7	35,97%
8	1008 TS 2.5	4,6	40,65%	4,6	29,86%
9	1009 TS 3.0	5,4	36,45%	5,4	25,96%
10	1010 TS 3.5	6,3	33,55%	6,2	23,44%
11	1011 TS 4.0	7,1	31,46%	7,0	21,89%
12	1012 TS 4.5	7,8	30,00%	7,8	20,95%
13	1013 TS 8.0	12,4	26,19%	12,2	20,26%
14	1014 TS 12.0	14,6	24,35%	14,3	19,21%
15	1015 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1	36,2	-1,97%	31,3	-2,29%
16	1016 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5	36,8	-2,22%	31,7	-2,26%
17	1017 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0	37,5	-2,18%	32,3	-2,87%
18	1018 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5	38,2	-2,41%	32,8	-2,82%
19	1019 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0	38,9	-2,64%	33,3	-3,10%
20	1020 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5	39,5	-2,60%	33,8	-2,11%
21	1021 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0	40,2	-2,81%	34,2	-0,88%
22	1022 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5	40,8	-2,77%	34,7	0,00%
23	1023 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0	44,3	-3,50%	38,9	2,02%
24	1024 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0	45,7	4,39%	41,4	7,17%
25	1025 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1)	48,9	-2,09%	42,3	-2,42%
26	1026 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5)	49,6	-2,06%	42,8	-2,39%
27	1027 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0)	50,6	-2,22%	43,5	-2,59%
28	1028 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5)	51,6	-2,38%	44,2	-2,79%
29	1029 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0)	52,5	-2,54%	44,9	-2,98%
30	1030 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5)	53,4	-2,69%	45,6	-2,24%
31	1031 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0)	54,3	-2,84%	46,2	-1,09%
32	1032 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5)	55,1	-2,99%	46,9	-0,21%
33	1033 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0)	59,8	-3,64%	52,6	1,87%
34	1034 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0)	61,7	4,49%	55,8	7,31%
35	1035 H _{acc}	1,45	16,67%	1,45	16,67%
36	1036 TS 12.0 acc	9,05	19,20%	9,05	19,20%
37	1037 G 1+G 2+1,25(H _{acc} +TS 12.0 acc)	37,4	-0,81%	37,4	-0,81%
Μέση τιμή των Δδ _{ij}		-	9,2%	-	7,9%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των Δδ _{ij}		-	61,2%	-	51,0%

Στο Σχήμα 5-8 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα βέλη της σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1034.



Σχήμα 5-8: Βέλη σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1034

5.3.2 Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκών σύμμικτης γέφυρας

Ο Πίνακας 5-6 και ο Πίνακας 5-7 παρουσιάζουν τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις σε ΜΡα της κάτω ίνας των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας. Για τα μοντέλα 3 και 4 με μη γραμμικά ελατήρια δίνεται και η % διαφορά των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων ως προς τις αντίστοιχες των μοντέλων 1 και 2, σύμφωνα με την εξ. (5-2). Επίσης δίνονται η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή των εν λόγω διαφορών για κάθε μοντέλο.

$$\Delta\sigma_{ij} (\%) = \frac{\sigma_j - \sigma_i}{\sigma_j} \cdot 100 \quad (5-2)$$

όπου:

$\Delta\sigma_{ij}$ = % μεταβολή μέγιστης εφελκυστικής τάσης κάτω ίνας σιδηροδοκών του μοντέλου i ως προς το μοντέλο j ,

σ_j = μέγιστη εφελκυστική τάση κάτω ίνας σιδηροδοκών μοντέλου j ($j = 1$ ή 2) και

σ_i = μέγιστη εφελκυστική τάση κάτω ίνας σιδηροδοκών μοντέλου i ($i = 3$ ή 4).

Πίνακας 5-6: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε ΜΡα) της κάτω ίνας των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 1 και 2

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2
1	1001 G 1 Self Weight	46,6	46,6
2	1002 G 2 Superimposed	30,8	30,8
3	1003 $q_{fk,comb}$	8,8	8,8
4	1004 UDL	27,8	27,5
5	1005 TS 1.1	12,5	14,0
6	1006 TS 1.5	16,6	18,5
7	1007 TS 2.0	21,3	23,7
8	1008 TS 2.5	25,7	28,5
9	1009 TS 3.0	29,9	33,0

Πίνακας 5-6 (συνέχεια)

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2
10	1010 TS 3.5	33,7	37,0
11	1011 TS 4.0	37,3	40,7
12	1012 TS 4.5	40,5	44,0
13	1013 TS 8.0	55,7	59,2
14	1014 TS 12.0	61,1	64,6
15	1015 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1	116,1	102,0
16	1016 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5	117,9	103,4
17	1017 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0	120,2	105,2
18	1018 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5	122,5	107,0
19	1019 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0	124,8	108,8
20	1020 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5	127,1	111,0
21	1021 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0	129,3	114,1
22	1022 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5	131,5	117,4
23	1023 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0	148,0	144,3
24	1024 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0	161,2	157,0
25	1025 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1)	156,7	137,7
26	1026 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5)	159,1	139,6
27	1027 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0)	162,3	142,1
28	1028 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5)	165,4	144,5
29	1029 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0)	168,5	146,9
30	1030 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5)	171,6	149,8
31	1031 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0)	174,6	154,1
32	1032 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5)	177,6	158,5
33	1033 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0)	199,8	194,8
34	1034 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0)	217,6	212,0
35	1035 H _{acc}	3,6	3,6
36	1036 TS 12.0 acc	34,4	34,4
37	1037 G 1+G 2+1,25(H _{acc} +TS 12.0 acc)	124,2	124,2

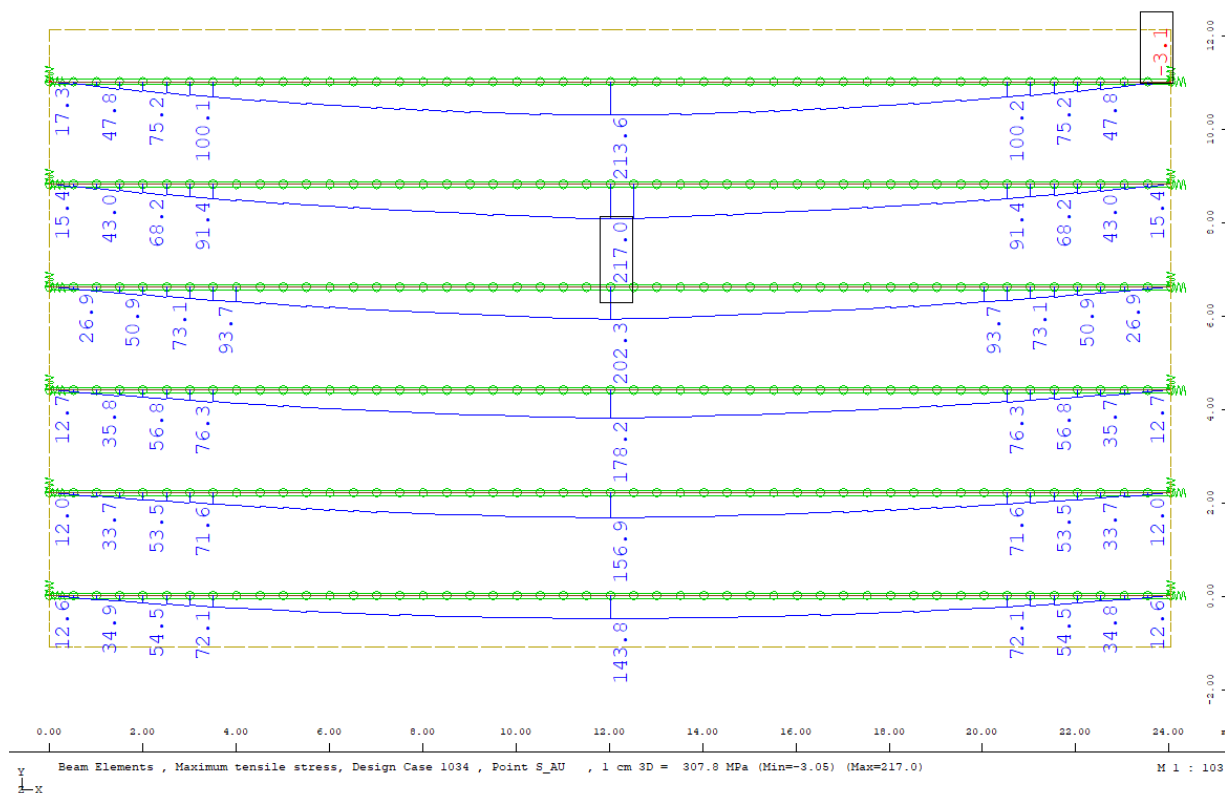
Πίνακας 5-7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (σε MPa) της κάτω ίνας των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας και μεταβολή τους ως προς τα μοντέλα 1 και 2 για τα μοντέλα 3 και 4

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 3		Μοντέλο 4	
		Τιμή	Δσ ₃₁	Τιμή	Δσ ₄₂
1	1001 G 1 Self Weight	47,4	-1,72%	47,4	-1,76%
2	1002 G 2 Superimposed	31,0	-0,65%	31,0	-0,65%
3	1003 q _{fk,comb}	8,8	0,11%	8,8	0,11%
4	1004 UDL	26,9	3,24%	26,5	3,64%
5	1005 TS 1.1	13,0	-4,00%	14,0	0,00%
6	1006 TS 1.5	16,9	-1,81%	18,3	1,08%
7	1007 TS 2.0	21,4	-0,47%	23,3	1,69%
8	1008 TS 2.5	25,6	0,39%	28,0	1,75%
9	1009 TS 3.0	29,7	0,67%	32,2	2,42%
10	1010 TS 3.5	33,4	0,89%	36,1	2,43%
11	1011 TS 4.0	36,8	1,34%	39,5	2,95%
12	1012 TS 4.5	39,9	1,48%	42,7	2,95%
13	1013 TS 8.0	54,7	1,80%	57,6	2,70%
14	1014 TS 12.0	60,8	0,49%	63,1	2,32%
15	1015 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1	117,9	-1,55%	103,9	-1,86%
16	1016 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5	119,9	-1,70%	105,4	-1,93%
17	1017 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0	122,2	-1,66%	107,3	-2,00%
18	1018 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5	124,6	-1,71%	109,2	-2,06%
19	1019 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0	127,0	-1,76%	111,1	-2,11%
20	1020 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5	129,3	-1,73%	112,9	-1,71%
21	1021 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0	131,7	-1,86%	114,7	-0,53%
22	1022 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5	133,9	-1,83%	116,5	0,77%
23	1023 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0	148,6	-0,41%	141,4	2,01%

Πίνακας 5-7 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 3		Μοντέλο 4	
		Τιμή	$\Delta\sigma_{31}$	Τιμή	$\Delta\sigma_{42}$
24	1024 G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0	160,7	0,31%	154,4	1,66%
25	1025 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.1)	159,2	-1,60%	140,2	-1,82%
26	1026 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 1.5)	161,8	-1,70%	142,3	-1,93%
27	1027 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.0)	165,0	-1,66%	144,9	-1,97%
28	1028 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 2.5)	168,2	-1,69%	147,4	-2,01%
29	1029 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.0)	171,4	-1,72%	150,0	-2,11%
30	1030 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 3.5)	174,6	-1,75%	152,5	-1,80%
31	1031 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.0)	177,7	-1,78%	154,9	-0,52%
32	1032 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 4.5)	180,8	-1,80%	157,3	0,76%
33	1033 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 8.0)	200,6	-0,40%	190,9	2,00%
34	1034 1,35(G 1+G 2+q _{fk,comb} +UDL+TS 12.0)	217,0	0,28%	208,5	1,65%
35	1035 H _{acc}	5,34	-47,92%	5,34	-47,92%
36	1036 TS 12.0 acc	34,4	0,00%	34,4	0,00%
37	1037 G 1+G 2+1,25(H _{acc} +TS 12.0 acc)	128,1	-3,14%	128,1	-3,14%
Μέση τιμή των $\Delta\sigma_i$		-	-2,1%	-	-1,2%
Μέγιστη απόλυτη τιμή των $\Delta\sigma_i$		-	47,9%	-	47,9%

Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνας των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1034.



Σχήμα 5-9: Εφελκυστικές τάσεις κάτω ίνας σιδηροδοκών σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1034

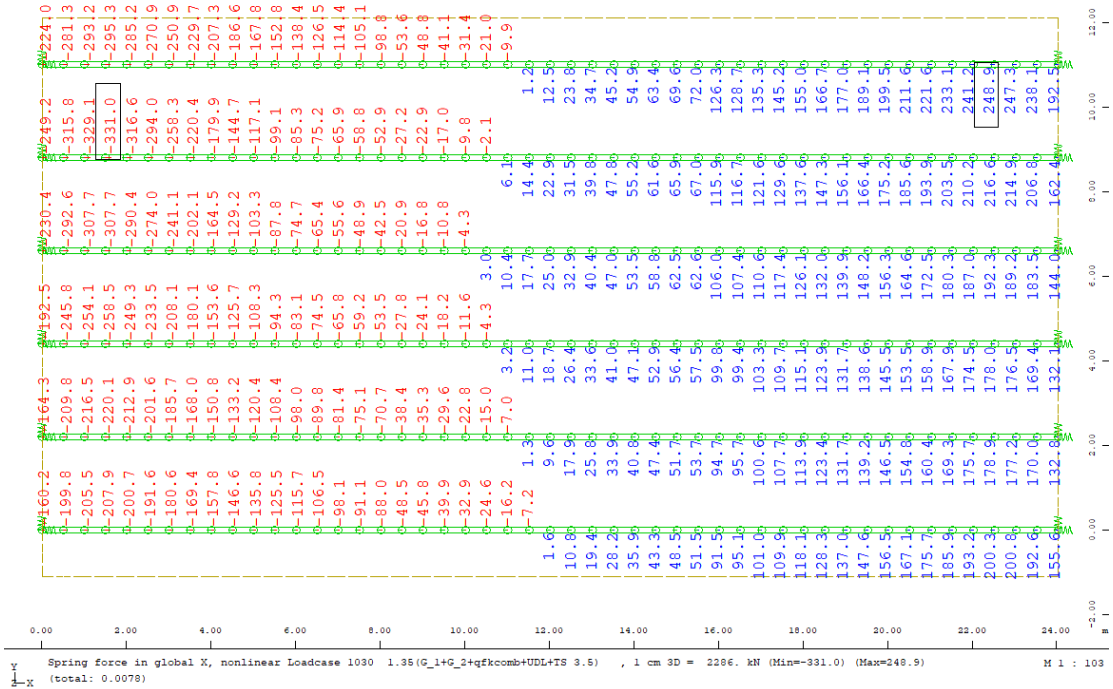
5.3.3 Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης γέφυρας

Ο Πίνακας 5-8 παρουσιάζει τις μέγιστες διατμητικές δυνάμεις σε kN των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 3 και 4.

Πίνακας 5-8: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για τα μοντέλα 3 και 4

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 3		Μοντέλο 4	
		Τιμή	$P_{y,spr}$	Τιμή	$P_{y,spr}$
1	1001 G 1 Self Weight	70,7	544,	70,7	544,4
2	1002 G 2 Superimposed	49,8		49,8	
3	1003 $q_{fk,comb}$	14,9		14,9	
4	1004 UDL	43,3		42,9	
5	1005 TS 1.1	66,4		70,7	
6	1006 TS 1.5	81,5		89,7	
7	1007 TS 2.0	92,5		100,4	
8	1008 TS 2.5	96,2		103,9	
9	1009 TS 3.0	98,4		105,8	
10	1010 TS 3.5	97,9		106,5	
11	1011 TS 4.0	97,5		105,3	
12	1012 TS 4.5	95,3		102,4	
13	1013 TS 8.0	76,7		82,1	
14	1014 TS 12.0	72,4		77,1	
15	1015 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.1	207,3		201,5	
16	1016 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.5	222,9		220,3	
17	1017 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.0	233,7		230,8	
18	1018 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.5	242,0		237,2	
19	1019 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.0	244,9		239,4	
20	1020 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.5	245,2		241,5	
21	1021 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.0	244,9		240,3	
22	1022 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.5	241,9		237,4	
23	1023 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 8.0	222,9		209,8	
24	1024 G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 12.0	215,5		185,9	
25	1025 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.1)	279,4		271,6	
26	1026 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 1.5)	300,3		296,9	
27	1027 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.0)	314,8		310,9	
28	1028 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 2.5)	326,5		320,0	
29	1029 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.0)	330,3		323,0	
30	1030 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 3.5)	331,0		326,0	
31	1031 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.0)	329,9		324,3	
32	1032 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 4.5)	326,4		320,3	
33	1033 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 8.0)	300,7		283,2	
34	1034 1,35(G 1+G 2+ $q_{fk,comb}$ +UDL+TS 12.0)	290,8		250,8	
35	1035 H_{acc}	7,52		7,52	
36	1036 TS 12.0 acc	42,4		42,4	
37	1037 G 1+G 2+1,25(H_{acc} +TS 12.0 acc)	194,6		194,6	

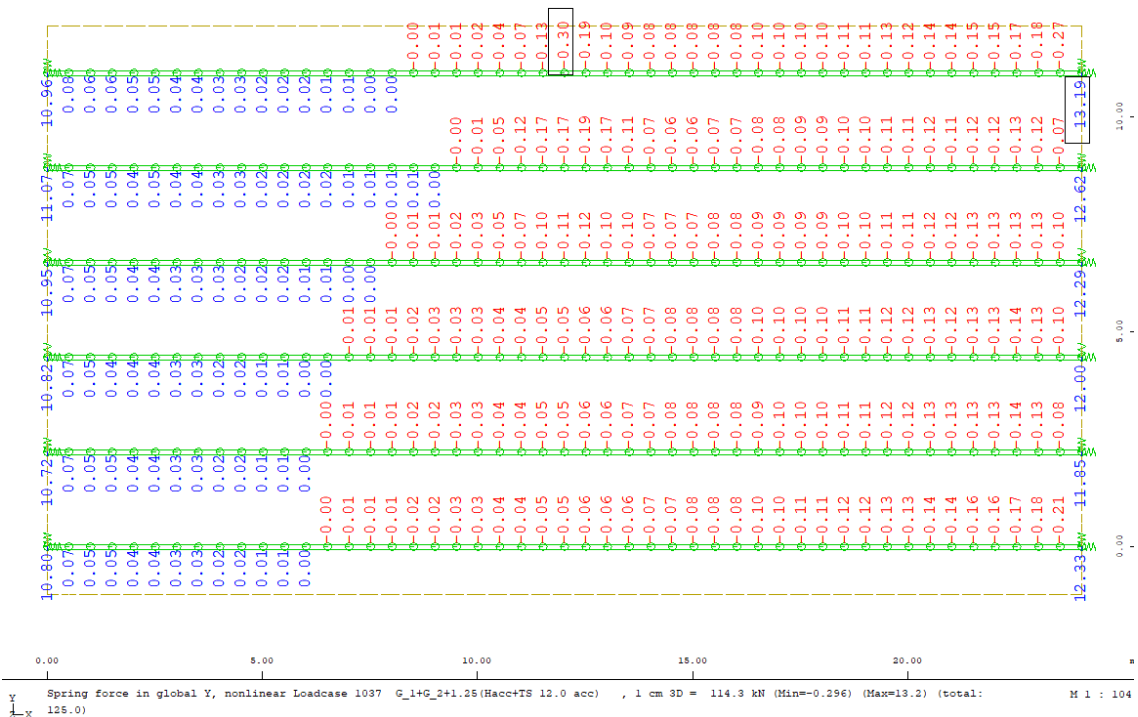
Στο Σχήμα 5-10 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης δοκού γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1030.



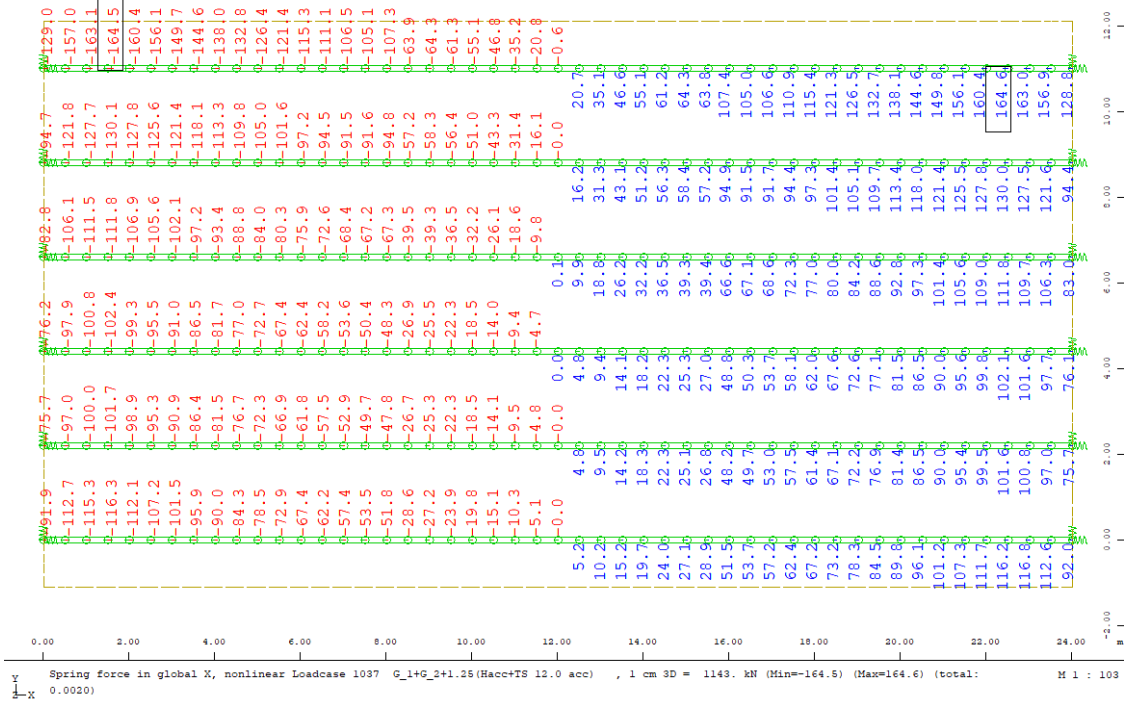
Σχήμα 5-10: Διατμητικές δυνάμεις μη γραμμικών ελατηρίων σύμμικτης γέφυρας για το μοντέλο 3 και την φόρτιση 1030

5.3.4 Διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για τον τυχηματικό συνδυασμό

Στο Σχήμα 5-11 παρουσιάζεται η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση y για τον τυχηματικό συνδυασμό 1037 G₁+G₂+1,25(H_{acc}+TS 12.0 acc) και στο Σχήμα 5-12 η αντίστοιχη κατανομή στην διεύθυνση x.



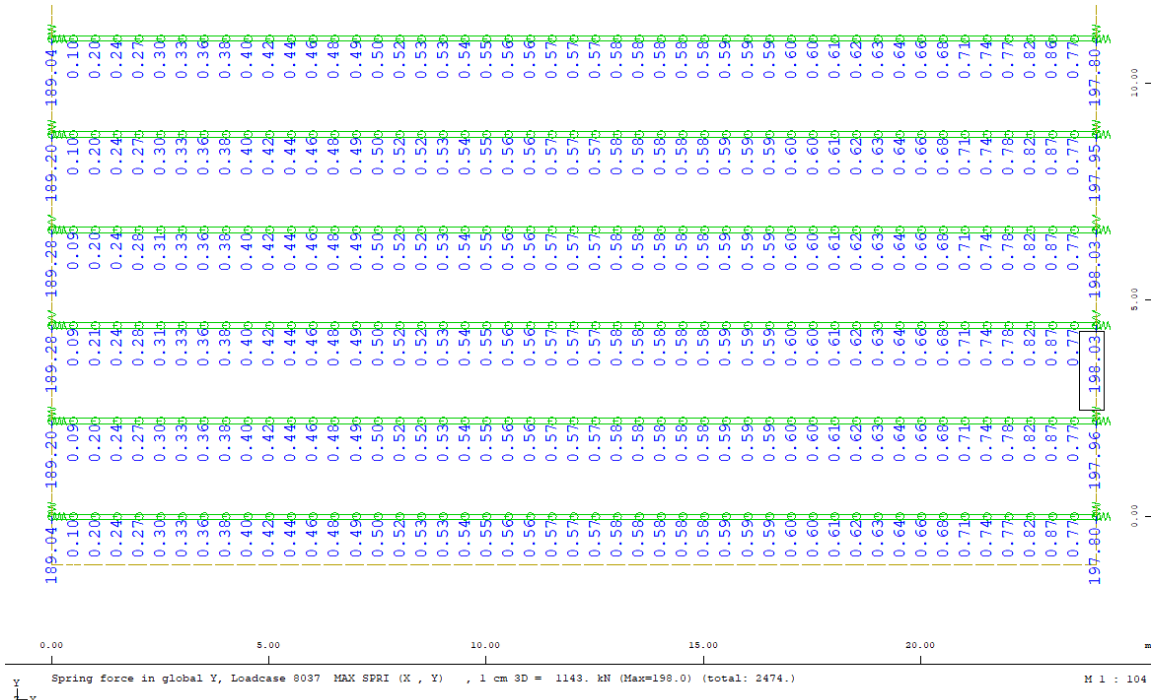
Σχήμα 5-11: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση y για τον τυχηματικό συνδυασμό



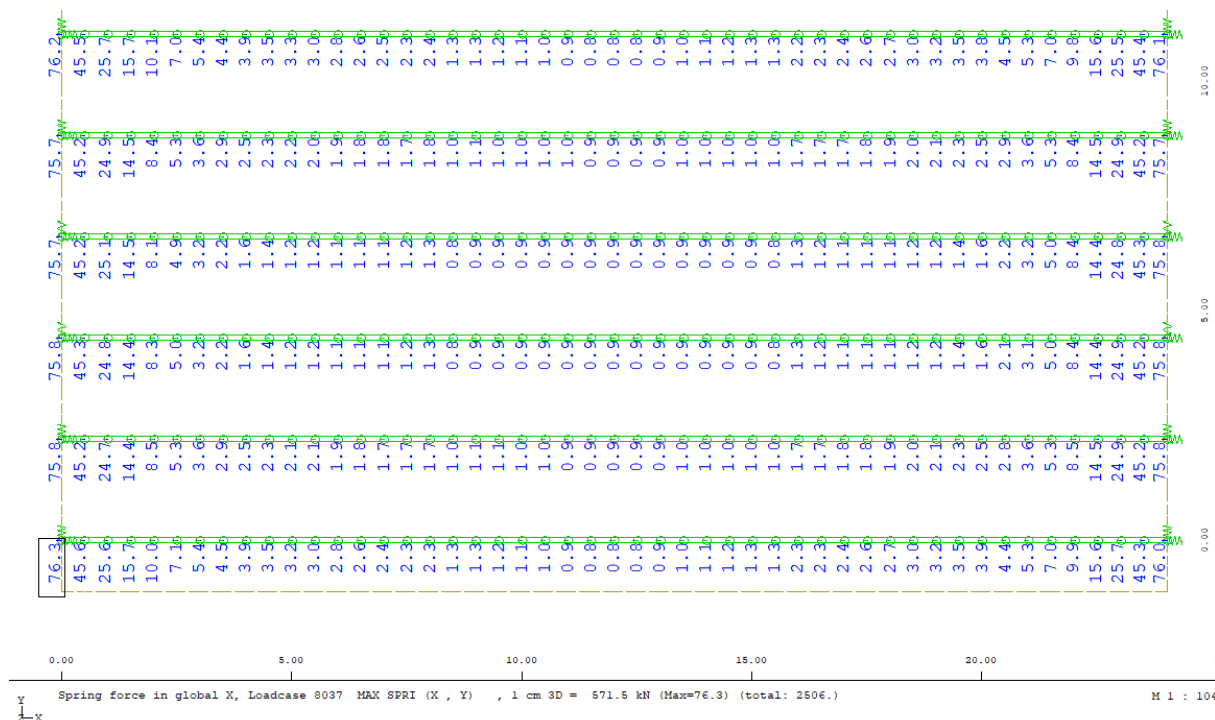
Σχήμα 5-12: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση x για τον τυχηματικό συνδυασμό

5.3.5 Διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας για την σεισμική φόρτιση

Στο Σχήμα 5-13 παρουσιάζεται η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση y για την σεισμική φόρτιση και στο Σχήμα 5-14 η αντίστοιχη κατανομή στην διεύθυνση x.



Σχήμα 5-13: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση y για την σεισμική φόρτιση



Σχήμα 5-14: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων της σύμμικτης γέφυρας στην διεύθυνση x για την σεισμική φόρτιση

5.4 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση του φορέα διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Συγκρίνοντας τα μέγιστα βέλη της σύμμικτης γέφυρας που εμφανίζονται στα μοντέλα ενιαίας διατομής (μοντέλα 1 και 2) με τα αντίστοιχα μοντέλα μη γραμμικών ελατηρίων (μοντέλα 3 και 4) παρατηρείται μία πάρα πολύ καλή σύγκλιση. Αν εξαιρέσουμε τις μεμονωμένες φορτίσεις των φορτίων κυκλοφορίας TS καθώς και τις μεμονωμένες τυχνηματικές φορτίσεις H_{acc} και TS 12.0 acc σε όλους τους υπόλοιπους συνδυασμούς η μεταβολή των βελών δεν ξεπερνά το 5% πλην των συνδυασμών 1004 (UDL), 1024 ($G_1+G_2+q_{fk,comb}+UDL+TS 12.0$) και 1034 [$1,35 \cdot (G_1+G_2+q_{fk,comb}+UDL+TS 12.0)$] όπου η μεταβολή των μέγιστων βελών μεταξύ των μοντέλων 2 και 4 κυμαίνεται λίγο πάνω από το 7%. Για τις μεμονωμένες φορτίσεις των φορτίων κυκλοφορίας TS οι υπόψη μεταβολές κυμαίνονται από 19,21% έως και 61,22%. Αν και αρκετά υψηλές, δικαιολογούνται από το γεγονός ότι αναφέρονται σε επιφανειακές φορτίσεις με πολύ μεγάλη τιμή φορτίου ανά m^2 οι οποίες ενεργούν σε αρκετά μικρή επιφάνεια ($0,85 m \cdot 0,85 m$). Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της πλάκας σκυροδέματος δικαιολογεί την εμφάνιση τοπικά αρκετά μεγαλύτερων παραμορφώσεων. Άλλωστε σε απόλυτες τιμές τα βέλη που προκαλούνται από τις υπόψη φορτίσεις είναι πάρα πολύ μικρά και επομένως η επίδραση της μεταβολής τους όταν συνδυάζονται με τα υπόλοιπα φορτία είναι μικρή.
- Συγκρίνοντας τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα των σιδηροδοκών της σύμμικτης γέφυρας που εμφανίζονται στα μοντέλα ενιαίας διατομής (μοντέλα 1 και 2) με τα αντίστοιχα μοντέλα μη γραμμικών ελατηρίων (μοντέλα 3 και 4) παρατηρείται μια ιδιαίτερα καλή σύγκλιση. Με μόνη εξαίρεση την μεμονωμένη τυχνηματική φόρτιση H_{acc} η μεταβολή των εφελκυστικών τάσεων είναι μικρότερη του 5% και μάλιστα στους περισσότερους συνδυασμούς η υπόψη μεταβολή περιορίζεται σε τιμές μικρότερες του 2%. Στην μεμονωμένη τυχνηματική φόρτιση H_{acc} η μεταβολή είναι αρκετά υψηλή (47,92%) δικαιολογείται όμως όπως και προηγουμένως λόγω του τοπικού χαρακτήρα της εν λόγω φόρτισης. Οι πολλοί μικρές τάσεις που προκαλούνται από την συγκεκριμένη φόρτιση δεν

προκαλούν ιδιαίτερη μεταβολή στον τυχηματικό συνδυασμό φορτίσεων 1037 μιας και η μεταβολή για τον υπόψη συνδυασμό ανέρχεται σε 3,14%.

- Αξιολογώντας την κατανομή των διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων στην διεύθυνση x για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων διαπιστώνεται ότι όσο πλησιάζουμε τις στηρίξεις τόσο οι διατμητικές δυνάμεις των ήλων αυξάνονται, μέχρι να μεγιστοποιηθεί σε κάποιο σημείο η θέση του οποίου εξαρτάται από την ύπαρξη στον εξεταζόμενο συνδυασμό φορτίων κυκλοφορίας TS ή του τυχηματικού φορτίου H_{acc} . Όσο πιο απομακρυσμένα από την στήριξη επιβάλλονται τα υπόψη φορτία τόσο πιο απομακρυσμένη είναι και η θέση μεγιστοποίησης της διατμητικής δύναμης των ελατηρίων.
- Εξετάζοντας την κατανομή των διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων στην διεύθυνση y για την τυχηματική φόρτιση 1035 H_{acc} , τον τυχηματικό συνδυασμό 1037 $G_1+G_2+1,25(H_{acc}+TS 12.0 acc)$ και την σεισμική φόρτιση προκύπτει ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον συμπέρασμα. Όλα τα ελατήρια πλην των ακραίων ελατηρίων κάθε δοκού παραλαμβάνουν πάρα πολύ μικρή διατμητική δύναμη, πρακτικά μηδενική, στην διεύθυνση y . Πρακτικά όλη η επιβαλλόμενη εξωτερική δύναμη μεταφέρεται από την πλάκα σκυροδέματος στις σιδηροδοκούς μέσω μόνο των ακραίων ελατηρίων κάθε δοκού. Η διαπίστωση αυτή δεν είναι η αναμενόμενη μιας και θα ήταν πιο λογική μια περίπου ομοιόμορφη κατανομή της επιβαλλόμενης εξωτερικής δύναμης στα ελατήρια.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και των επιμέρους συμπερασμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των παραδειγμάτων τα οποία παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 3, 4 και 5 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα όσον αφορά την αξιοπιστία της προτεινόμενης προσομοίωσης διατμητικών ήλων με μη γραμμικά ελατήρια:

- Η εν λόγω προσομοίωση κρίνεται αξιόπιστη για τον έλεγχο των βελών ενός φορέα όταν εξετάζονται ομοιόμορφα κατανεμημένες φορτίσεις ή συνδυασμοί φορτίσεων σε φορείς με πλήρη διατμητική σύνδεση, καθώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν πολύ μικρές μεταβολές συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα αντίστοιχα μοντέλα στα οποία η σύμμικτη δοκός προσομοιώνεται ως ενιαία διατομή. Όταν εξετάζονται μεμονωμένες φορτίσεις συγκεντρωμένων φορτίων ή ομοιόμορφα κατανεμημένων φορτίων που δρουν σε μικρή επιφάνεια και έχουν μεγάλη τιμή φορτίου, τα βέλη που προκύπτουν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή σε σχέση με τα αντίστοιχα των μοντέλων ενιαίας διατομής. Αυτό οφείλεται στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της πλάκας σκυροδέματος και εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στα μοντέλα των μη γραμμικών ελατηρίων είναι πιο ακριβή από τα αντίστοιχα των μοντέλων ενιαίας διατομής και επομένως και για τέτοιου είδους φορτίσεις η επιχειρούμενη προσομοίωση κρίνεται αξιόπιστη. Σε περιπτώσεις φορέων με μερική διατμητική σύνδεση η μεταβολή των βελών ως προς τα βέλη στην περίπτωση πλήρους διατμητικής σύνδεσης είναι αρκετά μικρή συγκρινόμενη με αυτήν που υπολογίζεται από την αναλυτική σχέση. Για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η προσομοίωση μας δεν είναι αξιόπιστη για περιπτώσεις μερικής διατμητικής σύνδεσης ή η αναλυτική σχέση είναι εξαιρετικά συντηρητική.
- Για τον έλεγχο των εφελκυστικών τάσεων στην κάτω ίνα των σιδηροδοκών η προσομοίωση διατμητικών ήλων με μη γραμμικά ελατήρια κρίνεται αξιόπιστη. Οι μεταβολές που προκύπτουν σε σύγκριση με τα μοντέλα ενιαίας διατομής στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερες του 5%. Μεγαλύτερες μεταβολές παρουσιάζονται και πάλι σε μεμονωμένες φορτίσεις συγκεντρωμένων φορτίων ή ομοιόμορφα κατανεμημένων φορτίων που δρουν σε μικρή επιφάνεια και έχουν μεγάλη τιμή φορτίου. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των βελών, τα αποτελέσματα των μοντέλων μη γραμμικών ελατηρίων κρίνονται ως πιο αξιόπιστα μιας και γίνεται χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της πλάκας σκυροδέματος.
- Η επιρροή του μήκους των τοποθετούμενων ελατηρίων στα βέλη και στις εφελκυστικές τάσεις δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Επομένως δεν είναι απαραίτητη η προσπάθεια ακριβούς προσομοίωσης του πραγματικού ύψους των διατμητικών ήλων με το ύψος των ελατηρίων. Αρκεί να επιλέγεται η

κοντινότερη τιμή στο πραγματικό ύψος μεταξύ της επιλογής να έχει το ελατήριο μήκος ίσο με ολόκληρο ή το μισό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος.

- Η εξεταζόμενη προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των διατμητικών δυνάμεων των ελατηρίων για φορτίσεις και συνδυασμούς φορτίσεων κατακόρυφων φορτίων. Η κατανομή των υπόψη δυνάμεων ακολουθεί σε περιπτώσεις ομοιόμορφα κατανεμημένων φορτίων την κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων των δοκών με εξαίρεση τα ελατήρια άνωθεν των στηρίξεων τα οποία αναλαμβάνουν μικρότερες διατμητικές δυνάμεις από τα αμέσως επόμενα τους. Στην πραγματικότητα όμως η δύναμη που πρέπει να λαμβάνεται για τα υπόψη ελατήρια οφείλει να είναι διπλάσια μιας και τα υπόψη ελατήρια έχουν τη μισή επιφάνεια επιρροής απ' ό,τι τα υπόλοιπα ελατήρια. Σε περιπτώσεις φορτίσεων που περιλαμβάνουν συγκεντρωμένα φορτία ή ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία που δρουν σε μικρή επιφάνεια η μεγιστοποίηση των διατμητικών δυνάμεων δεν συμβαίνει στα ακραία ελατήρια αλλά σε κάποιο εσωτερικό ελατήριο η θέση του οποίου εξαρτάται από τις θέσεις επιβολής των φορτίων. Από τις διατμητικές δυνάμεις των ελατηρίων μπορούν να υπολογιστούν οι διατμητικές δυνάμεις των ήλων και αναλόγως να τροποποιηθεί η κατανομή τους ή και τα χαρακτηριστικά τους, μέχρις ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση με διαδοχικές επιλύσεις των τροποποιημένων μοντέλων.
- Για τυχηματικές φορτίσεις ή για σεισμική φόρτιση, όπου ο φορέας καταπονείται και από οριζόντιες δυνάμεις, η προσομοίωση διατμητικών ήλων με μη γραμμικά ελατήρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των διατμητικών δυνάμεων των μη γραμμικών ελατηρίων στην διαμήκη διεύθυνση του φορέα. Η κατανομή των αντιστοίχων δυνάμεων στην εγκάρσια διεύθυνση δεν είναι η αναμενόμενη μιας και όλα τα ελατήρια πλην των ακραίων παραλαμβάνουν πάρα πολύ μικρή διατμητική δύναμη με αποτέλεσμα όλη η επιβαλλόμενη εξωτερική δύναμη να μεταφέρεται από την πλάκα σκυροδέματος στις σιδηροδοκούς μέσω μόνο των ακραίων ελατηρίων. Και σε αυτή την περίπτωση κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω διερεύνηση του υπόψη φαινομένου προκειμένου να διαπιστωθεί αν η υπόψη κατανομή είναι ακριβής ή αν η εξεταζόμενη προσομοίωση δεν είναι αξιόπιστη.
- Στο προτεινόμενο προσομοίωμα η μη γραμμικότητα περιορίζεται μόνο στη διατμητική σύνδεση χάλυβα σκυροδέματος, με αποτέλεσμα τον αξιόπιστο υπολογισμό μεγεθών (π.χ. βέλη, τάσεις) στην ελαστική περιοχή, η οποία συνήθως επαρκεί σε φορείς γεφυρών ακόμα και για φορτία στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Παρόλα αυτά, σε μεγέθη που η πλαστικοποίηση του υλικού είναι σημαντική, όπως π.χ. η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων της δοκού όταν αναπτύσσεται η πλαστική ροπή αντοχής ή εξετάζεται η πρόσκρουση ενός οχήματος, η ακρίβεια του προσομοιώματος μειώνεται δραστικά. Για το λόγο αυτό, ως περαιτέρω εξέλιξη της παρούσας εργασίας, προτείνεται η διερεύνηση της εισαγωγής μη γραμμικού νόμου υλικού τόσο στο χάλυβα όσο και στο σκυρόδεμα.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η εξεταζόμενη προσομοίωση δύναται να αξιοποιηθεί για την διερεύνηση περιπτώσεων που απαιτείται λεπτομερέστερη διερεύνηση της συμπεριφοράς των διατμητικών ήλων σε σύμμικτες δοκούς αν και κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση των παθογενειών που παρατηρήθηκαν.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α., Θανόπουλος Π. (2016). «Σχεδιασμός σύμμικτων γεφυρών από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι. (2018). «Σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα, 4η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Ερμόπουλος Ι. (2005). «Ευρωκώδικας 1: Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών. Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, 2^η έκδοση». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. EN 1990 (2002). «Ευρωκώδικας 0: Βάσεις σχεδιασμού», CEN.
5. EN 1991-2 (2003). «Ευρωκώδικας 1: Δράσεις. Μέρος 2: Φορτία κυκλοφορίας σε γέφυρες», CEN.
6. EN 1992-1-1 (2004). «Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα. Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια», CEN.
7. EN 1993-1-1 (2005). «Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα. Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια», CEN.
8. EN 1994-1-1 (2004) «Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα. Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια», CEN.
9. EN 1994-2 (2005) «Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα. Μέρος 2: Γενικοί κανόνες και κανόνες για γέφυρες», CEN.
10. EN 1998-1 (2004) «Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός. Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια», CEN.
11. EN 1998-2 (2005) «Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός. Μέρος 2: Γέφυρες», CEN.
12. He J., Lin Z., Liu Y., Xu X., Xin H. & Wang S. (2020). "Shear stiffness of headed studs on structural behaviors of steel-concrete composite girders." *Steel and Composite Structures*, 36(5), 553-568.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΜΗΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζεται η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αποφασισθεί ποια θα πρέπει να είναι η τιμή της δυσκαμψίας στη διαμήκη διεύθυνση των μη γραμμικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση μας. Η τιμή αυτή απαιτείται να είναι αρκούτσως μεγάλη ώστε πρακτικά να θεωρείται άπειρη και να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των επιμέρους παραδειγμάτων που αξιολογήθηκαν.

Προκειμένου να επιτευχθεί η εν λόγω διερεύνηση αναλύθηκαν τα μοντέλα 5, 6, 13 και 14 του παραδείγματος σύμμικτης δοκού γέφυρας (3^ο κεφάλαιο) με τρεις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας, $10 \cdot 10^6$ kN/m, $100 \cdot 10^6$ kN/m και $500 \cdot 10^6$ kN/m. Ο Πίνακας Α-1 παρουσιάζει την αντιστοιχία του ονόματος κάθε μοντέλου που αναλύθηκε με την περιγραφή του.

Πίνακας Α-1: Ονομασία και περιγραφή των μοντέλων σύμμικτης δοκού γέφυρας που αναλύθηκαν για τον καθορισμό της τιμής της δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους

A/A	Μοντέλο	Περιγραφή
1	Μοντέλο 5	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/150
2	Μοντέλο 6	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/150
3	Μοντέλο 13	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το πάχος της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350
4	Μοντέλο 14	Μοντέλο μη γραμμικών ελατηρίων με μήκος ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας που προσομοιώνουν διατμητικούς ήλους 2Φ19/350

Ο Πίνακας Α-2 και ο Πίνακας Α-3 παρουσιάζουν την σύγκριση των μέγιστων βελών (σε mm) των παραπάνω μοντέλων σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις εξεταζόμενες διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους.

Πίνακας Α-2: Σύγκριση μέγιστων βελών (σε mm) των μοντέλων 5 και 6 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους

A/A	Φόρτιση	Μοντέλο 5			Μοντέλο 6		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
1	1001 Q	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7

Πίνακας Α-2 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5			Μοντέλο 6		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
2	1002 TS 12	14,1	14,1	14,1	14,0	14,0	14,0
3	1003 TS 0.5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
4	1004 TS 1.0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
5	1005 TS 1.5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
6	1006 TS 2.0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
7	1007 TS 2.5	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3
8	1008 TS 3.0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
9	1009 TS 3.5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
10	1010 TS 4.0	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
11	1011 TS 4.5	7,6	7,6	7,6	7,5	7,5	7,5
12	1012 UDL	9,8	9,8	9,8	9,7	9,7	9,7
13	1013 Q + TS 12 + UDL	35,6	35,6	35,6	35,4	35,4	35,4
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	22,4	22,4	22,4	22,2	22,2	22,2
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	23,2	23,2	23,2	23,1	23,1	23,1
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	24,1	24,1	24,1	23,9	23,9	23,9
17	1017 Q + TS 2,0 + UDL	24,9	24,9	24,9	24,8	24,8	24,8
18	1018 Q + TS 2,5 + UDL	25,7	25,7	25,7	25,6	25,6	25,6
19	1019 Q + TS 3,0 + UDL	26,6	26,6	26,6	26,4	26,4	26,4
20	1020 Q + TS 3,5 + UDL	27,4	27,4	27,4	27,2	27,2	27,2
21	1021 Q + TS 4,0 + UDL	28,2	28,2	28,2	28,0	28,0	28,0
22	1022 Q + TS 4,5 + UDL	28,9	28,9	28,9	28,8	28,8	28,8
23	1023 1,35Q + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,1	48,1	48,1	47,8	47,8	47,8
24	1024 1,35Q + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,2	30,2	30,2	30,0	30,0	30,0
25	1025 1,35Q + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,4	31,4	31,4	31,2	31,2	31,2
26	1026 1,35Q + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,5	32,5	32,5	32,3	32,3	32,3
27	1027 1,35Q + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	33,6	33,6	33,6	33,4	33,4	33,4
28	1028 1,35Q + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	34,8	34,8	34,8	34,6	34,6	34,6
29	1029 1,35Q + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	35,9	35,9	35,9	35,7	35,7	35,7
30	1030 1,35Q + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,0	37,0	37,0	36,7	36,7	36,7
31	1031 1,35Q + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,0	38,0	38,0	37,8	37,8	37,8
32	1032 1,35Q + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,0	39,0	39,0	38,8	38,8	38,8

Πίνακας Α-3: Σύγκριση μέγιστων βελών (σε mm) των μοντέλων 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13			Μοντέλο 14		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
1	1001 Q	11,9	11,9	11,9	11,8	11,8	11,8
2	1002 TS 12	14,3	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2
3	1003 TS 0.5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
4	1004 TS 1.0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
5	1005 TS 1.5	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
6	1006 TS 2.0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
7	1007 TS 2.5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
8	1008 TS 3.0	5,3	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2
9	1009 TS 3.5	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
10	1010 TS 4.0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
11	1011 TS 4.5	7,7	7,7	7,7	7,6	7,6	7,6
12	1012 UDL	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
13	1013 Q + TS 12 + UDL	36,1	36,1	36,1	35,9	35,9	35,9

Πίνακας Α-3 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13			Μοντέλο 14		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	22,7	22,7	22,7	22,6	22,6	22,6
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	23,5	23,5	23,5	23,4	23,4	23,4
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	24,4	24,4	24,4	24,3	24,3	24,3
17	1017 Q + TS 2,0 + UDL	25,3	25,3	25,3	25,1	25,1	25,1
18	1018 Q + TS 2,5 + UDL	26,1	26,1	26,1	26,0	26,0	26,0
19	1019 Q + TS 3,0 + UDL	26,9	26,9	26,9	26,8	26,8	26,8
20	1020 Q + TS 3,5 + UDL	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6
21	1021 Q + TS 4,0 + UDL	28,5	28,5	28,5	28,4	28,4	28,4
22	1022 Q + TS 4,5 + UDL	29,3	29,3	29,3	29,2	29,2	29,2
23	1023 1,35Q + 1,35TS 12 + 1,35UDL	48,8	48,8	48,8	48,5	48,5	48,5
24	1024 1,35Q + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	30,6	30,6	30,6	30,5	30,5	30,5
25	1025 1,35Q + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	31,8	31,8	31,8	31,6	31,6	31,6
26	1026 1,35Q + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	32,9	32,9	32,9	32,8	32,8	32,8
27	1027 1,35Q + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	34,1	34,1	34,1	33,9	33,9	33,9
28	1028 1,35Q + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	35,2	35,2	35,2	35,1	35,0	35,0
29	1029 1,35Q + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	36,4	36,4	36,4	36,2	36,2	36,2
30	1030 1,35Q + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	37,5	37,5	37,5	37,3	37,3	37,3
31	1031 1,35Q + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	38,6	38,6	38,6	38,4	38,4	38,4
32	1032 1,35Q + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	39,6	39,6	39,6	39,4	39,4	39,4

Ο Πίνακας Α-4 και ο Πίνακας Α-5 παρουσιάζουν την σύγκριση των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού των μοντέλων 5, 6, 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις εξεταζόμενες διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους.

Πίνακας Α-4: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών τάσεων (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού των μοντέλων 5 και 6 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5			Μοντέλο 6		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
1	1001 Q	40,4	40,4	40,4	40,4	40,4	40,4
2	1002 TS 12	59,6	59,8	59,8	59,4	59,6	59,7
3	1003 TS 0.5	5,2	5,2	5,2	5,0	5,1	5,1
4	1004 TS 1.0	9,9	10,1	10,1	9,7	9,9	9,9
5	1005 TS 1.5	14,4	14,6	14,6	14,2	14,4	14,4
6	1006 TS 2.0	18,7	18,9	18,9	18,5	18,7	18,7
7	1007 TS 2.5	22,7	22,9	22,9	22,5	22,7	22,7
8	1008 TS 3.0	26,5	26,7	26,7	26,3	26,5	26,5
9	1009 TS 3.5	30,1	30,3	30,3	29,9	30,1	30,1
10	1010 TS 4.0	33,5	33,7	33,7	33,3	33,5	33,5
11	1011 TS 4.5	36,7	36,9	36,9	36,4	36,7	36,7
12	1012 UDL	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7
13	1013 Q + TS 12 + UDL	133,7	133,9	133,9	133,5	133,7	133,7
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6	76,6
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	79,1	79,1	79,1	79,1	79,1	79,1
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	81,7	81,7	81,7	81,7	81,7	81,7
17	1017 Q + TS 2,0 + UDL	84,3	84,3	84,3	84,3	84,3	84,3
18	1018 Q + TS 2,5 + UDL	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0

Πίνακας Α-4 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5			Μοντέλο 6		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
19	1019 Q + TS 3,0 + UDL	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7
20	1020 Q + TS 3,5 + UDL	92,4	92,4	92,4	92,4	92,4	92,4
21	1021 Q + TS 4,0 + UDL	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2	95,2
22	1022 Q + TS 4,5 + UDL	98,1	98,1	98,1	98,0	98,0	98,0
23	1023 1,35Q + 1,35TS 12 + 1,35UDL	180,5	180,8	180,8	180,2	180,5	180,6
24	1024 1,35Q + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,4	103,4	103,4	103,4	103,4	103,4
25	1025 1,35Q + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	106,8	106,8	106,8	106,8	106,8	106,8
26	1026 1,35Q + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,3	110,3	110,3	110,3	110,3	110,3
27	1027 1,35Q + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	113,9	113,9	113,9	113,8	113,8	113,8
28	1028 1,35Q + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	117,4	117,4	117,4	117,4	117,4	117,4
29	1029 1,35Q + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,1	121,1	121,1	121,0	121,0	121,0
30	1030 1,35Q + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8
31	1031 1,35Q + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	128,6	128,6	128,6	128,5	128,5	128,5
32	1032 1,35Q + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,4	132,4	132,4	132,3	132,3	132,3

Πίνακας Α-5: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών τάσεων (σε MPa) της κάτω ίνας της σιδηροδοκού των μοντέλων 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση τους

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13			Μοντέλο 14		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
1	1001 Q	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
2	1002 TS 12	60,1	60,3	60,3	59,9	60,2	60,2
3	1003 TS 0.5	5,4	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2
4	1004 TS 1.0	10,2	10,3	10,3	10,0	10,2	10,2
5	1005 TS 1.5	14,7	14,9	15,0	14,6	14,8	14,8
6	1006 TS 2.0	19,1	19,3	19,3	18,9	19,1	19,1
7	1007 TS 2.5	23,1	23,3	23,3	22,9	23,1	23,2
8	1008 TS 3.0	27,0	27,2	27,2	26,8	27,0	27,0
9	1009 TS 3.5	30,6	30,8	30,8	30,4	30,6	30,6
10	1010 TS 4.0	34,0	34,2	34,2	33,8	34,0	34,0
11	1011 TS 4.5	37,1	37,3	37,4	37,0	37,2	37,2
12	1012 UDL	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8
13	1013 Q + TS 12 + UDL	134,4	134,6	134,6	134,2	134,5	134,5
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	76,8	76,8	76,8	76,8	76,8	76,8
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	79,4	79,4	79,4	79,3	79,3	79,3
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9
17	1017 Q + TS 2,0 + UDL	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5
18	1018 Q + TS 2,5 + UDL	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2
19	1019 Q + TS 3,0 + UDL	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9
20	1020 Q + TS 3,5 + UDL	92,7	92,7	92,7	92,6	92,6	92,6
21	1021 Q + TS 4,0 + UDL	95,4	95,4	95,4	95,4	95,4	95,4
22	1022 Q + TS 4,5 + UDL	98,3	98,3	98,3	98,2	98,2	98,2
23	1023 1,35Q + 1,35TS 12 + 1,35UDL	181,4	181,7	181,7	181,2	181,5	181,5
24	1024 1,35Q + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	103,7	103,7	103,7	103,6	103,6	103,6
25	1025 1,35Q + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	107,1	107,1	107,1	107,1	107,1	107,1
26	1026 1,35Q + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	110,6	110,6	110,6	110,6	110,6	110,6
27	1027 1,35Q + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	114,1	114,1	114,1	114,1	114,1	114,1
28	1028 1,35Q + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	117,7	117,7	117,7	117,7	117,7	117,7
29	1029 1,35Q + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	121,4	121,4	121,4	121,3	121,3	121,3

Πίνακας Α-5 (συνέχεια)

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13			Μοντέλο 14		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
30	1030 1,35Q + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	125,1	125,1	125,1	125,0	125,0	125,0
31	1031 1,35Q + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	128,9	128,9	128,9	128,8	128,8	128,8
32	1032 1,35Q + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	132,7	132,7	132,7	132,6	132,6	132,6

Ο Πίνακας Α-6 και ο Πίνακας Α-7 παρουσιάζουν την σύγκριση των μέγιστων διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων των μοντέλων 5, 6, 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις εξεταζόμενες διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας στη διαμήκη διεύθυνση τους.

Πίνακας Α-6: Σύγκριση μέγιστων διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων των μοντέλων 5 και 6 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας στη διαμήκη διεύθυνση τους

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 5			Μοντέλο 6		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
1	1001 Q	59,7	59,7	59,7	59,9	59,8	59,8
2	1002 TS 12	52,0	52,0	52,0	52,0	52,0	52,0
3	1003 TS 0.5	30,8	31,2	31,2	40,7	39,2	39,1
4	1004 TS 1.0	53,1	53,5	53,5	60,5	59,6	59,5
5	1005 TS 1.5	66,5	66,6	66,6	70,0	70,1	70,1
6	1006 TS 2.0	73,2	73,1	73,1	75,2	75,3	75,3
7	1007 TS 2.5	77,8	77,7	77,7	79,1	79,1	79,1
8	1008 TS 3.0	80,0	80,0	80,0	81,5	81,5	81,5
9	1009 TS 3.5	82,1	82,0	82,0	82,9	82,9	82,9
10	1010 TS 4.0	82,3	82,3	82,2	82,8	82,8	82,8
11	1011 TS 4.5	81,4	81,4	81,4	81,7	81,7	81,7
12	1012 UDL	49,7	49,7	49,7	49,9	49,9	49,9
13	1013 Q + TS 12 + UDL	160,3	160,3	160,3	160,7	160,6	160,6
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	132,8	132,7	132,7	134,1	134,7	134,7
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	156,8	157,2	157,2	165,5	164,6	164,5
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	170,0	170,1	170,1	174,9	174,9	175,0
17	1017 Q + TS 2,0 + UDL	180,1	180,1	180,1	182,8	182,9	182,9
18	1018 Q + TS 2,5 + UDL	185,6	185,6	185,6	187,1	187,1	187,1
19	1019 Q + TS 3,0 + UDL	189,4	189,4	189,4	191,2	191,2	191,2
20	1020 Q + TS 3,5 + UDL	191,4	191,4	191,4	192,6	192,6	192,6
21	1021 Q + TS 4,0 + UDL	191,6	191,6	191,6	192,4	192,4	192,4
22	1022 Q + TS 4,5 + UDL	190,7	190,7	190,7	191,3	191,3	191,3
23	1023 1,35Q + 1,35TS 12 + 1,35UDL	216,3	216,3	216,3	216,8	216,8	216,8
24	1024 1,35Q + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	179,2	179,0	178,9	180,9	181,6	181,7
25	1025 1,35Q + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	211,4	211,9	211,9	223,1	221,9	221,8
26	1026 1,35Q + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	229,1	229,2	229,3	236,1	235,8	235,8
27	1027 1,35Q + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	242,9	243,1	243,1	246,7	246,7	246,7
28	1028 1,35Q + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	250,4	250,4	250,4	252,4	252,5	252,6
29	1029 1,35Q + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	255,6	255,6	255,6	258,0	258,1	258,1
30	1030 1,35Q + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	258,4	258,3	258,3	259,9	259,9	259,9
31	1031 1,35Q + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	258,6	258,5	258,5	259,6	259,6	259,6
32	1032 1,35Q + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	257,4	257,4	257,4	258,2	258,2	258,2

Πίνακας Α-7: Σύγκριση μέγιστων διατμητικών δυνάμεων (σε kN) των μη γραμμικών ελατηρίων των μοντέλων 13 και 14 της σύμμικτης δοκού γέφυρας για τις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας στη διαμήκη διεύθυνση τους

Α/Α	Φόρτιση	Μοντέλο 13			Μοντέλο 14		
		K _v (kN/m)			K _v (kN/m)		
		10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶	10·10 ⁶	100·10 ⁶	500·10 ⁶
1	1001 Q	57,4	57,4	57,4	57,6	57,6	57,6
2	1002 TS 12	51,7	51,7	51,7	51,8	51,8	51,8
3	1003 TS 0,5	26,0	26,2	26,2	32,2	31,4	31,3
4	1004 TS 1,0	44,1	44,3	44,3	48,6	48,2	48,1
5	1005 TS 1,5	57,3	57,4	57,4	60,1	60,1	60,1
6	1006 TS 2,0	65,4	65,4	65,4	67,3	67,3	67,3
7	1007 TS 2,5	70,0	70,0	70,0	71,3	71,4	71,4
8	1008 TS 3,0	73,7	73,7	73,7	74,6	74,6	74,6
9	1009 TS 3,5	75,4	75,4	75,4	76,3	76,3	76,3
10	1010 TS 4,0	76,9	76,9	76,9	77,5	77,5	77,5
11	1011 TS 4,5	77,1	77,1	77,1	77,5	77,5	77,5
12	1012 UDL	47,9	47,9	47,9	48,0	48,0	48,0
13	1013 Q + TS 12 + UDL	155,0	155,0	155,0	155,4	155,4	155,4
14	1014 Q + TS 0,5 + UDL	125,2	125,1	125,1	126,7	126,9	127,0
15	1015 Q + TS 1,0 + UDL	145,4	145,6	145,6	150,9	150,5	150,4
16	1016 Q + TS 1,5 + UDL	158,5	158,6	158,6	162,2	162,3	162,3
17	1017 Q + TS 2,0 + UDL	167,5	167,6	167,6	170,1	170,1	170,1
18	1018 Q + TS 2,5 + UDL	174,3	174,3	174,3	176,0	176,0	176,0
19	1019 Q + TS 3,0 + UDL	177,9	177,9	177,9	179,1	179,1	179,1
20	1020 Q + TS 3,5 + UDL	180,5	180,5	180,5	181,8	181,8	181,8
21	1021 Q + TS 4,0 + UDL	182,0	182,0	182,0	182,9	182,9	182,9
22	1022 Q + TS 4,5 + UDL	182,2	182,1	182,1	182,9	182,9	182,9
23	1023 1,35Q + 1,35TS 12 + 1,35UDL	209,1	209,1	209,1	209,7	209,7	209,7
24	1024 1,35Q + 1,35TS 0,5 + 1,35UDL	168,9	168,8	168,8	170,9	171,2	171,2
25	1025 1,35Q + 1,35TS 1,0 + 1,35UDL	196,0	196,2	196,3	203,5	202,9	202,8
26	1026 1,35Q + 1,35TS 1,5 + 1,35UDL	213,6	213,7	213,7	218,7	218,7	218,7
27	1027 1,35Q + 1,35TS 2,0 + 1,35UDL	226,0	226,1	226,1	229,4	229,4	229,4
28	1028 1,35Q + 1,35TS 2,5 + 1,35UDL	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3
29	1029 1,35Q + 1,35TS 3,0 + 1,35UDL	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3
30	1030 1,35Q + 1,35TS 3,5 + 1,35UDL	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3
31	1031 1,35Q + 1,35TS 4,0 + 1,35UDL	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3
32	1032 1,35Q + 1,35TS 4,5 + 1,35UDL	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3	233,3

Από την σύγκριση των προηγούμενων πινάκων διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Τα μέγιστα βέλη και για τις τρεις διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας των μη γραμμικών ελατηρίων στην διαμήκη διεύθυνση τους παρουσιάζουν απόλυτη σύγκλιση.
- Οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις της κάτω ίνα της σιδηροδοκού παρουσιάζουν μία πάρα πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των ελεγχθέντων διαφορετικών τιμών δυσκαμψίας. Η σύγκλιση αυτή γίνεται απόλυτη, πλην ελαχίστων φορτίσεων τοπικού χαρακτήρα, μεταξύ των τιμών 100·10⁶ kN/m και 500·10⁶ kN/m. Ακόμα και στις περιπτώσεις φορτίσεων όπου εμφανίζονται διαφορές, αυτές δεν ξεπερνάνε το 0,1 MPa.
- Οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις των μη γραμμικών ελατηρίων παρουσιάζουν και αυτές μία πάρα πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των ελεγχθέντων διαφορετικών τιμών δυσκαμψίας. Και πάλι η σύγκλιση αυτή γίνεται σχεδόν απόλυτη μεταξύ των τιμών 100·10⁶ kN/m και 500·10⁶ kN/m. Στις ελάχιστες περιπτώσεις φορτίσεων όπου δεν υπάρχει απόλυτη σύγκλιση οι διαφορές που παρατηρούνται δεν ξεπερνάνε το 0,1 kN.

Από τα παραπάνω προκύπτει επομένως ότι επιλέγοντας την τιμή $100 \cdot 10^6$ kN/m για την δυσκαμψία των μη γραμμικών ελατηρίων στην διαμήκη διεύθυνση τους, επιτυγχάνεται η πρακτικώς άπειρη δυσκαμψία τους μιας και περαιτέρω αύξηση προκαλεί πάρα πολύ μικρές μεταβολές, πρακτικά μηδενικές, στα τελικά αποτελέσματα.