



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική Διερεύνηση και Αναλυτικά Μοντέλα
για την Εκτίμηση της Αντοχής Σύμμικτων Κοίλων
Διατομών για Πλάκες Χωρίς Δοκούς



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Παναγιώτης Κ. Τσιρούλης

Επιβλέπων: Δημήτριος Βαμβάτσικος

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΕΜΚ ΔΕ 2020/15

Τσιρούλης Γ. Π. Κ. (2020).
Πειραματική διερεύνηση και αναλυτικά μοντέλα για την εκτίμηση της αντοχής σύμμικτων
κοίλων διατομών για πλάκες χωρίς δοκούς.
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2020/15
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Tsiroulis G.P. K. (2020).
Experimental investigation and analytical models for strength assessment of composite
hollow sections for slim floor slabs.
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2020/15
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
1 Εισαγωγή.....	7
1.1 Εισαγωγή στις σύμμικτες κατασκευές	7
1.2 Σιδηροδοκοί εγκιβωτισμένες σε σκυρόδεμα για πλάκες χωρίς δοκούς (Slim floor beams) .	8
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	10
2 Πειραματικές δοκιμές.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Περιγραφή των δοκιμών	11
2.3 Υλικά κατασκευής.....	13
2.4 Πειραματική διάταξη.....	14
2.5 Τοποθέτηση δοκιμών στην πειραματική διάταξη	16
2.5.1 Περιστροφή δοκιμών	16
2.5.2 Εισαγωγή των δοκιμών στην πειραματική διάταξη	20
2.6 Εξοπλισμός μετρητικών οργάνων	22
2.6.1 Όργανα μέτρησης μετατοπίσεων (LVDTs)	22
2.6.2 Μονοδιευθυντικά επιμηκυσίόμετρα (Strain Gages).....	24
2.6.3 Μετρητές θέσης συρματόσχοινου και κλισιόμετρα	25
2.7 Μορφή και διαδικασία πειραματικής δοκιμής	27
2.8 Απομάκρυνση δοκιμίου από την πειραματική διάταξη.....	28
3 Αναλυτικά μοντέλα δοκιμών.....	31
3.1 Το πρόγραμμα και η μέθοδος προσομοίωσης των δοκιμών	31
3.2 Ορισμός μοντέλου	32
3.2.1 Τύπος ανάλυσης.....	32
3.2.2 Ορισμός υλικών και μηχανικών ιδιοτήτων	32
3.2.3 Ορισμός διατομής και οπλισμός	36
3.2.4 Τύπος στοιχείων.....	39
3.2.5 Ορισμός κόμβων μελών και κινηματικές δεσμεύσεις.....	40
3.2.6 Ορισμός φορτιών	41
3.3 Ανάλυση και ανάγνωση αποτελεσμάτων	43
4 Πειραματικά αποτελέσματα και σύγκριση με αυτά των αναλυτικών μοντέλων.....	45
4.1 Δοκίμιο H1	45
4.2 Δοκίμιο H2	49
4.3 Δοκίμιο H3	52
4.4 Δοκίμιο H4	56
4.5 Δοκίμιο H5	59
4.6 Δοκίμιο H6.....	62
5 Συμπεράσματα.....	66
6 Βιβλιογραφία.....	67

Πειραματική διερεύνηση και αναλυτικά μοντέλα για την εκτίμηση της αντοχής σύμμικτων κοίλων διατομών για πλάκες χωρίς δοκούς

Τσιρούλης Γ. Π. Κ. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

Περίληψη

Διερευνώνται πειραματικά έξι σύμμικτες δοκοί με κοίλη χαλύβδινη διατομή για χρήση σε πλάκες χωρίς δοκούς και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αναλυτικά μοντέλα. Ο εγκιβωτισμός σιδηροδοκών σε σκυρόδεμα για τη δημιουργία λεπτών πλακών χωρίς δοκούς αποτελεί συνήθη κατασκευαστική πρακτική τα τελευταία χρόνια χάρη στην πληθώρα των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει, πράγμα που καθιστά σημαντική την περαιτέρω μελέτη τέτοιου είδους διατομών.

Για την πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν έξι σύμμικτες δοκοί με εγκιβωτισμένη σιδηροδοκό τραπεζοειδούς διατομής, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε πειραματική διάταξη και υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων με μονοτονική φόρτιση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των καμπυλών Δύναμης-Μετατόπισης κάθε δοκιμίου.

Για την μοντελοποίηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία δοκού-υποστυλώματος κατανεμημένης πλαστικότητας με διατομές ινών, προκειμένου να δημιουργηθούν απλά τρισδιάστατα μοντέλα ισοδύναμα με τα πειραματικά δοκίμια. Με αυτό τον τρόπο έγινε μια πρακτική αναλυτική προσέγγιση της συμπεριφοράς των πειραματικών δοκιμίων, προκειμένου να δοθεί μια έγκυρη εκτίμηση σχετικά με την δυσκαμψία, την αντοχή και την πλαστιμότητά τους.

Μετά το πέρας της μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και αναλυτικών καμπύλων καθώς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της μεθόδου μοντελοποίησης. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από την πειραματική μελέτη όσο και από την αναλυτική διερεύνηση.

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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔE 2020/15

**Experimental investigation and analytical models for strength assessment
of composite hollow sections for slim floor slabs.**

Tsiroulis G. P. K. (supervised by Vamvatsikos D.)

Abstract

Six composite steel-concrete beams with steel hollow sections for use in slim floor slabs are experimentally investigated and the results are compared with analytical models. Nowadays, it has become a standard approach in construction to embed steel sections in a concrete slab in order to create slim floor slabs due to its numerous advantages, and as a result it is important to make further investigations for this type of composite sections.

For the experimental investigation we used six composite beams with an embedded member of trapezoidal steel section, which were placed into an experimental frame and submitted to three-point bending test with monotonic loading. The test results were used for generating force-displacement curves of each specimen.

For the analytical models, beam-column finite elements with distributed plasticity were employed in order to be create simple 3D models equivalent to the tested specimens. In this way a practical approximation of the specimens behavior was achieved, in order to have an estimation of their stiffness, strength and ductility.

Afterwards a comparison was made between the experimental and analytical curves and the results were discussed in order to evaluate the reliability of the modeling method. Finally conclusions were derived from the experimental and analytical investigation.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ Δημήτριο Βαμβάτσικο για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών και ιδιαίτερα τον κ Ξενοφόντα Λιγνό για τις γνώσεις που μου παρείχε ως προς τον τρόπο διεξαγωγής των πειραματικών δοκιμών.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που στάθηκε δίπλα μου σε όλη την διάρκεια των σπουδών.

1 Εισαγωγή

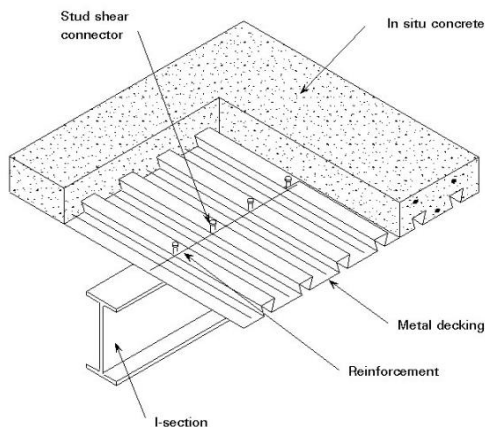
1.1 Εισαγωγή στις σύμμικτες κατασκευές

Μια σημαντική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών στον τομέα των κατασκευών αποτελεί η ανάπτυξη των σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα. Τα δυο δημοφιλέστερα υλικά, ο χάλυβας και το σκυρόδεμα, συνδυάζονται με το βέλτιστο τρόπο αξιοποιώντας την μεγάλη ικανότητα του σκυροδέματος σε θλίψη και του χάλυβα σε εφελκυσμό, ώστε να προκύπτουν ασφαλείς, λειτουργικές, ανθεκτικές στο χρόνο και οικονομικές κατασκευές. Επιπλέον, η εξαιρετική τους αντισεισμική συμπεριφορά τις καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλείς σε σεισμογενείς περιοχές.

Η συστηματική χρήση σύμμικτων στοιχείων σε οικοδομικά έργα ξεκίνησε από την Ιαπωνία, όπου ήδη από την δεκαετία του 1930 και μέχρι τη δεκαετία του 1970 ηλωτές δικτυωτές δοκοί και ηλωτά υποστυλώματα σύνθετων διατομών από γωνιακά εγκιβωτίζονταν σε σκυρόδεμα. Στην Ευρώπη για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο δεν γινόταν χρήση του χάλυβα σε οικοδομικά έργα κυρίως λόγω της έλλειψης χάλυβα αλλά και της χαμηλής τιμής του σκυροδέματος. Η κατάσταση αυτή άλλαξε ριζικά από τις αρχές του 1980 με την υιοθέτηση των Αμερικάνικων μεθόδων διαχείρισης «fast-track».

Σήμερα οι σύμμικτες κατασκευές θεωρούνται σύγχρονες, γρήγορες και οικονομικές και η χρήση τους είναι αρκετά διαδεδομένη στις περισσότερες προηγμένες χώρες. Τα πλεονεκτήματά τους συχνά οδηγούν σε τέτοιου είδους κατασκευές ως την πλέον συνήθη δομική λύση ιδιαίτερα σε έργα όπως κτίρια γραφείων ή γέφυρες μεσαίων ανοιγμάτων. Η αντικατάσταση μεγάλων διατομών οπλισμένου σκυροδέματος με μικρότερες χαλύβδινες έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υλικών αλλά και την δημιουργία ελαφρύτερων κατασκευών. Επιπλέον η κατασκευή των μεταλλικών στοιχείων στο εργοστάσιο και η συναρμολόγηση τους στο εργοτάξιο έχει σημαντικό αντίκτυπο στην

Ομοίως και στην Ελλάδα, τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο χρήση σύμμικτων κατασκευών στα οικοδομικά έργα. Παράλληλα, με την έκδοση του Ευρωκώδικα 4 για τις σύμμικτες κατασκευές υπάρχει πλέον ένα σταθερό κανονιστικό πλαίσιο για τη μελέτη και την εκτέλεση τέτοιου είδους κατασκευών.

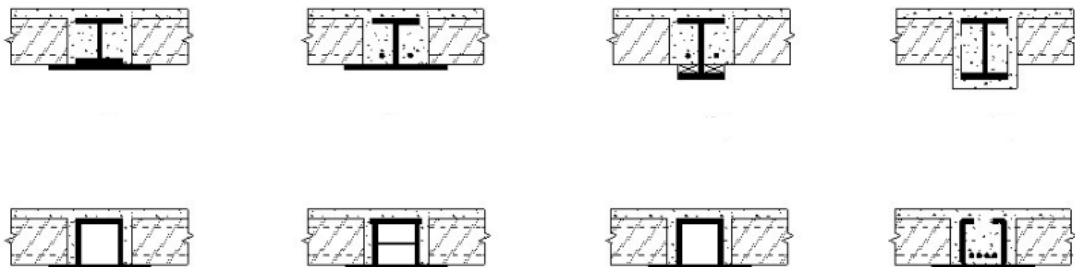


Σχήμα 1.1: Τυπική διάταξη σύμμικτης δοκού με χαλυβδόφυλλο.

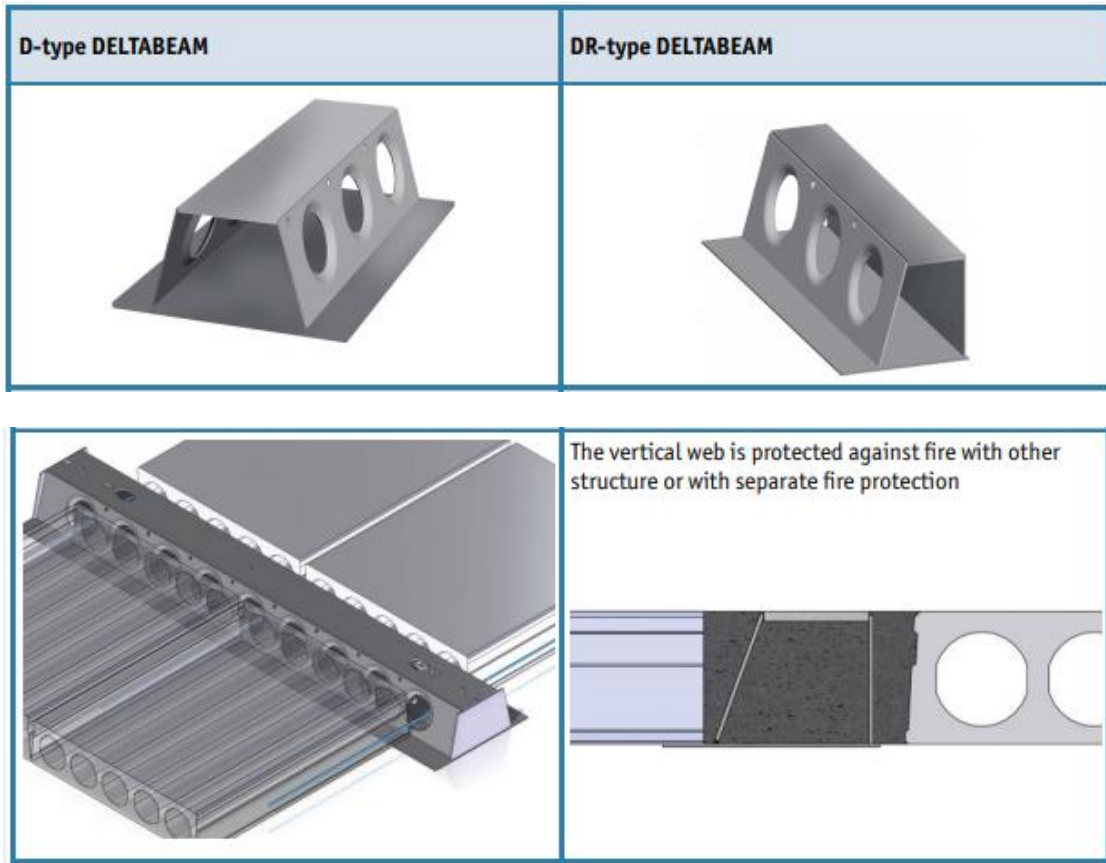
1.2 Σιδηροδοκοί εγκιβωτισμένες σε σκυρόδεμα για πλάκες χωρίς δοκούς (Slim floor beams)

Ο εγκιβωτισμός σιδηροδοκών σε σκυρόδεμα αποτελεί συνήθη κατασκευαστική πρακτική σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες τα τελευταία χρόνια. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται επίπεδες πλάκες χωρίς δοκούς οδηγώντας σε άριστο αρχιτεκτονικά τελικό αποτέλεσμα. Οι λεπτές πλάκες (slim floor slabs) αποτελούν μια προηγμένη μορφή σύμμικτων πλακών όπου η δοκός είναι εγκιβωτισμένη σε σκυρόδεμα και βρίσκεται στο εσωτερικό της πλάκας. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται οι προεξοχές (κρέμαση) των δοκών στο κάτω μέρος της πλάκας και έτσι μειώνεται το απαιτούμενο ύψος ορόφου σε κτηριακές κατασκευές εξοικονομώντας ωφέλιμο χώρο. Το μικρό ύψος της διατομής της δοκού σε συνδυασμό με την μεγάλη καμπτική ικανότητα δίνει τη δυνατότητα κατασκευής μεγάλων ανοιγμάτων (12-16μ) ελαχιστοποιώντας έτσι τα απαιτούμενα υποστυλώματα. Παράλληλα η απουσία μεγάλων διατομών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ίδιου βάρους της κατασκευής, πράγμα που μειώνει τα σεισμικά φορτία και συνεπώς οι απαιτήσεις όπλισης των δομικών στοιχείων είναι μειωμένες. Δεδομένου ότι η μεταφορά των δυνάμεων στα υποστυλώματα δεν γίνεται μέσω του σκυροδέματος αλλά μέσω των σιδηροδοκών δεν παρουσιάζονται προβλήματα διάτρησης. Τέλος ο εγκιβωτισμός του χάλυβα στο σκυρόδεμα εξασφαλίζει επαρκή πυρασφάλεια και αντοχή στη διάβρωση.

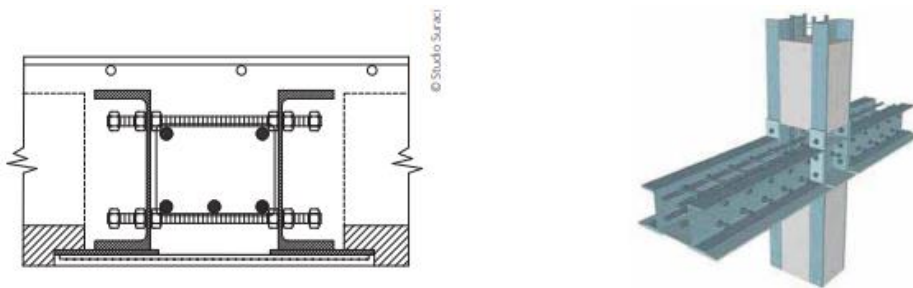
Οι μορφές των διατομών που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους κατασκευές ποικίλουν (Σχήμα 1.2, 1.3, 1.4, 1.5). Στην υπόψη μελέτη έχουν χρησιμοποιηθεί μεταλλικές διατομές τραπεζοειδούς μορφής αλλά επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατομές μορφής «I», κοίλες τετραγωνικές και άλλες. Η συγκεκριμένη διατομή τραπεζοειδούς μορφής περιλαμβάνει οπές στον κορμό τόσο για την πλήρωση του εσωτερικού της διατομής με σκυρόδεμα όσο και για την διέλευση εγκάρσιων οπλισμών. Το κάτω πέλαμα είναι διευρυμένο ώστε να υπάρχει η δυνατότητα έδρασης προκατασκευασμένων πλακών με ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε επίπεδα ταχύτητας κατασκευής και οικονομίας. Παράλληλα η δοκός μπορεί να σκυροδετηθεί και με τον κλασικό τρόπο με χρήση ικριωμάτων. Με την σκλήρυνση του σκυροδέματος δημιουργείται μια σύμμικτη διατομή υψηλής δυσκαμψίας και αντοχής με την σιδηροδοκό πλήρως εγκιβωτισμένη στο σκυρόδεμα. Λόγω της κλειστής τραπεζοειδούς μορφής της διατομής η δοκός αναπτύσσει υψηλή στρεπτική αντοχή χωρίς να αναπτύσσονται φαινομένων αστάθειας και στρέβλωσης. Η διατμητική σύνδεση δοκού-πλάκας επιτυγχάνεται τόσο με χρήση διατμητικών ήλων όσο και με χρήση εγκάρσιου οπλισμού ο οποίος διαπερνά τον κορμό της δοκού δια μέσω των οπών.



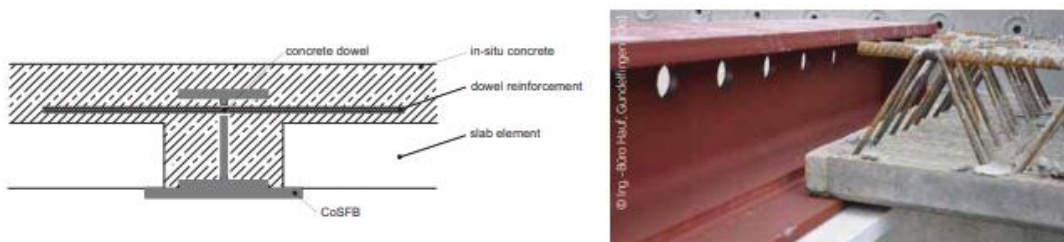
Σχήμα 1.2: Τυπικές διατομές σιδηροδοκών εγκιβωτισμένες σε σκυρόδεμα.



Σχήμα 1.3: Τυπικές διατομές σιδηροδοκών εγκιβωτισμένες σε σκυρόδεμα μορφής «Δ» (από Ρεϊκό 2020)



Σχήμα 1.4: Τυπική διατομή σιδηροδοκού εγκιβωτισμένη σε σκυρόδεμα μορφής «HB» (από ArcelorMittal 2020)



Σχήμα 1.5: Τυπική διατομή σιδηροδοκού εγκιβωτισμένη σε σκυρόδεμα μορφής «I» (από ArcelorMittal 2020).

1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο εγκιβωτισμός σιδηροδοκών σε σκυρόδεμα για τη δημιουργία λεπτών πλακών χωρίς δοκούς σε σύγκριση με τις συνήθεις σύμμικτες δοκούς, καθιστούν αναγκαία την καθιέρωση τους στα σύγχρονα δομικά έργα. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του συγκεκριμένου τύπου σύμμικτων δοκών μέσω πειραματικών δοκιμών για τον προσδιορισμό της αντοχής τους. Παράλληλα μελετάται η αξιοπιστία της μοντελοποίησης των πειραματικών δοκιμών, κατά την οποία η προσομοίωση της μεταλλικής διατομής γίνεται με χρήση ευθύγραμμων ράβδων οπλισμού για την δημιουργία απλοποιημένων μοντέλων τριών διαστάσεων. Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα αριθμητικά μοντέλα με τα αντίστοιχα πειραματικά, είναι δυνατόν να εξαχθούν ωφέλιμα συμπεράσματα σχετικά με την χρήση αυτής της μεθόδου μοντελοποίησης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών των δοκιμών σε κάμψη.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο μελέτης και συγκεκριμένα στις σύμμικτες κατασκευές και τα πλεονεκτήματα του εγκιβωτισμού σιδηροδοκών σε σκυρόδεμα. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία. Παρουσιάζετε η γεωμετρία των δοκιμών, τα υλικά κατασκευής, η πειραματική διάταξη, η εισαγωγή των δοκιμών σε αυτήν, τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζετε αναλυτικά ο τρόπος μοντελοποίησης των δοκιμών. Περιλαμβάνει όλα τα στάδια κατασκευής των τρισδιάστατων μοντέλων, τον τρόπο φόρτισης τους και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και η σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα των αναλυτικών μοντέλων. Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που εξήχθησαν τόσο από την πειραματική διαδικασία όσο και από την αριθμητική μοντελοποίηση.

2 Πειραματικές δοκιμές

2.1 Εισαγωγή

Για της πειραματική διερεύνηση της αντοχής των σύμμικτων κοίλων διατομών για πλάκες χωρίς δοκούς χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκίμια-δοκοί. Τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν και συντηρήθηκαν από ειδικό συνεργείο στο εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και επιβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Μετά την σκυροδέτηση και σκλήρυνση τους και πριν την εισαγωγή τους στην πειραματική διάταξη τα δοκίμια περιστράφηκαν κατά 180 μοίρες. Αυτό έγινε προκειμένου να διερευνηθεί επιπλέον η συμπεριφορά του συγκεκριμένου είδους δοκών υπό την επίδραση αρνητικών ροπών. Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα βρίσκεται στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της σχολής Πολιτικών μηχανικών του ΕΜΠ. Κατά την διαδικασία της δοκιμής κάθε ένα από τα δοκίμια τοποθετήθηκε στην πειραματική διάταξη με αμφιέριστη στήριξη ενώ στο μέσον τους εφαρμόστηκε ένα σταδιακά αυξανόμενο φορτίο P μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Με χρήση διαφόρων μετρητικών οργάνων συνδεδεμένα σε ηλεκτρονικούς καταγραφείς όλα τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν στον κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή του εργαστηρίου για επεξεργασία και περεταίρω ανάλυση. Στην συνέχεια παρουσιάζετε αναλυτικά η διαδικασία των πειραματικών δοκιμών.

2.2 Περιγραφή των δοκιμίων

Τα 6 δοκίμια έχουν μήκος 8,6m με τις υπόλοιπες διαστάσεις να μην μπορούν να δημοσιοποιηθούν λόγω εμπιστευτικότητας των στοιχείων που διατέθηκαν από την εταιρεία η οποία διαθέτει τα δοκίμια. Η ονοματολογία των δοκιμίων που επιλέχθηκε και με την οποία γίνεται αναφορά σε αυτά στη συνέχεια είναι H1-H6. Πρόκειται για σύμμικτες δοκούς οι οποίες αποτελούνται από μια τραπεζοειδή χαλύβδινη διατομή με οπές στον κορμό (Σχήμα 2.1), η οποία εγκιβωτίζεται σε σκυρόδεμα. Η χαλύβδινη διατομή στο εσωτερικό των δοκών έχει διαφορετικές διαστάσεις και πάχη ελασμάτων σε κάθε δοκίμιο. Το εύρος του πάχους των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι από 5 έως 25 χιλιοστά. Το πέλμα των σιδηροδοκών όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 είναι πεπλατυσμένο ενώ στην αρχή και στο τέλος τους είναι τοποθετημένη κατακόρυφη μετωπική πλάκα μεγάλου πάχους. Οι εξωτερικές μορφές της διατομής σκυροδέματος των 6 σύμμικτων δοκών διαφέρουν μεταξύ τους. Τα ζευγάρια δοκιμίων H1,H2 και H3,H4 έχουν μορφή διατομής παραλληλογράμμου και μορφής «Γ» αντίστοιχα, αλλά με διαφορετικές εξωτερικές διαστάσει και εσωτερικό οπλισμό μεταξύ των ζευγαριών. Τα δοκίμια H5 και H6 έχουν μορφή διατομής παραλληλογράμμου και ανάποδου «Γ» αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια H1-H6 που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2 και 2.3.

Στο εσωτερικό των δοκών έχει τοποθετηθεί επιπλέον εγκάρσιος θλιβόμενος και εφελκυσμένος οπλισμός καθώς και διαμήκης οπλισμός σε μορφή συνδετήρων. Η διατμητική σύνδεση χάλυβα-σκυροδέματος επιτυγχάνεται με χρήση διατμητικών ήλων στο άνω πέλμα της σιδηροδοκού (Σχήμα 2.1) καθώς και με ευθύγραμμο οπλισμό ο οποίος διαπερνά τον κορμό της χαλύβδινης διατομής μέσω οπών μεγάλης διαμέτρου. Ομοίως λόγω εμπιστευτικότητας δεν δημοσιοποιούνται τα σχέδια που περιλαμβάνουν τις

αριθμητικές διαστάσεις των διατομών καθώς και την εσωτερική διαρρύθμιση των οπλισμών των δοκιμίων.



Σχήμα 2.1: Χαλύβδινη διατομή μορφής τραπεζίου.



Σχήμα 2.2: Εξωτερική διατομή δοκιμίων H4,H2 (αριστερά πάνω, κάτω) και H3,H4 (δεξιά πάνω, κάτω).



Σχήμα 2.3: Εξωτερική διατομή δοκιμίων H5,H6.

2.3 Υλικά κατασκευής

Το υλικό κατασκευής των σιδηροδοκών είναι ο χάλυβας S 355J2+N οι οποίες εγκιβωτίζονται σε σκυρόδεμα ποιότητας C30/37. Για την όπλιση των δοκών χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινοι ράβδοι οπλισμού κατηγορίας B500C. Για τον ακριβή προσδιορισμό της ποιότητας του σκυροδέματος, του δομικού χάλυβα και του χάλυβα οπλισμού πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα. Πιο συγκεκριμένα, δώδεκα (12) δοκίμια χάλυβα οπλισμού διαμέτρων $\Phi 8$ έως $\Phi 12$ και εικοσιένα (21) δοκίμια δομικού χάλυβα πάχους από 5 έως 15 χιλιοστά υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού για τον προσδιορισμό του ορίου διαρροής και θραύσης. Επίσης σκυροδετήθηκαν δώδεκα (12) κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 15* 30 εκατοστών, εκ των οποίων τα εννέα (9) υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης 28 ημέρες μετά την σκυροδέτηση και τα υπόλοιπα τρία (3) σε 112 ημέρες αντίστοιχα, ήτοι κατά την ημέρα πραγματοποίησης της πρώτης δοκιμής. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών των δοκιμίων κατά τον Ευρωκώδικα συνοψίζονται στους Πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος C30/37 κατά EN 1991, 1992

Σκυρόδεμα C30/37	
Μέση θλιπτική αντοχή	$f_{ck}=30.000 \text{ kPa}$
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή	$f_{cm}=38.000 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας	$E_{cm}=28,73 \text{ GPa}$
Ειδικό βάρος	$\gamma=24 \text{ kN/m}^3$

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες δομικού χάλυβα S355 κατά EN 1991, 1993

Χάλυβας S355	
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	$f_{yk}=355.000 \text{ kPa}$
Εφελκυστική αντοχή	$f_u= 470.000 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας	$E_s=210 \text{ GPa}$
Ειδικό βάρος	$\gamma=78 \text{ kN/m}^3$

Πίνακας 2.3: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα οπλισμού B500c κατά EN 1991, 1992

Χάλυβας S420	
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	$f_{yk}=500.000 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας	$E_s=200 \text{ GPa}$
Ειδικό βάρος	$\gamma=78 \text{ kN/m}^3$

2.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη πραγματοποίηση των δοκιμών βρίσκεται στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολίτικων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αποτελείται από τέσσερα όμοια υποστυλώματα διατομής διπλού «Γ» εδραζόμενα πάνω σε ισχυρό δάπεδο σκυροδέματος πάχους 80 εκατοστών, τέσσερις δοκούς σύζευξης εκ των οποίων οι δύο είναι τύπου Hem και οι άλλες δύο κιβωτοειδούς διατομής, καθώς και οριζόντιους και κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας (Σχήμα 2.4).

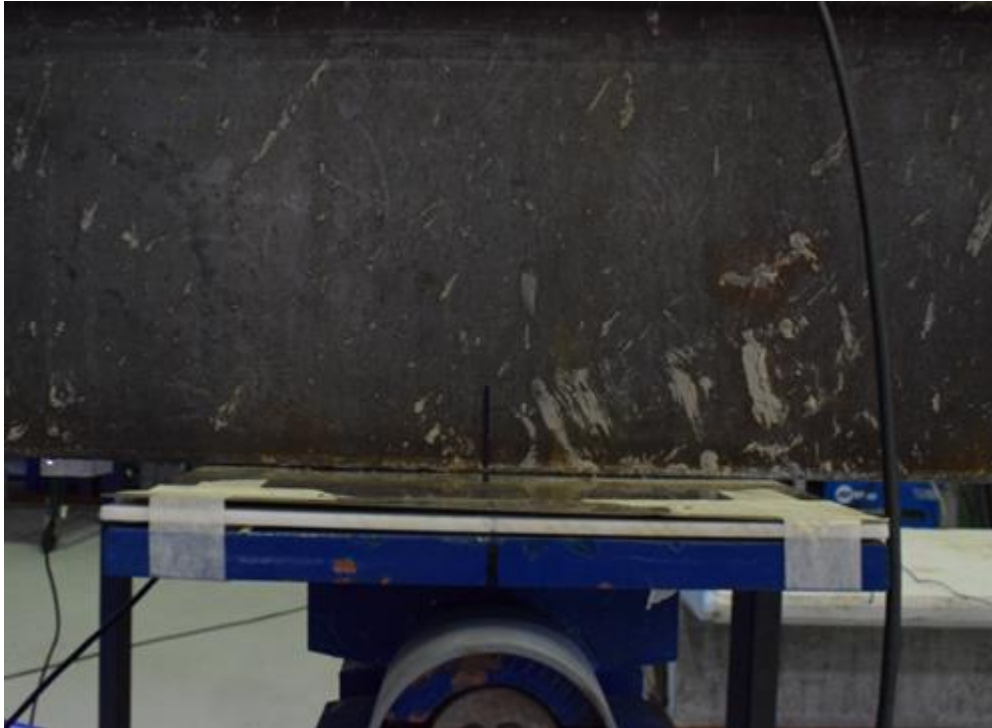
Το κατακόρυφο φορτίο επιβλήθηκε από υδραυλικό έμβολο ενεργού μήκους 500mm με ικανότητα φόρτισης 2.5 MN. Το έμβολο τοποθετήθηκε πάνω στη πειραματική διάταξη σε διατομή διπλού «Γ» η οποία αναρτήθηκε από τις δύο κιβωτοειδούς διατομής δοκούς σύζευξης. Την πειραματική διάταξη συμπληρώνουν δύο μεταλλικές στηρίξεις (Σχήμα 2.5) οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση 7,2 μέτρων και οι οποίες προσομοιώνουν την άρθρωση προκειμένου να επιτευχθεί αμφιπροέχουσα αρθρωτή στήριξη του δοκιμίου. Η κάθε άρθρωση συνδέεται με την κύρια πειραματική διάταξη μέσω δύο αντηρίδων κοίλης κυκλικής διατομής ενώ επιπλέον εδράζεται στο ίδιο ισχυρό δάπεδο με την υπόλοιπη διάταξη συνδεδεμένη στα άκρα της με δύο ντίζες. Για την ελεύθερη ολίσθηση του δοκιμίου, πάνω σε κάθε άρθρωση είναι τοποθετημένη πλάκα τεφλόν καλυμμένη από πλάκα αλουμινίου (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.4: Η πειραματική διάταξη.



Σχήμα 2.5: Μεταλλική στήριξη προσομοίωσης άρθρωσης.



Σχήμα 2.6: Πλάκα τεφλόν και αλουμινίου για την έδραση του δοκιμίου στην άρθρωση.

2.5 Τοποθέτηση δοκιμίων στην πειραματική διάταξη

Η διαδικασία τοποθέτησης των δοκιμίων στην πειραματική διάταξη πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενη περιστροφή κάθε δοκιμίου περί τον διαμήκη άξονα κατά 180 μοίρες. Αυτή η περιστροφή έγινε λόγω του ότι η πειραματική διαδικασία έχει ως αντικείμενο μελέτης την εκτίμηση της αντοχής των σύμμικτων αυτών δοκών υπό την επίδραση αρνητικών ροπών. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την προώθηση των δοκιμίων στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης και την τελική τοποθέτηση πάνω στις στηρίξεις.

2.5.1 Περιστροφή δοκιμίων

Οι δοκοί H3 και H4 λόγω της μορφής «Γ» της διατομής τους τοποθετήθηκαν σε ειδική μεταλλική κατασκευή η οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή διεξαγωγή της περιστροφής χωρίς την αστοχία των δύο «φτερών» των διατομών. Η κατασκευή αποτελούνταν από δύο όμοια τμήματα τραπεζοειδούς σχηματισμού τα οποία περιέβαλλαν την διατομή στο εσωτερικό τους και τοποθετήθηκαν στα σημεία που βρίσκονται οι σπείρες ανάρτησης της δοκού. Τα δύο αυτά τμήματα συνδέονταν μεταξύ τους με τέσσερις διαμήκεις μεταλλικές διατομές μορφής «Γ» στην άνω και κάτω πλευρά της κατασκευής. Η κατασκευή περιστροφής παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 2.7.

Στις άνω σπείρες ανάρτησης της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 τοποθετήθηκαν «φασκιές» μήκους 5 μέτρων ενώ στις κάτω σπείρες τοποθετήθηκαν αλυσίδες με δυνατότητα αυξομείωση του μήκους τους. Τόσο η «φασκιές» όσο και οι αλυσίδες τοποθετήθηκαν στα δυο άκρα μεταλλικής διατομής διπλού «Τ» η οποία αναρτήθηκε από την γερανογέφυρα του εργαστηρίου και είχε μήκος όσο η απόσταση των δυο σπειρών ανάρτησης (Σχήμα 2.9).

Κατά την πρώτη φάση της περιστροφής η το δοκίμιο ανυψώθηκε ελεγχόμενα ώστε η αλυσίδα που συνδέεται στην κάτω σπείρα να ξεκινήσει την περιστροφή του μέχρι τις 90 μοίρες για να ισορροπήσει στη συνέχεια με την βοήθεια της μεταλλικής κατασκευής (Σχήμα 2.10). Στην δεύτερη φάση μετά από κατάλληλη προσαρμογή του μήκους της αλυσίδας συνεχίστηκε η ανύψωση του δοκιμίου με ταυτόχρονη μετάθεση του κατά την διεύθυνση της περιστροφής έτσι ώστε το δοκίμιο να πάρει γωνία μεγαλύτερη των 90 μοιρών, να στηριχθεί στις φασκιές και ελεγχόμενα να περιστραφεί πλήρως (Σχήμα 2.11) .

Οι υπόλοιπες τέσσερις δοκοί (H1,H2,H5,H6) λόγω της απλούστερης μορφής της διατομής τους (μορφή παραλληλογράμμου) και δεδομένου ότι δεν υπήρχε κίνδυνος αστοχίας περιστράφηκαν χωρίς τη χρήση της ειδικής μεταλλικής κατασκευής. Στην κάθε άνω σπείρα ανάρτησης τοποθετήθηκε «φασκιά» μήκους 5m ενώ στην κάτω σπείρα ανάρτησης τοποθετήθηκε αλυσίδα αυξομειούμενου μήκους. Με αντίστοιχη διαδικασία με αυτή των δοκών H3-H4 και τη χρήση της γερανογέφυρας τα δοκίμια αρχικά περιστράφηκαν κατά 90 μοίρες μέχρι να ισορροπήσουν και στην συνέχεια περιστράφηκαν πλήρως μέχρις ότου ακουμπήσουν ξανά στο δάπεδο (Σχήμα 2.12)



Σχήμα 2.7: Μεταλλική κατασκευή για την περιστροφή των δοκιμίων H3,H4 προσαρμοσμένες στο δοκίμιο H3.



Σχήμα 2.8: Τοποθέτηση φασκιάς στην άνω σπείρα ανάρτησης.



Σχήμα 2.9: Σύστημα μεταφοράς των δοκιμίων με χρήση της γερανογέφυρας.



Σχήμα 2.10: Δοκίμιο Η3 κατά το τέλος της πρώτης φάσης της ανατροπής.



Σχήμα 2.11: Δοκίμιο Η3 κατά τη δεύτερη φάση της ανατροπής.



Σχήμα 2.12: Δοκίμιο H2 κατά τη δεύτερη φάση της ανατροπής.

2.5.2 Εισαγωγή των δοκιμίων στην πειραματική διάταξη

Για την τοποθέτηση των δοκιμίων στην πειραματική διάταξη αρχικά έγινε απελευθέρωση της μιας άρθρωσης από τις αντηρίδες που την συνδέουν με την κύρια διάταξη και από την μια ντίζα εκ των δύο που την συνδέει με το δάπεδο. Με αυτό τον τρόπο η άρθρωση έχει τη δυνατότητα να περιστραφεί γύρω από το ένα άκρο της και να «ανοίξει». Έτσι ήταν δυνατόν να γίνει ευθύγραμμη προώθηση του δοκιμίου μέσα στην διάταξη της δοκιμής.

Προκειμένου να μην υπάρχει πρόβλημα αστάθειας κατά μεταφορά των δοκών με την γερανογέφυρα τοποθετήθηκε στο άγκιστρο της διατομή διπλού «T» με συνολικό μήκος ίσο με την απόσταση των δύο σπείρων ανάρτησης, από όπου με την χρήση δύο φασκιών έγινε η ανάρτηση της δοκού. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή της δοκού στην περιγραμματική διάταξη μέχρι του σημείου που ήταν δυνατόν με την γερανογέφυρα, και στη συνέχεια τοποθετήθηκε πάνω σε τετραγωνικό αμαξίδιο (Σχήμα 2.13) προκειμένου να συνεχιστεί ανεμπόδιστα η μετακίνηση του δοκιμίου μέχρι την ακριανή άρθρωση. Η κίνηση του αμαξιδίου επιτεύχθηκε με τη χρήση χειροκίνητου εργάτη (Σχήμα 2.14). ολοκληρώθηκε η μεταφορά η δοκός αναρρώθηκε εκ νέου από την γερανογέφυρα προκειμένου να ανυψωθεί στο ύψος της άρθρωσης και να τοποθετηθεί πάνω στις αλουμιένιες επιφάνειες. Με χρήση συστημάτων βαθμονόμησης τύπου λείζερ, έγινε ακριβές κεντράρισμα του δοκιμίου πάνω στην διάταξη έτσι ώστε η τετραγωνική πλάκα του εμβόλου να πατάει στο μέσο του δοκιμίου και τα άκρα του να ισαπέχουν από την εξωτερική παρειά της κάθε στήριξης. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε μια από τις έξι δοκούς.



Σχήμα 2.13: Προώθηση δοκιμίου Η6 με χρήση αμαξιδίου .



Σχήμα 2.14: Μηχανικός εργάτης για την μετακίνηση του αμαξιδίου.

2.6 Εξοπλισμός μετρητικών οργάνων

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών και για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις:

Μέτρηση της επιβαλλόμενης δύναμης από το έμβολο της υδραυλικής μηχανής και της αντίστοιχης κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσον της δοκού, της σχετικής μετακίνησης σκυροδέματος και χαλύβδινης διατομής, των διαμήκων συνεπίπεδων παραμορφώσεων του χάλυβα σε προκαθορισμένα σημεία της κατακόρυφης μετατόπισης του δοκιμίου στο σημείο επιβολής του φορτίου, καθώς και μέτρηση της στροφής του δοκιμίου ως προς τον οριζόντιο άξονα. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν τρία ξεχωριστά συστήματα οργάνων, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

2.6.1 Όργανα μέτρησης μετατοπίσεων (LVDTs)

Χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) όργανα μέτρησης μετατοπίσεων (LVDTs) σε κάθε δοκίμιο για τη μέτρηση της σχετικής μετακίνησης σκυροδέματος-χάλυβα της σύμμικτης διατομής (Σχήματα 2.15, 2.16, 2.17). Τα όργανα τοποθετήθηκαν στην άνω πλευρά του δοκιμίου πάνω στη σιδηροδοκό η οποία βρισκόταν εξωτερικά του σκυροδέματος. Για την τοποθέτηση τους χρησιμοποιήθηκαν μαγνήτες υψηλής διατμητικής αντοχής οι οποίοι προσαρμόστηκαν στη βάση κάθε οργάνου. Η τελική τοποθέτηση των LVDTs έγινε κατά τη διαμήκη διεύθυνση του δοκιμίου και πάνω στο γεωμετρικό άξονα συμμετρίας του και με κατεύθυνση προς το σημείο επιβολής του φορτίου. Παράλληλα κατασκευάστηκαν ειδικά αλουμινένια στοιχεία μορφής «Π» τα οποία στερεώθηκαν στη επιφάνια του σκυροδέματος κάθε δοκιμίου (Σχήμα 2.15, 2.16). Στο άνω οριζόντιο τμήμα των «Π» ακουμπούσε η μύτη κάθε LVDT και σε τρόπο τέτοιο ώστε να καθοριστεί μηδενικό σημείο αναφοράς των μετρήσεων (Σχήμα 2.17). Σημειώνεται ότι μόνο για το δοκίμιο H5 η τοποθέτηση των LVDT έγινε με χρήση αλουμινένιων στοιχείων μορφής «Γ» τα οποία εδράζονταν στην μία πλευρά του δοκιμίου. Επιπλέον δυο (2) όργανα μέτρησης μετατοπίσεων (LVDTs) τοποθετήθηκαν με κατακόρυφο προσανατολισμό στα σημεία των δύο αρθρώσεων (Σχήμα 2.18) ώστε να καταγραφούν τυχόν μετακινήσεις των στηρίξεων (Σχήμα 2.18). Όλα τα όργανα ήταν συνδεδεμένα με ηλεκτρονικούς καταγραφείς για την μεταφορά των δεδομένων στον κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.



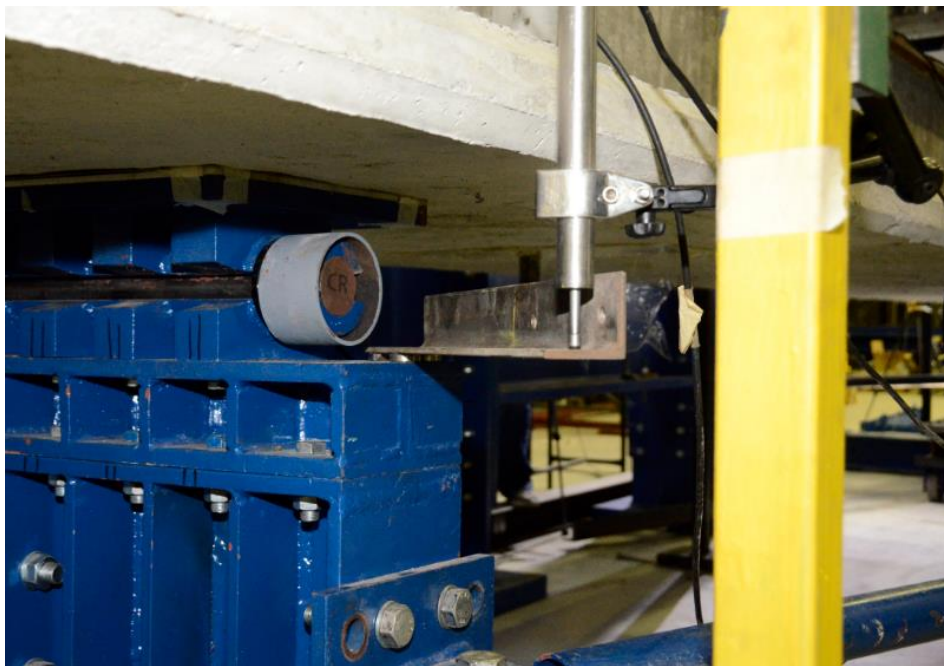
Σχήμα 2.15: Προσαρμοσμένα αλουμινένια «Π» στο δοκίμιο Η3.



Σχήμα 2.16: Προσαρμοσμένα αλουμινένια «Π» στο δοκίμιο Η2.



Σχήμα 2.17: Όργανο μέτρησης μετατοπίσεων (LVDT).



Σχήμα 2.18: Όργανο μέτρησης μετατοπίσεων (LVDT) τοποθετημένο στην άρθρωση.

2.6.2 Μονοδιευθυντικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gages)

Οκτώ (8) μονοδιευθυντικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gages) (Σχήμα 2.20) χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των συνεπίπεδων διαμήκων παραμορφώσεων της επιφάνειας του χάλυβα στη άνω πλευρά κάθε δοκιμίου. Επιπλέον τέσσερα (4) Strain

Gages τοποθετήθηκαν στην κάτω πλευρά των δοκιμίων H5 και H6 στην επιφάνεια του χάλυβα. Τα Strain Gages που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μήκος αναφοράς (active gage length) 10 mm και ονομαστική αντίσταση 120 Ω. Η τοποθέτηση τους έγινε σύμφωνα με της οδηγίες του εργοστασίου κατασκευής και με φορά τέτοια ώστε ο διαμήκης άξονας τους να συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου ενώ η συγκόλληση τους έγινε με ειδική εποξειδική κόλλα συνιστούμενη από τον κατασκευαστή. Η επιφάνεια εφαρμογής των αισθητήρων προετοιμάστηκε έτσι ώστε να είναι λεία και απαλλαγμένη από κάθε είδους σκουριά ή σαθρά υλικά Σχήμα (2.19).

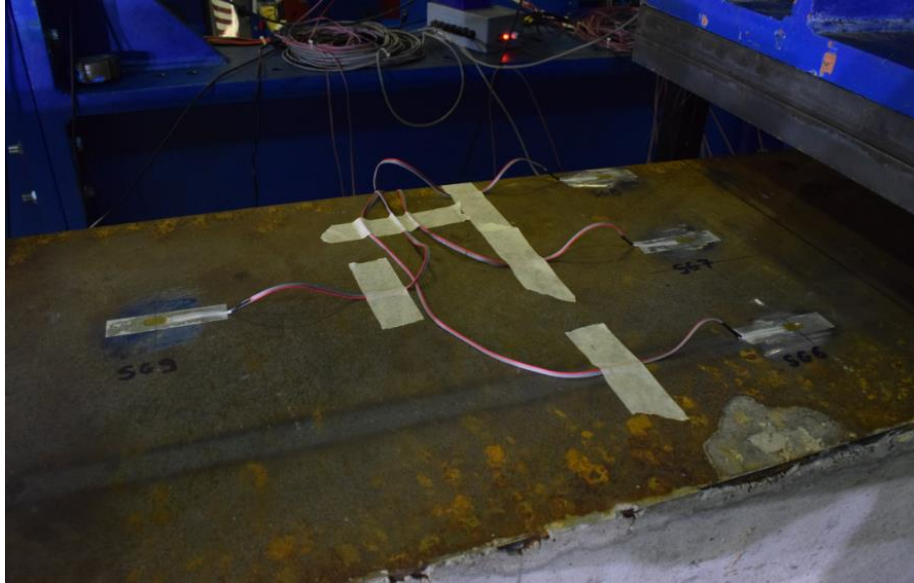
2.6.3 Μετρητές θέσης συρματόσχοινου και κλισιόμετρα

Δυο (2) μετρητές θέσης συρματόσχοινου (Wired) (Σχήμα 2.21) χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της κατακόρυφης μετατόπισης του δοκιμίου στο σημείο επιβολής του φορτίου που ελήφθησαν απ' ευθείας απ' το έμβολο . Τα όργανα τοποθετήθηκαν πάνω σε μεταλλικούς αμετάθετους στύλους στη δεξιά και την αριστερή πλευρά του δοκιμίου με το άκρο του συρματόσχοινου να στερεώνεται με μαγνήτη στη άνω πλευρά του δοκιμίου πάνω στη χαλύβδινη διατομή.

Δύο (2) κλισιόμετρα (Σχήμα 2.22) χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των κλίσεων (γωνιών) του δοκιμίου με τον οριζόντιο άξονα κατά την διάρκεια του πειράματος. Τα κλισιόμετρα τοποθετήθηκαν με χρήση μαγνήτη στην χαλύβδινη επιφάνεια στην άνω πλευρά κάθε δοκιμίου.



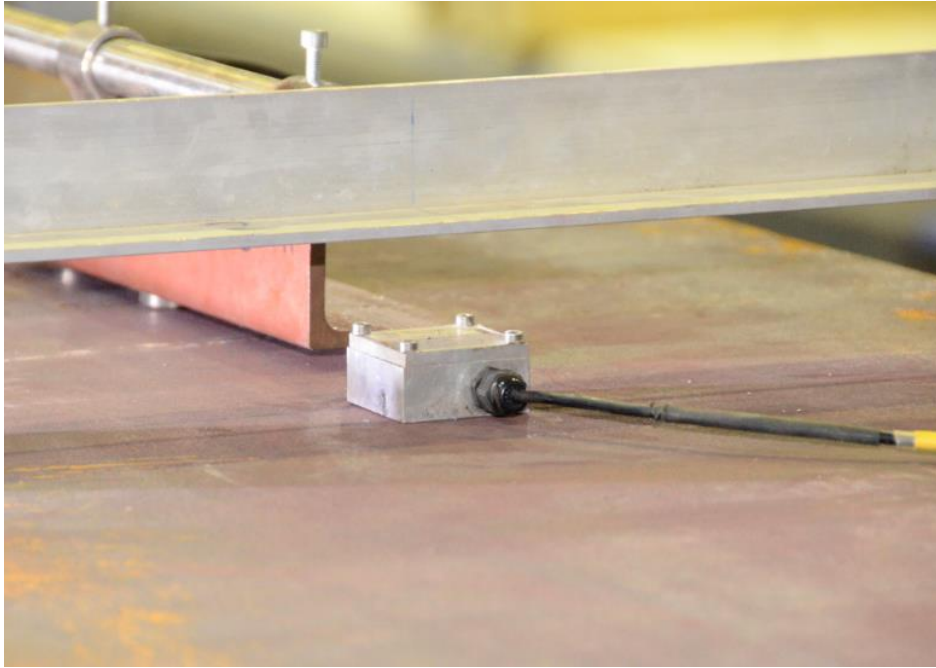
Σχήμα 2.19: Τοποθέτηση Strain Gage.



Σχήμα 2.20: Μονοδιευθυντικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gages) στην άνω πλευρά του δοκιμίου.



Σχήμα 2.21: Μετρητής θέσης συρματοσχοινού .



Σχήμα 2.22: Κλισιόμετρο.

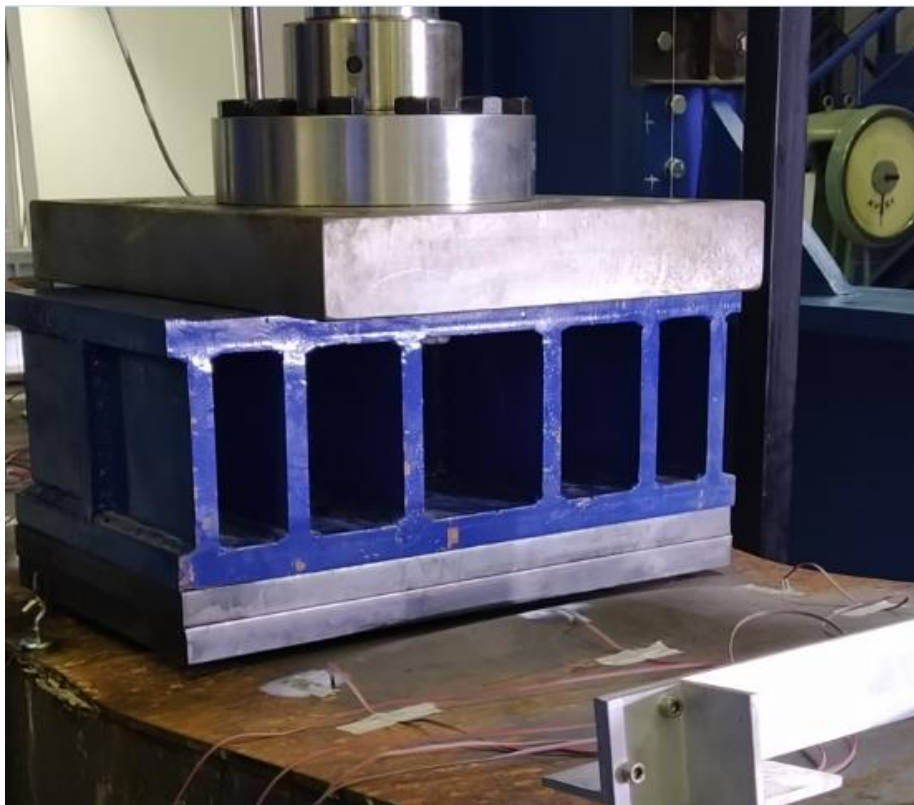
2.7 Μορφή και διαδικασία πειραματικής δοκιμής

Τα δοκίμια H1-H6 μετά την περιστροφή τους τοποθετήθηκαν ένα-ένα στην πειραματική διάταξη σχηματίζοντας μια αμφιπροέχουσα αμφιέριστη δοκό με άνοιγμα $L=7.2$ μέτρων. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων με εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης στο μέσω του ανοίγματος L μέσω του υδραυλικού εμβόλου. Στη βάση του εμβόλου που έρχεται σε επαφή με την άνω παρειά των δοκών τοποθετήθηκαν συγκεκριμένος αριθμός παραλληλόγραμμων μεταλλικών πλακών ύψος 10 και 5 εκατοστών ανάλογα το ύψος του κάθε δοκιμίου προκειμένου να μειωθεί στο ελάχιστο η απόσταση του εμβόλου από το δοκίμιο σε κατάσταση μηδενικού βέλους (Σχήμα 2.23). Έτσι αποφεύχθηκε ο τερματισμός της διαδρομής της κατακόρυφης μετακίνησης του εμβόλου πριν την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

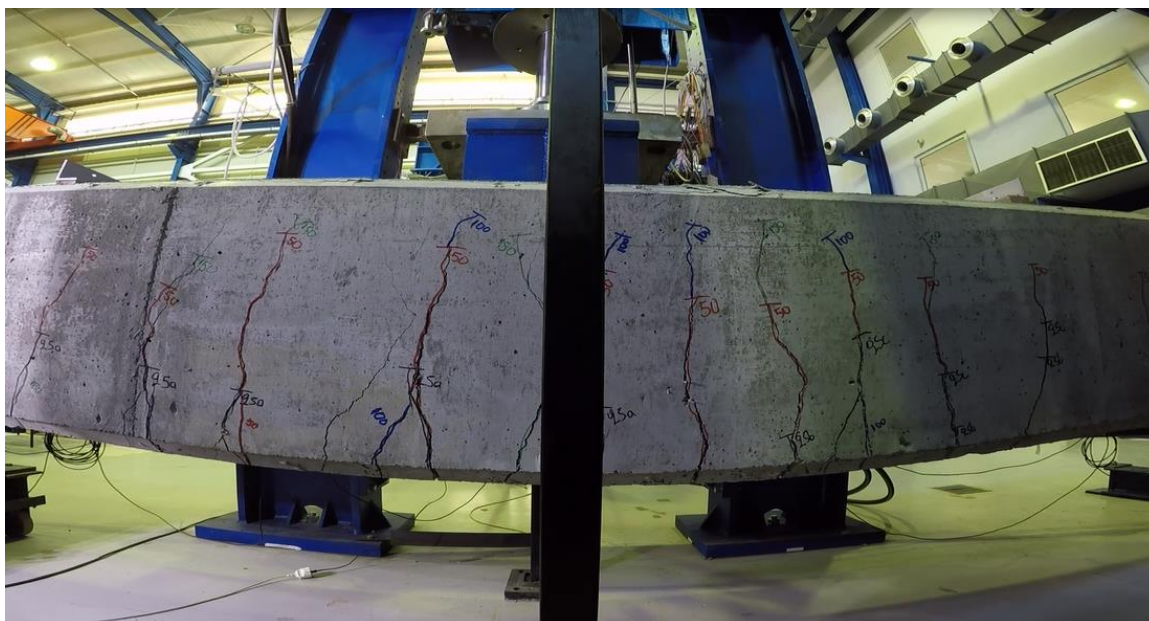
Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε ως εξής: Κατά την έναρξη της διαδικασίας χειροκίνητα και με αργό βήμα κατεβαίνει το έμβολο προκειμένου να έρθει σε οριακή επαφή με το δοκίμιο. Από τη στιγμή αυτή ξεκινά η στατική φόρτιση του δοκιμίου με προοδευτικά αυξανόμενο φορτίο. Αρχικά γίνεται μια προφόρτιση του δοκιμίου εφαρμόζοντας τρεις αργούς κύκλους φόρτισης έτσι ώστε να βρεθεί στην τελική του θέση. Με την είσοδο στον τέταρτο κύκλο φόρτισης ξεκινάει το βασικό κομμάτι της δοκιμής. Κατά την διάρκεια της δοκιμής σημειώνεται πάνω στο δοκίμιο η πορεία των ρωγμών που σχηματίζονται στο σκυρόδεμα (Σχήμα 2.24). Η πειραματική δοκιμή ολοκληρώνεται με την αστοχία του δοκιμίου η οποία έχει οριστεί ως η στιγμή αδυναμίας παραλαβής μεγαλύτερου φορτίου σε συνδυασμό με την ανάπτυξη μεγάλων πλαστικών στροφών με αποτέλεσμα την εκτεταμένη αύξηση κατακόρυφων ρωγμών. Μετά το πέρας της δοκιμής το έμβολο επιστρέφει χειροκίνητα στην αρχική του θέση και με προσοχή απομακρύνονται όλα τα μετρητικά όργανα από τις επιφάνειες του δοκιμίου και αποσυνδέονται από τους ψηφιακούς καταγραφείς.

2.8 Απομάκρυνση δοκιμίου από την πειραματική διάταξη

Το δοκίμιο το οποίο μετά το πέρας της δοκιμής ήταν πλέον σε σχήμα «U» αναρτήθηκε από την γερανογέφυρα. Στην συνέχεια έγινε απελευθέρωση της μιας άρθρωσης από τις αντηρίδες που τη συνδέουν με την κύρια διάταξη καθώς και από την ντίζα που αγκυρώνει την μία πλευρά της άρθρωσης στο δάπεδο προκειμένου να μπορέσει να περιστραφεί και να ανοίξει ώστε να βγει το δοκίμιο. Το δοκίμιο αφού μετακινήθηκε με την γερανογέφυρα έξω από την πειραματική διάταξη, τοποθετήθηκε στη συνέχεια στο αμαξίδιο μεταφοράς. Λόγω του μεγάλου μόνιμου βέλους κάμψης που είχε αποκτήσει, η τοποθέτηση στο αμαξίδιο έγινε με προσοχή και η μετακίνηση του έγινε με ειδικό χειροκίνητο εργάτη για την διευκόλυνση της εξαγωγής. Αφού καθαρίστηκε η διαδρομή του αμαξιδίου, πραγματοποιήθηκε ευθύγραμμη εξαγωγή του δοκιμίου από την πειραματική διάταξη και εν συνεχεία ανάρτηση του από την γερανογέφυρα για μεταφορά μέχρι το τελικό σημείο αποθήκευσης. Στα σχήματα 2.23-2.26 παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες από τα δοκίμια μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 2.23: Παραλληλόγραμμα μεταλλικές πλάκες προσαρμοσμένες στη βάση του εμβόλου.



Σχήμα 2.24: Επισήμανση των ρωγμών για παρακολούθηση της πορείας τους .



Σχήμα 2.25: Δοκίμιο Η1 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής και την αφαίρεση των μετρητικών οργάνων.



Σχήμα 2.26: Μεταφορά του δοκιμίου H1 στην τελική θέση αποθήκευσης του.

3 Αναλυτικά μοντέλα δοκιμίων

3.1 Το πρόγραμμα και η μέθοδος προσομοίωσης των δοκιμίων

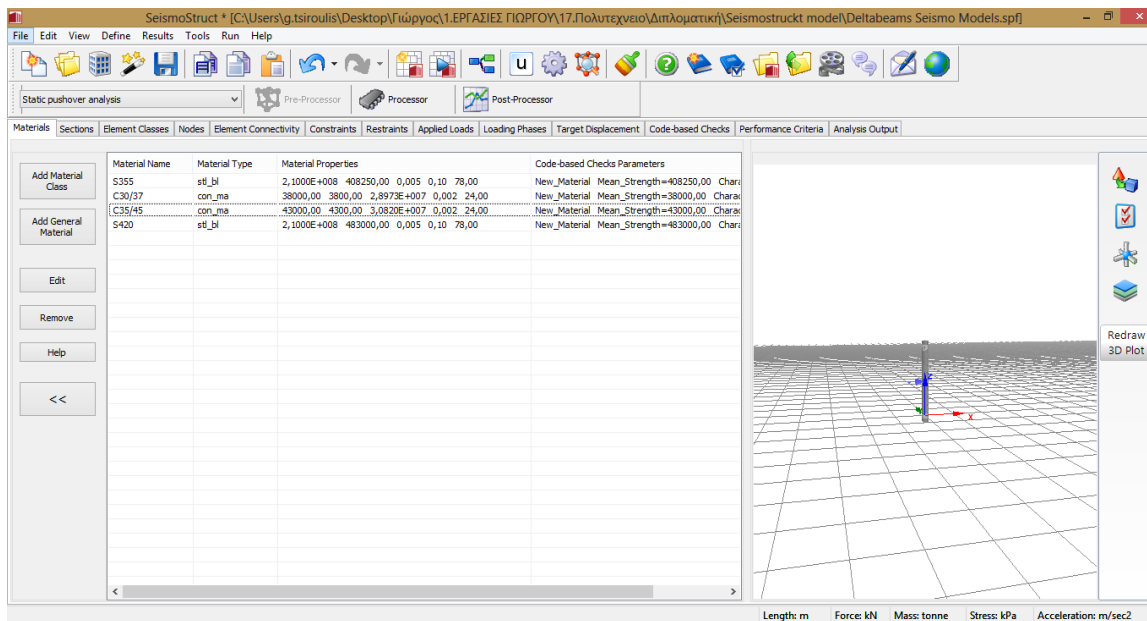
Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόγραμμα που επιλέχτηκε για την αριθμητική διερεύνηση των πειρατικών αποτελεσμάτων είναι το Seismostruct της εταιρίας Seismosoft Ltd. και συγκεκριμένα η έκδοση v2018 build:50. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ικανό να προβλέψει τη συμπεριφορά χωρικών πλαισίων που υπόκεινται σε μεγάλες μετατοπίσεις υπό στατική ή δυναμική φόρτιση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες όσο και την ανελαστικότητα των υλικών. Μοντέλα σκυροδέματος, χάλυβα, FRP και άλλα είναι διαθέσιμα, μαζί με μια μεγάλη βιβλιοθήκη γραμμικών στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με μια ευρεία ποικιλία προκαθορισμένων διατομών, μεταλλικών, οπλισμένου σκυροδέματος και σύμμικτων.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα διαθέτει ένα εξαιρετικά απλό και διαισθητικό γραφικό περιβάλλον (Σχήμα 3.1) με ευδιάκριτη μεθοδολογία από τον ορισμό των υλικών έως και τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Έτσι δίνεται η δυνατότητα μιας γρήγορης και έγκυρης πρώτης εκτίμησης της αντοχής αυτών των ιδιαίτερα σύνθετων διατομών, με χρήση ισοδύναμων απλών μοντέλων τριών διαστάσεων χωρίς να απαιτηθεί η χρήση πολύπλοκων και χρονοβόρων προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων.

Διαθέτει συνολικά 69 είδη διατομών σκυροδέματος, χάλυβα και σύμμικτων διατομών. Παρ' όλα αυτά λόγω της ιδιαίτερης μορφής της σύμμικτης διατομής των δοκιμίων που πρόκειται να μοντελοποιηθούν (εγκιβωτισμένη τραπεζοειδής χαλύβδινη διατομή σε σκυρόδεμα), για την προσομοίωση τους χρησιμοποιήθηκε μια εναλλακτική μέθοδος. Από τις έτοιμες διατομές σκυροδέματος που παρέχει το πρόγραμμα, επιλέχθηκε η αντίστοιχη διατομή για κάθε μια από τις 6 δοκούς και με χρήση ευθύγραμμων ράβδων οπλισμού κατά τη διαμήκη διεύθυνση έγινε η προσομοίωση της χαλύβδινης διατομής. Κύριος στόχος είναι σε κάθε στάθμη του μοντέλου να υπάρχει η ισοδύναμη ποσότητα χάλυβα με ιδιότητες υλικού όμοιες με αυτές της τραπεζοειδούς διατομής του πειραματικού δοκιμίου. Έτσι δημιουργήθηκε ένα απλό τρισδιάστατο μοντέλο προκειμένου να εκτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα σε κάμψη.

Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των γραμμικών στοιχείων γίνεται με χρήση στοιχείων κατανεμημένης πλαστικότητας με ολοκλήρωση τάσεων-παραμορφώσεων σε 5 διακριτές διατομές του δομικού στοιχείου η οποία εφαρμόζεται στο Seismostruct. Η κάθε διατομή χωρίζεται σε έναν μεγάλο αριθμό από ίνες ενώ η συνολική συμπεριφορά της διατομής προκύπτει ως συνισταμένη των ανελαστικών αποκρίσεων της κάθε χωριστής ίνας η οποία καταπονείται αξονικά. Αρκεί να είναι γνωστή η αξονική συμπεριφορά των ινών του υλικού, οπότε η συνολική συμπεριφορά της κάθε διαφορετικής διατομής προκύπτει αυτόματα ως άθροισμα της συμπεριφοράς των ινών από τις οποίες απαρτίζεται.

Η διαδικασία της μοντελοποίησης έγινε δυο φορές. Στην αρχική φάση της μελέτης έγινε μια πρώτη μοντελοποίηση κατά την οποία δεν ήταν διαθέσιμα τα αποτελέσματα των πειραμάτων που αφορούσαν τις ακριβείς ποιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειραματικά δοκίμια και η μόνη γνώση που υπήρχε ήταν οι χαρακτηριστικές τους τιμές. Στην δεύτερη φάση έγινε αριθμητική μοντελοποίηση των δοκιμίων με χρήση των πραγματικών παραμέτρων των υλικών όπου προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές.



Σχήμα 3.1: Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος.

3.2 Ορισμός μοντέλου

Το κομμάτι της ανάλυσης που αφορά τον ορισμό του μοντέλου περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στάδια της δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου. Γίνεται ο καθορισμός των υλικών και των μηχανικών τους ιδιοτήτων, η επιλογή των κατάλληλων διατομών, ο ορισμός των κόμβων και η σύνδεση αυτών. Τέλος καθορίζεται το καθεστώς φόρτισης και οι συνοριακές συνθήκες.

3.2.1 Τύπος ανάλυσης

Για την εκτίμηση της αντοχής των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η ανελαστική στατική ανάλυση. Πρόκειται για την κλασική ανάλυση Pushover κατά την οποία γίνεται εφαρμογή οριζόντιου φορτίου το οποίο αυξάνεται σταδιακά μέχρι την αστοχία. Προκειμένου το πρόγραμμα να μπορέσει να προσομοιώσει σωστά την συμπεριφορά των δοκών λόγω του ότι η ανάλυση Pushover αφορά οριζόντιες στατικές φορτίσεις, τα μοντέλα τοποθετήθηκαν κατακόρυφα. Ορίστηκε ως διαμήκης άξονας ο άξονα z, εφαρμόστηκε οριζόντιο φορτίο κατά τον άξονα x και έγινε ο ορισμός της διεύθυνση βαρυτικών δυνάμεων κατά τη διεύθυνση φόρτισης δηλαδή του άξονα x.

3.2.2 Ορισμός υλικών και μηχανικών ιδιοτήτων

Στην πρώτη φάση της μοντελοποίησης για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν σκυρόδεμα με ιδιότητες βασισμένες στο μοντέλο των Mander et al. (1988) με μονοαξονική μη γραμμική συμπεριφορά. Επιλέχθηκε σκυρόδεμα ποιότητας C30/37 οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου είναι αυτές που προτείνονται από το συγκεκριμένο μοντέλο του υλικού και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1. Για το δομικό χάλυβα και το χάλυβα οπλισμού χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ποιότητας S355 με ιδιότητες

βασισμένες στο διγραμμικό μοντέλο με κινηματική κράτυνση. Ο λόγος που επιλέχθηκε το αυτό είδος υλικού τόσο για τον δομικό χάλυβα όσο και για τον χάλυβα οπλισμού είναι διότι το πρόγραμμα επιτρέπει τον ορισμό ενός υλικού για όλες τις ράβδους οπλισμού. Συνεπώς τόσο οι ράβδοι οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της χαλύβδινης διατομής όσο και αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν ως εγκάρσιοι και διαμήκεις οπλισμοί της διατομής πρέπει να έχουν υλικό με κοινές ιδιότητες. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα είναι αυτές που προτείνονται από το πρόγραμμα και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.

Στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών που προέκυψαν από πειράματα. Για το σκυρόδεμα ορίστηκε η θλιπτική αντοχή ως ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των τριών δοκιμίων που επιβλήθηκαν σε δοκιμή 112 ημέρες μετά την σκυροδέτηση τους. Αυτή ήταν και η μέρα έναρξης των πειραματικών δοκιμών των δοκιμίων H1-H6 στο εργαστήριο. Όσον αφορά το δομικό χάλυβα η τιμή που χρησιμοποιήθηκε ως όριο διαρροής σε κάθε ένα από τα μοντέλα των δοκιμίων H1-H6, προέκυψε από τον μέσο όρο των πειραματικών τιμών ανάλογα με το πάχος του άνω και του κάτω ελάσματος της σιδηροδοκού. Επιπλέον για κάθε ένα μοντέλο δοκιμίου υπολογίστηκε η τιμή της μετελαστικής κλίσης («Strain hardening parameter»). Η τιμή αυτή προέκυψε από την κλίση της ευθείας μεταξύ του πρώτου ορίου διαρροής και ορίου θραύσης του διγραμμικού διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του δοκιμίου δομικού χάλυβα διαιρεμένη με την κλίση του διαγράμματος στον ελαστικό κλάδο. Τέλος οορίστηκε η τιμή της ανοιγμένης παραμόρφωση θραύσης/λυγισμού («Fracture/Buckling strain» 0,13. Για τις υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων των υλικών χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες από το πρόγραμμα. Στους Πίνακες 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος C30/37 για τα αρχικά μοντέλα των δοκιμίων H1-H6.

Σκυρόδεμα C30/37	
Μέση θλιπτική αντοχή	30.000 kPa
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή	38.000 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	28,73 GPa
Ειδικό βάρος	24 kN/m ³

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα αρχικά μοντέλα των δοκιμίων H1-H6.

Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	483.000 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	420.000 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0.005
Fracture/Buckling strain	0.10
Ειδικό βάρος	78 kN/m ³

Πίνακας 3.3: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος C30/37 για τα μοντέλα των δοκιμών H1-H6 στη δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

Σκυρόδεμα C30/37	
Μέση θλιπτική αντοχή	30.380kPa
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή	45.570 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	31,529 GPa
Ειδικό βάρος	24 kN/m ³

Πίνακας 3.4: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα μοντέλα δοκιμών H1 στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	371.565 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	323.100 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0,004
Fracture/Buckling strain	0.13
Ειδικό βάρος	78 kN/m ³

Πίνακας 3.5: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα μοντέλα δοκιμών H2 στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	362.510 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	315.226 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0.00418
Fracture/Buckling strain	0.13
Ειδικό βάρος	78 kN/m ³

Πίνακας 3.6: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα μοντέλα δοκιμίων H3 στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	371.565 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	323.100 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0,004
Fracture/Buckling strain	0.13
Ειδικό βάρος	78 kN/m ³

Πίνακας 3.7: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα μοντέλα δοκιμίων H4 στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

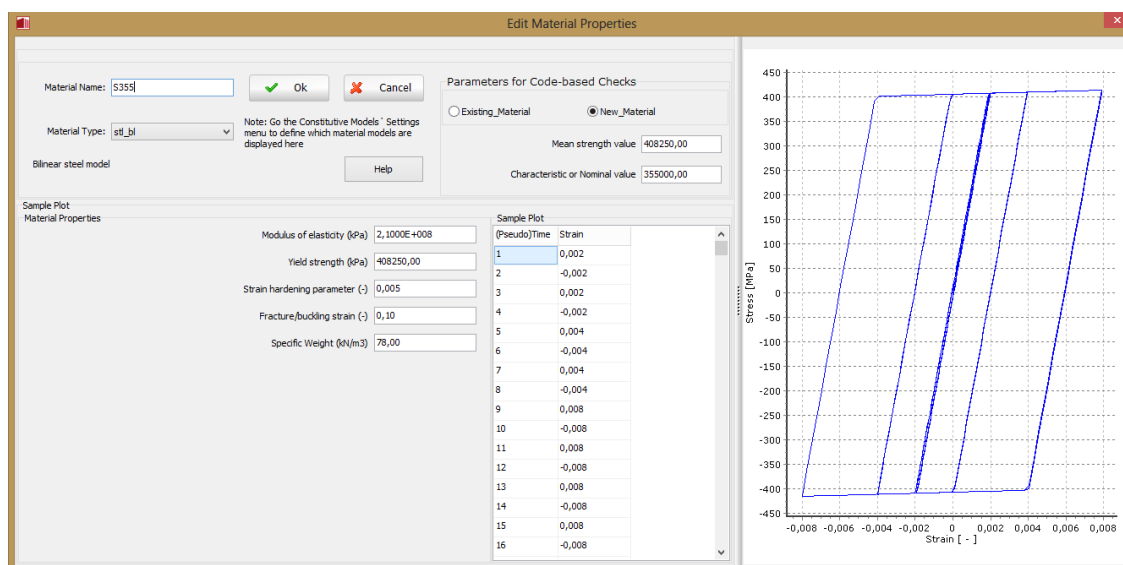
Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	362.510 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	315.226 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0.00418
Fracture/Buckling strain	0.13
Ειδικό βάρος	78 kN/m ³

Πίνακας 3.8: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα μοντέλα δοκιμίων H5 στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	379.520 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	330.017 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0,004801
Fracture/Buckling strain	0.13
Ειδικό βάρος	78 kN/m ³

Πίνακας 3.9: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 για τα μοντέλα δοκιμών H6 στην δεύτερη φάση της μοντελοποίησης.

Χάλυβας S355	
Όριο διαρροής	367.030 kPa
Χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής	319.156 kPa
Μέτρο ελαστικότητας	200 GPa
Strain hardening parameter	0,004042
Fracture/Buckling strain	0.13
Ειδικό βάρος	78 kN/m3



Σχήμα 3.2: Ορισμός ποιότητας και είδος δομικού χάλυβα.

3.2.3 Ορισμός διατομής και οπλισμός

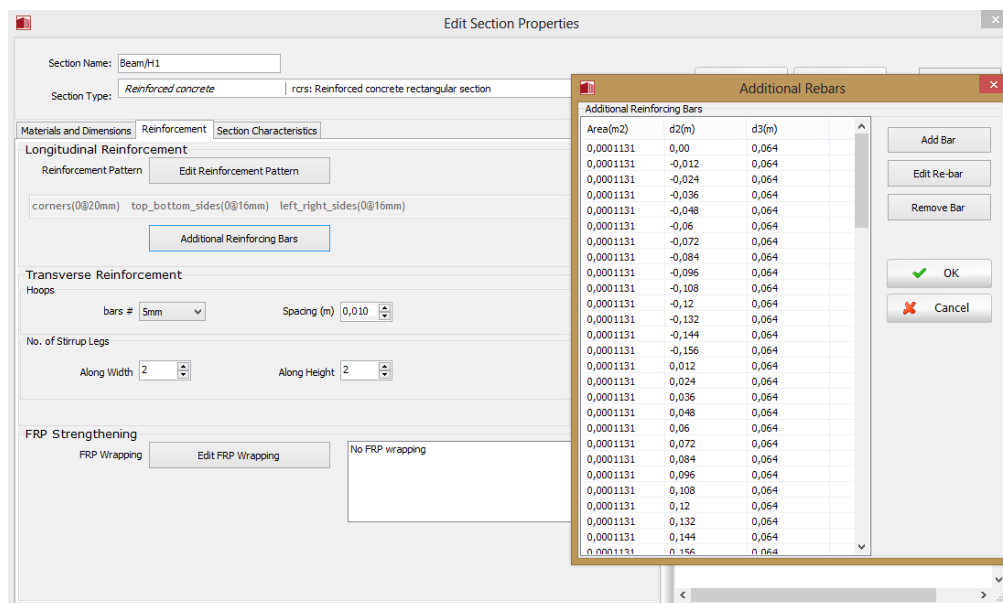
Για τη καθορισμό της διατομής αρχικά επιλέχθηκε από τις έτοιμες διατομές του προγράμματος η κατάλληλη γεωμετρία διατομής οπλισμένου σκυροδέματος. Στη συνέχεια δόθηκαν οι σωστές διαστάσεις και οι ποιότητες των υλικών. Για τα δοκίμια H1, H2 και H5 έγινε επιλογή ορθογωνικής διατομής οπλισμένου σκυροδέματος ενώ για τα δοκίμια H3, H4 και H6 επιλέχθηκε διατομή οπλισμένου σκυροδέματος μορφής «T».

Αφού έγινε ορισμός των διαστάσεων της εξωτερικής διατομής κάθε μοντέλου, στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στη διαμήκη διεύθυνση του μοντέλου ράβδοι οπλισμού προκειμένου να γίνει προσομοίωση της χαλύβδινη διατομής (Σχήμα 3.3). Τοποθετήθηκε ποσότητα οπλισμού έτσι ώστε σε κάθε στάθμη του μοντέλου να υπάρχει η αντίστοιχη

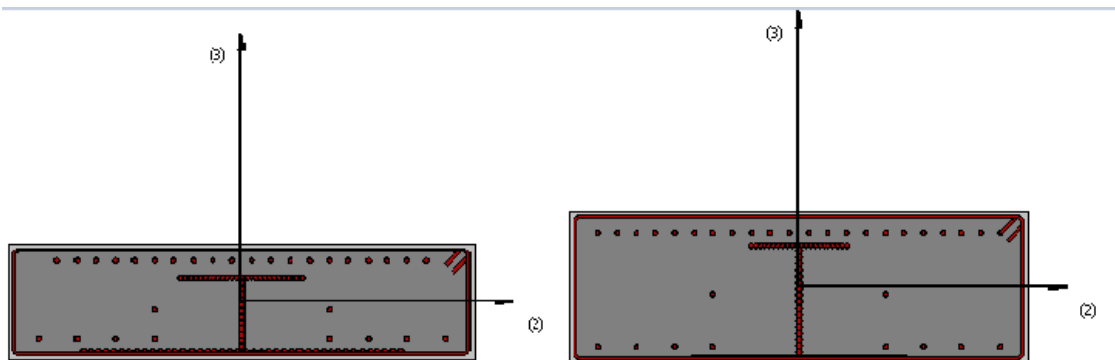
ποσότητα χάλυβα με αυτήν του πειραματικού μοντέλου προκρινόμενου να προκύψει ένα ισοδύναμο αποτέλεσμα.

Για κάθε μια από τις περιπτώσεις της αριθμητικής μοντελοποίησης δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα. Αυτό έγινε λόγω του ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε δεν υπήρχε δυνατότητα δημιουργίας οπών στον κορμό της χαλύβδινης διατομής των μοντέλων μιας και αυτή αποτελείται από ευθύγραμμες ράβδους οπλισμού. Έτσι δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με πλήρη διατομή στον κορμό και ένα με απομειωμένη στην οποία αφαιρέθηκαν οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού στις θέσεις όπου υπήρχαν οι οπές του κορμού. Η τελική μορφή των ισοδύναμων μοντέλων για κάθε μια από τις περιπτώσεις παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.4-3.9 με την χαλύβδινη διατομή να είναι μορφής διπλού «Γ» συμμετρική ως προς τον κατακόρυφο άξονα και με πεπλατυσμένο το κάτω πέλμα όπως και στην πειραματική διατομή. Για τον οπλισμό έγινε επιλογή υλικού με ιδιότητες δομικού χάλυβα και συγκεκριμένα ποιότητας S355.

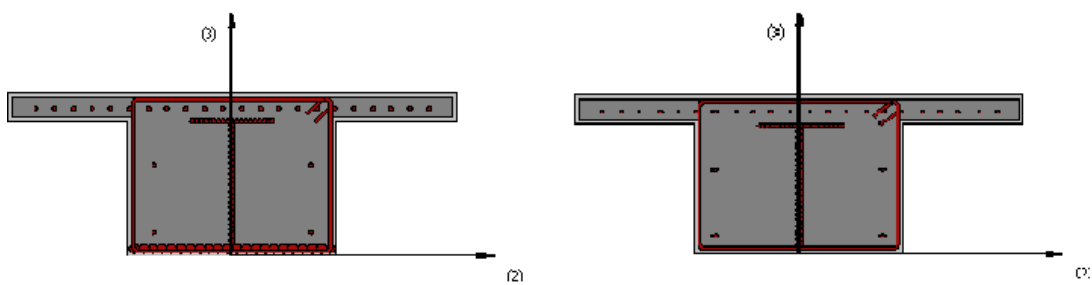
Στην συνέχεια τοποθετήθηκε ο δευτερεύων οπλισμός στα σημεία που απαιτήθηκε με βάση τα σχέδια της κάθε δοκού. Εφόσον για όλες τις ράβδους οπλισμού έγινε επιλογή χάλυβα S355 έπρεπε να γίνει τροποποίηση στις διαμέτρους του χάλυβα οπλισμού που ορίζεται από τα σχέδια, προκειμένου ο οπλισμός του μοντέλου να δουλεύει στην ίδια τάση με αυτή του χάλυβα ποιότητας B500C που έχουμε στα πειραματικά δοκίμια. Για τον οπλισμό περίσφιξης του μοντέλου έγινε αθροιστικός υπολογισμός των συνολικών συνδετήρων της δοκού και αναγωγή αυτού σε οπλισμό cm^2/m για τον ορισμό της ισοδύναμης ποσότητας δίτιμων συνδετήρων στο μοντέλο. Η επικάλυψη του οπλισμού τέθηκε ίση με 30 χιλιοστά



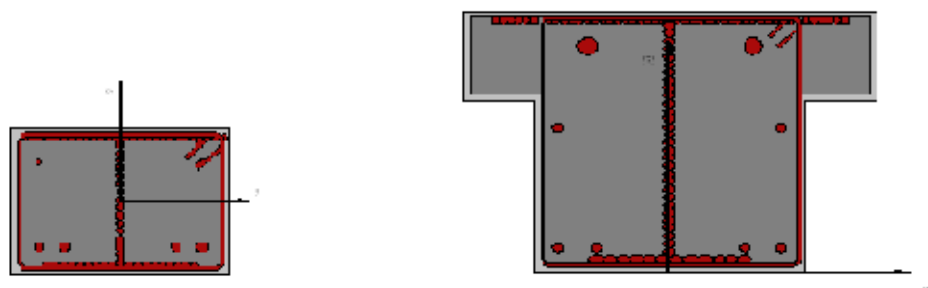
Σχήμα 3.3: Ορισμός οπλισμών διατομής.



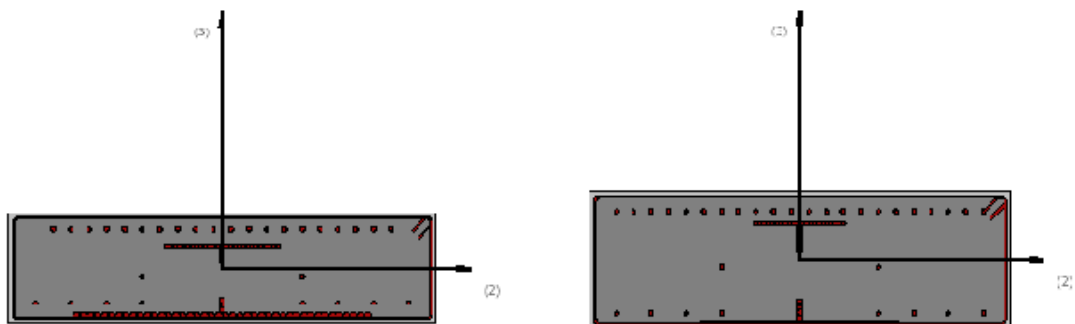
Σχήμα 3.4: Μοντέλα δοκιμίων H1,H2 χωρίς σπές.



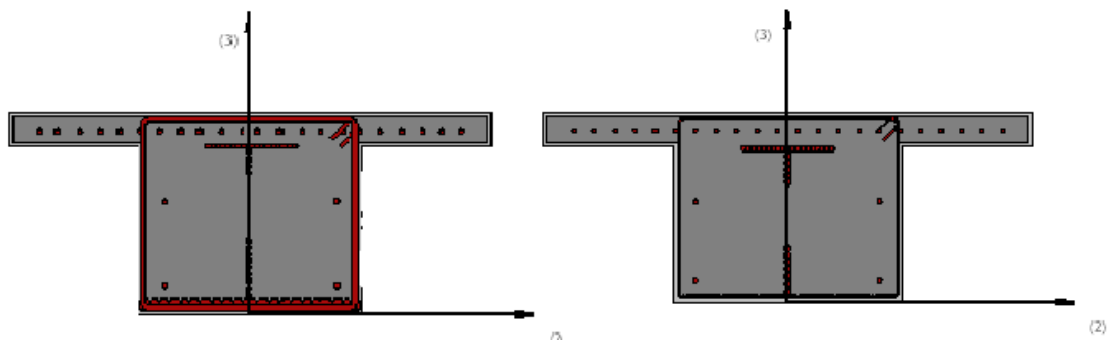
Σχήμα 3.5: Μοντέλα δοκιμίων H3,H4 χωρίς σπές.



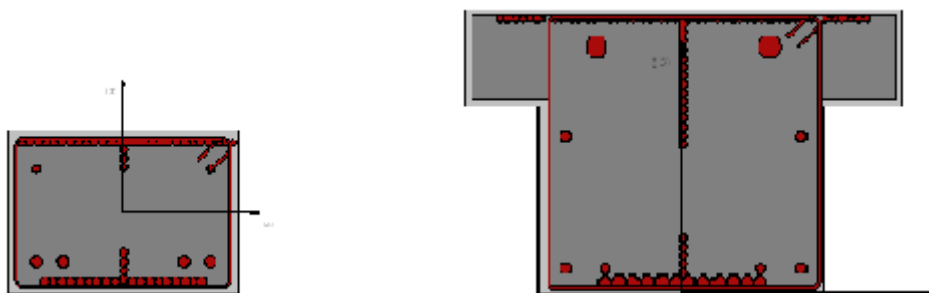
Σχήμα 3.6: Μοντέλα δοκιμίων H4,H5 χωρίς σπές.



Σχήμα 3.7: Μοντέλα δοκιμίων H1,H2 με σπές.



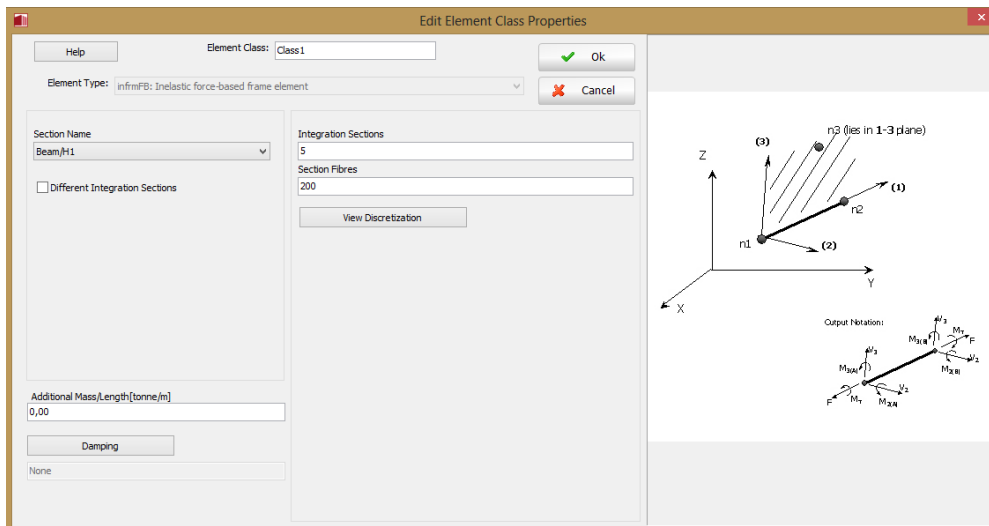
Σχήμα 3.8: Μοντέλα δοκιμίων H3,H4 με σπές.



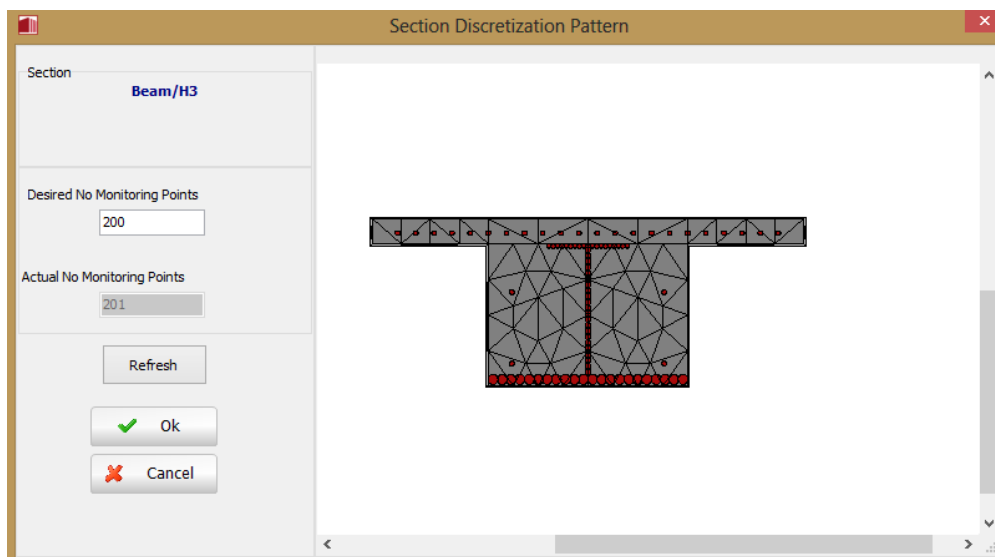
Σχήμα 3.9: Μοντέλα δοκιμίων H5,H6 με σπές.

3.2.4 Τύπος στοιχείων

Μετά την επιλογή των υλικών και τον καθορισμό της διατομής του κάθε μοντέλου, ακολούθησε ο προσδιορισμός του τύπου των στοιχείων του φορέα. Χρησιμοποιήθηκαν τύποι στοιχείων βασισμένα στις δυνάμεις («Inelastic Force-Based elements»). Πρόκειται για τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα γραμμικά στοιχεία για ανελαστική συμπεριφορά δομικών στοιχείων. Μέσα στα στοιχεία αυτό καθορίζεται ο αριθμός των διατομών ελέγχου ο οποίος ορίστηκε να είναι 5 και αποτελεί τον αριθμό των διατομών στις οποίες θα γίνεται ο έλεγχος πλαστικοποίησης του στοιχείου. Η προσομοίωση των στοιχείων έγινε με χρήση στοιχείων Fibre Element δηλαδή στοιχείων των οποίων οι διατομές υποδιαιρούνται σε ίνες. Ο διαχωρισμός της διατομής έγινε σε 200 ίνες (Σχήμα 3.10, 3.11) με απαιτούμενο αριθμό ινών τουλάχιστον 150-200 ίνες.



Σχήμα 3.10: Ορισμός τύπου στοιχείου.



Σχήμα 3.11: Διατομή H3 υποδιαιρεμένη σε 200 ίνες.

3.2.5 Ορισμός κόμβων μελών και κινηματικές δεσμεύσεις

Για την σχεδίαση της γεωμετρίας του στοιχείου έγινε εισαγωγή κόμβων σε συγκεκριμένες συντεταγμένες. Για την δημιουργία του κάθε μοντέλου ορίστηκαν πέντε κόμβοι μορφής Structural nodes ήτοι κόμβοι που συνδέονται με τα δομικά στοιχεία του φορέα. Για κάθε κόμβο δόθηκαν οι συντεταγμένες (x,y,z) με τον z να αποτελεί τον διαμήκη άξονα και τον x και y τον εγκάρσιο κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα αντίστοιχα. Οι συντεταγμένες που δόθηκαν αφορούσαν τον σχεδιασμό του στοιχείου λαμβάνοντας

υπόψη αξονικές διαστάσεις . Οι συντεταγμένες των κόμβων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Για τον τελικό σχεδιασμό του φορέα απαιτήθηκε η δημιουργία των γραμμικών στοιχείων για την ένωση των κόμβων. Δημιουργήθηκαν έτσι 4 γραμμικά στοιχεία το καθένα από τα οποία αποτελείται από τον κόμβο αρχής και τον κόμβο τέλους ενώνοντας έτσι τους πέντε κόμβους του μοντέλου. Τα τέσσερα γραμμικά στοιχεία ενώνουν τους κόμβους 0-1, 1-2, 2-3, 3-4

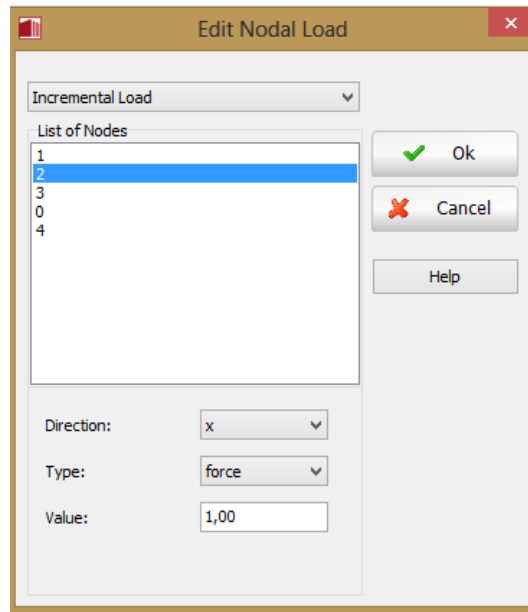
Στους κόμβους 1 και 3 λόγω του ότι πρόκειται για τα σημεία στα οποία βρίσκονται οι στηρίξεις στην πειραματική διαδικασία τοποθετήθηκαν κινηματικές δεσμεύσεις. Στον κόμβο 1 τοποθετήθηκε στήριξη μορφής κύλισης με περιορισμό των μετακινήσεων κατά τους άξονες x, y και των στροφών περί τους άξονες x, z. Στον κόμβο 3 τοποθετήθηκε στήριξη μορφής άρθρωσης με περιορισμό των μετακινήσεων κατά τους άξονες x, y, z και των στροφών περί τους άξονες x, z. Δημιουργήθηκε έτσι ένα μοντέλο αμφιπροέχουσας δοκού που αποτελεί μια ισοδύναμη προσομοίωση του πραγματικού δοκιμίου.

Πίνακας 3.10: Συντεταγμένες κόμβων κάθε μοντέλου.

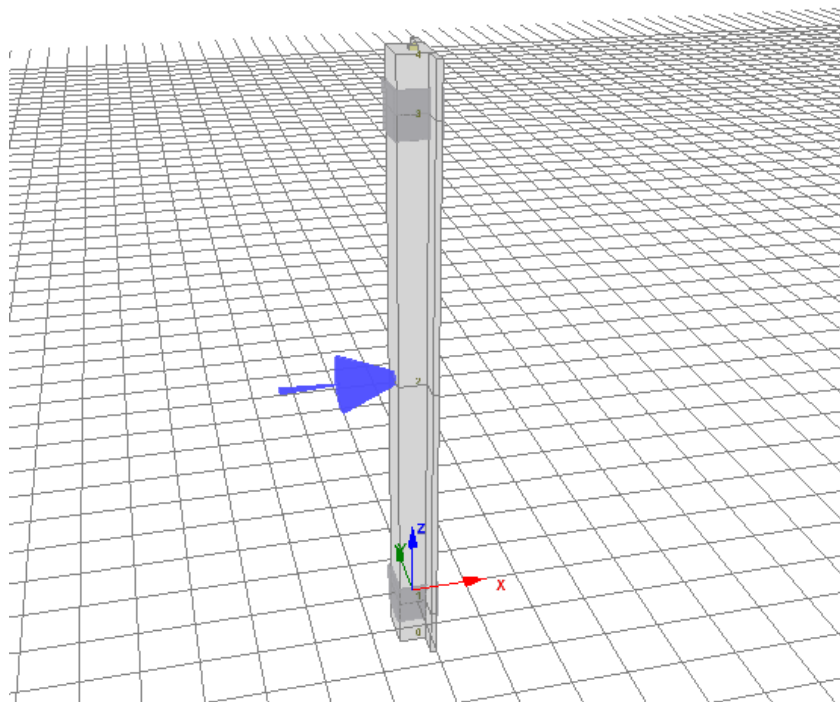
Όνομα κόμβου	X	Y	Z	Είδος κόμβου
Κόμβος 0	0,00	0,00	-0,70	Structural node
Κόμβος 1	0,00	0,00	0,00	structural node
Κόμβος 2	0,00	0,00	3,60	Structural node
Κόμβος 3	0,00	0,00	7,20	Structural node
Κόμβος 4	0,00	0,00	7,90	Structural node

3.2.6 Ορισμός φορτιών

Ήδη στο φορέα από τον ορισμό της διατομής και των διαστάσεων του εφαρμόστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα το φορτίο που έχει προκύψει από το ίδιο βάρος της δοκού. Στην συνέχεια τοποθετήθηκε πρόσθετο επικόμβιο φορτίο $P_0=1\text{kN}$ στον κόμβο 2 κατά την διεύθυνση x. Το φορτίο αυτό προσομοιώνει το κατακόρυφο φορτίο του εμβόλου το οποίο εφαρμόζεται στο μέσο της δοκού. Ορίζεται ως «incremental load» καθώς πρόκειται για ένα σταδιακά αυξανόμενο φορτίο (Σχήμα 3.12). Η σταδιακή αύξηση του φορτίου γίνεται μέσω ενός συντελεστή φόρτισης «λ» ο οποίος με αρχικά μηδενική τιμή αυξάνεται με σταθερό βήμα μέσω του προγράμματος και πολλαπλασιάζεται με το αρχικά ορισμένο φορτίο P_0 μέσω της σχέσης $P=P_0*\lambda$. Το αρχικό φορτίο P_0 τέθηκε να είναι ίσο με τη μονάδα έτσι ώστε σε κάθε στάδιο φόρτισης ο συντελεστής λ να αποτελεί το φορτίο που επιβάλλεται στο μοντέλο. Το φορτίο αυξάνεται μέχρι την αστοχία ή την επίτευξη κάποιας στοχευόμενης μετακίνησης. Σε όλες τις αναλύσεις ορίστηκε ως παράμετρος που θα καθορίζει το εύρος αύξησης του φορτίου η τιμή της μετατόπισης του κόμβου 2 στο μέσο της δοκού κατά την εξεταζόμενη διήθηση x. Επιλέχθηκε μέγιστη τιμή μετατόπισης 0.8 m. και το πλήθος βημάτων μέχρι την επίτευξη της στοχευόμενης μετατόπισης να είναι ίσο με 500. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο.



Σχήμα 3.12: Ορισμός φορτίων.

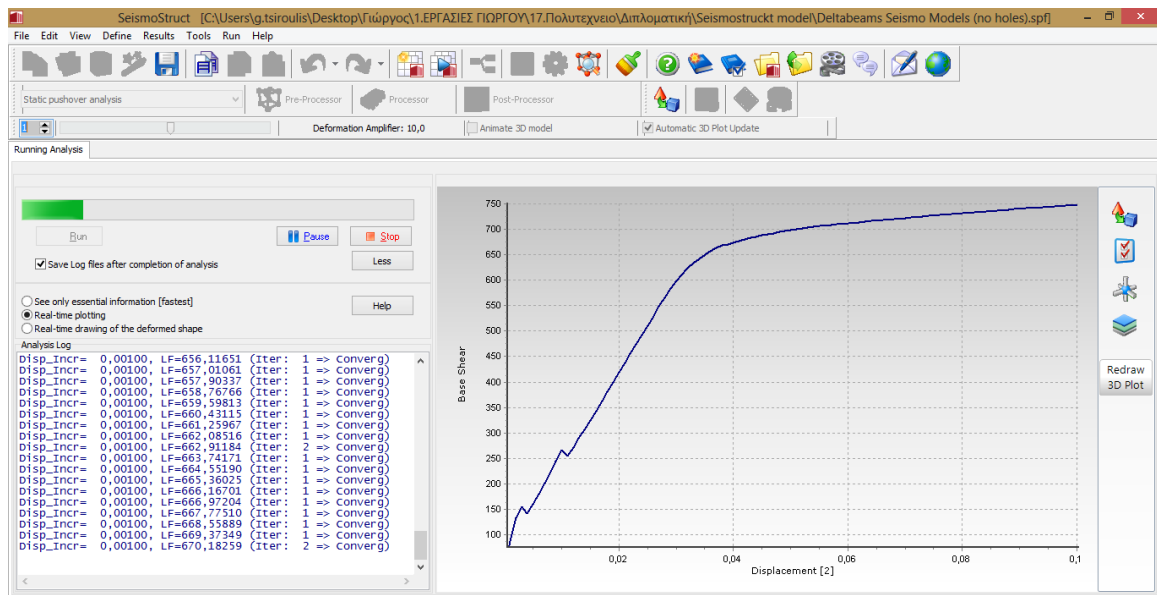


Σχήμα 3.13: Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο.

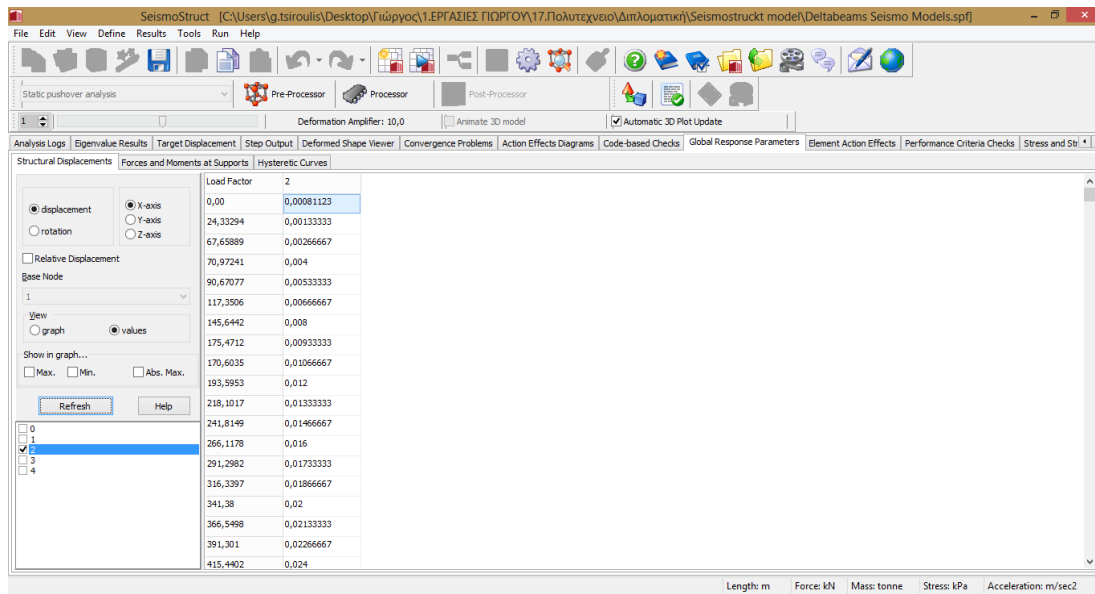
3.3 Ανάλυση και ανάγνωση αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης του κάθε δοκιμίου γίνεται ανάλυση του φορέα η οποία διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα (Σχήμα 3.14). Μέσω εργαλείων που διαθέτει το πρόγραμμα γίνεται η παρακολούθηση της πορείας της δημιουργίας του διαγράμματος Τάσεων-Παραμορφώσεων καθώς και της διαδικασίας παραμόρφωσης του μοντέλου τριών διαστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μια πρώτη εικόνα για τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Τέλος γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εξαγωγή των διαγραμμάτων. Τα κύρια αποτελέσματα που ενδιαφέρουν για τον έλεγχο τη φέρουσας ικανότητας των δοκών είναι το φορτίο διαρροής καθώς και το φορτίο αστοχίας της δοκού όπως και οι παραμορφώσεις διαρροής και αστοχίας. Η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων (Σχήμα 3.15) μέσω των διαγραμμάτων Δύναμης-Μετατόπισης και Ροπών –Καμπυλοτήτων μας δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης με αυτά των πειραματικών δοκιμών προκειμένου να εξεταστεί η εγκυρότητα της μεθόδου μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.14: Ανάλυση-μοντέλων



Σχήμα 3.15: Περιβάλλον παρουσίασης αποτελεσμάτων.

4 Πειραματικά αποτελέσματα και σύγκριση με αυτά των αναλυτικών μοντέλων

Η σύγκριση που περιγράφεται στο παρακάτω κεφάλαιο έγινε μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών της μοντελοποίησης και αφορά τις καμπύλες Δύναμης-Μετατόπισης των δοκιμίων. Η αριθμητική μοντελοποίηση έγινε για δύο περιπτώσεις. Στην αρχική φάση της μελέτης δηλαδή πριν την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων για την ποιότητα των υλικών των δοκιμίων η μόνη γνώση που υπήρχε ήταν οι χαρακτηριστικές τους τιμές. Έτσι σε κάθε ένα από τα μοντέλα των δοκιμίων H1-H6 τοποθετήθηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές των υλικών και έγινε η εξαγωγή των πρώτων αναλυτικών διαγραμμάτων προκειμένου να υπάρξει μια πρώτη εικόνα σχετικά με την δυσκαμψία και την αντοχή των δοκιμίων. Στη δεύτερη περίπτωση η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τις πραγματικές τιμές των υλικών αφού ήταν διαθέσιμα τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τις ποιότητες των υλικών των δοκιμίων. Τοποθετήθηκαν στα μοντέλα οι πραγματικές παράμετροι των υλικών και προέκυψαν τα τελικά αναλυτικά διαγράμματα.

Για κάθε μια από τις δυο περιπτώσεις δημιουργήθηκαν δυο μοντέλα. Στο ένα η διατομή είναι πλήρης ενώ στο δεύτερο είναι απομειωμένη στον κορμό της προκειμένου να γίνει μια προσομοίωση των οπών που υπάρχουν στον κορμό της σιδηροδοκού. Για κάθε ένα από τα δοκίμια H1-H6 δημιουργήθηκε ένα κοινό διάγραμμα το οποίο περιλαμβάνει την πειραματική και τις αριθμητικές καμπύλες για την πλήρη και την απομειωμένη διατομή. Λόγω του περιορισμού που υπάρχει ως προς την δημοσιοποίηση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών έγινε μια κανονικοποίηση στις τιμές των διαγραμμάτων. Με απλή διγραμμικοποίηση κάθε διαγράμματος βρέθηκε το σημείο διαρροής και διαιρέθηκαν όλες η τιμές δύναμης και μετατόπισης με τις αντίστοιχες τιμές διαρροής. Το σημείο διαρροής αποτελεί το σημείο (1,1) και όλα τα υπόλοιπα σημεία κανονικοποιήθηκαν με βάση αυτό.

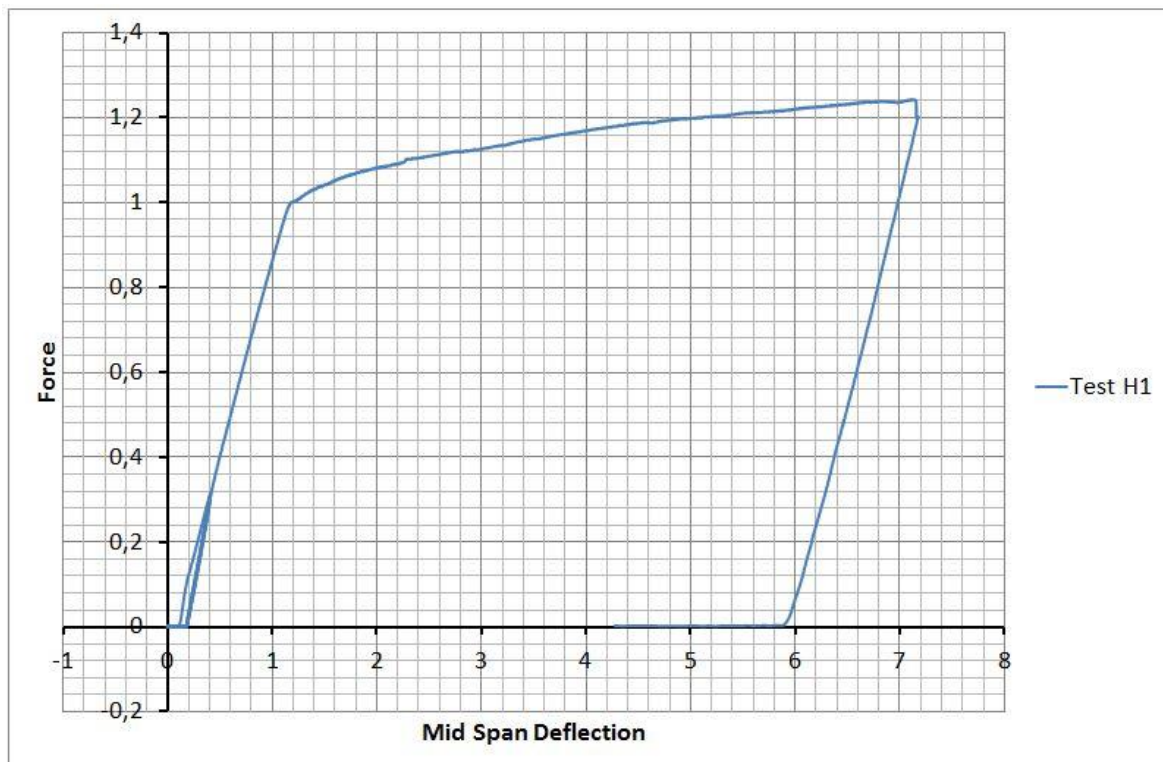
4.1 Δοκίμιο H1

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα Δύναμης-Παραμόρφωσης που αφορούν το δοκίμιο H1. Το Σχήμα 4.1 απεικονίζει το πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ενώ τα Σχήματα 4.2 και 4.3 απεικονίζουν τα συγκριτικά διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες. Στις αναλυτικές καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2 έχουν χρησιμοποιηθεί οι χαρακτηριστικές τιμές για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα ενώ σε αυτές του Σχήματος 4.3 έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές των υλικών που έχουν προκύψει από τα πειράματα δοκιμίων σκυροδέματος και δομικού χάλυβα.

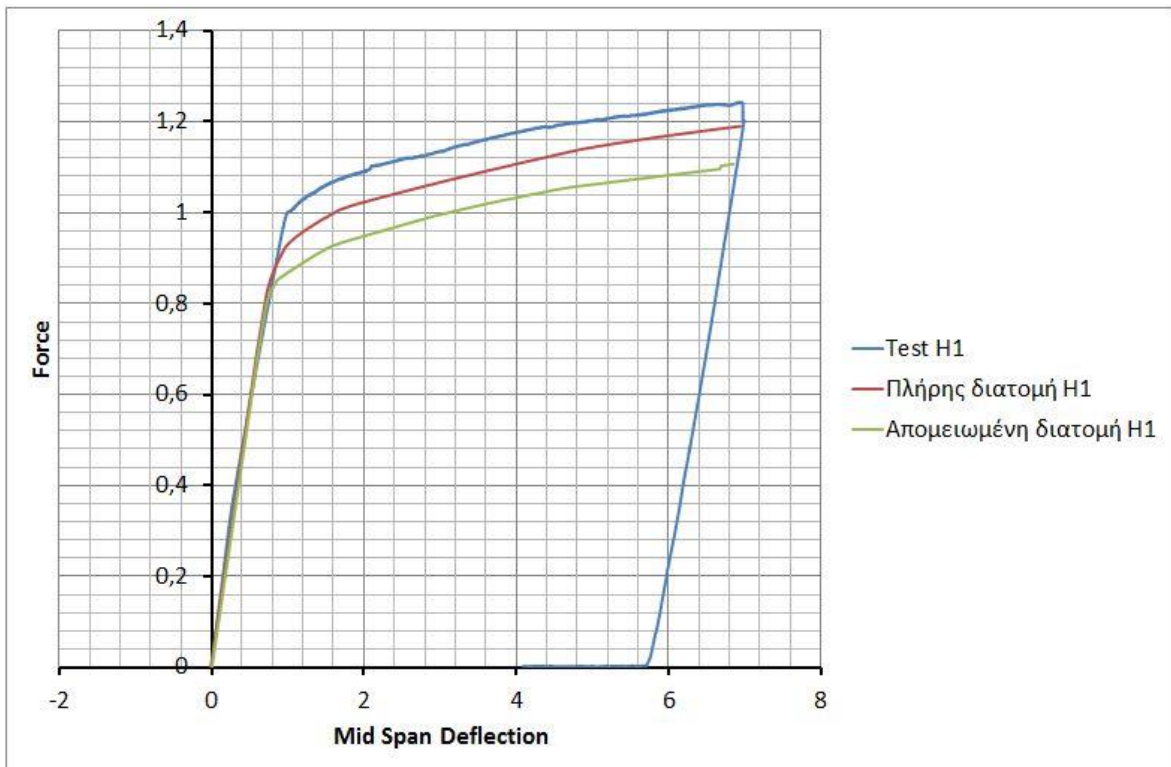
Σχετικά με το διάγραμμα του Σχήματος 4.3 (το οποίο περιλαμβάνει και τις πραγματικές τιμές των υλικών) ως προς την αρχική δυσκαμψία της δοκού H1 η οποία ταυτίζεται με την κλίση του διαγράμματος δύναμης-παραμόρφωσης στο τμήμα του ελαστικού κλάδου παρατηρείται να εμφανίζει μια μικρή απόκλιση της τάξης του 3.5%, με τα αναλυτικά μοντέλα να είναι λίγο πιο δύσκαμπτα. Με βάση το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η δυσκαμψία στο μετελαστικό κλάδο είναι ικανοποιητική, με τις αναλυτικές καμπύλες να ακολουθούν την πορεία της πειραματικής. Σε επίπεδο αντοχής τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζονται να είναι πιο συντηρητικά, καθώς το πειραματικό

δοκίμιο εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή από αυτή που υπολογίζουμε στα μοντέλα της τάξης του 17%. Τέλος τα αναλυτικά μοντέλα δεν μπορούν να μας δώσουν έγκυρη εκτίμηση σχετικά με την πλαστιμότητα που εμφανίζει το πειραματικό δοκίμιο καθώς το πρόγραμμα αδυνατεί να ολοκληρώσει τον αριθμό βημάτων που ορίσαμε δόθηκαν και συνεπώς το διάγραμμα κόβεται χωρίς να συγκλίνει στην τελική τιμή.

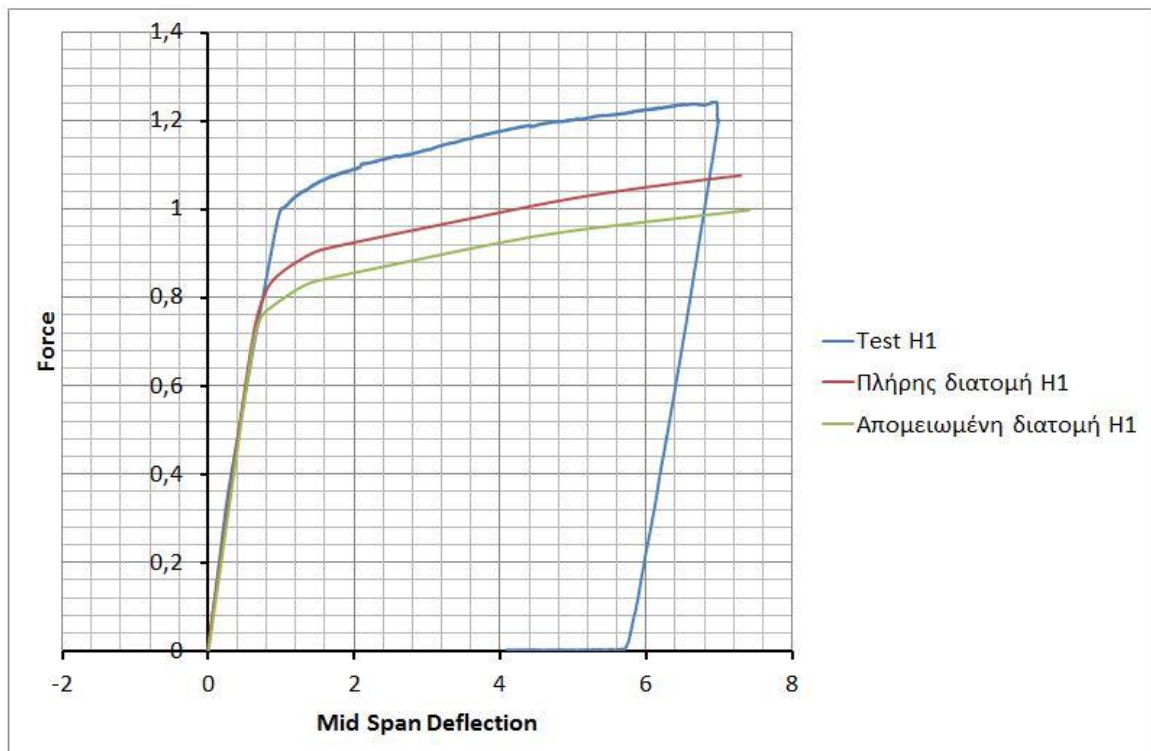
Τα Σχήματα 4.4 και 4.5 απεικονίζουν το δοκίμιο H1 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.1: Πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης για το δοκίμιο H1.



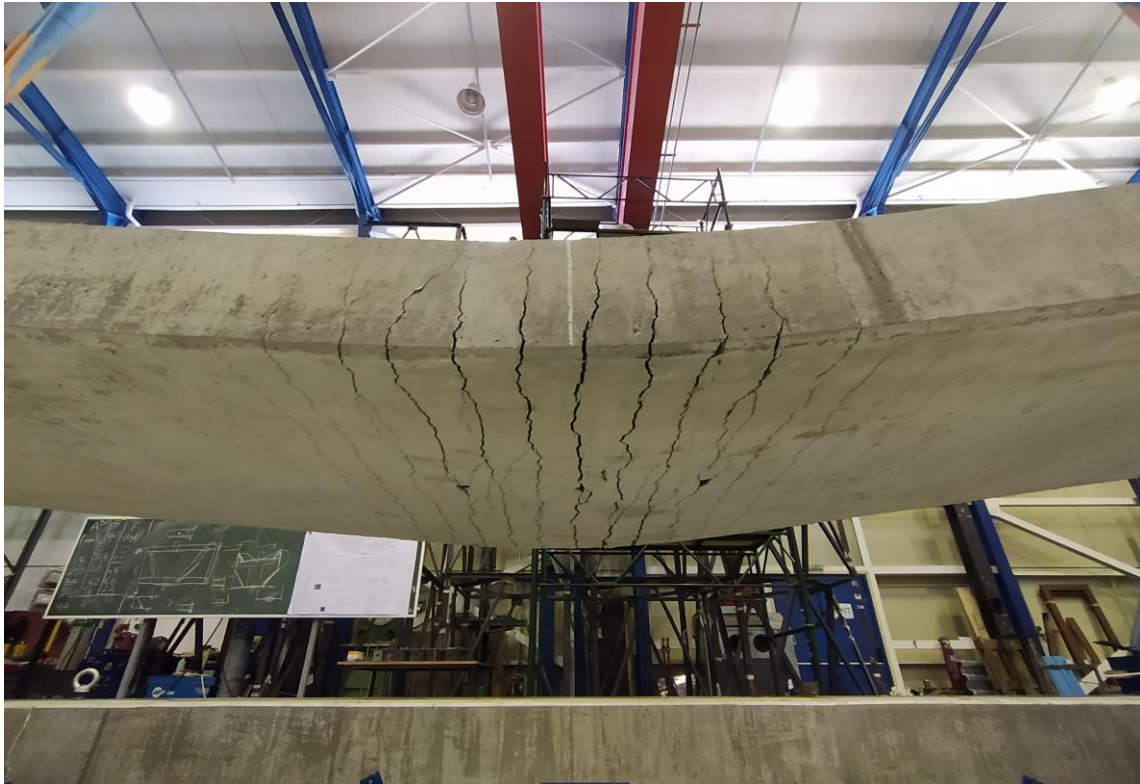
Σχήμα 4.2: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H1 με τις πειραματικές και τις αρχικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των χαρακτηριστικών τιμών των υλικών .



Σχήμα 4.3: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H1 με τις πειραματικές και τις τελικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των πειρατικών τιμών των υλικών .



Σχήμα 4.4: Δοκίμιο H1 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής



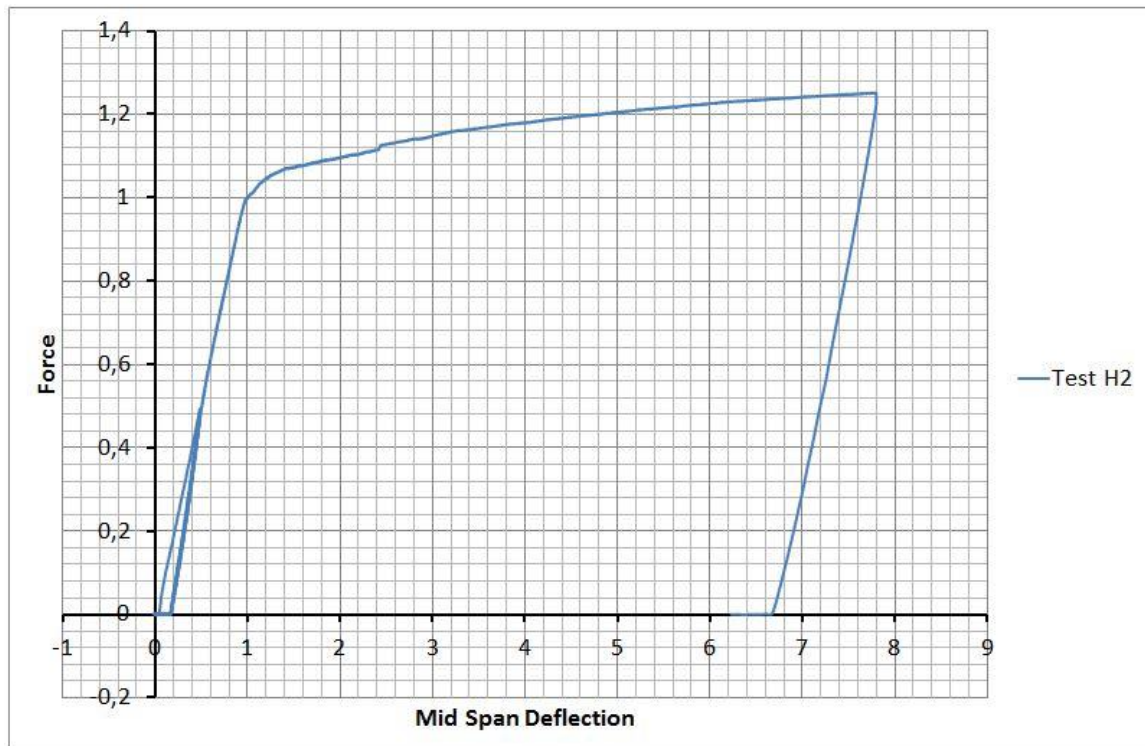
Σχήμα 4.5: Καμπτική ρηγμάτωση σκυροδέματος δοκιμίου H1.

4.2 Δοκίμιο H2

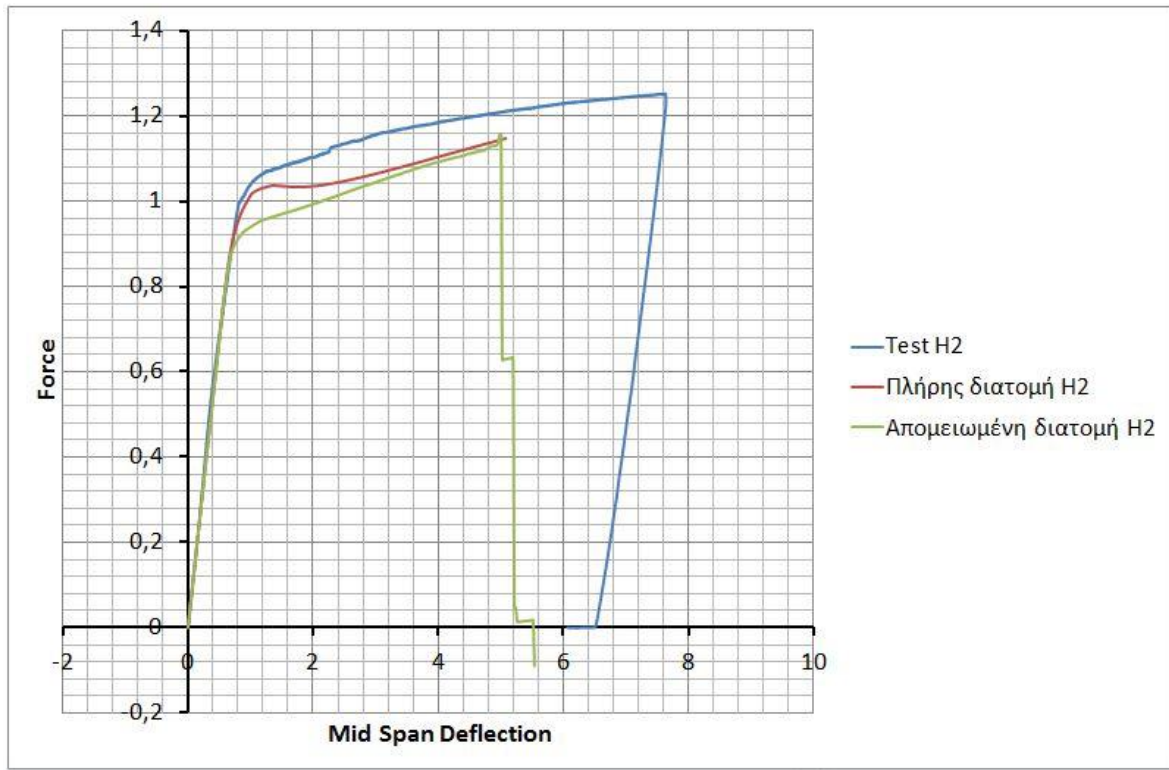
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα Δύναμης-Παραμόρφωσης που αφορούν το δοκίμιο H2. Το Σχήμα 4.6 απεικονίζει το πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ενώ τα Σχήματα 4.7 και 4.8 απεικονίζουν τα συγκριτικά διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες. Στις αναλυτικές καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.7 έχουν χρησιμοποιηθεί οι χαρακτηριστικές τιμές για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα ενώ σε αυτές του σχήματος 4.8 έχουν χρησιμοποιηθεί οι παράμετροι των υλικών που έχουν προκύψει από τα πειράματα δοκιμίων σκυροδέματος και δομικού χάλυβα.

Σχετικά με το διάγραμμα του Σχήματος 4.8 παρατηρείται ότι η δυσκαμψία μεταξύ της πειραματικής και των αναλυτικών καμπύλων ταυτίζεται έχοντας μια ελάχιστη απόκλιση 0,2%. Παράλληλα παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία στο μετελαστικό κλάδο είναι ικανοποιητική με τις αναλυτικές καμπύλες να ακολουθούν την πορεία της πειραματικής. Σε επίπεδο αντοχής, τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται να είναι πιο συντηρητικά καθώς το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή από αυτή που υπολογίζουμε στα μοντέλα της τάξης του 16%. Στην αναλυτική καμπύλη που αφορά το μοντέλο με πλήρη διατομή παρατηρείτε μια μικρή πτώση της αντοχής στο αρχικό τμήμα του μεταπλαστικού κλάδου η οποία αρχίζει να αυξάνεται ξανά. Τέλος τα αναλυτικά μοντέλα δεν μπορούν να μας δώσουν έγκυρη εκτίμηση σχετικά με την πλαστιμότητα που εμφανίζει το πειραματικό δοκίμιο καθώς το πρόγραμμα αδυνατεί να ολοκληρώσει τον αριθμό βημάτων που ορίσαμε και συνεπώς το διάγραμμα κόβεται χωρίς να συγκλίνει στην τελική τιμή.

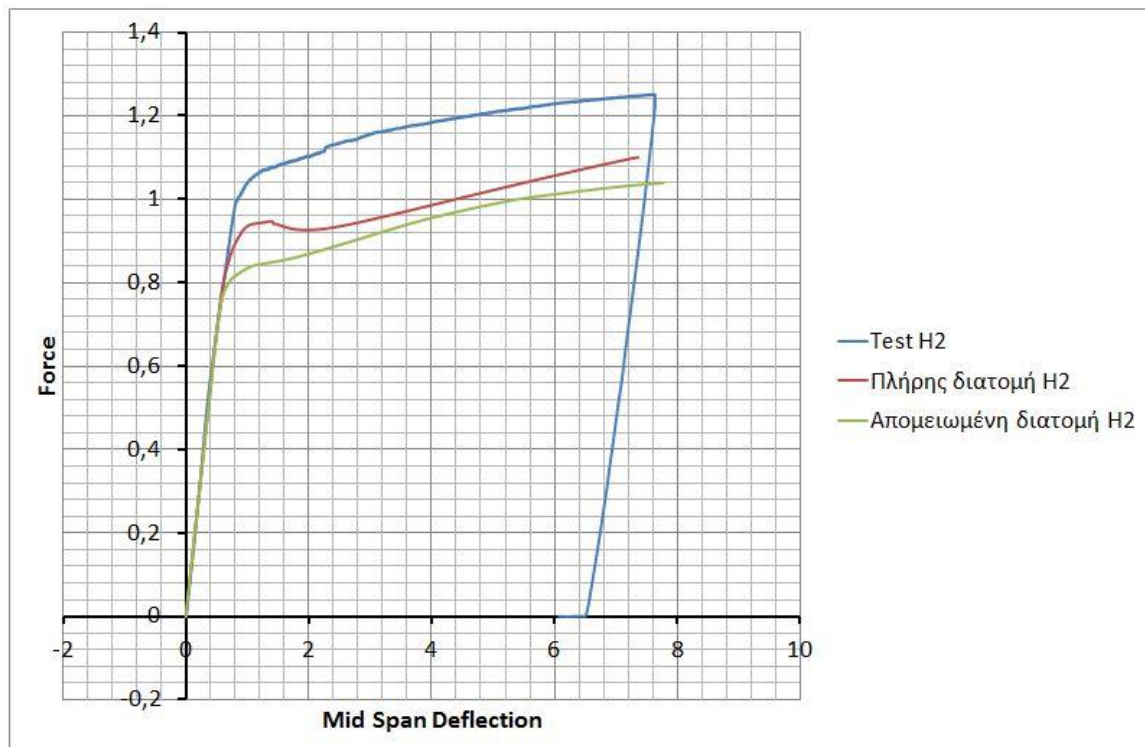
Τα Σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11 απεικονίζουν το δοκίμιο H2 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



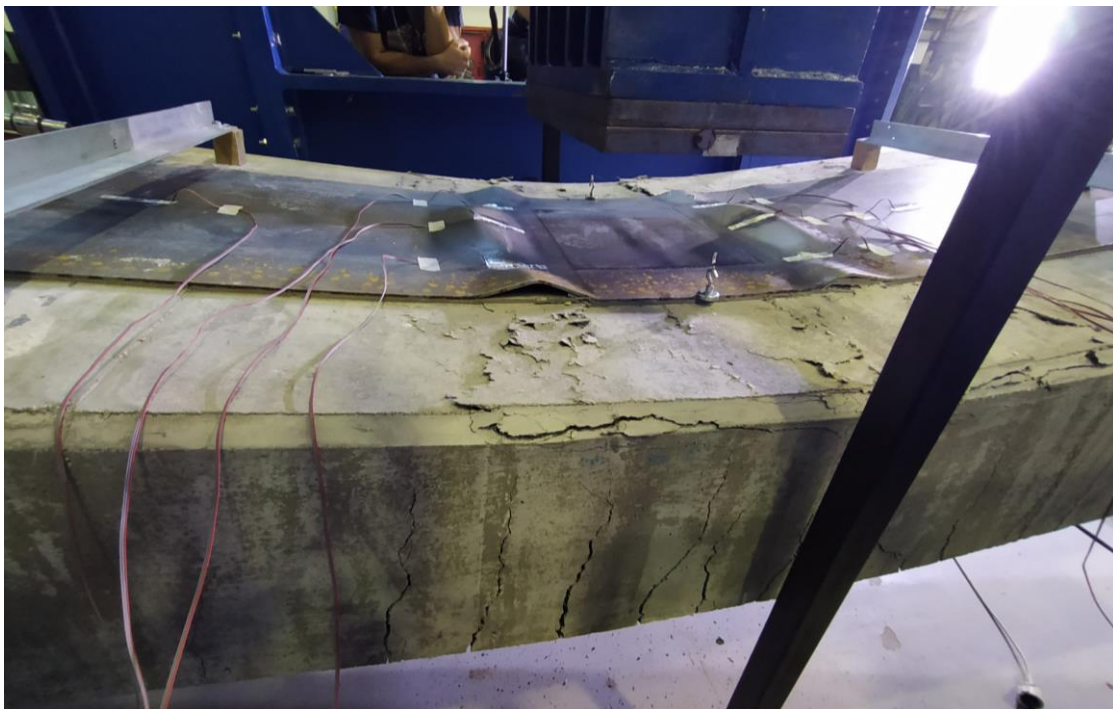
Σχήμα 4.6: Πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης για το δοκίμιο H2.



Σχήμα 4.7: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H2 με τις πειραματικές και τις αρχικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των χαρακτηριστικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.8: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H2 με τις πειραματικές και τις τελικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των πειρατικών τιμών των υλικών .



Σχήμα 4.9: Δοκίμιο H2 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.10: Καμπτική ρηγμάτωση σκυροδέματος δοκιμίου H2.



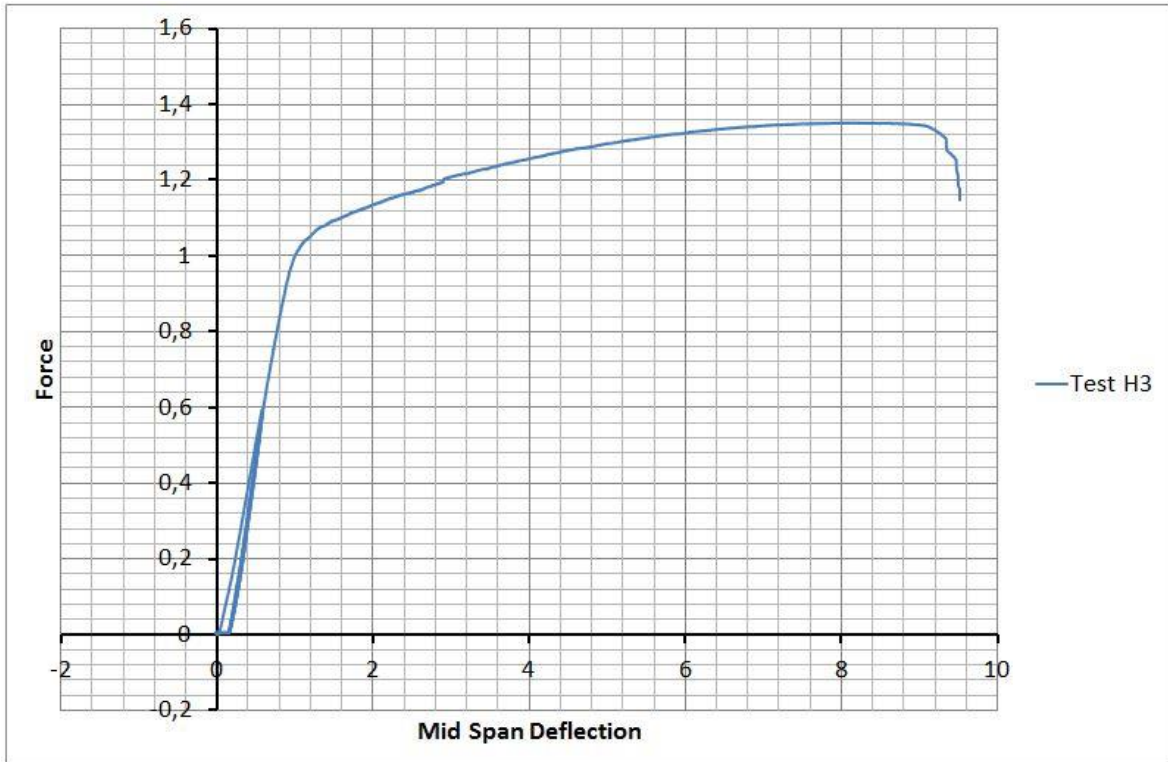
Σχήμα 4.11: Δοκίμιο H2 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.

4.3 Δοκίμιο H3

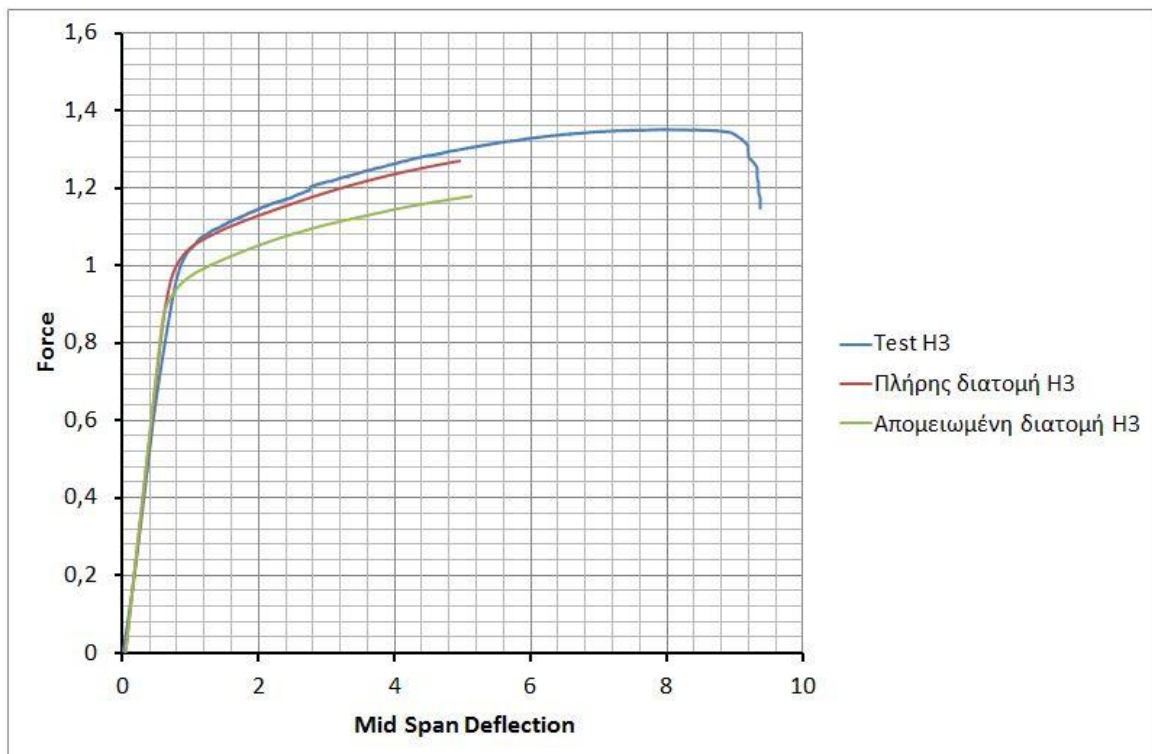
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα Δύναμης-Παραμόρφωσης που αφορούν το δοκίμιο H3. Το Σχήμα 4.12 απεικονίζει το πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ενώ τα Σχήματα 4.13 και 4.14 απεικονίζουν τα συγκριτικά διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες. Στις αναλυτικές καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.13 έχουν χρησιμοποιηθεί οι χαρακτηριστικές τιμές για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα ενώ σε αυτές του σχήματος 4.14 έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές των υλικών που έχουν προκύψει από τα πειράματα δοκιμίων σκυροδέματος και δομικού χάλυβα.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.14 (το οποίο περιλαμβάνει και τις πραγματικές τιμές των υλικών) σχετικά με την δυσκαμψία παρατηρούμε ότι τα αναλυτικά μοντέλα είναι πιο δύσκαμπτα από το πειραματικό μοντέλο με μια απόκλιση της τάξης του 12.6%. Παράλληλα παρατηρήσουμε ότι η δυσκαμψία στο μετελαστικό κλάδο είναι ικανοποιητική με τις αναλυτικές καμπύλες να ακολουθούν την πορεία της πειραματικής. Σε επίπεδο αντοχής τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται να είναι λίγο πιο συντηρητικά καθώς το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη (της τάξης του 8%) αντοχή από αυτή που υπολογίζουμε στα μοντέλα. Τέλος τα αναλυτικά μοντέλα δεν μπορούν να μας δώσουν έγκυρη εκτίμηση σχετικά με την πλαστιμότητα που εμφανίζει το πειραματικό δοκίμιο καθώς το πρόγραμμα αδυνατεί να ολοκληρώσει τον αριθμό βημάτων που ορίσαμε δόθηκαν και συνεπώς το διάγραμμα κόβεται χωρίς να συγκλίνει στην τελική τιμή.

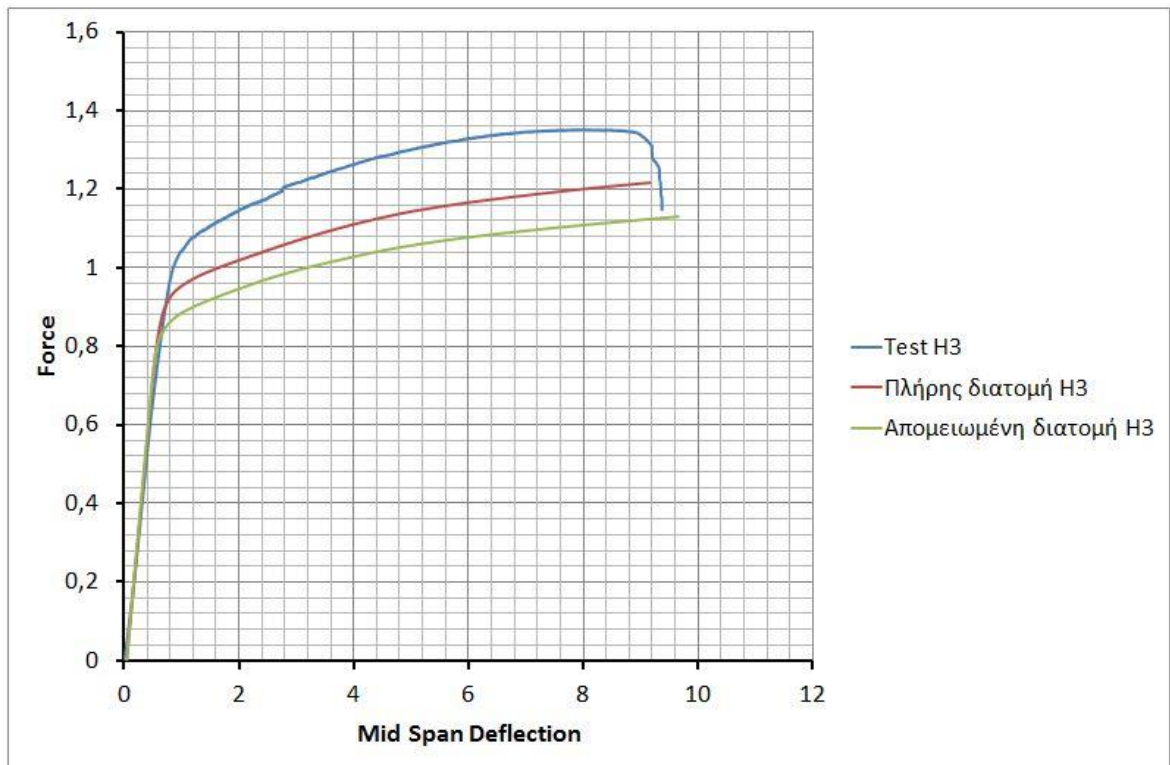
Τα Σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17 απεικονίζουν το δοκίμιο H3 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης δοκιμίου H3.



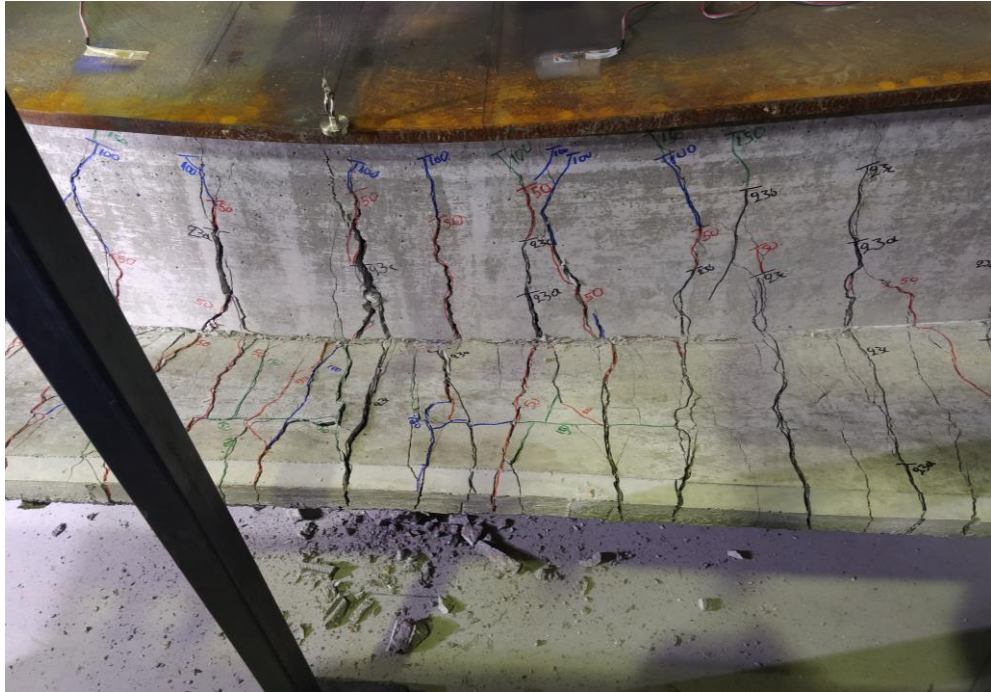
Σχήμα 4.13: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H3 με τις πειραματικές και τις αρχικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των χαρακτηριστικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.14: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκίμιου H3 με τις πειραματικές και τις τελικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των πειρατικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.15: Δοκίμιο H3 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.16: Ρηγμάτωση σκυροδέματος δοκιμίου Η3.



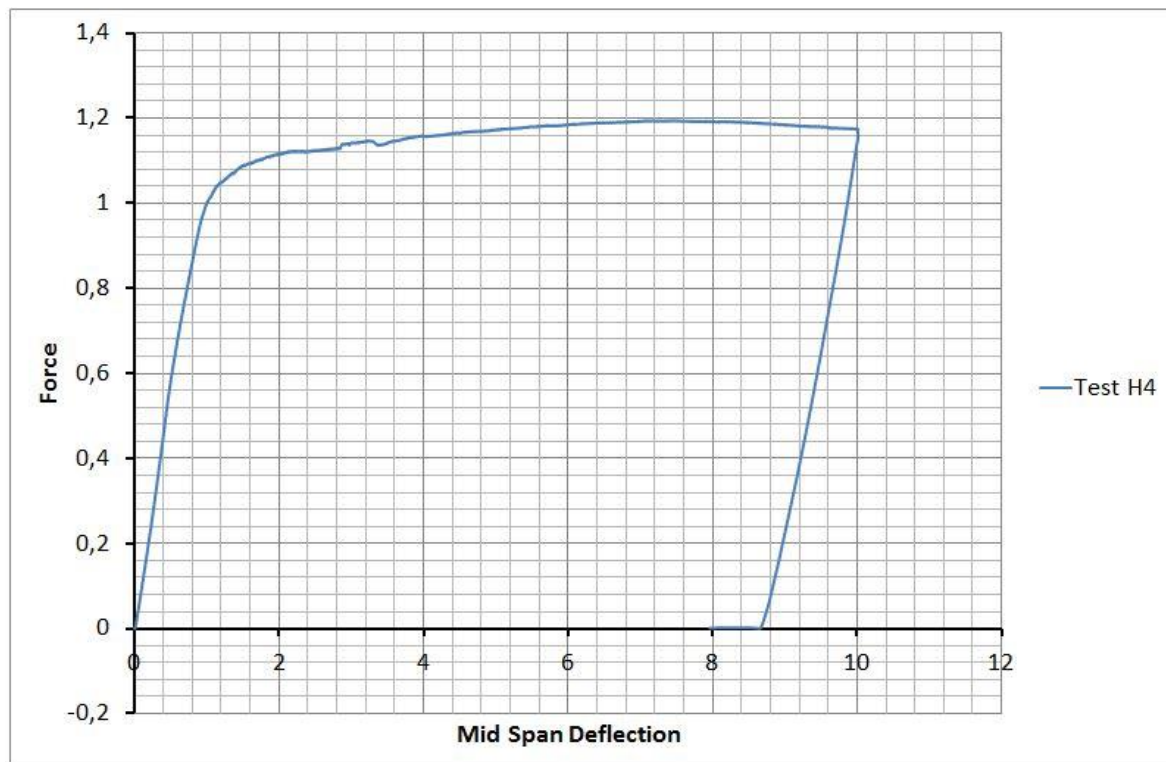
Σχήμα 4.17: Αποφλοίωση σκυροδέματος εφελκόμενης ίνας δοκιμίου Η3 και αστοχία μιας εκ των εγκάρσιων ράβδων οπλισμού.

4.4 Δοκίμιο Η4

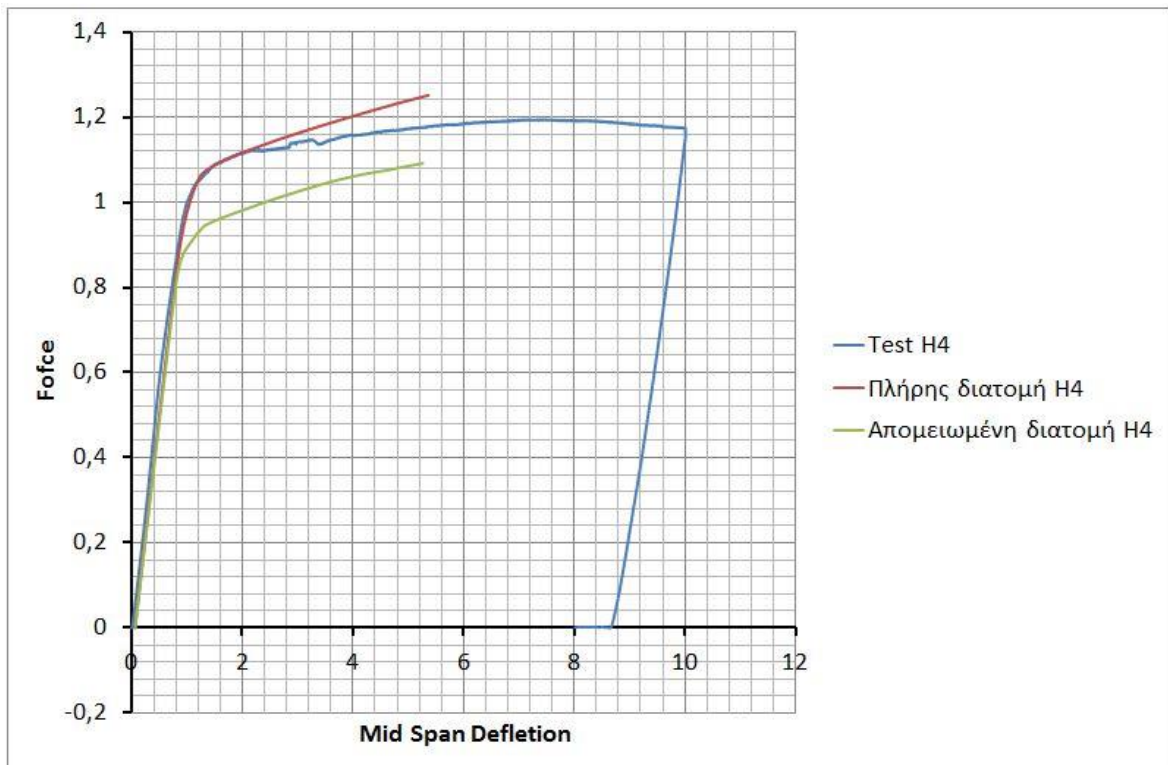
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα Δύναμης-Παραμόρφωσης που αφορούν το δοκίμιο Η4. Το Σχήμα 4.7 απεικονίζει το πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ενώ τα Σχήματα 4.8 και 4.9 απεικονίζουν τα συγκριτικά διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης τα οποία περιλαμβάνουν τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες. Στις αναλυτικές καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8 έχουν χρησιμοποιηθεί οι χαρακτηριστικές τιμές για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα ενώ σε αυτές του σχήματος 4.9 έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές των υλικών που έχουν προκύψει από τα πειράματα δοκιμίων σκυροδέματος και δομικού χάλυβα.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.7 (το οποίο περιλαμβάνει και τις πραγματικές τιμές των υλικών) η αρχική δυσκαμψία του πειραματικού δοκιμίου και των αναλυτικών μοντέλων ταυτίζεται. Όσον αφορά την δυσκαμψία των αναλυτικών μοντέλων στον μετελαστικό κλάδο παρατηρούμε ότι πλησιάζει αρκετά αυτή του πειραματικού μοντέλου με τις αναλυτικές καμπύλες να ακολουθούν την πορεία της πειραματικής. Σε επίπεδο αντοχής τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζονται να είναι αρκετά πιο συντηρητικά καθώς το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή της τάξης του 21%. Τέλος αναλυτικά τα μοντέλα εμφανίζουν λίγο μικρότερη πλαστιμότητα (10 %) σε σχέση με τα πειραματικό μοντέλο.

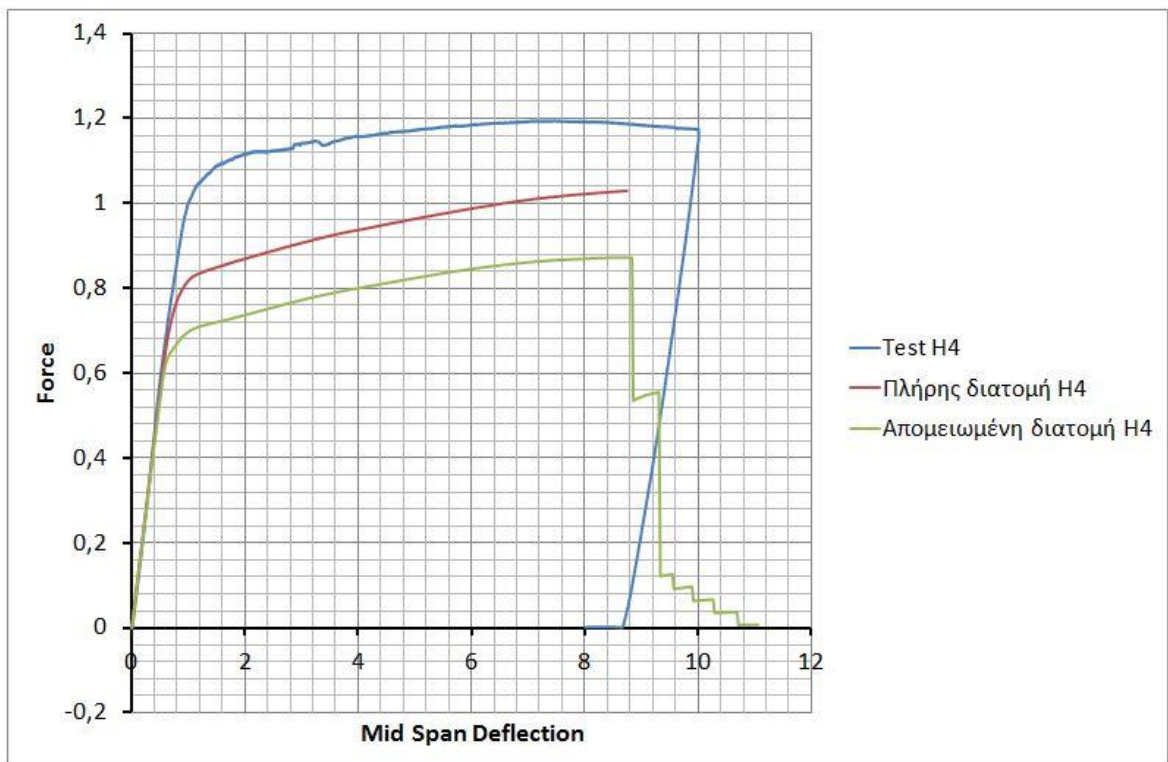
Τα Σχήματα 4.21, και 4.22 απεικονίζουν το δοκίμιο Η4 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



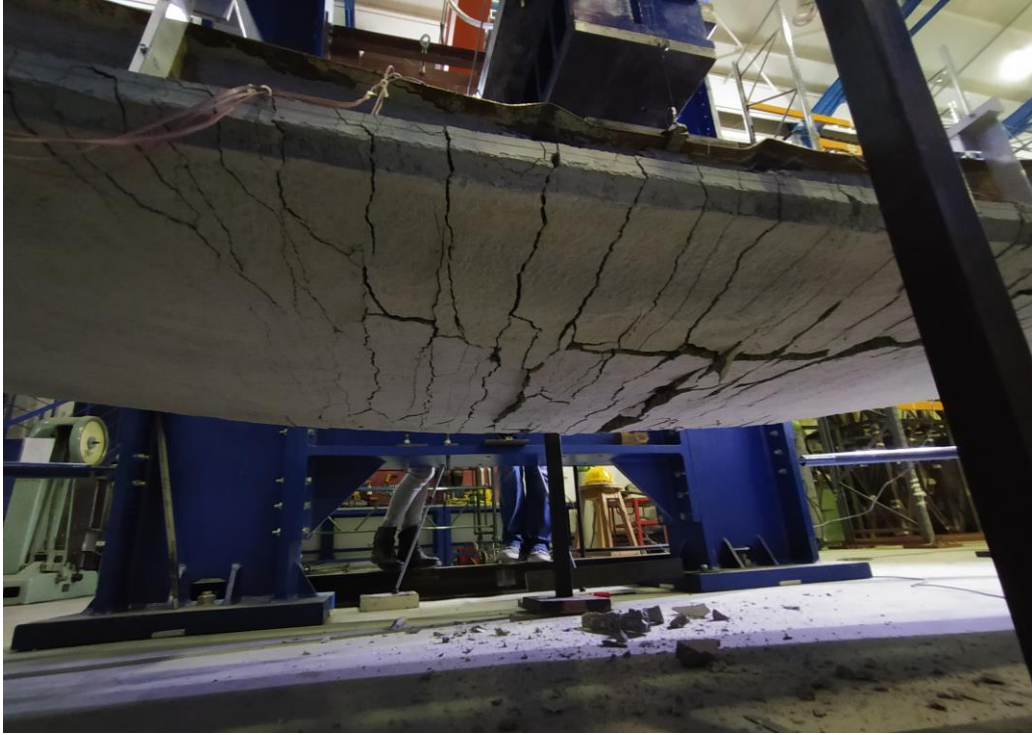
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης δοκιμίου Η4.



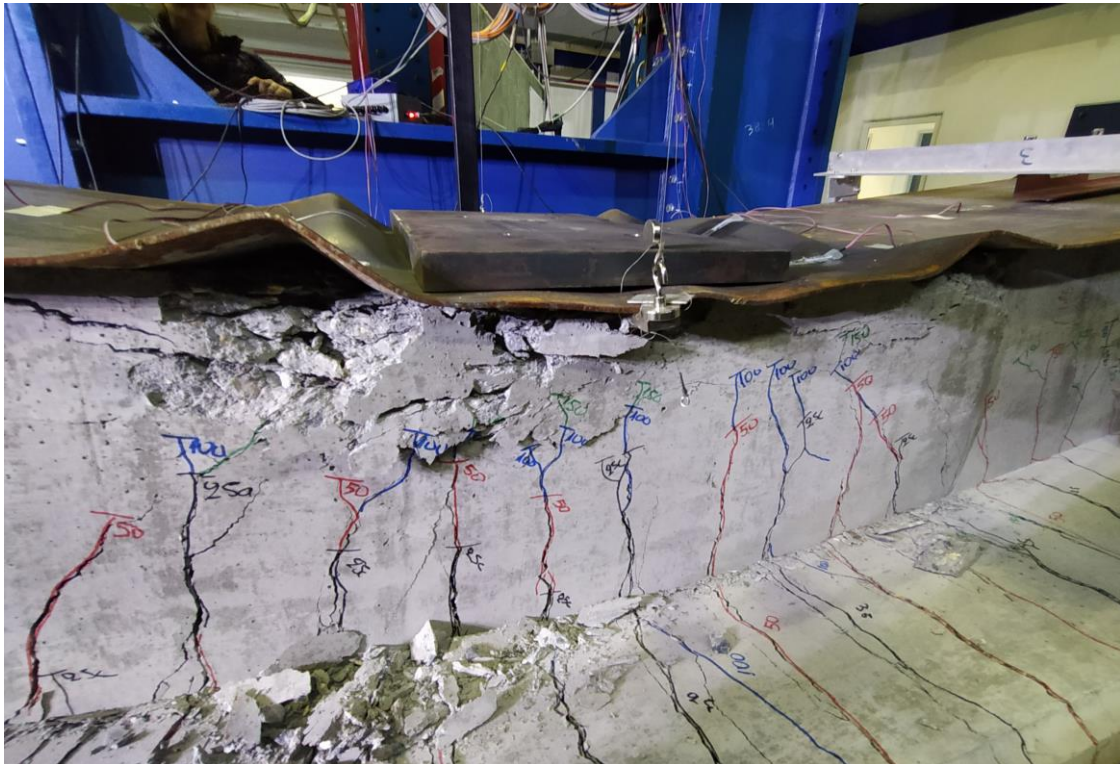
Σχήμα 4.19: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H4 με τις πειραματικές και τις αρχικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των χαρακτηριστικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.20: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H4 με τις πειραματικές και τις τελικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των πειρατικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.21: Καμπτική ρηγμάτωση δοκιμίου Η4.



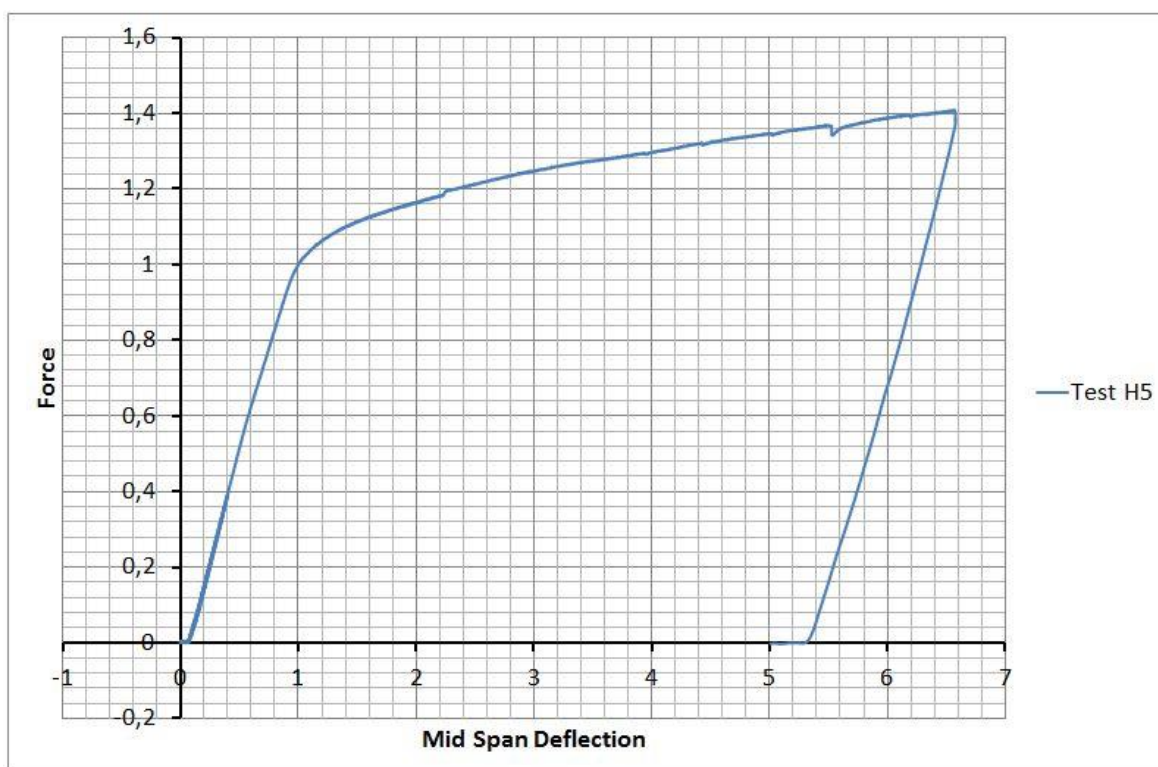
Σχήμα 4.22: Αστοχία σκυροδέματος υπό θλίψη και τοπικός λογισμός του χάλυβα της σιδηροδοκού.

4.5 Δοκίμιο H5

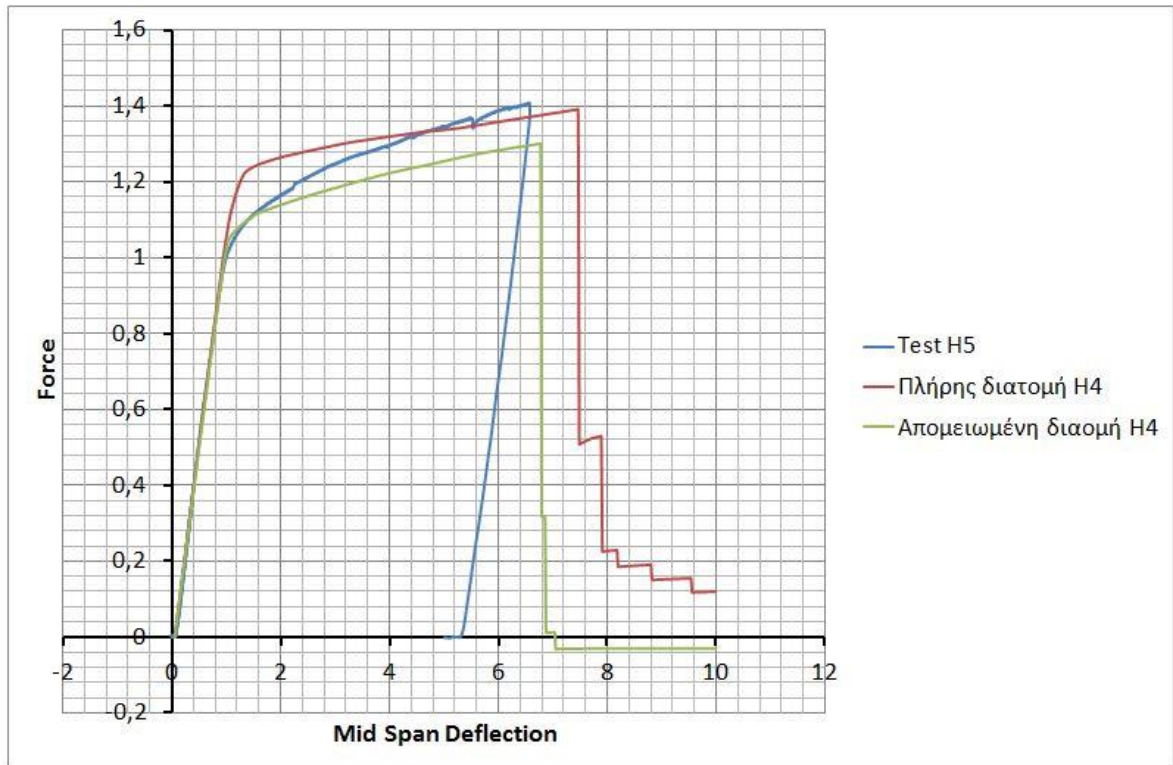
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα Δύναμης-Παραμόρφωσης που αφορούν το δοκίμιο H5. Το Σχήμα 4.23 απεικονίζει το πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ενώ τα Σχήματα 4.24 και 4.25 απεικονίζουν τα συγκριτικά διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες. Στις αναλυτικές καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.24 έχουν χρησιμοποιηθεί οι χαρακτηριστικές τιμές για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα ενώ σε αυτές του σχήματος 4.25 έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές των υλικών που έχουν προκύψει από τα πειράματα δοκιμών σκυροδέματος και δομικού χάλυβα.

Σχετικά με το διάγραμμα του Σχήματος 4.25 (το οποίο περιλαμβάνει και τις πραγματικές τιμές των υλικών) ως προς την αρχική δυσκαμψία της δοκού H5 παρατηρείται ταύτιση μεταξύ της αναλυτικής και της πειραματικής δυσκαμψίας. Με βάση το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η δυσκαμψία των αναλυτικών μοντέλων στο μεταπλαστικό κλάδο παρουσιάζει μεγαλύτερη πτώση σε σχέση με την πειραματική. Σε επίπεδο αντοχής τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζονται να είναι λίγο πιο συντηρητικά καθώς το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη αντοχή της τάξης του 11%. Τέλος τα μοντέλα εμφανίζουν λίγο μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σχέση με το πειραματικό δοκίμιο.

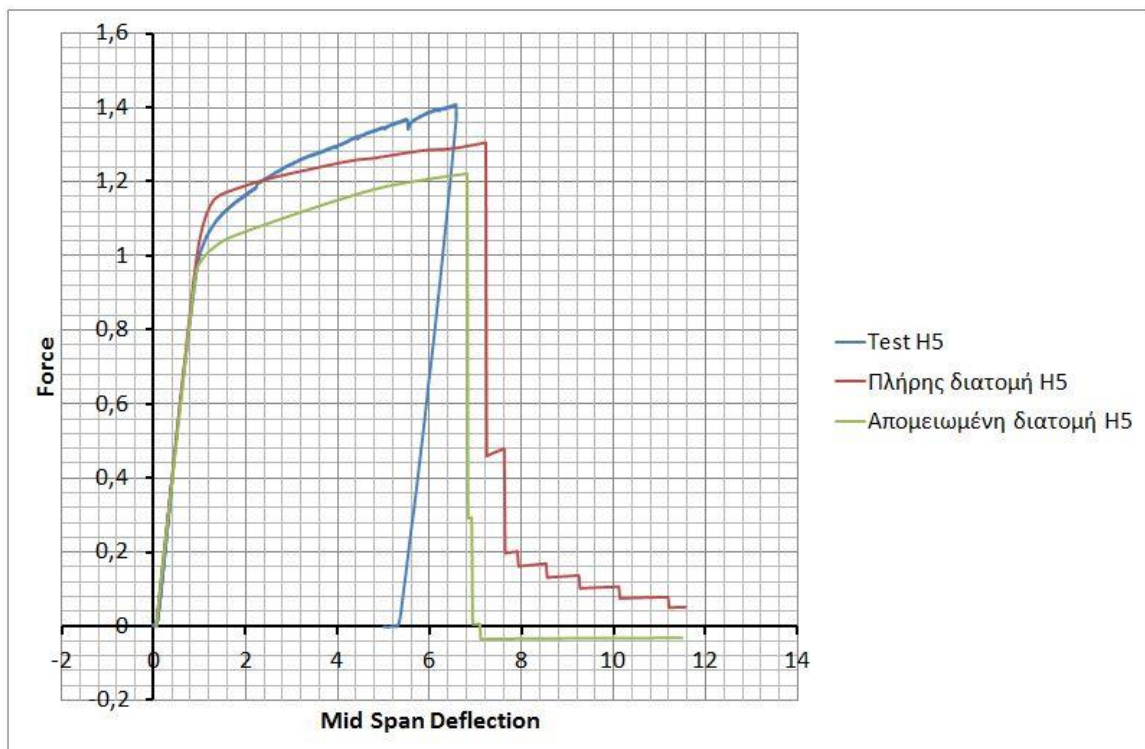
Τα Σχήματα 4.26 και 4.27 απεικονίζουν το δοκίμιο H5 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης δοκιμίου H5.



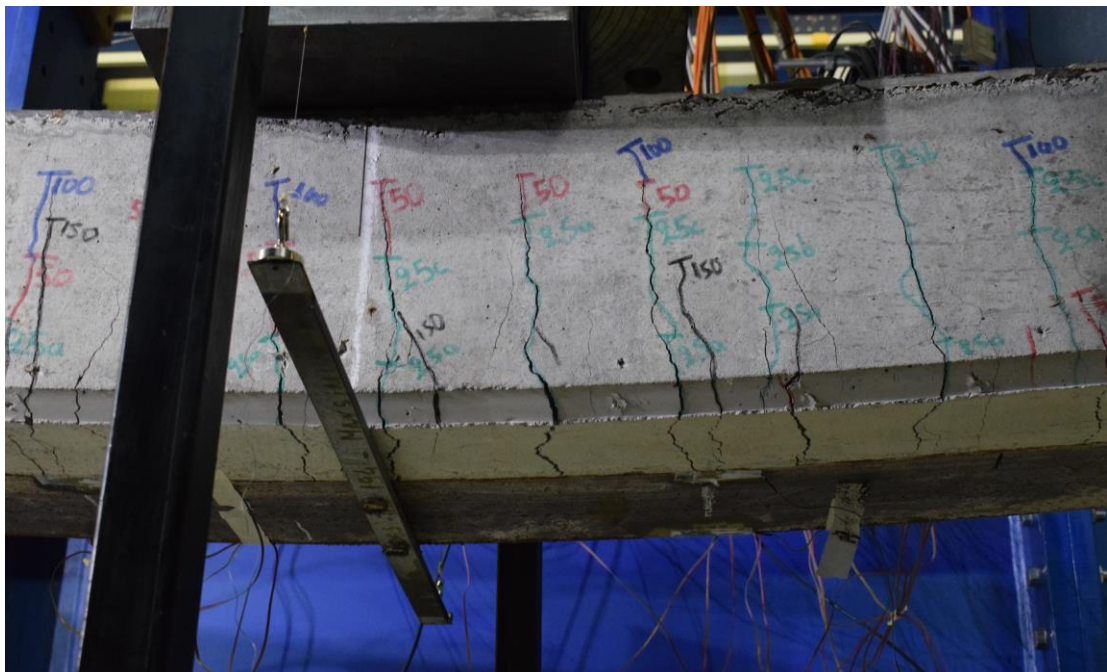
Σχήμα 4.24: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H5 με τις πειραματικές και τις αρχικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των χαρακτηριστικών τιμών των υλικών



Σχήμα 4.25: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H5 με τις πειραματικές και τις τελικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των πειρατικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.26: Δοκίμιο Η5 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



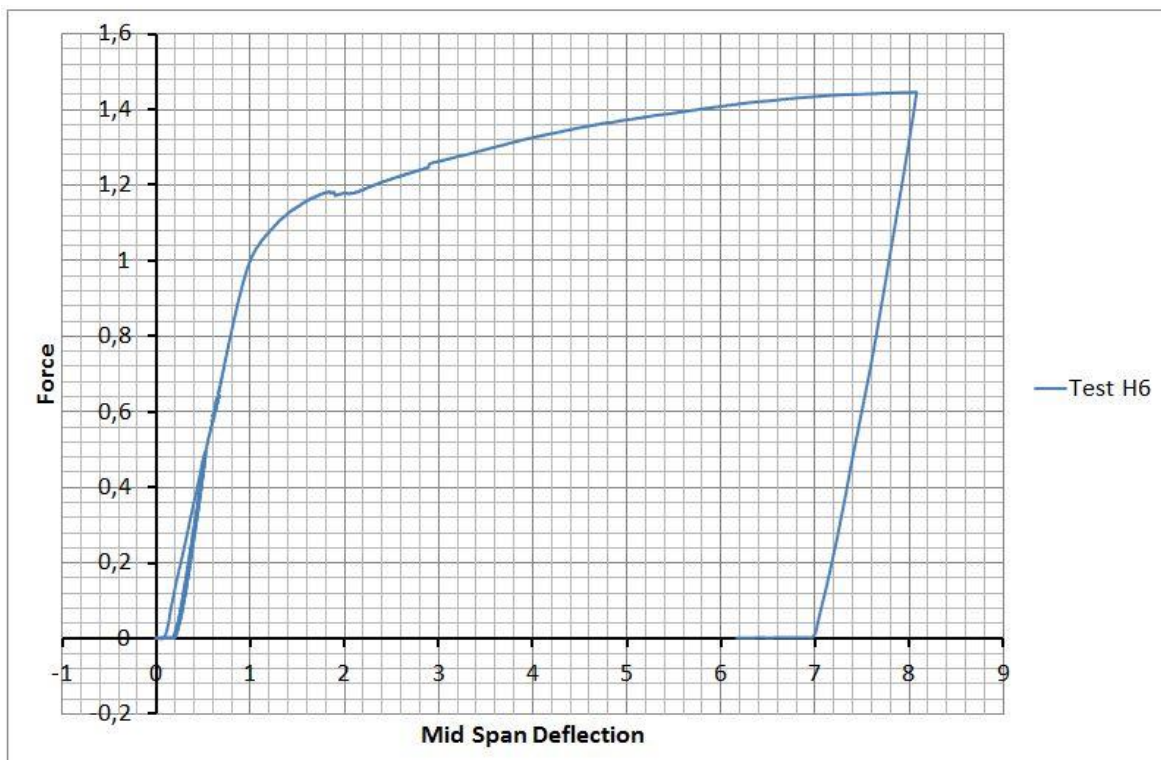
Σχήμα 4.27: Καμπτική ρηγμάτωση δοκιμίου Η5.

4.6 Δοκίμιο Η6

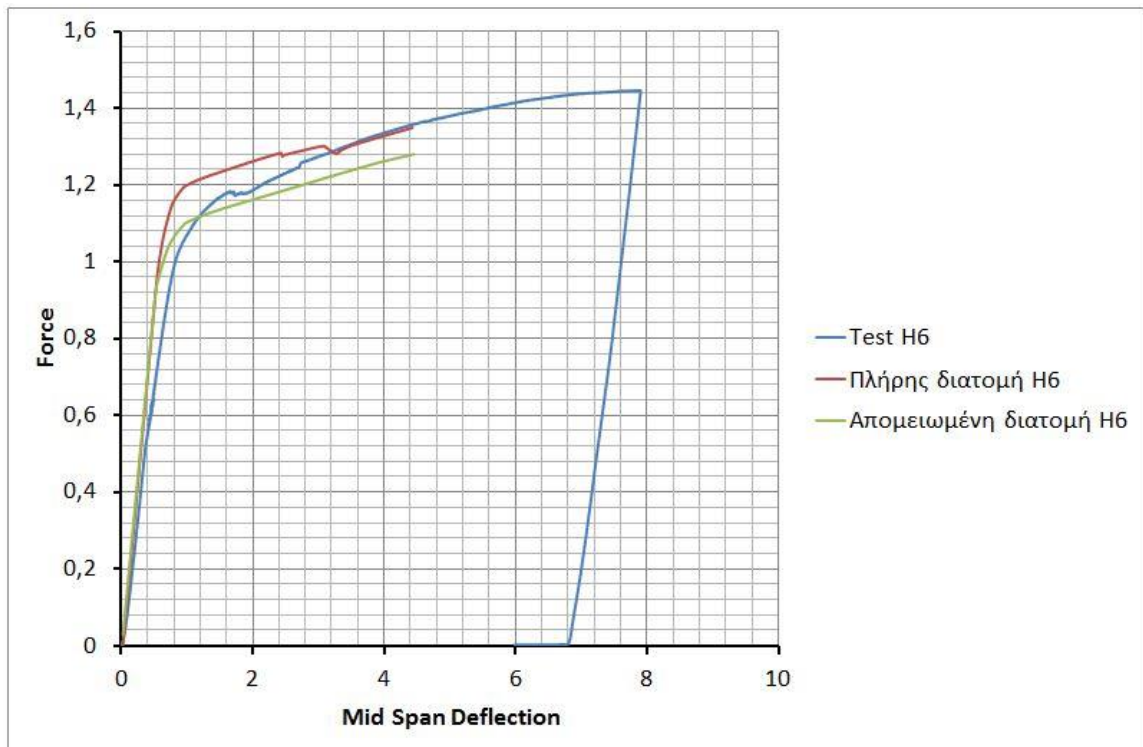
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα Δύναμης-Παραμόρφωσης που αφορούν το δοκίμιο Η6. Το Σχήμα 4.28 απεικονίζει το πειραματικό διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ενώ τα Σχήματα 4.29 και 4.30 απεικονίζουν τα συγκριτικά διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες. Στις αναλυτικές καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.29 έχουν χρησιμοποιηθεί οι χαρακτηριστικές τιμές για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα ενώ σε αυτές του σχήματος 4.30 έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές των υλικών που έχουν προκύψει από τα πειράματα δοκιμίων σκυροδέματος και δομικού χάλυβα.

Σχετικά με το διάγραμμα του Σχήματος 4.30 (το οποίο περιλαμβάνει τις πραγματικές τιμές των υλικών) παρατηρούμε ότι η αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη δυσκαμψία της τάξης του 32% σε σχέση με το πειραματικό μοντέλο. Με βάση το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο μεταπλαστικό κλάδο τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση της δυσκαμψίας σε σχέση με το πειραματικό δοκίμιο. Σε επίπεδο αντοχής τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζονται να είναι λίγο πιο συντηρητικά καθώς το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη αντοχή της τάξης του 15%. Τέλος τα αναλυτικά μοντέλα δεν μπορούν να μας δώσουν έγκυρη εκτίμηση σχετικά με την πλαστιμότητα που εμφανίζει το πειραματικό δοκίμιο καθώς το πρόγραμμα αδυνατεί να ολοκληρώσει τον αριθμό βημάτων που ορίσαμε δόθηκαν και συνεπώς το διάγραμμα κόβεται.

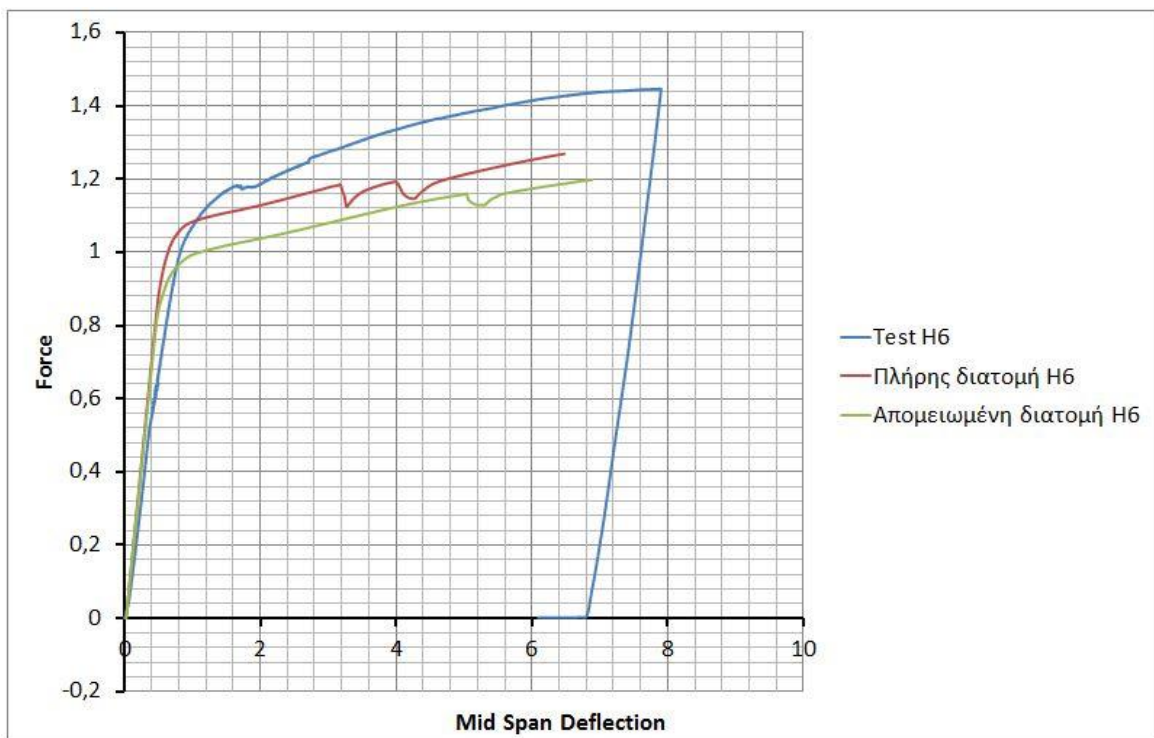
Τα Σχήματα 4.26 και 4.27 απεικονίζουν το δοκίμιο Η5 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 4.28: Διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης δοκιμίου Η6.



Σχήμα 4.29: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης δοκιμίου H6 με βάση τα πειραματικά και τα αναλυτικά αποτελέσματα.



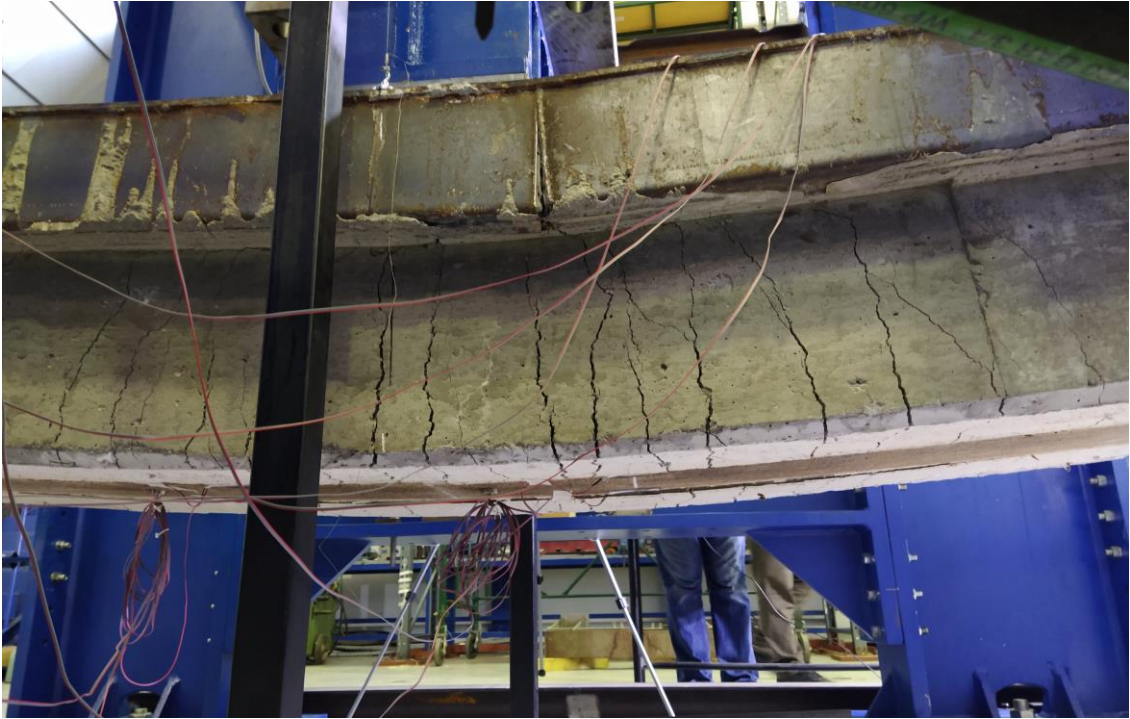
Σχήμα 4.30: Κοινό διάγραμμα Δύναμης-Παραμόρφωσης του δοκιμίου H6 με τις πειραματικές και τις τελικές αναλυτικές καμπύλες στις οποίες έγινε χρήση των πειρατικών τιμών των υλικών.



Σχήμα 4.31: Αστοχία συγκόλλησης ελασμάτων σιδηροδοκού .



Σχήμα 4.32: Τοπικός λυγισμός του άνω πέλματος της σιδηροδοκού δοκιμίου Η6.



Σχήμα 4.33: Καμπτική ρηγμάτωση δοκιμίου Η6.

5 Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό και με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια, παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των δοκιμών H1-H6.

- Η συγκεκριμένη μορφή σύμμικτων δοκών παρουσιάζει καλή συμπεριφορά υπό την επίδραση αρνητικών ροπών με εμφάνιση υψηλής αντοχής και πλαστιμότητας .
- Κατά την μοντελοποίηση των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των εγκάρσιων συνδετήρων προκαλεί βελτίωση σε επίπεδα διάτμησης και αύξηση της περίσφιξης χωρίς όμως να προκαλεί σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά του μοντέλου. Λόγο του πυκνού εσωτερικού οπλισμού το σκυρόδεμα θεωρείται από το πρόγραμμα ικανοποιητικά περισφιγμένο και συνεπώς η επιπλέον προσθήκη συνδετήρων δεν προκαλεί μεγάλες διαφορές στη συμπεριφορά.
- Ως προς την αρχική δυσκαμψία τα μοντέλα προσεγγίζουν ικανοποιητικά την δυσκαμψία των πειραματικών δοκιμών με εξαίρεση τα μοντέλα του δοκίμιου H6 τα οποία προκύπτουν να είναι αρκετά πιο δύσκαμπτα.
- Σχετικά με την δυσκαμψία στο μετελαστικό κλάδο στην πλειοψηφία των μοντέλων είναι ικανοποιητική με τις αναλυτικές καμπύλες να ακολουθούν την πορεία των πειραματικών όπως παρατηρήθηκε στα συγκριτικά διαγράμματα.
- Σε επίπεδο αντοχής τα αναλυτικά μοντέλα παρουσιάζονται να είναι λίγο πιο συντηρητικά σε σύγκριση με τα πειραματικά τα οποία εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή. της τάξης του 10-20%.
- Ως προς τη πλαστιμότητα παρατηρήθηκε δυσκολία του προγράμματος να ολοκληρώσει όλα τα βήματα της μεθόδου ώστε να υπάρξει τελική σύγκλιση του διαγράμματος σε κάποια τιμή. Συνεπώς δεν μπορεί να υπάρξει μια έγκυρη εκτίμηση σχετικά με την πλαστιμότητα των δοκιμών.

6 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι. (2010). «Σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Κίρτας Ε. (2014), “Τεχνική Έκθεση Νο.9: Εισαγωγή στο πρόγραμμα Seismostruct”
3. ArcelorMittal (2020) https://constructalia.arcelormittal.com/files/5_5_1_SlimFloor--e6ed7ccc7e15ff8fbb6a29eb8ce82342.pdf
4. Peiko (2020): Εγχειρίδιο σύμμικτης δοκού Delta Beam (a). <https://docplayer.gr/39753-Genika-peikko-greece-ae-agamemnonos-13-holargos-155-61-athina-til-210-65-64-644-fax-210-65-64-644-www-peikko-gr.html>
5. Peiko Greece 2020: Εγχειρίδιο σύμμικτης δοκού Delta Beam (b). <https://docplayer.gr/11734969-Deltabeam-symmikti-dokos.html>
6. Lecturer 147: Anatomy of multi-storey building. <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg14/10700.htm>
7. Eurocode 2: Design of concrete structures -EN 1992-1-1 (2004)
8. Eurocode 3: Design of steel structures -EN 1993-1-1 (2005)
9. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures- EN 1994-1-1 (2004)
10. Mander et al (1988)
11. SeismoStruct's Help System - © 2002-2018 Seismosoft Ltd