



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

---

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ  
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΥΠΕΡΣΤΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΑ ΦΟΡΤΙΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Καραχάλιος Ηλίας**

**Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος**

**Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Αθήνα, Μάρτιος 2012**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά των Αναπληρωτή καθηγητή του ΕΜΠ κ. Καττή Μαρίνο, επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τις γνώσεις, τη βοήθεια και τη συμπαράσταση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω των υποψήφιο διδάκτορα Καραλή Νίκο, για τη βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφερε σχετικά με το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επίσης και για την άριστη συνεργασία και την αμέριστη συμπαράσταση του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με στήριξαν ηθικά και έμπρακτα όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο πρωταρχικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός μιας μεταλλικής κατασκευής για την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών κάμψης σε δοκούς σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μια σειρά μετρήσεων και υπολογισμών, παραθέτονται και σχολιάζονται. Στο πρώτο σκέλος της εργασίας, τίθενται οι απαιτήσεις που θα αποτελέσουν τη βάση σχεδιασμού της εργαστηριακής κατασκευής και περιγράφεται το δομικό σύστημα, που επιλέχθηκε, καθώς και ο μηχανισμός επιβολής των φορτίων. Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση και ο σχεδιασμός του δομικού συστήματος της κατασκευής, με βάση τις σχετικές θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί στην μηχανική των κατασκευών, χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό λογισμικό πακέτο στατικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το τελικό αποτέλεσμα του σχεδιασμού ήταν η σύνταξη των σχετικών σχεδίων και λεπτομερειών της εργαστηριακής κατασκευής, προκειμένου να μπορεί να υλοποιηθεί από τον κατασκευαστή. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε ο πειραματικός έλεγχος της κατασκευής και προέκυψαν τα σχετικά αποτελέσματα που αφορούν την πειραματική επιβεβαίωση των βασικών απαιτήσεων της εργαστηριακής κατασκευής, μετά την υλοποίηση της και την εγκατάστασή της στο χώρο του εργαστηρίου. Στο τελευταίο σκέλος της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και γίνονται οι προτάσεις για την βελτίωση της κατασκευής.

## **ABSTRACT**

The primary purpose of this thesis is the design of a metal structure to perform experiments on bending beams of concrete. The results from a series of measurements and calculations, are listed and discussed. In the first part of the work are the requirements that will form the basis of laboratory design and construction of the structural system is described, selected, and the enforcement mechanism of the loads. To do the analysis and design of the structural system of construction, based on relevant theories developed in the mechanical construction, used a commercial software package static finite element analysis. The end result was the design drawing of the plans and construction details of the laboratory so that it can be implemented by the manufacturer. Subsequently, a review of the experimental design and the results derived for experimental confirmation of the essential requirements of laboratory construction, after completion of the installation and in the laboratory. In the last part of the work, we present the conclusions drawn from this thesis and made suggestions for improving the construction.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>1</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>3</b>
ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	3
2.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	3
2.2 Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....	4
2.3 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....	9
2.4 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....	11
2.4.1 Η βαθμονόμηση του συστήματος καταγραφής .....	11
2.4.2 Όργανα καταγραφής .....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>16</b>
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....	16
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....	16
3.2 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ .....	17
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	18
3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....	28
3.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗ .....	38
3.5.1 Έλεγχος τάσεων στα κατακόρυφα στοιχεία του πλαισίου.....	38
3.5.2 Έλεγχος τάσεων στα οριζόντια στοιχεία του πλαισίου .....	39
3.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΜΒΩΝ .....	40
3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ .....	41

---

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>44</b>
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....	44
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ.....	44
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	54
4.3.1 Σύγκριση της θεωρητικής και πειραματικής βύθισης της πειραματικής δοκού .....	54
4.3.2 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών παραμορφώσεων στις επιλεγμένες θέσεις του πλαισίου .....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>60</b>
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	60
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>62</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός μιας μεταλλικής κατασκευής για την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών κάμψης σε δοκούς σκυροδέματος. Η ανάγκη σχεδιασμού της παραπάνω κατασκευής προέκυψε στα πλαίσια της έρευνας που διεξάγεται τα τελευταία χρόνια στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ, πάνω σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP. Η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος, όπως δοκών και υποστυλωμάτων για την ανάπτυξη της απαραίτητης τεχνογνωσίας για την ασφαλή τους χρήση στην πράξη, απαιτεί πειραματικές δοκιμές σε δοκίμια φυσικού μεγέθους, προκειμένου να απαλειφθούν οι επιδράσεις μεγέθους στα αποτελέσματα. Το μέγεθος των δοκιμών και των φορτίων, που απαιτούνται, σε κλίμακα φυσικού μεγέθους, δημιουργούν ιδιαίτερες απαιτήσεις για μια τέτοια κατασκευή. Ένας από τους πρώτους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν να διαμορφώσει καταρχήν, ένα πλαίσιο τέτοιων απαιτήσεων, που αποτελούσαν τη βάση σχεδιασμού της κατασκευής και τον μηχανισμό επιβολής των φορτίων. Ο δεύτερος και βασικός στόχος ήταν η ανάλυση και ο σχεδιασμός της κατασκευής με βάση τις απαιτήσεις αυτές, χρησιμοποιώντας τις σχετικές θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί στην μηχανική των κατασκευών. Το τελικό αποτέλεσμα του σχεδιασμού ήταν η σύνταξη των σχετικών σχεδίων και λεπτομερειών της εργαστηριακής κατασκευής, προκειμένου να μπορεί να υλοποιηθεί από τον κατασκευαστή. Ένας τρίτος στόχος ήταν η πειραματική επιβεβαίωση των βασικών απαιτήσεων της εργαστηριακής κατασκευής, μετά την υλοποίηση της και την εγκατάσταση της στο χώρο του εργαστηρίου, που είχε προβλεφθεί. Ο πειραματικός έλεγχος αφορούσε, όχι μόνο τις απαιτήσεις αντοχής της πειραματικής κατασκευής, αλλά και τις απαιτήσεις λειτουργικότητας, με την ευρεία έννοια του όρου. Δηλαδή, πέρα από την απαίτηση του περιορισμένου εύρους μετατοπίσεων των δομικών μελών του πλαισίου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, η χρηστικότητα της επιτελεστικότητας της εργαστηριακής κατασκευής

στην εκτέλεση των σχετικών δοκιμών. Η οργάνωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο τίθενται οι απαιτήσεις σχεδιασμού της εργαστηριακής κατασκευής και περιγράφεται το δομικό σύστημα, που επιλέχθηκε, καθώς και το σύστημα φόρτισης της. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση και ο σχεδιασμός του δομικού συστήματος, χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό λογισμικό πακέτο στατικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία του πειραματικού ελέγχου της κατασκευής και τα σχετικά αποτελέσματα που προέκυψαν. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και γίνονται οι προτάσεις για την βελτίωση της κατασκευής.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

#### 2.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μεταλλικού πλαισίου, που θα αποτελεί το δομικό σύστημα μιας εργαστηριακής κατασκευής, που θα χρησιμοποιείται, για την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών, σε δομικά στοιχεία φυσικού μεγέθους. Για το σχεδιασμό του μεταλλικού πλαισίου τέθηκαν οι παρακάτω απαιτήσεις, που σχετίζονται με την αντοχή και τη λειτουργικότητα του:

- Το μεταλλικό πλαίσιο δεν θα πρέπει να μεταβιβάζει στο δάπεδο φορτία, όταν εκτελούνται πειραματικές δοκιμές. Η απαίτηση αυτή επιβάλλεται από το γεγονός ότι τα φορτία, που θα εφαρμόζονται στο πειραματικό στοιχείο, κατά τη διάρκεια των δοκιμών είναι μεγάλα σε μέγεθος και δεν μπορούν να παραληφθούν από τις πλάκες του υφιστάμενου κτιρίου. Συνεπώς, το μεταλλικό πλαίσιο θα πρέπει να σχεδιαστεί ως ένα υπερστατικό δομικό σύστημα, που θα μπορεί να παραλαμβάνει «εσωτερικά» τα επιβαλλόμενα φορτία.
- Το μεταλλικό πλαίσιο θα πρέπει να προσαρμοστεί λειτουργικά στο διαθέσιμο χώρο, που διαθέτει το εργαστήριο για την εγκατάσταση του. Έτσι, το μέγιστο μήκος και ύψος του πλαισίου θα πρέπει να επιλεγθούν με κριτήριο τις διαστάσεις του διαθέσιμου εργαστηριακού χώρου.

- Τα μέγιστα φορτία, που θα επιβάλλονται στο πλαίσιο κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, θα πρέπει να μην προκαλούν πλαστικές παραμορφώσεις στο μεταλλικό πλαίσιο. Να μην αναπτύσσονται, δηλαδή, μόνιμες παραμορφώσεις στα μεταλλικά μέλη του πλαισίου. Επομένως, ως φορτίο αστοχίας θα θεωρούμε εκείνο, που προκαλεί διαρροή στις διατομές των δομικών μελών του πλαισίου, ή διαφορετικά, το μεταλλικό πλαίσιο θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί ελαστικά.
- Τα μέγιστα φορτία, που θα επιβάλλονται στο μεταλλικό πλαίσιο, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, θα πρέπει να μπορούν να παραλαμβάνονται με ασφάλεια από τους κόμβους του. Επειδή οι συνδέσεις με συγκολλήσεις εισάγουν πολλές αβεβαιότητες στην κατασκευή, θα πρέπει αυτές να επιλεγθούν να είναι κοχλιωτές. Επειδή οι συνδέσεις αποτελούν τοπικές περιοχές στο δομικό σύστημα, που δεν επηρεάζουν σημαντικά την συνολική απόκρισή του, που επιθυμούμε να είναι ελαστική, ο έλεγχος επάρκειας των συνδέσεων αυτών θα μπορούσε να γίνει στα πλαίσια της πλαστικής θεωρίας, σύμφωνα με την EC3.
- Μία από τις βασικές μετρήσεις, που θα γίνεται στα πειραματικά δοκίμια, είναι αυτή των βυθίσεων, δηλαδή των κατακόρυφων μετατοπίσεων των πειραματικών δοκιμίων. Προκειμένου να απαλείψουμε τη «συνεισφορά» της μετατόπισης του πλαισίου στις μετρήσεις αυτές, θα πρέπει οι βυθίσεις του πλαισίου, λόγω της φόρτισης, να είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους από αυτές των δοκιμίων. Αν δηλαδή οι αναμενόμενες μετρήσεις της βύθισης της πειραματικής δοκού είναι της τάξης των cm, τότε οι μετατοπίσεις στο πλαίσιο θα πρέπει να είναι της τάξης των mm.

## 2.2 Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

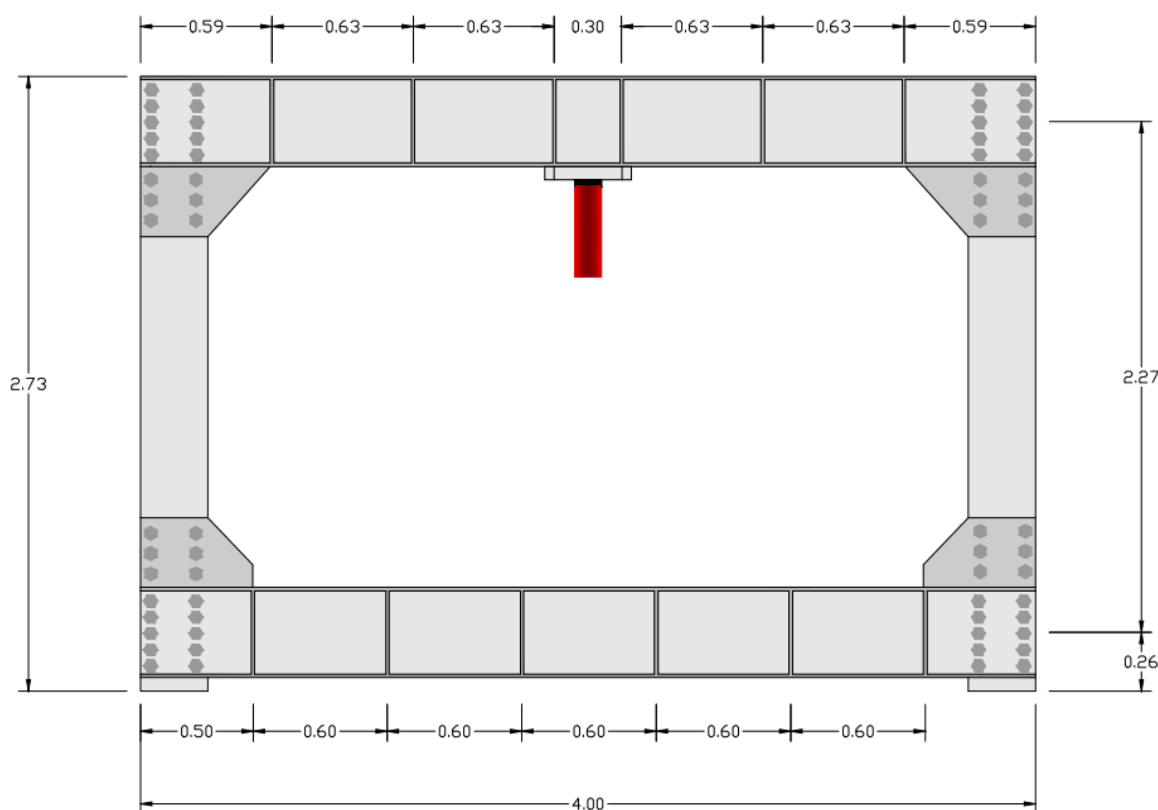
Το δομικό σύστημα του μεταλλικού πλαισίου, που επιλέχθηκε, δείχνεται στα Σχήματα 2-1, 2-2 και 2-3. Το σύστημα αυτό αποτελείται:

- από δύο κατακόρυφα μεταλλικά στοιχεία διατομών HEB 600,
- από δύο άνω οριζόντια μεταλλικά στοιχεία διατομών UPE 400,

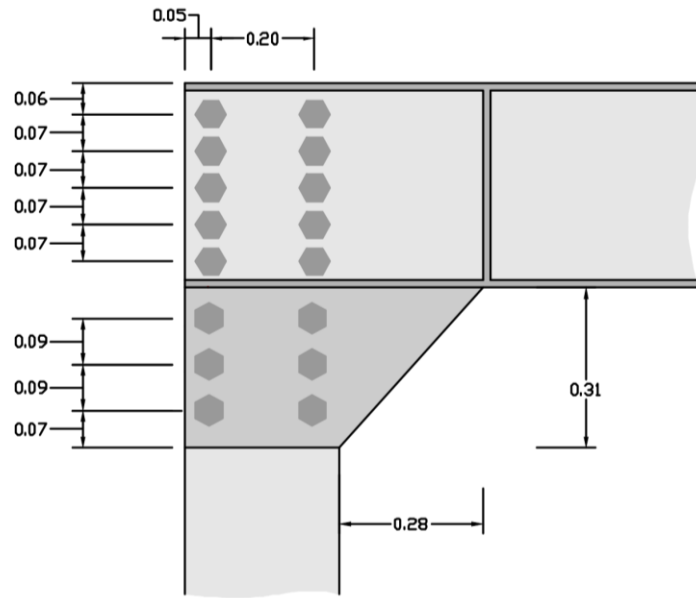
- από δύο κάτω οριζόντια μεταλλικά στοιχεία διατομών UPE 400,
- από μια μεταλλική πλάκα διαστάσεων 0.86 x 0.39 x 0.06 μέτρα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1, στα καμπτόμενα οριζόντια στοιχεία του πλαισίου, έχουν τοποθετηθεί εγκάρσιες νευρώσεις με συγκολλήσεις, σε κατάλληλες θέσεις, προκειμένου να αυξηθεί η καμπτική τους ακαμψία.

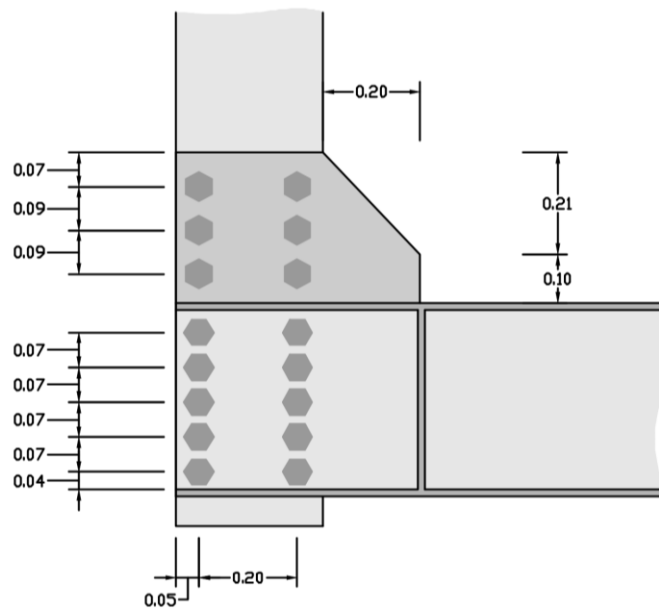
Τα οριζόντια στοιχεία συνδέονται με τα κατακόρυφα, μέσω κοχλιωτών συνδέσεων, που έχουν ενισχυθεί τοπικά, συγκολλώντας κατάλληλα μεταλλικά κομβο-ελάσματα. Η κάθε σύνδεση περιλαμβάνει οκτώ κοχλίες τύπου M30 και κατηγορίας 8.8, που έχουν διαταχθεί όπως δείχνεται στο Σχήμα 2-2. Στο ίδιο σχήμα δίνονται και οι διαστάσεις των κομβο-ελασμάτων. Το μεταλλικό πλαίσιο σε όψη και τομές, δείχνεται στα Σχήματα 2-3, 2-4 και 2-5.



Σχήμα 2-1 Γεωμετρικές διαστάσεις του πλαισίου

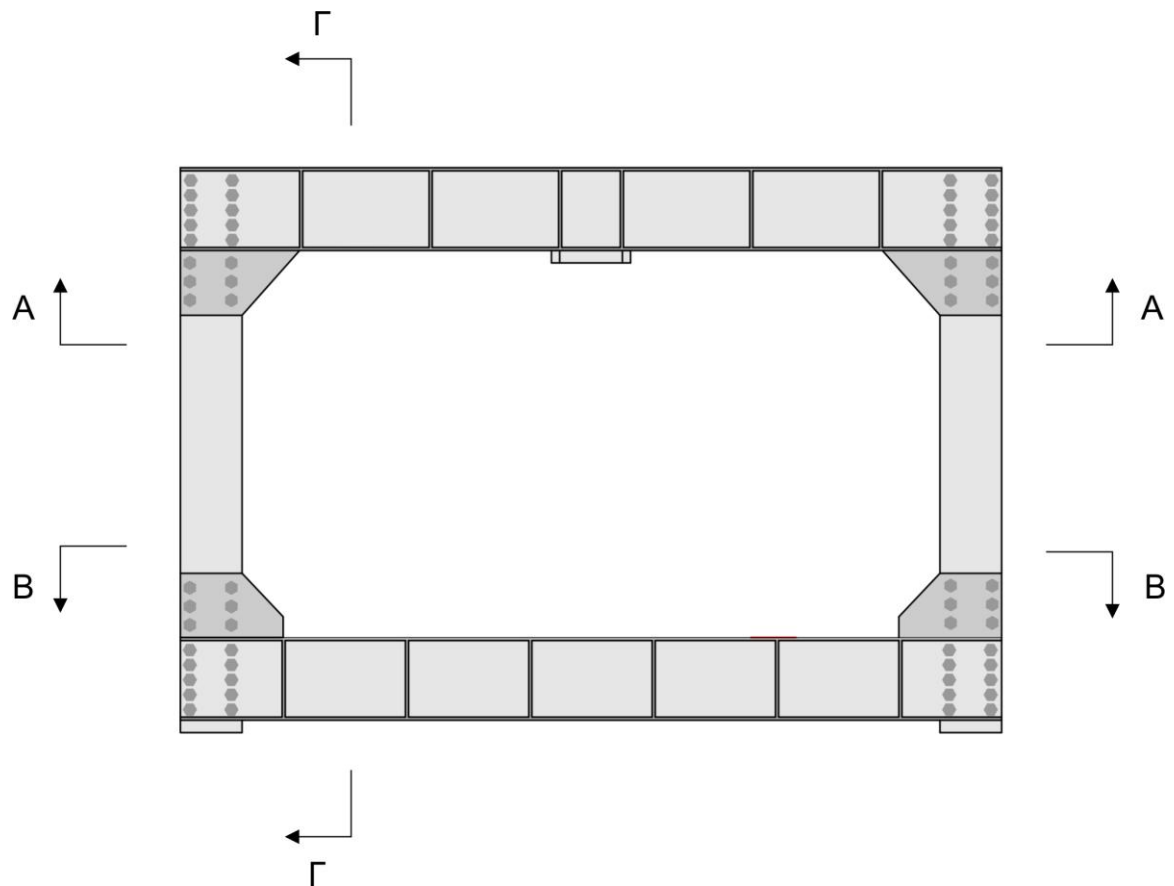


(α)

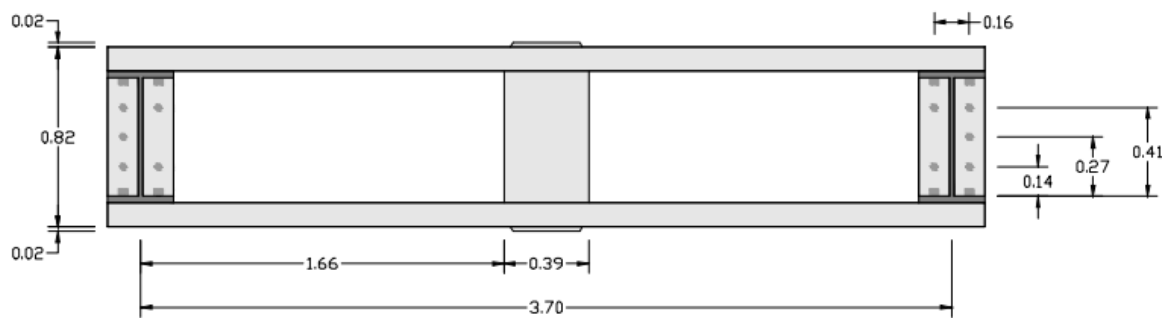


(β)

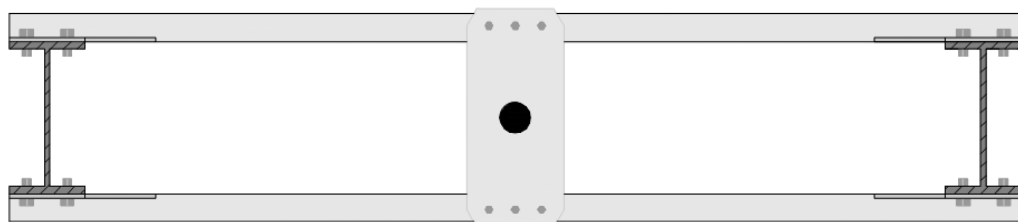
Σχήμα 2-2 (α) Άνω κόμβος, (β) κάτω κόμβος



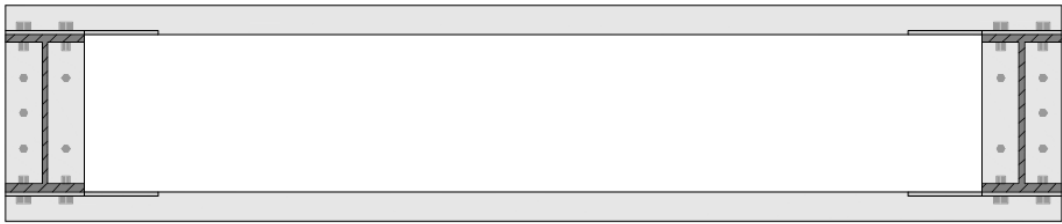
Σχήμα 2-3 Εμπρός όψη του μεταλλικού πλαισίου



(α)

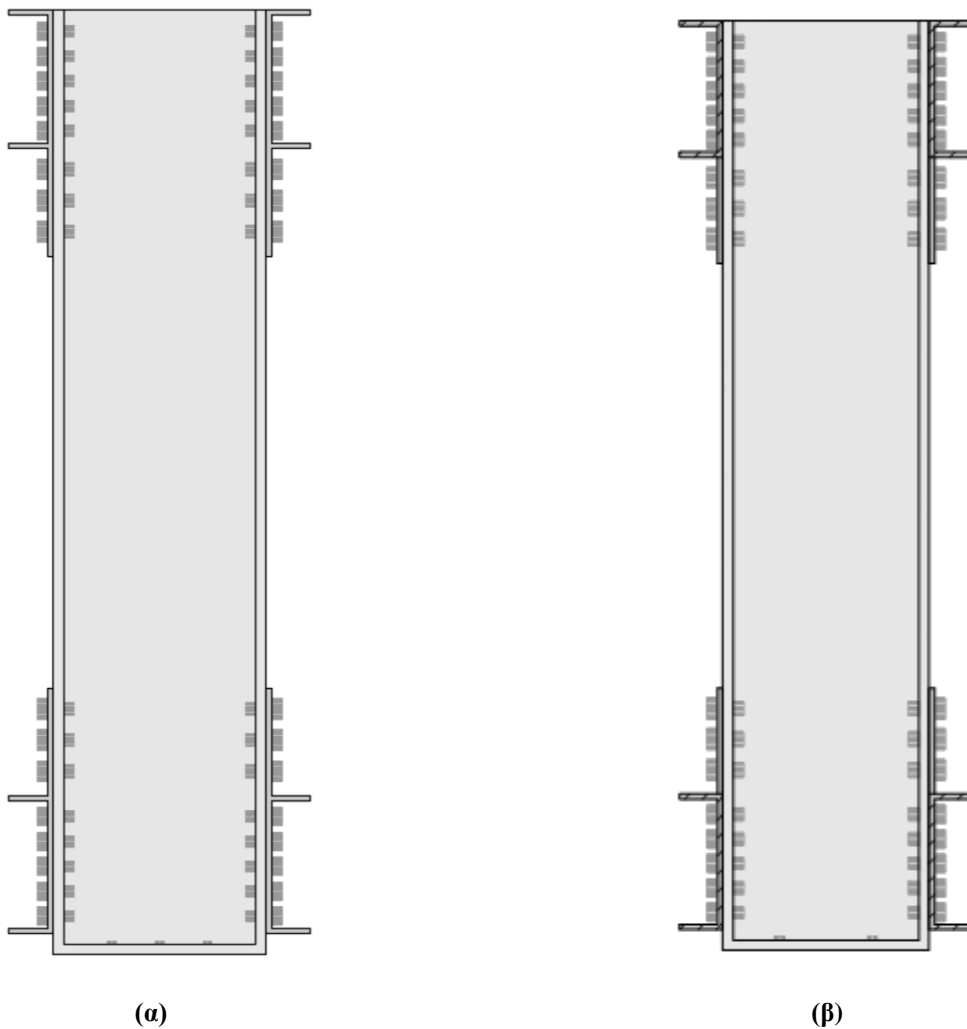


(β)



(γ)

Σχήμα 2-4 (α) Κάτοψη πλαισίου, (β) τομή Α-Α και (γ) τομή Β-Β

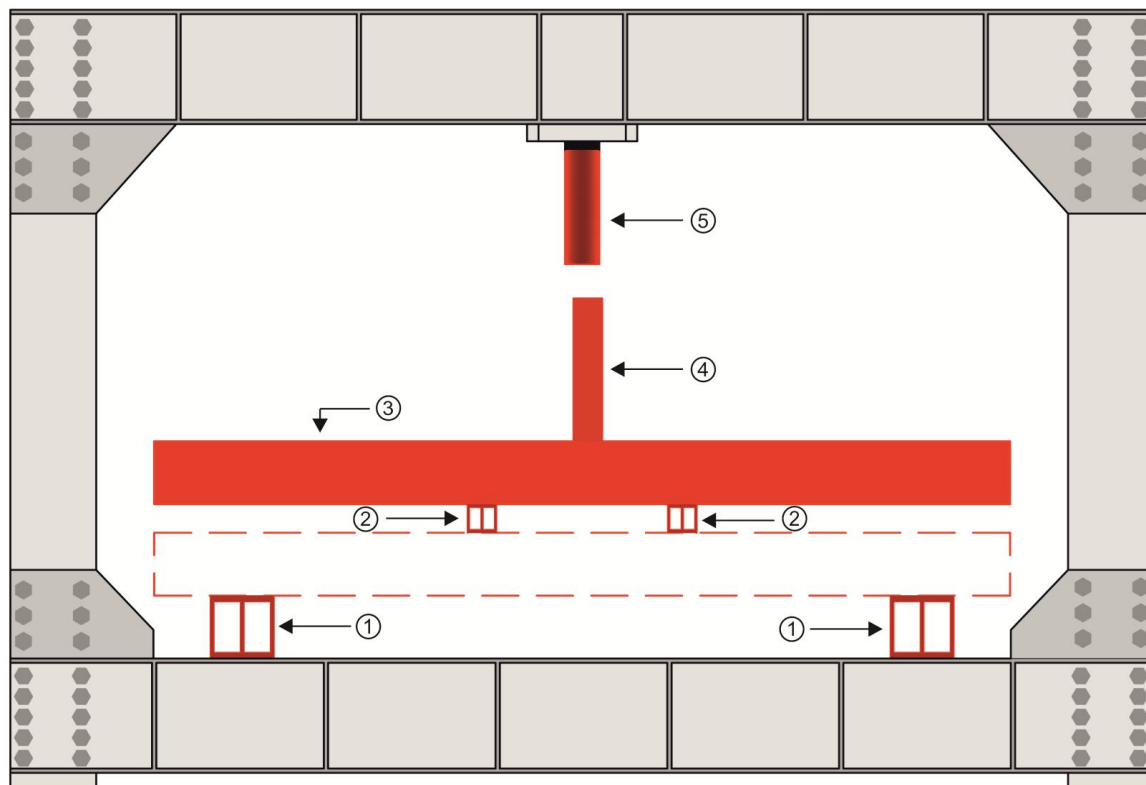


Σχήμα 2-5 (α) Αριστερή πλάγια όψη, (β) τομή Γ-Γ

### 2.3 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Το σύστημα φόρτισης που προσαρμόστηκε στο μεταλλικό πλαίσιο περιλαμβάνει:

- Δύο μεταλλικά τμήματα, που τοποθετούνται εγκάρσια και επάνω στα δύο κάτω οριζόντια στοιχεία του πλαισίου, που χρησιμοποιούνται για την έδραση των πειραματικών δοκών (βλέπε στοιχεία 1 στο Σχήμα 2-6). Τα δύο αυτά στοιχεία έχουν κατασκευαστεί από διατομή τύπου **I** και έχουν ενισχυθεί πλευρικά, με συγκολλημένα μεταλλικά ελάσματα πάχους 10 mm. Το κάθε στοιχείο έχει μήκος 900 mm, πλάτος 220 mm και βάρος, περίπου, 930 N. Τα δύο αυτά στοιχεία είναι μετακινούμενα, έτσι ώστε να τοποθετούνται στην επιθυμητή διάταξη.
- Δύο μεταλλικά τμήματα, που τοποθετούνται επάνω από την πειραματική δοκό, προκειμένου να μεταφερθεί σε αυτή, σημειακά, το φορτίο της πρέσας (βλέπε στοιχεία 2 στο Σχήμα 2-6). Τα τμήματα αυτά είναι κατασκευασμένα από διατομή τύπου **I** και έχουν ενισχυθεί πλευρικά, με συγκολλημένα μεταλλικά ελάσματα, πάχους 10 mm. Καθένα από τα τμήματα αυτά, έχει μήκος 500 mm, πλάτος 100 mm και βάρος 200 N.
- Ένα οριζόντιο μεταλλικό στοιχείο, που τοποθετείται επάνω στα δύο τμήματα, που περιγράφονται αμέσως παραπάνω (βλέπε στοιχείο 3 στο Σχήμα 2-6). Με το στοιχείο αυτό, το φορτίο, που παραλαμβάνεται από την πρέσα, μεταβιβάζεται στην πειραματική δοκό με δύο ίσα σημειακά φορτία. Το στοιχείο αυτό έχει κατασκευαστεί από διατομή τύπου **I**, και έχει ενισχυθεί πλευρικά, με συγκολλημένα μεταλλικά ελάσματα πάχους 10 mm. Έχει μήκος 2990 mm, πλάτος 220 mm και βάρος, περίπου, 3100 N.
- Ένα κατακόρυφο μεταλλικό τμήμα, που τοποθετείται κάθετα στο αμέσως παραπάνω στοιχείο (βλέπε στοιχείο 4 στο Σχήμα 2-6). Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιείται για να παραλαμβάνει το φορτίο από την πρέσα και να το μεταφέρει στο παραπάνω οριζόντιο στοιχείο. Το τμήμα αυτό έχει διατομή **I** και έχει ενισχυθεί πλευρικά όπως τα προαναφερθέντα στοιχεία. Διαθέτει μήκος 500 mm, πλάτος 100 mm, και βάρος, περίπου, 200 N.



Σχήμα 2-6 Η διάταξη του συστήματος φόρτισης

Το σύστημα φόρτισης, εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, περιλαμβάνει και την ηλεκτρο-υδραυλική πρέσα (βλέπε στοιχείο 5 στο Σχήμα 2-6). Η πρέσα αυτή αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Μια πλήρη εμβολοφόρα ηλεκτρο-υδραυλική αντλία των 700 bar, που αποτελείται από τέσσερα έμβολα, με διάμετρο  $\Phi 9$  και παροχή λαδιού 2 lt/min και απεικονίζεται στο Σχήμα 2-7(α).
- Ένα κύλινδρο διπλής κατεύθυνσης, με δυνατότητα επιβολής δύναμης 500 kN. Το έμβολο έχει διαδρομή 300 mm, επιφάνειά  $70.1 \text{ mm}^2$  και βάρος, περίπου, 200 N. Το έμβολο αυτό δείχνεται στο Σχήμα 2-7(β).
- Δύο σωλήνες υψηλής πίεσης, των τεσσάρων μέτρων, που συνδέουν την αντλία με το έμβολο (Σχήμα 2-7(α)).
- Τέσσερις ταχυσυνδέσμους, που είναι τοποθετημένοι στη μία άκρη των σωληνώσεων και τις συνδέουν με το έμβολο (Σχήμα 2-7(β)).





(α)

(β)

**Σχήμα 2-7 (α) Ηλεκτρο-υδραυλική αντλία και σωλήνες υψηλής πίεσης, (β) έμβολο διπλής κατεύθυνσης και ταχυσύνδεσμοι**

Γενικά, οι κύλινδροι διπλής κατεύθυνσης περιέχουν δύο ρευστά σώματα, έτσι ώστε η πίεση να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τόσο για την επέκταση, όσο και για την υποχώρηση του εμβόλου. Αυτός ο τύπος της αντλίας είναι ο πιο διαδεδομένος, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο σχεδόν το εύρος των πειραματικών δοκιμών.

## 2.4 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

### 2.4.1 Η βαθμονόμηση του συστήματος καταγραφής

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την καταγραφή των φορτίων που θα επιβάλλονται στην πειραματική δοκό, έγινε η βαθμονόμηση της ηλεκτρο-υδραυλικής πρέσας. Για τη βαθμονόμηση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν:

- μία δυναμοκουψέλη τύπου IMPACT CC06 – 100T, που δείχνεται στο Σχήμα 2-8(α),
- ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής τύπου Tracker 200, που δείχνεται στο Σχήμα 2-8(β).



(α)



(β)

**Σχήμα 2-8 (α) Η δυναμοκυψέλη τύπου IMPACT CC06 – 100T, (β) το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής τύπου Tracker 200**

Κατά τη βαθμονόμηση του εμβόλου, η δυναμοκυψέλη ήταν συνδεδεμένη, μέσω ενός καλωδίου, με το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής. Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, για μια συγκεκριμένη τιμή πίεσης της αντλίας, το έμβολο εξασκούσε επάνω στη δυναμοκυψέλη μια συγκεκριμένη τιμή δύναμης (Σχήμα 2-9), που την κατέγραφε ο ηλεκτρονικός καταγραφέας (Σχήμα 2-8(β)).



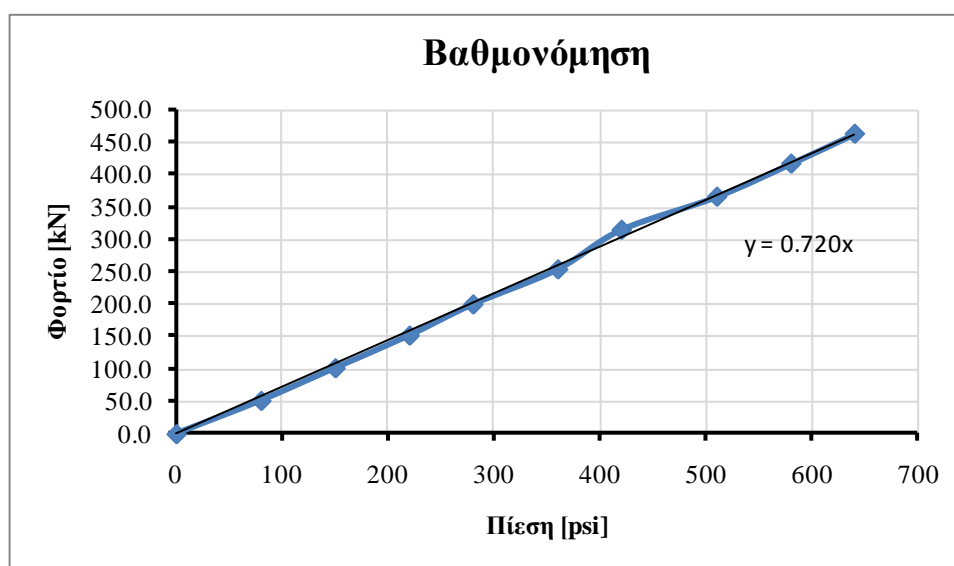
**Σχήμα 2-9 Η θέση της δυναμοκυψέλης στο σύστημα φόρτισης**

Για τη βαθμονόμηση του συστήματος καταγραφής έγινε μια σειρά μετρήσεων πίεσης και αντίστοιχης δύναμης, που καταχωρούνται στον Πίνακα 2-1. Τοποθετώντας τα αποτελέσματα αυτά σε ένα διάγραμμα πίεσης-δύναμης, προέκυψε ότι τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται γραμμικά. Η βέλτιστη ευθεία, που προσαρμόζεται στα αποτελέσματα αυτά με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, περιγράφεται από τη σχέση:

$$N = 0.720p, \quad [p \text{ σε bar}, N \text{ σε kN}] \quad (2.1)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 Μετρήσεις βαθμονόμησης

$p_i$ (bar)	0	80	150	220	280	360	420	510	580	640
$N_i$ (kN)	0	51.3	101.6	152.0	200.0	254.0	315.0	366.0	417.0	463.0



Σχήμα 2-10 Διάγραμμα βαθμονόμησης του συστήματος καταγραφής

#### 2.4.2 Όργανα καταγραφής

Για τη μέτρηση της απόκριση των πειραματικών δοκιμίων, προσαρμόστηκαν στο μεταλλικό πλαίσιο τα παρακάτω όργανα καταγραφής:

- ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής (data logger),

- δύο βελόμετρα, και
- το πιεσόμετρο της αντλίας.

Το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής (data logger), που δείχνεται στο Σχήμα 2-11, είναι ένα ψηφιακό σύστημα μέτρησης μετατόπισης, που συγκεντρώνει τις μετρήσεις και προσφέρει υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα αποτελεσμάτων. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας από τη συμβατική μέθοδο, αφού δεν επηρεάζεται από την αρχική παραμόρφωση και δεν παρουσιάζει σφάλμα στη γραμμικότητα του κυκλώματος γέφυρας που διαθέτει. Με την έναρξη επιβολής φορτίου όλες οι μετρήσεις, καταγράφονται αυτόματα από το σύστημα καταγραφής δεδομένων. Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται γραφικά σε πραγματικό χρόνο και αποθηκεύονται στον ηλεκτρονικό καταγραφέα για κάθε δευτερόλεπτο.



Σχήμα 2-11 Το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής, data logger

Το ηλεκτρονικό βελόμετρο συνδέεται σε ένα από τα κανάλια του συστήματος καταγραφής μετατόπισης, προσφέροντας τη δυνατότητα μέτρησης του βέλους κάμψης των πειραματικών δοκιμίων στο κατάλληλο σημείο επιλογής (Σχήμα 2-12(α)). Για τις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκε και ένα μηχανικό βελόμετρο, που φαίνεται στο Σχήμα 2-12(β).



(α)



(β)

Σχήμα 2-12 (α) Το ηλεκτρονικό βελόμετρο, (β) το μηχανικό βελόμετρο

Το πιεσόμετρο, που είναι ενσωματωμένο στην αντλία της ηλεκτρο-υδραυλικής πρέσας, παρέχει για κάθε χρονική στιγμή μια τιμή της πίεσης του υγρού στο σωλήνα. Το πιεσόμετρο της αντλίας, φαίνεται στο Σχήμα 2-13.



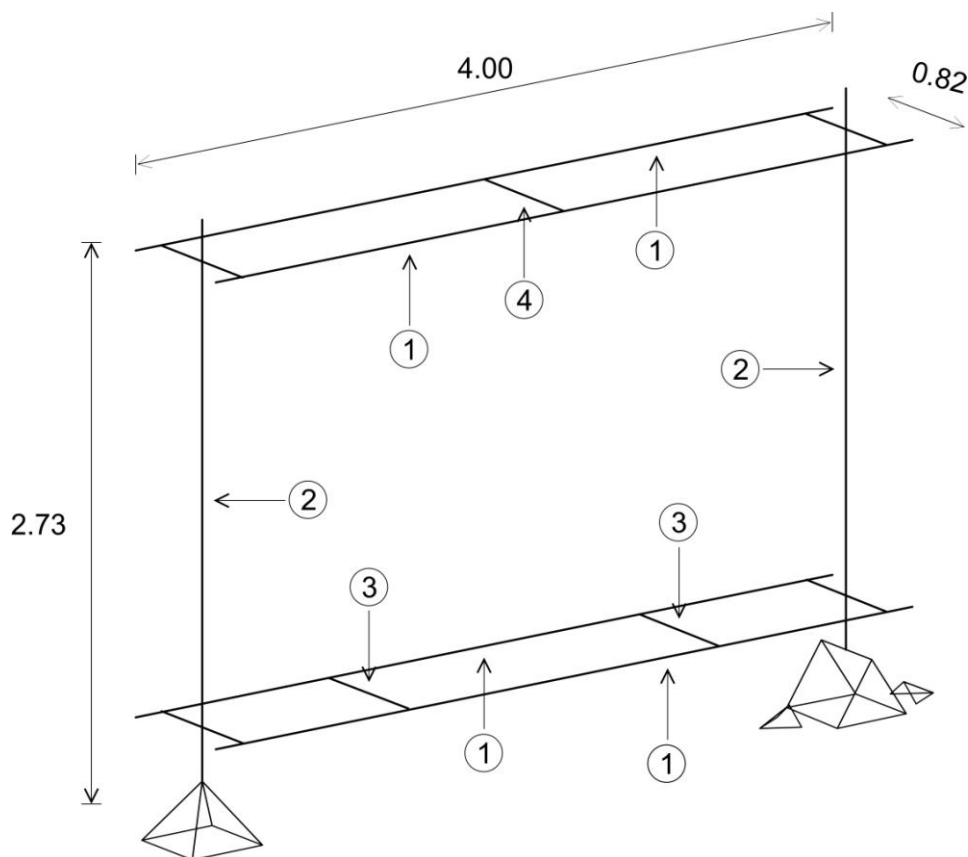
Σχήμα 2-13 Το πιεσόμετρο της αντλίας της ηλεκτρο-υδραυλικής πρέσας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

### 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ





Για τον προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών, του δομικού συστήματος της πλαισιωτής κατασκευής, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό προσομοιώθηκε με ένα χωρικό πλαίσιο, με τη γεωμετρία που δείχνεται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1 Το δομικό σύστημα της πλαισιωτής κατασκευής

Το χωρικό αυτό πλαίσιο, απαρτίζεται από κατακόρυφα και οριζόντια γραμμικά στοιχεία, που συνδέονται μεταξύ τους με άκαμπτους κόμβους. Οι διατομές του δομικού συστήματος με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους μεγέθη, δείχνονται στον Πίνακα 3-1.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 Τα γεωμετρικά μεγέθη των στοιχείων του δομικού συστήματος**

Στοιχεία	Τύπος	Γεωμετρικές διαστάσεις	Ροπή αδράνειας (cm <sup>4</sup> )	Εμβαδόν (cm <sup>2</sup> )	Ελαστικές ροπές αντίστασης (cm <sup>3</sup> )
1	HEB 600		171000	270	5700
2	UPE 400		20350	91.5	1020
3	Ορθογωνική πλάκα		702	234	125
4	HEB 220		8090	91	245

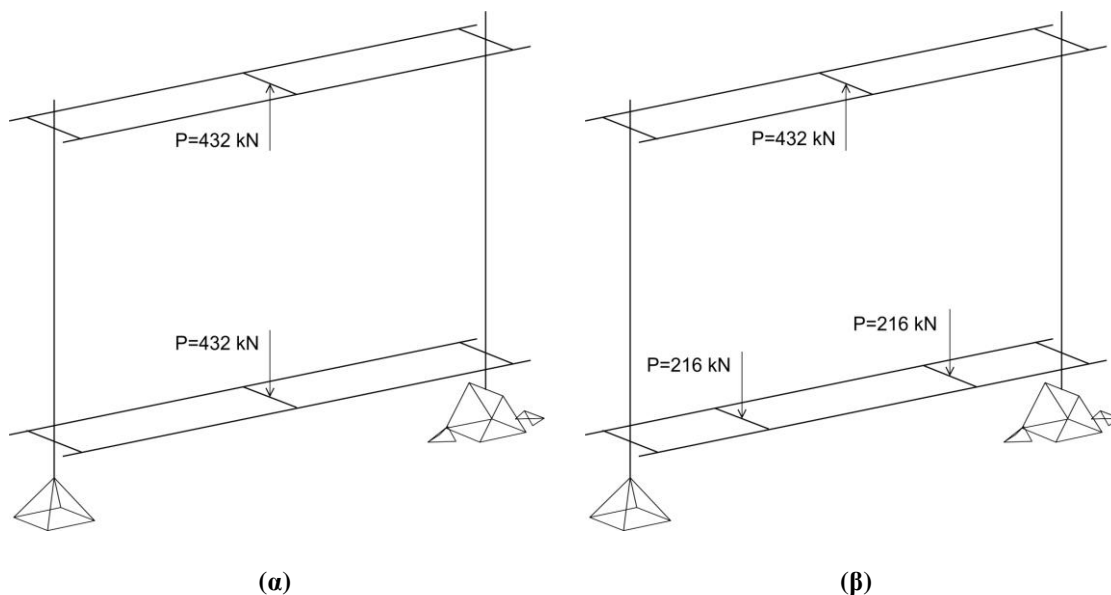
Το δομικό σύστημα της πλαισιωτής κατασκευής, προσομοιώνεται με την μεσαία γραμμή των στοιχείων και οι διαστάσεις που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση δείχνονται στο Σχήμα 3-1. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων, που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση είναι:

- Μέτρο ελαστικότητας:  $E = 200000 \text{ MPa}$ ,
- Τάση διαρροής:  $\sigma_y = 450 \text{ MPa}$ .

### 3.2 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Το δομικό σύστημα της πλαισιωτής κατασκευής θα αναλυθεί για τα μέγιστα φορτία, που θα το καταπονήσουν κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Τα μέγιστα αυτά φορτία αντιστοιχούν στη μέγιστη δύναμη, που μπορεί να εξαχθεί από την πρέσα, που

είναι ενσωματωμένη στο πλαίσιο. Για την μέγιστη τιμή  $P$ , της δύναμης της πρέσας, που είναι ίση με 432 kN, οι φορτίσεις του δομικού συστήματος που αναλύονται είναι αυτές, που δείχνονται στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2 (α) Φόρτιση I, (β) Φόρτιση II

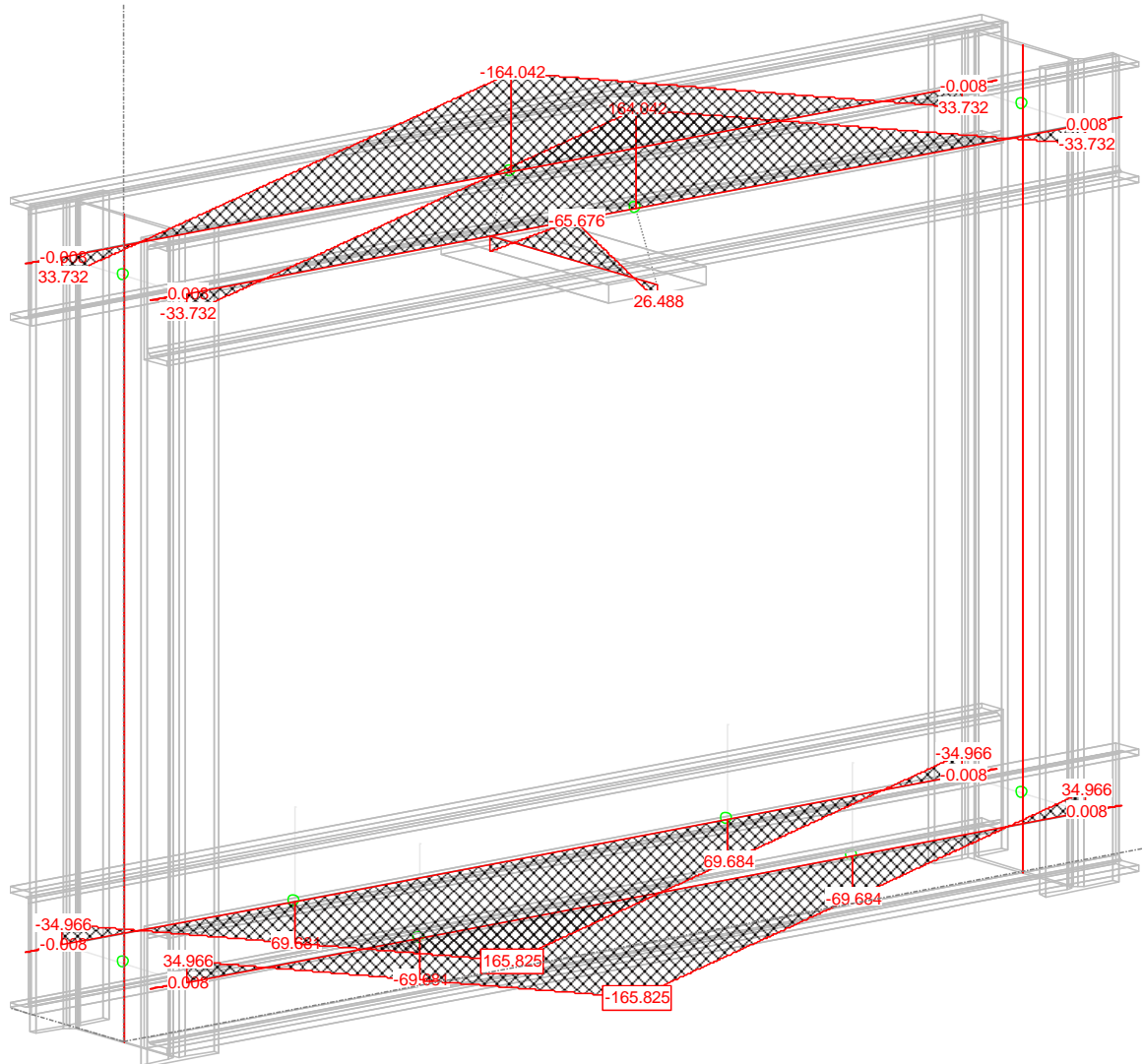
Για τις δύο φορτίσεις του δομικού συστήματος, που δείχνονται στο Σχήμα 3-2, οι πάνω δυνάμεις αντιπροσωπεύουν την αντίδραση του εμβόλου στο πλαίσιο, ενώ οι κάτω δυνάμεις τις αντιδράσεις των πειραματικών στοιχείων. Η φόρτιση I αντιστοιχεί στην περίπτωση, που το πειραματικό στοιχείο είναι υποστύλωμα, ή κάποιο άλλο κατακόρυφο στοιχείο, ενώ στην φόρτιση II το δομικό στοιχείο είναι μια δοκός. Η ανάλυση, που θα γίνει για τις δύο αυτές φορτίσεις, θα είναι ελαστική, και θα πραγματοποιηθεί τόσο για την περίπτωση απουσίας των συντελεστών επαύξησης των φορτίων (ανάλυση λειτουργικότητας), όσο και για την περίπτωση ύπαρξης αυτών (ανάλυση σχεδιασμού).

### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

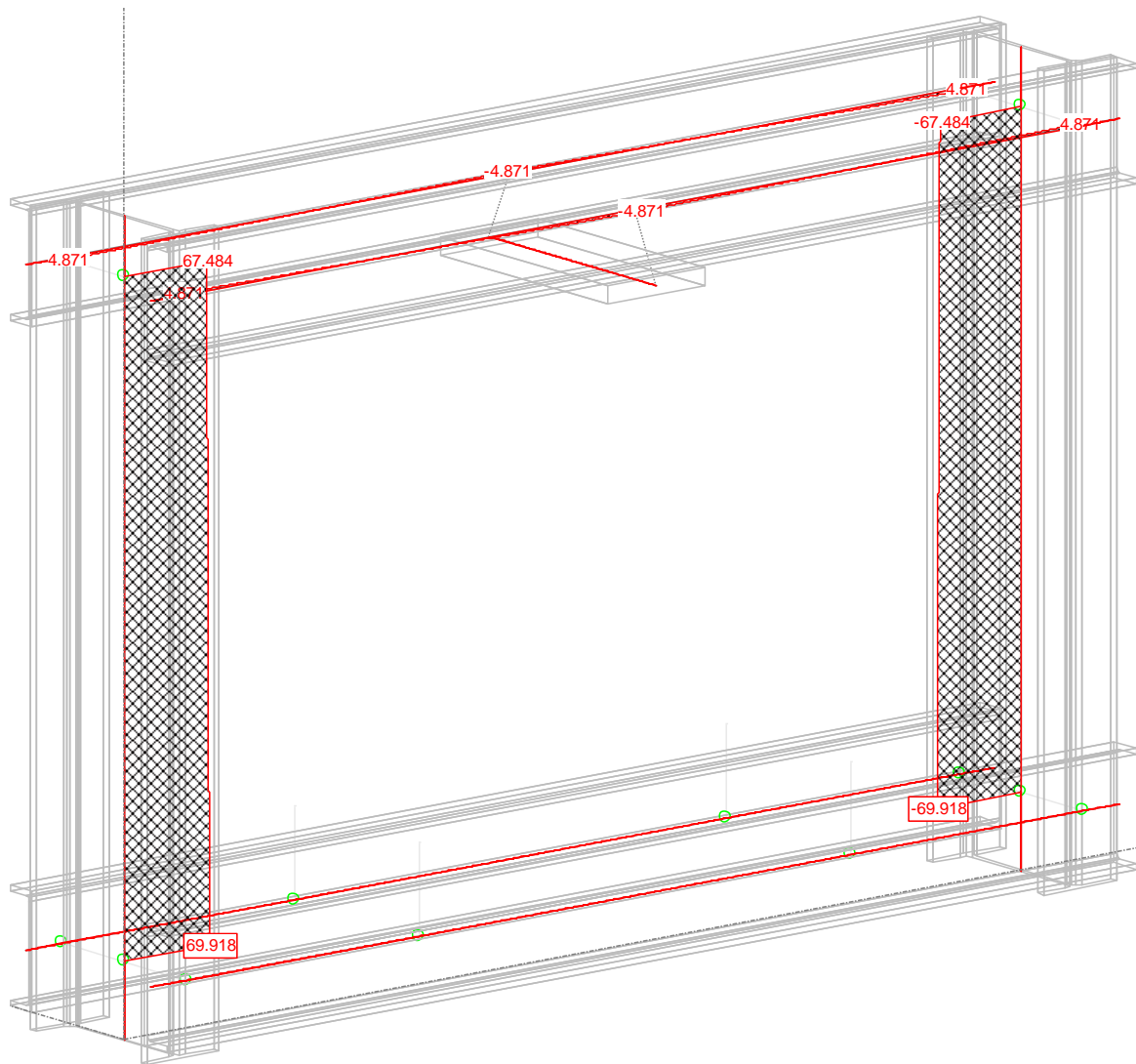
Το μεταλλικό πλαίσιο θα αναλυθεί για τις δύο φορτίσεις, που δείχνονται στο Σχήμα 3-2, προκειμένου να προσδιοριστούν τα εντατικά μεγέθη σε κάθε διατομή των δομικών του μελών. Η ανάλυση, που θα γίνει, θα είναι γραμμικά ελαστική, με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου STATIK-5, που διαθέτει το εργαστήριο της Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Σε συνθήκες λειτουργικότητας, οι συντελεστές παραγοντοποίησης των φορτίων και οι συντελεστές υλικού θα ληφθούν ίσοι με τη μονάδα. Το πλαίσιο είναι



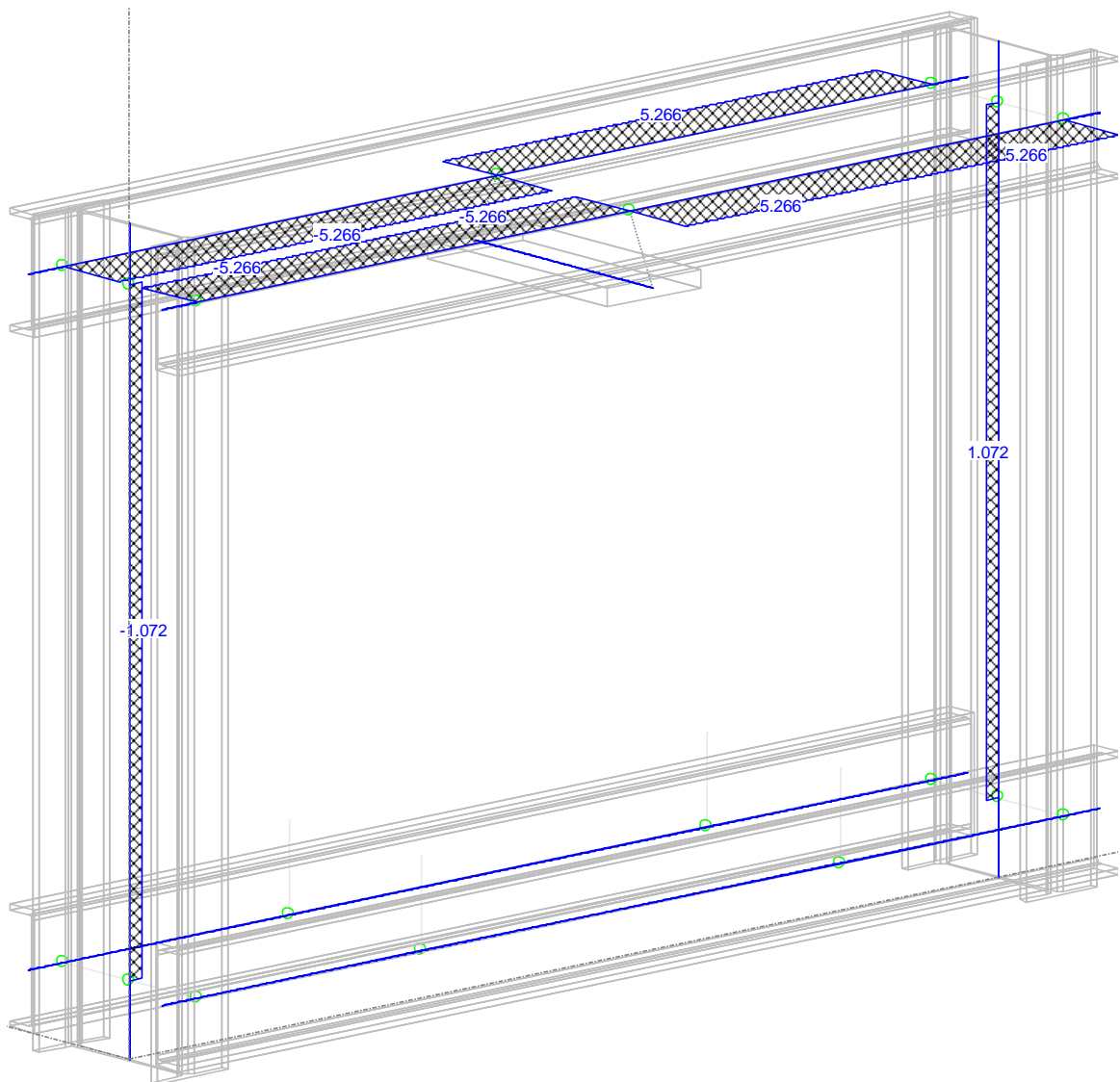
υπερστατικό και η ανάλυση που γίνεται με το λογισμικό πρόγραμμα στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα γεωμετρικά δεδομένα του πλαισίου, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, δείχνονται στο Σχήμα 3-1. Από την ανάλυση που έγινε, αποκτήθηκαν τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών  $M$ ,  $V$  και  $N$ , που παρουσιάζονται για τις φορτίσεις I και II στα Σχήματα 3-3 έως 3-12. Επίσης, στην ανάλυση που έγινε, προσδιορίστηκαν οι εγκάρσιες μετατοπίσεις του μεταλλικού πλαισίου, στις δύο διευθύνσεις.



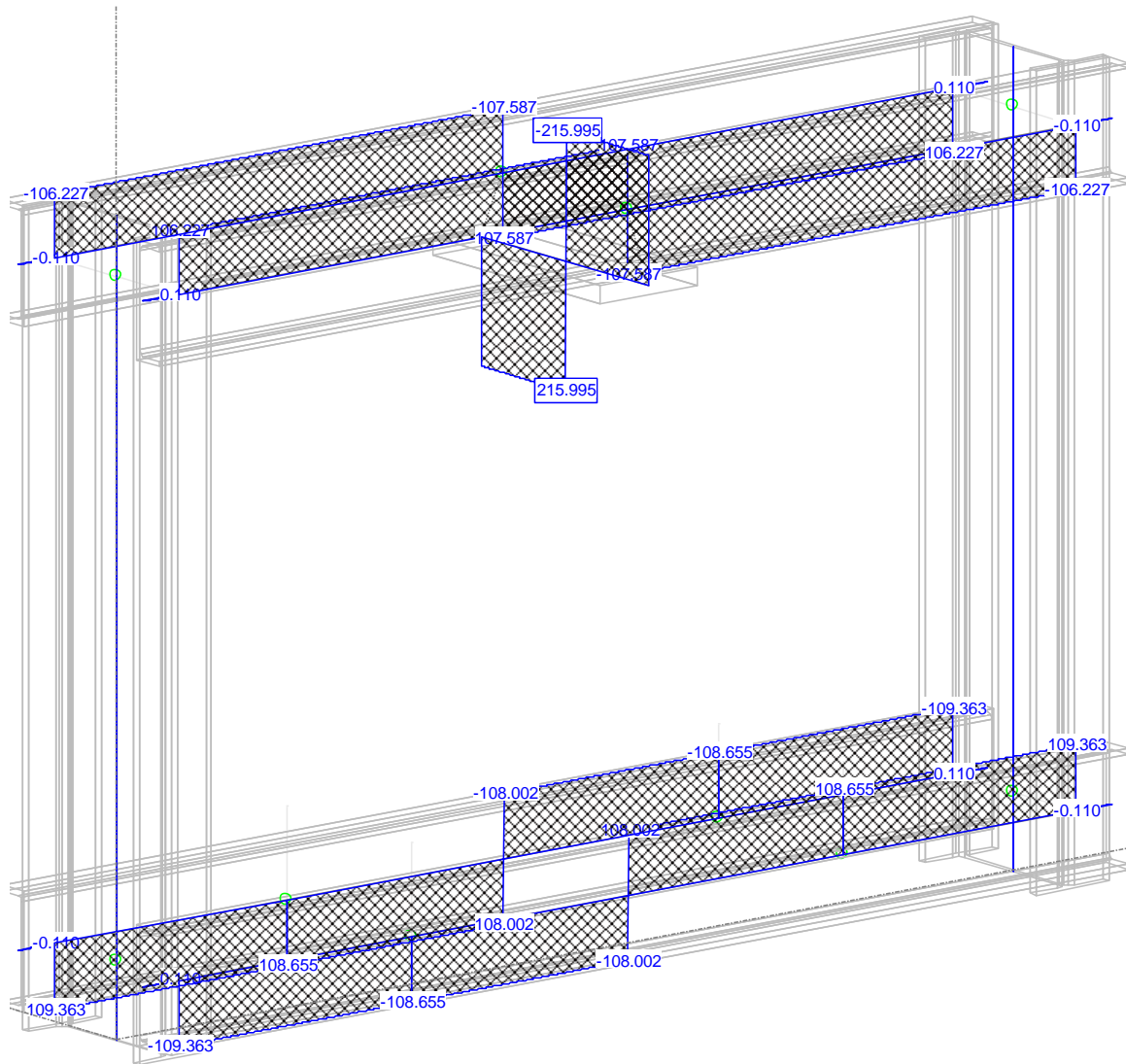
Σχήμα 3-3 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_y$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης I



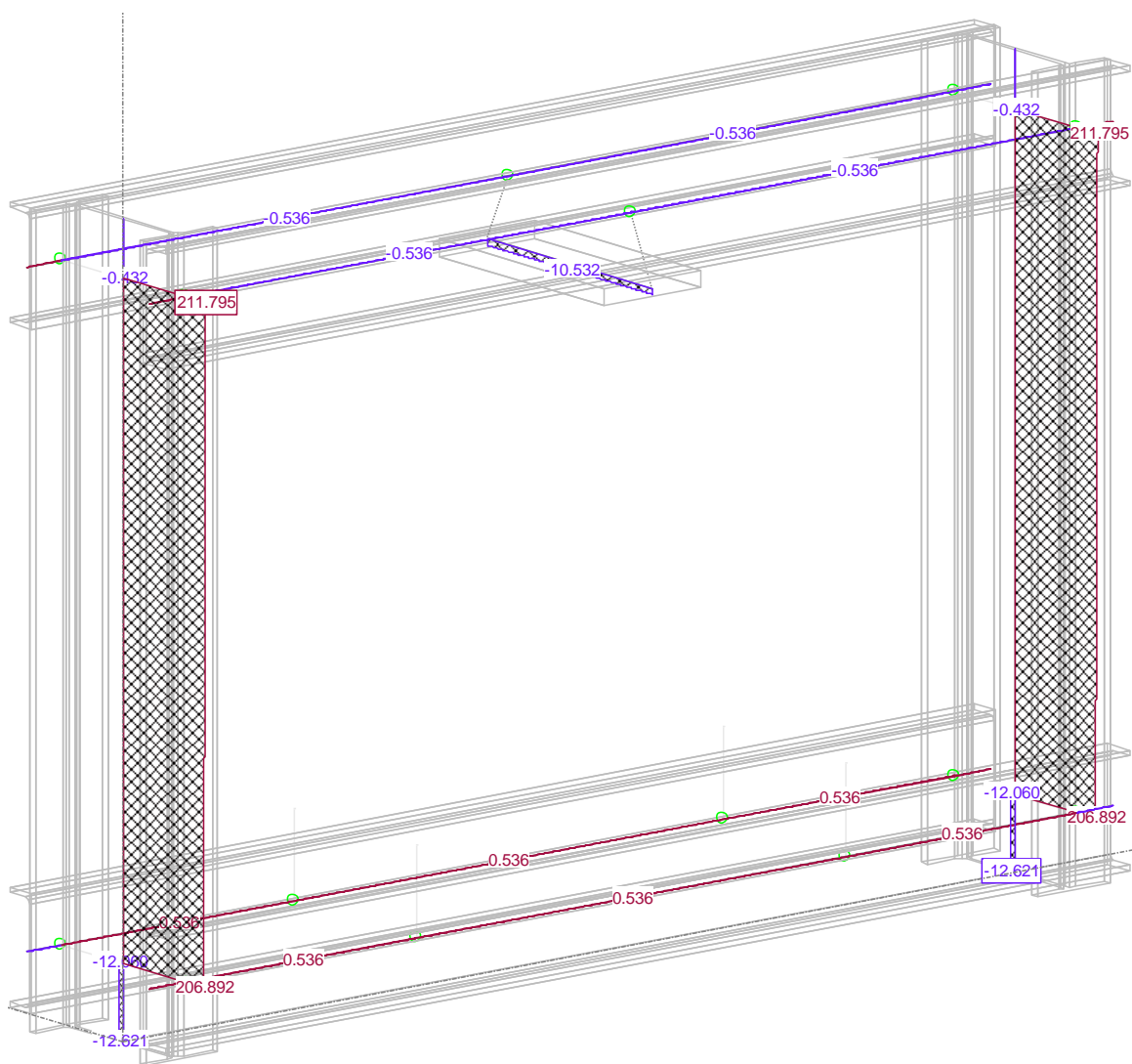
Σχήμα 3-4 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_z$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης I



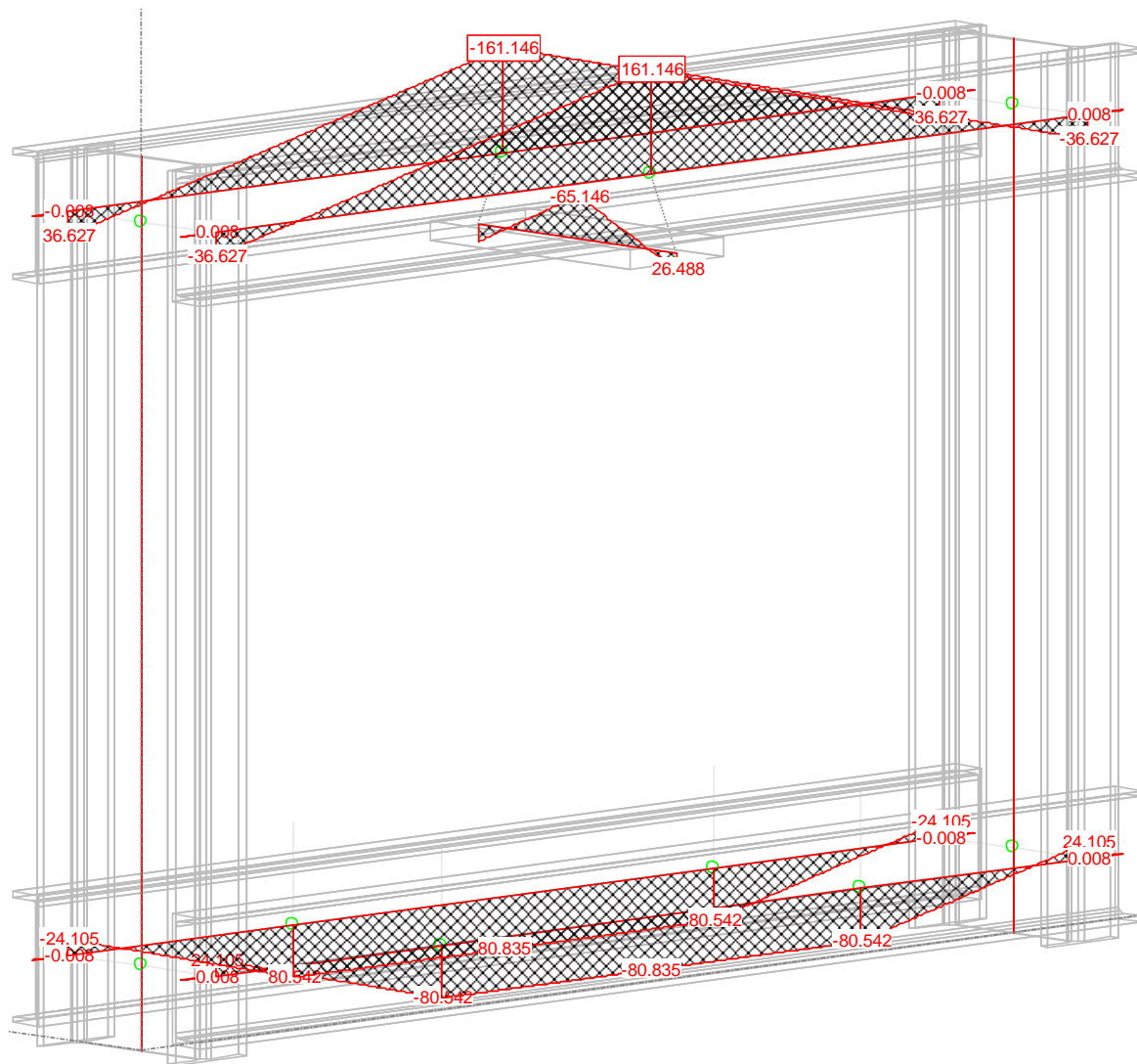
Σχήμα 3-5 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_y$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης I



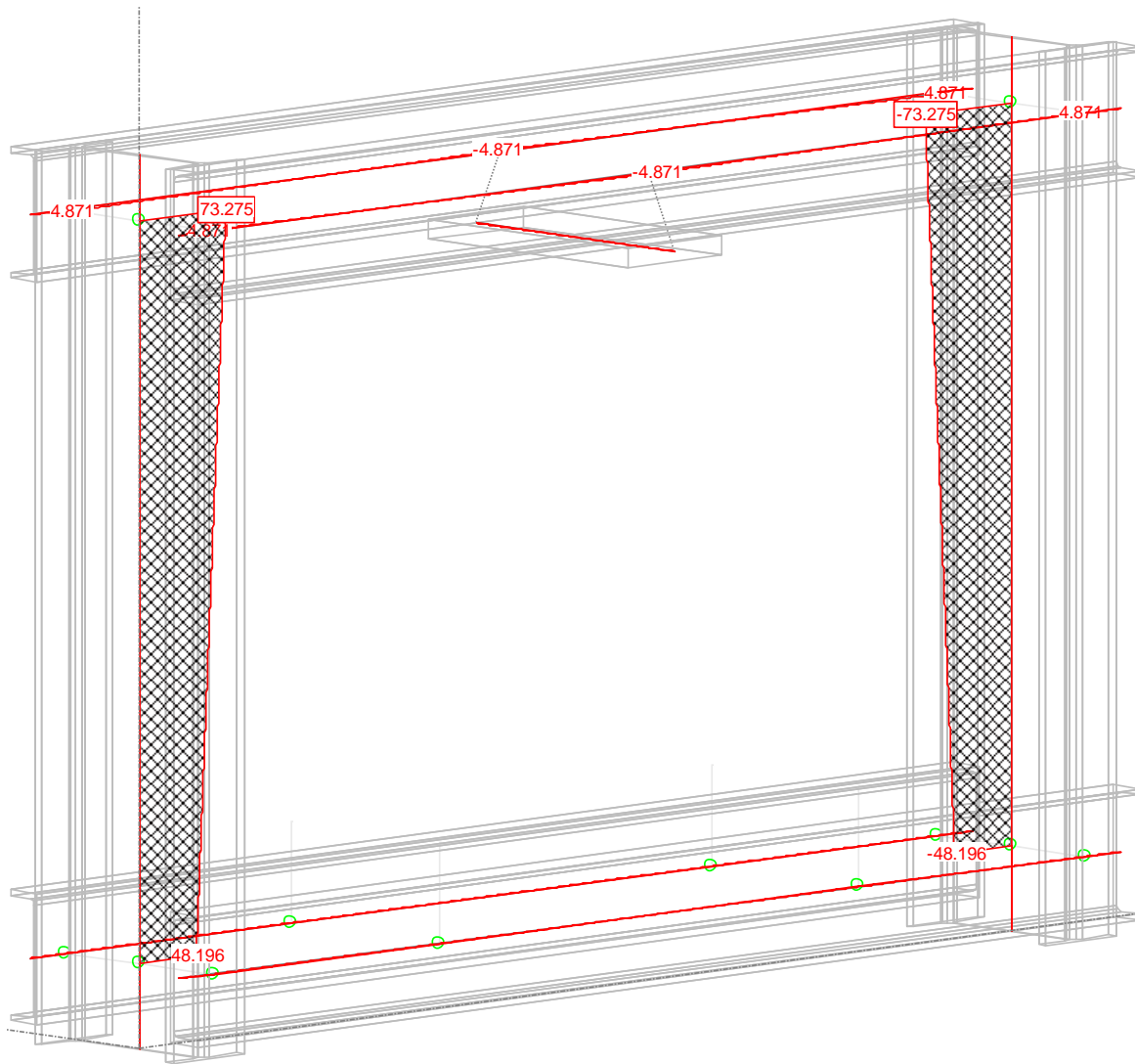
Σχήμα 3-6 Διάγραμμα τεμνουσών Vz, για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης I



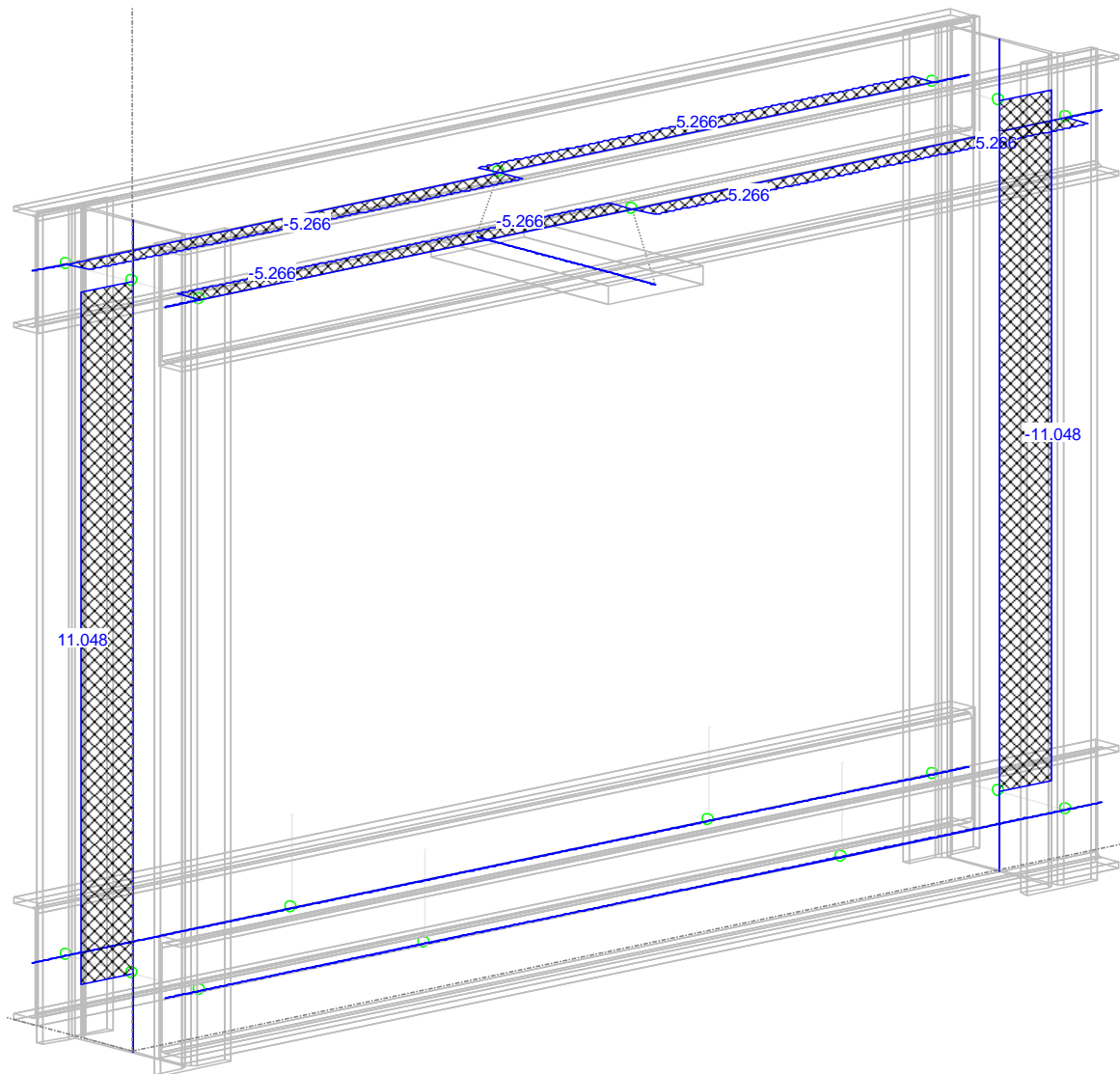
Σχήμα 3-7 Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N, για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης I



Σχήμα 3-8 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_y$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης II

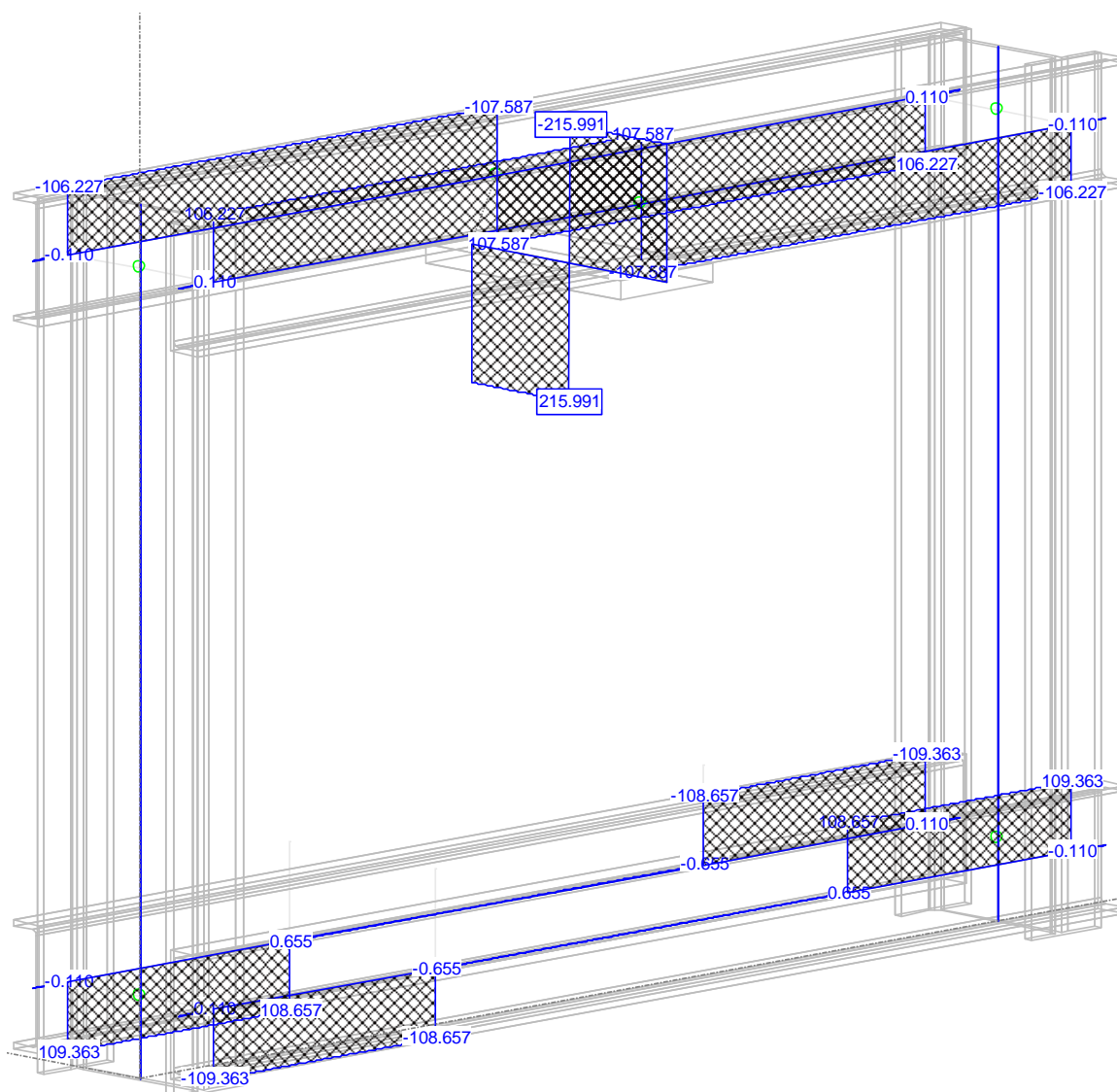


Σχήμα 3-9 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_z$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης II

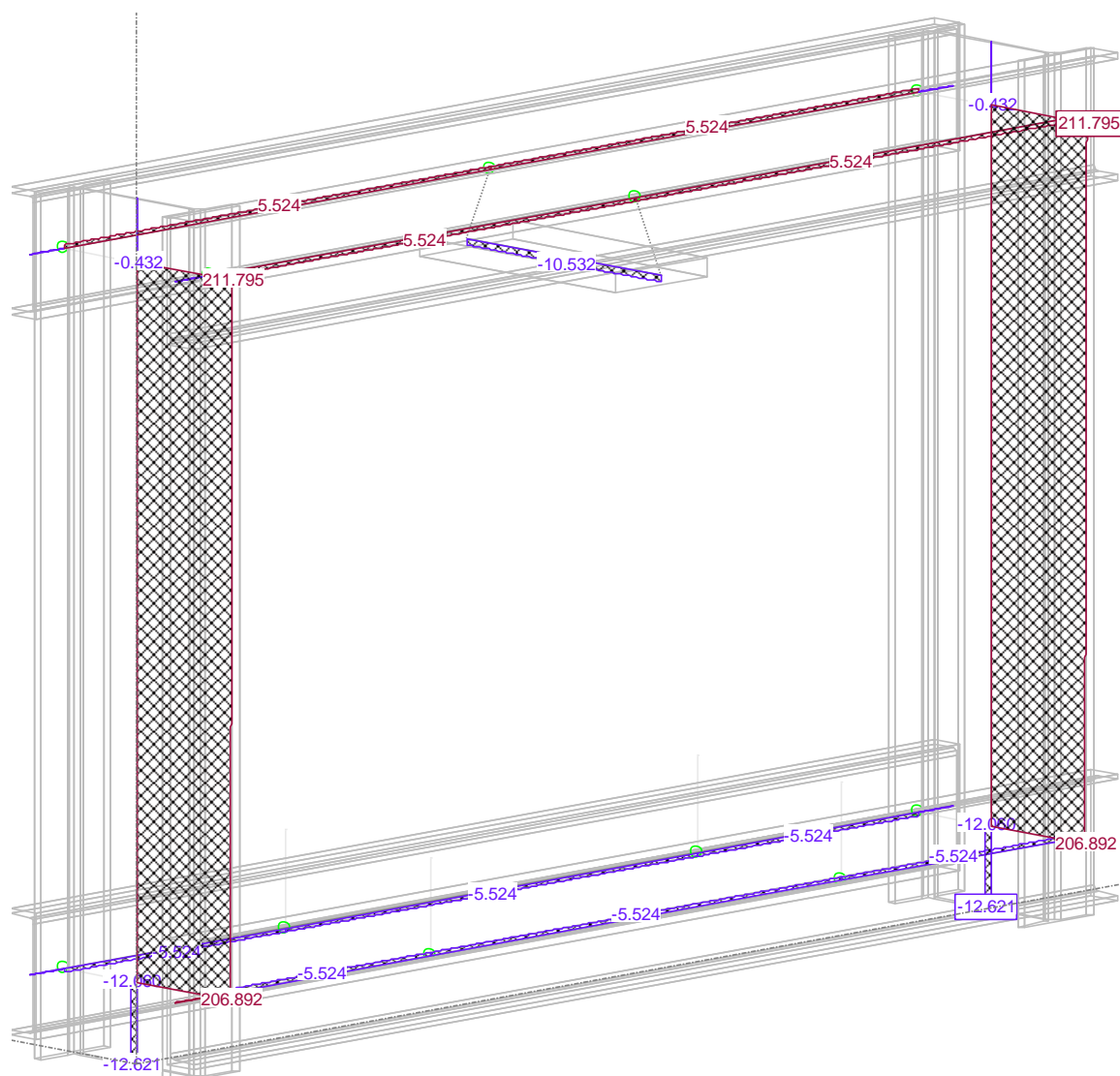


Σχήμα 3-10 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_y$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης II





Σχήμα 3-11 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_z$ , για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης II

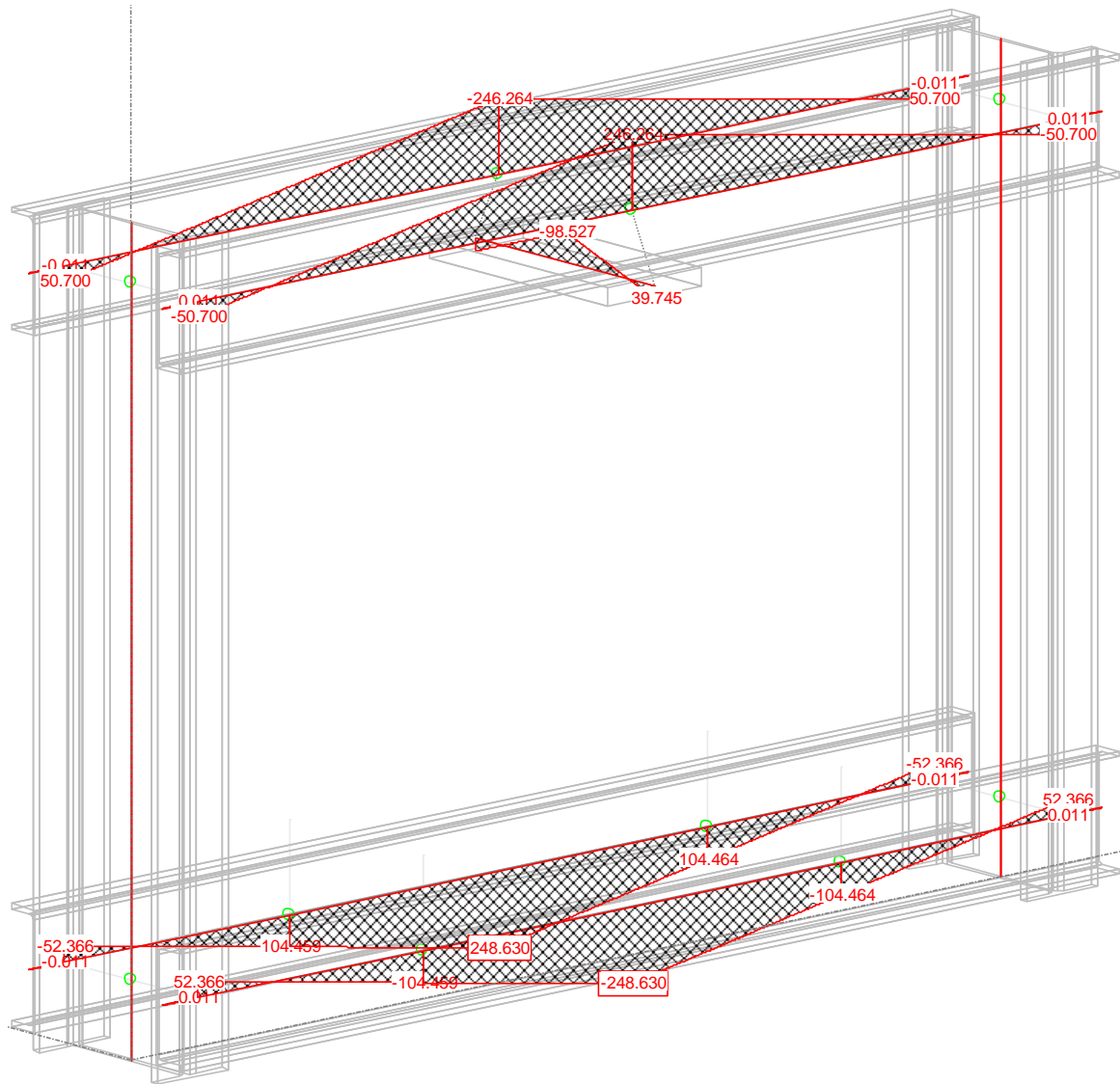


Σχήμα 3-12 Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N, για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης II

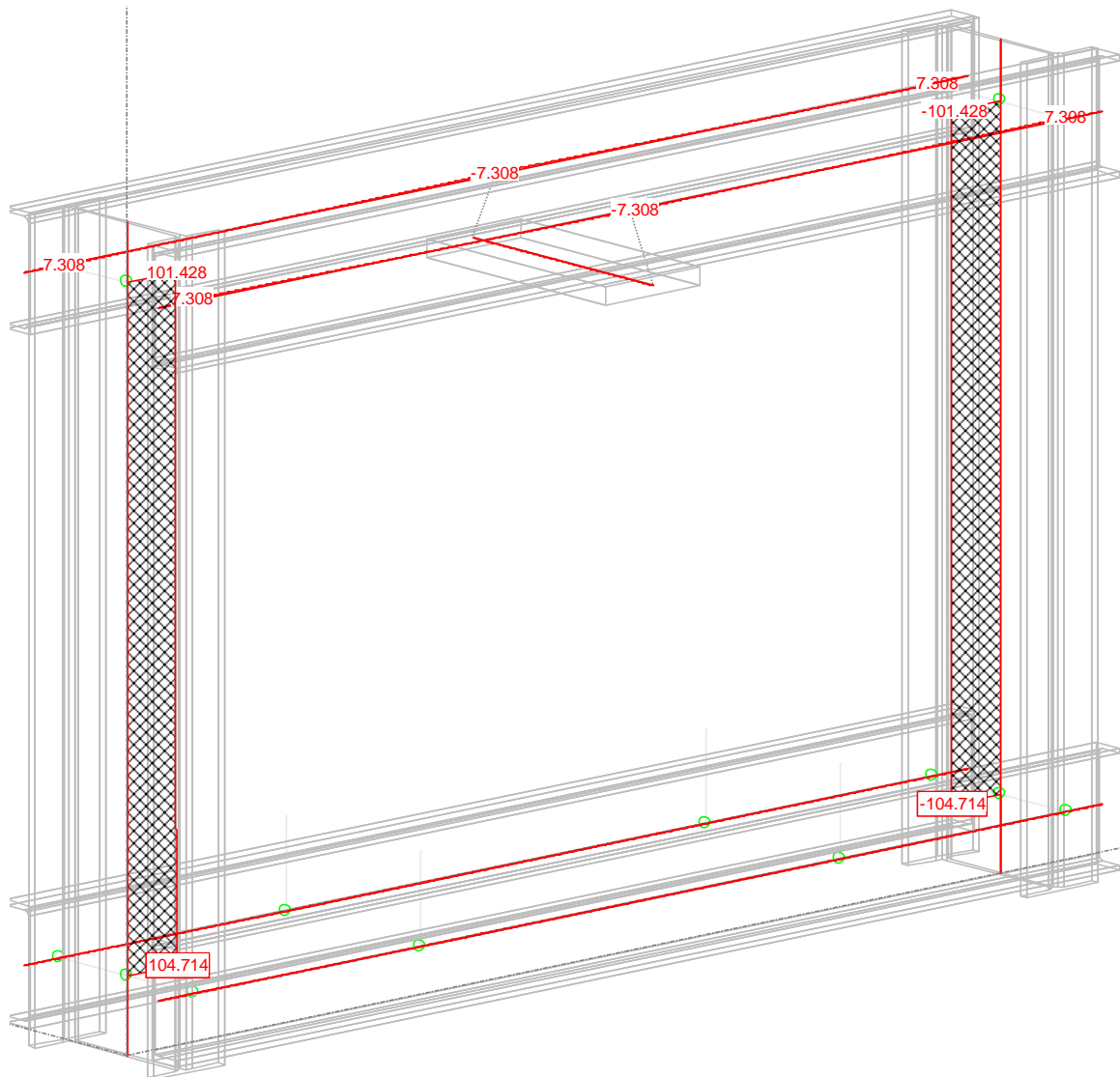
### 3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στην ανάλυση οριακών καταστάσεων, οι συντελεστές παραγοντοποίησης των φορτίων και οι συντελεστές υλικού, για τον έλεγχο των οριακών καταστάσεων σχεδιασμού, θα ληφθούν ίσοι με 1.35 και 1.50 αντίστοιχα. Όπως και προηγουμένως, η ανάλυση του υπερστατικού πλαισίου θα γίνει με το λογισμικό πρόγραμμα STATIK-5, και στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, για τα γεωμετρικά του δεδομένα, που δείχνονται στο Σχήμα 3-1. Από την ανάλυση που έγινε, αποκτήθηκαν τα διαγράμματα

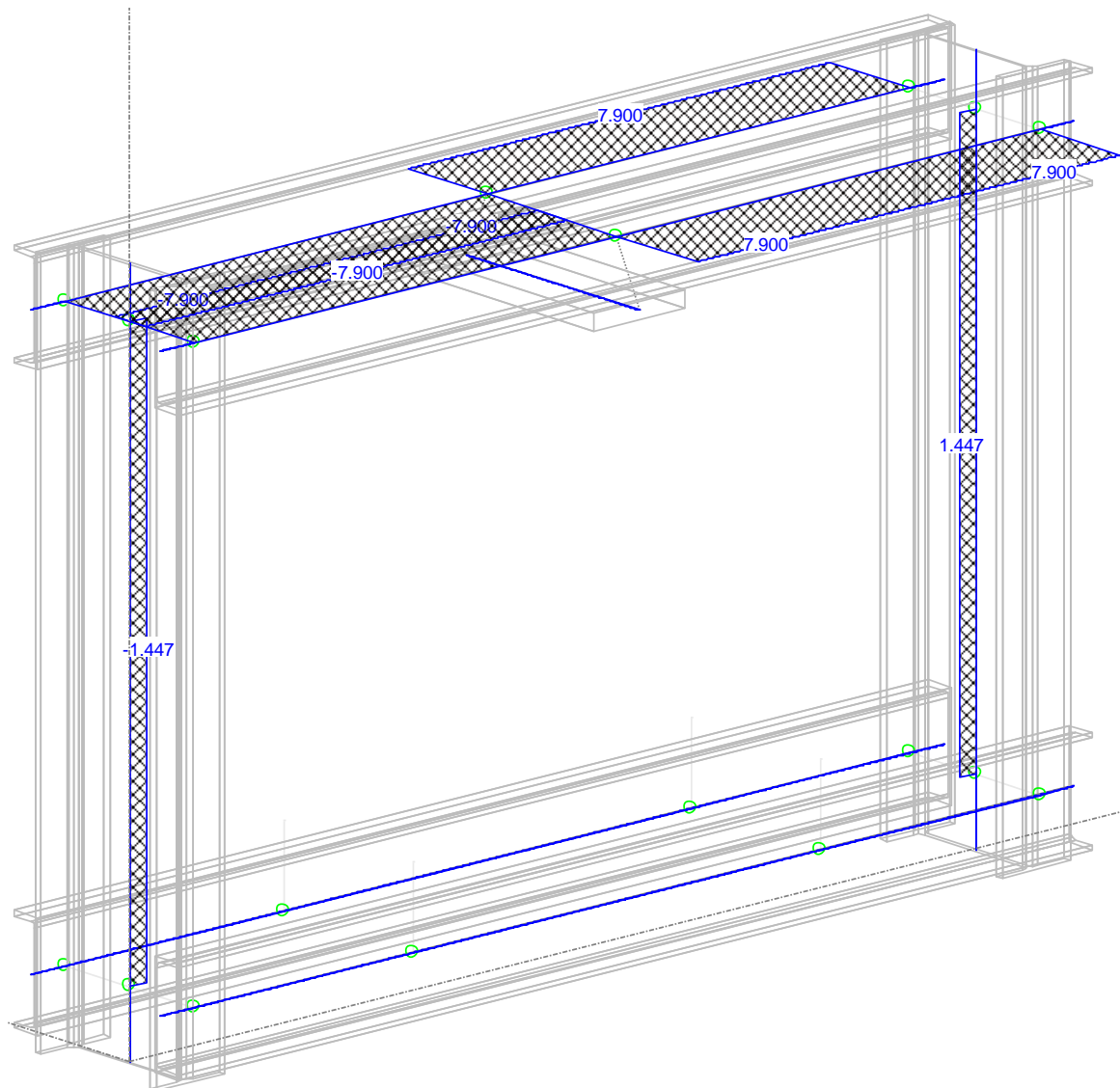
εντατικών μεγεθών  $M_d$ ,  $V_d$  και  $N_d$ , που παρουσιάζονται για τις φορτίσεις I και II στα Σχήματα 3-13 έως 3-22.



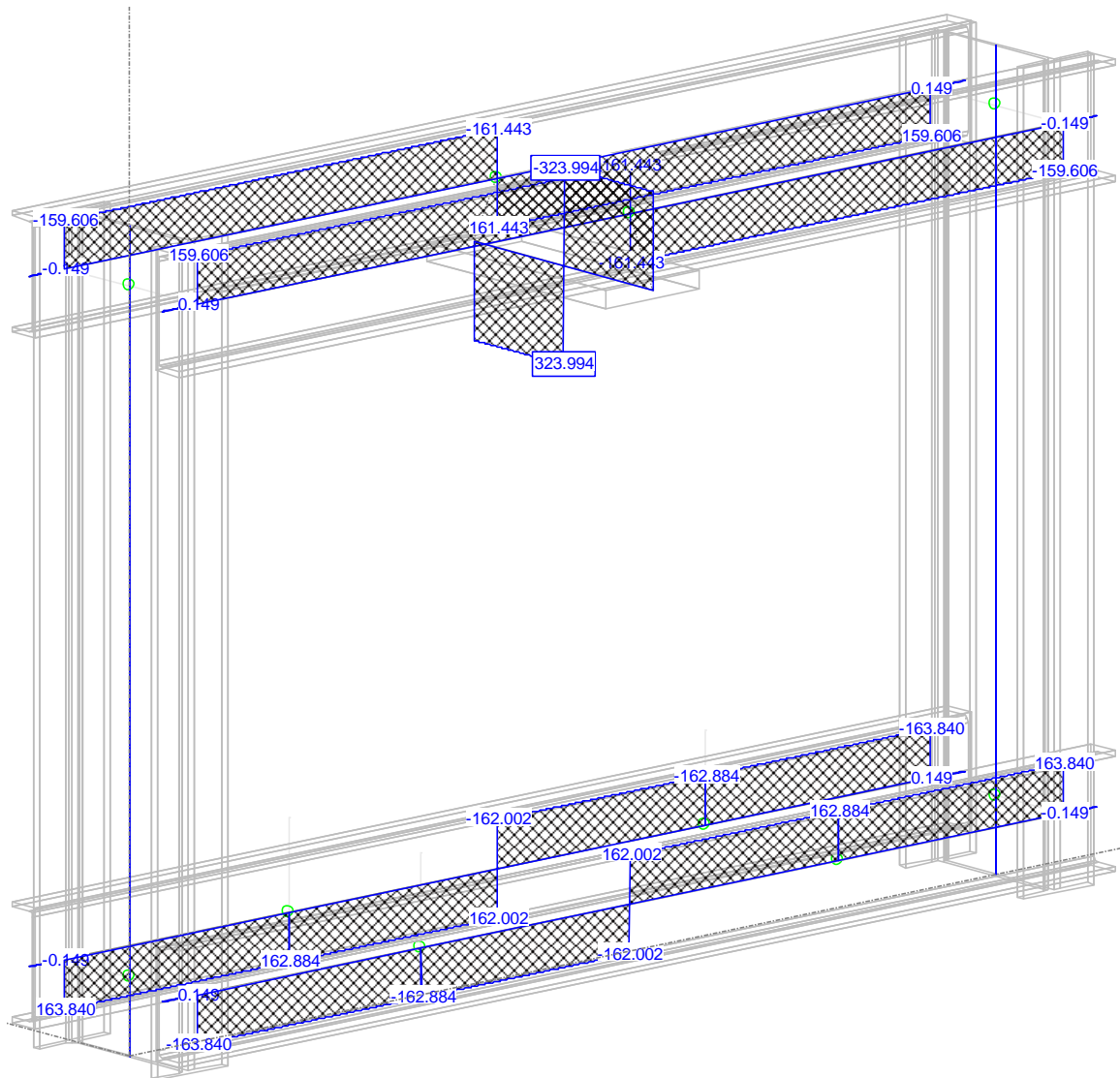
Σχήμα 3-13 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_{y,d}$ , για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης I



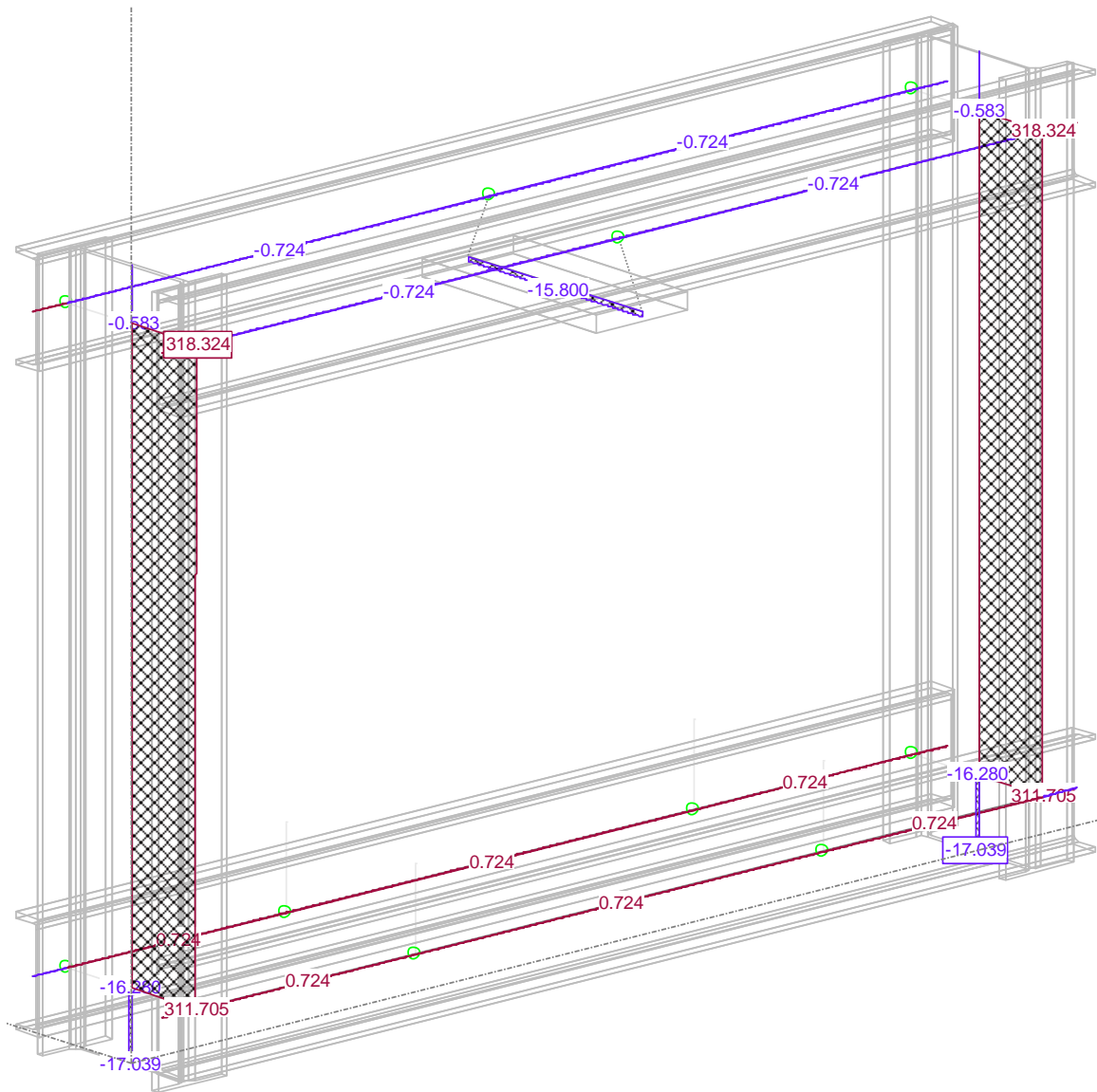
Σχήμα 3-14 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_{z,d}$  για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης I



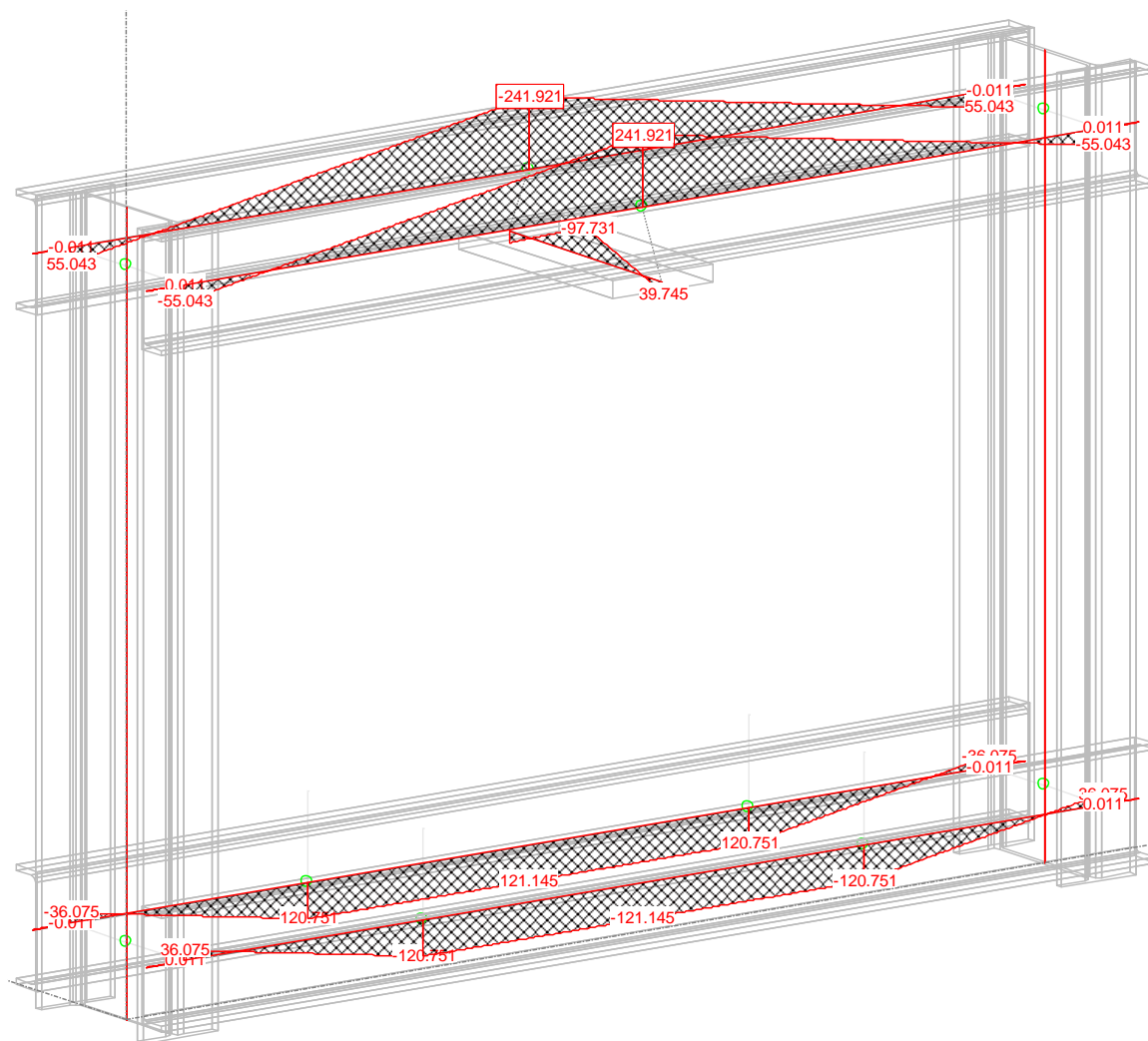
Σχήμα 3-15 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_{\gamma}$ , για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης I



Σχήμα 3-16 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_z$ , για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης I

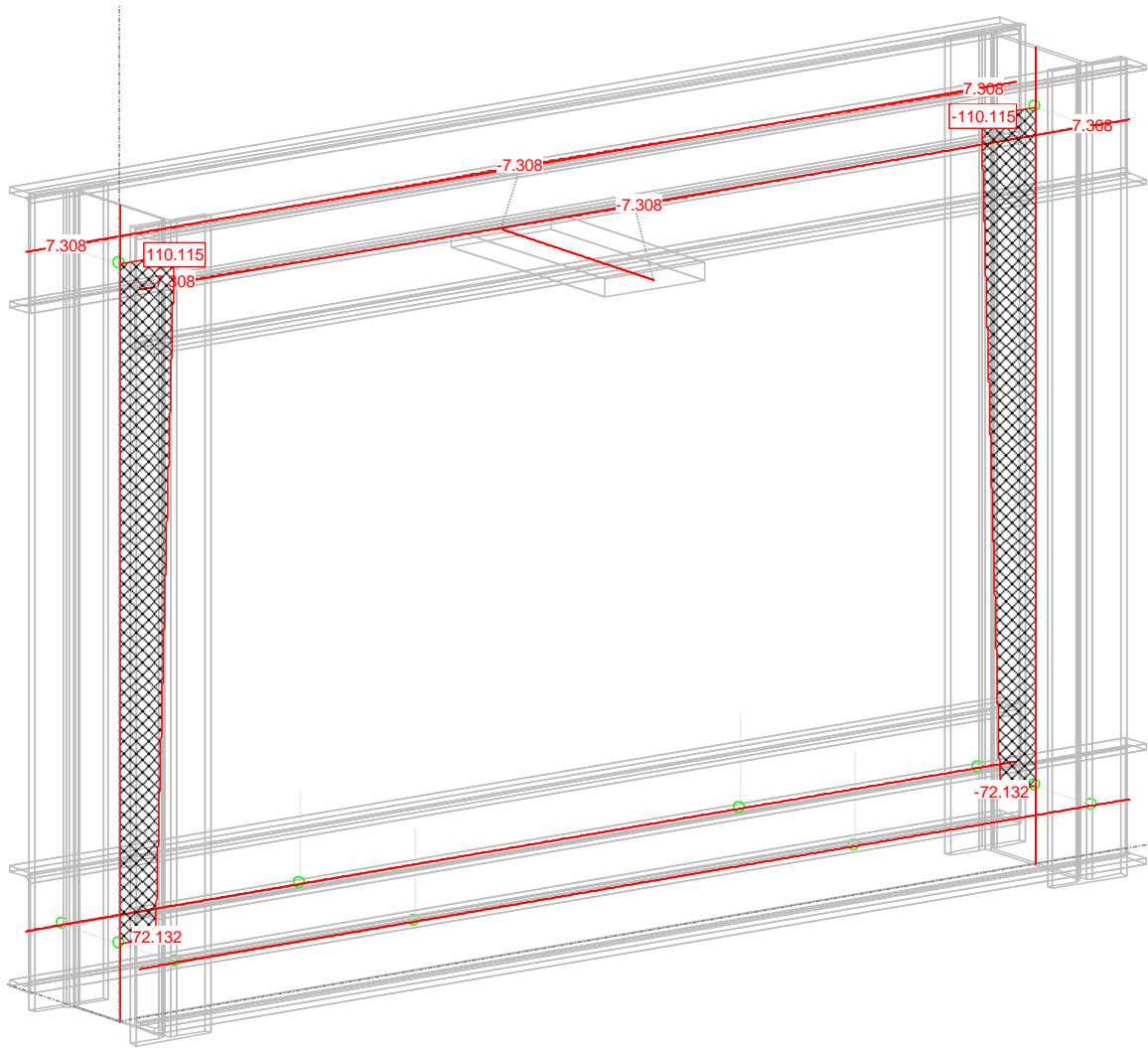


Σχήμα 3-17 Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N, για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης I

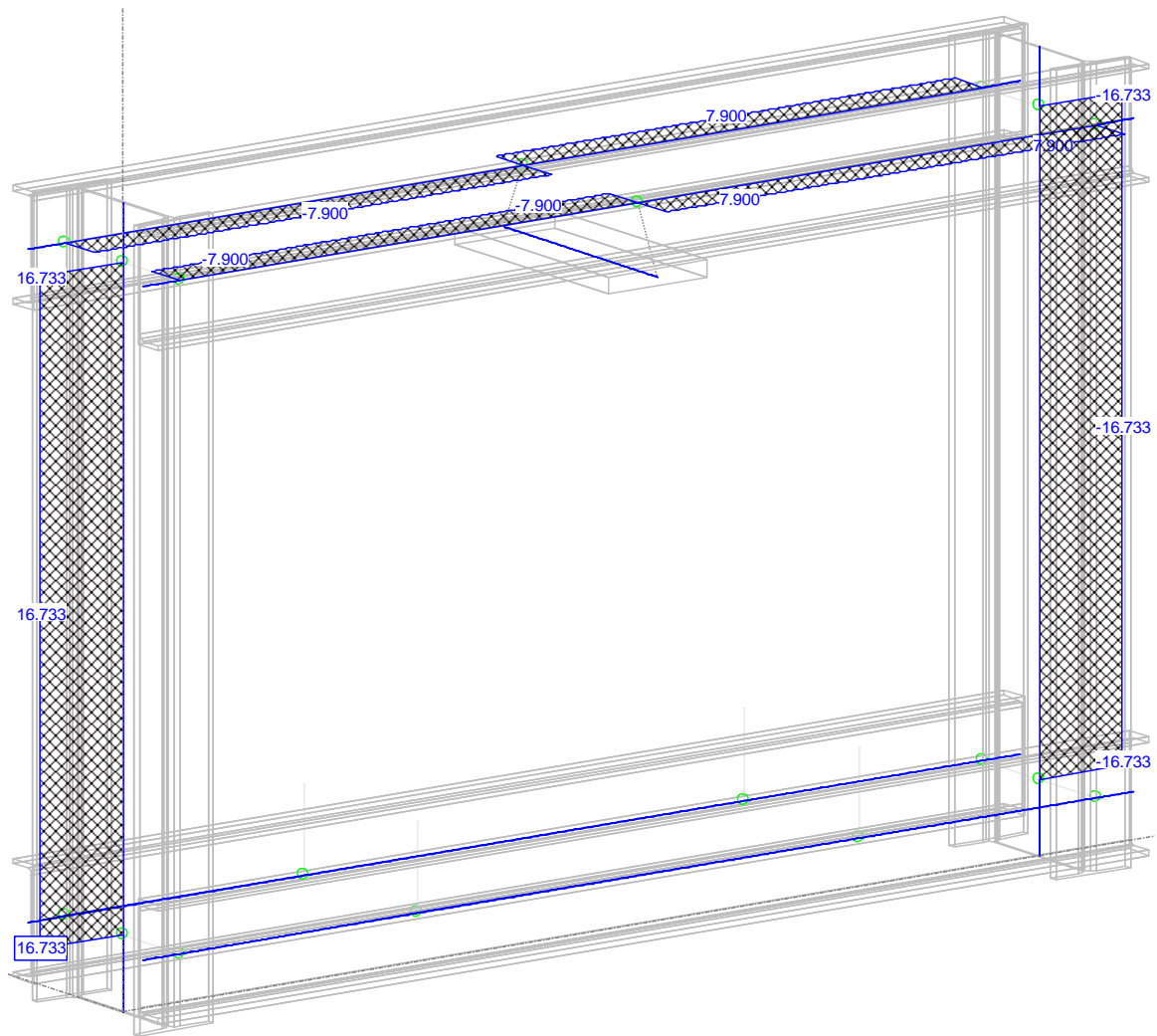


Σχήμα 3-18 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_{y,d}$  για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης II

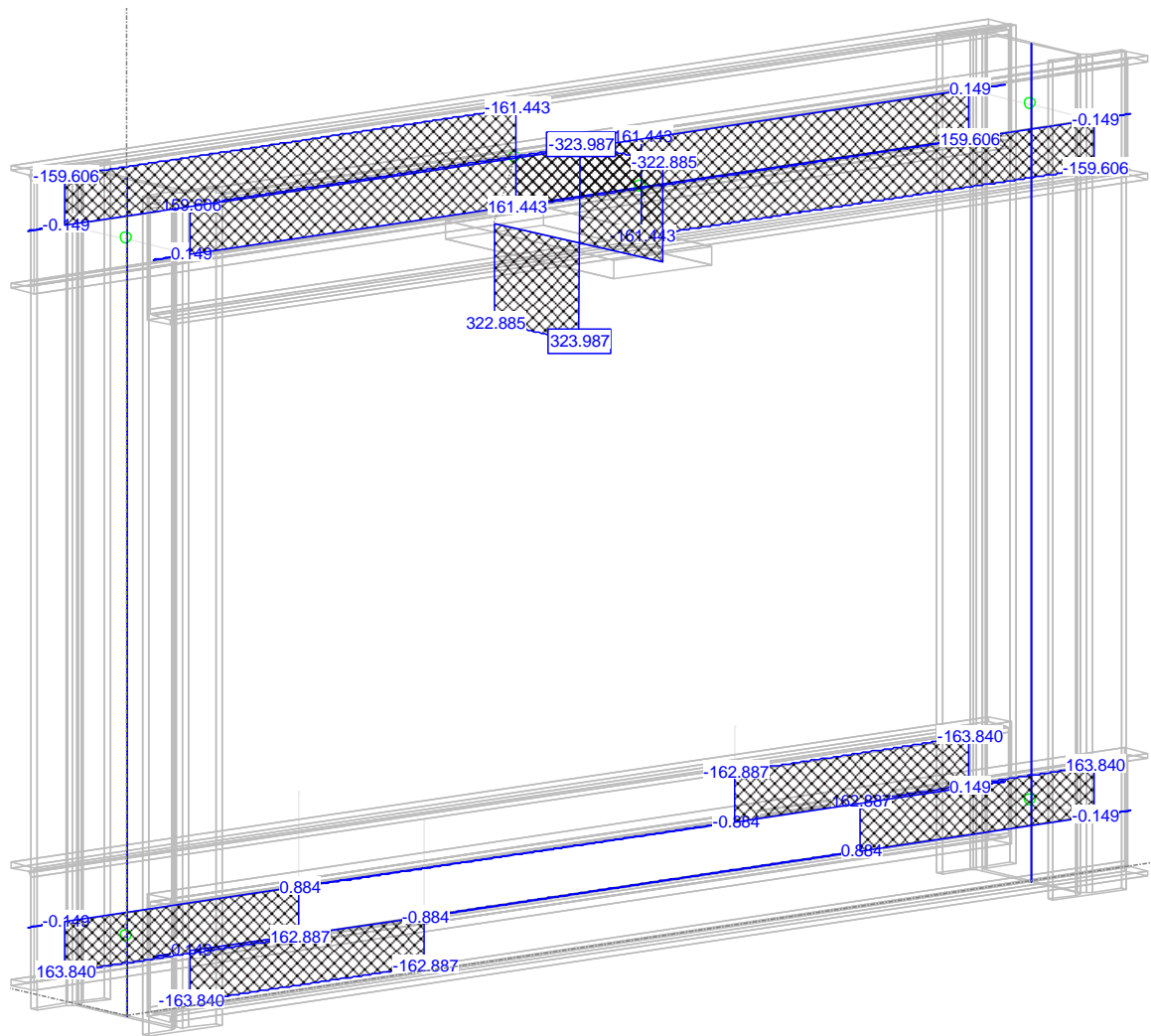




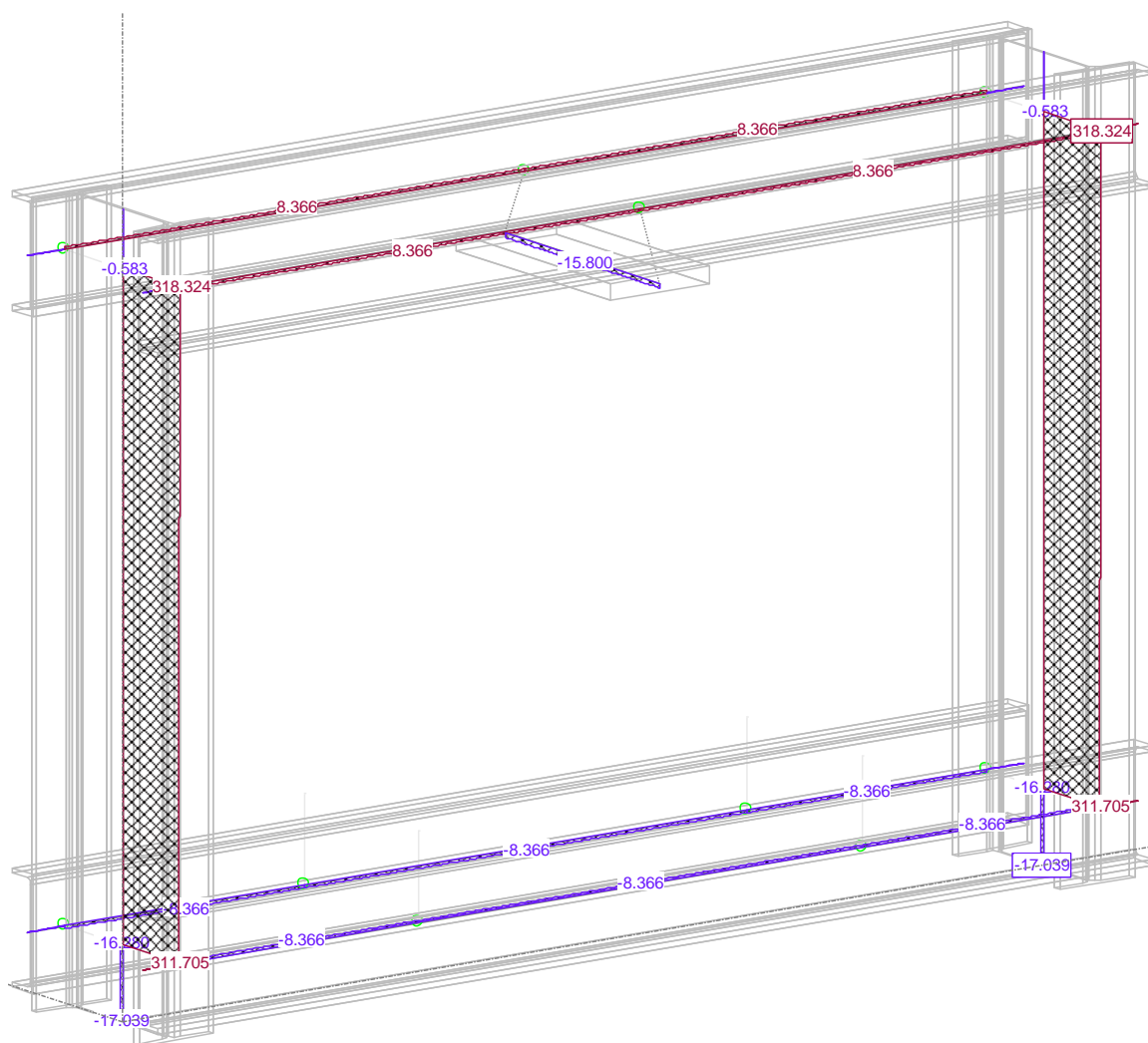
Σχήμα 3-19 Διάγραμμα καμπτικής ροής  $M_{z,d}$  για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης II



Σχήμα 3-20 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_{y,d}$  για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης II



Σχήμα 3-21 Διάγραμμα τεμνουσών  $V_{zd}$ , για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης II



Σχήμα 3-22 Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N_d$ , για την ελαστική ανάλυση οριακών καταστάσεων της φόρτισης II

### 3.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

#### 3.5.1 Έλεγχος τάσεων στα κατακόρυφα στοιχεία του πλαισίου

Σύμφωνα με την ανάλυση, που έγινε, η μέγιστη αξονική δύναμη που αναπτύσσεται σε κάθε κατακόρυφο στοιχείο του πλαισίου, για τα φορτία λειτουργίας του, είναι ίση με  $N = +211 \text{ kN}$  και  $M_z = 69.918 \text{ kN}$ . Για τη συνδυασμένη δράση αξονικής και καμπτικής ροπής, οι μέγιστες τάσεις που εμφανίζονται στα κατακόρυφα στοιχεία είναι

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_z}{W_z}$$

Η επιτρεπόμενη τάση για εφελκυσμό και κάμψη έχει ληφθεί ίση με  $\sigma_{\varepsilon\pi} = 160$  MPa που αντιστοιχεί σε χάλυβα St 37 που χρησιμοποιήθηκε. Η διατομή των κατακόρυφων στοιχείων είναι HEB 600, που έχει εμβαδόν διατομής  $A = 27000$  mm<sup>2</sup> και ελαστική ροπή αντίστασης ως προς τον άξονα που διέρχεται από τον κορμό  $W = 902 \times 10^3$  mm<sup>3</sup>. Συνεπώς, η μέγιστη εφελκυστική τάση που εμφανίζεται στα κατακόρυφα στοιχεία θα είναι:

$$\sigma = \frac{211 \times 10^3}{27000} \pm \frac{69.918 \times 10^6}{902 \times 10^3} = 7.8 \pm 77.5 = 85.3 \text{ MPa} < 160 \text{ MPa}$$

Συνεπώς, τα κατακόρυφα στοιχεία, κατά την διαδικασία εκτέλεσης των πειραματικών δοκιμών, καταπονούνται ελαστικά, με μια μέγιστη εφελκυστική τάση ίση με το μισό της επιτρεπόμενης. Λόγω των μικρών διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στα κατακόρυφα στοιχεία, ο σχετικός έλεγχος παραλείπεται.

### 3.5.2 Έλεγχος τάσεων στα οριζόντια στοιχεία του πλαισίου

Στα οριζόντια στοιχεία, που είναι διατομές τύπου UPE 400, λόγω των φορτίων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, η μέγιστη καμπτική ροπή θα είναι  $M_y = 165.825$  kNm, ενώ η μέγιστη διατμητική δύναμη θα είναι ίση με  $V_z = 108.655$  kNm. Η μέγιστη εφελκυστική τάση στα στοιχεία αυτά και η μέγιστη διατμητική τάση θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad \tau = \frac{V}{A_{\text{κορμού}}}$$

Ως επιτρεπόμενες τάσεις θα ληφθούν οι τιμές  $\sigma_{\varepsilon\pi} = 160$  MPa και για τη διάτμηση  $\tau_{\varepsilon\pi} = 180$  MPa. Για τη διατομή UPE 400 έχουμε  $W = 1020 \times 10^3$  mm<sup>3</sup> και  $A = 400 \times 14 = 5600$  mm<sup>2</sup>.

Συνεπώς, η μέγιστη εφελκυστική τάση και η μέγιστη διατμητική τάση που εμφανίζονται στα οριζόντια στοιχεία θα είναι:

$$\sigma = \frac{165.825 \times 10^6}{1020 \times 10^3} = 160 \text{ MPa} \approx \sigma_{\text{επ}}, \tau = \frac{108.655 \times 10^3}{5600} = 19.4 \text{ MPa} < \tau_{\text{επ}} = 180 \text{ MPa}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα οριζόντια στοιχεία του πλαισίου, στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να αναπτυχθεί κατά τη διαδικασία των πειραματικών δοκιμών, εξαντλούν όλο το όριο της ελαστικής περιοχής με ένα συντελεστή ασφάλειας  $\frac{450}{160} = 2.8$ .

### 3.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΜΒΩΝ

Το υφιστάμενο πλαίσιο διαθέτει 4 κόμβους, καθένας εκ των οποίων εφαρμόζεται με 16 προεντεταμένους κοχλίες τοποθετημένους σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 3. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται ο αλγεβρικός υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε κοχλία καθώς και του άντυγα κάθε οπής με βάση το τυπολόγιο του Ευροκώδικα 3.

Έλασμα γεφύρωσης των δύο άνω οριζόντιων στοιχείων της κατασκευής, με διατομή UPE 400:

$$W_{pl} = \frac{38.6 \times 6^2}{4} = 346.5 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl}^{plate} = \frac{346.50 \times 23.5}{1.0} = 8142.75 \text{ kNcm}$$

$$\frac{P_i L}{4} \leq 8142.75 \frac{P_i L}{4} \leq 8142.75 \Rightarrow P_i \leq \frac{8142.75 \times 4}{60} = 542.85 \text{ kN}, \text{ οπότε}$$

οπότε:

$$P_{final} \leq \frac{P_i}{\gamma_Q} = \frac{542.85}{1.50} = 361.90 \text{ kN}$$

Κοχλίες M30 (8.8):

$$I_p = \Sigma(x_i^2 + y_i^2) = 7320 \text{ cm}^2$$

$$M_{Ed} = 4632 \text{ kNcm}, V_{Ed} = 141 \text{ kN}$$

$$F_y = \frac{M_{Ed}}{I_p} z = \frac{4632}{7320} \times 32.2 = 20.57 \text{ kN}$$

$$F_{\max} = (20.57^2 + 15.14^2)^{1/2} = 25.54 \text{ kN}$$

Αντοχή του κοχλία

$$F_{V,Rd} = \frac{a_v f_{ub} A}{\gamma_{M_2}} = \frac{0.60 \times 5.61 \times 80}{1.25} = 215.4 \text{ kN} > 25.54 \text{ kN}$$

Σύνθλιψη άντυνα οπής: Πάχος ελάσματος κοχλίωσης  $t = 15 \text{ mm}$

$$K_1 = \min\left\{2.80 \times \frac{50}{33} - 1.70\right\} = 2.50$$

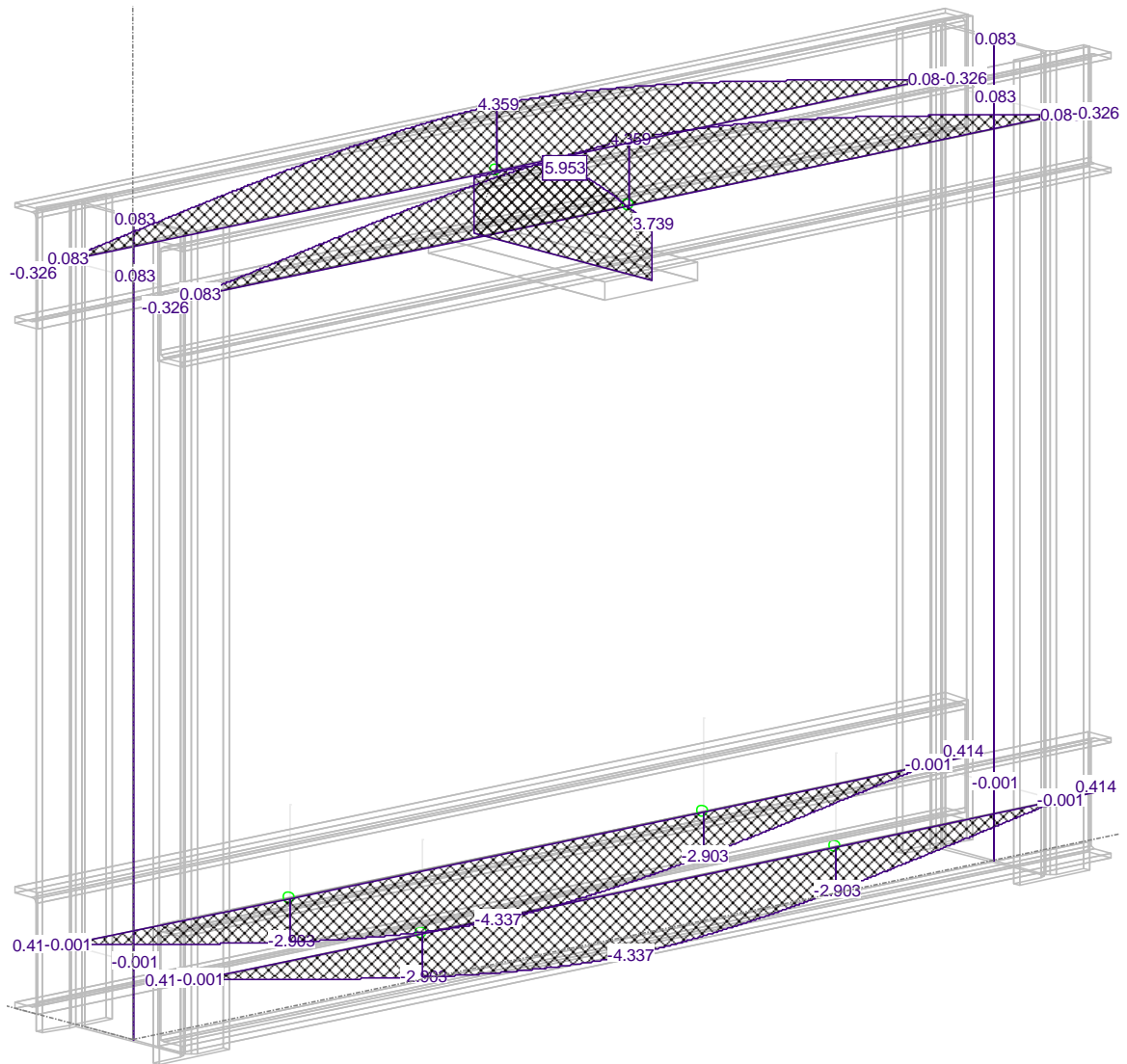
$$a = \min\left\{\frac{60}{3 \times 33} \quad \frac{70}{3 \times 33} - 0.25 \quad \frac{80}{36} \quad 1\right\} = 0.457$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2.50 \times 0.457 \times 36 \times 3.3 \times 1.5}{1.25} = 162.87 \text{ kN} > 25.54 \text{ kN}$$

Συνεπώς οι κοχλιώσεις είναι επαρκείς.

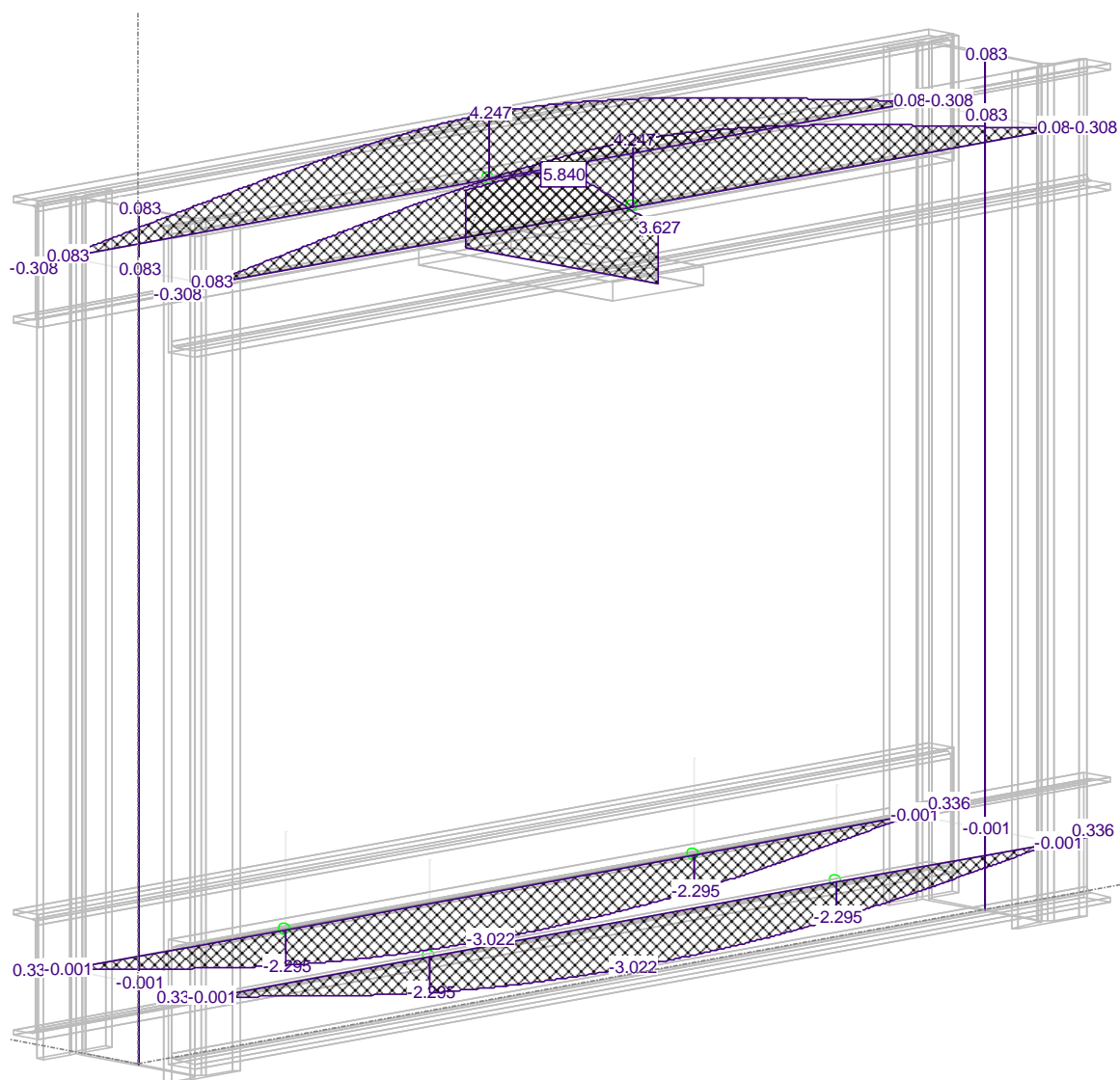
### 3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

Το διάγραμμα μετακινήσεων του υπερστατικού πλαισίου για τη μέγιστη φόρτιση που θα αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών δείχνεται στα Σχήματα 3-23 και 3-24. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα αυτά, η μέγιστη βύθιση που θα αναπτυχθεί στο μέσο των οριζόντιων στοιχείων, είναι ίση με 4.3 mm, ενώ στα σημεία των στηρίξεων η μέγιστη βύθιση είναι περίπου της τάξης των 2 mm. Επειδή οι κατακόρυφες βυθίσεις των δοκών σκυροδέματος αναμένεται να είναι της τάξης των 20-25 mm, μια τέτοια μετατόπιση θα μπορούσε να γίνει αποδεκτή για τέτοιες δοκιμές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι φορτίσεις στις δοκιμές δοκούς σκυροδέματος εκτιμάται ότι δεν θα υπερβαίνουν σε μέγεθος το μισό της φόρτισης I, για την οποία αναπτύσσεται η μετατόπιση αυτή.



Σχήμα 3-23 Διάγραμμα μετατοπίσεων  $D_2$  για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης





Σχήμα 3-24 Διάγραμμα μετατοπίσεων  $D_z$  για την ελαστική ανάλυση λειτουργικότητας της φόρτισης

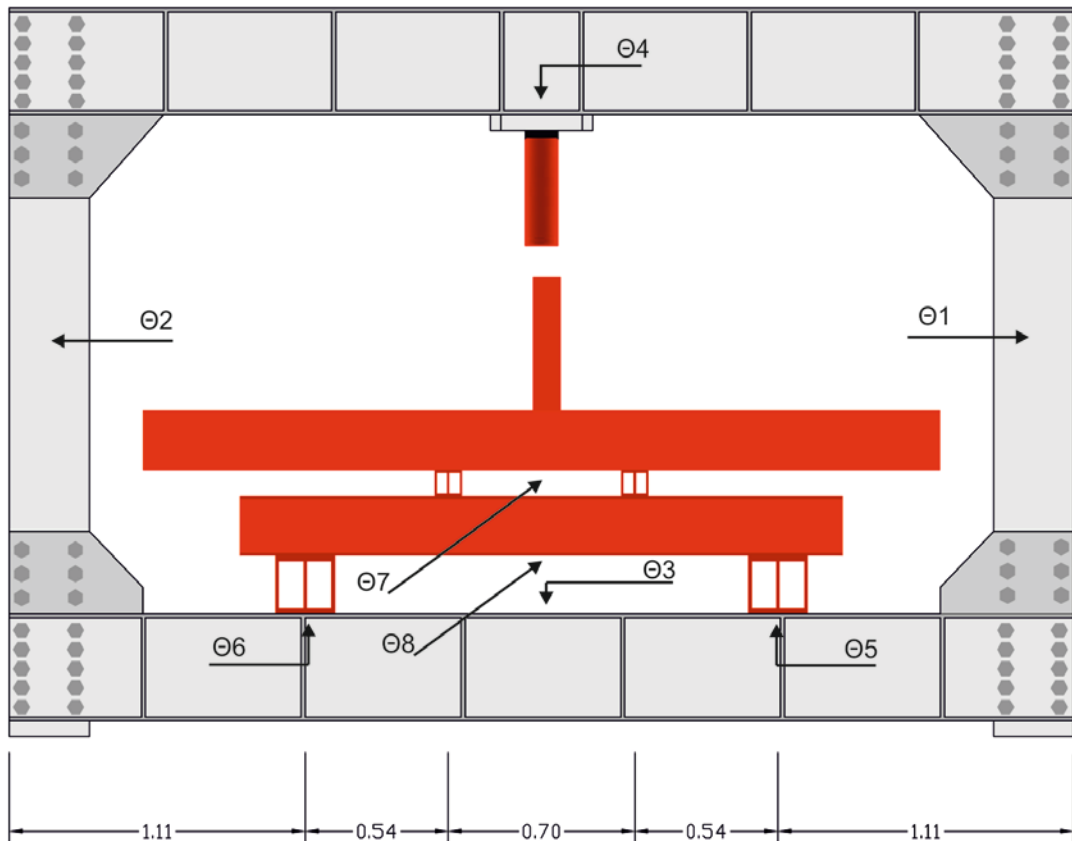
II

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

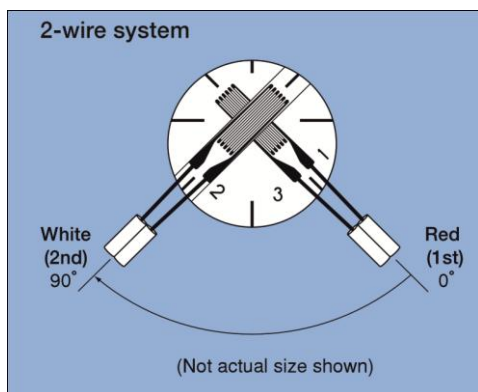
#### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η παραμόρφωση που αναπτύσσεται στο πλαίσιο, για τα πραγματικά μέγιστα φορτία που θα το καταπονήσουν κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκε και εκτελέστηκε το πειραματικό έργο που περιγράφεται παρακάτω. Ως πειραματική δοκός χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο από χάλυβα, διατομής τύπου I, μήκους 2260 mm, πλάτους 220 mm και βάρους 1550 N, που τοποθετήθηκε στο πλαίσιο όπως δείχνεται στο Σχήμα 4-1. Η μεταλλική δοκός στηρίχθηκε σε δύο μεταλλικά στοιχεία, που τοποθετήθηκαν κοντά στις ακραίες διατομές της, έτσι ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες αμφιέριστης δοκού ανοίγματος  $l=1780$  mm. Η δοκός υποβλήθηκε στη συνέχεια μέσω του συστήματος φόρτισης του πλαισίου σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Οι δύο επιβαλλόμενες φορτίσεις από την πρέσα εφαρμόστηκαν στη δοκό μέσω δύο μεταλλικών στοιχείων σε δύο θέσεις που απείχαν  $a=540$  mm από τις παριές των στηρίξεων. Για τη μέτρηση της μετατόπισης του πειραματικού δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν, ένα μηχανικό και ένα ηλεκτρονικό βελόμετρο (Σχήμα 4-2).

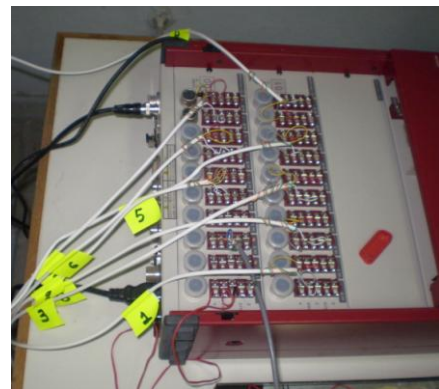


Σχήμα 4-1 Η θέση της πειραματικής δοκού

Για να προσδιοριστεί η παραμόρφωση λόγω της φόρτισης της δοκού και του πλαισίου, χρησιμοποιήθηκαν μηκυνσιόμετρα (strain gauges) δύο διευθύνσεων (Σχήμα 4-2). Τα μηκυνσιόμετρα (strain gauges), που είναι όργανα μέτρησης της παραμόρφωσης, συνδέθηκαν με το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής data logger (Σχήμα 4-3), προκειμένου να καταγράφεται ηλεκτρονικά και με συνεχή τρόπο η παραμόρφωση της επιφάνειας του μεταλλικού πλαισίου και της πειραματικής δοκού, στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί.



Σχήμα 4-2 Μηκυνσιόμετρο δύο διευθύνσεων



Σχήμα 4-3 Συνδέσεις μηκυνσιόμετρων

Στα σημεία τοποθέτησης των μηκυνσιόμετρων, η επιφάνεια των μεταλλικών στοιχείων λειάνθηκε κατάλληλα και στη συνέχεια έγινε επικόλληση τους με την ειδική κόλλα του προμηθευτή. Για την προστασία των μηκυνσιόμετρων, από εξωτερικούς παράγοντες και από την υγρασία, έγινε επικάλυψη τους με ειδική σιλικόνη. Τα μηκυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας KYOWA, είχαν μήκος 10 mm και αντίσταση 120 Ω. Οι θέσεις που επιλέχθηκαν για την τοποθέτηση των μηκυνσιόμετρων, δείχνονται στο Σχήμα 4-4. Οι θέσεις αυτές είναι:

- στα δύο κατακόρυφα μεταλλικά στοιχεία του πλαισίου (θέσεις 1 και 2),
- στο μπροστινό και κάτω οριζόντιο μεταλλικό στοιχείο του πλαισίου (θέση 3),
- στη μεταλλική πλάκα (θέση 4),
- στα δύο μεταλλικά τμήματα που τοποθετήθηκαν επάνω στο πλαίσιο (θέσεις 5 και 6),
- στο οριζόντιο μεταλλικό στοιχείο, που παραλαμβάνει το φορτίο από την πρέσα (θέση 7) και
- στην πειραματική δοκό (θέση 8).



Σχήμα 4-4 Η διάταξη των μηχανοσιόμετρων



(α)



(β)

Σχήμα 4-5 (α) Δεξιό υποστύλωμα μεταλλικού πλαισίου, Θ1 (β) αριστερό υποστύλωμα μεταλλικού πλαισίου, Θ2



Σχήμα 4-6 Μπροστά κάτω δοκός μεταλλικού πλαισίου, Θ3



Σχήμα 4-7 Μεταλλική πλάκα, Θ4



(α)



(β)

Σχήμα 4-8 (α) δεξιό στήριγμα, Θ5 και αριστερό στήριγμα, Θ6, (β) οριζόντιο μεταλλικό στοιχείο, Θ7 και πειραματική δοκός, Θ8

## 4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά την υλοποίηση των πειραματικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των μετρήσεων με δύο τρόπους:

- αναλογικά, για το πιεσόμετρο της πρέσας και το μηχανικό βελόμετρο

- ψηφιακά, με τη χρήση του data logger, για το ηλεκτρονικό βελόμετρο και τα strain gauges.

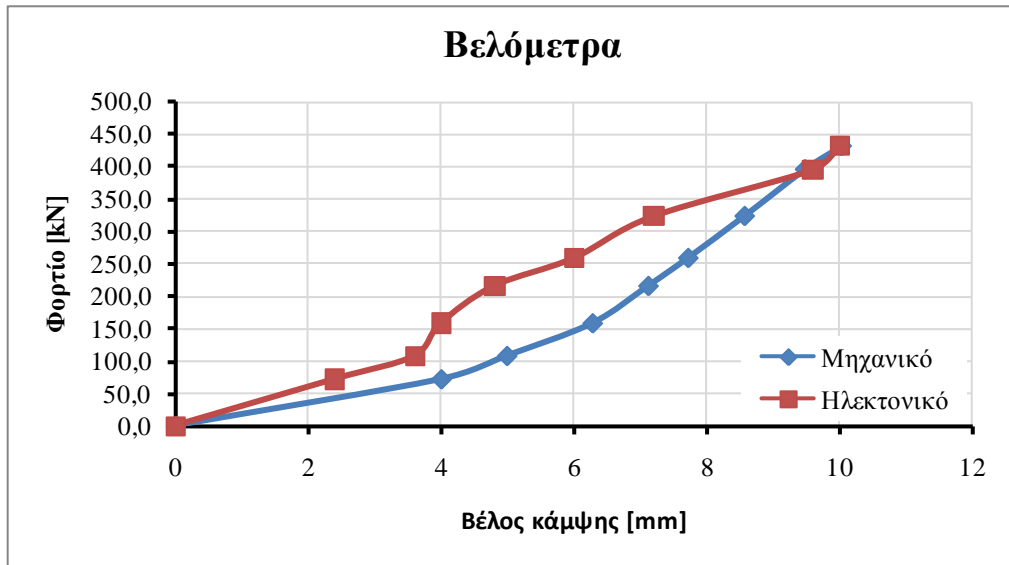
Για τον υπολογισμό της απόκρισης του μεταλλικού πλαισίου και των πειραματικών δοκιμίων, έγινε μια σειρά μετρήσεων μετατόπισης και αντίστοιχης δύναμης και παραμόρφωσης και αντίστοιχης δύναμης, που καταχωρούνται στους Πίνακες 4-1 και 4-2.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1** Πειραματικές παραμορφώσεις από τα μηκυνσιόμετρα στις θέσεις Θ1-Θ4

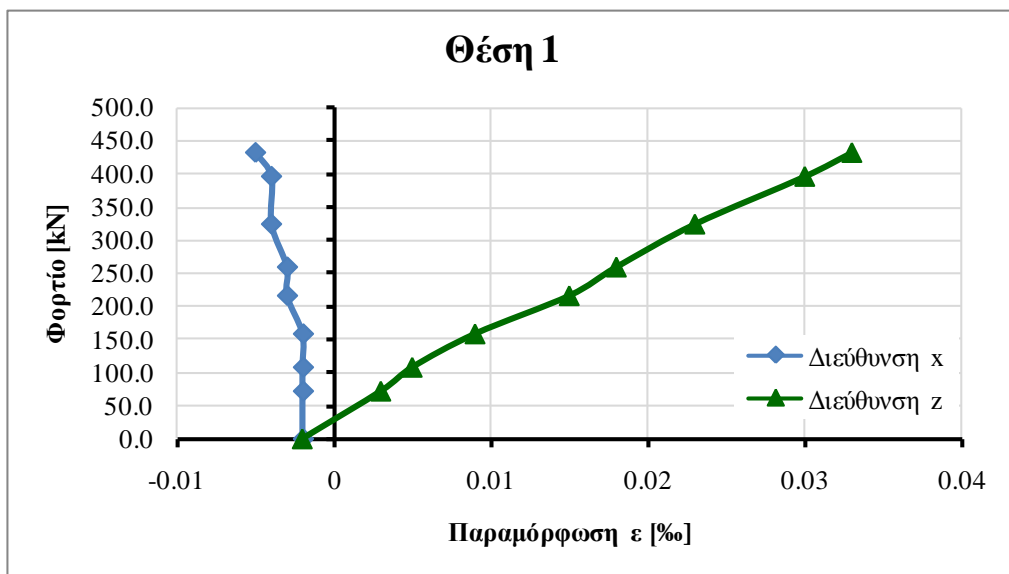
διεύθυνση φορτίο [kN]	Θέση 1		Θέση 2		Θέση 3		Θέση 4	
	x	z	x	z	x	y	x	y
0.0	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.005	-0.005	-0.002	0.001
72.0	-0.002	0.003	-0.007	-0.002	-0.07	0.014	0.03	0.18
108.0	-0.002	0.005	-0.006	0.001	-0.101	0.022	0.053	0.271
158.4	-0.002	0.009	-0.005	0.007	-0.141	0.036	0.088	0.406
216.0	-0.003	0.015	0.001	0.019	-0.188	0.05	0.135	0.573
259.2	-0.003	0.018	-0.001	0.021	-0.228	0.058	0.156	0.69
324	-0.004	0.023	-0.004	0.025	-0.271	0.072	0.191	0.844
396	-0.004	0.03	-0.004	0.033	-0.324	0.088	0.235	1.033
432	-0.005	0.033	-0.005	0.037	-0.358	0.096	0.259	1.138

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2** Πειραματικές παραμορφώσεις από τα μηκυνσιόμετρα στις θέσεις Θ5-Θ8

διεύθυνση φορτίο [kN]	Θέση 5		Θέση 6		Θέση 7		Θέση 8	
	y	x	y	x	x	y	y	x
0.0	0	0	-0.013	-0.011	-0.007	-0.007	-0.004	-0.002
72.0	0.044	0.006	0.001	-0.019	0.084	0.03	-0.058	0.171
108.0	0.066	0.002	0.012	-0.018	0.13	0.051	-0.08	0.25
158.4	0.096	-0.007	0.033	-0.01	0.196	0.082	-0.108	0.357
216.0	0.129	-0.016	0.066	0.005	0.278	0.117	-0.138	0.489
259.2	0.151	-0.027	0.084	0.002	0.337	0.141	-0.167	0.583
324	0.18	-0.034	0.11	-0.015	0.416	0.173	-0.202	0.703
396	0.214	-0.043	0.146	-0.042	0.513	0.214	-0.239	0.847
432	0.234	-0.049	0.164	-0.058	0.56	0.234	-0.26	0.927

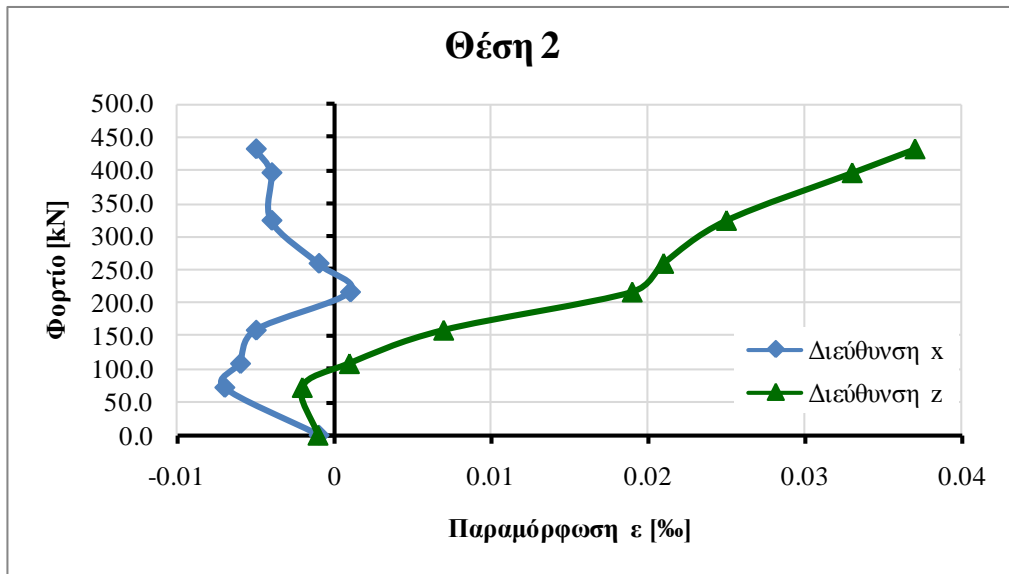


Σχήμα 4-9 Πειραματική καμπύλη φορτίων-βύθισης της πειραματικής δοκού

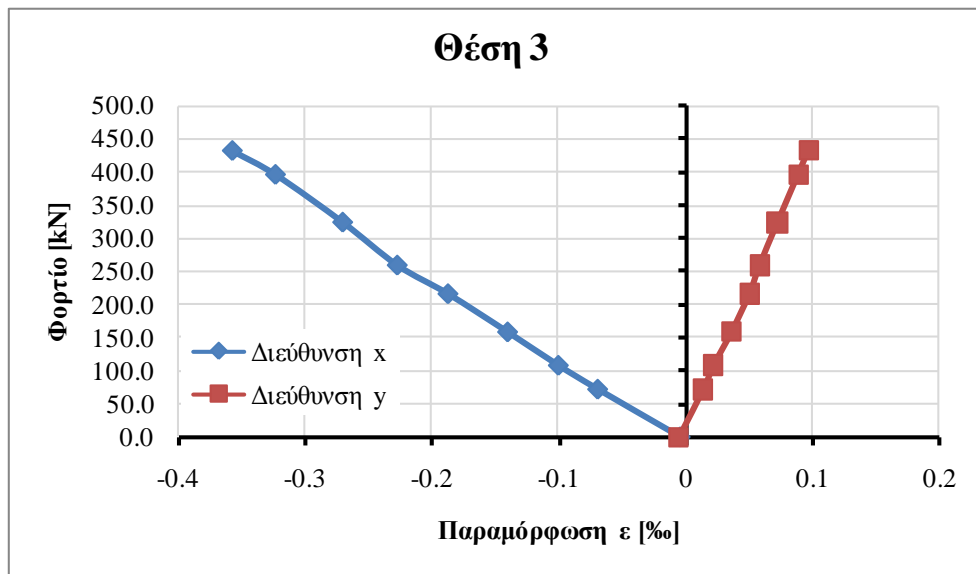


(α)

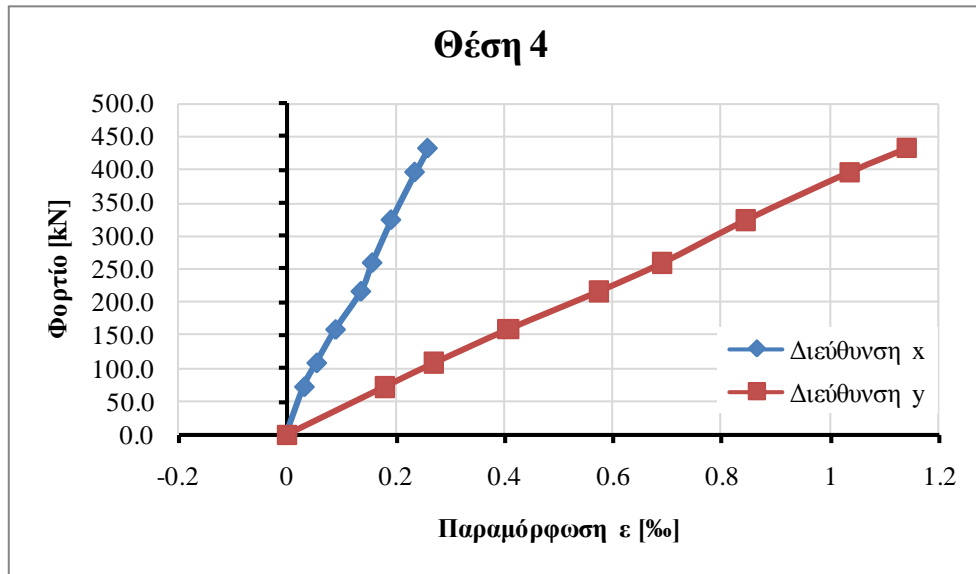




(β)

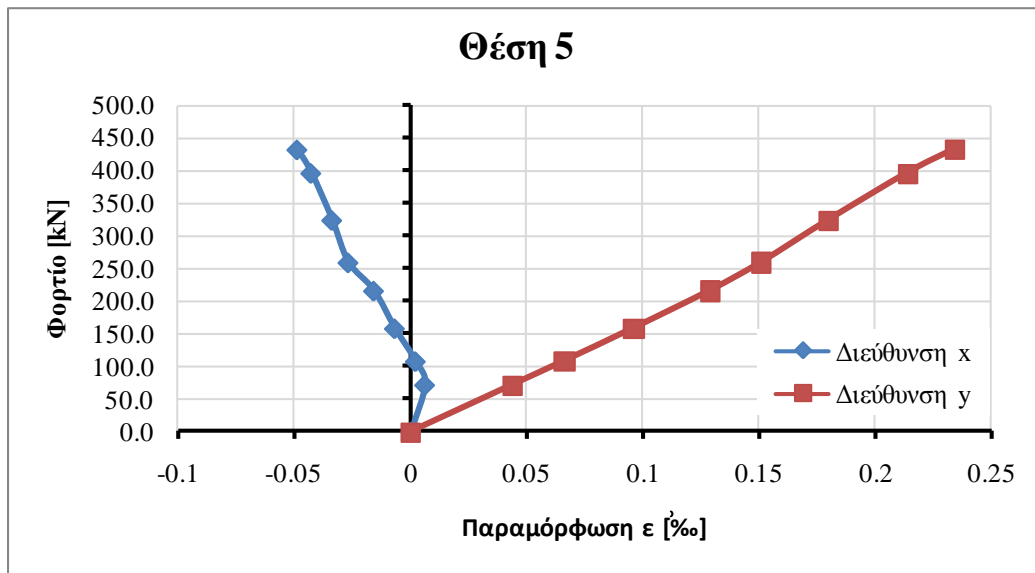


(γ)

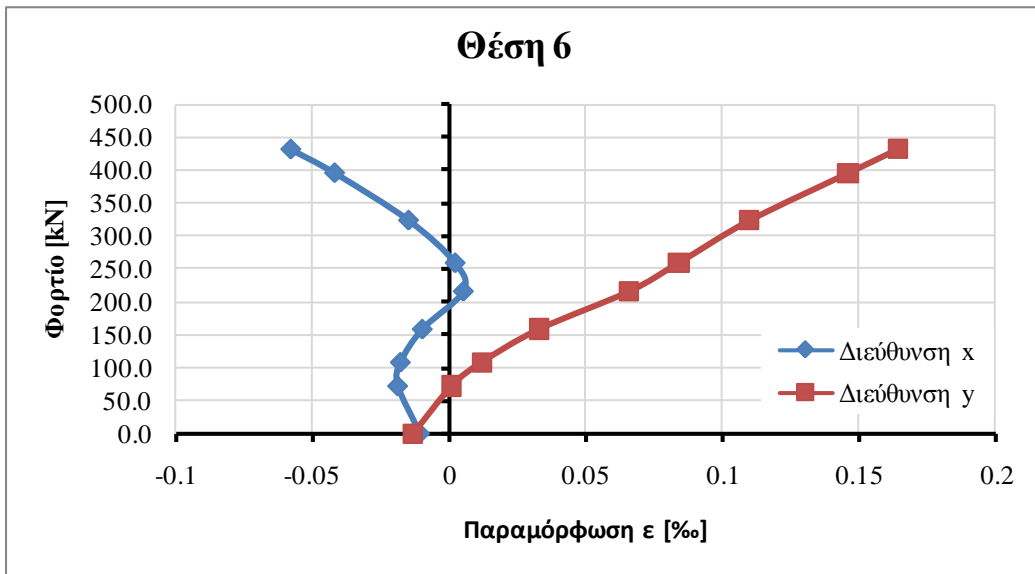


(δ)

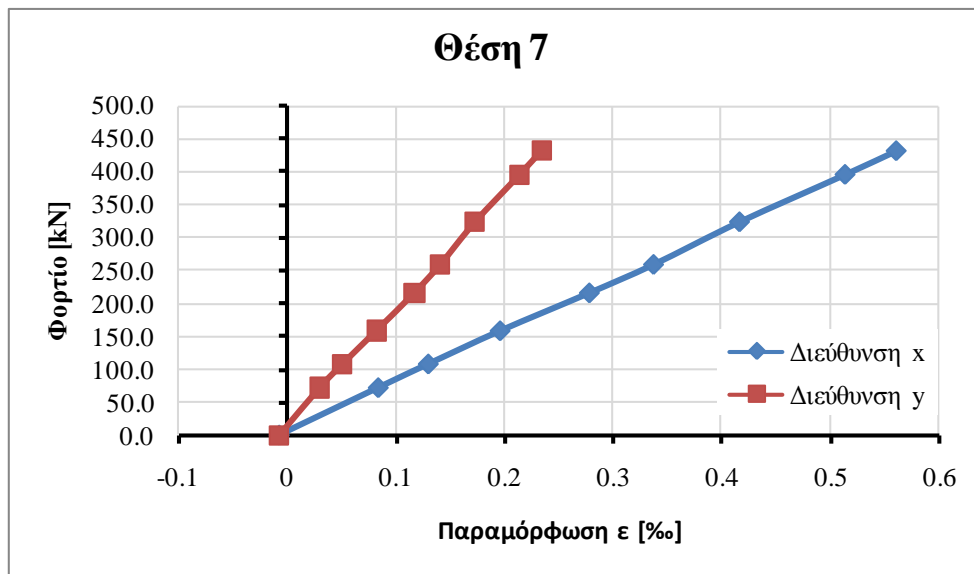
Σχήμα 4-10 (α), (β), (γ), (δ) Πειραματικές καμπύλες επιβαλλόμενων φορτίων-παραμόρφωσης από τα μηχανοσκόμμετρα στις θέσεις 1-4



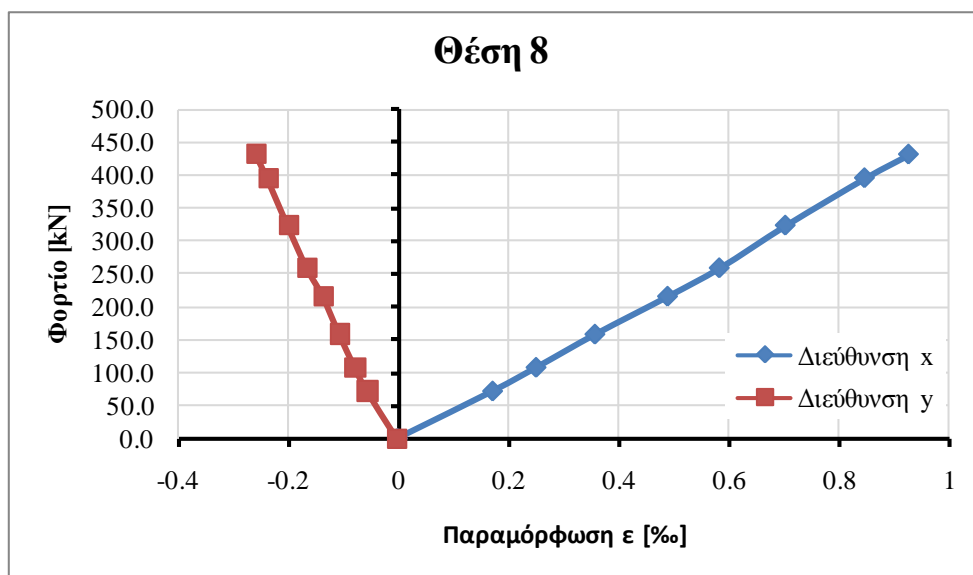
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4-11 (α), (β), (γ), (δ) Πειραματικές καμπύλες επιβαλλόμενων φορτίων-παραμόρφωσης από τα μηχανοσκόπια στις θέσεις 5-8

### 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 4.3.1 Σύγκριση της θεωρητικής και πειραματικής βύθισης της πειραματικής δοκού

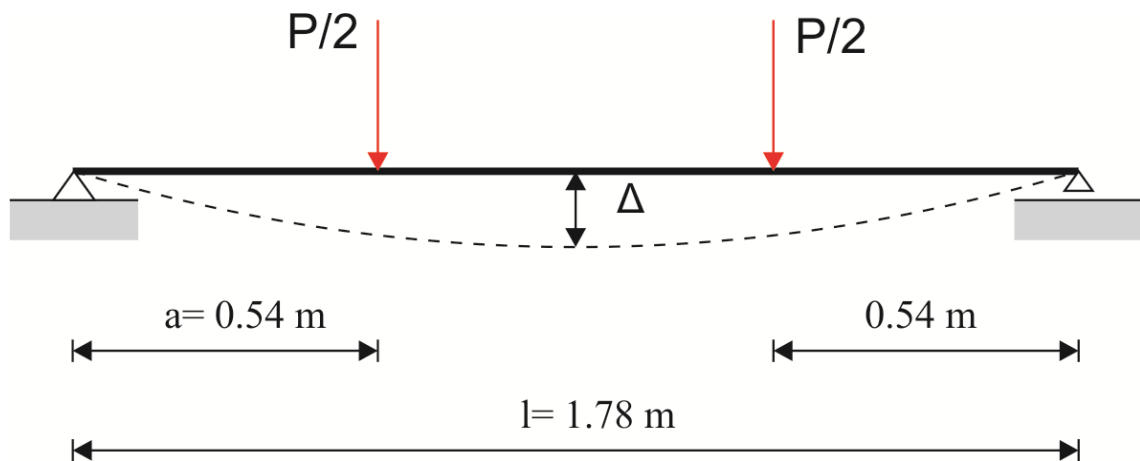
Οι πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης, που προέκυψαν για την πειραματική μεταλλική δοκό και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-10 και 4-11, θα συγκριθούν με τις βυθίσεις, που προκύπτουν από τη θεωρητική ανάλυση της δοκού. Για τη θεωρητική ανάλυση, το στατικό μοντέλο της μεταλλικής δοκού δείχνεται στο Σχήμα 4-12.

Η μέγιστη εφελκυστική και μέγιστη (κατά απόλυτη τιμή) καμπτική τάση  $\sigma$ , που αναπτύσσονται στη δοκό κατά την ελαστική παραμόρφωσή της, παρέχονται από την σχέση

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} \tag{4.1}$$

όπου  $M$  είναι η ροπή κάμψης και  $W$  είναι η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής. Για τη δοκό ΗΕΒ 220, που μελετάμε, η ελαστική καμπτική αντίσταση της διατομής είναι  $W = 376 \text{ cm}^3$ . Για την κατηγορία υλικού που χρησιμοποιήθηκε (St 37), η τάση διαρροής είναι  $\sigma_y = 450 \text{ MPa}$ . Συνεπώς, για να εισέλθει η δοκός στην ελαστική κατάσταση, η απαιτούμενη ροπή είναι ίση με

$$M_y = \sigma W = 450 \times 736 \times 10^{-3} = 331 \text{ kNm} \quad (4.2)$$



Σχήμα 4-12 Το στατικό μοντέλο της μεταλλικής πειραματικής δοκού

Η μέγιστη ροπή, που αναπτύσσεται στην πειραματική δοκό, αντιστοιχεί στη δύναμη  $P = 432 \text{ kN}$  και είναι ίση με

$$M_{prov} = \frac{P}{2} a = \frac{432}{2} \times 0.54 = 117 \text{ kNm} < M_y = 331 \text{ kNm} \quad (4.3)$$

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η πειραματική δοκός δεν εισήλθε στην πλαστική περιοχή για τα φορτία που καταπονήθηκε, και συνεπώς, μπορεί να αναλυθεί στα πλαίσια της θεωρίας της ελαστικότητας. Για τον υπολογισμό της απόκρισης της πειραματικής δοκού, έγινε μια σειρά μετρήσεων μετατόπισης και αντίστοιχης δύναμης και μια σειρά θεωρητικών υπολογισμών της βύθισης αυτής, που καταχωρούνται στον Πίνακα 4-3.

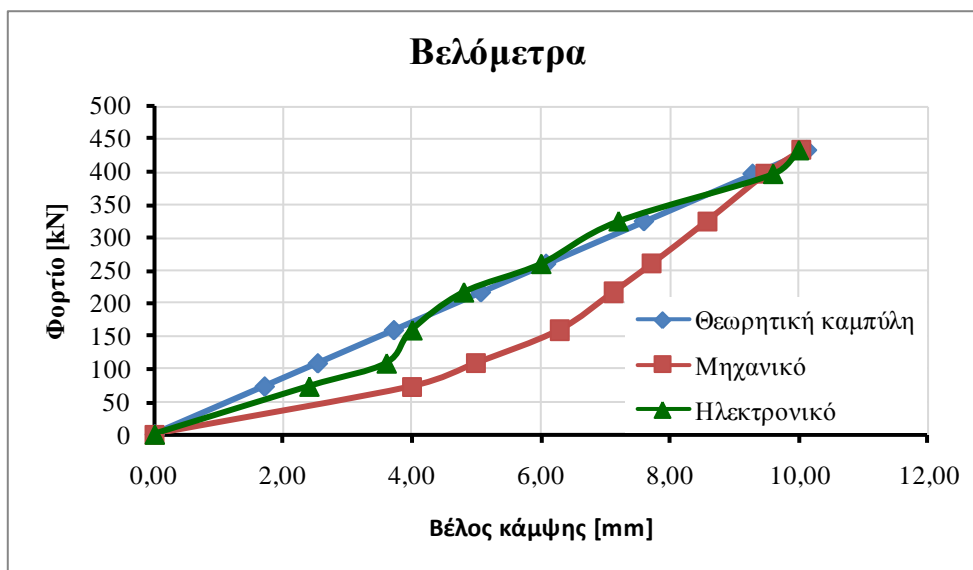
Με τη θεωρία της ελαστικότητας, η βύθιση  $\Delta$  στο μέσον της δοκού (Σχήμα 4-12) παρέχεται από τη σχέση:

$$\Delta = \frac{Pl^2 a}{48EI} \left(3 - 4 \frac{a}{l}\right) = P \frac{1780^2 \times 540}{48 \times 200000 \times 4000 \times 10^4} \left(3 - 4 \frac{540}{1780}\right) = 0.0234P \quad (4.4)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 Πειραματικές μετρήσεις βύθισης και θεωρητική καμπύλη υπολογισμού

Βελόμετρα Φορτίο	Μηχανικό	Ηλεκτρονικό	Θεωρητική καμπύλη
0.0	0.00	0.00	0.00
72.0	4.00	2.40	1.71
108.0	4.99	3.60	2.53
158.4	6.28	4.00	3.71
216.0	7.12	4.80	5.07
259.2	7.72	6.00	6.08
324	8.57	7.20	7.60
396	9.48	9.60	9.29
432	10.03	10.00	10.13

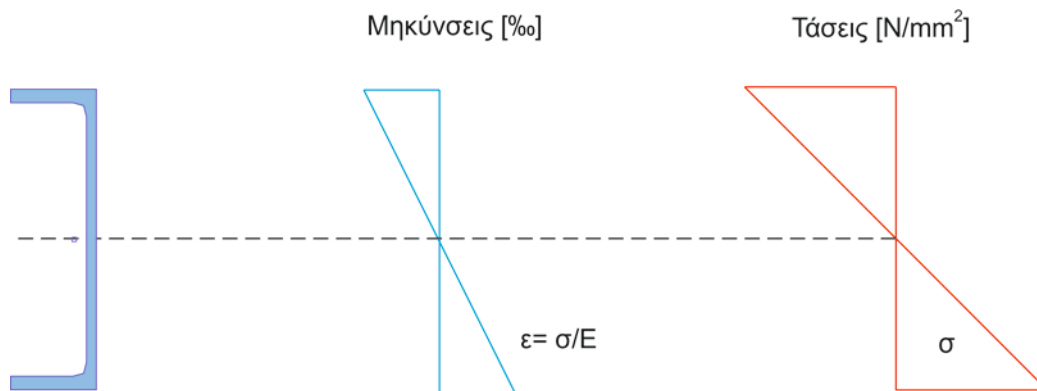
Από τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν και με τη χρήση της σχέσης (4.5), προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 4-13, για την πειραματική και τη θεωρητική καμπύλη φορτίων-βύθισης της πειραματικής μεταλλικής δοκού.



Σχήμα 4-13 Θεωρητική και πειραματική καμπύλη φορτίων-βύθισης της πειραματικής δοκού

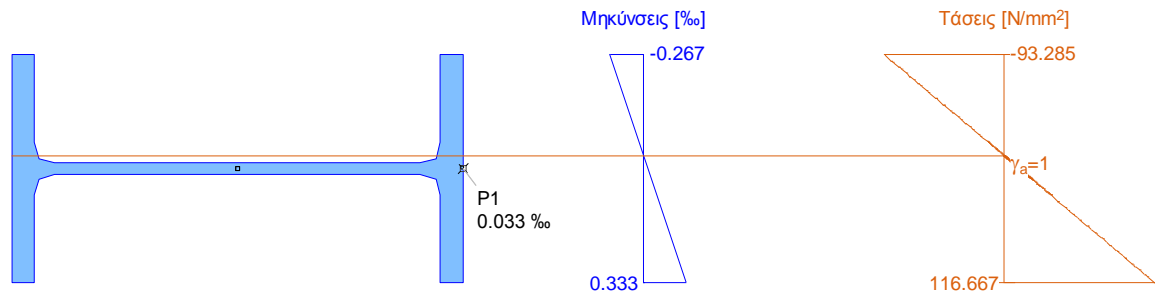
#### 4.3.2 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών παραμορφώσεων στις επιλεγμένες θέσεις του πλαισίου

Προκειμένου να ελεγχθεί η παραμορφωσιακή συμπεριφορά του μεταλλικού πλαισίου κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, έγιναν πειραματικές μετρήσεις των ορθών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε τέσσερις θέσεις του πλαισίου για όλη την ιστορία φόρτισης του πλαισίου, με τα φορτία που καταπονούν τη δοκό. Για τις θέσεις αυτές θα εξαχθούν οι θεωρητικές τιμές φόρτισης του πλαισίου, έτσι όπως αυτές προκύπτουν από την ελαστική θεωρία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κανένα τμήμα του πλαισίου, οι τάσεις δεν ξεπερνούν την τάση διαρροής  $\sigma_y$  του υλικού του πλαισίου, και συνεπώς, είναι δυνατή η εφαρμογή της ελαστικής θεωρίας. Οι ορθές παραμορφώσεις μετρήθηκαν με τα μηκυνσιόμετρα, σε δύο κάθετες διευθύνσεις, η μία εκ των οποίων ήταν τοποθετημένη παράλληλα στον άξονα των στοιχείων. Από την τεχνική θεωρία ελαστικότητας, η διανομή των ορθών παραμορφώσεων κατά το ύψος της διατομής είναι γραμμική. Σε μια θέση της διατομής, που η παραμόρφωση είναι  $\epsilon$ , η αντίστοιχη τάση είναι  $\sigma = E\epsilon$ , όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας.

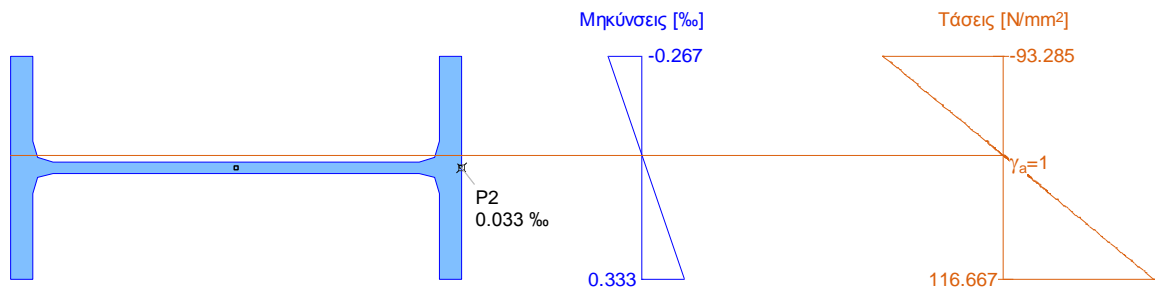


Σχήμα 4-14 Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων

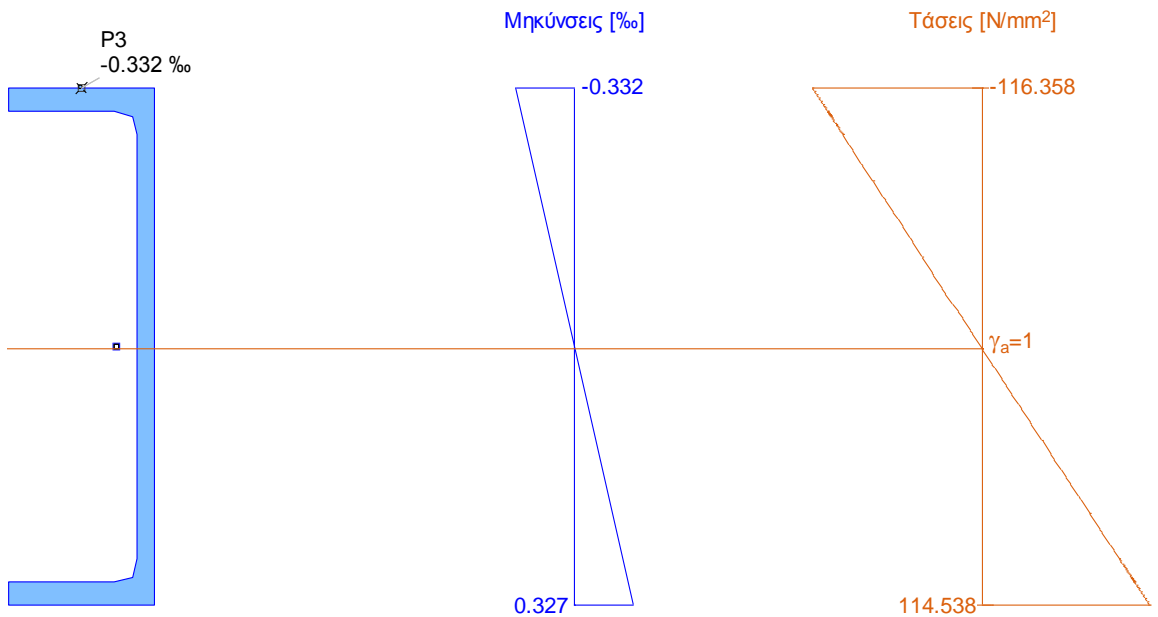
Το αντικείμενο ενδιαφέροντος για τη λειτουργία του πλαισίου είναι η μέγιστη τιμή των παραμορφώσεων στις τέσσερις θέσεις μετρήσεων. Στις θέσεις αυτές για το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε στη δοκό, η κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή του, αντιστοιχούν στις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του πλαισίου και δείχνονται στα Σχήματα 4-15, 4-16, 4-17 και 4-18. Τα διαγράμματα αυτά παρήχθησαν από το υποπρόγραμμα FAGUS-5 του λογισμικού πακέτου STATIK-5, που διαθέτει το εργαστήριο.



Σχήμα 4-15 Διανομή των θεωρητικών τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή ΗΕΒ, στη θέση Θ1.

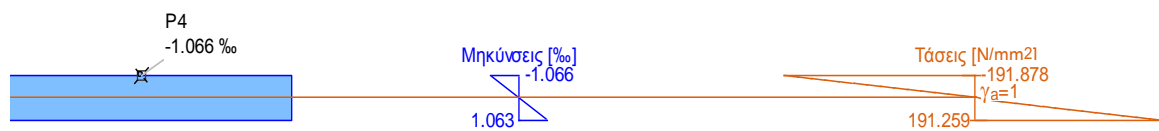


Σχήμα 4-16 Διανομή των θεωρητικών τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή ΗΕΒ, στη θέση Θ2.



Σχήμα 4-17 Διανομή των θεωρητικών τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή UPEB, στη θέση Θ3.





Σχήμα 4-18 Διανομή των θεωρητικών τάσεων και παραμορφώσεων στη μεταλλική πλάκα, στη θέση Θ4

Στον Πίνακα 4-4, έχουν καταχωρηθεί οι θεωρητικές και πειραματικές τιμές της παραμόρφωσης στις θέσεις Θ1, Θ2, Θ3 και Θ4, για τη μέγιστη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου  $P= 432 \text{ kN}$ . Από τη σύγκριση των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών, προκύπτει ότι οι πειραματικές τιμές βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4 Πειραματικές και θεωρητικές τιμές της παραμόρφωσης στις θέσεις 1, 2, 3 και 4, για τη μέγιστη τιμή του φορτίου  $P= 432 \text{ kN}$

	Διεύθυνση	Θεωρητικό	Πειραματικό
Θέση 1	z	0.033	0.033
Θέση 2	z	0.037	0.033
Θέση 3	x	-0.358	-0.332
Θέση 4	y	1.138	1.066

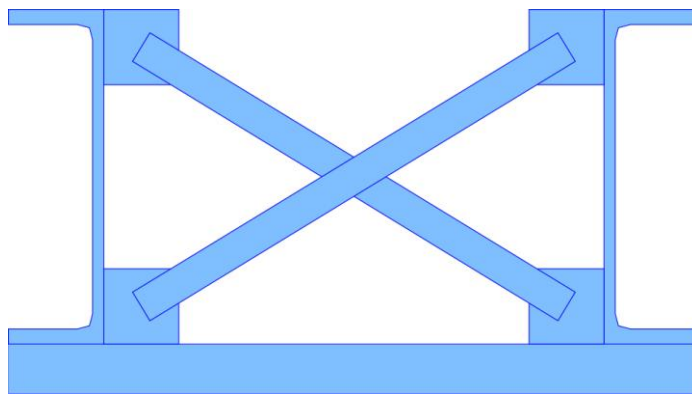
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύθηκε και σχεδιάστηκε μια εργαστηριακή κατασκευή για την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος φυσικού μεγέθους. Με βάση την ανάλυση που έγινε συντάχθηκαν τα κατασκευαστικά σχέδια και τα σχέδια λεπτομερειών με βάση τα οποία έγινε η υλοποίηση της κατασκευής. Η εργαστηριακή κατασκευή είναι ένα μεταλλικό υπερστατικό πλαίσιο από τυποποιημένες διατομές του εμπορίου, που συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικά ελάσματα και προεντεταμένους κοχλίες.

- Για την ανάλυση και τον σχεδιασμό της εργαστηριακής κατασκευής, τέθηκαν συγκεκριμένες απαιτήσεις αναφορικά με την αντοχή και τη λειτουργικότητα. Μία από αυτές τις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού που τέθηκαν, είναι να παραμένουν όλα τα δομικά μέλη της κατασκευής στην ελαστική περιοχή, για το μέγιστο φορτίο λειτουργίας της. Το μέγιστο αυτό φορτίο αντιστοιχεί σε μια δύναμη ίση με 432 kN, που επιβάλλεται στα οριζόντια στοιχεία της κατασκευής. Το μέγεθος αυτό της δύναμης κρίνεται ότι επαρκεί για πειραματικές δοκιμές σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος φυσικού μεγέθους.
- Μια δεύτερη βασική απαίτηση για το σχεδιασμό της κατασκευής ήταν το μικρό μέγεθος των βυθίσεων των οριζόντιων στοιχείων. Τα οριζόντια αυτά στοιχεία, ιδιαίτερα τα δύο κάτω, επάνω στα οποία τοποθετείται η πειραματική δοκός θα πρέπει να υφίσταται μετατοπίσεις διαφορετικής τάξης μεγέθους από αυτές που αναμένεται να αναπτυχθούν στις πειραματικές δοκούς. Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε, οι κατακόρυφες βυθίσεις που αναμένεται να αναπτυχθούν στα οριζόντια στοιχεία, στις θέσεις των στηριγμάτων των δοκών, είναι της τάξης των 2 mm. Αυτές οι βυθίσεις είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους από τις μετατοπίσεις των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, που αναμένεται να είναι της τάξης των 20 mm.

- Στην εργαστηριακή κατασκευή προσαρμόστηκε και βαθμονομήθηκε ένα σύστημα φόρτισης. Η βαθμονόμηση του συστήματος έγινε με τη χρήση μιας δυναμοκυψέλης και ενός ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής της πίεσης της ηλεκτρο-υδραυλικής πρέσας.
- Η παραμορφωσιακή κατάσταση που αναπτύσσεται στην κατασκευή, ελέγχεται πειραματικά, εκτελώντας μια δοκιμή σε μια μεταλλική δοκό προκειμένου να αναπτυχθεί το μέγιστο φορτίο, που μπορεί να επιβάλλει η πρέσα. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης της κατασκευής, τοποθετήθηκαν τέσσερα μηκυνσιόμετρα στο μεταλλικό πλαίσιο και τέσσερα μηκυνσιόμετρα πειραματική μεταλλική δοκό. Στο κάτω μέρος της πειραματικής δοκού, τοποθετήθηκαν επίσης και δύο βελόμετρα, ένα μηχανικό και ένα ηλεκτρονικό. Οι μετρήσεις που έγιναν βρέθηκαν σε ικανοποιητική συμφωνία με αυτές που προβλέπει η γραμμική ελαστική θεωρία.
- Δύο βασικά μειονεκτήματα καταγράφηκαν κατά την διαδικασία της πειραματικής δοκιμής, που πραγματοποιήθηκε. Το πρώτο μειονέκτημα σχετίζεται με τη δυσκολία και την επικινδυνότητα τοποθέτησης των δοκιμών στην κατασκευή, λόγω του υπερβολικού βάρους και του μεγάλου μεγέθους αυτών. Το δεύτερο μειονέκτημα έγκειται στον τρόπο καταγραφής των μετρήσεων, αφού δεν υπήρχε ένας ενιαίος και άμεσος τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών.
- Για την εύρυθμη λειτουργία της εργαστηριακής κατασκευής σε μελλοντικά πειράματα μεγαλύτερων απαιτήσεων σε φορτία, προτείνεται η τοποθέτηση κατακόρυφου συνδέσμου δυσκαμψίας μεταξύ των δύο άνω οριζόντιων στοιχείων, διατομής UPE 400, και επάνω από το έλασμα με πάχος  $t = 60 \text{ mm}$ . Ο σύνδεσμος αυτός προτείνεται να έχει μήκος 600 mm και πάχος 40 mm.



Σχήμα 5-1 Προτεινόμενη διάταξη γεφύρωσης

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

*Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα*, European Committee for Standardisation, Μάιος 2005

Κουνάδη Αντωνίου, *Σιδηρές Κατασκευές Συμπεριφορά και Ανάλυση*, Εκδόσεις Συμμεών Τόμος I, Αθήνα 2007

Beton-Kalender, Εκδόσεις ΤΕΕ, 1970

Κουνάδη Αντωνίου, *Διατομές Σιδηροδοκών*, Εκδοτικός Οργανισμός Γρηγορίου Φούντα

<http://euler9.tripod.com/bolt-database/23.html>

<http://www.leecosteel.com>