



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΑΘΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ



Διπλωματική Εργασία  
**Κωνσταντίνος Λεοντάρης**

ΕΜΚ ΔΕ 2016 30

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΑΘΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ



Διπλωματική Εργασία  
**Κωνσταντίνος Λεοντάρης**

ΕΜΚ ΔΕ 2016 30

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



Copyright © Κωνσταντίνος Λεοντάρης, 2016  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Konstantinos Leontaris, 2016  
All Rights Reserved

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

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

Κωνσταντίνος Λεοντάρης (2016)

Σχεδιασμός Μεταλλικών Αντηρίδων Προσωρινής Αντιστήριξης Βαθιάς Εκσκαφής  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 30  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos Leontaris (2016)

Design of Steel Struts for the Temporary Support of Deep Excavations  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 30  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο διάστημα αυτό κατακτήθηκαν πολλοί και διαφορετικοί στόχοι, οι οποίοι δεν θα μπορούσαν να γίνουν πράξη, χωρίς την συμβολή, υποστήριξη και καθοδήγηση ορισμένων ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της εν λόγω Διπλωματικής Εργασίας. Το άψογο κλίμα συνεργασίας μεταξύ μας, η συστηματική καθοδήγηση και η διάθεσή του να αφιερώσει πολλές ώρες, παρά το απαιτητικό του πρόγραμμα, συντέλεσαν στο να ξεπεράσω τις όποιες δυσκολίες παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και στο να κλείσει με ιδιαίτερα όμορφο τρόπο ο κύκλος των σπουδών μου στη σχολή αυτή.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νίκο Ρούσσο, MSc. Μεταλλειολόγο – Γεωτεχνικό Μηχανικό της εταιρίας Όμικρον Κάπα Μελετητική Α.Ε., ο οποίος με τις καθοριστικές συμβουλές του βοήθησε καταλυτικά στην προσέγγιση του συνολικού προβλήματος της εν λόγω εργασίας.

Για τις υποδείξεις του σε κάποια σημεία της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Θανάσουλα, υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π.

Αδιαμφισβήτητα, θα ήθελα να σταθώ και στους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν με την εμπιστοσύνη τους όλα αυτά τα χρόνια και μοιραστήκαμε μαζί πολύ όμορφες στιγμές.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Πέτρο και Άννα, και τον αδερφό μου Χρήστο, για την αγάπη, την υπομονή και την ηθική υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

*Κωνσταντίνος Λεοντάρης*

*Οκτώβριος 2016*





*Στους γονείς μου Πέτρο και Άννα,  
οι οποίοι είναι αρωγοί σε κάθε  
μου προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2016 30

## **Σχεδιασμός Μεταλλικών Αντηρίδων Προσωρινής Αντιστήριξης Βαθιάς Εκσκαφής**

**Κωνσταντίνος Λεοντάρης**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Οκτώβριος 2016

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση εναλλακτικών συστημάτων προσωρινής αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής με χρήση μεταλλικών αντηρίδων. Εξετάζονται δύο διαφορετικοί τύποι συστημάτων, με και χωρίς χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας μεταξύ των αντηρίδων της ίδιας ή και διαφορετικής στάθμης. Εξάγονται οι οριακές επαρκείς διατομές με στόχο την σύγκριση διατομών μεταξύ των ιδίων χαλύβδινων δομικών μελών που ανήκουν σε διαφορετικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στους διάφορους τύπους συστημάτων προσωρινής αντιστήριξης βαθιών εκσκαφών αναφέροντας επιγραμματικά τις βασικές προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός ασφαλούς συστήματος αντιστήριξης. Ακολούθως διατυπώνεται το υπό μελέτη πρόβλημα με έμφαση στον στόχο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος, αναλύεται συνοπτικά η διάρθρωση της παρούσας εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικώς η λογική μόρφωσης και η επιλογή κατάλληλου τύπου διατομής για το εκάστοτε από τα υπό μελέτη συστήματα αντιστήριξης. Στη συνέχεια παρατίθενται τα δεδομένα του προβλήματος αναφοράς (γεωμετρικές διαστάσεις, συνθήκες στηρίξεως, συνδυασμοί φόρτισης κλπ.). Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα γραμμικά και μη γραμμικά προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη μη γραμμικότητα γεωμετρίας που χαρακτηρίζει το μέλος της αντηρίδας λόγω υψομετρικής διαφοράς των σημείων στήριξής της που επιβάλλεται κανονιστικά ως μορφή ατέλειας.

Στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα της διερεύνησης που έγινε για το εκάστοτε σύστημα προσωρινής αντιστήριξης μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται συνοπτικώς σε πρώτη φάση τα χαρακτηριστικά των χωρικών προσομοιωμάτων και εκτελούνται γραμμικές αναλύσεις. Από την περιβάλλουσα των αποτελεσμάτων των γραμμικών στατικών αναλύσεων αυτών των προσομοιωμάτων λαμβάνονται εντατικά μεγέθη με βάση τα οποία γίνεται διαστασιολόγηση των διαγωνίων μελών και των τραβερσών, σύμφωνα με τις διατάξεις του EC3. Για τα δομικά αυτά μέλη δεν κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η λειτουργία και οι απαιτήσεις ελέγχου τους είναι οι συνήθεις. Επίσης, με βάση τα

ανωτέρω δυσμενή εντατικά μεγέθη γίνεται μια προδιαστασιολόγηση των αντηρίδων και των δύο σταθμών και λαμβάνονται αξονικές δυνάμεις για τις αντηρίδες, οι οποίες εν συνεχεία εισάγονται ως αξονικά φορτία σχεδιασμού στις μη γραμμικές αναλύσεις, με βάση τις οποίες γίνεται η διαστασιολόγηση των αντηρίδων. Επισημαίνεται ότι για τις αντηρίδες δεν κρίνεται επαρκής η διαστασιολόγηση με γραμμικές αναλύσεις και εφαρμογή των διατάξεων του EC3, διότι δεν θα ήταν έτσι δυνατόν να ληφθεί αξιόπιστα υπόψη η κανονιστική απαίτηση θεώρησης αρχικών ατελειών λόγω υψομετρικής διαφοράς των σημείων στήριξης.

Στο σύστημα αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων (τέταρτο κεφάλαιο) λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία των αναλύσεων, γραμμικών και μη γραμμικών, οι φάσεις κατασκευής του έργου, κάτι το οποίο δεν είναι απαραίτητο στο σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένων αντηρίδων (τρίτο κεφάλαιο) διότι οι αντηρίδες των δύο σταθμών λειτουργούν ανεξάρτητα. Επιπροσθέτως πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές διερευνήσεις ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας και ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της. Από την πρώτη προκύπτει ότι για ρεαλιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών δεν υπάρχει διαφοροποίηση στο οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Από την δεύτερη το κύριο συμπέρασμα είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Τέλος, πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής της τραβέρσας. Για ρεαλιστικό εύρος τιμών, το οποίο κυμαίνεται από 5% έως 50% της εγκάρσιας δυσκαμψίας των εδαφικών θλιπτικών ελατηρίων, προκύπτει ότι η διατομή του μέλους της τραβέρσας επαρκεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η περίπτωση του κλειστού χωρίου εκσκαφής. Στα ανωτέρω συστήματα αντιστήριξης το χωρίο της εκσκαφής είναι κλειστό μόνο από τις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές του. Με τη ρεαλιστικότερη αυτή προσέγγιση, το μέγεθος της επιβαλλόμενης θλιπτικής αξονικής δύναμης στα μέλη των τραβερσών και των κεφαλοδέσμων αυξάνει ραγδαία, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις σε μέγεθος διατομής και ενισχυτικών ελασμάτων, κορμού και πελμάτων, να αυξάνουν. Εξετάζεται η χρήση ενός ή δύο διαγωνίων μελών στα άκρα της εκσκαφής, οι οποίοι θα συνδέουν τις τραβέρσες και τους κεφαλοδέσμους της εγκάρσιας και διαμήκου διεύθυνσης μεταξύ τους και ταυτοχρόνως θα ισομοιράζουν το ελεύθερο μήκος των δομικών αυτών μελών.

Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας και γίνεται μια σύντομη αναφορά στη λογική προσέγγισης του συνολικού προβλήματος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2016 30

## **Design of Steel Struts for the Temporary Support of Deep Excavations**

**Konstantinos Leontaris**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

October 2016

### **ABSTRACT**

The present diploma thesis deals with the investigation of alternative temporary support systems of deep excavations with the use of steel struts. Two different types of retaining systems are examined, the first including the use of vertical and horizontal cross beams between the struts and the other without. Optimum cross-sections of beams are defined and the main goal is to compare the cross-sections of the same structural elements, which belong to different temporary retaining systems.

In the first chapter, an introduction to different types of temporary retaining systems is presented and simultaneously the main requirements for the construction of a safe retaining system are briefly mentioned. Furthermore, emphasis is given to the main goal of the thesis. Finally, the contents of the thesis are briefly described.

In the second chapter, the design approach and the selection of the appropriate cross-section type, for each of the temporary retaining systems, are presented. Moreover, the data of the prototype structure are mentioned (dimensions of structural components, support conditions, load combinations etc.). Furthermore, linear and non-linear simulations are introduced and special attention is given to non-linearity, since there is an altitude difference, between the supports of the struts, dictated by pertinent codes as an additional initial imperfection.

In the third and fourth chapter, the results of an extensive investigation of each temporary retaining system, by means of linear and non-linear analysis, are presented. Initially the characteristics of the numerical models are given and subsequently linear analyses are carried out. The dimensions of the cross-section of beams are calculated, according to the most unfavorable internal forces based on the results of linear static analysis, according to the regulations of EC3. Non-linear analysis is not necessarily for those structural elements. Moreover, the initial evaluation of the struts cross-section dimensions is calculated based on the unfavorable internal forces mentioned above for both levels of the retaining system. The final evaluation of the struts cross-sections is made employing the most unfavorable axial internal forces, which are introduced as axial design forces in the non-linear analysis. It should be underlined that the evaluation of the cross-section of the struts should take into consideration the altitude difference between the supports of the strut, which is not being taken into account in linear analysis.

The construction stages of the temporary retaining system that includes the cross beams between the struts (fourth Chapter) are introduced both to linear and non-linear simulations. In the occasion of the temporary retaining system with single struts, the introduction of construction stages is not needed, as the struts of each level act separately. Furthermore, parametric investigations based on the size of the altitude between the supports of the strut and the size of the initial bow imperfection are examined. The results of the first parametric investigation showed that there is no reduction in the resistance load of the struts, for a realistic range of values of altitude difference the supports of the struts. Concerning the second parametric investigation the main conclusion that arises is that the larger the initial bow imperfection is, the lower the resistance load of the strut is. In the last parametric investigation carried out, the value of the stiffness of friction spring is examined. For values, varying from 5% to 50% of the transverse stiffness of compression soil springs, the cross-section of the beam is adequate.

In the fifth chapter, the excavation area is considered to be of finite length and closed on all four sides, while in the above retaining systems, the excavation area was considered to be of infinite length. This more realistic approach showed that the amount of the compressive axial force in the longitudinal beams is rapidly increasing, requiring larger cross sections. The cases of using one or two diagonal struts on each side at the edge of the excavation is examined.

In the sixth and final chapter, conclusions of the diploma thesis are presented and a brief summary of the general approach of the current thesis is mentioned.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Εισαγωγή στο πρόβλημα .....	4
1.3	Διάρθρωση της εργασίας.....	6
<b>2</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....</b>	<b>9</b>
2.1	Μεθοδολογία .....	9
2.2	Δεδομένα προβλήματος .....	10
2.2.1	Ποιότητες υλικών .....	10
2.2.2	Διατομές δομικών μελών .....	10
2.2.3	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων .....	11
2.2.4	Εδαφικά ελατήρια.....	11
2.2.5	Φορτία – Συνδυασμοί Φόρτισης .....	12
2.3	Ανάλυση και Σχεδιασμός .....	14
2.3.1	Γραμμικές αναλύσεις.....	14
2.3.1.1	1 <sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων.....	14
2.3.1.2	2 <sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων.....	15
2.3.1.3	Υπολογισμός εμβαδού επιρροής.....	16
2.3.1.4	Φάσεις κατασκευής.....	19
2.3.1.5	Σύνοψη .....	21
2.3.2	Μη γραμμικές αναλύσεις .....	21
<b>3</b>	<b>ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ .....</b>	<b>27</b>
3.1	Γενικά.....	27
3.2	Διαστασιολόγηση Αντηρίδων .....	27
3.2.1	Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος.....	27
3.2.1.1	Διατομές δομικών μελών .....	29
3.2.1.2	Ελατήρια .....	30
3.2.1.3	Φορτία – Συνδυασμοί φόρτισης.....	30
3.2.2	Γραμμικές αναλύσεις.....	30
3.2.2.1	Άνω στάθμη.....	31
3.2.2.2	Κάτω στάθμη .....	40
3.2.2.3	Σύνοψη .....	41
3.2.3	Μη γραμμικές αναλύσεις .....	41
3.2.3.1	Άνω στάθμη.....	42
3.2.3.2	Κάτω στάθμη .....	58
3.2.3.3	Σύνοψη .....	67

3.2.4	Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας.....	68
3.2.4.1	Άνω στάθμη (CHS508/16) .....	68
3.2.4.2	Κάτω στάθμη (CHS610/40).....	70
3.2.5	Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας.....	70
3.2.5.1	Άνω στάθμη (CHS508/16) .....	71
3.2.5.2	Κάτω στάθμη (CHS610/40).....	72
3.3	Διαστασιολόγηση τραβερσών.....	72
3.3.1	Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος.....	72
3.3.2	Γραμμικές αναλύσεις.....	73
3.3.3	Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής.....	86

#### **4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΧΙΑΣΤΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ..... 89**

4.1	Γενικά.....	89
4.2	Διαστασιολόγηση Αντηρίδων .....	89
4.2.1	Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος.....	90
4.2.1.1	Διατομές δομικών μελών .....	94
4.2.1.2	Ελατήρια .....	94
4.2.1.3	Φορτία – Συνδυασμοί Φόρτισης.....	94
4.2.2	1 <sup>η</sup> Φάση κατασκευής (πριν την τοποθέτηση των αντηρίδων της κάτω στάθμης) .....	95
4.2.2.1	Γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη.....	95
4.2.2.2	Μη γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη.....	113
4.2.2.3	Σύνοψη .....	125
4.2.3	2 <sup>η</sup> Φάση κατασκευής (μετά την τοποθέτηση των αντηρίδων της κάτω στάθμης).....	126
4.2.3.1	Γραμμικές αναλύσεις – Κάτω στάθμη .....	126
4.2.3.2	Μη γραμμικές αναλύσεις – Κάτω στάθμη .....	139
4.2.3.3	Γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη.....	153
4.2.3.4	Μη γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη.....	163
4.2.3.5	Σύνοψη .....	171
4.2.4	Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας.....	172
4.2.4.1	Άνω στάθμη (CHS508/16) .....	172
4.2.4.2	Κάτω στάθμη (CHS610/20).....	173
4.2.5	Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας.....	174
4.2.5.1	Άνω στάθμη (CHS508/16) .....	174
4.2.5.2	Κάτω στάθμη (CHS610/20).....	175
4.3	Διαστασιολόγηση Τραβερσών .....	175
4.3.1	Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος.....	175



4.3.2	Γραμμικές αναλύσεις.....	176
4.3.3	Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής.....	190
4.4	Διαστασιολόγηση Δικτυωμάτων .....	192
4.4.1	Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος.....	192
4.4.2	Κατακόρυφα Χιαστί .....	192
4.4.3	Οριζόντια Χιαστί.....	196
<b>5</b>	<b>ΚΛΕΙΣΤΟ ΧΩΡΙΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ.....</b>	<b>199</b>
5.1	Γενικά.....	199
5.2	Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος.....	199
5.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	200
5.2.2	Εδαφικά ελατήρια.....	201
5.2.3	Φορτία – Συνδυασμοί Φόρτισης .....	202
5.3	Διαστασιολόγηση τραβερσών.....	203
5.3.1	Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	204
5.3.1.1	Έλεγχος επάρκειας διατομής τραβέρσας .....	206
5.3.1.2	Έλεγχος επάρκειας μέλους τραβέρσας.....	219
5.3.1.3	Σύνοψη.....	225
5.3.2	Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	226
5.3.3	Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	227
5.3.4	Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	229
5.4	Διαστασιολόγηση διαγωνίων στοιχείων .....	230
5.4.1	Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	231
5.4.1.1	Κάτω στάθμη.....	231
5.4.1.2	Άνω στάθμη.....	238
5.4.2	Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	238
5.4.3	Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	238
5.4.4	Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X.....	238
5.4.5	Σύνοψη.....	239
<b>6</b>	<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>241</b>
6.1	Περίληψη .....	241
6.2	Συμπεράσματα.....	243

**7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 249**

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Πολλές φορές, είναι επιτακτική η δημιουργία βαθιών εκσκαφών με στόχο την κατασκευή μεγάλων έργων (π.χ. πολιτιστικά και ψυχαγωγικά κέντρα, υπόγεια parking) και την κατασκευή υπόγειων έργων (π.χ. σταθμοί Μετρό). Οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την ασφαλή κατασκευή ενός συστήματος αντιστήριξης είναι:

- Η υλοποίηση γεωτεχνικής έρευνας με σκοπό των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού
- Εκπόνηση Μελέτης Εφαρμογής Προσωρινών Αντιστηρίξεων βάσει των προαναφερόμενων παραμέτρων σχεδιασμού και των κανονισμών που ορίζονται από τις προδιαγραφές του έργου. Κατά την εκπόνηση της μελέτης λαμβάνονται υπόψη οι φάσεις κατασκευής του έργου και η αλληλεπίδραση με τις όμορες κατασκευές
- Ενόργανη παρακολούθηση του έργου

### Γεωτεχνική έρευνα

Η γεωτεχνική έρευνα πρέπει να εκτείνεται σε όλο το βάθος επιρροής του συστήματος αντιστήριξης και μέσω αυτής θα πρέπει να διαπιστώνονται τα εξής:

- η ύπαρξη ή μη χαλαρών ή μαλακών εδαφικών υλικών με πιθανά προβλήματα αστάθειας κατά την κατασκευή των στοιχείων αντιστήριξης
- η ύπαρξη εδαφικών σχηματισμών μεγάλης διαπερατότητας (όπως άμμοι, αμμοχάλικα κλπ.)
- η παρουσία βραχωδών σχηματισμών ή ογκολίθων που θα ήταν δυνατόν να προκαλέσουν δυσκολίες κατά την εκσκαφή ή την διάτρηση των στοιχείων αντιστήριξης
- η παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η στάθμη του

### Μελέτη Εφαρμογής Προσωρινών Αντιστηρίξεων

Η Μελέτη Εφαρμογής Προσωρινών Αντιστηρίξεων αφορά:

- Καθορισμός Φάσεων Κατασκευής
- Διαστασιολόγηση πασσάλων ή διαφραγματικών τοίχων
- Διαστασιολόγηση αγκυρίων ή/και αντηρίδων

- Υπολογισμός μετακινήσεων επιφανείας πασσάλων
- Καθορισμός ορίων επιφυλακής και συναγερμού με σκοπό την ενόργανη παρακολούθηση της αντιστήριξης

#### Ενόργανη παρακολούθηση έργου

Κατά την ενόργανη παρακολούθηση του έργου τα μετρούμενα μεγέθη αφορούν:

- τις επιφανειακές καθιζήσεις
- τις οριζόντιες μετακινήσεις επιφανείας
- τις οριζόντιες μετακινήσεις πασσάλων ή διαφραγματικών τοίχων
- τις αξονικές δυνάμεις αγκυρίων ή/και αντηρίδων
- την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

Η παρακολούθηση των παραμορφώσεων γίνεται με:

- Απλούς τοπογραφικούς μάρτυρες
- Αποκλισιόμετρα (Inclinometers)
- Κλισίμετρα (tiltmeters)
- Πιεζόμετρα

Η επιλογή του τοίχου αντιστήριξης γίνεται κυρίως σε συνάρτηση με την φύση του εδάφους και την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα. Διάφοροι τύποι συστημάτων αντιστήριξης είναι οι εξής:

- Τοίχοι τύπου "Βερολίνου"
- Διαφραγματικοί τοίχοι
- Τοίχοι με πασσαλοσανίδες

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1-1, Εικόνα 1-2, Εικόνα 1-3, Εικόνα 1-4, Εικόνα 1-5) παρουσιάζονται διάφοροι τύποι αντιστήριξης καθώς και κάποιες φάσεις του έργου κατά την κατασκευή του τυχόντος συστήματος προσωρινής αντιστήριξης.



(α)



(β)

Εικόνα 1-1: Τοίχοι αντιστήριξης τύπου Βερολίνου (α) United tower at Sharq in Kuwait (β) κτίριο Αγροτικής Ασφαλιστικής Λεωφόρος Συγγρού



(α)



(β)

Εικόνα 1-2: Αντιστήριξη με μεταλλικές αντηρίδες (α) κτίριο Stefanescu (Βουκουρέστι) (β) σταθμός μετρό στον Πειραιά



Εικόνα 1-3: Διάτρηση αγκυριών σε φρεατοπασσάλους



Εικόνα 1-4: Διάτρηση αγκυριών σε μεταλλικούς πασσάλους





Εικόνα 1-5: Αντιστήριξη με αγκυρώσεις που διασταυρώνονται

## 1.2 Εισαγωγή στο πρόβλημα

Η χρήση αντηρίδων για την προσωρινή αντιστήριξη βαθιών εκσκαφών είναι μια συνήθης πρακτική που ακολουθείται και εφαρμόζεται κυρίως στις περιπτώσεις όπου:

- Υπάρχει η απαίτηση ενός δύσκαμπτου συστήματος αντιστήριξης που δύναται να αναλάβει αυξημένες ωθήσεις λόγω πτωχών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας
- Υπάρχει η απαίτηση σε μερικές περιπτώσεις για περιορισμό – ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων, είτε λόγω ύπαρξης κτιρίων, αγωγών είτε λόγω αυξημένων μετακινήσεων από την προηγούμενη φάση του έργου
- Αδυναμία τοποθέτησης αγκυρίων (π.χ. λόγω ύπαρξης δικτύων ΟΚΩ, υδροφόρου οριζοντα με σημαντική παροχή νερού)
- Σε ορθογωνικά οικόπεδα όπου η μικρή διάσταση αυτών επιτρέπει την χρήση αντηρίδων με μικρό κόστος

Όμως κατά την χρήση του ανωτέρω συστήματος προσωρινής αντιστήριξης, υπάρχουν και μειονεκτήματα, όπως για παράδειγμα οι δυσκολίες εκσκαφής κάτω από τις αντηρίδες και οι δυσκολίες τοποθέτησης στεγανωτικής μεμβράνης στην επιφάνεια της εκσκαφής.

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1-6, Εικόνα 1-7, Εικόνα 1-8, Εικόνα 1-9) παρουσιάζονται έργα όπου χρησιμοποιούνται μεταλλικές αντηρίδες για λόγους προσωρινής αντιστήριξης της εκσκαφής.



Εικόνα 1-6: Χρησιμοποίηση μεταλλικών αντηρίδων προς αποφυγή προβλημάτων με τα όμορα κτίσματα και τα δίκτυα Ο.Κ.Ω. – Σταθμός Ανθούπολης (1)



Εικόνα 1-7: Χρησιμοποίηση μεταλλικών αντηρίδων προς αποφυγή προβλημάτων με τα όμορα κτίσματα και τα δίκτυα Ο.Κ.Ω. – Σταθμός Μετρό Ανθούπολης (2)

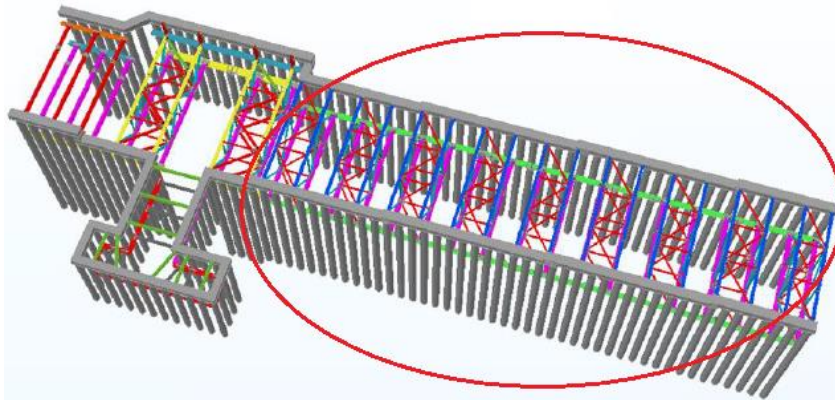


Εικόνα 1-8: Αντιστήριξη με μεταλλικές αντηρίδες – Σταθμός Μετρό Περιστερίου



Εικόνα 1-9: Αντιστήριξη με μεταλλικές αντηρίδες προς αποφυγή αγκυρώσεων που "διασταυρώνονται" – Σταθμός Μετρό Περιστερίου

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάται σύστημα προσωρινής αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής με χρήση μεταλλικών αντηρίδων.



Εικόνα 1-10: Σύστημα προσωρινής αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής με χρήση μεταλλικών αντηρίδων σε 2 στάθμες

Πιο συγκεκριμένα, στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση εναλλακτικών συστημάτων προσωρινής αντιστήριξης της βαθιάς εκσκαφής με χρήση μεταλλικών αντηρίδων, οι οποίες αντιστηρίζουν την εκσκαφή σκάμματος μεγάλου βάθους για την κατασκευή σταθμού Μετρό (Εικόνα 1-10), και κατ' επέκταση η σύγκριση μεταξύ διατομών ιδίων χαλύβδινων δομικών μελών που ανήκουν όμως σε διαφορετικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης. Εξετάζονται δύο διαφορετικοί τύποι συστημάτων, με και χωρίς χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας μεταξύ των αντηρίδων της ίδιας ή και διαφορετικής στάθμης, μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων και εξάγονται οριακές επαρκείς διατομές για τα δομικά μέλη του συστήματος της αντιστήριξης.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, κρίνεται επιτακτική η προσέγγιση μέσω μη γραμμικών αναλύσεων διότι οι στηρίξεις της τυχούσας αντηρίδας έχουν υψομετρική διαφορά ίση με  $D/6$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος της κοίλης κυκλικής διατομής (CHS) της αντηρίδας. Η εκκεντρότητα αναφέρεται στον ΕΑΒ «Recommendations on Excavations». Αυτή η απαίτηση θεώρησης αρχικών ατελειών λόγω υψομετρικής διαφοράς των σημείων στήριξης δεν συμπεριλαμβάνεται στις διατάξεις του EC3, άρα δεν κρίνεται επαρκής η διαστασιολόγηση μόνο μέσω γραμμικών αναλύσεων.

Με αφορμή την υψομετρική διαφορά των στηρίξεων της τυχούσας αντηρίδας, που αποτελεί στοιχείο μη γραμμικότητας του φορέα, πραγματοποιούνται επιπροσθέτως παραμετρικές διερευνήσεις, για το εκάστοτε από τα υπό μελέτη συστήματα προσωρινής αντιστήριξης, ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων και ως προς το μέγεθος της αρχικής ατέλειας, με στόχο να εξεταστεί το κατά πόσο αυξομειώνεται το μέγεθος της οριακής αντοχής του μέλους της αντηρίδας.

Τέλος, από την Εικόνα 1-10, γίνεται αντιληπτό ότι το χωρίο της εκσκαφής είναι κλειστό μόνο από τις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές του. Με αφορμή αυτό, διερευνάται και η περίπτωση όπου το χωρίο εκσκαφής ήταν κλειστό και εκτιμώνται εκ νέου τρόποι διαμόρφωσης της εκσκαφής στα άκρα της (χρήση διαγωνίων μελών) καθώς και οι νέες απαιτούμενες οριακές διατομές των δομικών μελών της τραβέρσας και των διαγωνίων στοιχείων στα άκρα της εκσκαφής.

### 1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε δύο βασικές ενότητες: Τη μελέτη του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας (Κεφάλαιο 3) και τη μελέτη του συστήματος αντιστήριξης με χρήση χιαστί συνδέσμων μεταξύ των αντηρίδων (Κεφάλαιο 4).



Ειδικότερα, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται αρχικά η μέθοδος προσέγγισης της μόρφωσης του συστήματος της αντιστήριξης, δηλαδή ο τρόπος σύνθεσης του συστήματος των αντηρίδων και η επιλογή σε αρχικό στάδιο τύπου διατομής. Στη συνέχεια παρατίθενται τα δεδομένα του προβλήματος (π.χ. γεωμετρικά χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων, οι συνθήκες στηρίξεως, οι συνδυασμοί φόρτισης κλπ.). Τέλος, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά των γραμμικών και μη γραμμικών προσομοιωμάτων λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις φάσεις κατασκευής.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά η μελέτη του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αρχικώς τα χαρακτηριστικά του χωρικού προσομοιώματος και στην συνέχεια πραγματοποιούνται γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις μέσω των οποίων εκτιμώνται οι οριακές διατομές επάρκειας των αντηρίδων. Ακολουθούν παραμετρικές διερευνήσεις ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων και του μεγέθους της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας. Τέλος, πραγματοποιείται διαστασιολόγηση των τραβερσών και παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής που υφίστανται, λόγω της επαφής μεταξύ τραβέρσας και επιφάνειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στο Κεφάλαιο 4 ακολουθείται επακριβώς η ίδια λογική προσέγγισης με αυτή του Κεφαλαίου 3, με τη μόνη διαφοροποίηση ότι διαδικασία ελέγχων των μελών των αντηρίδων άνω στάθμης μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων θα πραγματοποιηθεί και στις δύο φάσεις κατασκευής, αφού δεν είναι προφανής ποια εκ των δύο φάσεων κατασκευής είναι δυσμενέστερη για τις αντηρίδες άνω στάθμης ώστε να γίνουν οι έλεγχοι απευθείας για το δυσμενέστερο σενάριο. Τέλος, πραγματοποιούνται και έλεγχοι επάρκειας των οριζόντιων και κατακόρυφων χιαστί συνδέσμων μεταξύ των αντηρίδων, αξιοποιώντας τα δυσμενέστερα μεγέθη σχεδιασμού που προκύπτουν από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις.

Στο Κεφάλαιο 5 διερευνάται η περίπτωση όπου το χωρίο εκσκαφής είναι κλειστό, και όχι όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-10 που η εκσκαφή αντιστηρίζεται μόνο στις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές της. Αναλυτικότερα, γίνεται μια αρχική περιγραφή του χωρικού προσομοιώματος και στη συνέχεια πραγματοποιείται ο έλεγχος επάρκειας των τραβερσών (στην διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση) και των διαγωνίων στοιχείων (άνω και κάτω στάθμης) που βρίσκονται στα άκρα της εκσκαφής μέσω γραμμικών αναλύσεων. Τα σενάρια με βάση τα οποία ελέγχονται και διαστασιολογούνται τα ανωτέρω δομικά μέλη είναι τα εξής:

- Χρήση ενός διαγωνίου στοιχείου στα άκρα της εκσκαφής και κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην διαμήκη διεύθυνση ίσο με το κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην εγκάρσια διεύθυνση.
- Χρήση ενός διαγωνίου στοιχείου στα άκρα της εκσκαφής και κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην διαμήκη διεύθυνση ίσο με το μισό κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην εγκάρσια διεύθυνση.
- Χρήση δύο διαγωνίων στοιχείων στα άκρα της εκσκαφής και κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην διαμήκη διεύθυνση ίσο με το κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην εγκάρσια διεύθυνση.
- Χρήση δύο διαγωνίων στοιχείων στα άκρα της εκσκαφής και κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην διαμήκη διεύθυνση ίσο με το μισό κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών στην εγκάρσια διεύθυνση.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων όλων των κεφαλαίων και μια σύντομη αναφορά στη λογική προσέγγισης του συνολικού προβλήματος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



## 2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

### 2.1 Μεθοδολογία

Το σύστημα προσωρινής αντιστήριξης μορφώνεται με μεταλλικές αντηρίδες σε δύο στάθμες (άνω και κάτω στάθμη). Οι αντηρίδες της κάτω στάθμης έχουν κοίλες κυκλικές διατομές (CHS) θερμής έλασης. Οι αντηρίδες της άνω στάθμης έχουν είτε κοίλες κυκλικές διατομές (CHS) θερμής έλασης, σε περιοχές όπου δεν διατάσσονται διαγώνιοι σύνδεσμοι (οριζόντιοι και κατακόρυφοι) μεταξύ των αντηρίδων για τη μείωση του μήκους λυγισμού τους, είτε διατομές διπλού ταυ τύπου HEM, σε θέσεις όπου διατάσσονται τέτοιοι διαγώνιοι σύνδεσμοι.

Επισημαίνεται ότι οι οριζόντιοι διαγώνιοι σύνδεσμοι μπορούν να τοποθετηθούν μαζί με τις αντηρίδες της άνω στάθμης, ενώ για την τοποθέτηση των αντίστοιχων κατακόρυφων συνδέσμων πρέπει η εκσκαφή να προχωρήσει μέχρις ότου τοποθετηθούν και οι αντηρίδες της κάτω στάθμης. Αυτό σημαίνει ότι οι αντηρίδες της άνω στάθμης θα λειτουργούν πάντοτε με πλευρική εξασφάλιση στο οριζόντιο επίπεδο, όμως θα αναγκαστούν να λειτουργήσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς πλευρική εξασφάλιση σε κατακόρυφο επίπεδο. Αυτό δικαιολογεί σε τέτοιες περιπτώσεις την επιλογή διατομών τύπου διπλού ταυ, προσανατολισμένων έτσι ώστε ο ισχυρός τους άξονας να ενεργοποιείται για κάμψη σε κατακόρυφο επίπεδο. Η χρήση διαγωνίων στοιχείων πλευρικής εξασφάλισης επελέγη σε περιπτώσεις που χωρίς αυτά θα υπήρχε απαίτηση πολύ μεγάλων και εμπορικά μη διαθέσιμων διατομών CHS για τις αντηρίδες.

Η λογική προσέγγιση του εν λόγω συστήματος προσωρινής αντιστήριξης είναι σε πρώτη φάση να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα αντιστήριξης όσο το δυνατόν πιο απλοποιημένο. Το σύστημα αυτό επιτυγχάνεται με χρήση αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης οι οποίες δεν θα συνδέονται μεταξύ τους με διαγώνια στοιχεία (οριζόντια ή κατακόρυφα) (Κεφάλαιο 3). Επομένως, από την ανωτέρω μόρφωση του συστήματος αντιστήριξης, γίνεται αντιληπτό ότι η διατομή που θα επιλεγεί για τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης είναι κοίλη κυκλική (CHS) και ότι στην ανάλυση και σχεδιασμό δεν παίζει ρόλο η ακολουθία των φάσεων κατασκευής αφού οι αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης δεν συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία και κατ' επέκταση λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Σε δεύτερη φάση επιλέγεται η μόρφωση ενός πιο σύνθετου συστήματος αντιστήριξης στο οποίο χρησιμοποιούνται οριζόντια διαγώνια στοιχεία μεταξύ των αντηρίδων της ίδιας στάθμης και κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία μεταξύ των αντηρίδων των δύο σταθμών (Κεφάλαιο 4). Από τη μόρφωση αυτή του συστήματος αντιστήριξης είναι φανερό ότι η ακολουθία των φάσεων κατασκευής παίζει ρόλο, αφού κατά την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής οι αντηρίδες της άνω στάθμης θα διαθέτουν μόνο οριζόντια εξασφάλιση ενώ

κατά την 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής θα διαθέτουν επιπροσθέτως και κατακόρυφη εξασφάλιση. Επομένως το μέλος της αντηρίδας της άνω στάθμης οφείλει να μελετηθεί σε κάθε μια από τις δυο αυτές περιπτώσεις, σε αντίθεση με το μέλος της αντηρίδας της κάτω στάθμης, το οποίο με το που τοποθετείται εξασφαλίζεται και κατά τις δυο διευθύνσεις (οριζοντίως και κατακορύφως). Στο τέλος της 1<sup>ης</sup> φάσης της κατασκευής θα διερευνηθεί, από άποψη οικονομίας και ταχύτητας – ευκολίας κατασκευής, το αν η λύση της χρησιμοποίησης αντηρίδας διατομής διπλού ταυ με οριζόντια δικτύωση ή η λύση της χρησιμοποίησης μεμονωμένης αντηρίδας διατομής κοίλης κυκλικής είναι καλύτερη. Αξιοποιώντας την βέλτιστη λύση που θα προκύψει για τις αντηρίδες της άνω στάθμης, θα ακολουθήσει στη συνέχεια η 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής.

Οι αντηρίδες της κάτω στάθμης στηρίζονται σε οριζόντιες τραβέρσες που διαμορφώνονται με διατομές διπλών ταυ τύπου ΗΕΒ συγκολλημένων μεταξύ τους, με τον ισχυρό τους άξονα να λειτουργεί σε οριζόντιο επίπεδο. Οι τραβέρσες με τη σειρά τους εδράζονται σε βραχείς προβόλους που εξέχουν ανά κάθε τρίτο πάσσαλο. Ο σχεδιασμός των πασσάλων προσωρινής αντιστήριξης δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Οι αντηρίδες της άνω στάθμης στηρίζονται απευθείας επί των κεφαλοδέσμων των πασσάλων (ο σχεδιασμός των οποίων επίσης δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας).

## 2.2 Δεδομένα προβλήματος

### 2.2.1 Ποιότητες υλικών

Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των υλικών του χάλυβα και του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν στα δομικά μέλη της κατασκευής.

Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά υλικών χάλυβα και σκυροδέματος

Χάλυβας S355		Σκυρόδεμα C20/25	
Μέτρο Ελαστικότητας	$E=210\text{GPa}$	Μέτρο Ελαστικότητας	$E=30\text{GPa}$
Σταθερά Poisson	$\nu=0.3$	Σταθερά Poisson	$\nu=0.3$
Ειδικό Βάρος	$\gamma=78.5\text{kN/m}^3$	Ειδικό Βάρος	$\gamma=25\text{kN/m}^3$
Όριο διαρροής / Όριο θραύσης	$f_{yk}=355\text{MPa} / f_{uk}=355\text{MPa}$	Αντοχή	$f_{ck}=20\text{MPa}$

### 2.2.2 Διατομές δομικών μελών

Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται οι τελικές διατομές των δομικών μελών της κατασκευής που αποτελούνται από χάλυβα και σκυρόδεμα. Σε ότι αφορά τα μέλη από σκυρόδεμα, όπως αναφέρθηκε και στην υποπαράγραφο 2.1, ο σχεδιασμός τους δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Για τα μέλη από χάλυβα, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι οριακές διατομές που έχουν προκύψει έπειτα από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις στο σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας και στο σύστημα αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων.

Πίνακας 2-2: Διατομές δομικών μελών

Μέλη από χάλυβα	Μέλη από σκυρόδεμα
Αντηρίδες άνω στάθμης: CHS508/16 Αντηρίδες κάτω στάθμης: CHS 610/20 – CHS610/40 Τραβέρσες: 2HEB450 Στοιχεία δικτύματος: CHS168.3/6.3	Κεφαλοδεσμοί(BxH): 1.20m x 1.00m Πάσσαλοι: D=1.00m

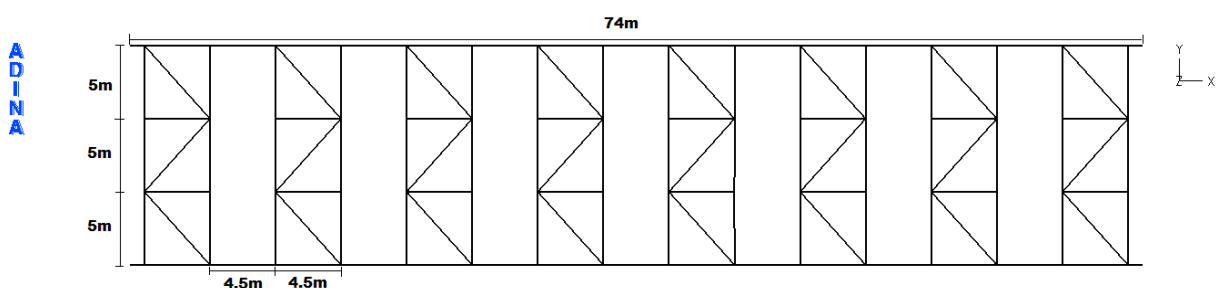
### 2.2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων

Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χωρικού προσομοιώματος του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης.

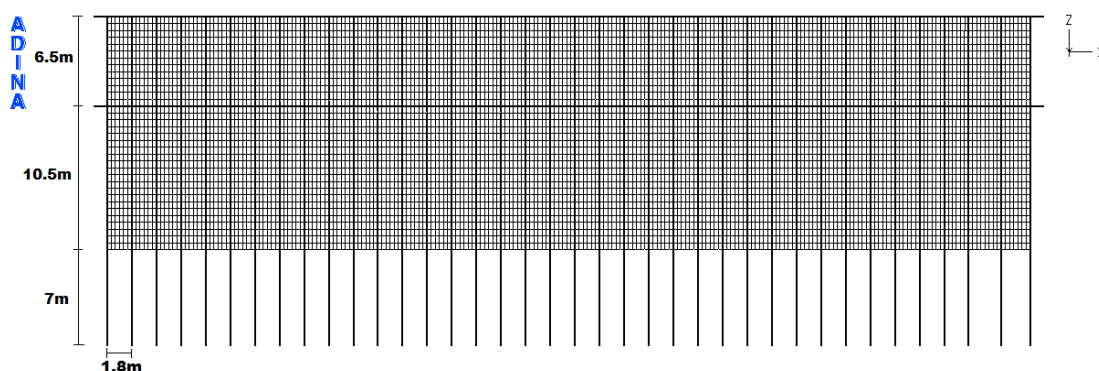
Πίνακας 2-3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά χωρικού προσομοιώματος

Συνολικό μήκος εκσκαφής	74m
Πλάτος εκσκαφής	15m
Βάθος εκσκαφής	17m
Βάθος έμπηξης	7m
Κατακόρυφη απόσταση άνω – κάτω αντηρίδων	6.5m
Διαμήκη απόσταση διαδοχικών αντηρίδων	4.5m
Μήκος αντηρίδας πλευρικά εξασφαλισμένο (οριζοντίως και κατακορύφως)	5m
Απόσταση διαδοχικών πασσάλων	1.8m

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-1, Σχήμα 2-2) παρουσιάζονται οι γεωμετρικές διαστάσεις του χωρικού προσομοιώματος συστήματος προσωρινής αντιστήριξης.



Σχήμα 2-1: Κάτοψη χωρικού προσομοιώματος συστήματος προσωρινής αντιστήριξης – Απεικόνιση γεωμετρικών διαστάσεων



Σχήμα 2-2: Όψη ΧΖ χωρικού προσομοιώματος συστήματος προσωρινής αντιστήριξης – Απεικόνιση γεωμετρικών διαστάσεων

### 2.2.4 Εδαφικά ελατήρια

Η άνω στάθμη των μεταλλικών αντηρίδων βρίσκεται στην περιοχή των τεχνητών επιχώσεων. Το μέτρο ελαστικότητας στην συγκεκριμένη στρώση είναι  $E_{MC}=45\text{MPa}$ . Συνεπώς, με μια μικρή απομείωση η τιμή του ελατηρίου για την πρώτη στάθμη λαμβάνεται ως  $40\text{MN/m}$  ανά τρέχον μέτρο στην περίπτωση που η αντηρίδα είναι στη στάθμη του κεφαλοδέσμου ή  $40\text{MN/m}$  ανά θέση πασσάλου στην περίπτωση που η αντηρίδα βρίσκεται κάτω από τον κεφαλοδέσμο και εδράζεται σε τραβέρσες.

Η κάτω στάθμη των μεταλλικών αντηρίδων βρίσκεται στην περιοχή με μέτρο ελαστικότητας  $E_{MC}=65\text{MPa}$ . Συνεπώς, με μια μικρή απομείωση η τιμή του ελατηρίου για τη δεύτερη στάθμη θα μπορούσε να ληφθεί

60MN/m ανά θέση πασσάλου. Ωστόσο, γίνεται έλεγχος για το ελατήριο των επιχώσεων, δηλαδή 40MN/m ανά θέση πασσάλου.

Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι μια απλουστευτική, και ταυτόχρονα υπέρ της ασφαλείας, προσέγγιση είναι η θεώρηση του δείκτη εδάφους ίσο με  $K_s=40000\text{kN/m}^3$ . Ο δείκτης εδάφους πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμη γραμμική δυσκαμψία για να μπορέσει να εισαχθεί ως παράμετρος στην ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Η γραμμική δυσκαμψία του εκάστοτε κόμβου του πλέγματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων που έχει σχηματιστεί στο προσομοίωμα ισούται με το δείκτη εδάφους, πολλαπλασιασμένο με το εμβαδόν επιρροής του κόμβου αυτού. Η διακριτοποίηση που πραγματοποιήθηκε για την διαμήκη διεύθυνση του φορέα είναι ανά 0.3m και για την κατακόρυφη διεύθυνση ανά 0.5m. Επομένως το εμβαδόν επιρροής ισούται με:

$$A = \left( \frac{0.3\text{m}}{2} + \frac{0.3\text{m}}{2} \right) \cdot \left( \frac{0.5\text{m}}{2} + \frac{0.5\text{m}}{2} \right) = 0.15\text{m}^2$$

Άρα η γραμμική δυσκαμψία του εκάστοτε κόμβου είναι:

$$K = K_s \cdot A \Rightarrow K = 40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0.15\text{m}^2 \Rightarrow K = 6000 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Όμοια είναι και η λογική για τον υπολογισμό της γραμμικής δυσκαμψίας των κόμβων των πασσάλων ( $D=1.00\text{m}$ ) που βρίσκονται κάτω από την στάθμη της εκσκαφής.

$$A = 1.00\text{m} \cdot \left( \frac{0.5\text{m}}{2} + \frac{0.5\text{m}}{2} \right) = 0.5\text{m}^2 \text{ Επομένως προκύπτει:}$$

$$K = K_s \cdot A \Rightarrow K = 40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0.5\text{m}^2 \Rightarrow K = 20000 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Σε ότι αφορά την αντίσταση για κίνηση κατά την διαμήκη διεύθυνση του προσομοιώματος, αυτή οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ: τραβερσών και επιφάνειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος, των κεφαλοδέσμων, του τμήματος των πασσάλων που είναι κάτω από την στάθμη της εκσκαφής, της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με το έδαφος. Προσεγγιστικά η δυσκαμψία των ελατηρίων τριβής θεωρείται ίση με το 20% της δυσκαμψίας των εγκάρσιων θλιπτικών ελατηρίων.

$$\text{Επομένως είναι: } K_h = 20\% \cdot K \Rightarrow K_h = 20\% \cdot 6000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \Rightarrow K_h = 1200 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 2.2.5 Φορτία – Συνδυασμοί Φόρτισης

Τα εν λόγω προσομοιώματα φορτίζονται με τα ίδια βάρη του συστήματος αντιστήριξης (G), με τις ωθήσεις γαιών σε κατάσταση στατική ( $\Omega\Gamma$ ) ή σε κατάσταση σεισμού ( $\Omega\Gamma\Sigma$ ) και με επιβαλλόμενη ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T$ ). Πιο συγκεκριμένα, στην 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων επιβάλλονται τα ίδια βάρη και οι ωθήσεις γαιών και στην 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων η ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή, αφού όπως αναφέρεται στην αρχή της υποπαραγράφου 2.3 από το μοντέλο της 1<sup>ης</sup> ομάδας υπολογίζονται αξιόπιστα οι εντάσεις λόγω ωθήσεων γαιών ενώ από το μοντέλο της 2<sup>ης</sup> ομάδας υπολογίζονται αξιόπιστα οι εντάσεις λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι δεν επιβάλλεται και στη 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων το φορτίο λόγω ίδιου βάρους, διότι στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται η επιρροή του στο σύστημα προσωρινής αντιστήριξης δύο φορές. Επίσης, το ομοιόμορφο θερμοκρασιακό φορτίο επιβάλλεται σε όλα τα μέλη του φορέα, είτε αυτά είναι από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα, λαμβάνοντας ταυτοχρόνως υπόψη τους συντελεστές θερμικής διαστολής του χάλυβα ( $\alpha_t = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ ) και του σκυροδέματος ( $\alpha_t = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Οι εξεταζόμενοι συνδυασμοί φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-4.

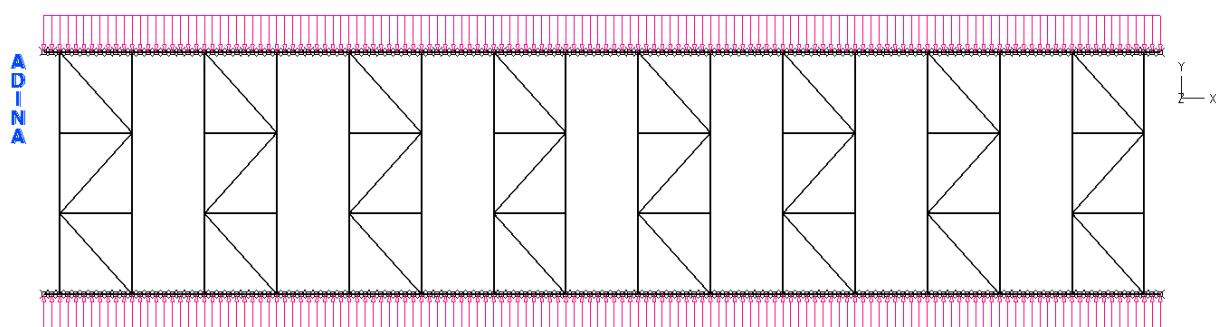
Πίνακας 2-4: Συνδυασμοί Φόρτισης

Στατικά φορτία	$1.35G + 1.35\Omega\Gamma$ (1)
Στατικά φορτία	$1.35G + 1.35\Omega\Gamma + 1.50\Delta T$ (2)
Σεισμικά φορτία	$1.35G + 1.00\Omega\Gamma\Sigma + 1.50\Delta T$ (3)

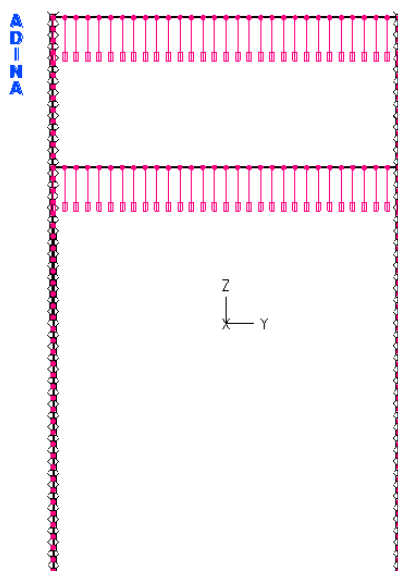
Ο συνδυασμός φόρτισης (2) είναι εν γένει δυσμενέστερος από τον (1), επομένως ο (1) είναι περιττό να εξεταστεί στις ανωτέρω ομάδες προσομοιωμάτων.

Οι ωθήσεις γαιών ασκούνται ως ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος των τραβερσών και κεφαλοδέσμων, με τιμές που λαμβάνονται από την γεωτεχνική μελέτη. Η επιβαλλόμενη ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή θεωρείται ίση με  $\Delta T=20$  °C, λαμβάνοντας υπόψη τη συνήθη μελετητική πρακτική στον ελληνικό χώρο.

Στο παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-3, Σχήμα 2-4) παρουσιάζονται ενδεικτικά οι φορτίσεις λόγω ωθήσεων γαιών και λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής στο σύστημα προσωρινής αντιστήριξης.



Σχήμα 2-3: Ενδεικτική απεικόνιση επιβολής του κατανεμημένου φορτίου λόγω ωθήσεων γαιών στη μία εκ των δύο σταθμών του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης



Σχήμα 2-4: Ενδεικτική απεικόνιση επιβολής του ομοιόμορφου θερμοκρασιακού φορτίου στο χωρικό προσομοίωμα του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης

## 2.3 Ανάλυση και Σχεδιασμός

Λαμβάνεται μέριμνα ώστε οι διατομές όλων των χαλύβδινων δομικών μελών να είναι κατηγορίας 1. Επομένως αποφεύγονται τα φαινόμενα τοπικού λυγισμού και η κύρια ανησυχία είναι αποκλειστικά ο καθολικός λυγισμός τους.

Για την ανάλυση και διαστασιολόγηση του εκάστοτε από τα ανωτέρω συστήματα προσωρινής αντιστήριξης μορφώνονται δύο διαφορετικοί τύποι προσομοιωμάτων στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA και εκτελούνται γραμμικές αναλύσεις.

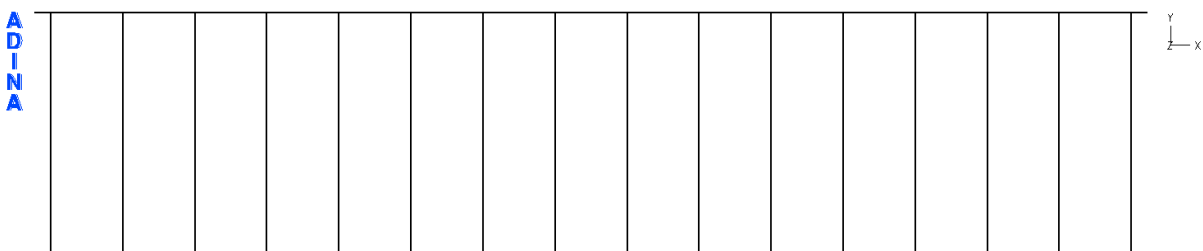
Στην 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων, για λόγους απλούστευσης, δεν προσομοιώθηκαν οι πάσσαλοι και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Με το μοντέλο αυτό υπολογίζονται αξιόπιστα οι εντάσεις λόγω ωθήσεων γαιών. Στη 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων προσομοιώθηκαν επιπλέον οι πάσσαλοι με ραβδωτά στοιχεία και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με επιφανειακά στοιχεία. Με τον τρόπο αυτό λήφθηκε υπόψη η πραγματική πρόσθετη δυσκαμψία του συστήματος αντιστήριξης, ώστε να υπολογίζονται πιο αξιόπιστα και οι εντάσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο, η διαστασιολόγηση των δομικών μελών του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης γίνεται με βάση τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη από τους δύο αυτούς τύπους προσομοιωμάτων.

### 2.3.1 Γραμμικές αναλύσεις

#### 2.3.1.1 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

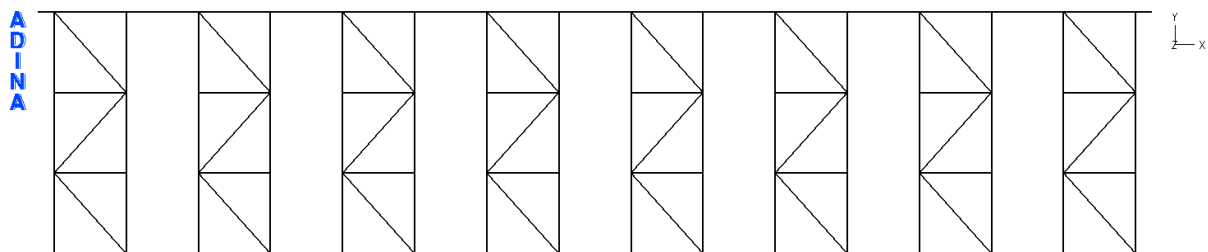
Το χωρικό προσομοίωμα της κάθε περιοχής περιλαμβάνει τις αντηρίδες τόσο της άνω όσο και της κάτω στάθμης, κατάλληλα δικτυωμένες μεταξύ τους με διαγώνια μέλη όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο (αποκλειστικά για το σύστημα αντιστήριξης με τους χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων που αναφέρθηκε ανωτέρω), τις οριζόντιες τραβέρσες και την αλληλεπίδραση των κεφαλοδέσμων και τραβερσών με το έδαφος μέσω εγκάρσιων μη γραμμικών εδαφικών ελατηρίων που παραλαμβάνουν μόνο θλίψη. Οι τραβέρσες θεωρούνται απλά εδραζόμενες στην κατακόρυφη διεύθυνση ανά κάθε τρίτο πάσσαλο, ενώ η ευστάθεια του συστήματος σε οριζόντιο επίπεδο εξασφαλίζεται από τα γραμμικά εδαφικά ελατήρια. Στα άκρα των αντηρίδων και των διαγωνίων μελών επιβάλλονται ελευθερώσεις ροπών, και οι αντίστοιχες συνδέσεις μορφώνονται με τρόπο που να είναι συμβατός με τις θεωρήσεις αυτές. Βέβαια στο μοντέλο η σύνδεση της αντηρίδας με τον κεφαλόδεσμο και την τραβέρσα προσομοιώθηκε με πάκτωση, αλλά αυτό δεν επηρεάζει το διάγραμμα ροπών της αντηρίδας διότι η στρεπτική ροπή που αναπτύσσεται στο μέλος της τραβέρσας είναι περίπου μηδενική. Επομένως, για λόγους ισορροπίας στον κόμβο αυτό, η ροπή στο άκρο της αντηρίδας είναι μηδενική, όπως ακριβώς θα προέκυπτε αν οι συνδέσεις στα άκρα της ήταν αρθρωτές.

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-5, Σχήμα 2-6, Σχήμα 2-7, Σχήμα 2-8) παρουσιάζονται διάφορες όψεις των προσομοιωμάτων της 1<sup>ης</sup> ομάδας του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας και του συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων.

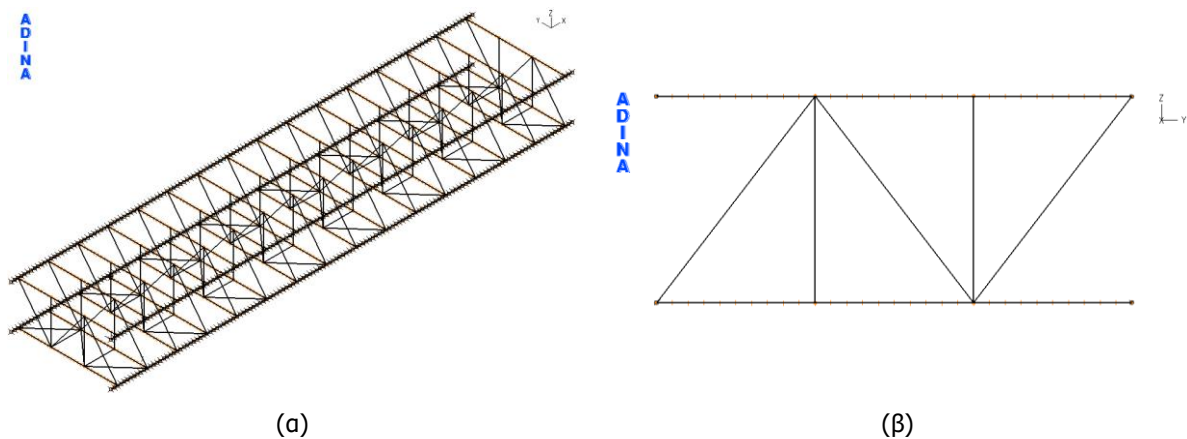


Σχήμα 2-5: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων – αντηρίδες άνω στάθμης χωρίς οριζόντια δικτύωση

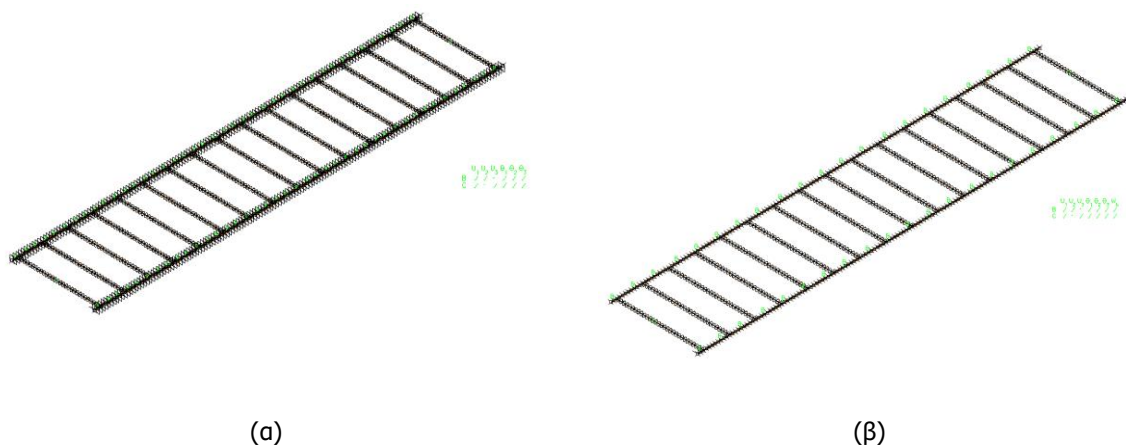




Σχήμα 2-6: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων – αντηρίδες κάτω στάθμης με οριζόντια δικτύωση



Σχήμα 2-7: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων (α) τοποθετημένες οι αντηρίδες και των 2 σταθμών (β) κατακόρυφη δικτύωση μεταξύ των 2 σταθμών



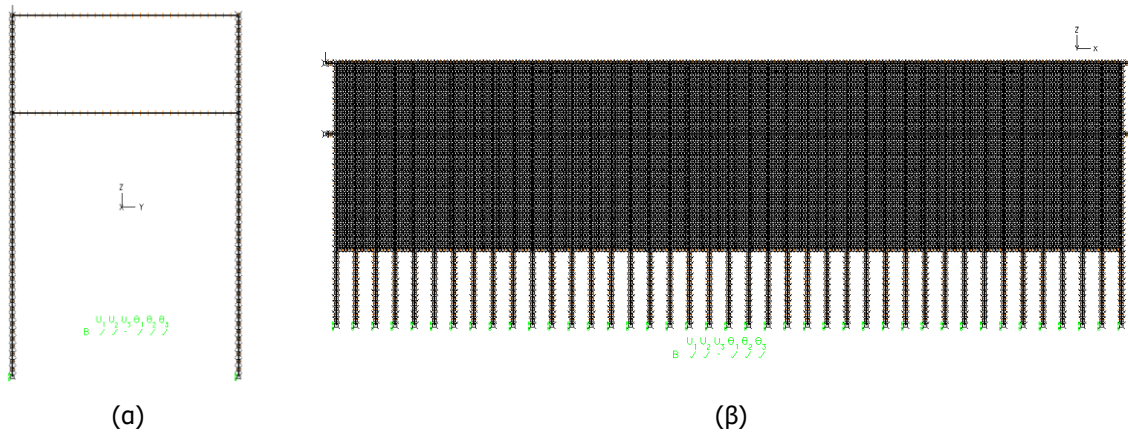
Σχήμα 2-8: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας (α) άνω στάθμης (β) κάτω στάθμης

### 2.3.1.2 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

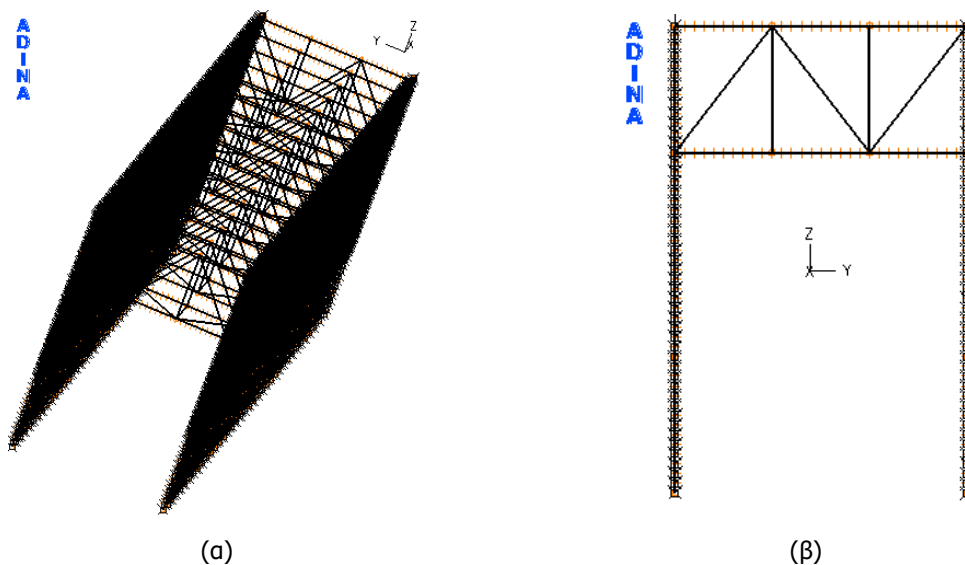
Τα μοντέλα της 2<sup>ης</sup> ομάδας προσομοιωμάτων περιλαμβάνουν, επιπλέον των ανωτέρω αναφερθέντων, τους πασσάλους με ραβδωτά στοιχεία και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με επιφανειακά στοιχεία. Οι πάσσαλοι θεωρούνται κατακόρυφα εδραζόμενοι στο κατώτερό τους σημείο. Φέρουν πλευρικά ελατήρια στο μήκος τους που βρίσκεται κάτω από την εκάστοτε στάθμη εκσκαφής, πάνω της οποίας έχει τοποθετηθεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Πάνω από αυτή τη στάθμη εκσκαφής η αλληλεπίδραση με το έδαφος εφαρμόζεται στα επιφανειακά στοιχεία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η εκκεντρότητα μεταξύ του άξονα των πασσάλων με  $D=1.00\text{m}$ , του άξονα της επιφάνειας του σκυροδέματος πάχους  $15\text{cm}$  και του άξονα του δομικού μέλους της τραβέρσας διατομής  $2\text{HEB}450$  δεν αναπαρίσταται στο εν λόγω μοντέλο, διότι κρίνεται ότι η απλουστευτική αυτή παραδοχή δεν επηρεάζει την συνολική συμπεριφορά του μοντέλου.

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-9, Σχήμα 2-10) παρουσιάζονται διάφορες όψεις των προσομοιωμάτων της 2<sup>ης</sup> ομάδας του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας και του συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων.



Σχήμα 2-9: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένων αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης (α) Όψη YZ (β) Όψη XZ



Σχήμα 2-10: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση (β) Όψη YZ

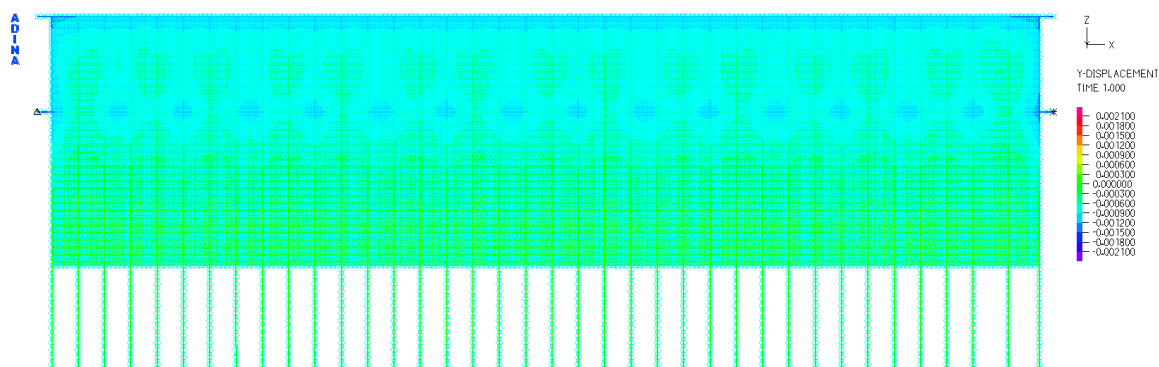
### 2.3.1.3 Υπολογισμός εμβαδού επιρροής

Ιδιαίτερος σημαντικό είναι να εντοπιστεί ποιο είναι το εμβαδόν επιρροής της εκάστοτε αντηρίδας στην γύρω περιοχή λόγω του ομοιόμορφου αξονικού φορτίου. Δηλαδή είναι ενδιαφέρον να εντοπιστεί το εύρος στο οποίο εκτείνεται η επιρροή της αντηρίδας εξαιτίας της διαστολής της λόγω του επιβαλλόμενου ομοιόμορφου θερμοκρασιακού φορτίου σε αυτήν.

Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει αντιληπτό αποκλειστικά μέσω των μοντέλων της 2<sup>ης</sup> ομάδας προσομοιωμάτων διότι τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία είναι αυτά που θα δείξουν την επιρροή αυτή. Δηλαδή η

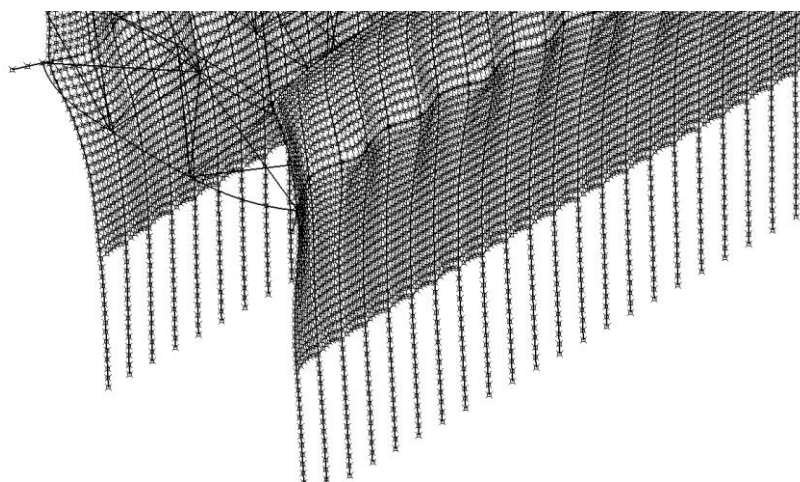
μετατόπισή τους από την αρχική τους θέση θα δείξει το χωρίο που επηρεάζεται λόγω της διαστολής της αντηρίδας.

Στο Σχήμα 2-11 απεικονίζονται με χρωματική κλίμακα οι μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή εκατέρωθεν της τυχούσας αντηρίδας. Παρατηρώντας το Σχήμα 2-11 γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο κοντά στην αντηρίδα τόσο πιο μεγάλες οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό διότι η εξάπλωση της επιρροής ξεκινά από την γειτονική περιοχή της αντηρίδας και εξαπλώνεται έως ότου να σβήσει.



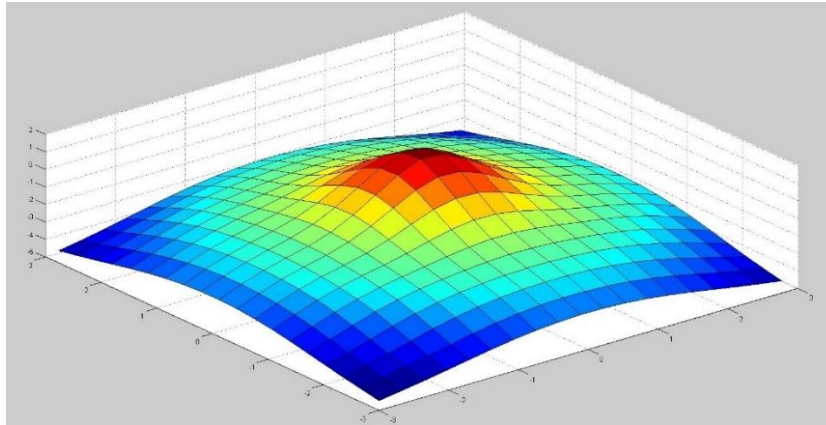
Σχήμα 2-11: Μετακινήσεις των διαφόρων σημείων της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά την διεύθυνση Y λόγω επιμήκυνσης της τυχούσας αντηρίδας

Στο Σχήμα 2-12 παρουσιάζεται η χωρική παραμορφωσιακή εικόνα ενός τμήματος της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λόγω της διαστολής των αντηρίδων και των 2 σταθμών.



Σχήμα 2-12: Χωρική παραμορφωσιακή εικόνα ενός τμήματος της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λόγω της διαστολής των αντηρίδων και των 2 σταθμών

Στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζεται το διάγραμμα της θλιπτικής δύναμης των εδαφικών ελατηρίων στην περιοχή σύνδεσης της αντηρίδας με την τραβέρσα και κατ' επέκταση με την επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Σχήμα 2-13: Διάγραμμα δυνάμεων των θλιπτικών εδαφικών ελατηρίων στην περιοχή σύνδεσης της αντηρίδας με την τραβέρσα και κατ' επέκταση με την επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Επιπροσθέτως κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί αν είναι εφικτό, στην ανωτέρω περίπτωση, αλλά και σε παρόμοιες, να υπολογίζεται το εμβαδόν επιρροής με απλοποιημένες προσεγγίσεις και όχι μέσω τρισδιάστατων χωρικών προσομοιωμάτων τα οποία αποτελούνται από πλήθος πεπερασμένων στοιχείων.

Μια απλοποιημένη προσέγγιση που αντικατοπτρίζει την ανωτέρω κατάσταση, είναι ένα μοντέλο το οποίο θα αποτελείται από το μέλος της αντηρίδας, το οποίο θα φορτίζεται με το ομοιόμορφο θερμοκρασιακό φορτίο και στα άκρα του θα φέρει αξονικά ελατήρια τα οποία θα εμποδίζουν την διαστολή του. Τα ελατήρια αυτά αντικατοπτρίζουν την ελατηριακή συμπεριφορά του εδάφους, δηλαδή παρουσιάζουν αντίσταση μόνο όταν το έδαφος θλίβεται και όχι όταν εφελκύεται. Η ισορροπία του συστήματος επιτυγχάνεται όταν η αξονική δύναμη της αντηρίδας αντισταθμίζεται από την δύναμη του ελατηρίου στο αντίστοιχο άκρο. Δηλαδή όταν είναι:

$$N = K \cdot \Delta I, \text{ όπου:}$$

- $N$  = αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη αντηρίδας
- $K$  = γραμμική εδαφική δυσκαμψία
- $\Delta I$  = μετακίνηση του ακριανού κόμβου της αντηρίδας

Επομένως, εξάγοντας από το προσομοίωμα την αναπτυσσόμενη αξονική της τυχούσας αντηρίδας και την μετακίνηση του άκρου της αντηρίδας λόγω επιβολής ομοιόμορφου θερμοκρασιακού φορτίου, προσδιορίζεται το  $K$  και κατ' επέκταση το εμβαδόν επιρροής  $A$ , διότι:

$$K = K_s \cdot A, \text{ όπου:}$$

- $K_s$  = δείκτης εδάφους ( $=40000 \text{ kN/m}^3$ )
- $A$  = εμβαδόν επιρροής ( $\text{m}^2$ )

Επιλέγεται να εξεταστεί η τυχούσα αντηρίδα κάτω στάθμης διότι παρατηρώντας το Σχήμα 2-9, για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης γίνεται καλύτερα αντιληπτό το εμβαδόν επιρροής. Άρα εξετάζοντας την τυχούσα αντηρίδα κάτω στάθμης εξάγεται  $N=775.6 \text{ kN}$  και  $\Delta I=1.024 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Επομένως αντικαθιστώντας στις ανωτέρω εξισώσεις προκύπτει:

$$775.6 \text{ kN} = 40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot A \cdot 1.024 \cdot 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow A = 18.94 \text{ m}^2$$

Πρέπει στο σημείο αυτό να εξαχθεί και το εμβαδόν επιρροής από το προσομοίωμα με τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για το ίδιο μέλος της αντηρίδας με ανωτέρω και να προκύψει η απόκλιση των δυο

αυτών προσεγγίσεων. Η σωστή προσέγγιση είναι να εξεταστεί σε ποια θέση η δύναμη του ελατηρίου είναι μηδενική, επομένως μέχρι την θέση αυτή εξαπλώνεται το εμβαδόν επιρροής. Όμως η σχέση δύναμης ελατηρίου – μετατόπισης είναι γραμμική ( $F=K \cdot x$ ), επομένως είναι ισοδύναμο να εξεταστεί μέχρι ποια θέση αναπτύσσονται μετακινήσεις. Από το Σχήμα 2-9 και με τη βοήθεια της χρωματικής κλίμακας, ώστε να γίνεται αντιληπτό το χωρίο στο οποίο αναπτύσσονται μετακινήσεις εκατέρωθεν της υπό μελέτης αντηρίδας, εκτιμάται γραφικά το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που ανήκουν στο χωρίο επιρροής.

Προκύπτει  $M=120$ , όπου  $M$ =πλήθος πεπερασμένων στοιχείων. Το εμβαδόν του εκάστοτε πεπερασμένου στοιχείου καθορίζεται κάθε φορά από την διακριτοποίηση που έχει γίνει στο συνολικό μοντέλο. Στο παρών μοντέλο η διακριτοποίηση που έχει πραγματοποιηθεί κατά την διαμήκη διεύθυνση είναι ανά  $0.3m$  και η διακριτοποίηση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ανά  $0.5m$ . Άρα το εμβαδόν του πεπερασμένου στοιχείου είναι ίσο με:  $E=0.3m \cdot 0.5m=0.15m^2$

Επομένως προκύπτει:

$$A=M \cdot E=120 \cdot 0.15m^2 \Rightarrow A=18m^2$$

Ποσοστό απόκλισης:  $\frac{18.94m^2-18m^2}{18.94m^2}=4.9\% < 5\%$  (αποδεκτό ποσοστό απόκλισης)

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό ότι με τον απλοποιημένο τρόπο η προσέγγιση του ρεαλιστικού μεγέθους του εμβαδού επιρροής είναι πολύ ικανοποιητική. Άρα, είναι επιτρεπτό σε τέτοιες περιπτώσεις, αντί να μορφώνονται σύνθετα μοντέλα με μεγάλο βαθμό διακριτοποίησης και πλήθους πεπερασμένων στοιχείων, να εφαρμόζονται απλοποιητικές διαδικασίες όπως η ανωτέρω.

#### 2.3.1.4 Φάσεις κατασκευής

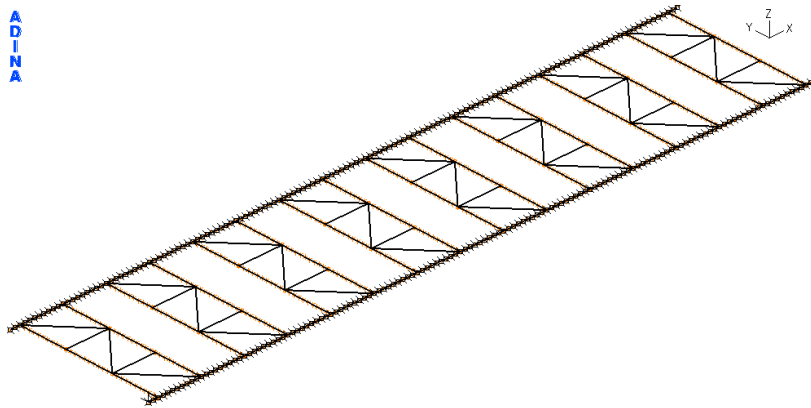
Από τη στιγμή που οι αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης μεμονωμένων αντηρίδων δεν συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας, τα συστήματα αντιστήριξης των δυο σταθμών λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επομένως μελετάται η αναπτυσσόμενη εντατική καταπόνηση σε κάθε στάθμη ξεχωριστά και δεν χρειάζεται να προσομοιωθούν οι φάσεις κατασκευής.

Από την άλλη, για το σύστημα προσωρινής αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων, οι αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφα χιαστί, επομένως είναι αναγκαίο να προσομοιωθούν οι φάσεις κατασκευής, καθώς στην 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής οι άνω αντηρίδες δεν θα έχουν κατακόρυφη εξασφάλιση, ενώ στην 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής, που είναι και η τελική, θα έχουν κατακόρυφη εξασφάλιση. Δεν είναι φανερό εκ των προτέρων ποια από τις δυο εντατικές καταστάσεις είναι δυσμενέστερη για τις άνω αντηρίδες. Επομένως είναι επιτακτική η μελέτη και των 2 φάσεων κατασκευής.

Για το λόγο αυτό μορφώνεται ακόμα ένα δεύτερο μοντέλο για να προσομοιάσει την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής κατά την οποία έχουν τοποθετηθεί μόνον οι άνω αντηρίδες με τα μεταξύ τους οριζόντια διαγώνια στοιχεία, ενώ δεν έχουν τοποθετηθεί ακόμα τα κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία, επομένως οι αντηρίδες της άνω στάθμης δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, όπως εξηγήθηκε στην υποπαράγραφο 2.1 προτιμάται να χρησιμοποιηθούν διατομές διπλού ταυ για τις αντηρίδες της άνω στάθμης.

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-14, Σχήμα 2-15, Σχήμα 2-16) παρουσιάζονται τα προσομοιώματα της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> ομάδας για την περίπτωση του συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων.

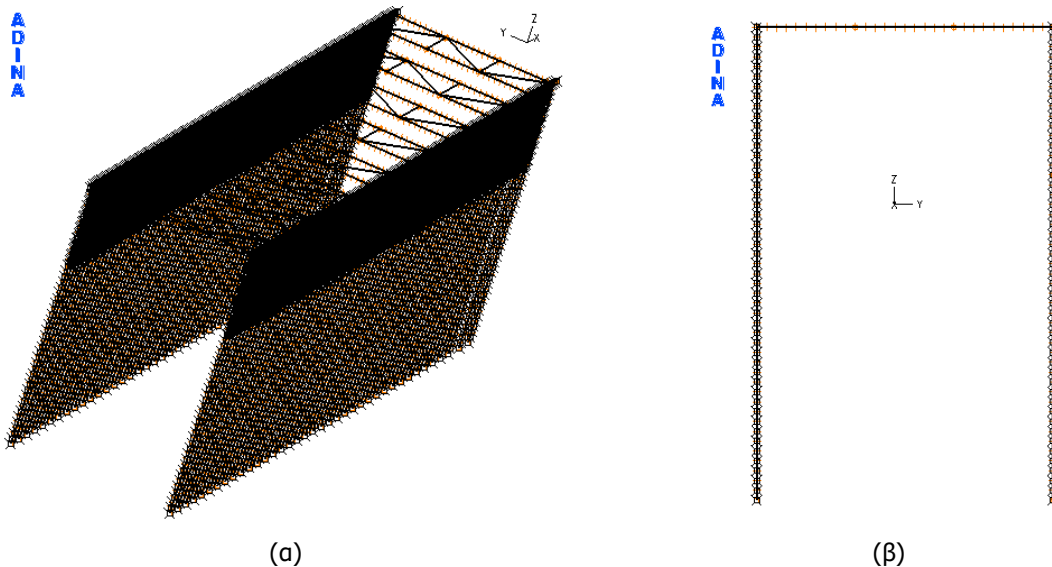




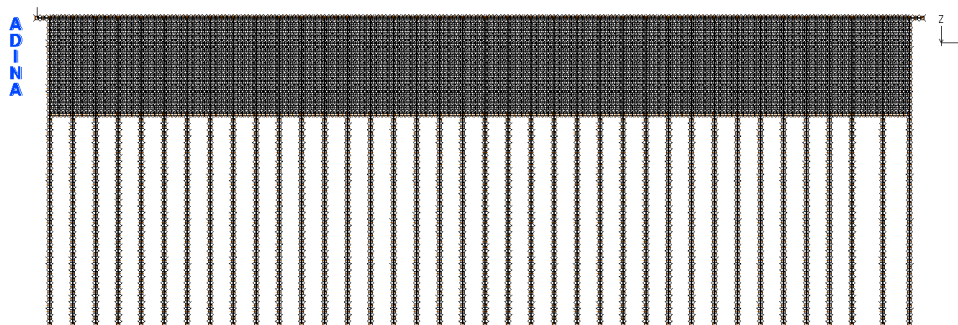
Σχήμα 2-14: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων – τοποθετημένες οι αντηρίδες της άνω στάθμης

Στην περίπτωση της 2<sup>ης</sup> ομάδας προσομοιωμάτων μελετάται το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή η δυσμενέστερη εντατική κατάσταση για τις αντηρίδες της άνω στάθμης, η οποία πραγματοποιείται για το μέγιστο βάθος εκσκαφής στο οποίο οι αντηρίδες της άνω στάθμης είναι χωρίς κατακόρυφη εξασφάλιση. Το μέγιστο αυτό βάθος ισούται με 7.5m.

Παρατηρώντας τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-15, Σχήμα 2-16) γίνεται αντιληπτό ότι η επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (gunite) φτάνει μέχρι τη στάθμη  $z=-7.5\text{m}$ , όπου το  $z$  μετράει από την επιφάνεια της εκσκαφής, δηλαδή τη στάθμη στην οποία είναι πλέον εφικτό κατασκευαστικά να τοποθετηθούν οι αντηρίδες της κάτω στάθμης με τα οριζόντια και κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία. Από την στάθμη  $z=-7.5\text{m}$  έως το τέλος των πασσάλων, οι πάσσαλοι είναι εμπηγνυόμενοι μέσα στο έδαφος.



Σχήμα 2-15: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση (β) Όψη YZ



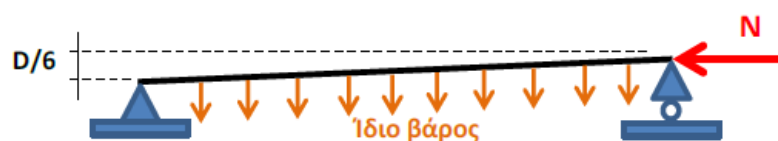
Σχήμα 2-16: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων – Όψη ΧΖ

### 2.3.1.5 Σύνοψη

Από την περιβάλλουσα των αποτελεσμάτων των γραμμικών στατικών αναλύσεων αυτών των προσομοιωμάτων λαμβάνονται εντατικά μεγέθη με βάση τα οποία γίνεται διαστασιολόγηση των διαγωνίων μελών και των τραβερσών, σύμφωνα με τις διατάξεις του EC3. Για τα δομικά αυτά μέλη δεν κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η λειτουργία και οι απαιτήσεις ελέγχου τους είναι οι συνήθεις.

Επίσης, με βάση τα ανωτέρω δυσμενή εντατικά μεγέθη γίνεται μια προδιαστασιολόγηση των αντηρίδων και των δυο σταθμών και λαμβάνονται αξονικές δυνάμεις για τις αντηρίδες, οι οποίες εν συνεχεία εισάγονται ως αξονικά φορτία σχεδιασμού στις μη γραμμικές αναλύσεις, με βάση τις οποίες γίνεται η διαστασιολόγηση των αντηρίδων. Επισημαίνεται ότι για τις αντηρίδες δεν κρίνεται επαρκής η διαστασιολόγηση με γραμμικές αναλύσεις και εφαρμογή των διατάξεων του EC3, διότι δεν θα ήταν έτσι δυνατόν να ληφθεί αξιόπιστα υπόψη η κανονιστική απαίτηση θεώρησης αρχικών ατελειών λόγω υψομετρικής διαφοράς των σημείων στήριξης ίση με  $A/6$  (όπου  $A=H$  αν η διατομή είναι διπλού ταυ ή  $A=D$  αν η διατομή είναι κοίλη κυκλική).

Στο Σχήμα 2-17 παρουσιάζεται η υψομετρική διαφορά των στηρίξεων της αντηρίδας, κάτι το οποίο αποτελεί στοιχείο γεωμετρικής μη γραμμικότητας και δεν λαμβάνεται υπόψη στις διατάξεις του EC3. Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς της αντηρίδας μέσω μη γραμμικών αναλύσεων.



Σχήμα 2-17: Υψομετρική διαφορά στηρίξεων αντηρίδας ίση με  $D/6$  – Στοιχείο γεωμετρικής μη γραμμικότητας

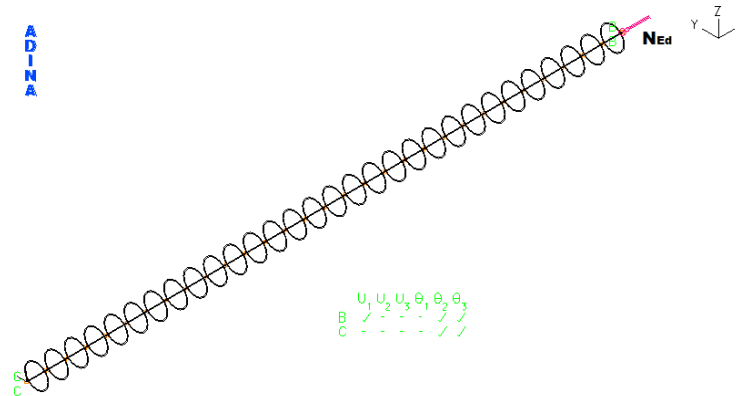
### 2.3.2 Μη γραμμικές αναλύσεις

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, για τη διαστασιολόγηση των αντηρίδων πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GNIA) καθώς και μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού (με ελαστικό – τελείως πλαστικό νόμο υλικού) με αρχικές ατέλειες (GMNIA) στο εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA ως εξής:

Στο σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας απομονώνεται το μέλος της αντηρίδας και σε αυτό θα πραγματοποιηθούν οι ανωτέρω μη γραμμικές αναλύσεις, επιβάλλοντας την μία φορά το αξονικό φορτίο σχεδιασμού των αντηρίδων άνω στάθμης και την άλλη το αξονικό φορτίο σχεδιασμού των αντηρίδων της κάτω στάθμης. Στο εν λόγω σύστημα αντιστήριξης, όπως εξηγήθηκε στην

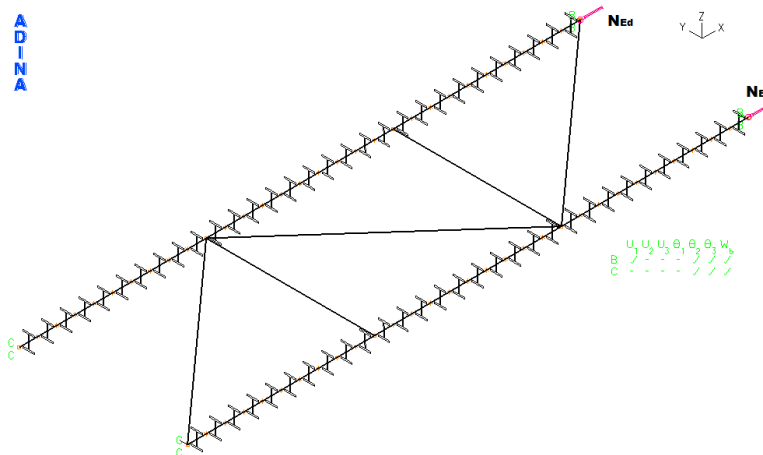
υποπαράγραφο 2.3.1.4, δεν χρειάζεται να προσομοιωθούν οι φάσεις κατασκευής, αφού είτε στην 1<sup>η</sup> είτε στην 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής το δομικό σύστημα αντιστήριξης που μελετάται είναι το ίδιο.

Στο Σχήμα 2-18 παρουσιάζεται το μη γραμμικό προσομοίωμα του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας.



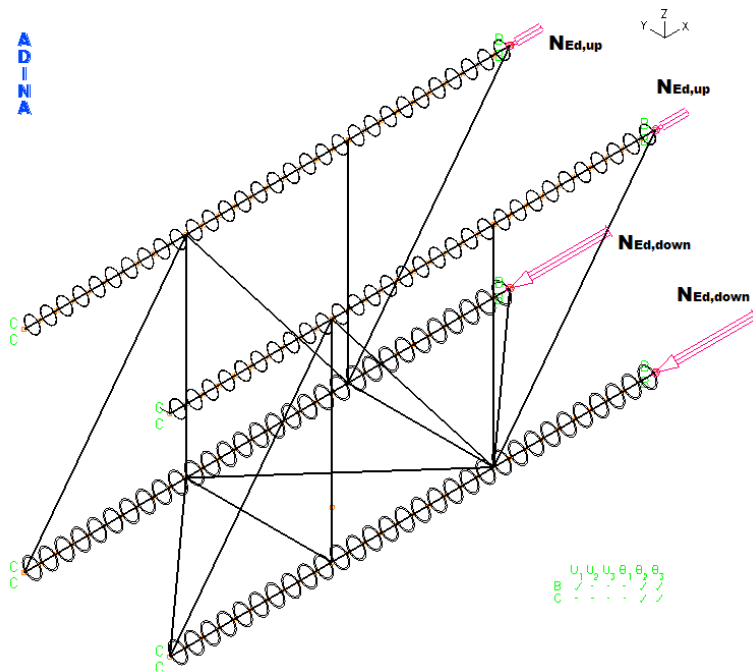
Σχήμα 2-18: Μη γραμμικό προσομοίωμα συστήματος προσωρινής αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας

Στο σύστημα αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων απομονώνεται ένα τμήμα της συνολικής αντιστήριξης. Πιο συγκεκριμένα για την 1<sup>η</sup> φάση της κατασκευής (Σχήμα 2-19) απομονώνονται οι δύο άνω αντηρίδες με τα μεταξύ τους οριζόντια διαγώνια στοιχεία και για την 2<sup>η</sup> φάση της κατασκευής (Σχήμα 2-20) απομονώνονται οι δύο άνω και οι δύο κάτω αντηρίδες με τα οριζόντια και κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία τους. Και τούτο γιατί, λόγω της ύπαρξης των διαγώνιων στοιχείων, οι αντηρίδες αλληλοεπηρεάζονται μεταξύ τους, επομένως είναι εσφαλμένη προσέγγιση το να μελετηθεί μη γραμμικά μία αντηρίδα αποκομμένη από το υπόλοιπο σύστημα αντηρίδων με το οποίο συνδέεται είτε με οριζόντια διαγώνια στοιχεία, είτε με κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία, είτε και με τα δύο.



Σχήμα 2-19: Μη γραμμικό προσομοίωμα συστήματος προσωρινής αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων – 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής





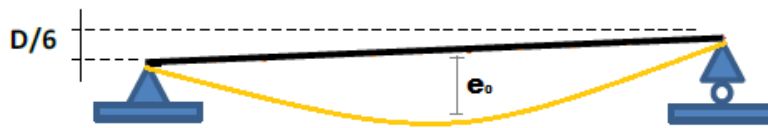
Σχήμα 2-20: Μη γραμμικό προσομοίωμα συστήματος προσωρινής αντιστήριξης με χιαστί συνδέσμους μεταξύ των αντηρίδων – 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής

Στα ανωτέρω μη γραμμικά προσομοιώματα η αντηρίδα αποτελείται από απλές αρθρωτές στηρίξεις στα άκρα της και από αρχικές ατέλειες λόγω υψομετρικής διαφοράς των σημείων στήριξης καθώς και λόγω αρχικής καμπυλότητας. Η υψομετρική διαφορά των σημείων στήριξης, ίση με  $A/6$  (όπου  $A=H$  αν η διατομή είναι διπλού ταυ ή  $A=D$  αν η διατομή είναι κοίλη κυκλική) σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου, εισάγεται στο προσομοίωμα ως αρχική κατασκευαστική ατέλεια. Εισάγεται επίσης γεωμετρική ατέλεια λόγω καμπυλότητας του φορέα με σχήμα αυτό των ιδιομορφών λυγισμού στο κατακόρυφο και στο οριζόντιο επίπεδο το οποίο προκύπτει από Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA και μέγεθος συμβατό με τις καμπύλες λυγισμού του EC3 για τον χρησιμοποιούμενο τύπο διατομής (Πίνακας 2-5), σύμφωνα με τον πίνακα 5.1 του EN1993-Μέρος 1-1.

Πίνακας 2-5: Μέγεθος αρχικής ατέλειας μέλους

Buckling curve according to Table 6.2, EC3	elastic analysis	plastic analysis
	$e_0/L$	$e_0/L$
$a_0$	1/350	1/300
$a$	1/300	1/250
$b$	1/250	1/200
$c$	1/200	1/150
$d$	1/150	1/100

Το μέγεθος της ατέλειας, όπως γίνεται αντιληπτό από τον Πίνακα 2-5, είναι διαφορετικό για ελαστικές και πλαστικές αναλύσεις. Οι διατομές των δομικών μελών είναι κατηγορίας 1, επομένως επιτρέπεται πλαστικός έλεγχος – διαστασιολόγηση. Άρα στις αναλύσεις θα χρησιμοποιηθεί το πλαστικό μέγεθος αρχικής ατέλειας. Επίσης η φορά της ατέλειας στο κατακόρυφο επίπεδο λαμβάνεται προς τα κάτω (Σχήμα 2-21), ώστε να προστίθεται στα βέλη λόγω ίδιου βάρους. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται το δυσμενέστερο σενάριο που μπορεί να συμβεί για το μέλος της αντηρίδας.



Σχήμα 2-21: Φορά ατέλειας μέλους στο κατακόρυφο επίπεδο

Επιβάλλονται τα ίδια βάρη, προσαυξημένα με βάση τον συντελεστή σχεδιασμού των μονίμων φορτίων (1.35), και υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες λόγω αυτών παραμορφώσεις και εντάσεις. Με σημείο εκκίνησης αυτήν την κατάσταση παραμορφώσεων και εντάσεων επιβάλλεται σταδιακά το συνολικό αξονικό θλιπτικό φορτίο σχεδιασμού λόγω ωθήσεων γαιών και θερμοκρασιακής μεταβολής, όπως προέκυψε από τις προ ηγηθείσες γραμμικές αναλύσεις του χωρικού προσομοιώματος στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί, ότι το στατικό σύστημα θα ήταν πιο ακριβές αν και στα δυο άκρα της αντηρίδας υπήρχε κύλιση, και όχι άρθρωση – κύλιση και το αξονικό θλιπτικό φορτίο να επιβαλλόταν και στα 2 άκρα, και όχι μόνο στο ένα όπως παρουσιάζεται ανωτέρω. Στην περίπτωση αυτή θα απαιτούνταν επιπλέον και η δέσμευση σε ένα κόμβο της αντηρίδας σε ότι αφορά την διαμήκη κίνησή της, έτσι ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα σχηματισμού του μητρώου στιβαρότητας και κατ' επέκταση να μπορεί να ολοκληρωθεί η μη γραμμική ανάλυση. Πραγματοποιώντας τις ίδιες μη γραμμικές αναλύσεις και με αυτό το πιο ακριβές προσομοίωμα, προέκυψαν ακριβώς οι ίδιοι δρόμοι ισορροπίας για διάφορες υπομετρικές διαφορές των στηρίξεων της αντηρίδας. Επομένως, δεν τίθεται κανένα θέμα αμφισβήτησης της αξιοπιστίας του αρχικού μη γραμμικού προσομοιώματος.

Οι έλεγχοι επάρκειας των αντηρίδων πραγματοποιούνται με δύο εναλλακτικούς τρόπους, ως εξής:

#### I. Μη γραμμική ανάλυση – Ελαστικό υλικό (GNIA) – Πλαστικός έλεγχος διατομής

Επιβάλλεται αξονικό θλιπτικό φορτίο έως το φορτίο σχεδιασμού του φορέα και πραγματοποιείται στο υπολογιστικό φύλλο EXCEL έλεγχος διατομής με τις μέγιστες τιμές  $N_{Ed}$  και  $M_{Ed}$  που προκύπτουν. Επισημαίνεται ότι, δεδομένου ότι όλες οι διατομές των αντηρίδων επιλέγεται να είναι κατηγορίας 1, είναι δόκιμη η εκτέλεση πλαστικού ελέγχου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για κάμψη και αξονική δύναμη ανάλογα με τον τύπο της διατομής, σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1993-1-1 και τη σχετική βιβλιογραφία. Η ορθή ένταση που αναπτύσσεται ελέγχεται ως ένα ζεύγος συντεταγμένων ( $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ ,  $M_{Ed}/M_{pl,Rd}$ ), το οποίο πρέπει να βρίσκεται στην ασφαλή περιοχή του διαγράμματος αλληλεπίδρασης.

#### II. Μη γραμμική ανάλυση – Ελαστοπλαστικό υλικό (GMNIA)

Επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο έως την κατάρρευση του φορέα και ελέγχεται ο λόγος του θλιπτικού φορτίου σχεδιασμού προς το θλιπτικό φορτίο κατάρρευσης. Το υλικό προσομοιώνεται ως ελαστικό – απολύτως πλαστικό, αμελώντας την κράτυνση και θεωρώντας συντηρητικά το όριο θραύσης ίσο προς το όριο διαρροής, σύμφωνα με τις σχετικές συστάσεις του EN1993-1.

Η τελική επιλογή διατομών γίνεται υπέρ της ασφαλείας από τα δυσμενέστερα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων (I) και (II).

Συμπερασματικά, υλοποιώντας τις ανωτέρω γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις, επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν, στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, διατομές χαλύβδινων δομικών μελών, οι οποίες να είναι οριακές, δηλαδή να ικανοποιούν οριακά τις απαιτήσεις των μελών αυτών έναντι των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Και τούτο γιατί μόνο τότε είναι δίκαιη η σύγκριση μεταξύ των διατομών ίδιων χαλύβδινων δομικών μελών που ανήκουν όμως σε διαφορετικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης. Στην περίπτωση που δεν υπήρχε η ανάγκη σύγκρισης μεταξύ των

διαφορετικών συστημάτων προσωρινής αντιστήριξης για λόγους εκτίμησης του αποδοτικότερου, από διάφορες απόψεις, συστήματος και γινόταν μια απλή διαστασιολόγηση, είναι φανερό ότι θα χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερες διατομές, ώστε να υπάρξει μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας.



## **3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ**

### **3.1 Γενικά**

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η μελέτη του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένων αντηρίδων μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση γίνεται μια αρχική εκτίμηση (προδιαστασιολόγηση) της διατομής του μέλους της αντηρίδας μέσω γραμμικών αναλύσεων. Σε δεύτερη φάση ακολουθούν μη γραμμικές αναλύσεις με στόχο την οριστική εκτίμηση της διατομής του μέλους της αντηρίδας. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται παραμετρικές διερευνήσεις, για τις αντηρίδες και των δύο σταθμών, ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των δύο στηρίξεων της αντηρίδας και ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας. Τέλος, υλοποιείται η διαστασιολόγηση του μέλους της τραβέρσας μέσω γραμμικών αναλύσεων.

### **3.2 Διαστασιολόγηση Αντηρίδων**

Το σύστημα αντιστήριξης μορφώνεται με μεταλλικές αντηρίδες σε 2 στάθμες (άνω και κάτω στάθμη) οι οποίες δεν συνδέονται ούτε με κατακόρυφη ούτε με οριζόντια δικτύωση μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται κοίλες κυκλικές διατομές (CHS) θερμής έλασης, ώστε το μέλος της αντηρίδας να παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά ως προς την τυχούσα διεύθυνση.

Στο μέλος της αντηρίδας εμφανίζεται γεωμετρική μη γραμμικότητα αφού οι στηρίξεις της παρουσιάζουν υψομετρική διαφορά  $D/6$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος της κοίλης κυκλικής διατομής της αντηρίδας. Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η γραμμική ανάλυση δεν επαρκεί από μόνη της για την διαστασιολόγηση του μέλους και είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί και μη γραμμική ανάλυση.

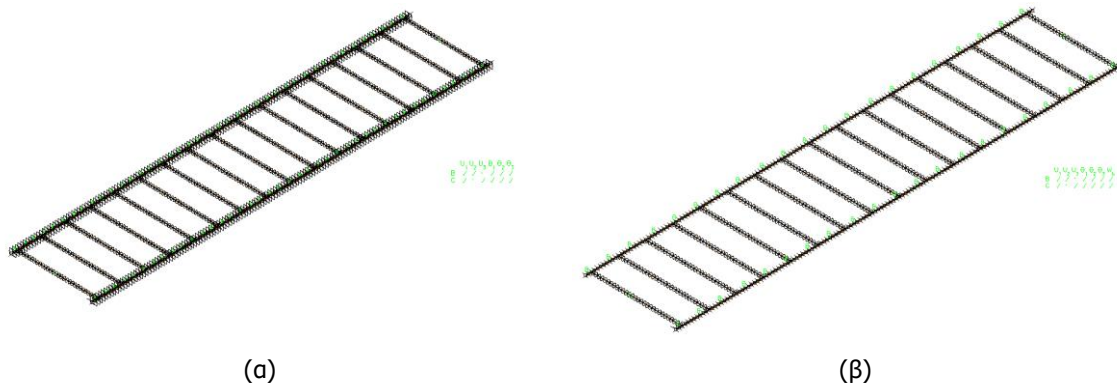
#### **3.2.1 Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος**

Όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2 για την ακολουθούμενη μεθοδολογία, προκειμένου να γίνει μια αρχική εκτίμηση της διατομής της αντηρίδας καθώς και να υπολογιστεί η θλιπτική ένταση των αντηρίδων που θα χρησιμοποιηθεί στο μη γραμμικό προσομοίωμα, μορφώνονται χωρικά προσομοιώματα στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

### 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Οι αντηρίδες της άνω στάθμης εδράζονται στον κεφαλόδεσμο, ενώ οι αντηρίδες της κάτω στάθμης στηρίζονται σε τραβέρσες, οι οποίες εδράζονται ακλόνητα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση σε βραχείς προβόλους που εξέχουν ανά κάθε τρίτο πάσσαλο. Η αλληλεπίδραση με το έδαφος προσομοιώνεται κατά την διεύθυνση των αντηρίδων με οριζόντια μη γραμμικά θλιπτικά ελατήρια και κατά την διεύθυνση των κεφαλόδεσμων και των τραβερσών με οριζόντια γραμμικά ελατήρια.

Στο Σχήμα 3-1 φαίνονται τα προσομοιώματα της άνω και της κάτω στάθμης αντιστοίχως.



Σχήμα 3-1: Σύστημα αντιστήριξης (α) άνω στάθμης (β) κάτω στάθμης

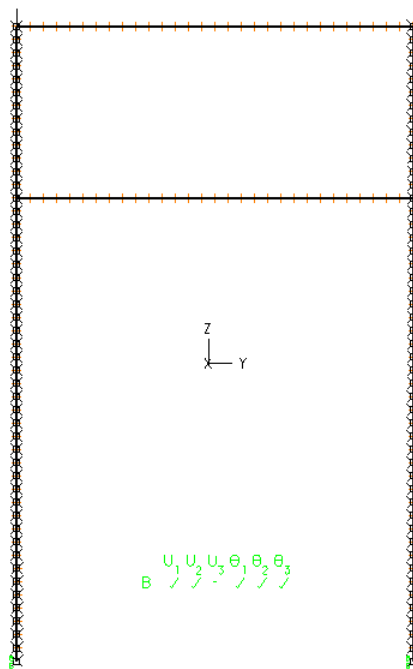
Στο παρόν σύστημα αντιστήριξης η ακολουθούμενη φάση κατασκευής είναι η εξής: 1) Τοποθέτηση των άνω αντηρίδων, 2) εκσκαφή σε βάθος 7.5m, όπου 6.5m είναι η απόσταση των αντηρίδων των δυο σταθμών και 1.0m είναι η επιπλέον εκσκαφή που απαιτείται για κατασκευαστικούς λόγους ώστε να τοποθετηθούν οι αντηρίδες της κάτω στάθμης και 3) η τοποθέτηση των αντηρίδων της κάτω στάθμης.

Από τη στιγμή που οι αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης δεν συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας, τα συστήματα αντιστήριξης των δυο σταθμών λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους, επομένως μελετάται η αναπτυσσόμενη εντατική καταπόνηση σε κάθε στάθμη ξεχωριστά και δεν χρειάζεται να προσομοιωθούν οι φάσεις κατασκευής.

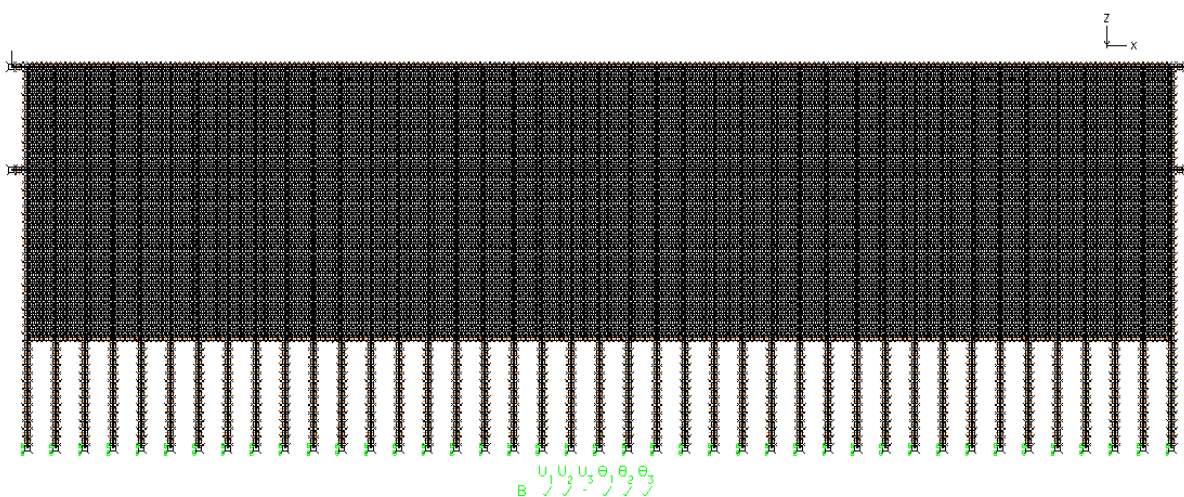
### 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Στα προσομοιώματα της ομάδας αυτής περιλαμβάνονται επιπλέον οι πάσσαλοι και τα επιφανειακά στοιχεία που αντιστοιχούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (gunite). Τα ελατήρια επιβάλλονται στα επιφανειακά στοιχεία και κάτω από τη στάθμη που αυτά παύουν να υπάρχουν στους πασσάλους. Διαμήκη ελατήρια με δυσκαμψία ίση με το 20% της δυσκαμψίας των εγκαρσίων τοποθετούνται για την προσομοίωση της τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στο έδαφος και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Στα κάτωθι σχήματα (Σχήμα 3-2, Σχήμα 3-3) παρουσιάζονται διάφορες όψεις του χωρικού προσομοιώματος, από τις οποίες γίνεται αντιληπτό η θέση τοποθέτησης του εκάστοτε δομικού στοιχείου του συστήματος αντιστήριξης της εκσκαφής (κεφαλόδεσμοι, τραβέρσες, αντηρίδες, πάσσαλοι, επιφάνεια εκτοξευόμενου σκυροδέματος).



Σχήμα 3-2: Σύστημα αντιστήριξης άνω και κάτω στάθμης – Όψη YZ



Σχήμα 3-3: Σύστημα αντιστήριξης άνω και κάτω στάθμης – Όψη XZ

3.2.1.1 Διατομές δομικών μελών

Οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική προσέγγιση του προβλήματος της αντιστήριξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Διατομές δομικών μελών

Μέλη από χάλυβα	Μέλη από σκυρόδεμα
Αντηρίδες άνω στάθμης: CHS 508/20 Αντηρίδες κάτω στάθμης: CHS 711/50 Τραβέρσες: 2HEB450	Κεφαλόδεσμοι(BxH): 1.20m x 1.00m Πάσσαλοι: D=1.00m

### 3.2.1.2 Ελατήρια

#### 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Τα εδαφικά ελατήρια είναι μη γραμμικά θλιπτικά, δηλαδή προσομοιώνουν την συμπεριφορά του εδάφους κατά την οποία το έδαφος προβάλλει αντίσταση όταν θλίβεται ενώ αντίθετα προβάλλει μηδενική αντίσταση όταν εφελκύεται. Στην περίπτωση αυτού του προσομοιώματος τα επιβαλλόμενα φορτία είναι οι ωθήσεις γαιών, επομένως το έδαφος δεν θλίβεται, άρα ο ρόλος των εδαφικών ελατηρίων είναι ανύπαρκτος. Επομένως δεν είναι αναγκαίο να τοποθετηθούν εδαφικά ελατήρια στους κεφαλοδέσμους και στις τραβέρσες. Αυτό σε ότι αφορά την εγκάρσια μετακίνηση των κεφαλοδέσμων και των τραβερσών. Για την διαμήκη μετακίνηση των δομικών αυτών μελών θα τοποθετηθούν ελατήρια με δυσκαμψία ίση με το 20% της εγκάρσιας δυσκαμψίας. Επομένως για την άνω στάθμη, που βρίσκονται οι κεφαλοδέσμοι, και για την κάτω στάθμη, που είναι οι τραβέρσες, θα εφαρμοστούν ελατήρια με δυσκαμψία στην διαμήκη διεύθυνση ίση με 4000kN/m και με 1200kN/m αντιστοίχως.

#### 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Στα επιφανειακά στοιχεία εφαρμόζονται μη γραμμικά θλιπτικά ελατήρια με δείκτη εδάφους 40000kN/m<sup>3</sup> επί το δυσμενέστερο. Στο κατώτερο τμήμα των πασσάλων δεν υπάρχουν επιφανειακά στοιχεία, αφού το τμήμα αυτό των πασσάλων είναι εμπηγνυόμενο μέσα στο έδαφος. Επομένως, τα εδαφικά ελατήρια εφαρμόζονται αποκλειστικά στους πασσάλους που έχουν διάμετρο D=1.00m και έχουν τιμή δυσκαμψίας ίση με 40000kN/m<sup>3</sup>·1.00m = 40000kN/m<sup>2</sup>. Τέλος, στα επιφανειακά στοιχεία επιβάλλονται και ελατήρια τριβής με τιμή δυσκαμψίας ίση με 0.20·40000kN/m<sup>3</sup>=8000kN/m<sup>3</sup>.

### 3.2.1.3 Φορτία – Συνδυασμοί φόρτισης

Στις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψιν το ίδιο βάρος των δομικών μελών, η επιρροή της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής και οι ωθήσεις γαιών. Οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2: Συνδυασμοί φόρτισης

Στατικά φορτία	1.35G + 1.35ΩΓ + 1.50ΔΤ
Σεισμικά φορτία	1.35G + 1.00ΩΓΣ + 1.50ΔΤ

Η θερμοκρασιακή μεταβολή, λήφθηκε, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ίση με ΔΤ=20° και οι ωθήσεις γαιών, που ασκούνται στην άνω και κάτω στάθμη στο μέλος του κεφαλοδέσμου και της τραβέρσας αντιστοίχως, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3. Οι τιμές αυτές των ωθήσεων γαιών είναι οι δυσμενέστερες που μπορούν να εμφανιστούν και έχουν προκύψει από τη γεωτεχνική μελέτη.

Πίνακας 3-3: Φορτία ωθήσεων γαιών

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
428kN/m	1407kN/m

## 3.2.2 Γραμμικές αναλύσεις

Στόχος είναι η αρχική εκτίμηση του μεγέθους της διατομής της αντηρίδας, χωρίς να ληφθούν υπ' όψιν οι όποιες μη γραμμικότητες παρουσιάζονται στο μέλος της αντηρίδας. Με τον τρόπο αυτό, αφενός θα χρησιμοποιηθεί μια εύλογη αρχική διατομή ελέγχου επάρκειας στις μη γραμμικές αναλύσεις και αφετέρου θα διαπιστωθεί ποια η διαφοροποίηση στο μέγεθος της διατομής που προκύπτει από γραμμική και μη γραμμική ανάλυση αντιστοίχως.



Τα εντατικά μεγέθη (M,Q,N) με βάση τα οποία θα γίνει ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας έχουν προκύψει από επαλληλία, με χρήση των κατάλληλων συντελεστών σχεδιασμού (1.35 και 1.50), των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις ανωτέρω δυο ομάδες προσομοιωμάτων.

Θα εξετασθεί κάθε στάθμη ξεχωριστά, στην οποία θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών λόγω των φορτίων που προαναφέρθηκαν στην υποπαράγραφο 3.2.1.3. Θα ακολουθήσει ποιοτική ερμηνεία των διαγραμμάτων αυτών και επιβεβαίωση των τιμών τους με πιο απλουστευμένες διαδικασίες. Τέλος με βάση τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας.

### 3.2.2.1 Άνω στάθμη

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών διατομής CHS508/20 αντηρίδων άνω στάθμης

Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3-1 επιλέγεται η κοίλη κυκλική διατομή CHS 508/20.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και λόγω του ότι η ανάλυση η οποία πραγματοποιείται είναι 1<sup>ης</sup> τάξης γίνεται μια προσπάθεια επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων με πιο απλοποιημένους τρόπους προσέγγισης.

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών



Σχήμα 3-4: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  λόγω ιδίου βάρους από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=66.46\text{kNm}$

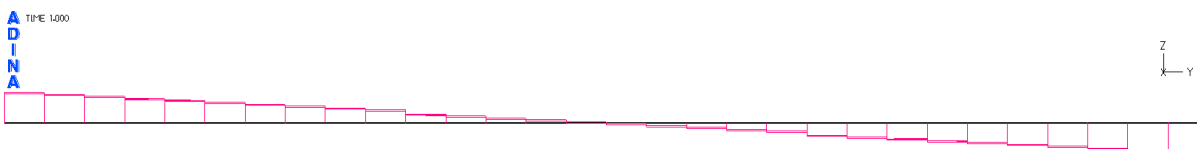
Με την θεώρηση της αντηρίδας ως αμφιέριστη, λόγω επιβολής ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου, η αναπτυσσόμενη ροπή (M) στο μέσο είναι ίση με  $M = \frac{q \cdot L^2}{8}$ .

$q = \gamma \cdot A$ , όπου  $\gamma$ =ειδικό βάρος χάλυβα και  $A$ =εμβαδόν διατομής αντηρίδας

$L$ =μήκος αντηρίδας

$$\text{Επομένως προκύπτει: } M = \frac{78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 307\text{cm}^2 \cdot (15\text{m})^2}{8} = 67.78\text{kNm}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{67.78\text{kNm} - 66.46\text{kNm}}{67.78\text{kNm}} = 1.9\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$

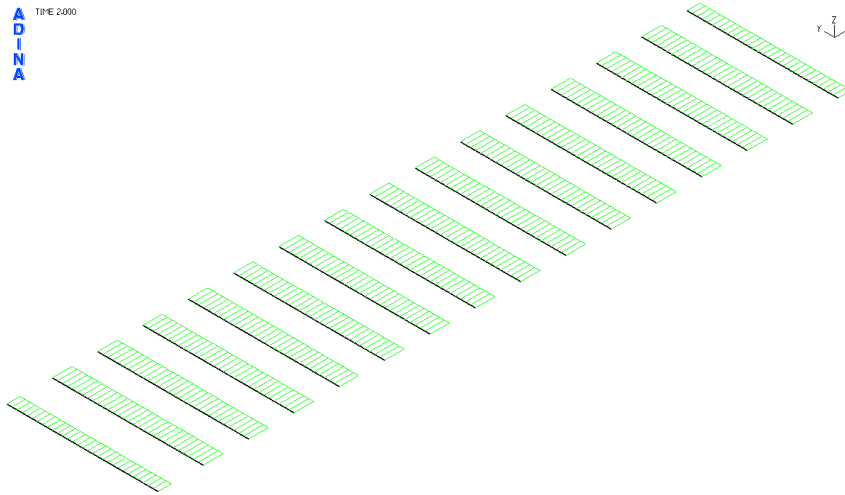


Σχήμα 3-5: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  λόγω ιδίου βάρους από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_z=17.12\text{kNm}$

Με την θεώρηση της αντηρίδας ως αμφιέριστη, λόγω επιβολής ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου, η μέγιστη τέμνουσα (V) εμφανίζεται στο άκρο του μέλους και είναι ίση με  $V = \frac{q \cdot L}{2}$ , όπου  $q$ ,  $A$  όπως ανωτέρω.

Επομένως προκύπτει: 
$$V = \frac{78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 307\text{cm}^2 \cdot 15\text{m}}{2} = 18.07\text{kN}$$

Ποσοστό απόκλισης: 
$$\frac{18.07\text{kN} - 17.12\text{kN}}{18.07\text{kN}} = 5.2\% \text{ (οριακά αποδεκτό ποσοστό απόκλισης)}$$



Σχήμα 3-6: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=1973\text{kN}$

Παρατηρείται ότι η αναπτυσσόμενη αξονική στις δυο ακριανές αντηρίδες είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη αξονική στις υπόλοιπες αντηρίδες, κάτι το οποίο είναι λογικό διότι το μήκος επιρροής του γραμμικού κατανεμημένου φορτίου ωθήσεων γαιών είναι μικρότερο για τις ακριανές αυτές αντηρίδες.

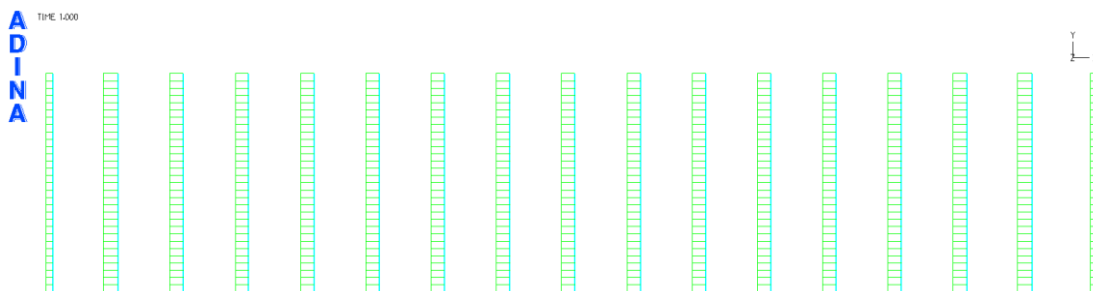
Από την ανάλυση προκύπτει  $N=1973\text{kN}$ .

Με την απλουστευμένη προσέγγιση η αναπτυσσόμενη αξονική ισούται με  $N=q \cdot L$ , όπου  $q$ =κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών (Πίνακας 3-3) και  $L$ =μήκος επιρροής.

Η απόσταση διαδοχικών αντηρίδων ισούται με 4.5m. Επομένως το μήκος επιρροής για την εκάστοτε αντηρίδα (εκτός από τις δυο ακριανές) είναι ίσο με  $L = \frac{4.5\text{m}}{2} + \frac{4.5\text{m}}{2} = 4.5\text{m}$ .

Επομένως προκύπτει: 
$$N = 428 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4.5\text{m} = 1926\text{kN}$$

Ποσοστό απόκλισης: 
$$\frac{1973\text{kN} - 1926\text{kN}}{1973\text{kN}} = 2.4\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$



Σχήμα 3-7: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=564.8\text{kN}$

Παρατηρείται, όπως και ανωτέρω, ότι η αναπτυσσόμενη αξονική στις δυο ακριανές αντηρίδες είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη αξονική στις υπόλοιπες αντηρίδες, κάτι που είναι λογικό, διότι και εδώ όπως και στο Σχήμα 3-6 οι δυο ακριανές αντηρίδες επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες. Λόγω του ότι δεν υπάρχει τόση εδαφική μάζα στην περιοχή γύρω από τις ακριανές αντηρίδες, όση υπάρχει στην περιοχή γύρω από τις πιο κεντρικές, η αντίσταση που προβάλλεται στην αντηρίδα λόγω διαστολής της είναι μικρότερη, άρα το μέλος της αντηρίδας μπορεί να διασταλεί περισσότερο και κατ' επέκταση η αναπτυσσόμενη αξονική είναι μικρότερη.

Το μέγεθος της αναπτυσσόμενης αξονικής στις αντηρίδες συσχετίζεται άμεσα με την εδαφική αντίσταση που παρουσιάζεται, η οποία σε επίπεδο προσομοιώματος αντικατοπτρίζεται από την δυσκαμψία των εδαφικών ελατηρίων. Από τη Στατική είναι γνωστό ότι αν σε ένα μέλος επιβάλλεται ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή και τα άκρα του μέλους είναι ακλόνητα (θεωρητικώς άπειρη δυσκαμψία εδαφικού ελατηρίου), τότε η αναπτυσσόμενη αξονική του μέλους ισούται με  $N = \alpha_t \cdot E \cdot A \cdot \Delta T$ , όπου:

$$\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C} = \text{συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (για } T \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$E$  = μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

$A$  = εμβαδόν διατομής αντηρίδας

$\Delta T$  = ομοιόμορφα επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή

$$\text{Επομένως είναι: } N = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 307 \text{ cm}^2 \cdot 20 = 1547.3 \text{ kN.}$$

Αντιθέτως αν τα άκρα του μέλους είναι ελεύθερα (μηδενική δυσκαμψία εδαφικού ελατηρίου), τότε το μέλος μπορεί να διασταλεί (ή συσταλεί) χωρίς να παρεμποδίζεται. Αυτό αυτομάτως σημαίνει μηδενική αναπτυσσόμενη ένταση στο μέλος ( $N=0$ ), αφού είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί όπως αυτό επιθυμεί.

Το έδαφος, σύμφωνα με την γεωτεχνική μελέτη, έχει δείκτη εδάφους  $40000 \text{ kN/m}^3$ . Επομένως η εδαφική αντίσταση που παρουσιάζεται είναι κάτι ανάμεσα από μηδενική και πολύ μεγάλη (θεωρητικώς άπειρη), άρα και η αναπτυσσόμενη αξονική αναμένεται να βρίσκεται μεταξύ των δυο οριακών τιμών που υπολογίστηκαν ανωτέρω.

$$\text{Είναι: } 0 \text{ kN} < N = 564.8 \text{ kN} < 1547.3 \text{ kN.}$$

Άρα επαληθεύεται ο ανωτέρω απλουστευμένος τρόπος ελέγχου του εξαγόμενου αποτελέσματος.

Στον Πίνακα 3-4 παρουσιάζονται, για οριακές τιμές δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων, οι αναπτυσσόμενες αξονικές των αντηρίδων του προσομοιώματος. Παρατηρείται ότι για μεγάλη και μικρή τιμή δυσκαμψίας, η τιμή της αξονικής τείνει στην τιμή  $N=1547.3 \text{ kN}$  και  $N=0$  αντιστοίχως.

Πίνακας 3-4: Συσχέτιση εδαφικής δυσκαμψίας – αξονικής αντηρίδας

Δυσκαμψία ελατηρίου (kN/m)	Αξονική αντηρίδας άνω στάθμης (kN)
0.000001	11.8
6000	564.8
100000	1307.2

ADINA  
TYPE 1000

Z  
Y



Σχήμα 3-8: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y = 21.40 \text{ kNm}$

Η σύνδεση αντηρίδας – κεφαλοδέσμου υλοποιείται με πάκτωση, επομένως λόγω της επιβολής του ομοιόμορφου θερμοκρασιακού φορτίου στην αντηρίδα αναπτύσσεται ροπή στα άκρα της και σε συνδυασμό με το ότι δεν επιβάλλονται κατακόρυφα εξωτερικά φορτία σε αυτήν, το μέγεθος της ροπής περί τον γ-γ άξονα παραμένει ίδιο σε όλο το μήκος της αντηρίδας.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 3-5 στον οποίο υπολογίζονται, με βάση τα ανωτέρω αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και με βάση τον συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.35ΩΓ+1.50ΔΤ του Πίνακα 3-2, τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού. Αξιοποιώντας τα κάτωθι μεγέθη σχεδιασμού, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας CHS508/20.

Πίνακας 3-5: Υπολογισμός μεγεθών σχεδιασμού

Ιδίων Βάρους		Ωθήσεις Γαιών		Θερμοκρασία		Μεγέθη Σχεδιασμού	
N	0	N	1973	N	564.8	$N_{Ed}$ (kN)	3510.8
$M_y$	66.46	$M_y$	0	$M_y$	21.4	$M_{Ed,y}$ (kNm)	121.8
$M_z$	0	$M_z$	0	$M_z$	0	$M_{Ed,z}$ (kNm)	0
$V_y$	0	$V_y$	0	$V_y$	0	$V_{Ed,y}$ (kN)	0
$V_z$	17.12	$V_z$	0	$V_z$	0	$V_{Ed,z}$ (kN)	23.1

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση γ-γ και στην z-z, γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed} = 3510.8 \text{ kN}$ ,  $M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 121.8 \text{ kNm}$ ,  $V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 23.1 \text{ kN}$

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/20 αντηρίδων άνω στάθμης

Τα δεδομένα για την διατομή CHS508/20 είναι:

$f_y = 35.5 \text{ MPa}$  (χάλυβας S355)

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$

$\gamma_{M_0} = 1.00$

$A = 307 \text{ cm}^2$

$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi} = 195 \text{ cm}^2$

$I = 91428 \text{ cm}^4$

$W_{pl} = 4766 \text{ cm}^3$

Εύρεση κατηγορίας διατομής

Αν επαληθεύεται η εξ. (3-1) τότε η διατομή είναι κατηγορίας 1. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι γενικότερη απαίτηση, οι διατομές που χρησιμοποιούνται να είναι κατηγορίας 1.

$$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \quad (3-1)$$

Είναι χάλυβας S355, επομένως  $\varepsilon = 0.81$ .

$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \Rightarrow \frac{508}{20} \leq 50 \cdot 0.81^2 \Rightarrow 25.4 \leq 32.81$ , επομένως η διατομή είναι κατηγορίας 1. Άρα θα πραγματοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (3-2)$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (3-3)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (3-4)$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (3-2), (3-3), (3-4) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{307 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 10899 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{4766 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 1691.9 \text{ kNm}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{195 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 4005.8 \text{ kN}$$

Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (3-5) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (3-5)$$

$$\text{Είναι: } V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 23.10 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 4005.8 \text{ kN} \Rightarrow 23.10 \text{ kN} \leq 2002.9 \text{ kN}$$

Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (3-6).

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}), \text{ όπου } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (3-6)$$

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 1691.9 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3510.8 \text{ kN}}{10899 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 1445.3 \text{ kNm}$$

Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{121.8 \text{ kNm}}{1445.3 \text{ kNm}} = 0.08$$

**Έλεγχος επάρκειας**

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}=0.32$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}=0.07$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

**Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS508/20 αντηρίδων άνω στάθμης**

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

Χρειάζεται επιπροσθέτως να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχών  $N_{Rk}$  και  $M_{Rk}$  από τις εξ. (3-7) και (3-8) αντιστοίχως.

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (3-7)$$

$$M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y \quad (3-8)$$

Είναι:  $N_{Rk} = A \cdot f_y = 307 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 10899 \text{ kN}$  και  $M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 4766 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 1691.9 \text{ kNm}$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

**1. Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )**

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της αντηρίδας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

**2. Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )**

**Ανηγμένη λυγηρότητα:**

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (3-9)$$

Όπου η εξ. (3-9) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3-10)$$

$$L_{cr} = k \cdot L \quad (3-11)$$

$$i = i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3-12)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (3-10), (3-11), (3-12) προκύπτει:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 15\text{m} = 15\text{m}$ , διότι  $k=1.00$  αφού τα άκρα του μέλους της αντηρίδας είναι αρθρωτά.

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{91428\text{cm}^4}{307\text{cm}^2}} = 17.26\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \frac{15\text{m}}{17.26\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 1.138$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών ( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi$ :

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3-13)$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (3-14)$$

Από την εξ. (3-13) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (1.138 - 0.2) + 1.138^2] = 1.246$$

Επομένως από την εξ. (3-14) προκύπτει μειωτικός συντελεστής  $\chi$  ίσος με:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1.246 + \sqrt{1.246^2 - 1.138^2}} = 0.571$$

3. Συντελεστές αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Υπολογισμός συντελεστών  $C_m$  ισοδύναμης ομοιόμορφης ροής:

Πίνακας 3-6: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	$y-y$	$z-z$
$C_{mz}$	$z-z$	$y-y$

Από τον Πίνακα 3-6 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροής.

Επαλληλίζοντας τα διαγράμματα ροπών περί τον  $y-y$  (Σχήμα 3-4 και Σχήμα 3-8) προκύπτει ροπή:

– στο άκρο ίση με  $M_h = 1.50 \cdot 21.4\text{kNm} = 32.1\text{kNm}$

– στο μέσο ίση με  $M_s = 1.35 \cdot 66.46\text{kNm} + 1.50 \cdot 21.4\text{kNm} = 121.8\text{kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$- a_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{32.1 \text{ kNm}}{121.8 \text{ kNm}} \Rightarrow a_h = 0.26$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το ίδιο βάρος και το θερμοκρασιακό φορτίο επιβάλλονται ομοιόμορφα στο μέλος της αντηρίδας

$$\text{Άρα προκύπτει: } C_{my} = 0.95 + 0.05 \cdot a_h = 0.95 + 0.05 \cdot 0.26 \Rightarrow C_{my} = 0.963$$

Από την φόρτιση λόγω ιδίου βάρους, ωθήσεων γαιών και θερμοκρασίας, όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών (Σχήμα 3-4 έως και Σχήμα 3-8) είναι  $M_z = 0 \text{ kNm}$ .

Επομένως στον σύνθετο έλεγχο, λόγω κάμψης και θλίψης, οι συντελεστές  $k_{zz}$  και  $k_{yz}$  δεν υπολογίζονται διότι από την στιγμή που  $M_z = 0 \text{ kNm}$  δεν έχουν κάποιο φυσικό νόημα. Άρα κατ' επέκταση ούτε ο συντελεστής ροπής  $C_{mz}$  υπολογίζεται.

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Το μέλος της αντηρίδας είναι εξασφαλισμένο στα άκρα του ώστε να μην παραμορφώνεται στρεπτικά και επιπλέον δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο στην αντηρίδα. Επομένως, το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας B.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα B.1.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (3-15)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (3-16)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-15) και (3-16) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 3-7.

Πίνακας 3-7: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	1.442
$k_{zy}$	0.865

#### 4. Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z = 0 \text{ kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (3-17)$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (3-18)$$



Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-17) και (3-18) προκύπτει:

$$0.62+0.11=0.74 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-17)}$$

$$0.62+0.07=0.69 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-18)}$$

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τους ανωτέρω ελέγχους (διατομής και μέλους) γίνεται αντιληπτό ότι κρίσιμότερος είναι ο έλεγχος μέλους της αντηρίδας, αφού τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας του μέλους είναι πολύ πιο κοντά στη μονάδα σε σχέση με τα αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας της διατομής.

Επίσης διαπιστώνεται ότι υπάρχει περιθώριο να χρησιμοποιηθεί και μικρότερη διατομή, αφού για την CHS508/20 κανένας από τους δυο ελέγχους δεν ικανοποιείται οριακά. Με χρήση μικρότερης διατομής αναμένεται οι τιμές των ελέγχων επάρκειας να είναι μεγαλύτερες, και ιδίως για τον έλεγχο μέλους υπάρχει ο κίνδυνος οι τιμές να πλησιάσουν αρκετά κοντά στη μονάδα.

### **Διατομή CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης**

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η CHS508/16, η οποία είναι κατηγορίας 1 (βασική απαίτηση).

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται ακριβώς η ίδια, με τη μόνη διαφοροποίηση ότι στην περίπτωση αυτή είναι διαφορετικά τα χαρακτηριστικά της διατομής. Δηλαδή η μορφή των διαγραμμάτων των εντατικών μεγεθών, η ποιοτική ερμηνεία των διαγραμμάτων αυτών και επιβεβαίωση των τιμών τους με πιο απλουστευμένες διαδικασίες και τέλος η ακολουθούμενη μεθοδολογία των ελέγχων διατομής και μέλους είναι ίδια.

Επομένως κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των ελέγχων διατομής και μέλους της CHS508/16, αφού αυτά είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μας δείχνουν την αποδοτικότητα της χρησιμοποιούμενης διατομής.

### **Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.38 \text{ και } \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.06 \text{ Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.}$$

### **Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης**

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-17) και (3-18) προκύπτει:

$$0.72+0.10=0.82 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-17)}$$

$$0.72+0.06=0.78 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-18)}$$

Παρατηρείται ότι από άποψη διατομής υπάρχει αρκετό ακόμα περιθώριο εκμετάλλευσής της. Αντίθετα από άποψη μέλους, διαπιστώνεται ότι οι τιμές του ελέγχου αυξήθηκαν και πλησίασαν ακόμα περισσότερο το άνω όριο, δηλαδή τη μονάδα. Παρόλα αυτά υπάρχει ακόμα διαθέσιμο περιθώριο στον έλεγχο μέλους, οπότε εξετάζεται η περίπτωση περαιτέρω απομείωσης της διατομής της αντηρίδας.

### **Διατομή CHS457/16 αντηρίδων άνω στάθμης**

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η CHS457/16, η οποία είναι κατηγορίας 1 (βασική απαίτηση) και επίσης είναι η αμέσως μικρότερη (από άποψη εμβαδού διατομής) διατομή μετά την CHS508/16.

Ακολουθείται ακριβώς η ίδια λογική προσέγγισης όπως και για την CHS508/20 και CHS508/16.

### **Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS457/16 αντηρίδων άνω στάθμης**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.42 \text{ και } \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.06 \text{ Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.}$$

### Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS457/16 αντηρίδων άνω στάθμης

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-17) και (3-18) προκύπτει:

$$0.93+0.12=1.05 \geq 1.00, \text{ από την εξ. (3-17)}$$

$$0.93+0.07=1.00 \geq 1.00, \text{ από την εξ. (3-18)}$$

Παρατηρείται ότι ενώ από άποψη διατομής υπάρχει αρκετό ανεκτό περιθώριο εκμετάλλευσής της, από άποψη μέλους έχει υπερβληθεί, οριακά, το όριο. Επομένως η CHS457/16 απορρίπτεται. Και επειδή απορρίπτεται οριακά, είναι φανερό, ότι μία από τις μικρότερες, αν όχι η μικρότερη, διατομή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η CHS508/16.

Στον Πίνακα 3-8 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας για κάθε μία από τις διατομές που εξετάστηκαν ανωτέρω.

Πίνακας 3-8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας – Άνω στάθμη

		CHS508/20	CHS508/16	CHS457/16
Έλεγχος επάρκειας διατομής	$N_{Ed}/N_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.32	0.38	0.42
	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.07	0.06	0.06
Έλεγχος επάρκειας μέλους	$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$ $Y_{M1}$	0.74	0.82	1.05
	$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$ $Y_{M1}$	0.69	0.78	1.00

#### 3.2.2.2 Κάτω στάθμη

Οι γραμμικές αναλύσεις του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας ολοκληρώνονται με την μελέτη και της κάτω στάθμης των αντηρίδων.

Ποιοτικά η κατάσταση για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης είναι ακριβώς η ίδια με αυτή των αντηρίδων της άνω στάθμης, αφού τα συστήματα αντιστήριξης άνω – κάτω στάθμης δεν συνδέονται κάπως μεταξύ τους ώστε το ένα να επηρεάζει το άλλο. Επομένως, αναμένεται η ίδια εικόνα από άποψη εντατικής καταπόνησης της αντηρίδας, και κατ' επέκταση ποιοτικής ερμηνείας των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών. Επίσης χρησιμοποιούνται κοίλες κυκλικές διατομές κατηγορίας 1 και για τις αντηρίδες κάτω στάθμης, επομένως η φύση και η λογική των ελέγχων είναι ίδια με αυτή που έχει παρουσιαστεί ανωτέρω για την άνω στάθμη (υποπαράγραφος 3.2.2.1)

Η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι οι αντηρίδες της κάτω στάθμης συνδέονται ακλόνητα στα άκρα τους με την μεταλλική τραβέρσα διατομής 2HEB450 και ότι το επιβαλλόμενο φορτίο ωθήσεων γαιών είναι μεγαλύτερο (Πίνακας 3-3) κάτι που είναι αναμενόμενο, αφού σε μεγαλύτερο βάθος οι εδαφικές πιέσεις είναι μεγαλύτερες.

Οι διαφοροποιήσεις αυτές δεν επηρεάζουν ούτε τη μορφή των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών, ούτε τη ποιοτική ερμηνεία τους – εκτίμηση των τιμών των διαγραμμάτων με προσεγγιστικούς τρόπους, ούτε τη μορφή των ελέγχων διατομής και μέλους.

Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση απευθείας των τελικών αποτελεσμάτων των ελέγχων επάρκειας διατομής και μέλους για κάθε μια από τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν (Πίνακας 3-9).

Πίνακας 3-9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας – Κάτω στάθμη

		CHS711/50	CHS610/40	CHS610/30
Έλεγχος επάρκειας διατομής	$N_{Ed}/N_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.29	0.42	0.55
	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.04	0.05	0.05
Έλεγχος επάρκειας μέλους	$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$ $\frac{Y_{M1}}{Y_{M1}}$	0.47	0.75	0.95
	$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$ $\frac{Y_{M1}}{Y_{M1}}$	0.45	0.72	0.91

Ερμηνεύοντας τον ανωτέρω πίνακα γίνεται αντιληπτό, ότι αφενός για όποια από τις ανωτέρω διατομές υπάρχει ακόμα αρκετό ανεκτό περιθώριο αξιοποίησης της διατομής, αφετέρου, όπως και για τις αντηρίδες άνω στάθμης, κρίσιμος είναι ο έλεγχος μέλους. Καθώς μικραίνει η διατομή ο έλεγχος μέλους γίνεται πιο κρίσιμος και για την CHS610/30, ικανοποιείται οριακά ο έλεγχος αυτός. Επομένως η CHS610/30 είναι η οριακά αποδεκτή διατομή.

### 3.2.2.3 Σύνοψη

Στον Πίνακα 3-10 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τελικές οριακές διατομές που θα χρησιμοποιηθούν για τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης έπειτα από διερεύνηση που προέκυψε μέσω γραμμικών (υποπαράγραφος 3.2.2).

Πίνακας 3-10: Τελικές οριακές διατομές αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
CHS508/16	CHS610/30

### 3.2.3 Μη γραμμικές αναλύσεις

Η βασική αιτία εφαρμογής των μη γραμμικών αναλύσεων, η οποία καθιστά επιτακτική την υλοποίησή τους, είναι η υψομετρική διαφορά  $D/6$  μεταξύ των στηρίξεων της αντηρίδας. Στόχος είναι να διερευνηθεί αν αυτή η υψομετρική διαφορά επηρεάζει την εντατική κατάσταση της αντηρίδας και κατ'έκταση κατά πόσο διαφοροποιεί τις απαιτήσεις σε διατομή της αντηρίδας, σε σύγκριση πάντα με τις διατομές που έχουν προκύψει από την γραμμική ανάλυση.

Ως διατομές έναρξης στις μη γραμμικές αναλύσεις για τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης, θα χρησιμοποιηθούν οι διατομές των αντηρίδων της αντίστοιχης στάθμης οι οποίες προέκυψαν από τις γραμμικές αναλύσεις. Επίσης, το θλιπτικά επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο στο μη γραμμικό προσομοίωμα ισούται με το φορτίο σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) που έχει προκύψει σύμφωνα με τον συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.35ΩΓ+1.50ΔΤ, αξιοποιώντας τις τιμές των αξονικών δυνάμεων των γραμμικών προσομοιωμάτων λόγω των φορτίων του ίδιου βάρους, των ωθήσεων γαιών και της ομοιόμορφης θερμοκρασίας.

Εισάγεται γεωμετρική ατέλεια λόγω καμπυλότητας του φορέα με το σχήμα των ιδιομορφών λυγισμού που θα προκύψουν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) και μέγεθος συμβατό με τις καμπύλες λυγισμού του EC3 για τον χρησιμοποιούμενο τύπο διατομής.

Η χρησιμοποιούμενη κοίλη κυκλική διατομή της αντηρίδας είναι θερμής έλασης και ποιότητας χάλυβα S355. Επομένως αντιστοιχεί στην καμπύλη λυγισμού a.

Άρα, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5 (Πίνακας 5.1 του EN1993-1-1) προκύπτει μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για το μέλος της αντηρίδας μήκους  $L=15\text{m}$ , όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-11.

Πίνακας 3-11: Μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για την κοίλη κυκλική διατομή της αντηρίδας

$e_{o,ei} = L/300$	$e_{o,pi} = L/250$
0.05m	0.06m

Οι διατομές των αντηρίδων και των δυο σταθμών είναι κατηγορίας 1. Επομένως από τη στιγμή που θα υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος και διαστασιολόγηση, λαμβάνεται υπόψιν το πλαστικό μέγεθος ατέλειας ( $e_{o,pi}$ ), και όχι το ελαστικό ( $e_{o,ei}$ ).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, λόγω του ότι οι άνω και οι κάτω αντηρίδες δεν συνδέονται μεταξύ τους με χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας, η κάθε στάθμη λειτουργεί ανεξάρτητα από την άλλη. Επομένως, θα μελετηθεί κάθε στάθμη ξεχωριστά και δεν χρειάζεται να ληφθεί υπ' όψιν στην εξέταση της εκάστοτε στάθμης η διαδικασία της φάσης κατασκευής.

### 3.2.3.1 Άνω στάθμη

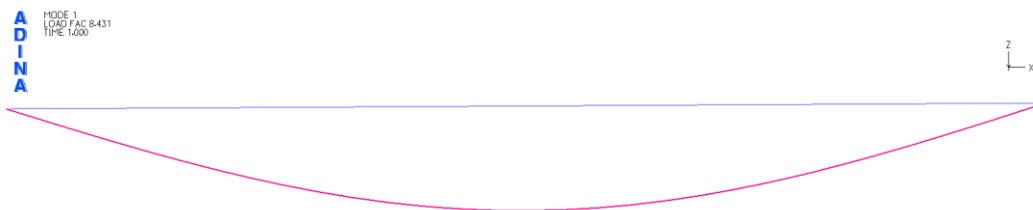
Η διατομή που προέκυψε από γραμμική ανάλυση, και ικανοποιεί οριακά τις απαιτήσεις των ελέγχων επάρκειας διατομής και μέλους, είναι η CHS508/16. Εκτός από την CHS508/16, θα εξεταστεί επιπροσθέτως μη γραμμικά, και η αμέσως μεγαλύτερη διατομή CHS508/20.

#### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS508/20 αντηρίδων άνω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 3510.8 \text{ kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,2 όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 3-9) και η 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 3-10).



Σχήμα 3-9: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS508/20 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού



Σχήμα 3-10: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS508/20 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδας αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3-11. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-11, Σχήμα 3-12) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-11: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Το οριζόντιο τμήμα του δρόμου ισορροπίας περιγράφει το αρχικό στάδιο της ανάλυσης, κατά το οποίο ασκείται το ίδιο βάρος της αντηρίδας.

Από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκύπτει ότι ακριβώς μετά την επιβολή του ίδιου βάρους της αντηρίδας η βύθιση στο μέσο της ισούται με  $10.89 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της βύθισης στο μέσο της αντηρίδας, και κατ' επέκταση ελέγχου της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση, υλοποιείται με τη θεώρηση:

- της αντηρίδας ως αμφιέριστη, κάτι το οποίο είναι αληθές αφού έτσι έχει προσομοιαστεί η αντηρίδα στο μη γραμμικό μοντέλο.
- του ίδιου βάρους ως ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, κάτι το οποίο είναι αληθές διότι η μάζα της αντηρίδας είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο μέλος της.

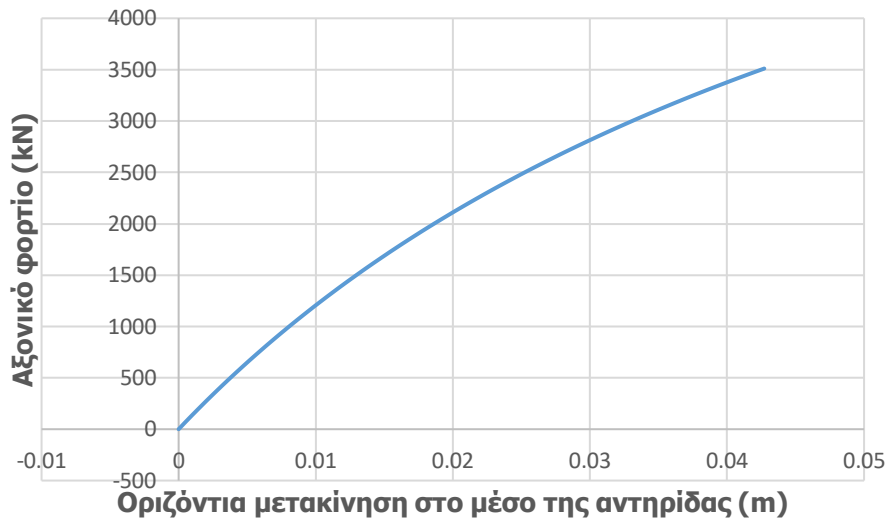
Με βάση τα ανωτέρω, από Στατική, είναι γνωστό ότι:

$$\delta_o = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (3-19)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-19) προκύπτει:

$$\delta_o = \frac{5 \cdot \left( 1.35 \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 307 \text{cm}^2 \right) \cdot (15 \text{m})^4}{384 \cdot 210 \text{GPa} \cdot 91428 \text{cm}^4} = 11.17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

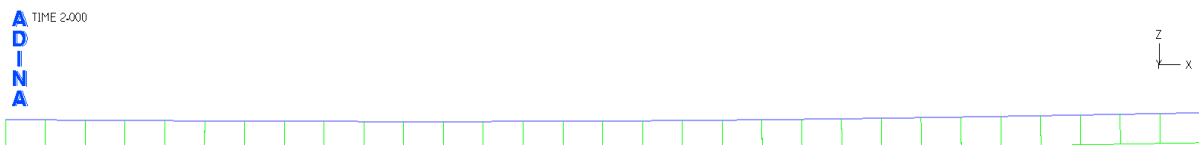
Ποσοστό απόκλισης:  $\frac{11.17 \cdot 10^{-3} \text{m} - 10.89 \cdot 10^{-3} \text{m}}{11.17 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 2.5\% < 5\%$  (αποδεκτό)



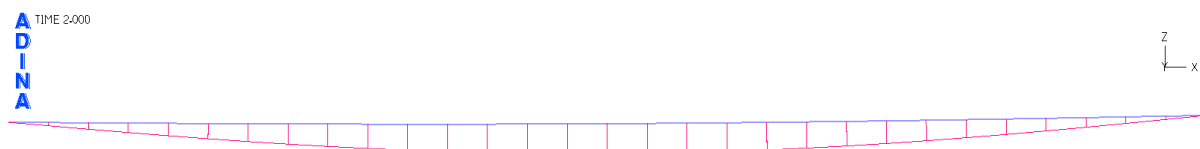
Σχήμα 3-12: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed} = 3510.8 \text{kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα ακόλουθα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 3-13), καμπτικών ροπών (Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15) και τεμνουσών δυνάμεων (Σχήμα 3-16, Σχήμα 3-17).



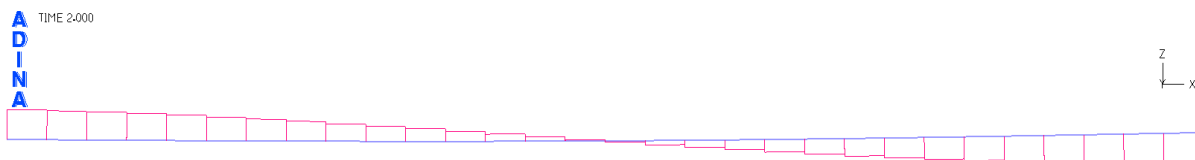
Σχήμα 3-13: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $N = 3510.8 \text{kN}$



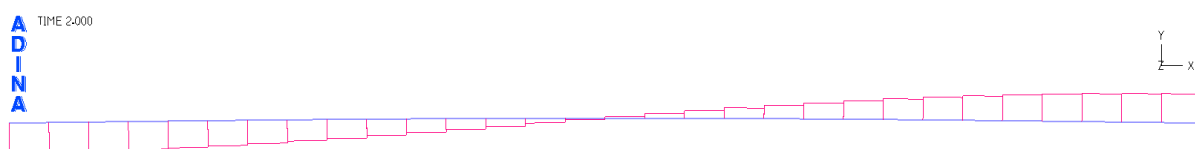
Σχήμα 3-14: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_y = 521.1 \text{kNm}$



Σχήμα 3-15: Διάγραμμα καμπικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_z=359.1\text{kNm}$



Σχήμα 3-16: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_z=114.6\text{kN}$



Σχήμα 3-17: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_y=75.83\text{kN}$

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/20 αντηρίδων άνω στάθμης

Πίνακας 3-12: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS508/20

$N_{Ed}$ (kN)	3510.8
$M_{Ed,y}$ (kNm)	521.1
$M_{Ed,z}$ (kNm)	359.1
$V_{Ed,y}$ (kN)	75.83
$V_{Ed,z}$ (kN)	114.6

Στον Πίνακα 3-12 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA.

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση  $y-y$  και στην  $z-z$ , γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed}=3510.8\text{kN}$ ,  $M_{Ed}=\sqrt{M_{Ed,y}^2+M_{Ed,z}^2}=632.9\text{kNm}$ ,  $V_{Ed}=\sqrt{V_{Ed,y}^2+V_{Ed,z}^2}=137.4\text{kN}$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (3-5) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

Είναι:  $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 137.4\text{kN} \leq 0.5 \cdot 4005.77\text{kN} \Rightarrow 137.4\text{kN} \leq 2002.9\text{kN}$

### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (3-6).

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1.7}) = 1691.3 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3510.8 \text{ kN}}{10898.5 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 1445.3 \text{ kNm}$$

### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.32$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.37$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

Άρα η διατομή CHS508/20 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

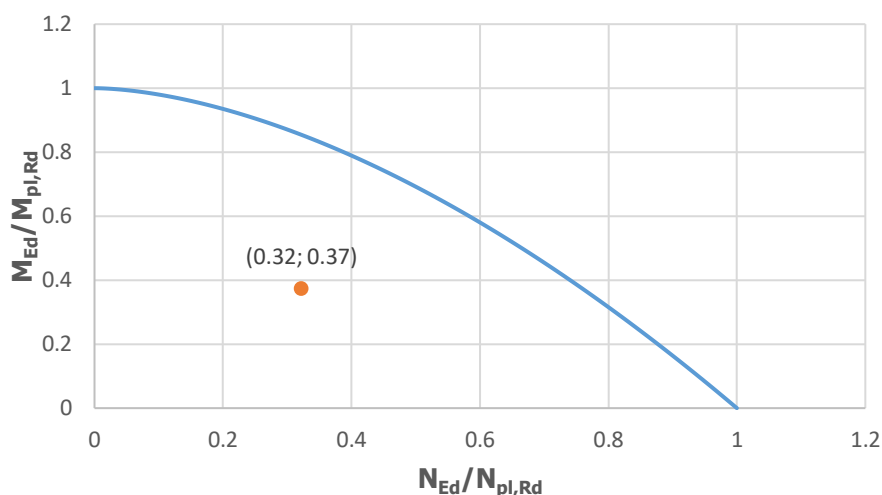
$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{632.8 \text{ kNm}}{1445.3 \text{ kNm}} = 0.44$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 3-18).

Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας. Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονικής δύναμης και ροπής.





Σχήμα 3-18: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/20 αντηρίδας άνω στάθμης

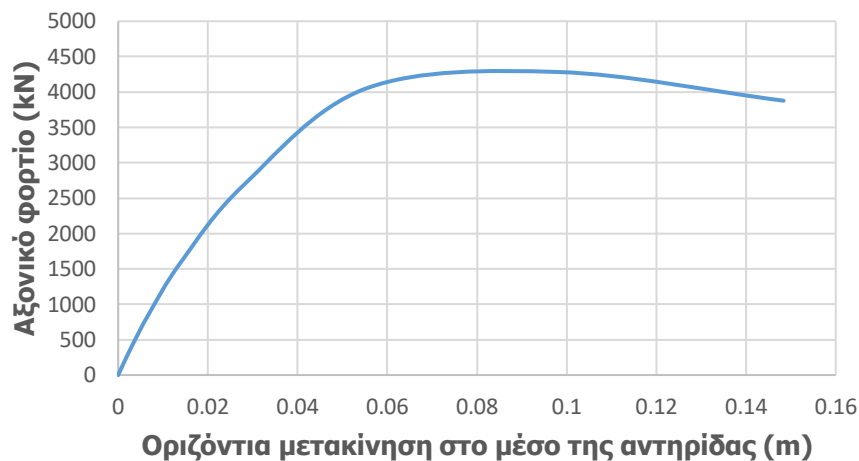
#### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-19, Σχήμα 3-20) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-19: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 3-20: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/20 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

$$P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} \quad (3-20)$$

Όπου:  $\Lambda$ =φορτικός συντελεστής (εξάγεται από το ADINA) και  $N_{Ed}$ =δρώσα αξονική δύναμη σχεδιασμού Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-20) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 1.219 \cdot 3510.8 \Rightarrow P_u = 4279.7 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{3510.8 \text{ kN}}{4279.7 \text{ kN}} = 0.82$$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής είναι ικανοποιητικός. Δηλαδή η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο ποσοστό της.

Επομένως, η CHS508/20 είναι κατάλληλη για την άνω στάθμη, διότι αφενός ικανοποιεί τις απαιτήσεις (διατομής και μέλους) και αφετέρου αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Για λόγους όμως σύγκρισης διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης μεταξύ τους, κρίνεται σκόπιμο να εντοπιστούν διατομές οι οποίες να επαρκούν οριακά, δηλαδή να έχουν αρκετά μεγάλο βαθμό αξιοποίησης, ώστε να έχει νόημα η σύγκριση μεταξύ διατομών μελών των διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης.

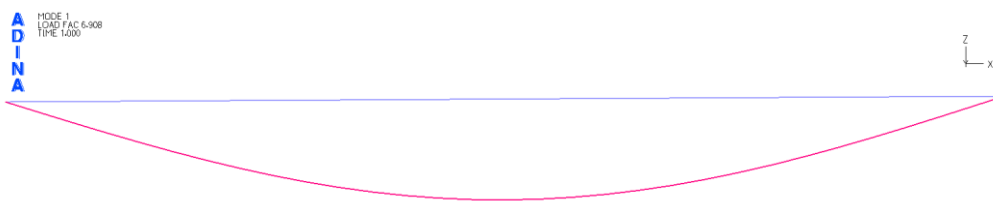
Για το λόγο αυτό, θα επαναληφθούν οι ανωτέρω μη γραμμικές αναλύσεις και για την αμέσως μικρότερη διατομή, την CHS508/16, αφού υπάρχει περιθώριο για μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίησης.

### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 3311.9 \text{ kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,2 όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 3-21) και η 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 3-22).



Σχήμα 3-21: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS508/16 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

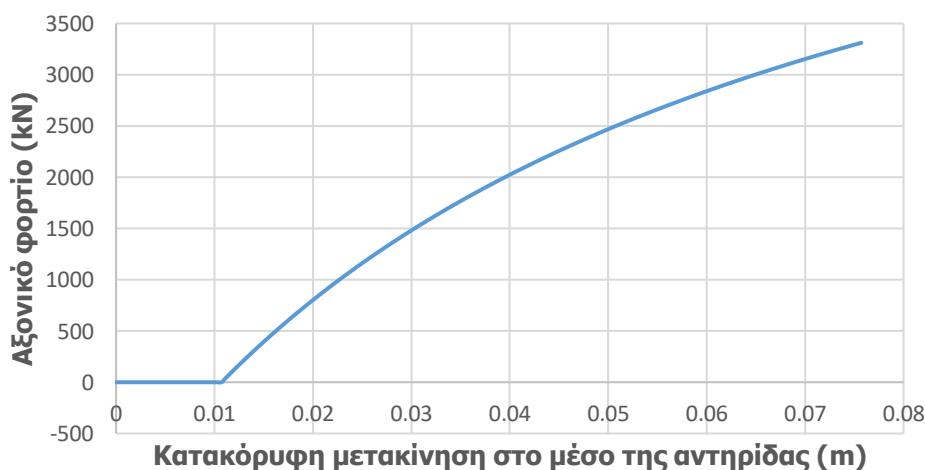


Σχήμα 3-22: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS508/16 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδα αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3-11. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-23, Σχήμα 3-24) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-23: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

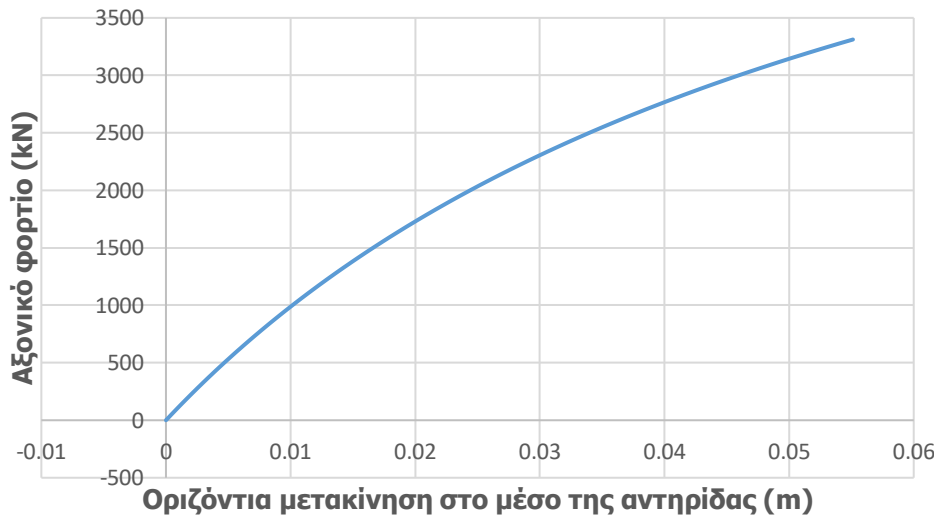
Το οριζόντιο τμήμα του δρόμου ισορροπίας περιγράφει το αρχικό στάδιο της ανάλυσης, κατά το οποίο ασκείται το ίδιο βάρος της αντηρίδας.

Από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκύπτει ότι ακριβώς μετά την επιβολή του ίδιου βάρους της αντηρίδας η βύθιση στο μέσο της ισούται με  $10.72 \cdot 10^{-3}$  m.

Με τον εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της βύθισης στο μέσο της αντηρίδας, και κατ' επέκταση τον έλεγχο της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση, προκύπτει αντικαθιστώντας στην εξ. (3-19):

$$\delta_o = \frac{5 \cdot \left( 1.35 \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 247 \text{cm}^2 \right) \cdot (15\text{m})^4}{384 \cdot 210 \text{GPa} \cdot 74909 \text{cm}^4} = 10.96 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{10.96 \cdot 10^{-3} \text{m} - 10.72 \cdot 10^{-3} \text{m}}{10.96 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 2.18\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$



Σχήμα 3-24: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed} = 3311.9 \text{ kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων, καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων, τα οποία ποιοτικώς έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα της CHS508/20 (Σχήμα 3-13, Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15, Σχήμα 3-16, Σχήμα 3-17).

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης

Πίνακας 3-13: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS508/16

$N_{Ed}$ (kN)	3311.9
$M_{Ed,y}$ (kNm)	527.3
$M_{Ed,z}$ (kNm)	379.8
$V_{Ed,y}$ (kN)	80.18
$V_{Ed,z}$ (kN)	115.1

Στον Πίνακα 3-13 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA για την CHS508/16.

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση  $y-y$  και στην  $z-z$ , γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

$$\text{Επομένως είναι: } N_{Ed} = 3311.9 \text{ kN}, M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 649.8 \text{ kNm}, V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 140.3 \text{ kN}$$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (3-5) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$\text{Είναι: } V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 140.3\text{kN} \leq 0.5 \cdot 3222.9\text{kN} \Rightarrow 140.3\text{kN} \leq 1611.5\text{kN}$$

Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ.(3-6).

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1.7}) = 1375.3\text{kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3311.9\text{kN}}{8768.5\text{kN}} \right)^{1.7} \right] = 1112.5\text{kNm}$$

Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.38$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.47$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

Άρα η διατομή CHS508/16 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

Βαθμός αξιοποίησης

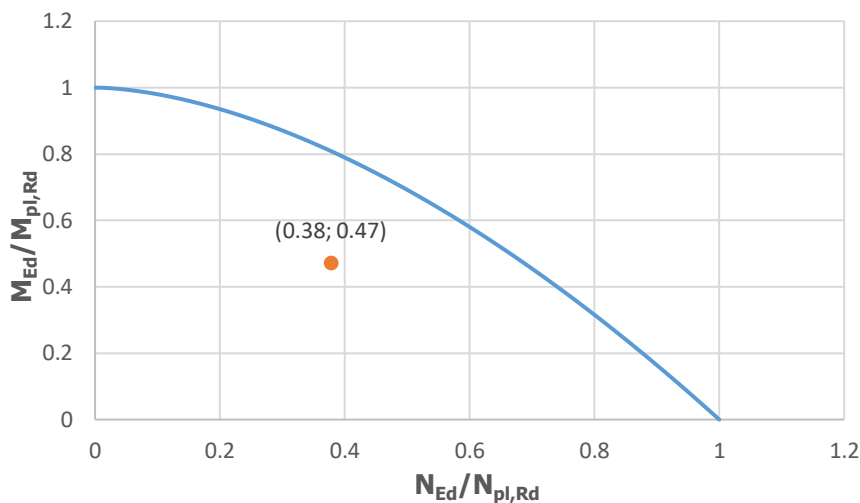
Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{649.8\text{kNm}}{1112.5\text{kNm}} = 0.58$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 3-25).

Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας. Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονικής δύναμης και ροπής.

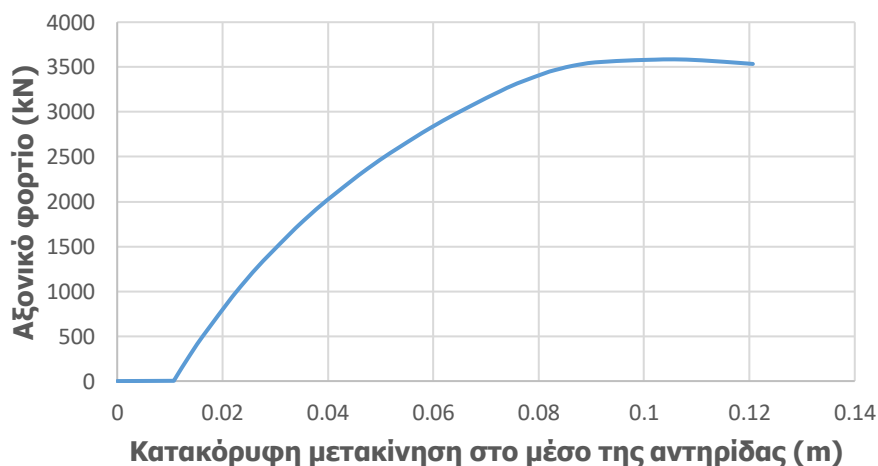


Σχήμα 3-25: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/16 αντηρίδας άνω στάθμης

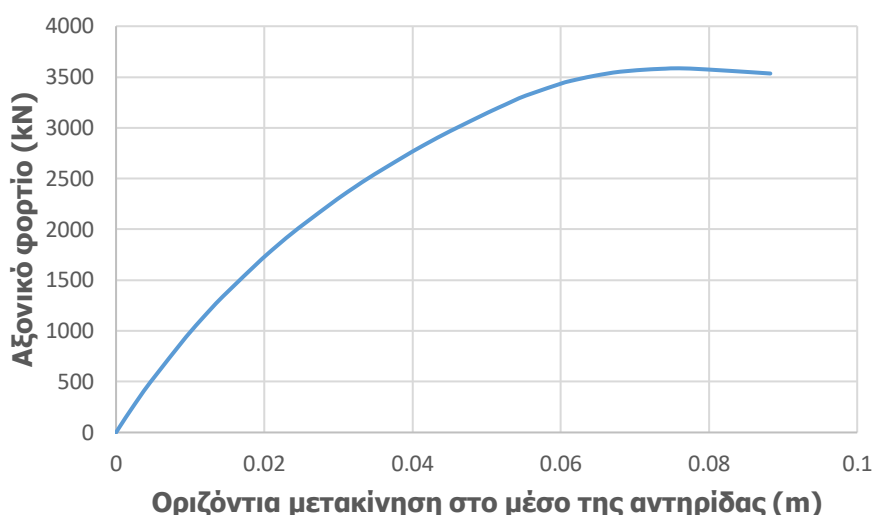
#### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-26, Σχήμα 3-27) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-26: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 3-27: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-20) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 1.083 \cdot 3311.9 \Rightarrow P_u = 3586.8 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{3311.9 \text{ kN}}{3586.8 \text{ kN}} = 0.923$$

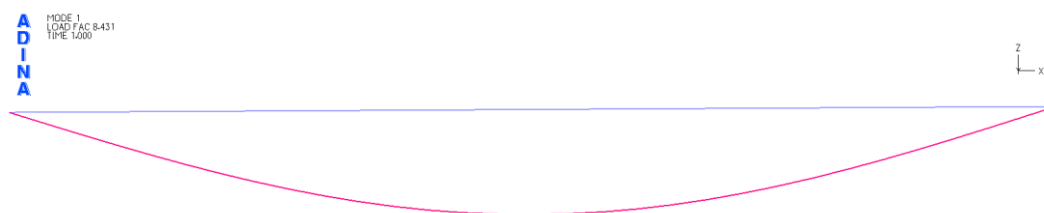
Ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης είναι αρκετά μεγάλος, επομένως η CHS508/16 μπορεί να θεωρηθεί ως οριακή διατομή, η οποία ικανοποιεί τις απαιτήσεις (έλεγχος διατομής και μέλους) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διατομή για τις αντηρίδες της άνω στάθμης.

### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS457/16 αντηρίδων άνω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 3285.8 \text{ kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,2 όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 3-28) και η 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 3-29).



Σχήμα 3-28: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS457/16 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

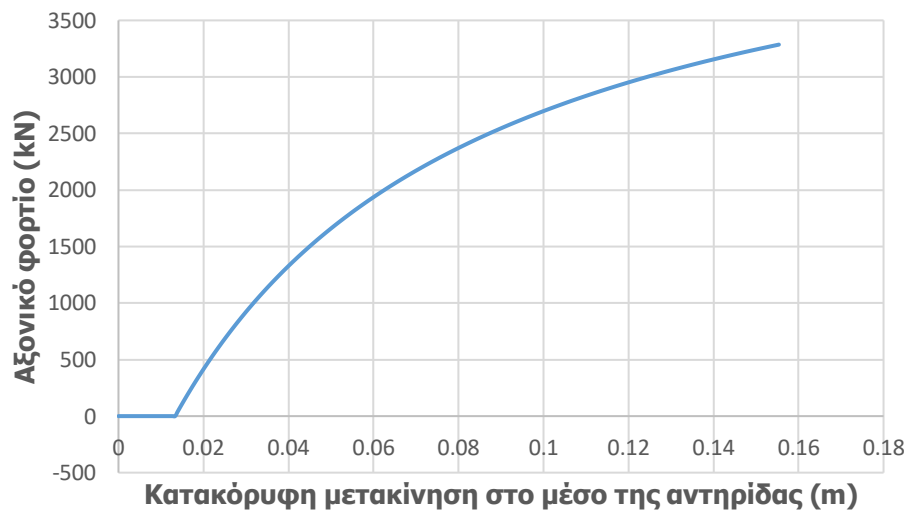


Σχήμα 3-29: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS457/16 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδα αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3-11. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-30, Σχήμα 3-31) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-30: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS457/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Το οριζόντιο τμήμα του δρόμου ισορροπίας περιγράφει το αρχικό στάδιο της ανάλυσης, κατά το οποίο ασκείται το ίδιο βάρος της αντηρίδας.

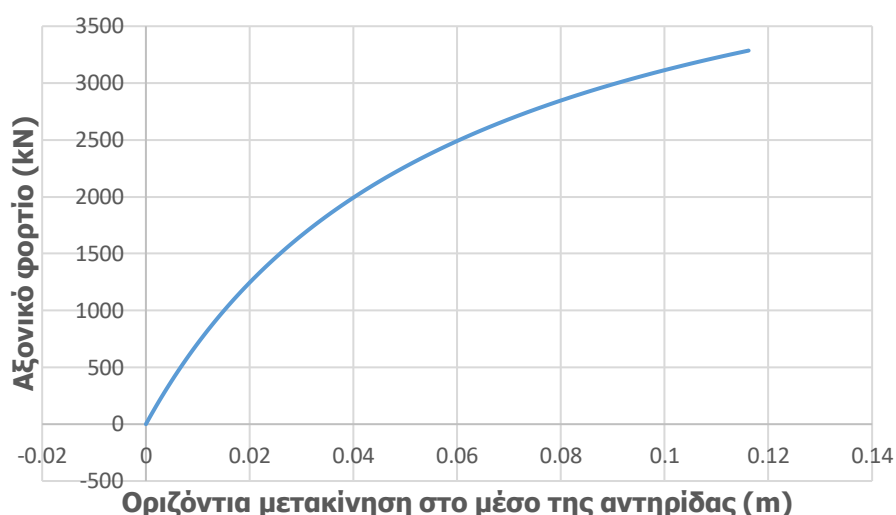
Από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκύπτει ότι ακριβώς μετά την επιβολή του ίδιου βάρους της αντηρίδας η βύθιση στο μέσο της ισούται με  $13.34 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Με τον εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της βύθισης στο μέσο της αντηρίδας, και κατ' επέκταση τον έλεγχο της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση, προκύπτει αντικαθιστώντας στην εξ. (3-19):

$$\delta_o = \frac{5 \cdot \left( 1.35 \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 222 \text{cm}^2 \right) \cdot (15 \text{m})^4}{384 \cdot 210 \text{GPa} \cdot 53959 \text{cm}^4} = 13.68 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{13.68 \cdot 10^{-3} \text{ m} - 13.34 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{13.68 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 2.48\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$





Σχήμα 3-31: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS457/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}=3285.8\text{kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων, καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων, τα οποία ποιοτικώς έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα της CHS508/20 (Σχήμα 3-13, Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15, Σχήμα 3-16, Σχήμα 3-17).

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS457/16 αντηρίδων άνω στάθμης

Πίνακας 3-14: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS457/16

$N_{Ed}$ (kN)	3285.8
$M_{Ed,y}$ (kNm)	781
$M_{Ed,z}$ (kNm)	576.8
$V_{Ed,y}$ (kN)	121.70
$V_{Ed,z}$ (kN)	168.4

Στον Πίνακα 3-14 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA για την CHS457/16.

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση  $y-y$  και στην  $z-z$ , γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed}=3285.8\text{kN}$ ,  $M_{Ed}=\sqrt{M_{Ed,y}^2+M_{Ed,z}^2}=970.9\text{kNm}$ ,  $V_{Ed}=\sqrt{V_{Ed,y}^2+V_{Ed,z}^2}=207.8\text{kN}$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (3-5) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

Είναι:  $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 207.8\text{kN} \leq 0.5 \cdot 2896.7\text{kN} \Rightarrow 207.8\text{kN} \leq 1448.4\text{kN}$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (3-6).

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 1105.1 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3285.8 \text{ kN}}{7881 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 855.4 \text{ kNm}$$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής.

$$\text{Προκύπτει: } \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.42 \text{ και } \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.88 .$$

#### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

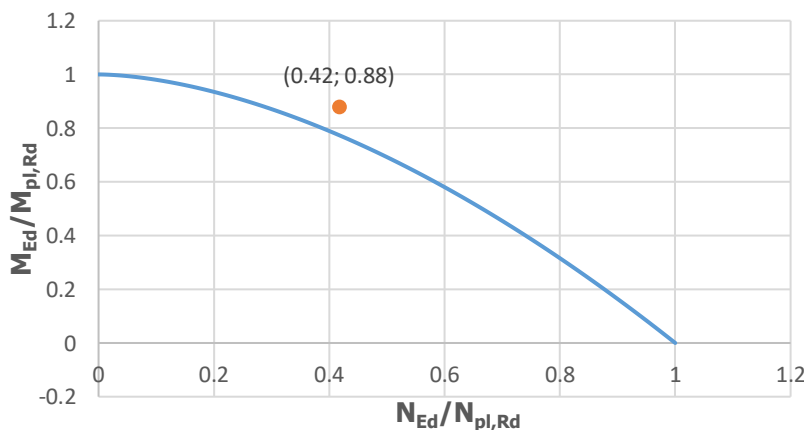
$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{970.9 \text{ kNm}}{855.4 \text{ kNm}} = 1.14$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 3-32).

Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας. Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονική δύναμης και ροπής.

Παρατηρώντας το διάγραμμα αλληλεπίδρασης γίνεται αντιληπτό, ότι το ζεύγος δρώσας ροπής και αξονικής βρίσκεται στην μη ασφαλή περιοχή, επομένως η διατομή CHS457/16 αστοχεί. Δηλαδή ο έλεγχος επάρκειας που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού δεν ικανοποιείται. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

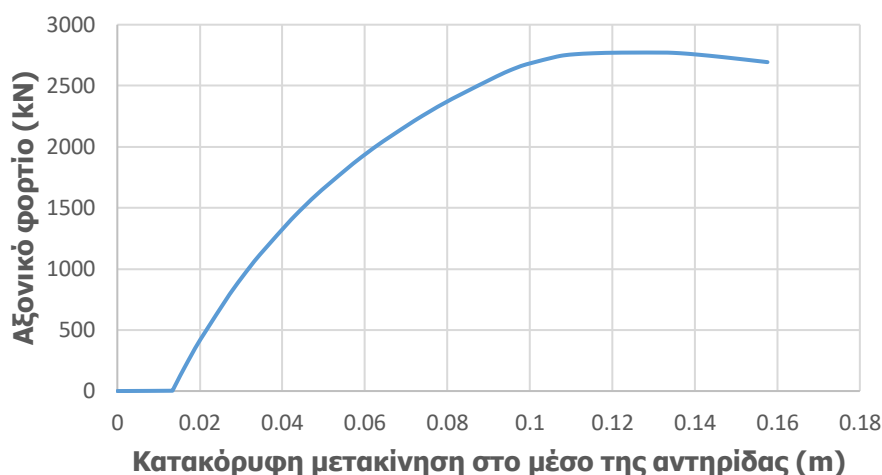


Σχήμα 3-32: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS457/16 αντηρίδας άνω στάθμης

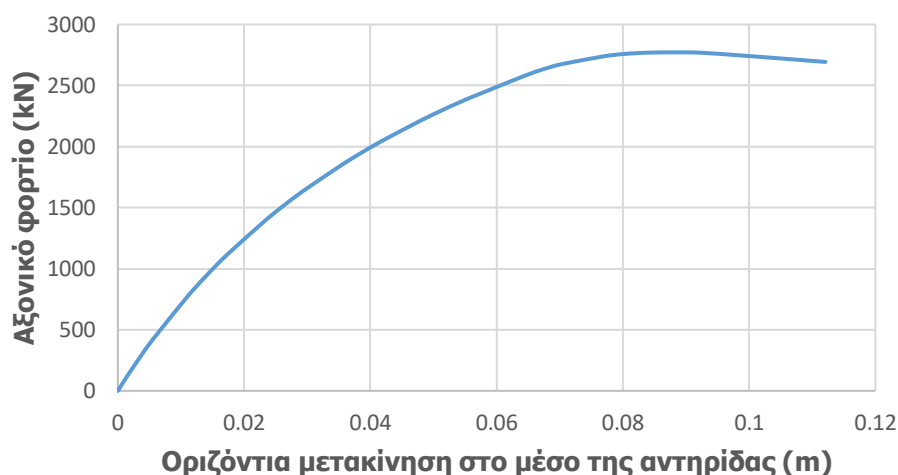
Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-33, Σχήμα 3-34) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-33: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS457/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 3-34: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS457/16 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-20) προκύπτει:  $P_u = \lambda \cdot N_{Ed} = 0.843 \cdot 3285.8 \Rightarrow P_u = 2769.9 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{3285.8\text{kN}}{2769.9\text{kN}} = 1.19 \geq 1.00$$

Ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης προκύπτει μεγαλύτερος της μονάδας. Επομένως είναι φανερό ότι η διατομή CHS457/16 δεν είναι ικανή να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της εντατικής καταπόνησης των αντηρίδων της άνω στάθμης. Άρα με την παρούσα χρησιμοποιούμενη διατομή το μέλος της αντηρίδας αστοχεί.

### 3.2.3.2 Κάτω στάθμη

Η διατομή που προέκυψε από γραμμική ανάλυση, και ικανοποιεί οριακά τις απαιτήσεις των ελέγχων επάρκειας διατομής και μέλους, είναι η CHS610/30. Εκτός από την CHS610/30, θα εξεταστεί επιπροσθέτως μη γραμμικά, και η αμέσως μεγαλύτερη διατομή CHS610/40.

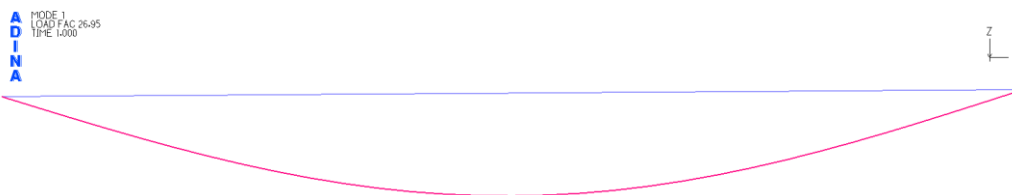
Η μεθοδολογία της διαδικασίας των μη γραμμικών αναλύσεων για την κάτω στάθμη είναι ακριβώς η ίδια με αυτή της άνω στάθμης. Η μόνη ποιοτική διαφοροποίηση που υπάρχει, είναι ως προς την τάξη μεγέθους των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Στην κάτω στάθμη το φορτίο των ωθήσεων γαιών είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο της άνω στάθμης. Επομένως τα φορτία σχεδιασμού θα αυξηθούν, κάτι που θα οδηγήσει σε απαίτηση μεγαλύτερων διατομών για την κάτω στάθμη, όπως φάνηκε εξάλλου και από την διαφοροποίηση ως προς το μέγεθος των διατομών άνω – κάτω στάθμης που προέκυψαν από την αρχική προσέγγιση μέσω των γραμμικών αναλύσεων.

### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS610/40 αντηρίδων κάτω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 10776.9\text{kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,2 όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 3-35) και η 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 3-36).



Σχήμα 3-35: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS610/40 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

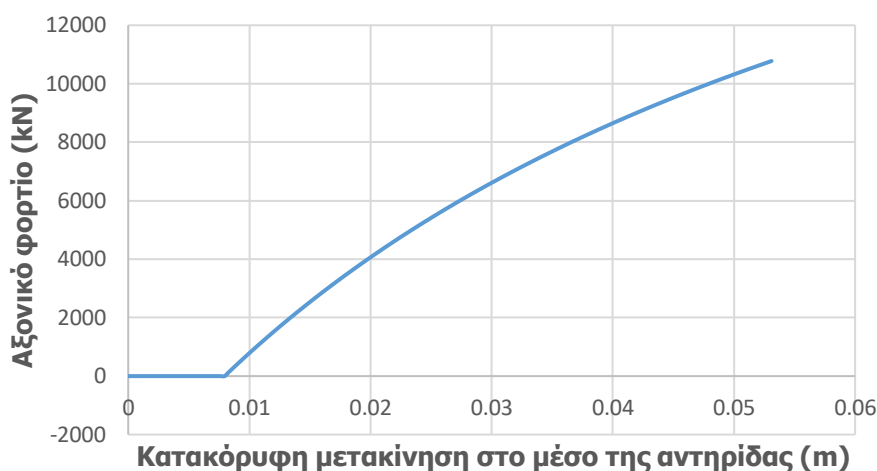


Σχήμα 3-36: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS610/40 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

#### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδα αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3-11. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-37, Σχήμα 3-38) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



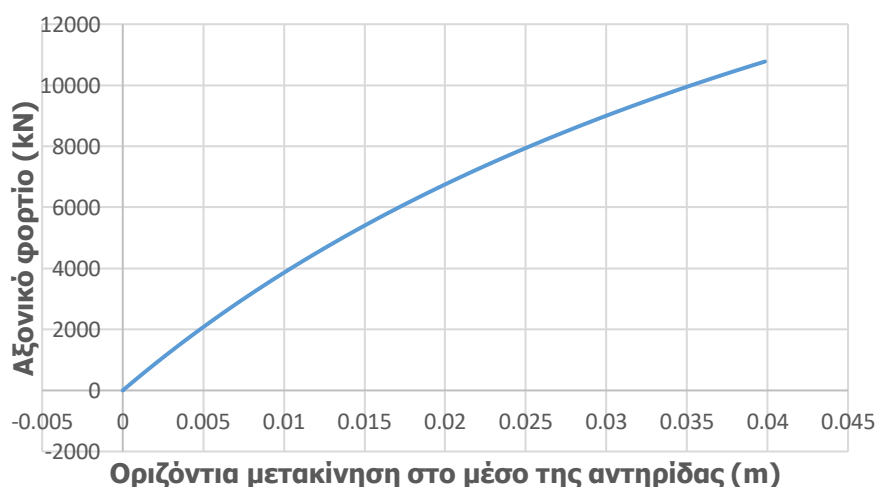
Σχήμα 3-37: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκύπτει ότι ακριβώς μετά την επιβολή του ίδιου βάρους της αντηρίδας η βύθιση στο μέσο της ισούται με  $7.96 \cdot 10^{-3}$  m.

Με τον εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της βύθισης στο μέσο της αντηρίδας, και κατ' επέκταση τον έλεγχο της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση, προκύπτει αντικαθιστώντας στην εξ. (3-19):

$$\delta_o = \frac{5 \cdot \left( 1.35 \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 716 \text{cm}^2 \right) \cdot (15\text{m})^4}{384 \cdot 210\text{GPa} \cdot 292333\text{cm}^4} = 8.15 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{8.15 \cdot 10^{-3} \text{m} - 7.96 \cdot 10^{-3} \text{m}}{8.15 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 2.33\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$



Σχήμα 3-38: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}=10776.9\text{kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων, καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων, τα οποία ποιοτικώς έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα της CHS508/20 (Σχήμα 3-13, Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15, Σχήμα 3-16, Σχήμα 3-17).

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/40 αντηρίδων κάτω στάθμης

Πίνακας 3-15: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS610/40

$N_{Ed}$ (kN)	10776.9
$M_{Ed,y}$ (kNm)	1444
$M_{Ed,z}$ (kNm)	1072
$V_{Ed,y}$ (kN)	226.30
$V_{Ed,z}$ (kN)	315.8

Στον Πίνακα 3-15 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA για την CHS610/40.

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση y-y και στην z-z, γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed}=10776.9\text{kN}$ ,  $M_{Ed}=\sqrt{M_{Ed,y}^2+M_{Ed,z}^2}=1798.4\text{kNm}$ ,  $V_{Ed}=\sqrt{V_{Ed,y}^2+V_{Ed,z}^2}=388.5\text{kN}$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (3-5) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

Είναι:  $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 388.5\text{kN} \leq 0.5 \cdot 9342.5\text{kN} \Rightarrow 388.5\text{kN} \leq 4671.3\text{kN}$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (3-6).

Επομένως είναι:  $M_{N,Rd}=M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1.7})=3117.6\text{kNm} \cdot \left[1-\left(\frac{10776.9\text{kN}}{25418\text{kN}}\right)^{1.7}\right]=2392.6\text{kNm}$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}=0.42$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}=0.58$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

Άρα η διατομή CHS610/40 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψη και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας

έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

### Βαθμός αξιοποίησης

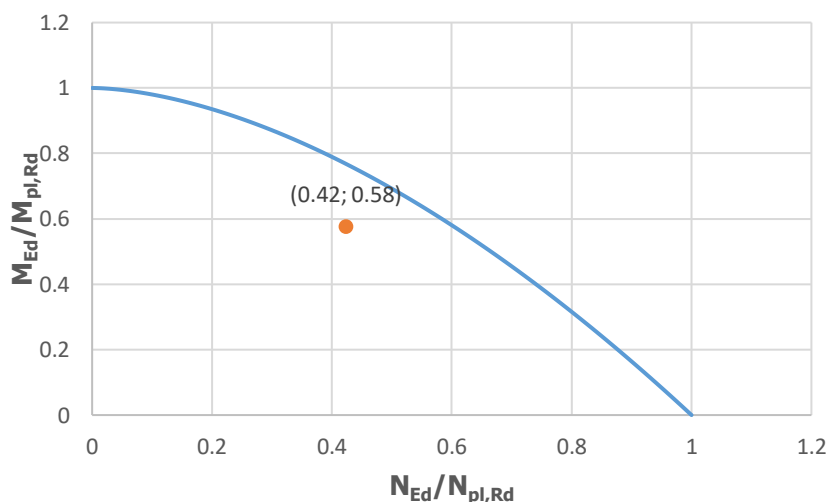
Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{1798.4\text{kNm}}{2392.6\text{kNm}} = 0.75$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 3-39).

Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας. Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονική δύναμης και ροπής.

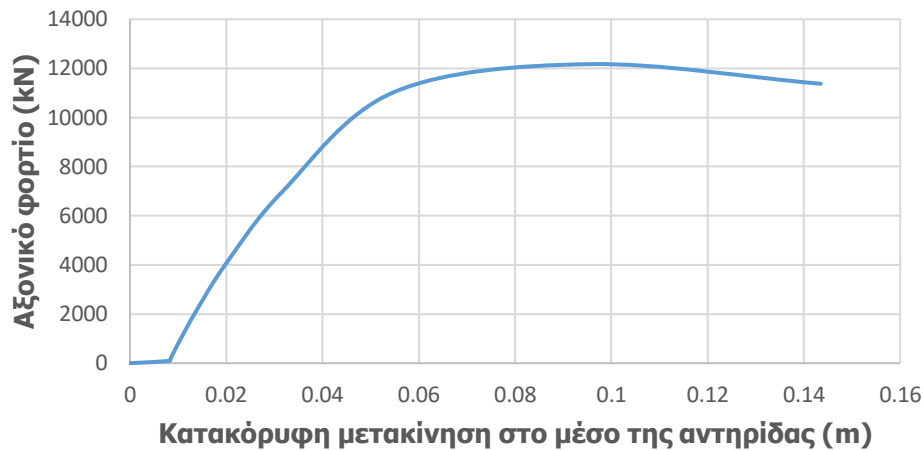


Σχήμα 3-39: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/40 αντηρίδας κάτω στάθμης

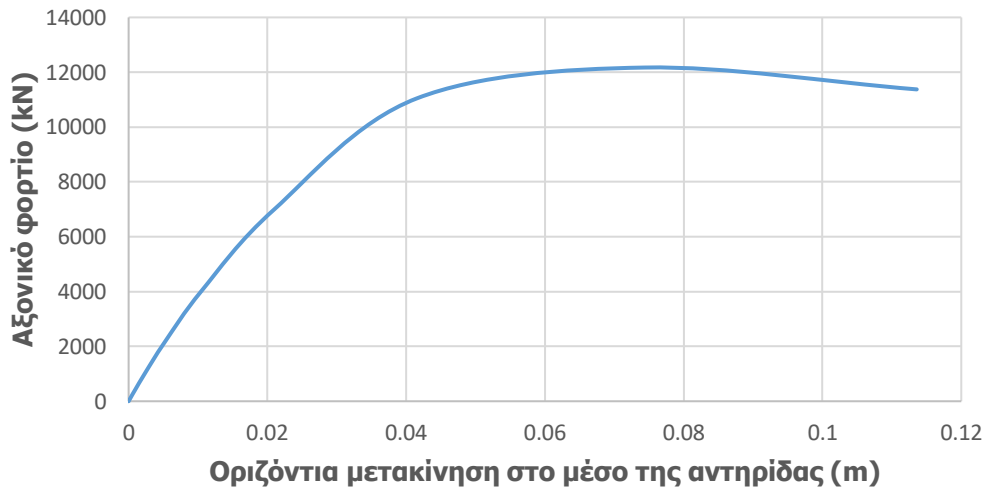
### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζωντωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-40, Σχήμα 3-41) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-40: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 3-41: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-20) προκύπτει:  $P_u = \lambda \cdot N_{Ed} = 1.129 \cdot 10776.9 \Rightarrow P_u = 12167.1 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{10776.9 \text{ kN}}{12167.1 \text{ kN}} = 0.886$$

Ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης είναι αρκετά μεγάλος, επομένως η CHS610/40 μπορεί να θεωρηθεί ως οριακή διατομή, η οποία ικανοποιεί τις απαιτήσεις (έλεγχος διατομής και μέλους) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διατομή για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης.

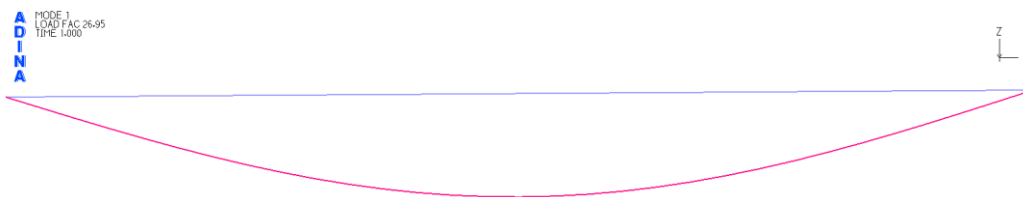


### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS610/30 αντηρίδων κάτω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Gr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 10659.2 \text{ kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,2 όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 3-42) και η 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 3-43).



Σχήμα 3-42: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS610/30 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

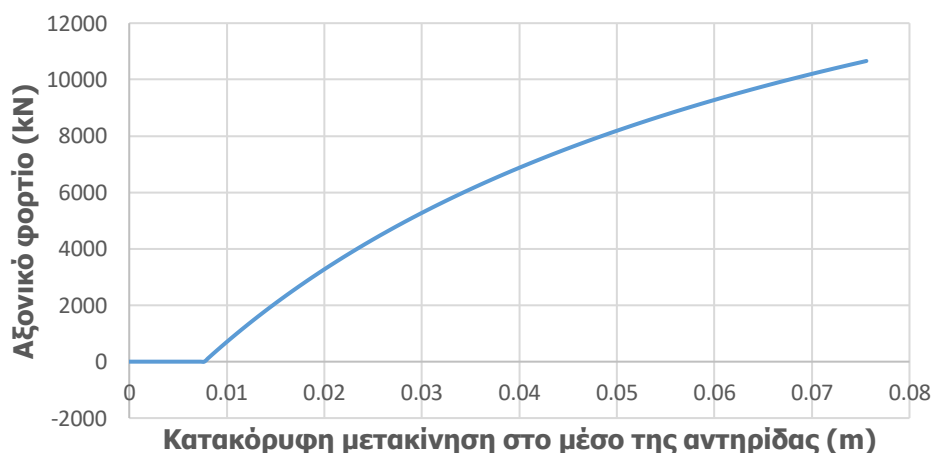


Σχήμα 3-43: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS610/30 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

#### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδας αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3-11. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-44, Σχήμα 3-45) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-44: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/30 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

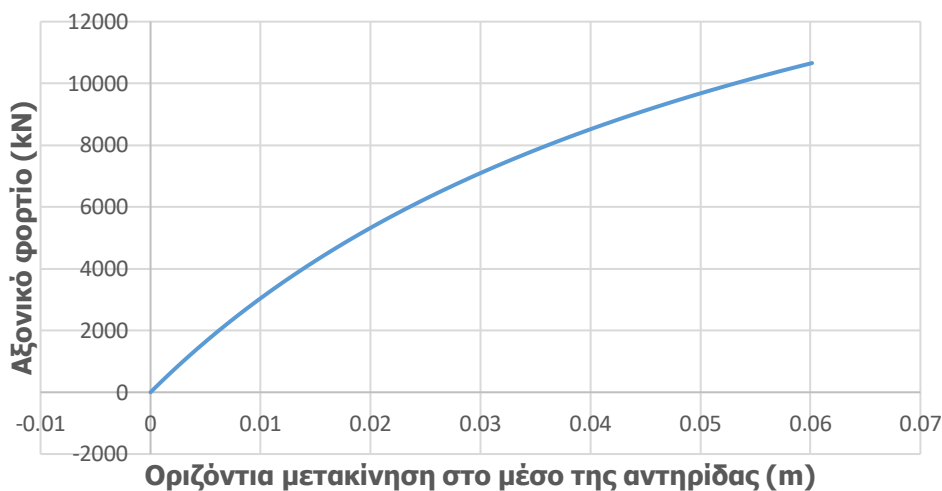
Το οριζόντιο τμήμα του δρόμου ισορροπίας περιγράφει το αρχικό στάδιο της ανάλυσης, κατά το οποίο ασκείται το ίδιο βάρος της αντηρίδας.

Από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκύπτει ότι ακριβώς μετά την επιβολή του ίδιου βάρους της αντηρίδας η βύθιση στο μέσο της ισούται με  $7.70 \cdot 10^{-3}$  m.

Με τον εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της βύθισης στο μέσο της αντηρίδας, και κατ' επέκταση τον έλεγχο της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση, προκύπτει αντικαθιστώντας στην εξ. (3-19):

$$\delta_o = \frac{5 \cdot \left( 1.35 \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 547 \text{cm}^2 \right) \cdot (15\text{m})^4}{384 \cdot 210\text{GPa} \cdot 230476 \text{cm}^4} = 7.89 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{7.89 \cdot 10^{-3} \text{m} - 7.70 \cdot 10^{-3} \text{m}}{7.89 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 2.41\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$



Σχήμα 3-45: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/30 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed} = 10659.2 \text{ kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων, καμπικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων, τα οποία ποιοτικώς έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα της CHS508/20 (Σχήμα 3-13, Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15, Σχήμα 3-16, Σχήμα 3-17).

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/30 αντηρίδων κάτω στάθμης

Πίνακα 3-16: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS610/30

$N_{Ed}$ (kN)	10659.2
$M_{Ed,y}$ (kNm)	1623
$M_{Ed,z}$ (kNm)	1277
$V_{Ed,y}$ (kN)	269.4
$V_{Ed,z}$ (kN)	351.6

Στον Πίνακα 3-16 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA για την CHS610/30.

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση y-y και στην z-z, γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed} = 1659.2 \text{ kN}$ ,  $M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 2065.2 \text{ kNm}$ ,  $V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 442.9 \text{ kN}$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (3-5) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

Είναι:  $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 442.9 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 7137.3 \text{ kN} \Rightarrow 442.9 \text{ kN} \leq 3568.65 \text{ kN}$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (3-6).

Επομένως είναι:  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 3585.86 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{10695.2 \text{ kN}}{19418.5 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 2292.4 \text{ kNm}$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής,

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.55$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.58$ .

#### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

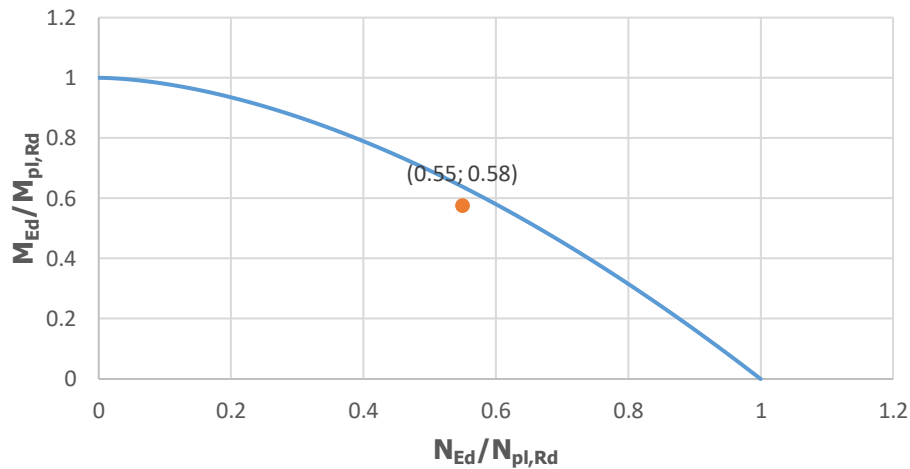
$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{2065.2 \text{ kNm}}{2292.4 \text{ kNm}} = 0.90$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 3-46).

Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας. Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονικής δύναμης και ροπής.

Παρατηρώντας το διάγραμμα αλληλεπίδρασης γίνεται αντιληπτό ότι το ζεύγος δρώσας αξονικής δύναμης και ροπής είναι οριακά εντός της ασφαλούς περιοχής. Επομένως είναι φανερό ότι οριακά ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής, ο οποίος γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.



Σχήμα 3-46: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/30 αντηρίδας κάτω στάθμης

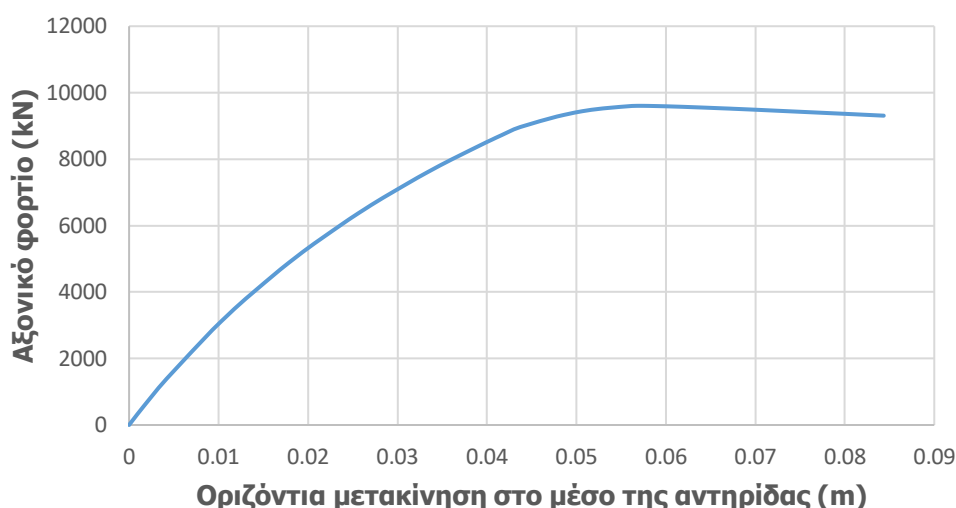
#### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 3-47, Σχήμα 3-48) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 3-47: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/30 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 3-48: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/30 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-20) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 0.90 \cdot 10695.2 \Rightarrow P_u = 9625.7 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{9625.7 \text{ kN}}{10695.2 \text{ kN}} = 1.11 \geq 1.00$$

Από την ανάλυση GMNIA προκύπτει φορτικός συντελεστής  $\Lambda = 0.90 < 1.00$ , κάτι που σημαίνει ότι το οριακό σημείο του δρόμου ισορροπίας εμφανίζεται σε τιμή αξονικού φορτίου μικρότερη από την τιμή του αξονικού φορτίου σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ). Επομένως, επέρχεται αστοχία σε τιμή αξονικού φορτίου μικρότερη από την τιμή σχεδιασμού και κατ' επέκταση γίνεται αντιληπτό ότι η CHS610/30 δεν επαρκεί για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις αντιστήριξης της κάτω στάθμης.

Άρα η CHS610/30 απορρίπτεται, και ως η πιο οριακή διατομή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί θεωρείται η CHS610/40.

### 3.2.3.3 Σύνοψη

Τέλος, πρέπει να τονιστεί, ότι μια διατομή για να είναι αποδεκτή, δεν αρκεί μόνο να μπορεί να ανταπεξέλθει έναντι των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών και ο βαθμός αξιοποίησής της να είναι μεγάλος. Πρέπει επίσης να παρουσιάζονται μετακινήσεις στην αντηρίδα, οριζοντίως και κατακορύφως, οι οποίες να είναι αποδεκτές, δηλαδή να είναι εντός ανεκτών ορίων. Παρατηρώντας τους δρόμους ισορροπίας των αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης που φτάνουν μέχρι την τιμή του αξονικού φορτίου σχεδιασμού, διαπιστώνεται ότι οι μετακινήσεις φτάνουν το πολύ μέχρι 6cm. Αλλά αυτές οι μετακινήσεις αφορούν την ΟΚΑ, δηλαδή την κατάσταση κατά την οποία στόχος είναι να μην καταρρεύσει η κατασκευή και ας παρουσιαστούν μεγάλες μετακινήσεις. Επομένως, για συνήθεις καταστάσεις (ΟΚΛ), όπου το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο έχει περίπου μέγεθος το μισό από αυτό του σχεδιασμού, οι μετακινήσεις που παρουσιάζονται είναι το πολύ 3cm, το οποίο γενικά είναι ανεκτό μέγεθος αναπτυσσόμενης μετακίνησης.

Στον Πίνακα 3-17 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τελικές οριακές διατομές που θα χρησιμοποιηθούν για τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης έπειτα από διερεύνηση που προέκυψε μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων (υποπαράγραφοι 3.2.2 και 3.2.3 αντιστοίχως).

Πίνακας 3-17: Τελικές οριακές διατομές αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
CHS508/16	CHS610/40

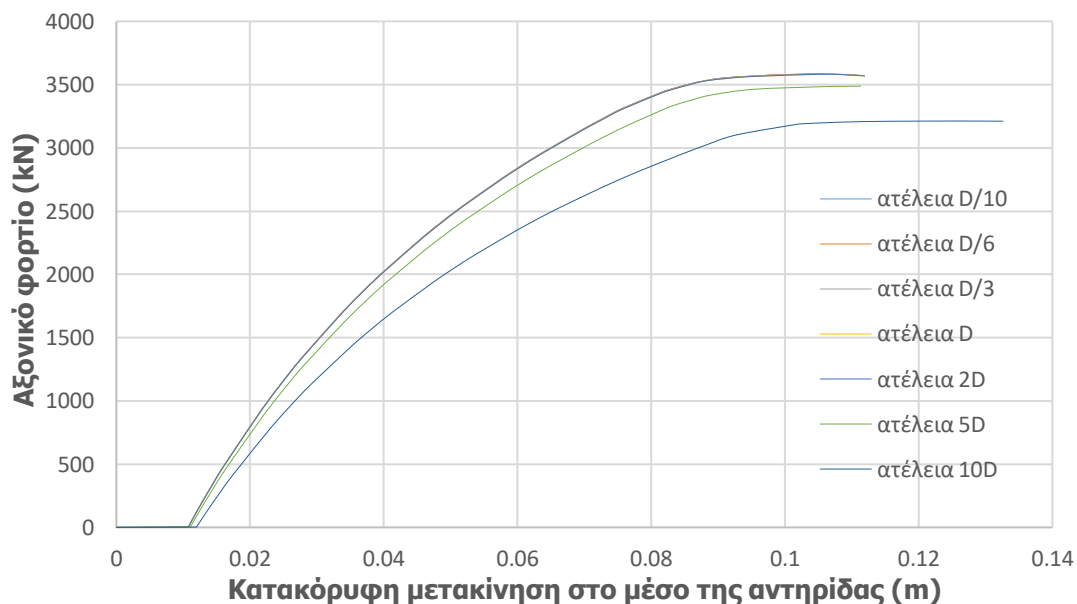
Σε ότι αφορά την διατομή CHS457/16 για την αντηρίδα της άνω στάθμης προέκυψε τόσο από τις γραμμικές όσο και από τις μη γραμμικές αναλύσεις (GNIA, GMNIA) ότι δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των εντατικών μεγεθών της άνω στάθμης, επομένως δεν επαρκεί. Αντιθέτως, για την διατομή CHS610/30 αντηρίδας κάτω στάθμης, προέκυψε από γραμμικές αναλύσεις και από την μη γραμμική ανάλυση GNIA ότι οριακά επαρκεί. Όμως η πιο ακριβή ανάλυση (GMNIA) έδειξε ότι ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης είναι για λίγο μεγαλύτερος της μονάδας, άρα εν τέλει οριακά δεν επαρκεί ως διατομή αντηρίδων της κάτω στάθμης.

### 3.2.4 Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας

Στόχος είναι να εξεταστεί το πώς επηρεάζει το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων (γεωμετρική ατέλεια) την οριακή αντοχή του μέλους της αντηρίδας. Στον παρόν σύστημα αντιστήριξης η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στηρίξεων είναι  $D/6$ , και παρουσιάζονται και άλλες πιθανές μορφές υψομετρικών διαφορών.

Για την εκάστοτε στάθμη, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας, που προκύπτουν από ανάλυση GMNIA, για διάφορες τιμές της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων.

#### 3.2.4.1 Άνω στάθμη (CHS508/16)



Σχήμα 3-49: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη υψομετρικών διαφορών

Από το ανωτέρω συγκριτικό διάγραμμα διαπιστώνεται ότι:

- για υψομετρική διαφορά στηρίξεων μικρότερη από 2D, το οριακό φορτίο παραμένει ίδιο.

- για υψομετρική διαφορά στηρίξεων μεγαλύτερη από 2D, όσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά, τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο.

Πίνακας 3-18: Φορτικός συντελεστής – Βύθιση στο μέσο της αντηρίδας για διάφορες τιμές υψομετρικών διαφορών

Υψομετρική διαφορά στηρίξεων	Φορτικός συντελεστής ( $\Lambda$ )	Βύθιση στο μέσο της αντηρίδας ( $W_z$ ) σε mm
D/10	1.0827	10.75
D/6	1.0827	10.75
D/3	1.0826	10.75
D	1.0815	10.76
2D	1.0815	10.76
5D	1.053	11.06
10D	0.97	11.99

Μια αρχική διαπίστωση είναι ότι το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων, συγκριτικά με το μήκος της αντηρίδας ( $L=15m$ ) είναι αμελητέο. Αυτό πρακτικά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάλυση του οριζόντιου επιβαλλόμενου φορτίου κατά την διεύθυνση της αντηρίδας δίνει αξονική συνιστώσα με τιμή, πολύ κοντά στην τιμή του οριζόντιου επιβαλλόμενου φορτίου. Από αυτό το συμπέρασμα, προκύπτει ότι ανεξαρτήτως της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων, η αξονική που δέχεται το μέλος της αντηρίδας είναι σε μεγάλο βαθμό η ίδια.

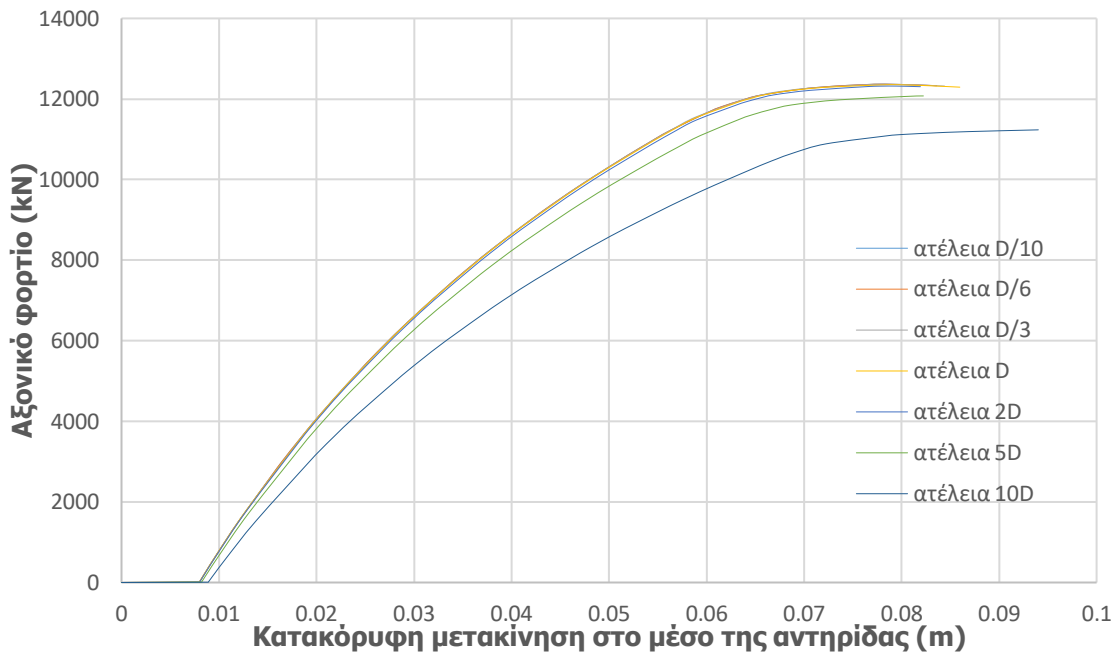
Επίσης, από τον Πίνακα 3-18 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η κλίση της αντηρίδας, τόσο μεγαλύτερη βύθιση ( $W_z$ ) παρουσιάζεται στο μέσο της. Αυτό σημαίνει ότι για να φτάσει η ροπή στο μέσο να γίνει ίση με  $M_{N,Rd}$ , και κατ' επέκταση να πλαστικοποιηθεί άρα να υπάρξει και αστοχία, απαιτείται μικρότερη προσαύξηση ( $\Lambda$ ) του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου, αφού λόγω της μεγαλύτερης βύθισης οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης αυξάνονται πιο γρήγορα.

Από τις ανωτέρω δυο παρατηρήσεις γίνεται αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά των στηρίξεων τόσο μικρότερος αναμένεται να είναι φορτικός συντελεστής  $\Lambda$ , και επομένως τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο (αξιοποιώντας την εξ. (3-20)) για την αντηρίδα.

Παρατηρώντας το Σχήμα 3-49 διαπιστώνεται ότι το ανωτέρω συμπέρασμα ισχύει για διατομές μεγαλύτερες από 2D, αφού σε αυτές υπάρχει διαφοροποίηση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-18, ως προς το μέγεθος της βύθισης  $W_z$ . Κοιτώντας τον προσεκτικά τον Πίνακα 3-18, γίνεται αντιληπτό ότι για υψομετρικές διαφορές μικρότερες από 2D, ο φορτικός συντελεστής, και κατ' επέκταση το οριακό φορτίο (αφού το αξονικό φορτίο σχεδιασμού είναι ίδιο ανεξαρτήτως υψομετρικής διαφοράς), είναι ίδιος. Δηλαδή, για ρεαλιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών, τα οποία είναι αυτά πλησίον του D/6, δεν υπάρχει διαφοροποίηση στο οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό, διότι δείχνει ουσιαστικά ότι αυτή η υψομετρική διαφορά των στηρίξεων, δηλαδή αυτό το στοιχείο μη γραμμικότητας, δεν παίζει κάποιο ρόλο, μιλώντας πάντα για ρεαλιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών.

Επομένως, από τη στιγμή που αυτή η μη γραμμικότητα δεν επηρεάζει την οριακή αντοχή της αντηρίδας, η μη γραμμική ανάλυση δεν έχει να προσφέρει κάτι. Άρα αναμένεται τα αποτελέσματα από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις να ταυτίζονται. Και τούτο επαληθεύεται, αφού για την άνω στάθμη ως οριακή διατομή προκύπτει η CHS508/16 είτε προσεγγίζοντας το πρόβλημα με γραμμικές είτε με μη γραμμικές αναλύσεις.

### 3.2.4.2 Κάτω στάθμη (CHS610/40)



Σχήμα 3-50: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη υψομετρικών διαφορών

Τα συστήματα αντιστήριξης άνω και κάτω στάθμης λειτουργούν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο αφού η μόνη τους διαφορά είναι ότι βρίσκονται σε διαφορετική στάθμη. Επομένως αναμένεται η ίδια συμπεριφορά, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-50 και ερμηνεύεται ποιοτικά ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως για την άνω στάθμη.

Στην περίπτωση της κάτω στάθμης, υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Και τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι η CHS610/30 είναι αρκετά οριακή διατομή, αφού από γραμμική ανάλυση προέκυψε ότι οριακά επαρκεί (οριακή ικανοποίηση ελέγχου μέλους), ενώ από μη γραμμική ανάλυση προέκυψε ότι οριακά δεν επαρκεί ( $\Lambda=0.90 \Rightarrow$  οριακά μικρότερο της μονάδας). Επομένως, λόγω του ότι είναι στο όριο επαρκείας ή μη, δεν συνίσταται να χρησιμοποιηθεί, και επιλέγεται η CHS610/40 ή οποία χαρακτηρίζεται ως οριακή, αφού έχει μεγάλο βαθμό αξιοποίησης, όπως προέκυψε από την ανάλυση GMNIA.

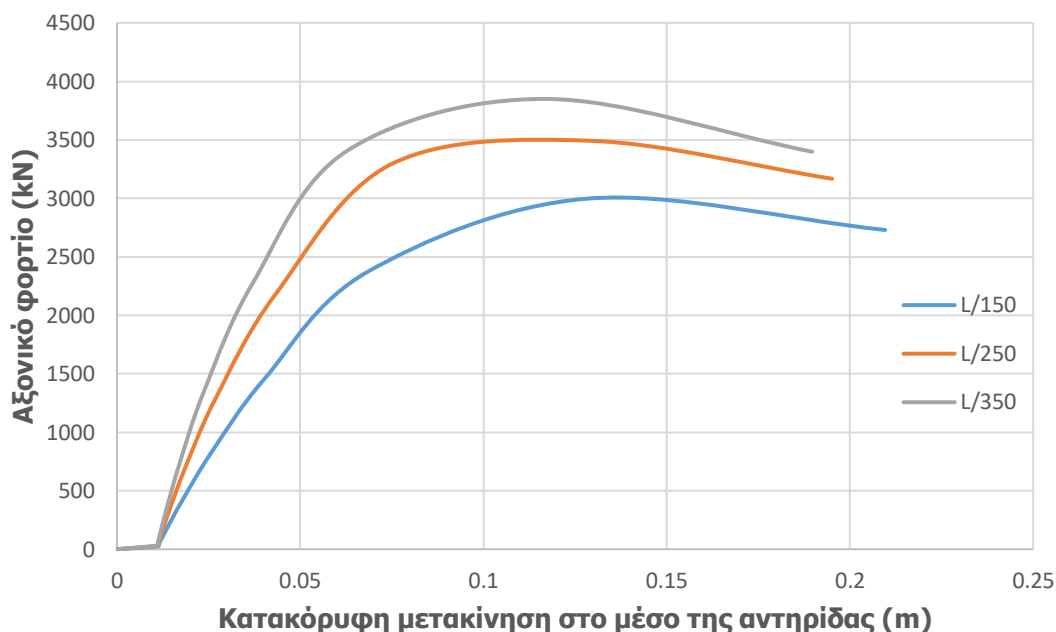
### 3.2.5 Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας

Στόχος είναι να εξεταστεί το πώς επηρεάζει το μέγεθος της ατέλειας την οριακή αντοχή του μέλους της αντηρίδας. Στον παρόν σύστημα αντιστήριξης θεωρείται δεδομένη η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στηρίξεων, η οποία είναι ίση με  $D/6$ , και εξετάζονται διαφορετικά μεγέθη ατελειών. Ο EC3 επιβάλλει για την περίπτωση επιλογής κοίλης κυκλικής διατομής, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5 (Πίνακας 5.1 του EN1993-1-1), ατέλεια μεγέθους  $L/250$ . Παρουσιάζονται επιπροσθέτως οι περιπτώσεις χρησιμοποίησης λίγο μεγαλύτερης και λίγο μικρότερης ατέλειας.

Για την εκάστοτε στάθμη, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας, που προκύπτουν από ανάλυση GMNIA, για διάφορες τιμές μεγέθους ατελειών.



## 3.2.5.1 Άνω στάθμη (CHS508/16)



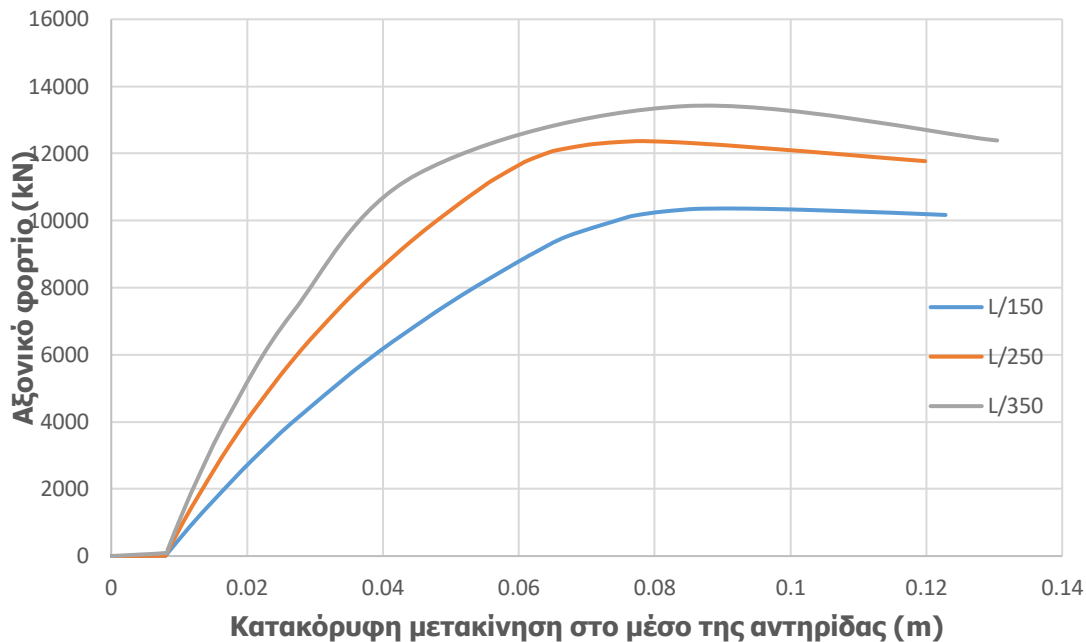
Σχήμα 3-51: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη ατελειών

Από το ανωτέρω συγκριτικό διάγραμμα προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας.

Και τούτο είναι λογικό, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τελική κατακόρυφη βύθιση του μέλους της αντηρίδας, αφού το αρχικό βέλος (ατέλεια), το οποίο θα συνεχίσει να αυξάνεται με την επιβολή όλο και μεγαλύτερου αξονικού φορτίου, είναι μεγαλύτερο. Επομένως, λόγω μεγαλύτερης βύθισης, οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης αυξάνονται ταχύτερα κάτι που οδηγεί σε γρηγορότερη πλαστικοποίηση στην κρίσιμη διατομή του μέλους της αντηρίδας και κατ' επέκταση απαιτείται μικρότερη προσαύξηση ( $\Lambda$ ) του αξονικά επιβαλλόμενου φορτίου του μέλους της αντηρίδας ώστε να επιτευχθεί εν τέλει η πλαστικοποίηση, και άρα αστοχία (αναλυτική εξήγηση στην υποπαράγραφο 3.2.4.1). Μικρότερος φορτικός συντελεστής, ισοδυναμεί με μικρότερο οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Αυτή είναι η ποιοτική ερμηνεία του συμπεράσματος που προκύπτει από το Σχήμα 3-51.

Επίσης γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 3-51, ότι χρησιμοποίηση λίγο μικρότερης ατέλειας (L/350) δεν οδηγεί σε τόσο μεγάλη αύξηση του οριακού φορτίου, όσο είναι η αντίστοιχη πτώση του λόγω χρησιμοποίησης λίγο μεγαλύτερης ατέλειας (L/150). Επομένως, είναι απαραίτητο κάθε φορά να χρησιμοποιείται το ρεαλιστικό μέγεθος ατέλειας. Συμπερασματικά, αν χρησιμοποιηθεί μικρότερο μέγεθος ατέλειας, σε σχέση με το πραγματικό, η αύξηση του οριακού φορτίου είναι μικρή. Αντίθετα αν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο μέγεθος ατέλειας, σε σχέση με το πραγματικό, η πτώση του οριακού φορτίου είναι αξιοσημείωτη, κάτι που υποδηλώνει ότι μικρή αύξηση της ατέλειας οδηγεί σε σημαντική πτώση των αντοχών του μέλους της αντηρίδας.

### 3.2.5.2 Κάτω στάθμη (CHS610/40)



Σχήμα 3-52: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη ατελειών

Αναμένεται ακριβώς η ίδια συμπεριφορά με αυτή του συστήματος αντιστήριξης άνω στάθμης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-52 και ερμηνεύεται ποιοτικά με τον ίδιο τρόπο όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως για την άνω στάθμη.

## 3.3 Διαστασιολόγηση τραβερσών

### 3.3.1 Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος

Οι τραβέρσες αποτελούν τα διαμήκη στοιχεία του συστήματος αντιστήριξης τα οποία εδράζονται κατακορύφως επί των βραχέων προβόλων, οι οποίοι εξέχουν ανά τρίτο πάσσαλο. Αποτελούνται από συγκολλητή διατομή 2HEB450 η οποία είναι με τέτοιο τρόπο προσανατολισμένη ώστε ο ισχυρός της άξονας (y-y) να λειτουργεί σε οριζόντιο επίπεδο. Τέλος, στις τραβέρσες συνδέονται μετωπικά οι αντηρίδες της κάτω στάθμης και αποτελούν τον συνδετικό κρίκο για τη μεταφορά του φορτίου από τις αντηρίδες στο έδαφος που βρίσκεται εκατέρωθεν της εκσκαφής, και αντιστρόφως.

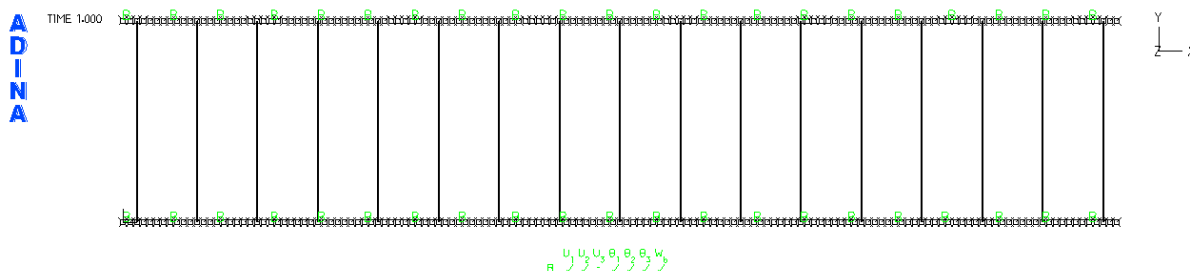
Το μέλος της τραβέρσας δεν παρουσιάζει κάποια μη γραμμικότητα γεωμετρίας ή υλικού, επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η λειτουργία του και οι απαιτήσεις ελέγχου του είναι οι συνήθεις. Άρα η τραβέρσα θα ελεγχθεί με βάση τα εντατικά μεγέθη που θα προκύψουν από γραμμικές αναλύσεις.

Το εξωτερικό μέρος της τραβέρσας εφάπτεται στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, και η τριβή που αναπτύσσεται, λόγω σχετικής μετακίνησης μεταξύ τους, προσομοιώνεται με γραμμικά ελατήρια τα οποία έχουν τιμή δυσκαμψίας ίση με το 20% της δυσκαμψίας των ελατηρίων του εδάφους (υπόδειξη γεωτεχνικής μελέτης).

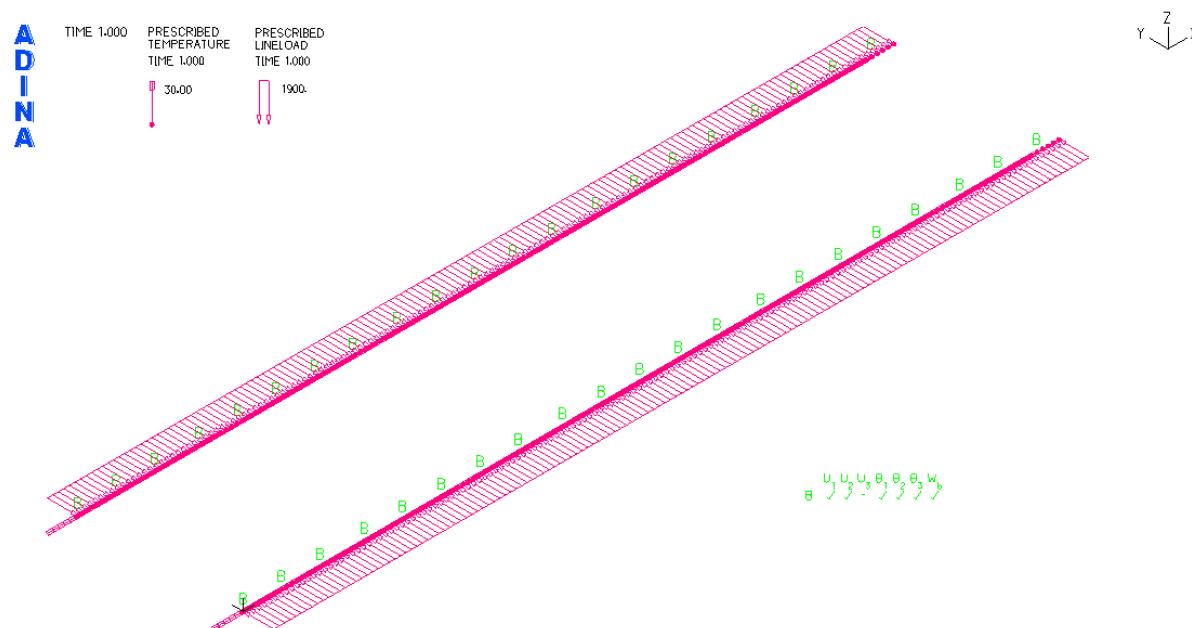
Η τραβέρσα διαστασιολογείται με βάση τον στατικό συνδυασμό φόρτισης  $1.35 \cdot G + 1.35 \cdot \Omega G + 1.50 \cdot \Delta T$  του Πίνακα 3-2. Η θερμοκρασιακή μεταβολή, λήφθηκε, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 ίση με  $\Delta T = 20^\circ$  και το φορτίο ωθήσεων γαιών και το φορτίο ωθήσεων γαιών σύμφωνα με τις τιμές των μεγεθών,

άνω και κάτω στάθμης, που υποδεικνύει ο Πίνακας 3-3. Το γραμμικό φορτίο των ωθήσεων γαιών επιβάλλεται στον κεφαλόδεσμο και στην τραβέρσα (άνω και κάτω στάθμη του χωρικού προσομοιώματος αντιστοίχως). Το φορτίο λόγω ιδίου βάρους και ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής επιβάλλεται σε όλα τα μέλη του συστήματος αντιστήριξης, τα οποία αποτελούνται τόσο από χάλυβα όσο και από σκυρόδεμα.

Στο Σχήμα 3-53 παρουσιάζεται το χωρικό προσομοίωμα του μέλους της τραβέρσας με τις αντηρίδες κάτω στάθμης, και στο Σχήμα 3-54 παρουσιάζονται οι φορτίσεις του μέλους της τραβέρσας,



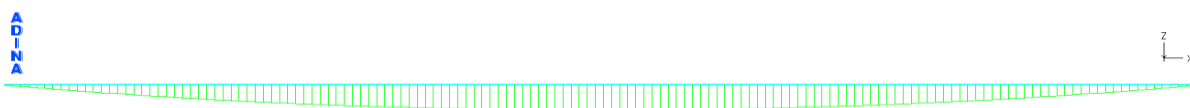
Σχήμα 3-53: Χωρικό προσομοίωμα μέλους τραβέρσας και αντηρίδων κάτω στάθμης



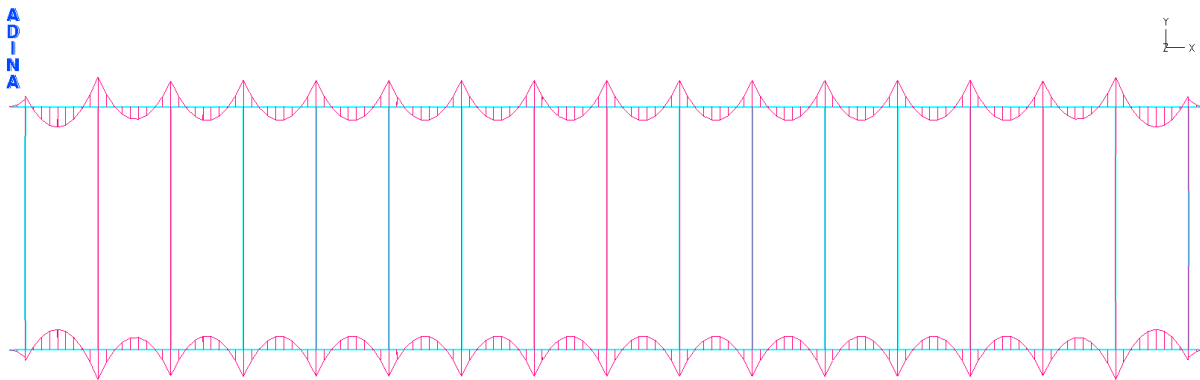
Σχήμα 3-54: Επιβαλλόμενο φορτίο ωθήσεων γαιών και ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής στο μέλος της τραβέρσας

### 3.3.2 Γραμμικές αναλύσεις

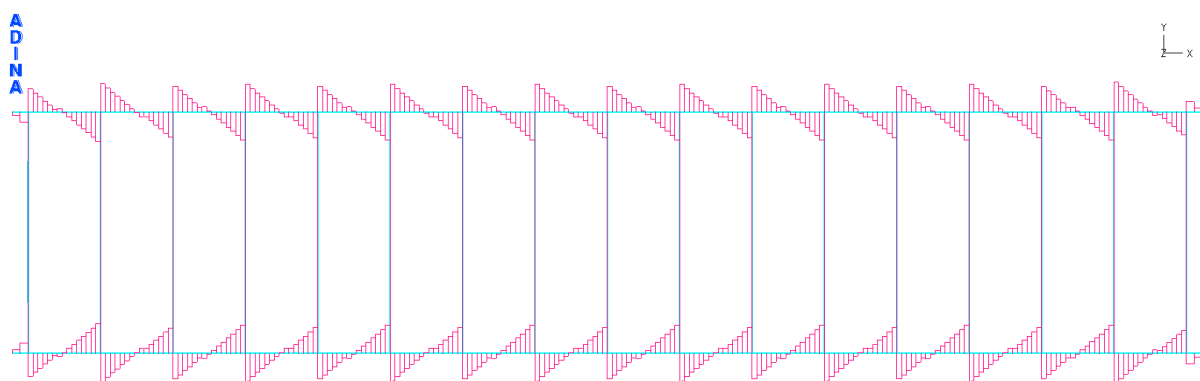
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3-55, Σχήμα 3-56, Σχήμα 3-57) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον ανωτέρω συνδυασμό φόρτισης.



Σχήμα 3-55: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=518.45\text{kN}$



Σχήμα 3-56: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $M_y=2647\text{kNm}$



Σχήμα 3-57: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $V_z=3970.4\text{kN}$

Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που εμφανίζονται στα ανωτέρω διαγράμματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3-19 και διαφοροποιούνται στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα. Αξιοποιώντας τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού του Πίνακα 3-19, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της τραβέρσας 2HEB450.

Παρατηρώντας τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών, γίνεται αντιληπτό, ότι η εικόνα της εντατικής κατάστασης επαναλαμβάνεται αυτούσια σε κάθε φάτνωμα, και διαφοροποιείται μόνο στο πρώτο και στο τελευταίο φάτνωμα, όπου η εντατική κατάσταση στα ακριανά αυτά φάτνωμα είναι ίδια λόγω συμμετρίας φορέα και φόρτισης. Επομένως, με βάση την ανωτέρω παρατήρηση, οι κρίσιμες θέσεις ελέγχου που προκύπτουν είναι:

- Το άνοιγμα και η στήριξη του τυχόν κεντρικού φαντώματος (Γενική περίπτωση), και κατά προτίμηση του μεσαίου φαντώματος, διότι εκεί η αξονική είναι μέγιστη.
- Το άνοιγμα και η στήριξη του 1<sup>ου</sup> φαντώματος (ή ισοδύναμα του τελευταίου φαντώματος).

Επίσης, υφίσταται και το διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  και τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$ , τα οποία αναπτύσσονται λόγω του ίδιου βάρους της τραβέρσας. Αλλά το μέγεθος της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής έντασης που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και επιπλέον η τιμή του είναι περίπου μηδενική στις κρίσιμες θέσεις ελέγχου. Για τις υπόλοιπες θέσεις, όπου έχει κάποια μικρή τιμή, τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη είναι αρκετά μικρότερα από ότι είναι στις κρίσιμες θέσεις. Επομένως, κρίνονται λιγότερο δυσμενείς οι θέσεις ελέγχου όπου το  $M_z$  και η  $V_y$  έχουν κάποιο μέγεθος, έστω και μικρό. Για το λόγο αυτό παραλείπεται τελείως η αναφορά στο διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  και τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$ .

Πίνακας 3-19: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού για την τραβέρσα 2HEB450

	<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
Γενική περίπτωση					
Άνοιγμα	518.45	1121.1	0	0	417.73
Στήριξη	513.72	2505.5	0	0	3734.9
1 <sup>ο</sup> φάτνωμα					
Άνοιγμα	82.48	1396.3	0	0	448.62
Στήριξη	157.4	2647	0	0	3970.4
0.5m από την Στήριξη	145.41	1456	0	0	3351.7
0.10m από την Στήριξη	133.23	449.78	0	0	2776.2

**Έλεγχος επάρκειας διατομής (2HEB450)**

Η διατομή 2HEB450 διαστασιολογείται ως μια HEB450 με τις μισές τιμές των εντατικών μεγεθών.

Στον Πίνακα 3-20 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της HEB450, οι τιμές σχεδιασμού για τους συντελεστές των υλικών καθώς και οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας.

Πίνακας 3-20: Δεδομένα – HEB450

<b>h</b> (mm)	450	<b>A</b> (cm <sup>2</sup> )	218
<b>b</b> (mm)	300	<b>A<sub>v</sub></b> (cm <sup>2</sup> )	79.68
<b>t<sub>f</sub></b> (mm)	26	<b>I<sub>y</sub></b> (cm <sup>4</sup> )	79890
<b>t<sub>w</sub></b> (mm)	14	<b>I<sub>z</sub></b> (cm <sup>4</sup> )	11720
<b>r</b> (mm)	27	<b>W<sub>el,y</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	3551
<b>f<sub>y</sub></b> (kN/cm <sup>2</sup> )	35.5	<b>W<sub>el,z</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	781
<b>E</b> (kN/cm <sup>2</sup> )	21000	<b>W<sub>pl,y</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	3982
γ <sub>Mo</sub>	1.00	<b>W<sub>pl,z</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	1198

**Εύρεση κατηγορίας διατομής της 2HEB450**

Η γενικότερη απαίτηση είναι ότι οι διατομές του συστήματος αντιστήριξης, άρα και της τραβέρας, πρέπει να είναι κατηγορίας 1.

- Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2α)

Η διατομή της τραβέρας υπόκειται σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 33 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} + \frac{b}{2}\right)}{t_f} = \frac{300\text{mm}}{26\text{mm}} = 11.5 \leq 26.7 = 33 \cdot \epsilon$$

- Κατάταξη προεξέχοντων ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2β)

Το προεξέχων πέλας υπόκειται σε θλίψη, , επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 9 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} = \frac{116\text{mm}}{26\text{mm}} = 4.5 \leq 7.3 = 9 \cdot \epsilon$$

Αφού ικανοποιούνται και οι δυο ανωτέρω ανισότητες, η διατομή είναι κατηγορίας 1.

#### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

Από τη στιγμή που η 2HEB450 είναι κατηγορίας 1, είναι επιτρεπτό να υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

Αξιοποιώντας τις εξ. (3-2), (3-3), (3-4) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{218 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 7739 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3982 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 1413.6 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1198 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 425.29 \text{ kNm}$$

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{79.68 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1633.1 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{79.68 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1633.1 \text{ kN}$$

#### **Άνοιγμα – Γενική περίπτωση**

Στον Πίνακα 3-21 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση του ανοίγματος – Γενική περίπτωση.

Πίνακας 3-21: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – Γενική περίπτωση)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
259.23	560.56	0	0	208.87

#### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-5) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 816.55 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 208.87 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1 \text{ kN} \Rightarrow 208.87 \text{ kN} \leq 816.55 \text{ kN}$$

Επομένως, αφού ικανοποιείται η εξ. (3-5), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η διατομή HEB450 είναι διατομή διπλής συμμετρίας σχήματος I. Επομένως, το αν θα υπάρξει απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω αξονικής, καθορίζεται από το αν ικανοποιούνται οι εξ. (3-21), (3-22), (3-23) ή όχι.

$$N_{Ed} \leq 0.25 \cdot N_{pl,Rd} \tag{3-21}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3-22)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3-23)$$

Αντικαθιστώντας στις ανωτέρω εξισώσεις προκύπτει:

$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.13 \leq 1.00$  και  $\frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0})} = 0.26 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0})} = 0.13 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος του δρώντος μεγέθους προς το μέγεθος αντοχής.

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{560.56 \text{ kNm}}{1413.6 \text{ kNm}} = 0.40 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{425.29 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{208.87 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.13$$

### Στήριξη – Γενική περίπτωση

Στον Πίνακα 3-22 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση της στήριξης – Γενική περίπτωση.

Πίνακας 3-22: Μεγέθη σχεδιασμού (Στήριξη – Γενική περίπτωση)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
256.86	1252.7	0	0	1867.5

### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-5) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 816.55 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1867.5 \text{ kN} \geq 1633.1 \text{ kN}$$

Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενισχυτικού ελάσματος. Στόχος είναι η ενίσχυση του κορμού, ώστε να μπορεί να παραληφθεί από τη διατομή η τέμνουσα σχεδιασμού.

Πίνακας 3-23: Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος

Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος	
b (mm)	340
t (mm)	20

Η επιλογή των διαστάσεων του ενισχυτικού ελάσματος (Πίνακας 3-23) έγινε με την εξής λογική:

Το ύψος του ενισχυτικού ελάσματος μπορεί να εκτείνεται το πολύ μέχρι το σημείο εκείνο του κορμού όπου αρχίζει η καμπύλωση της διατομής. Επομένως, το μέγιστο επιτρεπτό ύψος είναι ίσο με:

$$b_{\text{ελάσματος}} = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r \Rightarrow b_{\text{ελάσματος}} = 450 - 2 \cdot 26 - 2 \cdot 27 \Rightarrow b_{\text{ελάσματος}} = 344 \text{ mm}$$

Άρα επιλέγεται έλασμα ύψους  $b=340 \text{ mm}$ . Επίσης, ένα σύνηθες πάχος ελάσματος είναι  $20 \text{ mm}$ .

#### Νέα χαρακτηριστικά διατομής

Το έλασμα τοποθετείται εκατέρωθεν του κορμού, δηλαδή σε κάθε κορμό αντιστοιχούν 2 ελάσματα. Άρα το νέο εμβαδόν κορμού, το οποίο θα κληθεί να παραλάβει την τέμνουσα σχεδιασμού, είναι:

$$A_v = A_w + 2 \cdot (b \cdot t) \quad (3-24)$$

Στον Πίνακα 3-24 παρουσιάζονται τα νέα χαρακτηριστικά της διατομής.

Πίνακας 3-24: Νέα χαρακτηριστικά διατομής

$A_v$ (cm <sup>2</sup> )	215.68
$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	4420.56
$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	4420.56

Επομένως ο έλεγχος έναντι τέμνουσας γίνεται ως εξής:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 4420.56 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 2210.28 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1867.5 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 4420.56 \text{ kN} \Rightarrow 1867.5 \text{ kN} \leq 2210.28 \text{ kN}$$

Αφού ικανοποιείται η εξ. (3-5), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (3-21), (3-22), (3-23) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.13 \leq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M_0})} = 0.26 \leq 1.00, \quad \text{άρα είναι } M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \quad (\text{δεν χρειάζεται απομείωση}).$$

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M_0})} = 0.13 \leq 1.00, \quad \text{άρα είναι } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad (\text{δεν χρειάζεται απομείωση}).$$

Η χρήση του ενισχυτικού ελάσματος δεν βοηθάει στην παραλαβή της ροπής σχεδιασμού. Για αυτό στους ανωτέρω υπολογισμούς δεν εισάγεται με κάποιο τρόπο η ύπαρξη του ενισχυτικού ελάσματος. Τοποθετήθηκε αποκλειστικά για την ενίσχυση της διατομής έναντι τέμνουσας δύναμης.

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1252.7 \text{ kNm}}{1413.6 \text{ kNm}} = 0.89 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{4420.56 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{425.29 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1867.5 \text{ kN}}{4420.56 \text{ kN}} = 0.42$$

Η ανωτέρω διαδικασία ελέγχου επαναλαμβάνεται αυτούσια για το άνοιγμα και τη στήριξη του 1<sup>ου</sup> φαντώματος. Προκύπτει ότι για το άνοιγμα δεν απαιτείται χρήση ενισχυτικού ελάσματος ενώ για το στήριγμα είναι επιτακτική η χρήση του.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα εντακτικά μεγέθη σχεδιασμού και οι βαθμοί αξιοποίησης για το άνοιγμα και το στήριγμα του 1<sup>ου</sup> φαντώματος.



**Άνοιγμα – 1° Φάτνωμα**

Στον Πίνακα 3-25 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση του ανοίγματος – 1° Φάτνωμα.

Πίνακας 3-25: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – 1° Φάτνωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
41.24	698.14	0	0	224.31

**Βαθμός αξιοποίησης**

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{698.14\text{kNm}}{1413.6\text{kNm}} = 0.49 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{1633.1\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{425.29\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{224.31\text{kN}}{1633.1\text{kN}} = 0.14$$

**Στήριξη – 1° Φάτνωμα**

Στον Πίνακα 3-26 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση της στήριξης – 1° Φάτνωμα.

Πίνακας 3-26: Μεγέθη σχεδιασμού (Στήριξη – 1° Φάτνωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
78.69	1323.5	0	0	1985.2

**Βαθμός αξιοποίησης**

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1323.5\text{kNm}}{1413.6\text{kNm}} = 0.94 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{4420.56\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{425.29\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1985.2\text{kN}}{4420.56\text{kN}} = 0.45$$

Όπως διαπιστώθηκε από τους ελέγχους διατομής για το άνοιγμα (Γενική περίπτωση και 1° Φάτνωμα) δεν απαιτείται η χρήση ενισχυτικού ελάσματος. Είναι φανερό, ότι δεν είναι σωστό από άποψη σχεδιασμού να εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα σε όλο το μήκος της τραβέρσας, και για λόγους οικονομίας αλλά και επειδή μια τέτοια θεώρηση καθιστά υπερβολικά υπέρ της ασφαλείας τον σχεδιασμό της τραβέρσας. Επομένως, τίθεται άμεσα ο προβληματισμός μέχρι ποιο μήκος εκατέρωθεν της εκάστοτε στήριξης θα εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα. Θα εξεταστεί ποιο είναι το απαιτούμενο μήκος στο οποίο πρέπει να εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα, εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φατνώματος. Και επειδή η περιοχή της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φατνώματος είναι η δυσμενέστερη περιοχή, από άποψη αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών, το μήκος ελάσματος που θα υπολογιστεί σίγουρα θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις, για παραλαβή της τέμνουσας σχεδιασμού, της περιοχής γύρω από όποια άλλη στήριξη.

**Σε απόσταση 0.5m από τη στήριξη – 1° Φάτνωμα**

Στον Πίνακα 3-27 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.5m από την στήριξη – 1° Φάτνωμα.

Πίνακας 3-27: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.5m από την στήριξη – 1° Φάτνωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
72.71	727.98	0	0	1675.8

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-5) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 816.55\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1675.8\text{kN} \geq 1633.1\text{kN}$$

Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση ενισχυτικού ελάσματος μέχρι και σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φάτνωματος.

### Σε απόσταση 1.00m από τη στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα

Στον Πίνακα 3-28 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.10m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα.

Πίνακας 3-28: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.10m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
66.62	224.89	0	0	1388.1

### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-5) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 816.55\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1388.1\text{kN} \geq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 1388.1\text{kN} \geq 816.55\text{kN}$$

Επομένως απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της καμπτικής αντίστασης της διατομής σε  $M_{V,Rd}$ .

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (3-25)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-25) προκύπτει συντελεστής απομείωσης "ρ" ίσος με:

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot 1388.1\text{kN}}{1633.1\text{kN}} - 1 \right)^2 \Rightarrow \rho = 0.49$$

Για διατομές με ίσα πέλματα καμπτόμενες περί τον ισχυρό άξονα, ανεξάρτητα κατηγορίας, είναι:

$$M_{V,y,Rd} = \min \left\{ \left( W_{pl,y} - \frac{\rho}{4} \cdot \frac{A_v^2}{t_w} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} ; M_{c,y,Rd} \right\} \quad (3-26)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3-26) προκύπτει:

$$M_{V,y,Rd} = 1216.4\text{kN}$$

### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (3-21), (3-22), (3-23) προκύπτει:

$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.03 \leq 1.00$  και  $\frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M0})} = 0.07 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,y,Rd} = M_{V,y,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M0})} = 0.03 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

**Βαθμός αξιοποίησης**

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{224.89\text{kNm}}{1216.4\text{kNm}} = 0.18 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{1633.1\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{425.29\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1388.1\text{kN}}{1633.1\text{kN}} = 0.85$$

Από τον βαθμό αξιοποίησης έναντι τέμνουσας (ίσος με 0.85), λόγω του ότι είναι μεγάλος, γίνεται αντιληπτό ότι σχεδόν οριακά μπορεί η διατομή από μόνη της να παραλάβει την τέμνουσα σχεδιασμού. Δηλαδή, οριακά αποφεύγεται η χρήση του ενισχυτικού ελάσματος.

Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ενισχυτικό έλασμα πρέπει να εκτείνεται εκατέρωθεν της εκάστοτε στήριξης, σε μήκος ίσο με 1.00m.

Από κατασκευαστικής απόψεως, τα ενισχυτικά ελάσματα συγκολλούνται στον κορμό της εκάστοτε ΗΕΒ450, πριν οι δυο ΗΕΒ450 συγκολληθούν μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί το σχήμα της διατομής της τραβέρσας.

**Έλεγχος μέλους (2ΗΕΒ450)**

Το μέλος της τραβέρσας στηρίζεται κατακορύφως σε κοντούς προβόλους που εξέχουν από τους πασσάλους, δεσμεύεται οριζοντίως από τις αντηρίδες οι οποίες έχουν αρκετά μεγάλη διατομή ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι κρατούν ακλόνητο το σημείο επαφής τους με την τραβέρσα και επίσης από την εξωτερική πλευρά της τραβέρσας υπάρχει το έδαφος το οποίο έχει επενδυθεί με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15cm. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την μεγάλη διατομή της αντηρίδας και την μικρή επιβαλλόμενη θλιπτική αξονική δύναμη, συνηγορούν στο ότι το μέλος της αντηρίδας δεν κινδυνεύει από λυγισμό του μέλους τους. Αλλά για λόγους πληρότητας, θα παρουσιαστεί στην συνέχεια ο έλεγχος μέλους της τραβέρσας αξιοποιώντας τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού που έχουν προκύψει από τις ανωτέρω γραμμικές αναλύσεις.

Στην περίπτωση ελέγχου του λυγισμού του μέλους, δεν είναι σωστό να γίνει η θεώρηση που έγινε στον έλεγχο διατομής, το ότι δηλαδή μπορεί να εξεταστεί η μισή διατομή (ΗΕΒ450) με τα μισά εντατικά μεγέθη αντί όλης της διατομής με τα συνολικά εντατικά μεγέθη. Και τούτο γιατί στον λυγισμό παίζει ρόλο η γεωμετρία της διατομής. Επομένως χρειάζεται η συνολική διατομή για μπορέσει να ελεγχθεί η συμπεριφορά της έναντι λυγισμού.

Επίσης, παρατηρώντας το διάγραμμα αξονικών δυνάμεων της τραβέρσας (Σχήμα 3-55) γίνεται αντιληπτό, ότι αξιόλογο μέγεθος αξονικής δύναμης υπάρχει στο κεντρικό μέρος της τραβέρσας. Άρα εκεί αναμένεται να υπάρχει ο μεγαλύτερος κίνδυνος έναντι λυγισμού και όχι προς τα άκρα της τραβέρσας, αφού εκεί η αξονική δύναμη έχει πολύ μικρό, έως και αμελητέο, μέγεθος.

Τα δεδομένα και η κατηγορία διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

**Παράμετροι αντοχής**

Αξιοποιώντας τις εξ. (3-2) και (3-7) προκύπτει:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{436\text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 15478\text{kN} \quad \text{και} \quad N_{Rk} = A \cdot f_y = 436\text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 15478\text{kN}$$

Από την εξ. (3-4) προκύπτει:

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{159.36 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3266.2 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{159.36 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3266.2 \text{ kN}$$

Τα μεγέθη  $M_{pl,y,Rd}$  και  $M_{pl,z,Rd}$  υπολογίστηκαν με βάση την θεώρηση καταπόνησης της διατομής της τραβέρσας υπό καθαρή κάμψη στην κατάσταση πλήρους διαρροής. Και προκύπτει:

$$M_{pl,y,Rd} = 2864.1 \text{ kNm} \text{ και } M_{y,Rk} = 2864.1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = 2254.8 \text{ kNm} \text{ και } M_{z,Rk} = 2254.8 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

#### 1) Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της τραβέρσας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

#### 2) Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\text{Από την εξ. (3-10) προκύπτει } \lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

Στο οριζόντιο επίπεδο η τραβέρσα εξασφαλίζεται πλήρως από τις αντηρίδες, επομένως το μήκος λυγισμού ισούται με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών αντηρίδων. Άρα είναι  $L_{cr,y} = 4.5 \text{ m}$ .

Βέβαια αυτή είναι προσέγγιση υπέρ της ασφαλείας. Και τούτο γιατί, η σύνδεση αντηρίδας – τραβέρσας γίνεται με τους κοχλίες εκτός της διατομής της σύνδεσης, επομένως η σύνδεση τείνει προς πάκτωση και όχι προς απλή στήριξη. Αλλά επειδή δεν είναι και πάκτωση ώστε να μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι  $L_{cr,y} = 0.5 \cdot 4.5 \text{ m} = 2.25 \text{ m}$ , γίνεται η προσέγγιση, υπέρ της ασφαλείας, της απλής στήριξης της τραβέρσας επί της αντηρίδας. Επομένως θεωρείται απλουστευτικά, και υπέρ της ασφαλείας, ότι  $L_{cr,y} = 4.5 \text{ m}$ .

Στο κατακόρυφο επίπεδο η τραβέρσα εδράζεται ακλόνητα στους βραχείς προβόλους που εξέχουν από τους πασσάλους. Επομένως το μήκος λυγισμού στην κατακόρυφη διεύθυνση ισούται με  $L_{cr,z} = 3.6 \text{ m}$ .

Οι ροπές αδρανείας υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις (εξ.(3-12)):

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{159780 \text{ cm}^4}{436 \text{ cm}^2}} = 19.14 \text{ cm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{121540 \text{ cm}^4}{436 \text{ cm}^2}} = 16.70 \text{ cm}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στην εξ. (3-9) προκύπτει:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{4.5 \text{ m}}{19.14 \text{ cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.308$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{3.6\text{m}}{16.70\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.282$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για συγκολλητή κιβωτιοειδείς διατομή, με  $b/t_f < 30$ , εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού c.

Συντελεστής ατελειών(a):

$a=0.49$  για καμπύλη λυγισμού c.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή x:

Από την εξ. (3-13) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.308 - 0.2) + 0.308^2] = 0.574$$

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.282 - 0.2) + 0.282^2] = 0.560$$

Επομένως ο μειωτικός συντελεστής x είναι (εξ.(3-14)):

$$x_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.574 + \sqrt{0.574^2 - 0.308^2}} = 0.945$$

$$x_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.560 + \sqrt{0.560^2 - 0.282^2}} = 0.958$$

3) Συντελεστές αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  και σύνθετος έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Πίνακας 3-29: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	y-y	z-z
$C_{mz}$	z-z	y-y

Από τον Πίνακα 3-29 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροής.

Ανάλογα με το φάτνωμα ελέγχου διαφοροποιούνται οι τιμές των  $M_h$  και  $M_s$  και κατ' επέκταση οι τιμές των συντελεστών  $C_m$  και άρα και των συντελεστών αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση της τραβέρσας, τα φαντώματα ελέγχου είναι δύο. Το 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και το κεντρικό φάτνωμα στο οποίο η αξονική δύναμη έχει την μέγιστη τιμή.

Θα υπολογιστούν ξεχωριστά για καθένα από τα φαντώματα ελέγχου οι συντελεστές αλληλεπίδρασης και θα ακολουθήσει ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, οι τιμές του διαγράμματος καμπτικών ροών  $M_z$  είναι μικρές και επομένως είναι αμελητέο μπροστά στα υπόλοιπα διαγράμματα εντατικών μεγεθών. Άρα η ύπαρξή του παραλείπεται και απλουστευτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι  $M_z=0\text{kNm}$ .

Επομένως στον σύνθετο έλεγχο, λόγω κάμψης και θλίψης, οι συντελεστές  $k_{zz}$  και  $k_{yz}$  δεν υπολογίζονται διότι από την στιγμή που  $M_z=0\text{kNm}$  δεν έχουν κάποιο φυσικό νόημα. Άρα κατ' επέκταση ούτε ο συντελεστής ροής  $C_{mz}$  υπολογίζεται.

### 1ο Φάτνωμα

Παρατηρώντας το διάγραμμα ροπών (Σχήμα 3-56) προκύπτουν τα εξής μεγέθη ροπής:

- στο άκρο ίση με  $M_h = -2647 \text{ kNm}$
- στο μέσο ίση με  $M_s = 1396.3 \text{ kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. Β), είναι:

$$- a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{1396.3 \text{ kNm}}{-2647 \text{ kNm}} \Rightarrow a_s = -0.53$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το φορτίο ωθήσεων, από το οποίο προκαλείται το διάγραμμα ροπών, επιβάλλεται ομοιόμορφα στο μέλος της τραβέρσας

Άρα προκύπτει:  $C_{my} = 0.1 - 0.8 \cdot a_s = 0.1 - 0.8 \cdot (-0.53) \Rightarrow C_{my} = 0.524 \geq 0.4$

#### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Επί το δυσμενέστερο, θεωρείται ότι η αξονική δύναμη είναι σταθερή στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και ίση με τη μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Άρα είναι  $N_{Ed} = 157.4 \text{ kN}$ .

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας B.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα B.1.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (3-27)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (3-28)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-27) και (3-28) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 3-30.

Πίνακας 3-30: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.523
$k_{zy}$	0.314

#### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z = 0 \text{ kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (3-29)$$

$$\frac{N_{Ed}}{Y_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1.0$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (3-30)$$

$$\frac{N_{Ed}}{Y_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1.0$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-29) και (3-30) προκύπτει:

$$0.01+0.53=0.54 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-29)}$$

$$0.01+0.32=0.33 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-30)}$$

### Κεντρικό Φάτνωμα

Παρατηρώντας το διάγραμμα ροπών (Σχήμα 3-56) προκύπτουν τα εξής μεγέθη ροπής:

- στο άκρο ίση με  $M_h = -2505 \text{ kNm}$
- στο μέσο ίση με  $M_s = 1121.1 \text{ kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα Β.3 (EN1993-1-1 Παρ. Β), είναι:

$$- a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{1121.1 \text{ kNm}}{-2505 \text{ kNm}} \Rightarrow a_s = -0.45$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το φορτίο ωθήσεων, από το οποίο προκαλείται το διάγραμμα ροπών, επιβάλλεται ομοιόμορφα στο μέλος της τραβέρσας

$$\text{Άρα προκύπτει: } C_{my} = 0.1 - 0.8 \cdot a_s = 0.1 - 0.8 \cdot (-0.45) \Rightarrow C_{my} = 0.458 \geq 0.4$$

### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα Β.1 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Επί το δυσμενέστερο, θεωρείται ότι η αξονική δύναμη είναι σταθερή στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και ίση με τη μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Άρα είναι  $N_{Ed} = 518.45 \text{ kN}$ .

Ο πίνακας Β.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας Β.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα Β.1.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-27) και (3-28) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 3-31.

Πίνακας 3-31: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.459
$k_{zy}$	0.276

### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z = 0 \text{ kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-29) και (3-30) προκύπτει:

$$0.04+0.44=0.48 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-29)}$$

$$0.04+0.27=0.31 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-30)}$$

Συμπερασματικά, κοιτώντας τους ελέγχους επάρκειας μέλους και για τα δυο αυτά φάτνωμα ελέγχου, γίνεται αντιληπτό ότι η τραβέρσα δεν διατρέχει κανένα κίνδυνο λυγισμού του μέλους της.

### 3.3.3 Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής

Η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ τραβέρσας και εκτοξευόμενου σκυροδέματος (gunite) προσομοιώνεται με γραμμικά ελατήρια τα οποία έχουν τιμή δυσκαμψίας ίση με το 20% της δυσκαμψίας των ελατηρίων του εδάφους (υπόδειξη γεωτεχνικής μελέτης).

Στόχος είναι εξεταστεί, για ένα ρεαλιστικό εύρος τιμών δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής, η μεταβολή του διαγράμματος αξονικών δυνάμεων  $N$  και κατά πόσο αυτή η μεταβολή δυσχεραίνει, ή όχι, τους ελέγχους επάρκειας και μέλους της τραβέρσας. Το ρεαλιστικό αυτό εύρος τιμών δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής κυμαίνεται από 5% έως 50% της τιμής δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.

Τα ελατήρια τριβής εμποδίζουν την σχετική μετακίνηση τραβέρσας – gunite, η οποία προκαλείται λόγω του ομοιόμορφου θερμοκρασιακού φορτίου, το οποίο είναι η αιτία αυξομείωσης του μέλους της τραβέρσας. Ούτε το φορτίο ωθήσεων γαιών, ούτε το φορτίο λόγω ίδιου βάρους προκαλούν σχετική μετακίνηση τραβέρσας – gunite.

Επομένως γίνεται αντιληπτό, ότι η αυξομείωση της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής θα επηρεάσει μόνο το διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  της τραβέρσας και κανένα άλλο διάγραμμα εντατικών μεγεθών. Δηλαδή οι τιμές των υπολοίπων εντατικών μεγεθών της τραβέρσας παραμένουν ανεπηρέαστες από την μεταβολή του μεγέθους της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής. Επίσης αναμένεται, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η δυσκαμψία των ελατηρίων τριβής, τόσο μεγαλύτερη αξονική αντίσταση παρουσιάζεται στο μέλος της τραβέρσας κατά την αυξομείωση του μήκους του λόγω  $\Delta T$ , άρα το μέγεθος της αξονικής της τραβέρσας μεγαλώνει. Πρέπει να τονιστεί, ότι με την αυξομείωση της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής επηρεάζεται μόνο το μέγεθος της αξονικής και όχι η μορφή του διαγράμματος αξονικών δυνάμεων της τραβέρσας.

Στον Πίνακα 3-32 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο μέλος της τραβέρσας για διάφορες τιμές δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής, οι οποίες εκφράζονται ως ποσοστό της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.

Πίνακας 3-32: Δυσκαμψία ελατηρίων τριβής – Μέγιστη αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη  $N$

Δυσκαμψία ελατηρίων τριβής (ως ποσοστό της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων)	Αξονική δύναμη $N$ (kN)
5%	144.4
10%	278.6
20%	520.3
30%	731.8
40%	918.4
50%	1084



Επιβεβαιώνεται από τις τιμές αξονικής δύναμης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-32 αυτό που αναφέρθηκε ποιοτικά ανωτέρω, ότι δηλαδή η αύξηση της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής οδηγεί σε αύξηση της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης  $N$  στο μέλος της τραβέρσας.

Αυτό που πρέπει επίσης να εξεταστεί είναι κατά πόσο επηρεάζει η αύξηση της αξονικής δύναμης την ικανοποίηση των ελέγχων διατομής και μέλους της τραβέρσας. Για το λόγο αυτό θα παρουσιαστούν συνοπτικά στην συνέχεια οι έλεγχοι διατομής και μέλους της τραβέρσας για το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή για την αξονική που αναπτύσσεται στο μέλος της τραβέρσας για δυσκαμψία ελατηρίων τριβής ίση με το 50% της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.

#### **Έλεγχος επάρκειας διατομής για δυσκαμψία ίση με το 50% της εδαφικής δυσκαμψίας**

Πραγματοποιώντας στο υπολογιστικό φύλλο EXCEL τον έλεγχο διατομής σε κάθε μια από τις θέσεις ελέγχου που έχουν αναφερθεί ανωτέρω, παρατηρείται ότι δεν διαφοροποιείται απολύτως τίποτα σε σχέση με τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει για δυσκαμψία ελατηρίων τριβής ίση με το 20% της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.

Και τούτο γιατί η αύξηση της αξονικής δύναμης  $N$  που προκύπτει δεν επηρεάζει την απαίτηση για χρήση ή όχι ενισχυτικού ελάσματος, αφού αυτό καθορίζεται αποκλειστικά από το μέγεθος της τέμνουσας δύναμης το οποίο παραμένει ίδιο. Επίσης από τους ελέγχους για απομείωση της ροπής αντοχής έναντι αξονικής προκύπτει ότι δεν χρειάζεται απομείωση. Δηλαδή το μέγεθος της αξονικής δεν είναι τόσο μεγάλο ώστε να απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής. Επομένως οι βαθμοί αξιοποίησης παραμένουν ακριβώς οι ίδιοι.

#### **Έλεγχος επάρκειας μέλους για δυσκαμψία ίση με το 50% της εδαφικής δυσκαμψίας**

Στον έλεγχο μέλους η μόνη διαφοροποίηση που προκύπτει για την περίπτωση αυτή σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η δυσκαμψία των ελατηρίων τριβής ισούταν με το 20% της εδαφικής δυσκαμψίας, είναι ως προς την τιμή των συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$  και  $k_{zy}$ . Δηλαδή λόγω του ότι διαφοροποιείται το μέγεθος της αξονικής δύναμης στις θέσεις ελέγχου, διαφοροποιούνται κατ' επέκταση και οι τιμές των συντελεστών αλληλεπίδρασης και πιο συγκεκριμένα αυξάνουν, διότι το μέγεθος της αξονικής είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση αυτή (EN1993-1-1 Παρ. Β, Πίν. Β1).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται για την εκάστοτε θέση ελέγχου οι νέες τιμές των συντελεστών αλληλεπίδρασης (Πίνακας 3-33, Πίνακας 3-34) καθώς και ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας.

### **1ο Φάτνωμα**

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Πίνακας 3-33: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.523
$k_{zy}$	0.314

#### **Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη**

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-29) και (3-30) προκύπτει:

$$0.03+0.53=0.56 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-29)}$$

$$0.03+0.32=0.35 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-30)}$$

**Κεντρικό φάτνωμα**

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Πίνακας 3-34: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.462
$k_{zy}$	0.277

Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (3-29) και (3-30) προκύπτει:

$$0.08+0.44=0.52 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-29)}$$

$$0.08+0.27=0.35 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (3-30)}$$

Παρατηρείται ότι ο έλεγχος μέλους έγινε λίγο δυσμενέστερος, κάτι που είναι απολύτως λογικό αφού ο πρώτος όρος του ελέγχου, που εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της  $N$ , αυξάνει και επίσης αυξάνει λίγο και δεύτερος όρος του ελέγχου λόγω της μικρής αύξησης των συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$  και  $k_{zy}$ . Και πάλι όμως, όπως φαίνεται και από τον έλεγχο, το μέλος της τραβέρσας δεν διατρέχει απολύτως κανένα κίνδυνο λυγισμού του μέλους του.

## 4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΧΙΑΣΤΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΝΤΗΡΙΔΩΝ

### 4.1 Γενικά

Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η μελέτη του συστήματος αντιστήριξης το οποίο αποτελείται από οριζόντιους και κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας οι οποίοι συνδέουν μεταξύ τους τις αντηρίδες που βρίσκονται στην ίδια ή και σε διαφορετική στάθμη. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται σε πρώτη φάση μια διερεύνηση ως προς το είδος της διατομής, διπλού ταυ ή κοίλη κυκλική, που θα χρησιμοποιηθεί για τις αντηρίδες της άνω στάθμης αξιοποιώντας τα αποτελέσματα γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Στη συνέχεια μορφώνεται το συνολικό σύστημα αντιστήριξης, με τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης και με τα οριζόντια και κατακόρυφα στοιχεία δικτυώματος, στο οποίο υλοποιούνται γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις με στόχο την οριστική εκτίμηση της διατομής του μέλους της αντηρίδας άνω και κάτω στάθμης. Επιπλέον πραγματοποιούνται παραμετρικές διερευνήσεις, για τις αντηρίδες και των δύο σταθμών, ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των δύο στηρίξεων της αντηρίδας και ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας. Τέλος, υλοποιείται τόσο η διαστασιολόγηση του μέλους της τραβέρσας όσο και των οριζόντιων και κατακόρυφων στοιχείων δικτυώματος.

### 4.2 Διαστασιολόγηση Αντηρίδων

Το σύστημα αντιστήριξης μορφώνεται με μεταλλικές αντηρίδες σε 2 στάθμες (άνω και κάτω στάθμη) οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντια και κατακόρυφη δικτύωση. Η λογική προσέγγιση του παρόντος συστήματος αντιστήριξης βασίζεται αποκλειστικά στην φάση κατασκευής του συστήματος αυτού. Πιο συγκεκριμένα, στην 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής τοποθετούνται οι αντηρίδες της άνω στάθμης με τους οριζόντιους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Για να τοποθετηθούν και οι κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας πρέπει να τοποθετηθούν πρώτα και οι αντηρίδες της κάτω στάθμης. Επομένως γίνεται αντιληπτό, ότι για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, δηλαδή μέχρι η εκσκαφή να φτάσει στο επίπεδο των αντηρίδων της κάτω στάθμης, οι άνω αντηρίδες θα εξασφαλίζονται μόνο οριζοντίως και όχι και κατακόρυφως. Το γεγονός αυτό προκαλεί την αναγκαιότητα χρησιμοποίησης διατομής διπλού ταυ για τις αντηρίδες άνω στάθμης, έτσι ώστε να παρουσιάζεται μεγάλη δυσκαμψία για λυγισμό του μέλους της αντηρίδας επί κατακόρυφου επιπέδου και μικρότερη δυσκαμψία για λυγισμό του μέλους στο οριζόντιο

επίπεδο, αφού στο οριζόντιο επίπεδο υπάρχουν οι χιαστί σύνδεσμοι οι οποίοι προσφέρουν αντίσταση έναντι λυγισμού στο επίπεδο αυτό, μιας και μειώνουν το μήκος λυγισμού της αντηρίδας. Αντιθέτως, για την 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής, χρησιμοποιείται κοίλη κυκλική διατομή για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης διότι αυτές είναι εξ' αρχής συνδεδεμένες με οριζόντια και κατακόρυφα χιαστί. Επομένως δεν χρειάζεται να παρουσιάσουν κάποια ιδιαίτερη συμπεριφορά ως προς κάποια διεύθυνση και είναι επαρκές το να παρουσιάσουν την ίδια συμπεριφορά ως προς την τυχούσα διεύθυνση, κάτι το οποίο είναι χαρακτηριστικό της κοίλης κυκλικής διατομής.

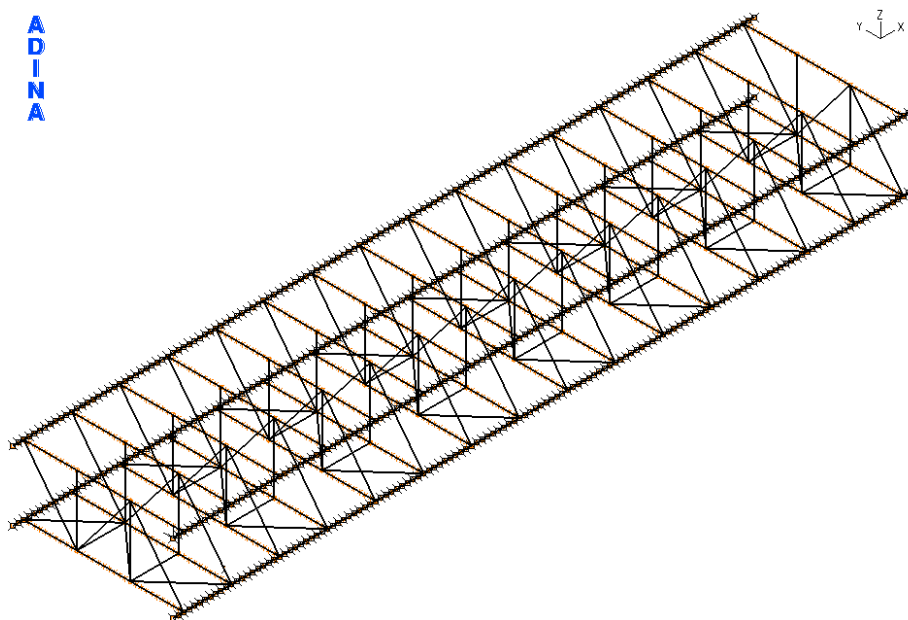
#### 4.2.1 Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος

Όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2 για την ακολουθούμενη μεθοδολογία, προκειμένου να γίνει μια αρχική εκτίμηση της διατομής της αντηρίδας καθώς και να υπολογιστεί η θλιπτική ένταση των αντηρίδων που θα χρησιμοποιηθεί στο μη γραμμικό προσομοίωμα, μορφώνονται χωρικά προσομοιώματα στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

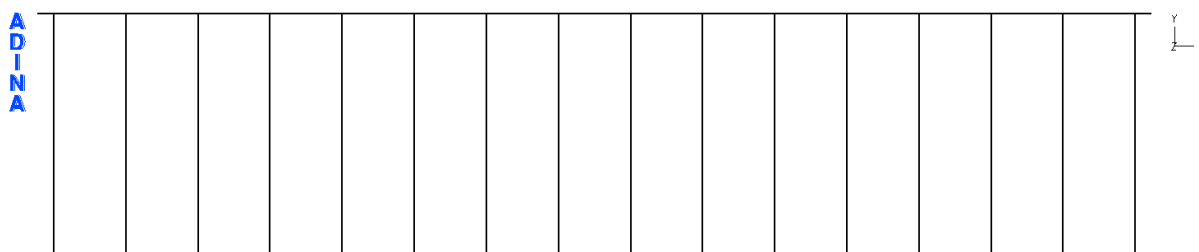
##### 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Οι αντηρίδες της άνω στάθμης εδράζονται στον κεφαλόδεσμο, ενώ οι αντηρίδες της κάτω στάθμης στηρίζονται σε τραβέρσες, οι οποίες εδράζονται ακλόνητα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση σε βραχείς προβόλους που εξέχουν ανά κάθε τρίτο πάσσαλο. Η αλληλεπίδραση με το έδαφος προσομοιώνεται κατά την διεύθυνση των αντηρίδων με οριζόντια μη γραμμικά θλιπτικά ελατήρια και κατά την διεύθυνση των κεφαλόδεσμων και των τραβερσών με οριζόντια γραμμικά ελατήρια.

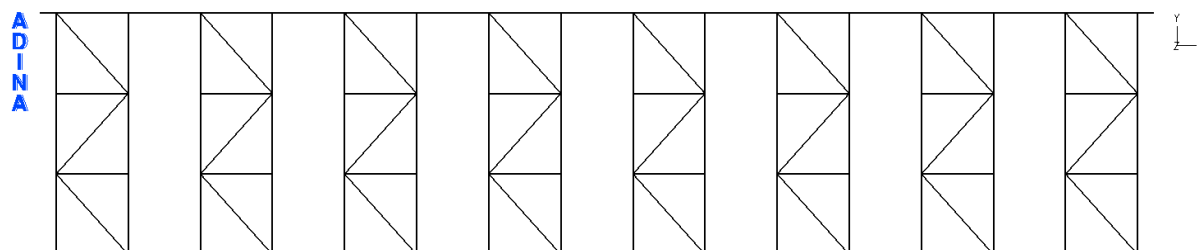
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-1, Σχήμα 4-2, Σχήμα 4-3, Σχήμα 4-4) παρουσιάζονται διάφορες όψεις του χωρικού προσομοιώματος του συστήματος αντιστήριξης με τοποθετημένες τις αντηρίδες και των 2 σταθμών.



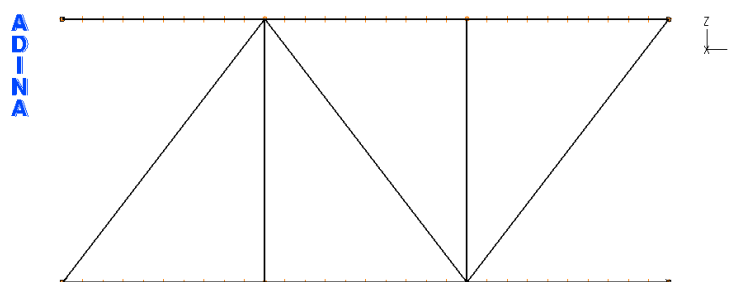
Σχήμα 4-1: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης – τοποθετημένες οι αντηρίδες και των 2 σταθμών



Σχήμα 4-2: Αντηρίδες άνω στάθμης χωρίς οριζόντια δικτύωση



Σχήμα 4-3: Αντηρίδες κάτω στάθμης με οριζόντια δικτύωση



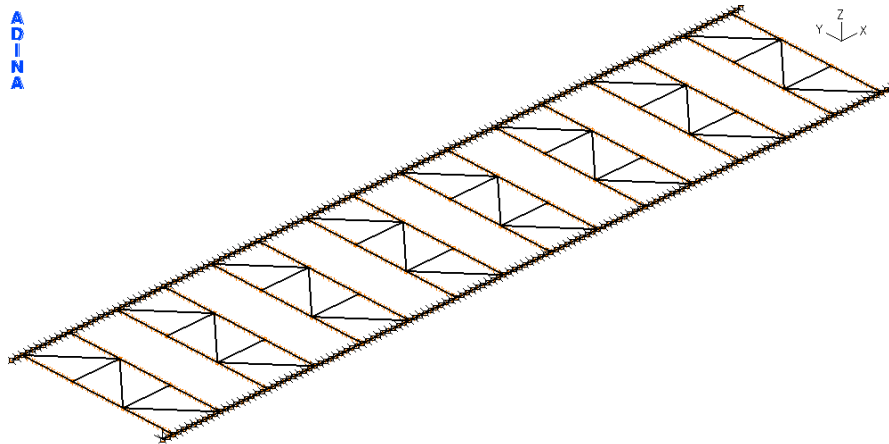
Σχήμα 4-4: Κατακόρυφη δικτύωση μεταξύ των 2 σταθμών

Στο παρόν σύστημα αντιστήριξης η ακολουθούμενη φάση κατασκευής είναι η εξής: 1) Τοποθέτηση των άνω αντηρίδων με τα μεταξύ τους οριζόντια διαγώνια στοιχεία, 2) εκσκαφή σε βάθος 7.5m, όπου 6.5m είναι η απόσταση των αντηρίδων των δυο σταθμών και 1.0m είναι η επιπλέον εκσκαφή που απαιτείται για κατασκευαστικούς λόγους ώστε να τοποθετηθούν οι αντηρίδες της κάτω στάθμης και 3) τοποθέτηση των αντηρίδων της κάτω στάθμης με τα μεταξύ τους οριζόντια διαγώνια στοιχεία καθώς και τοποθέτηση των κατακόρυφων διαγώνιων στοιχείων που συνδέουν τις αντηρίδες των 2 σταθμών μεταξύ τους.

Από τη στιγμή που οι αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφα χιαστί, είναι αναγκαίο να προσομοιωθούν οι φάσεις κατασκευής, καθώς στην 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής οι άνω αντηρίδες δεν θα έχουν κατακόρυφη εξασφάλιση, ενώ στην 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής, που είναι και η τελική, θα έχουν κατακόρυφη εξασφάλιση. Δεν είναι φανερό εκ των προτέρων ποια από τις δυο εντατικές καταστάσεις είναι δυσμενέστερη για τις άνω αντηρίδες. Επομένως είναι επιτακτική η μελέτη και των 2 φάσεων κατασκευής.

Για το λόγο αυτό μορφώνεται ακόμα ένα δεύτερο μοντέλο για να προσομοιάσει την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής κατά την οποία έχουν τοποθετηθεί μόνον οι άνω αντηρίδες με τα μεταξύ τους οριζόντια διαγώνια στοιχεία, ενώ δεν έχουν τοποθετηθεί ακόμα τα κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία, επομένως οι αντηρίδες της άνω στάθμης δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, όπως εξηγήθηκε και ανωτέρω, προτιμάται να χρησιμοποιηθούν διατομές διπλού ταυ για τις αντηρίδες της άνω στάθμης.

Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζεται το χωρικό προσομοίωμα του συστήματος αντιστήριξης της 1<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής.

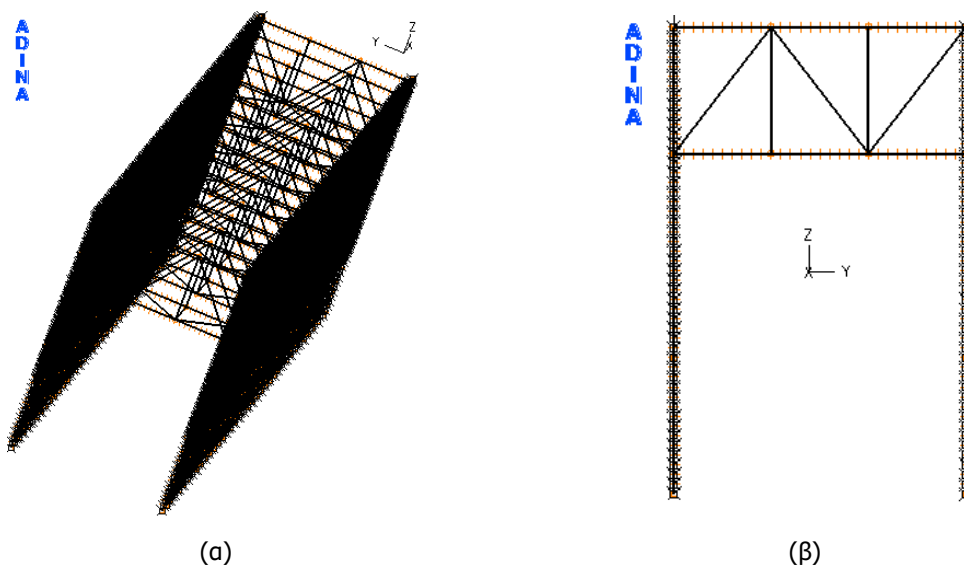


Σχήμα 4-5: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης – τοποθετημένες οι αντηρίδες της άνω στάθμης

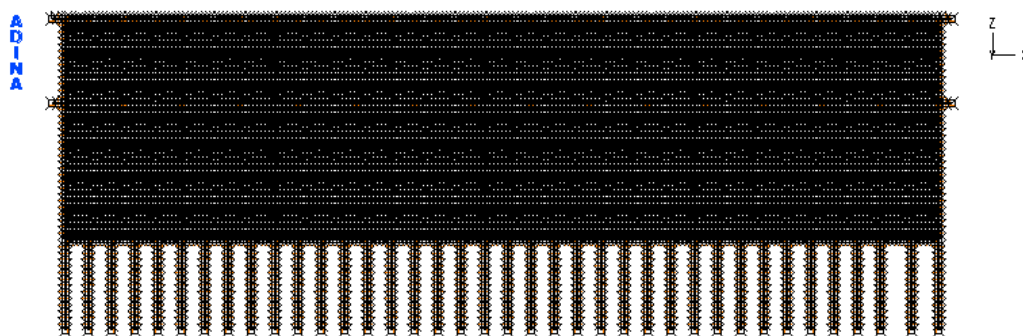
#### 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Στα προσομοιώματα της ομάδας αυτής περιλαμβάνονται επιπλέον οι πάσσαλοι και τα επιφανειακά στοιχεία που αντιστοιχούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (gunite). Τα ελατήρια επιβάλλονται στα επιφανειακά στοιχεία και κάτω από τη στάθμη που αυτά παύουν να υπάρχουν στους πασσάλους. Διαμήκη ελατήρια με δυσκαμψία ίση με το 20% της δυσκαμψίας των εγκαρσίων τοποθετούνται για την προσομοίωση της τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στο έδαφος και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Στα κάτωθι σχήματα (Σχήμα 4-6, Σχήμα 4-7) παρουσιάζονται διάφορες όψεις του χωρικού προσομοιώματος, από τις οποίες γίνεται αντιληπτό η θέση τοποθέτησης του εκάστοτε δομικού στοιχείου του συστήματος αντιστήριξης της εκσκαφής (κεφαλόδεσμοι, τραβέρσες, αντηρίδες, διαγώνια στοιχεία, πάσσαλοι, επιφάνεια εκτοξευόμενου σκυροδέματος).



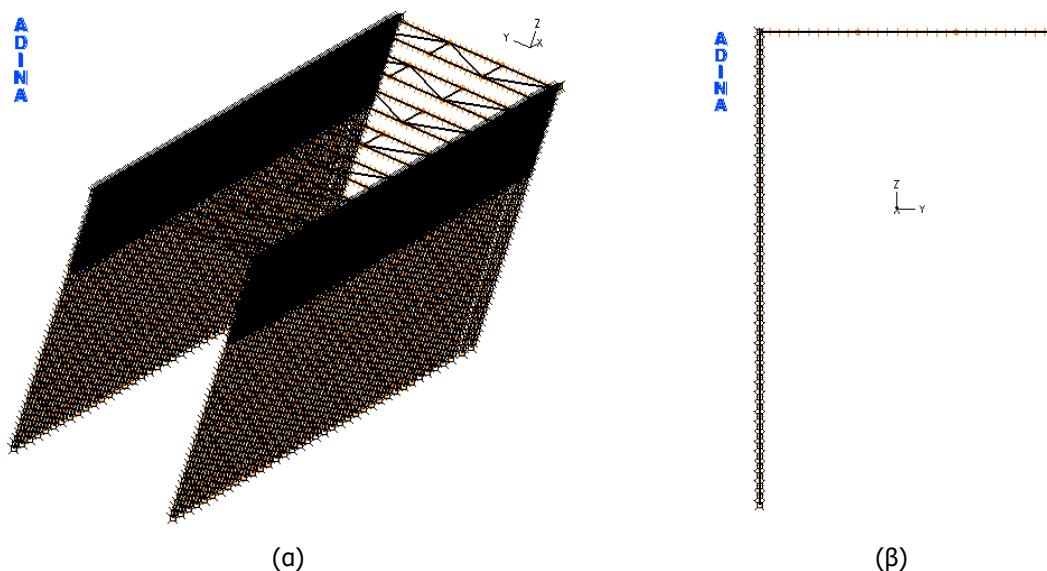
Σχήμα 4-6: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση (β) Όψη YZ



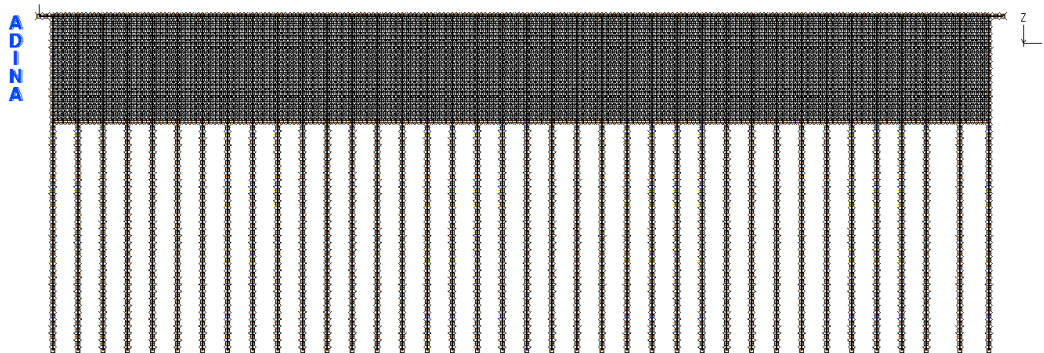
Σχήμα 4-7: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης – Όψη ΧΖ

Για την περίπτωση του προσομοιώματος που αφορά την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής, μελετάται το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή η δυσμενέστερη εντατική κατάσταση για τις αντηρίδες της άνω στάθμης, η οποία πραγματοποιείται για το μέγιστο βάθος εκσκαφής στο οποίο οι αντηρίδες της άνω στάθμης είναι χωρίς κατακόρυφη εξασφάλιση. Το μέγιστο αυτό βάθος, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω στην περιγραφή των φάσεων κατασκευής, ισούται με 7.5m.

Στα κάτωθι σχήματα (Σχήμα 4-8, Σχήμα 4-9) παρουσιάζονται οι διάφορες όψεις του χωρικού προσομοιώματος που αφορούν την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής. Παρατηρώντας τα σχήματα αυτά γίνεται αντιληπτό ότι η επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (gunite) φτάνει μέχρι τη στάθμη  $z=-7.5\text{m}$ , όπου το  $z$  μετράει από την επιφάνεια της εκσκαφής, δηλαδή τη στάθμη στην οποία είναι πλέον εφικτό κατασκευαστικά να τοποθετηθούν οι αντηρίδες της κάτω στάθμης με τα οριζόντια και κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία. Από την στάθμη  $z=-7.5\text{m}$  έως το τέλος των πασσάλων, οι πάσσαλοι είναι εμπηγνυόμενοι μέσα στο έδαφος.



Σχήμα 4-8: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση (β) Όψη ΥΖ



Σχήμα 4-9: Χωρικό προσομοίωμα συστήματος αντιστήριξης – Όψη ΧΖ

#### 4.2.1.1 Διατομές δομικών μελών

Οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική προσέγγιση του προβλήματος της αντιστήριξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Διατομές δομικών μελών

Μέλη από χάλυβα	Μέλη από σκυρόδεμα
Αντηρίδες άνω στάθμης: HEM 400 Αντηρίδες κάτω στάθμης: CHS 610/40 Τραβέρσες: 2HEB450 Στοιχεία δικτυώματος: CHS168.3/6.3	Κεφαλοδέσμοι(BxH): 1.20m x 1.00m Πάσσαλοι: D=1.00m

#### 4.2.1.2 Ελατήρια

##### 1<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Τα εδαφικά ελατήρια είναι μη γραμμικά θλιπτικά, δηλαδή προσομοιώνουν την συμπεριφορά του εδάφους κατά την οποία το έδαφος προβάλλει αντίσταση όταν θλίβεται ενώ αντίθετα προβάλλει μηδενική αντίσταση όταν εφελκύεται. Στην περίπτωση αυτού του προσομοιώματος τα επιβαλλόμενα φορτία είναι οι ωθήσεις γαιών, επομένως το έδαφος δεν θλίβεται, άρα ο ρόλος των εδαφικών ελατηρίων είναι ανύπαρκτος. Επομένως δεν είναι αναγκαίο να τοποθετηθούν εδαφικά ελατήρια στους κεφαλοδέσμους και στις τραβέρσες. Αυτό σε ότι αφορά την εγκάρσια μετακίνηση των κεφαλοδέσμων και των τραβερσών. Για την διαμήκη μετακίνηση των δομικών αυτών μελών θα τοποθετηθούν ελατήρια με δυσκαμψία ίση με το 20% της εγκάρσιας δυσκαμψίας. Επομένως για την άνω στάθμη, που βρίσκονται οι κεφαλοδέσμοι, και για την κάτω στάθμη, που είναι οι τραβέρσες, θα εφαρμοστούν ελατήρια με δυσκαμψία στην διαμήκη διεύθυνση ίση με 4000kN/m και με 1200kN/m αντιστοίχως.

##### 2<sup>η</sup> ομάδα προσομοιωμάτων

Στα επιφανειακά στοιχεία εφαρμόζονται μη γραμμικά θλιπτικά ελατήρια με δείκτη εδάφους 40000kN/m<sup>3</sup> επί το δυσμενέστερο. Στο κατώτερο τμήμα των πασσάλων δεν υπάρχουν επιφανειακά στοιχεία, αφού το τμήμα αυτό των πασσάλων είναι εμπηγνυόμενο μέσα στο έδαφος. Επομένως, τα εδαφικά ελατήρια εφαρμόζονται αποκλειστικά στους πασσάλους που έχουν διάμετρο D=1.00m και έχουν τιμή δυσκαμψίας ίση με 40000kN/m<sup>3</sup>·1.00m = 40000kN/m<sup>2</sup>. Τέλος, στα επιφανειακά στοιχεία επιβάλλονται και ελατήρια τριβής με τιμή δυσκαμψίας ίση με 0.20·40000kN/m<sup>3</sup>=8000kN/m<sup>3</sup>.

#### 4.2.1.3 Φορτία – Συνδυασμοί Φόρτισης

Στις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψιν το ίδιο βάρος των δομικών μελών, η επιρροή της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής και οι ωθήσεις γαιών. Οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.



Πίνακας 4-2: Συνδυασμοί φόρτισης

Στατικά φορτία	1.35G + 1.35ΩΓ + 1.50ΔΤ
Σεισμικά φορτία	1.35G + 1.00ΩΓΣ + 1.50ΔΤ

Η θερμοκρασιακή μεταβολή, λήφθηκε, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ίση με  $\Delta T=20^\circ$  και οι ωθήσεις γαιών, που ασκούνται στην άνω και κάτω στάθμη στο μέλος του κεφαλοδέσμου και της τραβέρσας αντιστοίχως, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3. Οι τιμές αυτές των ωθήσεων γαιών είναι οι δυσμενέστερες που μπορούν να εμφανιστούν και έχουν προκύψει από τη γεωτεχνική μελέτη.

Πίνακας 4-3: Φορτία ωθήσεων γαιών

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
428kN/m	1407kN/m

#### 4.2.2 1<sup>η</sup> Φάση κατασκευής (πριν την τοποθέτηση των αντηρίδων της κάτω στάθμης)

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, η μελέτη του παρόντος συστήματος αντιστήριξης συναρτάται άμεσα με την ακολουθία των φάσεων κατασκευής. Επομένως σε πρώτο στάδιο μελετάται το σύστημα αντιστήριξης της 1<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής. Δηλαδή μελετάται το σύστημα των αντηρίδων της άνω στάθμης με τα οριζόντια διαγώνια στοιχεία δικτυώματος που τις συνδέουν μεταξύ τους. Στόχος είναι να εκτιμηθεί η οριακή διατομή διπλού ταυ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις αντηρίδες της άνω στάθμης, ώστε να έχει νόημα η σύγκριση μεταξύ των διατομών των διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης. Θεωρείται ότι οι διατομές όλων των υπολοίπων δομικών μελών της άνω στάθμης (κεφαλοδέσμοι, οριζόντια διαγώνια στοιχεία δικτυώματος) δεν μεταβάλλονται και διαφοροποιείται μόνο η διατομή των αντηρίδων.

##### 4.2.2.1 Γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη

Μέσω των γραμμικών αναλύσεων στα προσομοιώματα της 1<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής γίνεται η αρχική εκτίμηση του μεγέθους της διατομής της αντηρίδας, χωρίς να ληφθούν υπ' όψιν οι όποιες μη γραμμικότητες παρουσιάζονται στο μέλος της αντηρίδας. Με τον τρόπο αυτό, αφενός θα χρησιμοποιηθεί μια εύλογη αρχική διατομή ελέγχου επάρκειας στις μη γραμμικές αναλύσεις και αφετέρου θα διαπιστωθεί ποια η διαφοροποίηση στο μέγεθος της διατομής που προκύπτει από γραμμική και μη γραμμική ανάλυση αντιστοίχως.

Υπενθυμίζεται ότι στο μέλος της αντηρίδας εμφανίζεται γεωμετρική μη γραμμικότητα αφού οι στηρίξεις της παρουσιάζουν υψομετρική διαφορά  $A/6$ , όπου  $A$  είναι το ύψος της διατομής, αν αυτή είναι διπλού ταυ, ή  $A$  είναι η διάμετρος της διατομής, αν αυτή είναι κοίλη κυκλική. Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η γραμμική ανάλυση δεν επαρκεί από μόνη της για την διαστασιολόγηση του μέλους και είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί και μη γραμμική ανάλυση.

Τα εντατικά μεγέθη ( $M, Q, N$ ) της άνω στάθμης, λόγω των φορτίων που προαναφέρθηκαν στην υποπαράγραφο 4.2.1.3, με βάση τα οποία θα γίνει ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας έχουν προκύψει από επαλληλία, με χρήση των κατάλληλων συντελεστών σχεδιασμού (1.35 και 1.50), των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις ανωτέρω δυο ομάδες προσομοιωμάτων.

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών διατομής HEM400 αντηρίδων άνω στάθμης

Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4-1 επιλέγεται ως αρχική διατομή των αντηρίδων άνω στάθμης η διατομή διπλού ταυ τύπου HEM400.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών και λόγω του ότι η ανάλυση η οποία πραγματοποιείται είναι 1<sup>ης</sup> τάξης γίνεται μια προσπάθεια επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων με πιο απλουστευμένους τρόπους προσέγγισης.

Α  
D  
I  
N  
A  
ΤΙΜΕ 1:000

Z  
Y



Σχήμα 4-10: Διάγραμμα καμπικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ιδίου βάρους από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=76.19\text{kNm}$

Με την θεώρηση της αντηρίδας ως αμφιέριστη, λόγω επιβολής ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου, η αναπτυσσόμενη ροπή ( $M$ ) στο μέσο είναι ίση με  $M=\frac{q \cdot L^2}{8}$ .

$q=\gamma \cdot A$ , όπου  $\gamma$ =ειδικό βάρος χάλυβα και  $A$ =εμβαδόν διατομής αντηρίδας

$L$ =μήκος αντηρίδας

$$\text{Επομένως προκύπτει: } M = \frac{78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 326\text{cm}^2 \cdot (15\text{m})^2}{8} = 71.97\text{kNm}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{76.19\text{kNm} - 71.97\text{kNm}}{76.19\text{kNm}} = 5.5\% \text{ (οριακά αποδεκτό ποσοστό απόκλισης)}$$

Α  
D  
I  
N  
A  
ΤΙΜΕ 1:000

Z  
Y



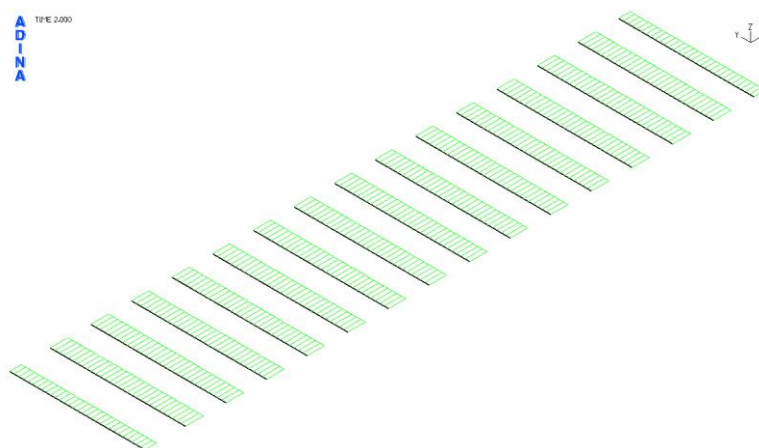
Σχήμα 4-11: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ιδίου βάρους από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_z=19.64\text{kN}$

Με την θεώρηση της αντηρίδας ως αμφιέριστη, λόγω επιβολής ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου, η μέγιστη τέμνουσα ( $V$ ) εμφανίζεται στο άκρο του μέλους και είναι ίση με  $V=\frac{q \cdot L}{2}$ , όπου  $q$ ,  $A$  όπως ανωτέρω.

$$\text{Επομένως προκύπτει: } V = \frac{78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 326\text{cm}^2 \cdot 15\text{m}}{2} = 19.19\text{kN}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{19.64\text{kN} - 19.19\text{kN}}{19.64\text{kN}} = 2.3\% < 5\% \text{ (αποδεκτό)}$$

Παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση των εντατικών μεγεθών  $M_y$  και  $V_z$  σε σχέση τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας. Και τούτο είναι λογικό, διότι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση τα δυο αυτά συστήματα αντιστήριξης δεν διαφέρουν. Η μόνη διαφοροποίησή τους είναι ως προς το ίδιο βάρος της διατομής της αντηρίδας που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτή είναι η μοναδική αιτία στην οποία οφείλεται η μικρή διαφοροποίηση των τιμών των εντατικών μεγεθών στις περιπτώσεις των δυο αυτών διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης.



Σχήμα 4-12: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αντηρίδας άνω στάθμης διατομής ΗΕΜ400 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=1978\text{kN}$

Παρατηρείται ότι η αναπτυσσόμενη αξονική στις δυο ακριανές αντηρίδες είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη αξονική στις υπόλοιπες αντηρίδες, κάτι το οποίο είναι λογικό διότι το μήκος επιρροής του γραμμικού κατανεμημένου φορτίου ωθήσεων γαιών είναι μικρότερο για τις ακριανές αυτές αντηρίδες.

Από την ανάλυση προκύπτει  $N=1978\text{kN}$ . Περίπου όσο είχε προκύψει και στην αντηρίδα άνω στάθμης του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, κάτι το οποίο είναι λογικό διότι το μέγεθος της αξονικής καθορίζεται αποκλειστικά από το μέγεθος του επιβαλλόμενου κατανεμημένου φορτίου των ωθήσεων γαιών και το μήκος επιρροής. Δεν συσχετίζεται σε καμία περίπτωση με το τί είδους διατομή έχει η αντηρίδα ή γενικότερα ποια είναι η μόρφωση του συστήματος αντιστήριξης (π.χ. αν θα υπάρχουν χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας ή όχι, ή το πόσο πυκνά θα είναι τοποθετημένοι οι σύνδεσμοι αυτοί κτλ.).

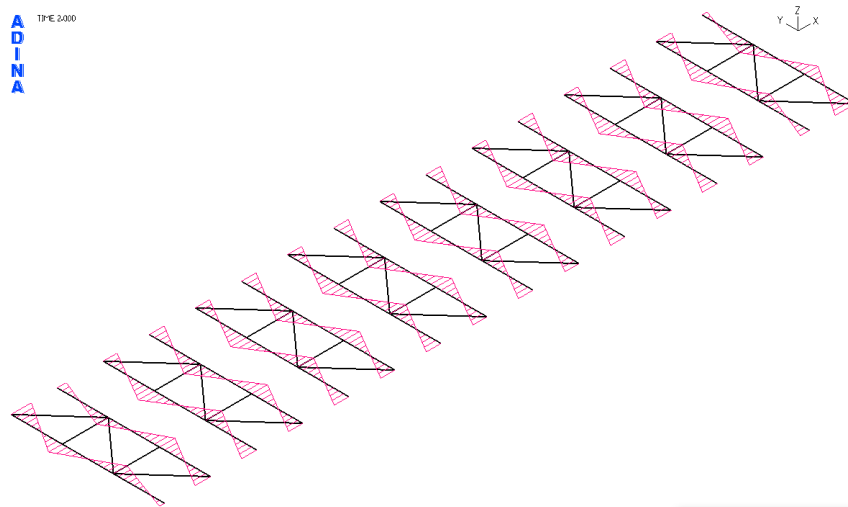
Με την απλουστευμένη προσέγγιση η αναπτυσσόμενη αξονική ισούται με  $N=q \cdot L$ , όπου  $q$ =κατανεμημένο φορτίο ωθήσεων γαιών (Πίνακας 4-3) και  $L$ =μήκος επιρροής.

Η απόσταση διαδοχικών αντηρίδων ισούται με 4.5m. Επομένως το μήκος επιρροής για την εκάστοτε αντηρίδα (εκτός από τις δυο ακριανές) είναι ίσο με  $L = \frac{4.5\text{m}}{2} + \frac{4.5\text{m}}{2} = 4.5\text{m}$ .

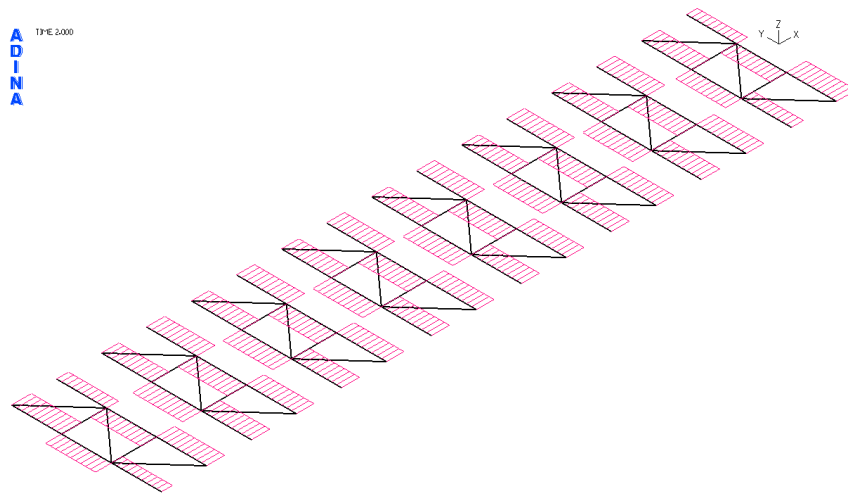
Επομένως προκύπτει:  $N = 428 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4.5\text{m} = 1926\text{kN}$

Ποσοστό απόκλισης:  $\frac{1978\text{kN} - 1926\text{kN}}{1978\text{kN}} = 2.6\% < 5\%$  (αποδεκτό)

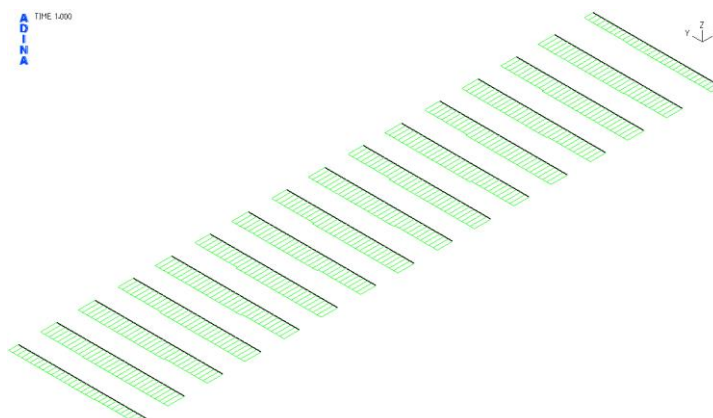
Λόγω της ύπαρξης των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας αναπτύσσονται, εκτός των ανωτέρω εντατικών μεγεθών, και εντατικά μεγέθη όπως καμπτική ροπή  $M_z$  και τέμνουσα δύναμη  $V_y$  στο μέλος της αντηρίδας. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-13, Σχήμα 4-14) παρουσιάζεται η μορφή αυτών των εντατικών μεγεθών. Στο σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, τα εντατικά αυτά μεγέθη ήταν μηδενικά, ή έστω πολύ μικρού μεγέθους, αφού δεν υπήρχαν οριζόντιοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας.



Σχήμα 4-13: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_z=15.8\text{kN}$



Σχήμα 4-14: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_y=5.25\text{kN}$



Σχήμα 4-15: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=430.3\text{kN}$

Παρατηρείται, όπως και ανωτέρω, ότι η αναπτυσσόμενη αξονική στις δυο ακριανές αντηρίδες είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη αξονική στις υπόλοιπες αντηρίδες, κάτι που είναι λογικό, διότι και εδώ όπως και στο Σχήμα 4-12 οι δυο ακριανές αντηρίδες επηρεάζονται από τις συντοριακές συνθήκες. Λόγω του ότι δεν υπάρχει τόση εδαφική μάζα στην περιοχή γύρω από τις ακριανές αντηρίδες, όση υπάρχει στην περιοχή γύρω από τις πιο κεντρικές, η αντίσταση που προβάλλεται στην αντηρίδα λόγω διαστολής της είναι μικρότερη, άρα το μέλος της αντηρίδας μπορεί να διασταλεί περισσότερο και κατ' επέκταση η αναπτυσσόμενη αξονική είναι μικρότερη.

Το μέγεθος της αναπτυσσόμενης αξονικής στις αντηρίδες συσχετίζεται άμεσα με την εδαφική αντίσταση που παρουσιάζεται, η οποία σε επίπεδο προσομοιώματος αντικατοπτρίζεται από την δυσκαμψία των εδαφικών ελατηρίων. Από τη Στατική είναι γνωστό ότι αν σε ένα μέλος επιβάλλεται ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή και τα άκρα του μέλους είναι ακλόνητα (θεωρητικώς άπειρη δυσκαμψία εδαφικού ελατηρίου), τότε η αναπτυσσόμενη αξονική του μέλους ισούται με  $N=\alpha_t \cdot E \cdot A \cdot \Delta T$ , όπου:

$$\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C} = \text{συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (για } T \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$E$ =μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

$A$ =εμβαδόν διατομής αντηρίδας

$\Delta T$ =ομοιόμορφα επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή

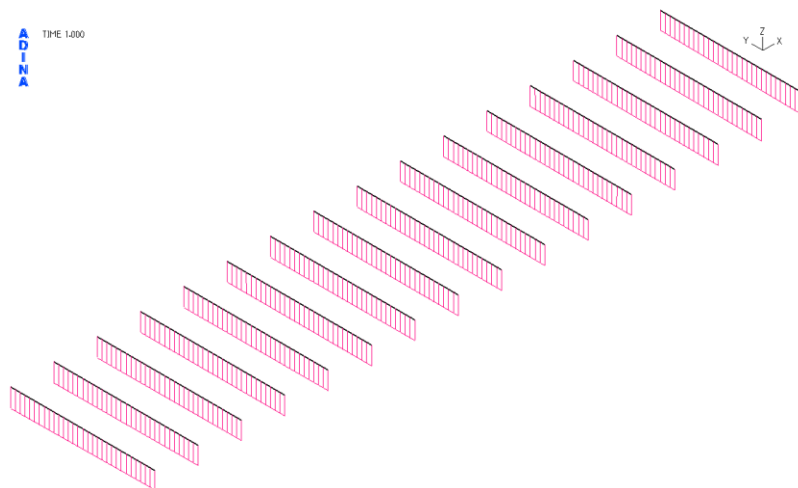
$$\text{Επομένως είναι: } N = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 210\text{GPa} \cdot 326\text{cm}^2 \cdot 20 = 1643.1\text{kN}.$$

Αντιθέτως αν τα άκρα του μέλους είναι ελεύθερα (μηδενική δυσκαμψία εδαφικού ελατηρίου), τότε το μέλος μπορεί να διασταλεί (ή συσταλεί) χωρίς να παρεμποδίζεται. Αυτό αυτομάτως σημαίνει μηδενική αναπτυσσόμενη ένταση στο μέλος ( $N=0$ ), αφού είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί όπως αυτό επιθυμεί.

Το έδαφος, σύμφωνα με την γεωτεχνική μελέτη, έχει δείκτη εδάφους  $40000\text{kN/m}^3$ . Επομένως η εδαφική αντίσταση που παρουσιάζεται είναι κάτι ανάμεσα από μηδενική και πολύ μεγάλη (θεωρητικώς άπειρη), άρα και η αναπτυσσόμενη αξονική αναμένεται να βρίσκεται μεταξύ των δυο οριακών τιμών που υπολογίστηκαν ανωτέρω.

$$\text{Είναι: } 0\text{kN} < N = 430.3\text{kN} < 1643.1\text{kN}.$$

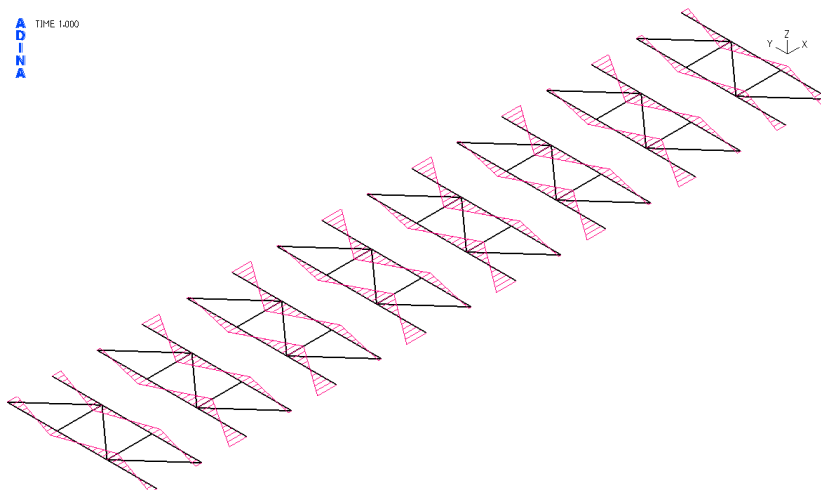
Άρα επαληθεύεται ο ανωτέρω απλουστευμένος τρόπος ελέγχου του εξαγόμενου αποτελέσματος.



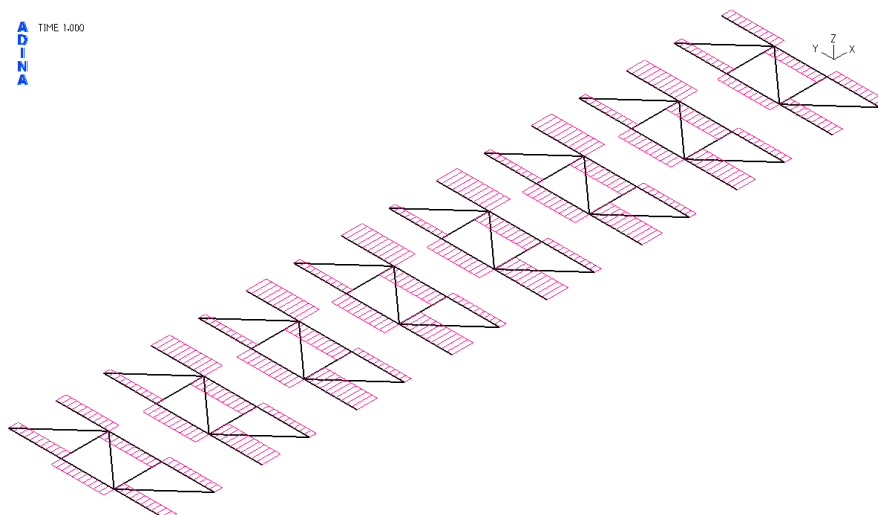
Σχήμα 4-16: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=13.41\text{kNm}$

Η σύνδεση αντηρίδας – κεφαλοδέσμου υλοποιείται με πάκτωση, επομένως λόγω της επιβολής του ομοιόμορφου θερμοκρασιακού φορτίου στην αντηρίδα αναπτύσσεται ροπή στα άκρα της και σε συνδυασμό με το ότι δεν επιβάλλονται κατακόρυφα εξωτερικά φορτία σε αυτήν, το μέγεθος της ροπής περί τον γ-γ άξονα παραμένει ίδιο σε όλο το μήκος της αντηρίδας.

Επιπροσθέτως, λόγω της ύπαρξης των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας, αναπτύσσονται και εντατικά μεγέθη λόγω καμπτικής ροπής  $M_z$  και τέμνουσας δύναμης  $V_y$  στο μέλος της αντηρίδας, η μορφή των οποίων παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-17 και Σχήμα 4-18 αντιστοίχως).



Σχήμα 4-17: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_z=5.8\text{kNm}$



Σχήμα 4-18: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM400 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_y=2.49\text{kN}$

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 4-4 στον οποίο υπολογίζονται, με βάση τα ανωτέρω αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και με βάση τον συνδυασμό φόρτισης  $1.35G+1.35\Omega\Gamma+1.50\Delta T$  του Πίνακα 4-2, τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού. Αξιοποιώντας τα κάτωθι μεγέθη σχεδιασμού, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας HEM400.

Πίνακας 4-4: Υπολογισμός μεγεθών σχεδιασμού

Ιδίων Βάρος		Ωθήσεις Γαιών		Θερμοκρασία		Μεγέθη Σχεδιασμού	
N	0	N	1978	N	430.3	$N_{Ed}$ (kN)	3315.75
$M_y$	76.19	$M_y$	0	$M_y$	13.41	$M_{Ed,y}$ (kNm)	122.97
$M_z$	0	$M_z$	15.8	$M_z$	5.8	$M_{Ed,z}$ (kNm)	30.03
$V_y$	0	$V_y$	5.28	$V_y$	2.49	$V_{Ed,y}$ (kN)	10.86
$V_z$	19.64	$V_z$	0	$V_z$	0	$V_{Ed,z}$ (kN)	26.51

#### Έλεγχος επάρκειας διατομής HEM400 αντηρίδων άνω στάθμης

Τα δεδομένα για την διατομή HEM400 είναι:

$$f_y=35.5\text{MPa (χάλυβας S355)}$$

$$E=21000 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu=0.3$$

$$G=\frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \quad (4-1)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-1) προκύπτει:

$$G=8076.9 \text{ kN/cm}^2$$

$$\gamma_{M_0}=1.00$$

$$A=326\text{cm}^2$$

$$A_v=\max\{A-2 \cdot b \cdot t_f+(t_w+2 \cdot r) \cdot t_f, n \cdot h_w \cdot t_w\} \quad (4-2)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-2) προκύπτει:

$$A_v = 110.4 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 104100 \text{ cm}^4, I_z = 19340 \text{ cm}^4, I_w = 7410000 \text{ cm}^6 \text{ και } I_t = 1520 \text{ cm}^4$$

$$W_{pl,y} = 5571 \text{ cm}^3 \text{ και } W_{pl,z} = 1934 \text{ cm}^3$$

### Εύρεση κατηγορίας διατομής

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι γενικότερη απαίτηση, οι διατομές των δομικών μελών του συστήματος αντιστήριξης να είναι κατηγορίας 1.

- Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2α)

Η διατομή της αντηρίδας υπόκειται κυρίως σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 33 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon = 0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{(h-2 \cdot t_f - 2 \cdot r)}{t_w} = \frac{432 \text{ mm} - 2 \cdot 40 \text{ mm} - 2 \cdot 27 \text{ mm}}{21 \text{ mm}} = 14.2 \leq 26.7 = 33 \cdot \epsilon$$

- Κατάταξη προεξέχοντων ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2β)

Το προεξέχων πέλαμα υπόκειται σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 9 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon = 0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} = \frac{\frac{307 \text{ mm}}{2} - \frac{21 \text{ mm}}{2} - 27}{40 \text{ mm}} = 2.9 \leq 7.3 = 9 \cdot \epsilon$$

Αφού ικανοποιούνται και οι δυο ανωτέρω ανισότητες, η διατομή είναι κατηγορίας 1. Άρα θα πραγματοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-3)$$

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-4)$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-5)$$

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (4-6)$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (4-7)$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (4-3), (4-4), (4-5), (4-6), (4-7) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:



$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{326 \text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 11573 \text{kN}$$

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{5571 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 1977.7 \text{kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{1934 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 686.6 \text{kNm}$$

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{110.4 \text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2262.8 \text{kN}$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{110.4 \text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2262.8 \text{kN}$$

### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-8) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (4-8)$$

Ο έλεγχος γίνεται και κατά τις 2 διευθύνσεις, γ-γ και z-z. Επομένως αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,y,Rd} \Rightarrow 10.86 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 2262.8 \text{kN} \Rightarrow 10.86 \text{kN} \leq 1131.4 \text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,z,Rd} \Rightarrow 26.51 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 2262.8 \text{kN} \Leftarrow 26.51 \text{kN} \leq 1131.4 \text{kN}$$

### Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή ( $\chi_{LT}$ ) ροπής αντοχής λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Η διατομή της αντηρίδας είναι διπλού ταυ. Άρα αφού δεν είναι κλειστή διατομή κινδυνεύει έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Ο κίνδυνος αυτός οδηγεί στην απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής με βάση την τιμή του μειωτικού συντελεστή  $\chi_{LT}$ .

Το κατακόρυφο φορτίο του ίδιου βάρους, που είναι το μοναδικό κατακόρυφο φορτίο, είναι η αιτία στρεπτοκαμπτικού λυγισμού του μέλους της αντηρίδας.

Πρωταρχικός στόχος είναι ο υπολογισμός της κρίσιμης ροπής  $M_{cr}$ . Η διατομή HEM400 είναι διπλής συμμετρίας και επίσης το φορτίο του ίδιου βάρους ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής, άρα είναι  $z_j=0$  και  $z_g=0$  αντιστοίχως. Επομένως η κρίσιμη ροπή υπολογίζεται από την εξ. (4-9).

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[ \left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} \right]^{0.5} \quad (4-9)$$

Ως μήκος  $L$  θεωρείται το μήκος της αντηρίδας μεταξύ πλευρικά εξασφαλισμένων σημείων. Επομένως, λόγω της ύπαρξης των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας και λόγω του ότι το μέλος της αντηρίδας τείνει να εκτραπεί πλευρικά λόγω της αναπτυσσόμενης ροπής περί τον γ-γ άξονα, γίνεται αντιληπτό ότι είναι  $L=5.00\text{m}$ .

Σύμφωνα με τον πίνακα F.1.1 (ENV1993-1-1/1992) λόγω του καταμεμημένου φορτίου του ίδιου βάρους και για θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα της αντηρίδας ( $k=1.00$ ), προκύπτει:

$C_1=1.00$ , αφού για το δυσμενέστερο φάτνωμα, το οποίο είναι το μεσαίο, γίνεται η απλουστευτική παραδοχή ότι  $\psi=1$ , δηλαδή γίνεται η υπέρ της ασφαλείας θεώρηση ότι αντί του παραβολοειδούς διαγράμματος ροπών θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς, στο μεσαίο φάτνωμα, ορθογωνικό διάγραμμα με σταθερή τιμή ίση με τη μέγιστη του παραβολοειδούς.

Βέβαια η σύνδεση της αντηρίδας με τον κεφαλόδεσμο προσεγγίζει πιο πολύ την πάκτωση διότι οι κοχλίες είναι εκτός της διατομής της σύνδεσης των δύο αυτών δομικών μελών. Αλλά υπέρ της ασφαλείας, θα γίνει η προσέγγιση ότι η σύνδεση είναι απλή, δηλαδή ότι ο κεφαλόδεσμος λειτουργεί ως απλή στήριξη για την αντηρίδα. Επομένως, σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, τα δύο άκρα της αντηρίδας είναι ελεύθερα σε στρέβλωση, άρα  $k_w=1.00$ .

Εν τέλει έχουν εκτιμηθεί οι τιμές όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της  $M_{cr}$ . Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-9) προκύπτει:

$$M_{cr}=1.132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 19340 \text{cm}^4}{(1.00 \cdot 5\text{m})^2} \cdot \left[ \left( \frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{7410000 \text{cm}^6}{19340 \text{cm}^4} + \frac{(1.00 \cdot 5\text{m})^2 \cdot 8076.9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 1520 \text{cm}^4}{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 19340 \text{cm}^4} \right]^{0.5} \Rightarrow M_{cr}=543456 \text{kNcm}$$

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (4-10)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-10) είναι:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{5571 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{543456 \text{kNcm}}} \Rightarrow \bar{\lambda}_{LT}=0.603$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.4 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για ελατή διατομή I με λόγο  $h/b < 2$ , προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $\alpha$ ):

$\alpha_{LT}=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_{LT}$ :

$$\Phi_{LT} = 0.5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (4-11)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^{-2}}} \quad (4-12)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y \cdot W_y}{\gamma_{M1}} \quad (4-13)$$

Από την εξ. (4-11) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_{LT} = 0.5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.603 - 0.2) + 0.603^2] = 0.724$$

Ο μειωτικός συντελεστής  $\chi_{LT}$ , από την εξ. (4-12), είναι:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0.724 + \sqrt{0.724^2 - 0.603^2}} \Rightarrow \chi_{LT} = 0.889$$

Επομένως η απομειωμένη ροπή αντοχής που προκύπτει από την εξ. (4-13) είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \frac{0.889 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 5571 \text{cm}^3}{1.00} \Rightarrow M_{b,Rd} = 1757.7 \text{kNm}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

$$N_{Ed} \leq 0.25 \cdot N_{pl,Rd} \quad (4-14)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-15)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-16)$$

Αν επαληθεύονται οι εξ. (4-14) και (4-15) τότε δεν χρειάζεται απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής για κάμψη περί τον άξονα γ-γ.

Αν επαληθεύεται η εξ. (4-16) τότε δεν χρειάζεται απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής για κάμψη περί τον άξονα z-z.

Δηλαδή στις ανωτέρω περιπτώσεις είναι  $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$  και  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ .

Στην περίπτωση που απαιτείται απομείωση στη ροπή αντοχής για κάμψη περί τον γ-γ και περί τον z-z άξονα τότε είναι:

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0.5 \cdot a}; M_{pl,y,Rd} \right\} \quad (4-17)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \text{ για } n > a \text{ και } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \text{ για } n \leq a \quad (4-18)$$

$$\text{Όπου: } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \text{ και } a = \min \left\{ (A-2 \cdot b \cdot t_f) / A; 0.5 \right\}$$

Στην παρούσα περίπτωση δεν ικανοποιείται καμία εξίσωση εκ των (4-14), (4-15), (4-16), επομένως απαιτείται απομείωση σύμφωνα με τις εξ. (4-17) και (4-18). Όπου στην περίπτωση απομείωσης της ροπής αντοχής για κάμψη περί τον γ-γ άξονα, δεν θα χρησιμοποιηθεί η  $M_{pl,y,Rd}$  αλλά η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, δηλαδή η  $M_{b,Rd}$ . Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι για τη ροπή αντοχής για κάμψη περί τον γ-γ υφίστανται δυο απομειώσεις. Μία λόγω του κινδύνου του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και μία λόγω του μεγέθους της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης. Ενώ για την ροπή αντοχής για κάμψη περί τον z-z, υφίσταται μία μόνο απομείωση, αυτή λόγω του μεγέθους της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης.

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις αυτές προκύπτει εν τέλει:

$$M_{N,y,Rd} = 1430.5 \text{ kNm} \text{ και } M_{N,z,Rd} = 684.65 \text{ kNm}$$

### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος του δρώντος μεγέθους προς το μέγεθος αντοχής.

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{122.98 \text{ kNm}}{1430.5 \text{ kNm}} = 0.09 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{10.86 \text{ kN}}{2262.8 \text{ kN}} = 0.005$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{30.03 \text{ kNm}}{684.65 \text{ kNm}} = 0.04 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{26.51 \text{ kN}}{2262.8 \text{ kN}} = 0.01$$

### Έλεγχος επάρκειας

$$\left[ \frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[ \frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1.00 \quad (4-19)$$

Όπου συντηρητικά μπορεί να ληφθεί  $\alpha = \beta = 1.00$ .

Πρέπει να γίνει έλεγχος διαξονικής κάμψης (εξ. (4-19)), διότι στις κρίσιμες θέσεις (μέσο αντηρίδας και σημείο σύνδεσης αντηρίδας με χιαστί) συνυπάρχουν οι ροπές  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$ . Παρατηρώντας όμως τους ανωτέρω λόγους των μέγιστων δρώντων ροπών προς τις ροπές αντοχής, διαπιστώνεται ότι οι λόγοι είναι πολύ μικροί. Πόσο μάλλον αν επισημανθεί ότι δεν παρουσιάζονται στις ίδιες θέσεις οι μέγιστες τιμές των  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$ , άρα στην θέση ελέγχου ο ένας εκ των δύο λόγων, δρώσας ροπής προς ροπή αντοχής, θα είναι σίγουρα μικρότερος από την αντίστοιχη τιμή του λόγου που παρουσιάζεται ανωτέρω. Επομένως είναι φανερό ότι ο έλεγχος διαξονικής κάμψης ικανοποιείται πολύ εύκολα για την εκάστοτε θέση ελέγχου, χωρίς καν να χρειαστεί να γίνει αντικατάσταση των τιμών των λόγων στην εξ. (4-19).

### Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής HEM400 αντηρίδων άνω στάθμης

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

Χρειάζεται επιπροσθέτως να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχών  $N_{Rk}$ ,  $M_{pl,y,Rk}$  και  $M_{pl,z,Rk}$  από τις εξ. (4-20), (4-21) και (4-22) αντιστοίχως.

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (4-20)$$

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y \quad (4-21)$$

$$M_{pl,z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y \quad (4-22)$$

Αντικαθιστώντας στις ανωτέρω εξισώσεις προκύπτει:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 326 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 11573 \text{ kN}$$

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 5571 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 1977.7 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 1934 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 686.6 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

1. Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Ο μειωτικός συντελεστής έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού υπολογίστηκε ανωτέρω στον έλεγχο διατομής της HEM400 των αντηρίδων άνω στάθμης. Επομένως κρίνεται σκόπιμο να μην ξανά επαναληφθεί η διαδικασία υπολογισμού του μειωτικού αυτού συντελεστή και απλώς να παρατεθεί η τιμή του.

Είναι δηλαδή  $\chi_{LT}=0.923$ .

2. Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

Για λυγισμό περί τον  $y$ - $y$  άξονα

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-23)$$

Όπου η εξ. (4-23) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4-24)$$

$$L_{cr,y} = k \cdot L \quad (4-25)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (4-26)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-24), (4-25) και (4-26) προκύπτει:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 15\text{m} = 15\text{m}, \text{ όπου:}$$

- $k=1.00$  (θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα της αντηρίδας)
- $L=15\text{m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων). Κρίσιμο είναι όλο το μήκος της αντηρίδας αφού δεν υπάρχουν κατακόρυφα χιαστί στοιχεία ώστε να προσφέρουν πλήρη εξασφάλιση, στα σημεία σύνδεσής τους με την αντηρίδα, στο κατακόρυφο επίπεδο και κατ' επέκταση να μειωθεί το μήκος λυγισμού της αντηρίδας.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{104100\text{cm}^4}{326\text{cm}^2}} = 17.87\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{15\text{m}}{17.87\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 1.099$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για ελατή διατομή με λόγο  $h/b > 1.2$ ,  $t_r = 40\text{mm} \leq 40\text{mm}$ , λυγισμό περί τον άξονα  $y$ - $y$  και χάλυβα κατηγορίας S355, προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών(a):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού a.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $x_y$ :

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] \quad (4-27)$$

$$x_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \quad (4-28)$$

Από την εξ. (4-27) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (1.099 - 0.2) + 1.099^2] = 1.198$$

Επομένως, από την εξ. (4-28), ο μειωτικός συντελεστής  $x_y$  είναι ίσος με:

$$x_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1.198 + \sqrt{1.198^2 - 1.099^2}} = 0.597$$

*Για λυγισμό περί τον z-z άξονα*

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-29)$$

Όπου η εξ. (4-29) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 5m = 5m$ , όπου:

- $k=1.00$  (θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα του εξεταζόμενου τμήματος)
- $L=5m$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων). Λόγω της ύπαρξης των οριζοντίων χιαστί εξασφαλίζεται πλήρως η αντηρίδα στα κοινά τους σημεία (δες υποπαράγραφο 4.4.1), επομένως το μήκος λυγισμού της μειώνεται στο 1/3 του συνολικού της μήκους.

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{19340 \text{cm}^4}{326 \text{cm}^2}} = 7.70 \text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{5m}{7.70 \text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.849$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για ελατή διατομή με λόγο  $h/b > 1.2$ ,  $t_r = 40 \text{mm} \leq 40 \text{mm}$ , λυγισμό περί τον άξονα z-z και χάλυβα κατηγορίας S355, προκύπτει καμπύλη λυγισμού b.

Συντελεστής ατελειών(a):

$a=0.34$  για καμπύλη λυγισμού a.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $x_z$ :

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] \quad (4-30)$$

$$x_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad (4-31)$$

Από την εξ. (4-30) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.34 \cdot (0.849 - 0.2) + 0.849^2] = 1.328$$

Επομένως, από την εξ. (4-31), ο μειωτικός συντελεστής  $x_y$  είναι ίσος με:

$$x_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1.328 + \sqrt{1.328^2 - 0.849^2}} = 0.426$$

### 3. Συντελεστές αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Υπολογισμός συντελεστών  $C_m$  ισοδύναμης ομοιόμορφης ροής:

Πίνακας 4-5: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	y-y	z-z
$C_{mz}$	z-z	y-y

Από τον Πίνακα 4-5 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροής.

Επαλληλίζοντας τα διαγράμματα ροών περί τον y-y (Σχήμα 4-10 και Σχήμα 4-16) προκύπτει ροπή:

- στο άκρο ίση με  $M_h = 1.50 \cdot 13.41 \text{ kNm} = 20.12 \text{ kNm}$
- στο μέσο ίση με  $M_s = 1.35 \cdot 76.19 \text{ kNm} + 1.50 \cdot 13.41 \text{ kNm} = 122.97 \text{ kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$- a_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{20.12 \text{ kNm}}{122.97 \text{ kNm}} \Rightarrow a_h = 0.16$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το ίδιο βάρος και το θερμοκρασιακό φορτίο επιβάλλονται ομοιόμορφα στο μέλος της αντηρίδας

$$\text{Άρα προκύπτει: } C_{my} = 0.95 + 0.05 \cdot a_h = 0.95 + 0.05 \cdot 0.16 \Rightarrow C_{my} = 0.958$$

Σε αντίθεση με την περίπτωση του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, στο παρόν σύστημα αντιστήριξης αναπτύσσεται καμπτική ένταση  $M_z$ . Επομένως υπολογίζεται ο συντελεστής ροής  $C_{mz}$ .

Για άξονα κάμψης z-z τα οριζόντια χιαστί εξασφαλίζουν πλήρως το μέλος της αντηρίδας στους κοινούς τους κόμβους (δες υποπαράγραφο 4.4.1). Επομένως σχηματίζονται 3 φατνώματα. Ο υπολογισμός του  $C_{mz}$  θα γίνει με βάση τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου, από άποψη εντατικών μεγεθών, φατνώματος, δηλαδή του ακριανού. Επαλληλίζοντας τα διαγράμματα ροών περί τον z-z του

ακριανού φατνώματος (Σχήμα 4-13 και Σχήμα 4-17) προκύπτει η μορφή του 1<sup>ου</sup> διαγράμματος ροπών του πίνακα B3 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Στον Πίνακα 4-6 παρουσιάζονται οι τιμές ροπών στα άκρα του ακριανού φατνώματος της αντηρίδας άνω στάθμης όπως έχουν προκύψει από τα 2 εναλλακτικά χωρικά προσομοιώματα που έχουν μορφωθεί.

Πίνακας 4-6: Τιμές ροπών στα άκρα του ακριανού φατνώματος της αντηρίδας άνω στάθμης

	<b>M στο άκρο (kNm)</b>	<b>M στο σημείο σύνδεσης χιαστί – αντηρίδας (kNm)</b>
Λόγω θερμοκρασιακού φορτίου	-6.63	5.8
Λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών	-11.38	12.48

Τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν και τους συντελεστές σχεδιασμού 1.35 και 1.50. Επομένως είναι:

$$M \text{ στο άκρο} = 1.35 \cdot (-11.38 \text{ kNm}) + 1.50 \cdot (-6.63 \text{ kNm}) = -25.31 \text{ kNm}$$

$$M \text{ στο σημείο σύνδεσης χιαστί – αντηρίδας} = 1.35 \cdot 12.48 \text{ kNm} + 1.50 \cdot 5.8 \text{ kNm} = 25.55 \text{ kNm}$$

$$\text{Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. Β), είναι } \psi = \frac{25.55}{-25.31} = 1.009$$

$$\text{Άρα προκύπτει: } C_{mz} = 0.6 + 0.4 \cdot \psi \geq 0.4 \Rightarrow C_{mz} = 0.4$$

#### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος της αντηρίδας είναι εξασφαλισμένο στα άκρα του ώστε να μην παραμορφώνεται στρεπτικά και επιπλέον δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο στην αντηρίδα. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Η χρησιμοποιούμενη διατομή είναι τύπου I οπότε, σε αντίθεση με την περίπτωση του συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας όπου η διατομή ήταν τύπου CHS, άρα ο υπολογισμός των συντελεστών αλληλεπίδρασης δεν ήταν ακριβής μέσω του πίνακα αυτού, ο υπολογισμός τώρα είναι ακριβής.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (4-32)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (4-33)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left( 1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0.6) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{mz} \cdot \left( 1 + 1.4 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (4-34)$$

$$k_{yz} = 0.6 \cdot k_{zz} \quad (4-35)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-32), (4-33), (4-34) και (4-35) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-7: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	1.326
$k_{zy}$	0.796
$k_{zz}$	0.696
$k_{yz}$	0.418



#### 4. Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Στο μέλος της αντηρίδας δεν παρουσιάζονται στην ίδια θέση οι μέγιστες τιμές των  $M_{y,Ed}$  και  $M_{z,Ed}$ . Αλλά για να αποφευχθεί να γίνει ο έλεγχος μέλους και στις 2 κρίσιμες θέσεις (μέσο αντηρίδας και σημείο σύνδεσης χιαστί – αντηρίδας) γίνεται, υπέρ της ασφαλείας, η απλουστευτική θεώρηση ότι εμφανίζονται στην ίδια θέση οι μέγιστες αυτές τιμές. Με βάση την θεώρηση αυτή υλοποιήθηκαν οι παρακάτω έλεγχοι.

$$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-36)$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-37)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-36) και (4-37) προκύπτει:

$$0.48+0.09+0.02=0.59 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-36)}$$

$$0.67+0.06+0.03=0.76 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-37)}$$

Παρατηρώντας τον σύνθετο έλεγχο μέλους, και κατά τις δυο διευθύνσεις, γίνεται αντιληπτό ότι ο κυριότερος κίνδυνος μη ικανοποίησης του ελέγχου οφείλεται στον όρο της αξονικής δύναμης (1<sup>ος</sup> όρος του ελέγχου). Επομένως το μέλος της αντηρίδας κινδυνεύει κυρίως λόγω καμπτικού λυγισμού και σχεδόν καθόλου λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, κάτι που το δείχνει ο 2<sup>ος</sup> όρος του ελέγχου.

Επίσης από τους ανωτέρω ελέγχους (διατομής και μέλους) είναι φανερό ότι κρισιμότερος είναι ο έλεγχος μέλους της αντηρίδας, αφού τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας του μέλους είναι πολύ πιο κοντά στη μονάδα σε σχέση με τα αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας της διατομής.

Τέλος διαπιστώνεται ότι υπάρχει περιθώριο να χρησιμοποιηθεί και μικρότερη διατομή, αφού για την HEM400 κανένας από τους δυο ελέγχους δεν ικανοποιείται οριακά. Με χρήση μικρότερης διατομής αναμένεται οι τιμές των ελέγχων επάρκειας να είναι μεγαλύτερες, και ιδίως για τον έλεγχο μέλους υπάρχει ο κίνδυνος οι τιμές να πλησιάσουν αρκετά κοντά στη μονάδα. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να εξεταστεί η HEM340 ως διατομή των αντηρίδων της άνω στάθμης, η οποία θα υποβληθεί σε έλεγχο επάρκειας διατομής και μέλους.

#### Διατομή HEM340 αντηρίδων άνω στάθμης

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η HEM340, η οποία είναι κατηγορίας 1 (βασική απαίτηση).

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται ακριβώς η ίδια, με τη μόνη διαφοροποίηση ότι στην περίπτωση αυτή είναι διαφορετικά τα χαρακτηριστικά της διατομής. Δηλαδή η μορφή των διαγραμμάτων των εντατικών μεγεθών, η ποιοτική ερμηνεία των διαγραμμάτων αυτών και επιβεβαίωση των τιμών τους με πιο απλουστευμένες διαδικασίες και τέλος η ακολουθούμενη μεθοδολογία των ελέγχων διατομής και μέλους είναι ίδια.

Επομένως κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των ελέγχων διατομής και μέλους της HEM340, αφού αυτά είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μας δείχνουν την αποδοτικότητα της χρησιμοποιούμενης διατομής.

### Έλεγχος επάρκειας διατομής HEM340 αντηρίδων άνω στάθμης

#### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος του δρώντος μεγέθους προς το μέγεθος αντοχής.

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{114.74\text{kNm}}{1196.9\text{kNm}} = 0.10 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{11.26\text{kN}}{2025\text{kN}} = 0.01$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{31.12\text{kNm}}{686.6\text{kNm}} = 0.05 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{25.76\text{kN}}{2025\text{kN}} = 0.01$$

#### Έλεγχος επάρκειας

Πρέπει να γίνει έλεγχος διαξονικής κάμψης (εξ. (4-19)), διότι στις κρίσιμες θέσεις (μέσο αντηρίδας και σημείο σύνδεσης αντηρίδας με χιαστί) συνυπάρχουν οι ροπές  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$ . Παρατηρώντας όμως τους ανωτέρω λόγους των μέγιστων δρώντων ροπών προς τις ροπές αντοχής, διαπιστώνεται ότι οι λόγοι είναι πολύ μικροί. Πόσο μάλλον αν επισημανθεί ότι δεν παρουσιάζονται στις ίδιες θέσεις οι μέγιστες τιμές των  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$ , άρα στην θέση ελέγχου ο ένας εκ των δύο λόγων, δρώσας ροπής προς ροπή αντοχής, θα είναι σίγουρα μικρότερος από την αντίστοιχη τιμή του λόγου που παρουσιάζεται ανωτέρω. Επομένως είναι φανερό ότι ο έλεγχος διαξονικής κάμψης ικανοποιείται πολύ εύκολα για την εκάστοτε θέση ελέγχου, χωρίς καν να χρειαστεί να γίνει αντικατάσταση των τιμών των λόγων στην εξ. (4-19).

### Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής HEM340 αντηρίδων άνω στάθμης

#### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Στο μέλος της αντηρίδας δεν παρουσιάζονται στην ίδια θέση οι μέγιστες τιμές των  $M_{y,Ed}$  και  $M_{z,Ed}$ . Αλλά για να αποφευχθεί να γίνει ο έλεγχος μέλους και στις 2 κρίσιμες θέσεις (μέσο αντηρίδας και σημείο σύνδεσης χιαστί – αντηρίδας) γίνεται, υπέρ της ασφαλείας, η απλουστευτική θεώρηση ότι εμφανίζονται στην ίδια θέση οι μέγιστες αυτές τιμές. Με βάση την θεώρηση αυτή υλοποιήθηκαν οι παρακάτω έλεγχοι.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-36) και (4-37) προκύπτει:

$$0.60 + 0.11 + 0.02 = 0.73 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-36)}$$

$$0.87 + 0.06 + 0.03 = 0.96 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-37)}$$

Παρατηρώντας τον σύνθετο έλεγχο μέλους, και κατά τις δυο διευθύνσεις, γίνεται αντιληπτό ότι ο κυριότερος κίνδυνος μη ικανοποίησης του ελέγχου οφείλεται στον όρο της αξονικής δύναμης (1<sup>ος</sup> όρος του ελέγχου). Επομένως το μέλος της αντηρίδας κινδυνεύει κυρίως λόγω καμπτικού λυγισμού και σχεδόν καθόλου λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, κάτι που το δείχνει ο 2<sup>ος</sup> όρος του ελέγχου.

Επίσης από τον έλεγχο διατομής είναι φανερό ότι υπάρχει ακόμα πολύ μεγάλο περιθώριο αξιοποίησης της HEM340. Αντιθέτως, από τον έλεγχο μέλους παρατηρείται οριακή μη υπέρβαση του ορίου. Επομένως εξαγεται το συμπέρασμα ότι με βάση τα αποτελέσματα των γραμμικών αναλύσεων η διατομή HEM340 οριακά επαρκεί.

Επειδή όμως η επάρκειά της είναι οριακή, είναι επιτακτικό να γίνουν και μη γραμμικές αναλύσεις ώστε να ληφθούν υπόψιν και τα φαινόμενα μη γραμμικότητας του συστήματος αντιστήριξης. Τότε, αφού θα έχουν ληφθεί εν τέλει όλοι οι παράμετροι υπόψιν, θα εξεταστεί αν τελικά η HEM340 επαρκεί ή όχι. Πάντως αναμένεται η επάρκειά της, ή μη, να είναι οριακή, αφού όπως επεξηγείται στην υποπαράγραφο 4.2.4 δεν παίζει ρόλο το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηριξεων της αντηρίδας, επομένως τα αποτελέσματα γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων πρέπει περίπου να ταυτίζονται.

Στον Πίνακα 4-8 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας για κάθε μία από τις διατομές που εξετάστηκαν ανωτέρω.

Πίνακας 4-8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας – Άνω στάθμη

		<b>HEM400</b>	<b>HEM340</b>
Έλεγχος επάρκειας διατομής	$M_{Ed,y} / M_{N,y,Rd} \leq 1.0$	0.09	0.10
	$M_{Ed,z} / M_{N,z,Rd} \leq 1.0$	0.04	0.05
Έλεγχος επάρκειας μέλους	$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0$ $\gamma_{M1}$	0.59	0.73
	$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0$ $\gamma_{M1}$	0.76	0.97

#### 4.2.2.2 Μη γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη

Η βασική αιτία εφαρμογής των μη γραμμικών αναλύσεων, η οποία καθιστά επιτακτική την υλοποίησή τους, είναι η υψομετρική διαφορά A/6 μεταξύ των στηρίξεων της αντηρίδας, όπου A=H διατομής διπλού ταυ. Στόχος είναι να διερευνηθεί αν αυτή η υψομετρική διαφορά επηρεάζει την εντατική κατάσταση της αντηρίδας και κατ' επέκταση κατά πόσο διαφοροποιεί τις απαιτήσεις σε διατομή της αντηρίδας, σε σύγκριση πάντα με τις διατομές που έχουν προκύψει από την γραμμική ανάλυση.

Ως διατομές έναρξης στις μη γραμμικές αναλύσεις για τις αντηρίδες άνω, θα χρησιμοποιηθούν οι διατομές των αντηρίδων οι οποίες προέκυψαν από τις γραμμικές αναλύσεις. Επίσης, το θλιπτικά επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο στο μη γραμμικό προσομοίωμα ισούται με το φορτίο σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) που έχει προκύψει σύμφωνα με τον συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.35ΩΓ+1.50ΔΤ, αξιοποιώντας τις τιμές των αξονικών δυνάμεων των γραμμικών προσομοιωμάτων λόγω των φορτίων του ίδιου βάρους, των ωθήσεων γαιών και της ομοιόμορφης θερμοκρασίας.

Εισάγεται γεωμετρική ατέλεια λόγω καμπυλότητας του φορέα με το σχήμα των ιδιομορφών λυγισμού που θα προκύψουν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) και μέγεθος συμβατό με τις καμπύλες λυγισμού του EC3 για τον χρησιμοποιούμενο τύπο διατομής.

Οι διατομές των αντηρίδων άνω στάθμης είναι κατηγορίας 1. Επομένως από τη στιγμή που θα υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος και διαστασιολόγηση, λαμβάνεται υπόψιν το πλαστικό μέγεθος ατέλειας ( $e_{o,pl}$ ), και όχι το ελαστικό ( $e_{o,el}$ ).

Η διατομή που προέκυψε από τις γραμμικές αναλύσεις, η οποία δεν ικανοποιεί οριακά τον έλεγχο επάρκειας, είναι η HEM340. Επομένως σε αυτήν έχει νόημα να πραγματοποιηθούν οι μη γραμμικές αναλύσεις για να διαπιστωθεί εν τέλει αν επαρκεί οριακά ή όχι.

#### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή HEM340 αντηρίδων άνω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{\Omega T} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 3304.4 \text{ kN}$$

Για την HEM340 ισχύει:

$$- \frac{h}{b} = \frac{377 \text{ mm}}{309 \text{ mm}} = 1.22 \geq 1.2$$

$$- t_f = 40 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm}$$

- Χάλυβας ποιότητας S355

Επομένως, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2 EN1993-1-1, προκύπτει ότι για λυγισμό περί τον γ-γ άξονα (ισχυρός άξονα) η καμπύλη λυγισμού της HEM340 είναι η a και για λυγισμό περί τον z-z άξονα (ασθενής άξονας) είναι η b.

Άρα σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 EN1993-1-1, τα μεγέθη των γεωμετρικών ατελειών περί τον ισχυρό και περί τον ασθενή άξονα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-9 και Πίνακα 4-10 αντιστοίχως.

Πίνακας 4-9: Μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα της διατομής HEM340

$e_{o,el} = L/300$	$e_{o,pl} = L/250$
0.05m	0.06m

Πίνακας 4-10: Μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής HEM340

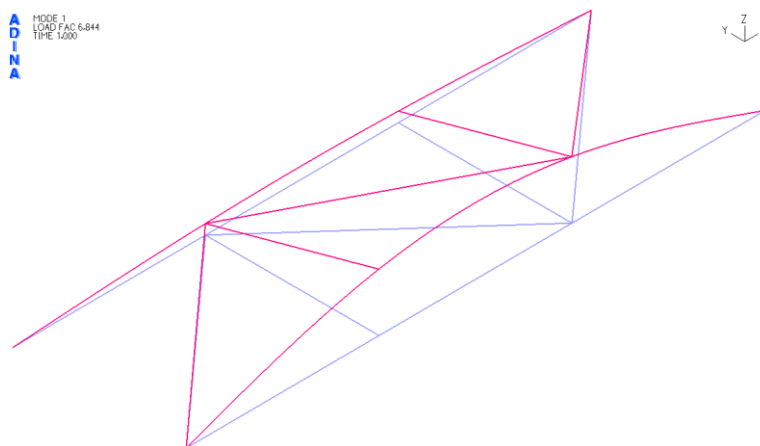
$e_{o,el} = (L/3)/250$	$e_{o,pl} = (L/3)/200$
0.02m	0.025m

Η γεωμετρική ατέλεια στην κατακόρυφη διεύθυνση θα εισαχθεί στο προσομοίωμα με πρόσημα <->, ώστε να έχει την ίδια φορά με αυτή του ίδιου βάρους. Επομένως εξετάζεται το δυσμενέστερο σενάριο που μπορεί να συμβεί στην πραγματικότητα.

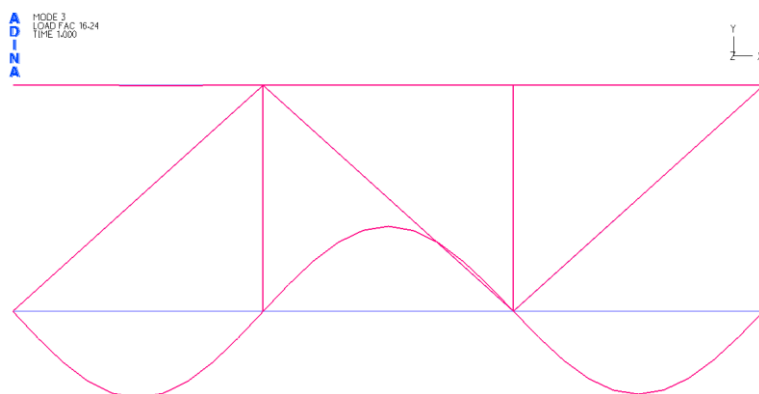
Τέλος, η διατομή HEM340 είναι κατηγορίας 1. Άρα από τη στιγμή που θα υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος και διαστασιολόγηση, λαμβάνεται υπόψιν το πλαστικό μέγεθος ατέλειας ( $e_{o,pl}$ ), και όχι το ελαστικό ( $e_{o,el}$ ).

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,3 για την μία αντηρίδα, και των ιδιομορφών 2,4 για την άλλη αντηρίδα όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Επειδή οι ιδιομορφές 1,3 είναι ακριβώς ίδιες με τις 2,4 αντιστοίχως, με την μόνη διαφορά ότι αναφέρονται σε διαφορετική αντηρίδα, παρουσιάζονται μόνο οι ιδιομορφές 1 και 3. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 4-19) και η 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 4-20).



Σχήμα 4-19: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή HEM340 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού



Σχήμα 4-20: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή HEM340 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

#### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδα αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4-9 και Πίνακα 4-10 αντιστοίχως. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-21, Σχήμα 4-22) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-21: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Το οριζόντιο τμήμα του δρόμου ισορροπίας περιγράφει το αρχικό στάδιο της ανάλυσης, κατά το οποίο ασκείται το ίδιο βάρος της αντηρίδας.

Από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκύπτει ότι ακριβώς μετά την επιβολή του ίδιου βάρους της αντηρίδας η βύθιση στο μέσο της ισούται με  $15.04 \cdot 10^{-3}$  m.

Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της βύθισης στο μέσο της αντηρίδας, και κατ' επέκταση ελέγχου της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση, υλοποιείται με τη θεώρηση:

- της αντηρίδας ως αμφιέριστη, κάτι το οποίο είναι αληθές αφού έτσι έχει προσομοιαστεί η αντηρίδα στο μη γραμμικό μοντέλο.
- του ίδιου βάρους ως ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, κάτι το οποίο είναι αληθές διότι η μάζα της αντηρίδας είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο μέλος της.

Με βάση τα ανωτέρω, από Στατική, είναι γνωστό ότι:

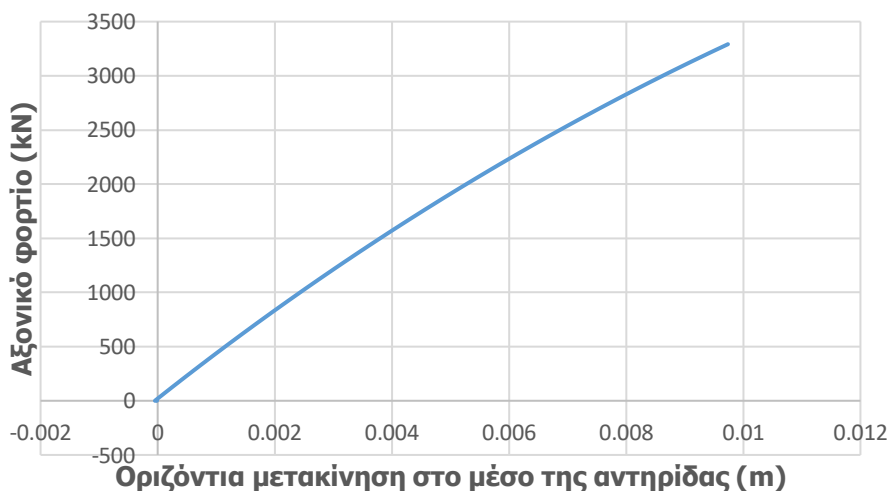
$$\delta_o = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (4-38)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-38) προκύπτει:

$$\delta_o = \frac{5 \cdot \left( 1.35 \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 316 \text{cm}^2 \right) \cdot (15\text{m})^4}{384 \cdot 210 \text{GPa} \cdot 76370 \text{cm}^4} = 13.76 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$\text{Ποσοστό απόκλισης: } \frac{15.04 \cdot 10^{-3} \text{m} - 13.76 \cdot 10^{-3} \text{m}}{15.04 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 8.5\%$$

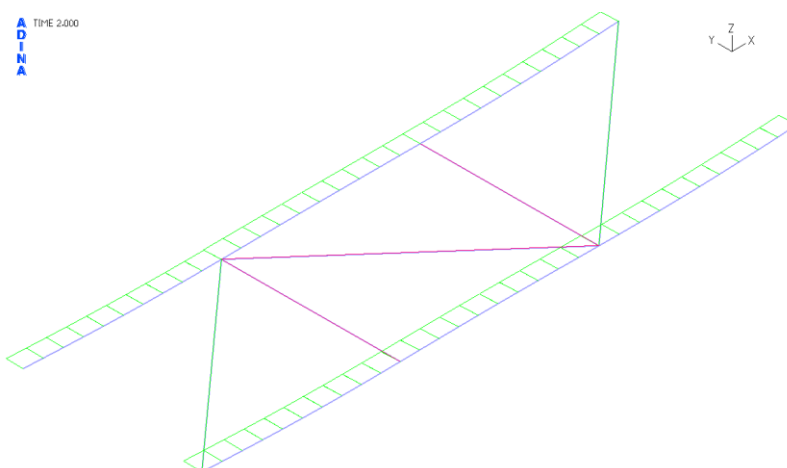
Το ποσοστό απόκλισης δεν είναι <5% ώστε να είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Αλλά αυτή η απόκλιση δεν προκαλεί ανησυχία, διότι η αντηρίδα στο παρόν σύστημα αντιστήριξης, σε αντίθεση με το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, δεν είναι ακριβώς αμφιέριστη αφού στο εσωτερικό της συνδέεται με τους οριζόντιους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Άρα κατά κάποιο τρόπο έχει ελαστικές στηρίξεις στο εσωτερικό της. Επομένως είναι αναμενόμενο να μην είναι κοντά οι τιμές των βυθίσεων στο μέσο της αντηρίδας που προκύπτουν από το ADINA και από την απλουστευτική προσέγγιση, αλλά σε καμία περίπτωση δεν αναμένεται να απέχουν αρκετά οι υπολογιζόμενες αυτές τιμές διότι η ελαστική αυτή εσωτερική στήριξη προσφέρεται από οριζόντια χιαστί και όχι από κατακόρυφα. Αν υπήρχαν κατακόρυφα χιαστί τότε η ενδιάμεση στήριξη θα έτεινε προς ακλόνητη, επομένως οι τιμές βυθίσεων στο μέσο της αντηρίδας που θα προέκυπταν από τους 2 ανωτέρω τρόπους προσέγγισης δεν θα είχαν καμία σχέση μεταξύ τους.



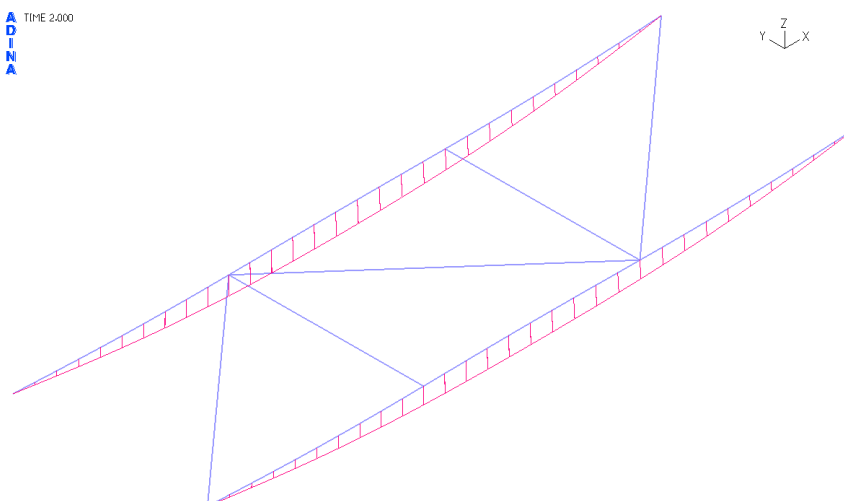
Σχήμα 4-22: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}=3304.4\text{kN}$ .

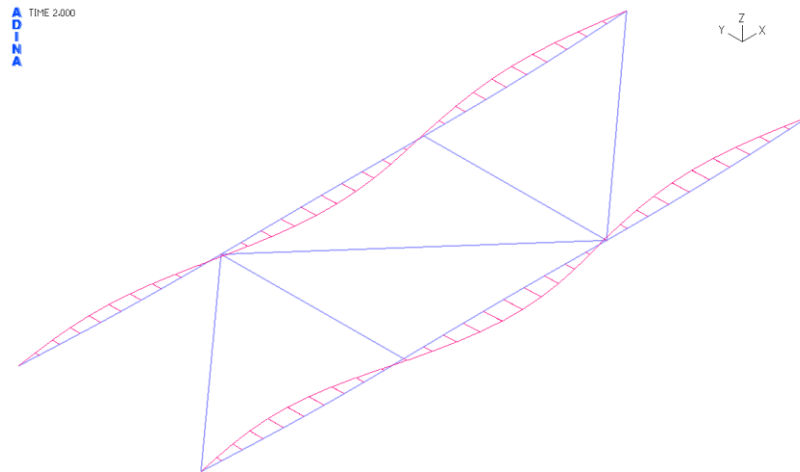
Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα ακόλουθα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 4-23), καμπτικών ροπών (Σχήμα 4-24, Σχήμα 4-25) και τεμνουσών δυνάμεων (Σχήμα 4-26, Σχήμα 4-27).



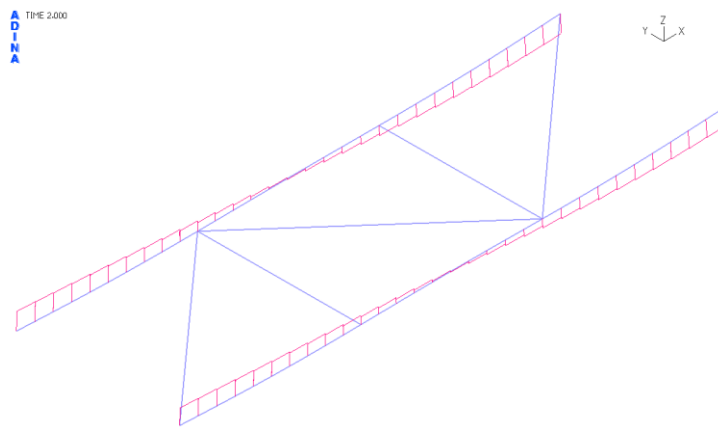
Σχήμα 4-23: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $N=3415\text{kN}$



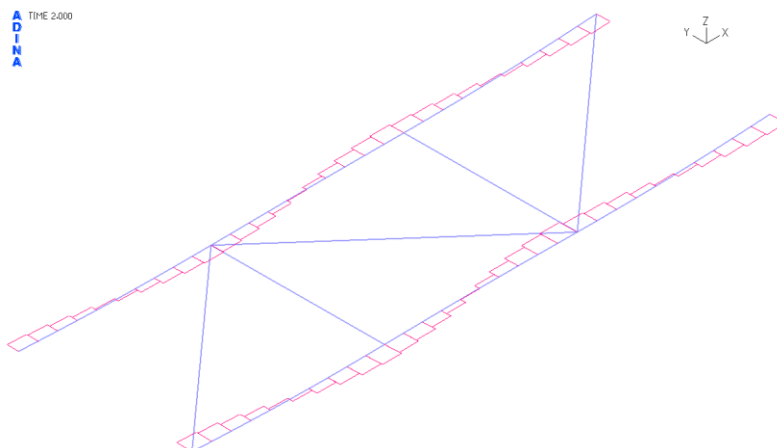
Σχήμα 4-24: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_y=628.20\text{kNm}$



Σχήμα 4-25: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_z=146.90\text{kNm}$



Σχήμα 4-26: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_z=137.20\text{kN}$



Σχήμα 4-27: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_y=93.01\text{kN}$



**Έλεγχος επάρκειας διατομής HEM340 αντηρίδων άνω στάθμης**

Πίνακας 4-11: Μεγέθη σχεδιασμού για την HEM340

$N_{Ed}$ (kN)	3415
$M_{Ed,y}$ (kNm)	628.20
$M_{Ed,z}$ (kNm)	146.90
$V_{Ed,y}$ (kN)	93.01
$V_{Ed,z}$ (kN)	137.20

Στον Πίνακα 4-11 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA.

Παρατηρώντας τον ανωτέρω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος της αξονικής σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) διαφοροποιήθηκε λίγο σε σχέση με την αρχική τιμή του που είχε εκτιμηθεί. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από το ότι στο παρόν σύστημα αντιστήριξης, σε αντίθεση με το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, υπάρχουν και οι χιαστί σύνδεσμοι, των οποίων η μία συνιστώσα της αξονικής είναι επί της διεύθυνσης της αντηρίδας, επομένως η συνιστώσα αυτή διαφοροποιεί λίγο το μέγεθος της αξονικής της αντηρίδας. Όπως και να έχει ο έλεγχος γίνεται με το δυσμενέστερο μέγεθος της αξονικής, το οποίο είναι αυτό που αναγράφεται στον Πίνακα 4-11.

Επίσης, γίνεται αντιληπτό, ότι το μέγεθος της ροπής  $M_z$  μειώθηκε αρκετά συγκριτικά με την ροπή  $M_z$  που αναπτυσσόταν στην περίπτωση που δεν υπήρχαν τα οριζόντια χιαστί. Επομένως ένας ακόμα ευεργετικός ρόλος των χιαστί, πέραν του ότι μειώνουν το μήκος λυγισμού της αντηρίδας για λυγισμό περί τον z-z άξονα, είναι ότι εξαιτίας τους μειώνεται το μέγεθος της δρώσας ροπής  $M_z$ , άρα μειώνεται η απαίτηση αντοχών της διατομής έναντι ροπής περί τον z-z άξονα και κατ' επέκταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερη διατομή για το μέλος της αντηρίδας.

Τα δεδομένα για την διατομή HEM340 είναι:

$f_y=35.5\text{MPa}$  (χάλυβας S355)

$E=21000\text{ kN/cm}^2$

$\nu=0.3$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-1) προκύπτει:

$G=8076.9\text{ kN/cm}^2$

$\gamma_{M_0}=1.00$

$A=316\text{cm}^2$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-2) προκύπτει:

$A_v=98.8\text{cm}^2$

$I_y=76370\text{cm}^4$ ,  $I_z=19710\text{cm}^4$ ,  $I_w=5585000\text{cm}^6$  και  $I_t=1510\text{cm}^4$

$W_{pl,y}=4718\text{cm}^3$  και  $W_{pl,z}=1953\text{cm}^3$

**Εύρεση κατηγορίας διατομής**

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι γενικότερη απαίτηση, οι διατομές των δομικών μελών του συστήματος αντιστήριξης να είναι κατηγορίας 1.

– Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2α)

Η διατομή της αντηρίδας υπόκειται κυρίως σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 33 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{(h-2 \cdot t_f - 2 \cdot r)}{t_w} = \frac{377\text{mm} - 2 \cdot 40\text{mm} - 2 \cdot 27\text{mm}}{21\text{mm}} = 11.6 \leq 26.7 = 33 \cdot \varepsilon$$

– Κατάταξη προεξέχοντων ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2β)

Το προεξέχων πέλας υπόκειται σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 9 \cdot \varepsilon$ , όπου  $\varepsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} = \frac{\frac{309\text{mm}}{2} - \frac{21\text{mm}}{2} - 27}{40\text{mm}} = 2.9 \leq 7.3 = 9 \cdot \varepsilon$$

Αφού ικανοποιούνται και οι δυο ανωτέρω ανισότητες, η διατομή είναι κατηγορίας 1. Άρα θα πραγματοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

#### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

Αξιοποιώντας τις εξ. (4-3), (4-4), (4-5), (4-6), (4-7) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{316\text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 11218\text{kN}$$

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{4718\text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 1674.9\text{kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{1953\text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 693.3\text{kNm}$$

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{98.8\text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2025\text{kN}$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{98.8\text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 2025\text{kN}$$

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-8) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

Ο έλεγχος γίνεται και κατά τις 2 διευθύνσεις,  $y-y$  και  $z-z$ . Επομένως αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,y,Rd} \Rightarrow 93.01\text{kN} \leq 0.5 \cdot 2025\text{kN} \Rightarrow 93.01\text{kN} \leq 1012.5\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,z,Rd} \Rightarrow 137.2\text{kN} \leq 0.5 \cdot 2025\text{kN} \Rightarrow 137.2\text{kN} \leq 1012.5\text{kN}$$

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή ( $\chi_{LT}$ ) ροπής αντοχής λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Η διατομή της αντηρίδας είναι διπλού ταυ. Άρα αφού δεν είναι κλειστή διατομή κινδυνεύει έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Ο κίνδυνος αυτός οδηγεί στην απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής με βάση την τιμή του μειωτικού συντελεστή  $\chi_{LT}$ .

Το κατακόρυφο φορτίο του ίδιου βάρους, που είναι το μοναδικό κατακόρυφο φορτίο, είναι η αιτία στρεπτοκαμπτικού λυγισμού του μέλους της αντηρίδας.

Πρωταρχικός στόχος είναι ο υπολογισμός της κρίσιμης ροπής  $M_{cr}$ . Η διατομή HEM400 είναι διπλής συμμετρίας και επίσης το φορτίο του ίδιου βάρους ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής, άρα είναι  $z_j=0$  και  $z_g=0$  αντιστοίχως. Επομένως η κρίσιμη ροπή υπολογίζεται από την εξ. (4-9).

Ως μήκος  $L$  θεωρείται το μήκος της αντηρίδας μεταξύ πλευρικά εξασφαλισμένων σημείων. Επομένως, λόγω της ύπαρξης των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας και λόγω του ότι το μέλος της αντηρίδας τείνει να εκτραπεί πλευρικά λόγω της αναπτυσσόμενης ροπής περί τον  $\gamma$ - $\gamma$  άξονα, γίνεται αντιληπτό ότι είναι  $L=5.00m$ .

Σύμφωνα με τον πίνακα F.1.1 (ENV1993-1-1/1992) λόγω του κατανεμημένου φορτίου του ίδιου βάρους και για θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα της αντηρίδας ( $k=1.00$ ), προκύπτει:

$C_1=1.00$ , αφού για το δυσμενέστερο φάτνωμα, το οποίο είναι το μεσαίο, γίνεται η απλουστευτική παραδοχή ότι  $\psi=1$ , δηλαδή γίνεται η υπέρ της ασφαλείας θεώρηση ότι αντί του παραβολοειδούς διαγράμματος ροπών θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς, στο μεσαίο φάτνωμα, ορθογωνικό διάγραμμα με σταθερή τιμή ίση με τη μέγιστη του παραβολοειδούς.

Βέβαια η σύνδεση της αντηρίδας με τον κεφαλόδεσμο προσεγγίζει πιο πολύ την πάκτωση διότι οι κοχλίες είναι εκτός της διατομής της σύνδεσης των δυο αυτών δομικών μελών. Αλλά, υπέρ της ασφαλείας, θα γίνει η προσέγγιση ότι η σύνδεση είναι απλή, δηλαδή ότι ο κεφαλόδεσμος λειτουργεί ως απλή στήριξη για την αντηρίδα. Επομένως, σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, τα δύο άκρα της αντηρίδας είναι ελεύθερα σε στρέβλωση, άρα  $k_w=1.00$ .

Εν τέλει έχουν εκτιμηθεί οι τιμές όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της  $M_{cr}$ . Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-9) προκύπτει:

$$M_{cr}=1.132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 19710 \text{cm}^4}{(1.00 \cdot 5m)^2} \cdot \left[ \left( \frac{1.00}{1.00} \right)^2 \cdot \frac{5585000 \text{cm}^6}{19710 \text{cm}^4} + \frac{(1.00 \cdot 5m)^2 \cdot 8076.9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 1510 \text{cm}^4}{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 19710 \text{cm}^4} \right]^{0.5} \Rightarrow M_{cr}=524358 \text{kNcm}$$

Ανηγμένη λυγηρότητα:

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-10) είναι:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{4718 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{524358 \text{kNcm}}} \Rightarrow \bar{\lambda}_{LT} = 0.565$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.4 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για ελατή διατομή I με λόγο  $h/b < 2$ , προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $\alpha$ ):

$\alpha_{LT}=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_{LT}$ :

Από την εξ. (4-11) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_{LT} = 0.5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.565 - 0.2) + 0.565^2] = 0.698$$

Ο μειωτικός συντελεστής  $\chi_{LT}$ , από την εξ. (4-12), είναι:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0.698 + \sqrt{0.698^2 - 0.565^2}} \Rightarrow \chi_{LT} = 0.903$$

Επομένως η απομειωμένη ροπή αντοχής που προκύπτει από την εξ. (4-13) είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \frac{0.913 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 4718 \text{cm}^3}{1.00} \Rightarrow M_{b,Rd} = 1511.97 \text{kNm}$$

### Κάμψη και αξονική δύναμη

Στην παρούσα περίπτωση δεν ικανοποιείται καμία εξίσωση εκ των (4-14), (4-15), (4-16), επομένως απαιτείται απομείωση σύμφωνα με τις εξ. (4-17) και (4-18). Όπου στην περίπτωση απομείωσης της ροπής αντοχής για κάμψη περί τον γ-γ άξονα, δεν θα χρησιμοποιηθεί η  $M_{pl,y,Rd}$  αλλά η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, δηλαδή η  $M_{b,Rd}$ . Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι για τη ροπή αντοχής για κάμψη περί τον γ-γ υφίστανται δυο απομειώσεις. Μία λόγω του κινδύνου του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και μία λόγω του μεγέθους της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης. Ενώ για την ροπή αντοχής για κάμψη περί τον z-z, υφίσταται μία μόνο απομείωση, αυτή λόγω του μεγέθους της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης.

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις αυτές προκύπτει εν τέλει:

$$M_{N,y,Rd} = 1180.2 \text{kNm} \quad \text{και} \quad M_{N,z,Rd} = 684.8 \text{kNm}$$

### Έλεγχος επάρκειας

Πρέπει να γίνει έλεγχος διαξονικής κάμψης (εξ. (4-19)), διότι στις κρίσιμες θέσεις συνυπάρχουν οι ροπές  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$ . Στην συγκεκριμένη περίπτωση η κρίσιμη θέση είναι μία, και αυτή είναι το μέσο της αντηρίδας αφού στην θέση αυτή συνυπάρχουν τα μέγιστα εντατικά μεγέθη των  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$ . Επομένως κάνοντας τον έλεγχο διαξονικής κάμψης στην κρίσιμη αυτή θέση αυτή προκύπτει:

$$0.53 + 0.21 = 0.74 \leq 1.00$$

Άρα η διατομή HEM340 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος του δρώντος μεγέθους προς το μέγεθος αντοχής.

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{628.2 \text{kNm}}{1180.2 \text{kNm}} = 0.53 \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{3415 \text{kN}}{11218 \text{kN}} = 0.30$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{146.9 \text{kNm}}{684.8 \text{kNm}} = 0.21 \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{3415 \text{kN}}{11218 \text{kN}} = 0.30$$

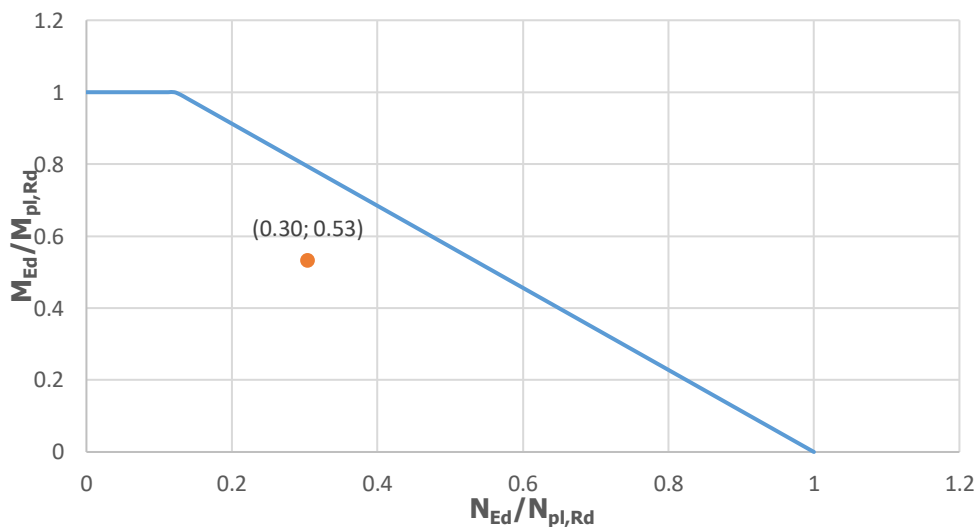
Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης που ακολουθούν.

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων  $O$  έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων  $O$  έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το  $O$  με την κουκίδα.

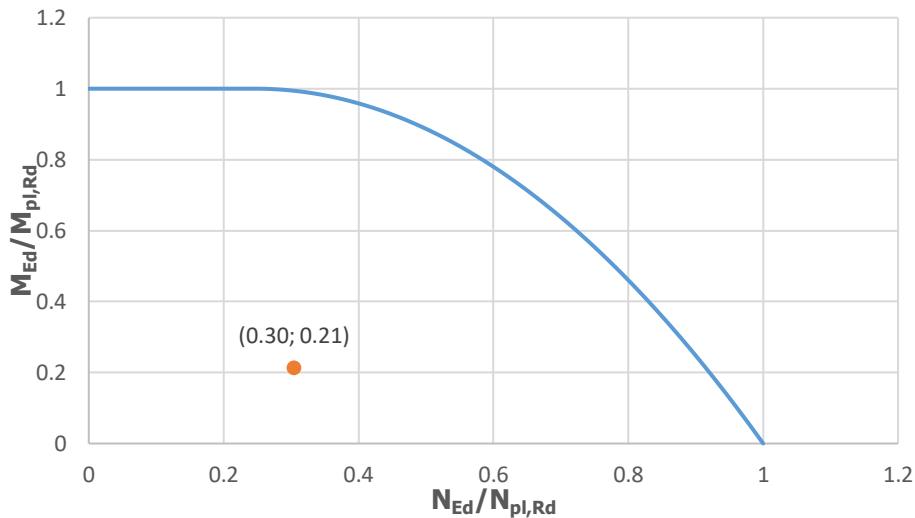
Στο Σχήμα 4-28 η <μπλε> γραμμή αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας και έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,y,Rd} = \min\{M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n)/(1-0.5 \cdot a); M_{pl,y,Rd}\}$ , όπου  $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$  και  $a = \min\{(A-2 \cdot b \cdot t_f)/A; 0.5\}$

Στο Σχήμα 4-29 η <μπλε> γραμμή αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχία έχει χαραχθεί σύμφωνα με τις σχέσεις αλληλεπίδρασης  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \left[1 - \left[\frac{n-a}{1-a}\right]^2\right]$ ,  $n > a$  και  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ ,  $n \leq a$ , όπου  $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$  και  $a = \min\{(A-2 \cdot b \cdot t_f)/A; 0.5\}$

Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη μπλε γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονική δύναμης και ροπής.



Σχήμα 4-28: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $M_y, N$  και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής HEM340 αντηρίδας άνω στάθμης

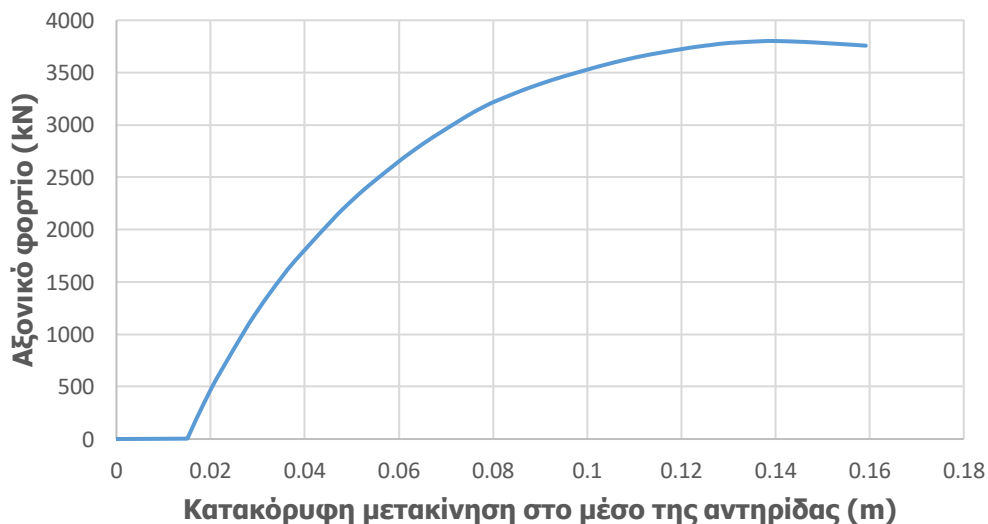


Σχήμα 4-29: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $M_z, N$  και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής HEM340 αντηρίδας άνω στάθμης

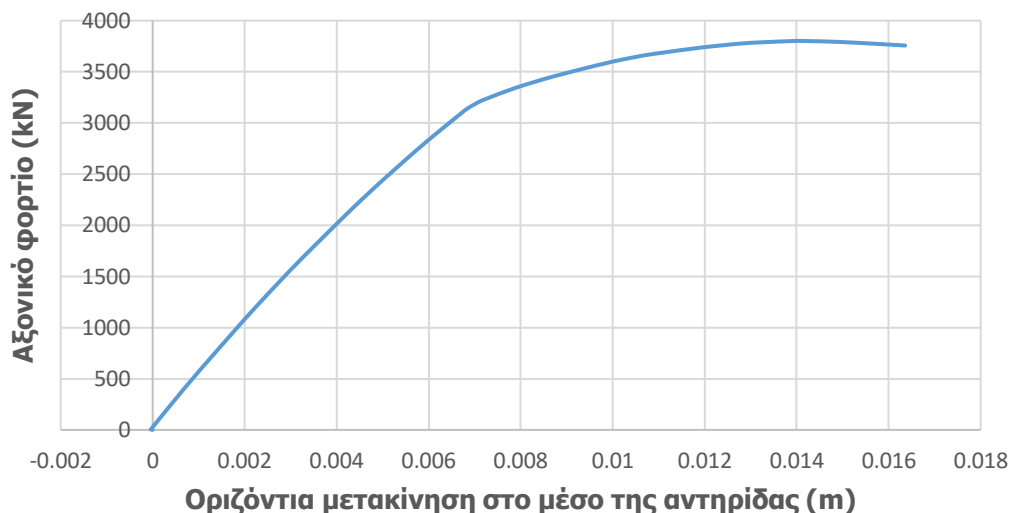
#### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-30, Σχήμα 4-31) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-30: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 4-31: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής HEM340 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

$$P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} \quad (4-39)$$

Όπου:  $\Lambda$ =φορτικός συντελεστής (εξάγεται από το ADINA) και  $N_{Ed}$ =δρώσα αξονική δύναμη σχεδιασμού Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-39) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 1.151 \cdot 3304.4 \Rightarrow P_u = 3803.3 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{3304.4 \text{ kN}}{3803.3 \text{ kN}} = 0.869$$

Ο βαθμός αξιοποίησης που προέκυψε είναι σχετικά οριακός, δηλαδή η HEM340 επαρκεί σχετικά οριακά, όπως προκύπτει από την πιο ακριβή ανάλυση, την GMNIA. Επομένως η HEM340 μπορεί να χαρακτηριστεί ως οριακή διατομή. Άρα δεν χρειάζεται να αναζητήσουμε άλλη διατομή, η οποία να είναι οριακή, καθώς αυτή επαρκεί ώστε να είναι δίκαιη η σύγκριση μεταξύ των διατομών δομικών μελών διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης.

#### 4.2.2.3 Σύνοψη

Συγκεντρωτικά, οι γραμμικές αναλύσεις έδειξαν οριακή επάρκεια της HEM340. Η πιο ακριβής ανάλυση, GMNIA, έδειξε πιο άνετη επάρκεια της HEM340. Και τέλος η GNIA έδειξε επάρκεια της HEM340 σχετικώς άνετα, και όχι οριακά.

Παρατηρείται δηλαδή η σύγκλιση στο αποτέλεσμα μεταξύ γραμμικών αναλύσεων και μη γραμμικών αναλύσεων τύπου GMNIA. Εν τέλει, αποδεκτό γίνεται το αποτέλεσμα της GMNIA ανάλυσης αφού είναι η πιο ακριβής, μιας και λαμβάνει όλες τις παραμέτρους (μη γραμμικότητες γεωμετρίας και υλικού) υπόψιν.

Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι για το σύστημα αντιστήριξης της άνω στάθμης θα χρησιμοποιηθεί για τις αντηρίδες η οριακή διατομή HEM340 και για τα οριζόντια διαγώνια στοιχεία η διατομή CHS168.3/6.3.

#### 4.2.3 2<sup>η</sup> Φάση κατασκευής (μετά την τοποθέτηση των αντηρίδων της κάτω στάθμης)

Από την στιγμή που προσδιορίστηκε η ελάχιστη απαιτούμενη διατομή των αντηρίδων της άνω στάθμης για την 1<sup>η</sup> φάση της κατασκευής, η εκσκαφή συνεχίζεται, και ο επόμενος έλεγχος, μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων, του συστήματος αντιστήριξης θα γίνει σε συνολικό επίπεδο. Δηλαδή αφού πρώτα τοποθετηθούν οι αντηρίδες της κάτω στάθμης, με τα οριζόντια και διαγώνια στοιχεία δικτυώματος, και αφού φτάσει η εκσκαφή στην τελική της στάθμη ( $z=-17m$ ).

Στο σημείο αυτό γίνεται η εξής παρατήρηση: Κοιτώντας την οριακή διατομή που προκύπτει για τις αντηρίδες άνω στάθμης από το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας (CHS508/16) και συγκρίνοντάς την με την HEM340 που προκύπτει από το σύστημα αντιστήριξης με τους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας, γίνεται αντιληπτό ότι το εμβαδόν της διατομής της CHS508/16 είναι αρκετά μικρότερο από αυτό της HEM340 ( $247cm^2$  έναντι  $316cm^2$ ). Αλλά και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί πιο οριακή διατομή διπλού ταυ, πάλι η απόκλιση μεταξύ των εμβαδών των 2 διατομών θα είναι σημαντική. Και τούτο γιατί ελέγχθηκε η HEM300 και αποδείχθηκε ότι δεν επαρκεί. Το εμβαδόν των διατομών μεταξύ της HEM300 και της HEM340 κυμαίνεται από  $303cm^2$  έως  $316cm^2$ . Μικρή δηλαδή η διαφοροποίηση στο εμβαδόν της διατομής, ακόμα και αν επιλεγεί κάποια η οποία είναι πιο οριακή από την HEM340.

Επιπροσθέτως, αν ληφθεί υπόψη και το εμβαδόν των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων της άνω στάθμης καθώς και η κατασκευαστική δυσκολία τοποθέτησης αυτών των διαγωνίων στοιχείων, καθίσταται η λύση της χρησιμοποίησης διατομής διπλού ταυ με οριζόντια χιαστί στοιχεία εντελώς ασύμφορη. Επομένως, επειδή είναι προφανές το ότι η λύση χρησιμοποίησης μεμονωμένης αντηρίδας διατομής CHS508/16 για την άνω στάθμη είναι καλύτερη και από άποψη κόστους υλικού δομικού χάλυβα, και από άποψη κατασκευαστικής ευκολίας, συνίσταται να χρησιμοποιηθεί αυτή η λύση για την άνω στάθμη.

Για την κάτω στάθμη είναι δεδομένο ότι θα χρησιμοποιηθεί διατομή κοίλη κυκλική, διότι με το που ενεργοποιείται ο ρόλος των κάτω αντηρίδων, είναι εξασφαλισμένες και οριζόντια και κατακόρυφα. Επομένως συνίσταται να χρησιμοποιηθεί μια διατομή που θα παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς την οποιαδήποτε διεύθυνση.

Συμπερασματικά, από την 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής αναζητείται η οριακή διατομή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης. Αφού εντοπιστεί, θα ελεγχθεί η επάρκεια της διατομής CHS508/16 των αντηρίδων της άνω στάθμης, όπου τώρα δεν θα είναι μόνες τους, αλλά θα συμμετέχουν στο συνολικό σύστημα αντιστήριξης. Θα εξεταστεί δηλαδή η επάρκειά τους συνολικά, δηλαδή αφού έχει οριστικοποιηθεί και η διατομή των αντηρίδων της κάτω στάθμης και συνδέονται πλέον οι 2 στάθμες με τα κατακόρυφα στοιχεία δικτυώματος.

##### 4.2.3.1 Γραμμικές αναλύσεις – Κάτω στάθμη

Μέσω των γραμμικών αναλύσεων στα προσομοιώματα της 2<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής γίνεται η αρχική εκτίμηση του μεγέθους της διατομής των αντηρίδων της κάτω στάθμης, χωρίς να ληφθούν υπ' όψιν οι όποιες μη γραμμικότητες παρουσιάζονται στο μέλος της αντηρίδας. Με τον τρόπο αυτό, αφενός θα χρησιμοποιηθεί μια εύλογη αρχική διατομή ελέγχου επάρκειας στις μη γραμμικές αναλύσεις και αφετέρου θα διαπιστωθεί ποια η διαφοροποίηση στο μέγεθος της διατομής που προκύπτει από γραμμική και μη γραμμική ανάλυση αντιστοίχως.

Υπενθυμίζεται ότι στο μέλος της αντηρίδας εμφανίζεται γεωμετρική μη γραμμικότητα αφού οι στηρίξεις της παρουσιάζουν υψομετρική διαφορά  $A/6$ , όπου  $A$  είναι το ύψος της διατομής, αν αυτή είναι διπλού ταυ, ή  $A$  είναι η διάμετρος της διατομής, αν αυτή είναι κοίλη κυκλική. Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η γραμμική ανάλυση δεν επαρκεί από μόνη της για την διαστασιολόγηση του μέλους και είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί και μη γραμμική ανάλυση.



Τα εντατικά μεγέθη (M,Q,N) της κάτω στάθμης, λόγω των φορτίων που προαναφέρθηκαν στην υποπαράγραφο 4.2.1.3, με βάση τα οποία θα γίνει ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας έχουν προκύψει από επαλληλία, με χρήση των κατάλληλων συντελεστών σχεδιασμού (1.35 και 1.50), των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις δυο ομάδες προσομοιωμάτων της 2<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής.

Όπως αναφέρθηκε και στη γενική περιγραφή της υποπαραγράφου 4.2.3 που παρουσιάστηκε ανωτέρω, η διατομή των αντηρίδων της άνω στάθμης είναι η CHS508/16 χωρίς την χρήση οριζόντιων διαγώνιων στοιχείων δυσκαμψίας. Αναζητείται ποια θα είναι η διατομή που θα επιλεγεί σε πρώτη φάση για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης. Μια εύλογη θεώρηση είναι να χρησιμοποιηθεί η οριακή διατομή που προέκυψε από το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, διότι από την στιγμή που στο σύστημα αυτό θα χρησιμοποιηθούν οριζόντια και κατακόρυφα στοιχεία δικτυώματος, υπό τα ίδια εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία, αναμένεται σίγουρα να επαρκεί. Επιλέγεται δηλαδή σε πρώτη φάση η CHS610/40 και ανάλογα με το πόσο άνετα επαρκεί θα επιλεγούν και μικρότερες διατομές αντηρίδων κάτω στάθμης για να ελεγχθεί η επάρκειά τους.

Στον Πίνακα 4-12 παρουσιάζονται οι διατομές των δομικών μελών που θα χρησιμοποιηθούν στα προσομοιώματα της 2<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής.

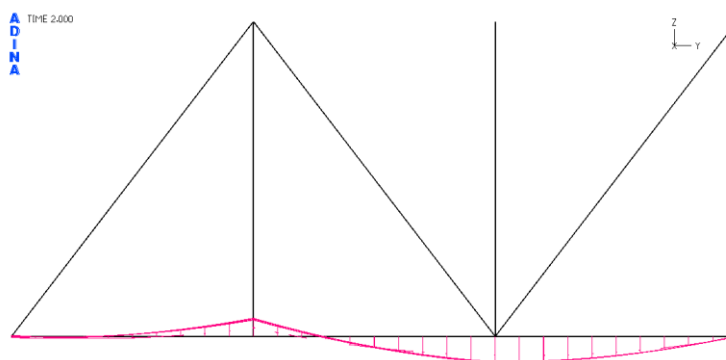
Πίνακας 4-12: Διατομές δομικών μελών στη 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής

Μέλη από χάλυβα	Μέλη από σκυρόδεμα
Αντηρίδες άνω στάθμης: CHS 508/16 Αντηρίδες κάτω στάθμης: CHS 610/40 Τραβέρσες: 2HEB450 Στοιχεία δικτυώματος: CHS168.3/6.3	Κεφαλόδεσμοι(BxH): 1.20m x 1.00m Πάσσαλοι: D=1.00m

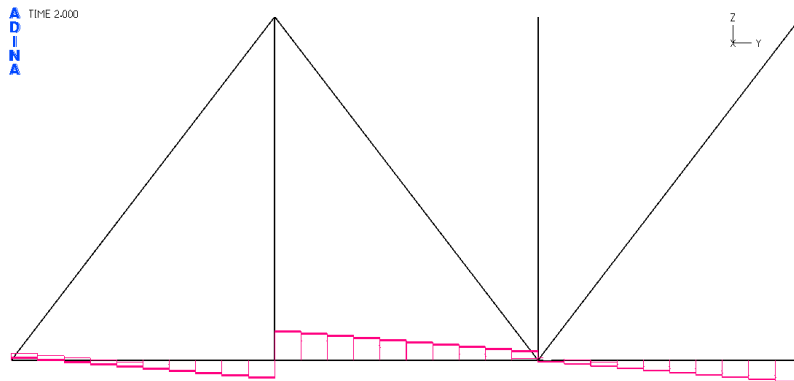
#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών διατομής CHS610/40 αντηρίδων κάτω στάθμης

Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4-12 επιλέγεται ως αρχική διατομή των αντηρίδων κάτω στάθμης η κοίλη κυκλική διατομή CHS610/40.

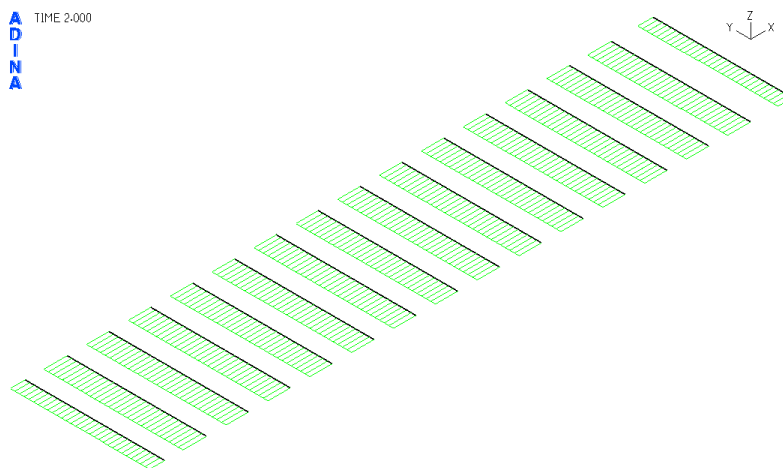
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών από γραμμική στατική ανάλυση 1<sup>ης</sup> τάξης.



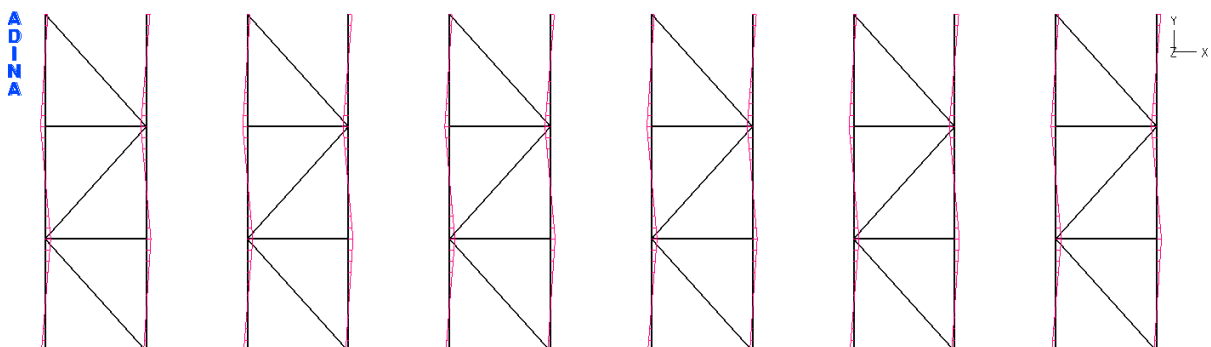
Σχήμα 4-32: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ιδίου βάρους και ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=72.34\text{kNm}$



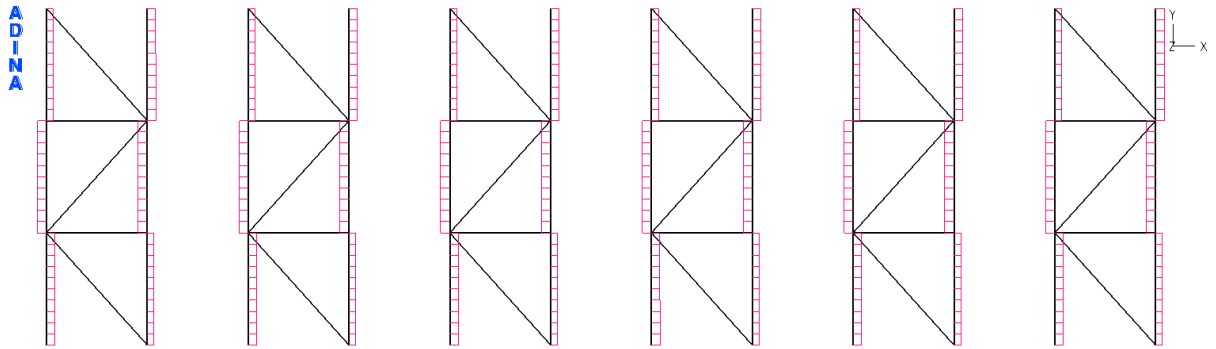
Σχήμα 4-33: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ιδίου βάρους και ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_z=36.57\text{kN}$



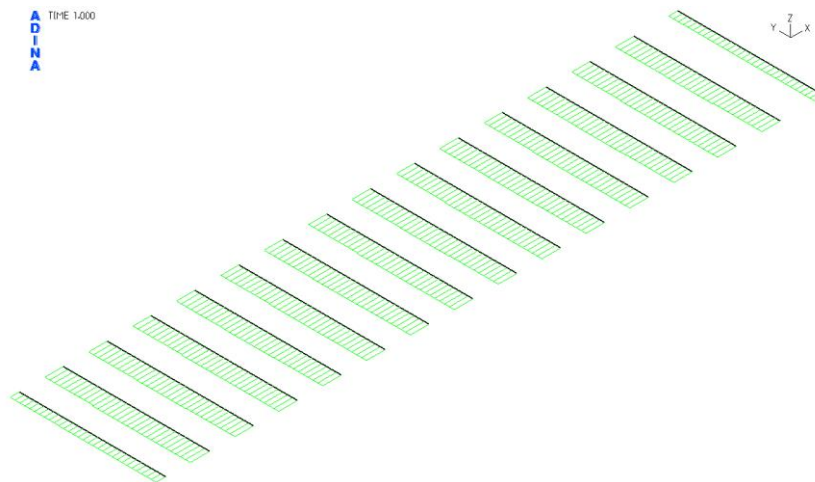
Σχήμα 4-34: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=6653\text{kN}$



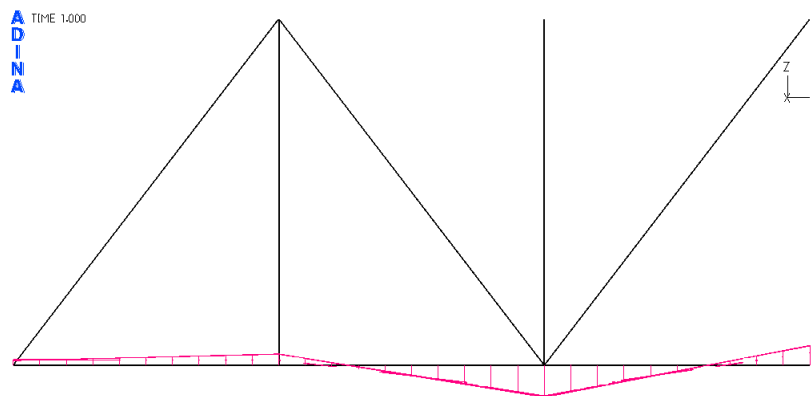
Σχήμα 4-35: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS 610/40 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_z=90.14\text{kNm}$



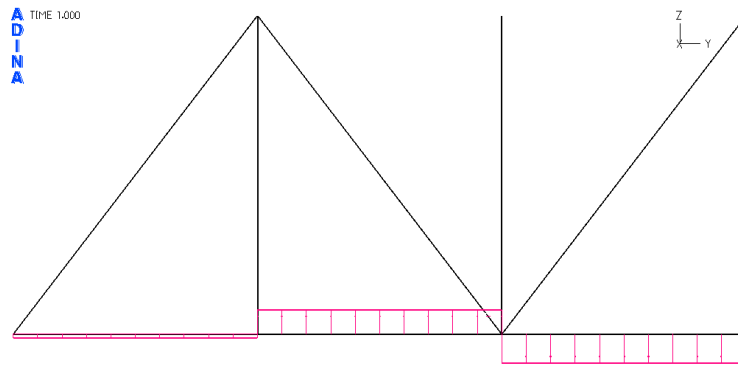
Σχήμα 4-36: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_y=33.32\text{kN}$



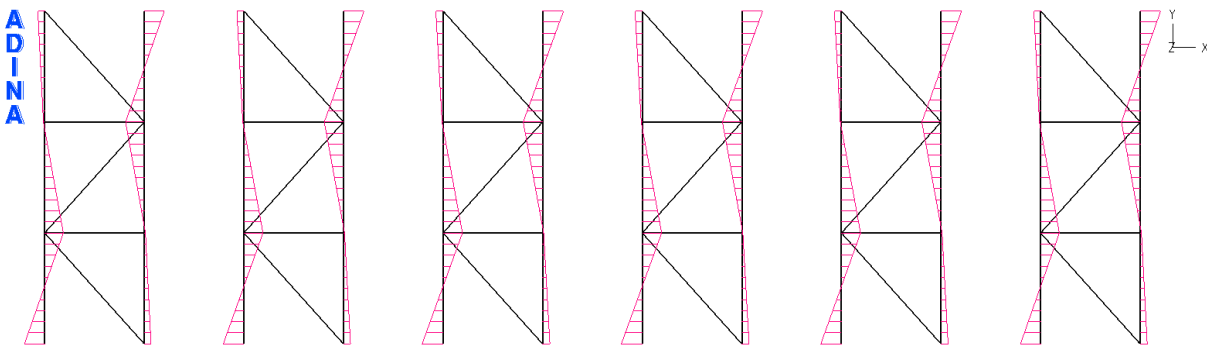
Σχήμα 4-37: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=1014\text{kN}$



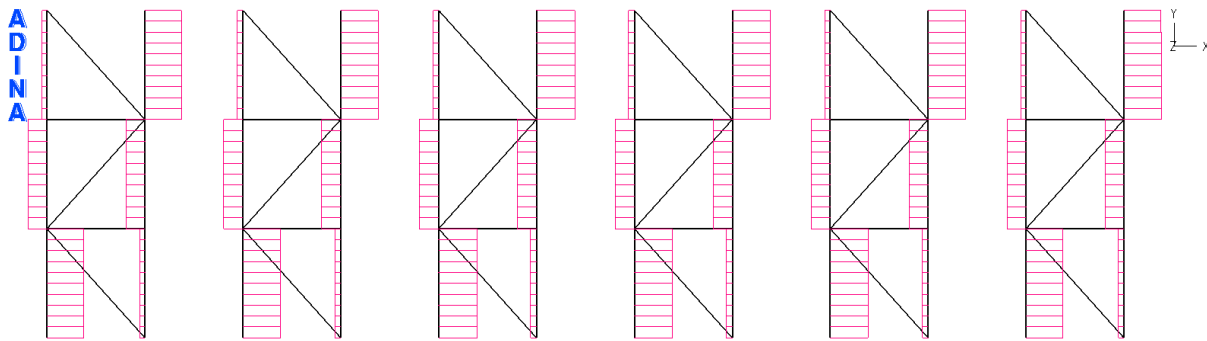
Σχήμα 4-38: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=29.87\text{kNm}$



Σχήμα 4-39: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_z=9.59\text{kN}$



Σχήμα 4-40: Διάγραμμα καμπτικών ροών  $M_z$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS 610/40 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_z=44.30\text{kNm}$



Σχήμα 4-41: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_y=18.42\text{kN}$

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 4-13 στον οποίο υπολογίζονται, με βάση τα ανωτέρω αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και με βάση τον συνδυασμό φόρτισης  $1.35G+1.35\Omega\Gamma+1.50\Delta\Gamma$  του Πίνακα 4-2, τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού. Αξιοποιώντας τα κάτωθι μεγέθη σχεδιασμού, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας CHS610/40.

Πίνακας 4-13: Υπολογισμός μεγεθών σχεδιασμού

Ιδίων Βάρους + Ωθήσεις Γαιών		Θερμοκρασία		Μεγέθη Σχεδιασμού	
N	6653	N	1014	$N_{Ed}$ (kN)	10502.55
$M_y$	72.34	$M_y$	29.87	$M_{Ed,y}$ (kNm)	142.46
$M_z$	90.14	$M_z$	44.30	$M_{Ed,z}$ (kNm)	188.14
$V_y$	33.32	$V_y$	18.42	$V_{Ed,y}$ (kN)	72.61
$V_z$	36.57	$V_z$	9.59	$V_{Ed,z}$ (kN)	63.75

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση y-y και στην z-z, γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed} = 10502.55 \text{ kN}$ ,  $M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 236 \text{ kNm}$ ,  $V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 96.63 \text{ kN}$

### Έλεγχος επάρκειας διατομής αντηρίδων κάτω στάθμης διατομής CHS610/40

Τα δεδομένα για την διατομή CHS610/40 είναι:

$f_y = 35.5 \text{ MPa}$  (χάλυβας S355)

$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$

$\gamma_{Mo} = 1.00$

$A = 716 \text{ cm}^2$

$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi} = 456 \text{ cm}^2$

$I = 292333 \text{ cm}^4$

$W_{pl} = 13017 \text{ cm}^3$

Εύρεση κατηγορίας διατομής

Αν επαληθεύεται η εξ. (4-40) τότε η διατομή είναι κατηγορίας 1. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι γενικότερη απαίτηση, οι διατομές που χρησιμοποιούνται να είναι κατηγορίας 1.

$$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \quad (4-40)$$

Είναι χάλυβας S355, επομένως  $\varepsilon = 0.81$ .

$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \Rightarrow \frac{610}{40} \leq 50 \cdot 0.81^2 \Rightarrow 15.25 \leq 32.81$ , επομένως η διατομή είναι κατηγορίας 1. Άρα θα πραγματοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-41)$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-42)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot Y_{Mo}} \quad (4-43)$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (4-41), (4-42) και (4-43) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{Y_{Mo}} = \frac{716 \text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 25418 \text{kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{Y_{Mo}} = \frac{13017 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 4621.04 \text{kNm}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot Y_{Mo}} = \frac{456 \text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3} \cdot 1.00} = 9342.5 \text{kN}$$

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-44) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (4-44)$$

Είναι:  $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 96.63 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 9342.5 \text{kN} \Rightarrow 96.63 \text{kN} \leq 4671.25 \text{kN}$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (4-45).

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}), \text{ όπου } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (4-45)$$

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 4621.04 \text{kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{10502.55 \text{kN}}{25418 \text{kN}} \right)^{1.7} \right] = 3592.55 \text{kNm}$$

#### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{236 \text{kNm}}{3592.55 \text{kNm}} = 0.07$$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.41$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.05$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

**Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS610/40 αντηρίδων κάτω στάθμης**

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

Χρειάζεται επιπροσθέτως να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχών  $N_{Rk}$  και  $M_{Rk}$  από τις εξ. (4-46) και (4-47) αντιστοίχως.

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (4-46)$$

$$M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y \quad (4-47)$$

$$\text{Είναι: } N_{Rk} = A \cdot f_y = 716 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 25418 \text{ kN} \text{ και } M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 13017 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 4621.04 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

1. Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της αντηρίδας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

2. Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

*Για λυγισμό περί τον γ-γ άξονα*

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-48)$$

Όπου η εξ. (4-48) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4-49)$$

$$L_{cr,y} = k \cdot L \quad (4-50)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (4-51)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-49), (4-50) και (4-51) προκύπτει:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 5 \text{ m} = 5 \text{ m}$ , όπου:

- $k = 1.00$  (θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα του εξεταζόμενου τμήματος)
- $L = 5 \text{ m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων). Λόγω της ύπαρξης των κατακορύφων χιαστί εξασφαλίζεται πλήρως η αντηρίδα στα κοινά τους σημεία (δες υποπαράγραφο 4.4.1), επομένως το μήκος λυγισμού της μειώνεται στο 1/3 του συνολικού της μήκους.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{292333\text{cm}^4}{716\text{cm}^2}} = 20.21\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{5\text{m}}{20.21\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.324$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_y$ :

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] \quad (4-52)$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \quad (4-53)$$

Από την εξ. (4-52) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.324 - 0.2) + 0.324^2] = 0.566$$

Επομένως από την εξ. (4-53) προκύπτει μειωτικός συντελεστής  $\chi$  ίσος με:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.566 + \sqrt{0.566^2 - 0.324^2}} = 0.972$$

*Για λυγισμό περί τον z-z άξονα*

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-54)$$

Όπου η εξ. (4-54) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$$L_{cr} = k \cdot L = \frac{1}{3} \cdot 15\text{m} = 5\text{m}, \text{ όπου:}$$

- $k=1.00$  (θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα του εξεταζόμενου τμήματος)
- $L=5\text{m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων). Λόγω της ύπαρξης των οριζοντίων χιαστί εξασφαλίζεται πλήρως η αντηρίδα στα κοινά τους σημεία (δες υποπαράγραφο 4.4.1), επομένως το μήκος λυγισμού της μειώνεται στο 1/3 του συνολικού της μήκους.

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{292333\text{cm}^4}{716\text{cm}^2}} = 20.21\text{cm}$$



Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{5\text{m}}{20.21\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.324$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_z$ :

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] \quad (4-55)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad (4-56)$$

Από την εξ. (4-55) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.324 - 0.2) + 0.324^2] = 0.566$$

Επομένως, από την εξ. (4-56), ο μειωτικός συντελεστής  $\chi_y$  είναι ίσος με:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.566 + \sqrt{0.566^2 - 0.324^2}} = 0.972$$

### 3. Συντελεστές αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Υπολογισμός συντελεστών  $C_m$  ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

Πίνακας 4-14: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροπής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	$y-y$	$z-z$
$C_{mz}$	$z-z$	$y-y$

Από τον Πίνακα 4-14 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροπής.

Για άξονα κάμψης  $y-y$  τα κατακόρυφα χιαστί εξασφαλίζουν πλήρως το μέλος της αντηρίδας στους κοινούς τους κόμβους (δες υποπαράγραφο 4.4.1). Επομένως σχηματίζονται 3 φατνώματα. Ο υπολογισμός του  $C_{my}$  θα γίνει με βάση τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου, από άποψη εντατικών μεγεθών, φατνώματος, δηλαδή του μεσαίου. Επαλληλίζοντας τα διαγράμματα ροπών περί τον  $y-y$  του μεσαίου φατνώματος (Σχήμα 4-32 και Σχήμα 4-38) προκύπτει η μορφή του 2<sup>ου</sup> διαγράμματος ροπών του πίνακα B3 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Στον Πίνακα 4-15 παρουσιάζονται οι τιμές ροπών στα άκρα και στο μέσο του μεσαίου φατνώματος της αντηρίδας κάτω στάθμης όπως έχουν προκύψει από τα 2 εναλλακτικά χωρικά προσομοιώματα που έχουν μορφωθεί.

Πίνακας 4-15: Τιμές ροπών στα άκρα του ακριανού φατνώματος της αντηρίδας άνω στάθμης

	<b>M στο άκρο (kNm)</b>	<b>M στο μέσο (kNm)</b>	<b>M στο άλλο άκρο (kNm)</b>
Λόγω θερμοκρασιακού φορτίου	10.28	-12.92	-28.38
Λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών + ιδίου βάρους	44.03	-30.43	-70.41

Τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν και τους συντελεστές σχεδιασμού 1.35 και 1.50. Επομένως είναι:

$$M \text{ στο άκρο} = 1.35 \cdot 44.03 \text{kNm} + 1.50 \cdot 10.28 \text{kNm} = 74.86 \text{kNm}$$

$$M \text{ στο μέσο} = 1.35 \cdot (-30.43 \text{kNm}) + 1.50 \cdot (-12.92 \text{kNm}) = -60.46 \text{kNm}$$

$$M \text{ στο άλλο άκρο} = 1.35 \cdot (-70.41 \text{kNm}) + 1.50 \cdot (-28.38 \text{kNm}) = -137.62 \text{kNm}$$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$M_h = -137.62 \text{kNm}$$

$$M_s = -60.46 \text{kNm}$$

$$(a) \alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-60.46 \text{kNm}}{-137.62 \text{kNm}} \Rightarrow \alpha_s = 0.44$$

$$(b) \psi = \frac{74.86 \text{kNm}}{-137.62 \text{kNm}} \Rightarrow \psi = -0.544$$

(γ) ομοιόμορφο φορτίο, αφού το ίδιο βάρος και το θερμοκρασιακό φορτίο επιβάλλονται ομοιόμορφα στο μέλος της αντηρίδας

$$\text{Με βάση τα (α), (β), (γ) προκύπτει: } C_{my} = 0.1 \cdot (1 - \psi) - 0.8 \cdot \alpha_s \geq 0.4 \Rightarrow C_{my} = 0.55$$

Για άξονα κάμψης z-z τα οριζόντια χιαστί εξασφαλίζουν πλήρως το μέλος της αντηρίδας στους κοινούς τους κόμβους (δες υποπαράγραφο 4.4.1). Επομένως σχηματίζονται 3 φατνώματα. Ο υπολογισμός του  $C_{mz}$  θα γίνει με βάση τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου, από άποψη εντατικών μεγεθών, φατνώματος, δηλαδή του μεσαίου. Επαλληλίζοντας τα διαγράμματα ροπών περί τον z-z του ακριανού φατνώματος (Σχήμα 4-35 και Σχήμα 4-40) προκύπτει η μορφή του 1<sup>ου</sup> διαγράμματος ροπών του πίνακα B3 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Στον Πίνακα 4-16 παρουσιάζονται οι τιμές ροπών στα άκρα του μεσαίου φατνώματος της αντηρίδας κάτω στάθμης όπως έχουν προκύψει από τα 2 εναλλακτικά χωρικά προσομοιώματα που έχουν μορφωθεί.

Πίνακας 4-16: Τιμές ροπών στα άκρα του ακριανού φατνώματος της αντηρίδας άνω στάθμης

	<b>M στο άκρο (kNm)</b>	<b>M στο άλλο άκρο (kNm)</b>
Λόγω θερμοκρασιακού φορτίου	44.30	-2.37
Λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών + ιδίου βάρους	90.14	-76.44

Τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν και τους συντελεστές σχεδιασμού 1.35 και 1.50. Επομένως είναι:

$$M \text{ στο άκρο} = 1.35 \cdot 90.14 \text{kNm} + 1.50 \cdot 44.30 = 188.14 \text{kNm}$$

$$M \text{ στο άλλο άκρο} = 1.35 \cdot (-76.44 \text{kNm}) + 1.50 \cdot (-2.37 \text{kNm}) = -106.70 \text{kNm}$$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι  $\psi = \frac{-106.70\text{kNm}}{188.14\text{kNm}} = -0.567$

Άρα προκύπτει:  $C_{mz} = 0.6 + 0.4 \cdot \psi \geq 0.4 \Rightarrow C_{my} = 0.4$

#### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$ , $k_{yz}$

Το μέλος της αντηρίδας είναι εξασφαλισμένο στα άκρα του ώστε να μην παραμορφώνεται στρεπτικά και επιπλέον δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο στην αντηρίδα. Επομένως, το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας B.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα B.1.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (4-57)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (4-58)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{mz} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (4-59)$$

$$k_{yz} = 0.6 \cdot k_{zz} \quad (4-60)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-57), (4-58), (4-59) και (4-60) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 4-17.

Πίνακας 4-17: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.581
$k_{zy}$	0.348
$k_{zz}$	0.421
$k_{yz}$	0.253

#### 4. Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-62)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-60) και (4-61) προκύπτει:

$$0.43 + 0.02 + 0.01 = 0.46 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-60)}$$

$$0.43 + 0.01 + 0.02 = 0.46 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-61)}$$

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τους ανωτέρω ελέγχους (διατομής και μέλους) γίνεται αντιληπτό ότι κρίσιμότερος είναι ο έλεγχος μέλους της αντηρίδας, αφού τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας του μέλους είναι πολύ πιο κοντά στη μονάδα σε σχέση με τα αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας της διατομής.

Τέλος διαπιστώνεται ότι υπάρχει περιθώριο να χρησιμοποιηθεί και μικρότερη διατομή, αφού για την CHS610/40 κανένας από τους δυο ελέγχους δεν ικανοποιείται οριακά. Με χρήση μικρότερης διατομής αναμένεται οι τιμές των ελέγχων επάρκειας να είναι μεγαλύτερες, και ιδίως για τον έλεγχο μέλους υπάρχει ο κίνδυνος οι τιμές να πλησιάσουν αρκετά κοντά στη μονάδα. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να εξεταστεί η CHS610/20 ως διατομή των αντηρίδων της κάτω στάθμης, η οποία θα υποβληθεί σε έλεγχο επάρκειας διατομής και μέλους.

### **Διατομή CHS610/20 αντηρίδων κάτω στάθμης**

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η CHS610/20, η οποία είναι κατηγορίας 1 (βασική απαίτηση).

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται ακριβώς η ίδια, με τη μόνη διαφοροποίηση ότι στην περίπτωση αυτή είναι διαφορετικά τα χαρακτηριστικά της διατομής. Δηλαδή η μορφή των διαγραμμάτων των εντατικών μεγεθών και η ακολουθούμενη μεθοδολογία των ελέγχων διατομής και μέλους είναι ίδια.

Επομένως κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των ελέγχων διατομής και μέλους της CHS610/20, αφού αυτά είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μας δείχνουν την αποδοτικότητα της χρησιμοποιούμενης διατομής.

### **Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/20 αντηρίδων κάτω στάθμης**

$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.77$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.10$  Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

### **Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS610/20 αντηρίδων κάτω στάθμης**

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-60) και (4-61) προκύπτει:

$$0.80 + 0.02 + 0.03 = 0.85 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-60)}$$

$$0.80 + 0.01 + 0.04 = 0.85 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-61)}$$

Παρατηρείται ότι από άποψη διατομής υπάρχει περιθώριο εκμετάλλευσής της. Αντίθετα, από άποψη μέλους, διαπιστώνεται ότι οι τιμές του ελέγχου αυξήθηκαν και πλησίασαν ακόμα περισσότερο το άνω όριο, δηλαδή τη μονάδα. Δεν υπάρχει περιθώριο για χρησιμοποίηση μικρότερης διατομής διότι όπως φαίνεται από τον έλεγχο μέλους η ικανοποίησή του είναι σχεδόν οριακή. Επομένως η CHS610/20 χαρακτηρίζεται ως οριακή διατομή.

Επειδή όμως η επάρκειά της είναι οριακή, είναι επιτακτικό να γίνουν και μη γραμμικές αναλύσεις ώστε να ληφθούν υπόψιν και τα φαινόμενα μη γραμμικότητας του συστήματος αντιστήριξης. Τότε, αφού θα έχουν ληφθεί εν τέλει όλοι οι παράμετροι υπόψιν, θα εξεταστεί αν τελικά η CHS610/20 επαρκεί ή όχι. Πάντως αναμένεται η επάρκειά της, ή μη, να είναι οριακή, αφού όπως επεξηγείται στην υποπαράγραφο 4.2.4, για ρεαλιστικές τιμές υψομετρικών διαφορών δεν παίζει ρόλο το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας, επομένως τα αποτελέσματα γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων πρέπει περίπου να ταυτίζονται.

Στον Πίνακα 4-18 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας για κάθε μία από τις διατομές που εξετάστηκαν ανωτέρω.

Πίνακας 4-18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας – Κάτω στάθμη

		CHS610/40	CHS610/20
Έλεγχος επάρκειας διατομής	$N_{Ed}/N_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.41	0.77
	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.05	0.10
Έλεγχος επάρκειας μέλους	$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0$	0.46	0.85
	$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0$	0.46	0.85

#### 4.2.3.2 Μη γραμμικές αναλύσεις – Κάτω στάθμη

Η βασική αιτία εφαρμογής των μη γραμμικών αναλύσεων, η οποία καθιστά επιτακτική την υλοποίησή τους, είναι η υψομετρική διαφορά D/6 μεταξύ των στηρίξεων της αντηρίδας. Στόχος είναι να διερευνηθεί αν αυτή η υψομετρική διαφορά επηρεάζει την εντατική κατάσταση της αντηρίδας και κατ' επέκταση κατά πόσο διαφοροποιεί τις απαιτήσεις σε διατομή της αντηρίδας, σε σύγκριση πάντα με τις διατομές που έχουν προκύψει από την γραμμική ανάλυση.

Ως διατομές έναρξης στις μη γραμμικές αναλύσεις για τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης, θα χρησιμοποιηθούν οι διατομές των αντηρίδων της αντίστοιχης στάθμης οι οποίες προέκυψαν από τις γραμμικές αναλύσεις. Επίσης, το θλιπτικά επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο στο μη γραμμικό προσομοίωμα ισούται με το φορτίο σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) που έχει προκύψει σύμφωνα με τον συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.35ΩΓ+1.50ΔΤ, αξιοποιώντας τις τιμές των αξονικών δυνάμεων των γραμμικών προσομοιωμάτων λόγω των φορτίων του ίδιου βάρους, των ωθήσεων γαιών και της ομοιόμορφης θερμοκρασίας.

Εισάγεται γεωμετρική ατέλεια λόγω καμπυλότητας του φορέα με το σχήμα των ιδιομορφών λυγισμού που θα προκύψουν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) και μέγεθος συμβατό με τις καμπύλες λυγισμού του EC3 για τον χρησιμοποιούμενο τύπο διατομής.

Η χρησιμοποιούμενη κοίλη κυκλική διατομή της αντηρίδας είναι θερμής έλασης και ποιότητας χάλυβα S355. Επομένως αντιστοιχεί στην καμπύλη λυγισμού a.

Άρα, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5 (Πίνακας 5.1 του EN1993-1-1) προκύπτει μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για το μέλος της αντηρίδας όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-19. Λόγω της ύπαρξης οριζόντιων και κατακόρυφων διαγώνιων στοιχείων για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης το μήκος λυγισμού του μέλους της αντηρίδας μειώνεται, και κατά τις 2 διευθύνσεις y-y και z-z, στα L/3=5m, αφού τα διαγώνια στοιχεία εξασφαλίζουν πλήρως το μέλος της αντηρίδας στους κοινούς κόμβους (δες υποπαράγραφο 4.4.1).

Πίνακας 4-19: Μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για την κοίλη κυκλική διατομή της αντηρίδας

$e_{o,el} = (L/3)/300$	$e_{o,pl} = (L/3)/250$
0.017m	0.02m

Οι διατομές των αντηρίδων της κάτω στάθμης είναι κατηγορίας 1. Επομένως από τη στιγμή που θα υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος και διαστασιολόγηση, λαμβάνεται υπόψιν το πλαστικό μέγεθος ατέλειας ( $e_{o,pl}$ ), και όχι το ελαστικό ( $e_{o,el}$ ).

Η οριακή διατομή που προέκυψε από τις γραμμικές αναλύσεις και για την οποία είναι επιτακτικό να διεξαχθούν μη γραμμικές αναλύσεις είναι η CHS610/20. Επίσης, για λόγους πληρότητας, θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων και για την CHS610/40.

Πλέον οι αντηρίδες των 2 σταθμών δεν λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους, αφού συνδέονται με κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία δικτυώματος. Επομένως η παραμορφωσιακή εικόνα της αντηρίδας της μίας στάθμης επηρεάζει την παραμορφωσιακή εικόνα της αντηρίδας της άλλης στάθμης. Για το λόγο αυτό, ανάλογα με το ποια στάθμη μελετάται κάθε φορά, επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν ιδιομορφές που απευθύνονται αποκλειστικά στις αντηρίδες της υπό μελέτης στάθμης. Και τούτο γιατί αν οι ιδιομορφές αυτές έχουν επιρροές και στις αντηρίδες της άλλης στάθμης, τότε μπορεί η ανάλυση να διακοπεί λόγω αστοχίας των αντηρίδων της στάθμης η οποία δεν μελετάται. Με λίγα λόγια στόχος είναι οι αντηρίδες της στάθμης η οποία δεν μελετάται να μείνουν ανεπηρέαστες, όσο αυτό είναι εφικτό, έτσι ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η οριακή αντοχή των αντηρίδων της υπό μελέτης στάθμης. Βέβαια αυτό δεν είναι απολύτως σωστό, διότι με τον τρόπο αυτό εισάγεται αρχική γεωμετρική ατέλεια μόνο στις αντηρίδες της υπό μελέτης στάθμης, κάτι το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό, αφού στην πραγματικότητα οι αντηρίδες και των 2 σταθμών έχουν μέγεθος αρχικής ατέλειας. Παρόλα αυτά, η ανωτέρω λογική θεωρείται σωστός τρόπος προσέγγισης του παρόντος προβλήματος.

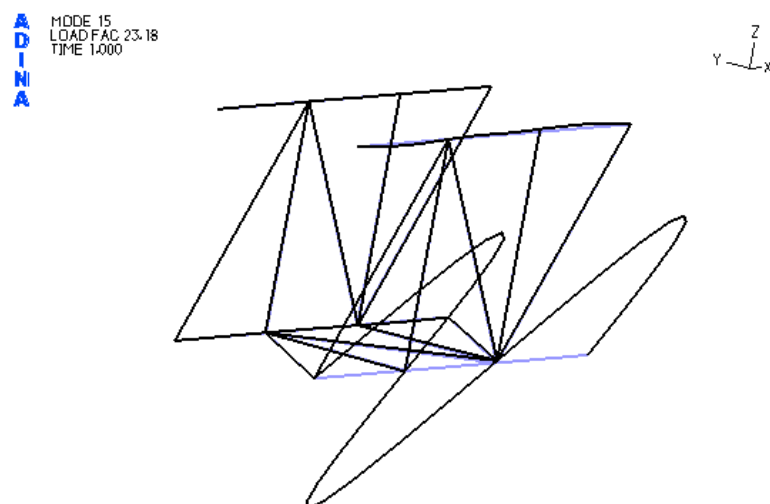
### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS610/40 αντηρίδων κάτω στάθμης

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 10502.55 \text{ kN}$$

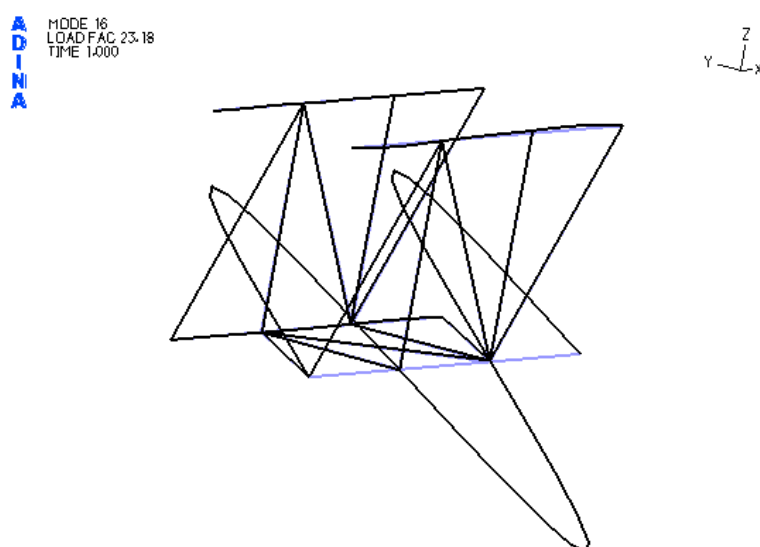
#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 15,16 για την μία αντηρίδα, και των ιδιομορφών 17,18 για την άλλη αντηρίδα όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Οι ιδιομορφές αυτές είναι λοξές, κάτι το οποίο δεν προκαλεί ανησυχία διότι ουσιαστικά το σχήμα της ιδιομορφής είναι η προβολή της λοξής αυτής ιδιομορφής στις διευθύνσεις y-y και z-z. Δεν επιλέγεται όμως μία λοξή ιδιομορφή για κάθε αντηρίδα με στόχο να χρησιμοποιηθεί η προβολή της στις διευθύνσεις y-y και z-z, αλλά για κάθε αντηρίδα χρησιμοποιούνται και οι 2 λοξές ιδιομορφές της, και για μέγεθος ατέλειας στην διεύθυνση y-y χρησιμοποιείται εκείνη η ιδιομορφή της οποίας η προβολή στην διεύθυνση αυτή δίνει μεγαλύτερο σχήμα. Ομοίως για το μέγεθος της ατέλειας στην διεύθυνση z-z.

Επειδή οι ιδιομορφές 15,16 είναι ακριβώς ίδιες με τις 17,18 αντιστοίχως, με την μόνη διαφορά ότι αναφέρονται σε διαφορετική αντηρίδα, παρουσιάζονται μόνο οι ιδιομορφές 15 και 16. Η 15<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 4-42) και η 16<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 4-43).



Σχήμα 4-42: 15<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS610/40 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού



Σχήμα 4-43: 16<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS610/40 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

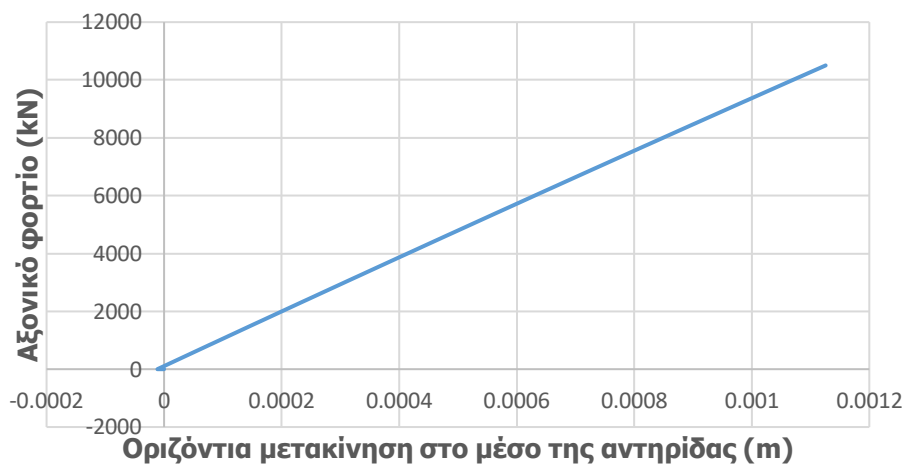
#### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδας αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4-19. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-44, Σχήμα 4-45) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-44: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

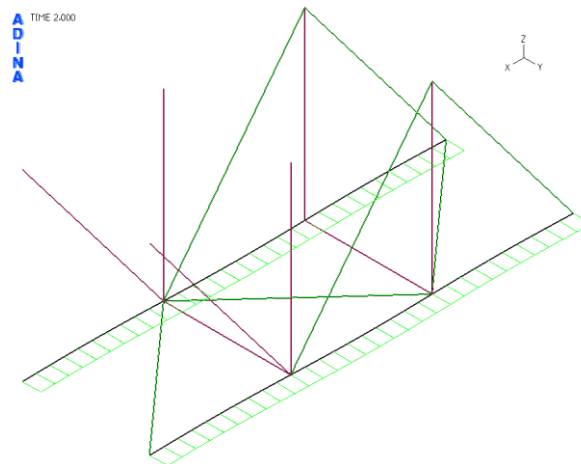


Σχήμα 4-45: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

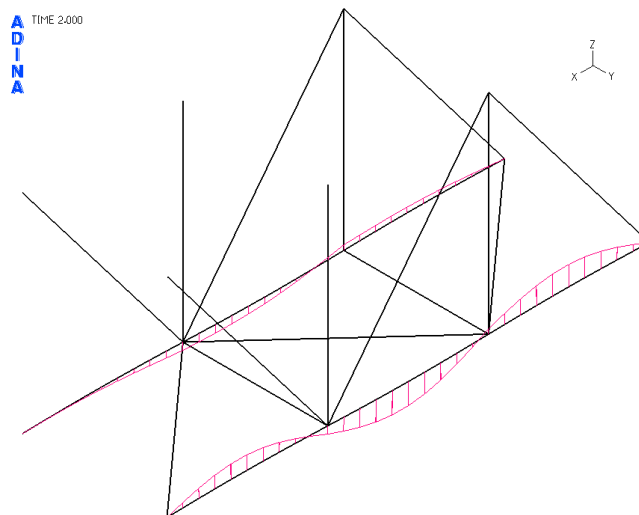
Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}=10502.55\text{kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα ακόλουθα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 3-13), καμπτικών ροπών (Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15) και τεμνουσών δυνάμεων (Σχήμα 3-16, Σχήμα 3-17).

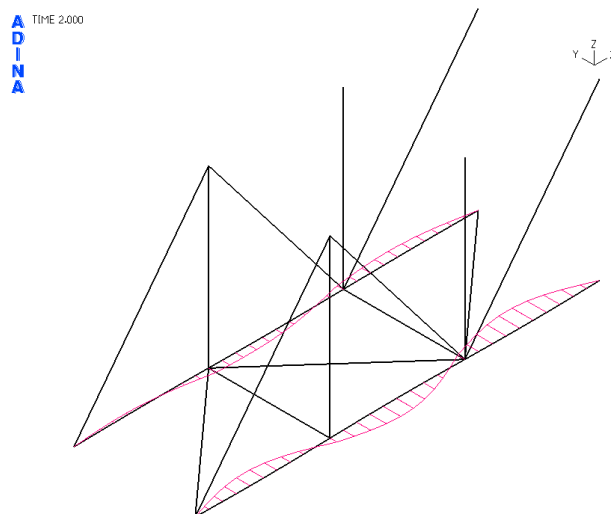




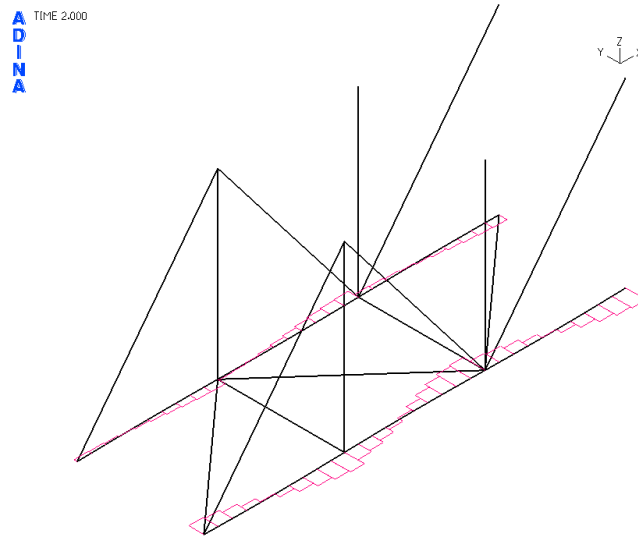
Σχήμα 4-46: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $N=10529\text{kN}$



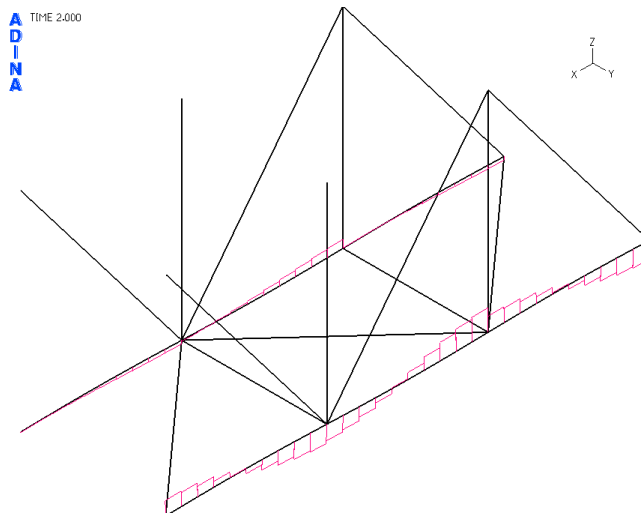
Σχήμα 4-47: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_y=378.1\text{kNm}$



Σχήμα 4-48: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_z=465.1\text{kNm}$



Σχήμα 4-49: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_y=296.4\text{kN}$



Σχήμα 4-50: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_z=262.1\text{kN}$

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/40 αντηρίδων κάτω στάθμης

Πίνακας 4-20: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS610/40

$N_{Ed}$ (kN)	10529
$M_{Ed,y}$ (kNm)	378.1
$M_{Ed,z}$ (kNm)	465.1
$V_{Ed,y}$ (kN)	296.4
$V_{Ed,z}$ (kN)	262.1

Στον Πίνακα 4-20 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA.

Παρατηρώντας τον ανωτέρω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος της αξονικής σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) διαφοροποιήθηκε λίγο σε σχέση με την αρχική τιμή του που είχε εκτιμηθεί. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από το ότι στο παρόν σύστημα αντιστήριξης, σε αντίθεση με το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, υπάρχουν και οι χιαστί σύνδεσμοι, των οποίων η μία συνιστώσα της αξονικής είναι επί της

διεύθυνσης της αντηρίδας, επομένως η συνιστώσα αυτή διαφοροποιεί λίγο το μέγεθος της αξονικής της αντηρίδας. Όπως και να έχει ο έλεγχος γίνεται με το δυσμενέστερο μέγεθος της αξονικής, το οποίο είναι αυτό που αναγράφεται στον Πίνακα 4-20.

$$N_{Ed} = 10529 \text{ kN}, M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 599.4 \text{ kNm}, V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 395.7 \text{ kN}$$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-44) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$\text{Είναι: } V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 395.7 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 9342.5 \text{ kN} \Rightarrow 395.7 \text{ kN} \leq 4671.25 \text{ kN}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (4-45).

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 4621.04 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{10529 \text{ kN}}{25418 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 3588.1 \text{ kNm}$$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.41$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.13$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

Άρα η διατομή CHS610/40 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

#### Βαθμός αξιοποίησης

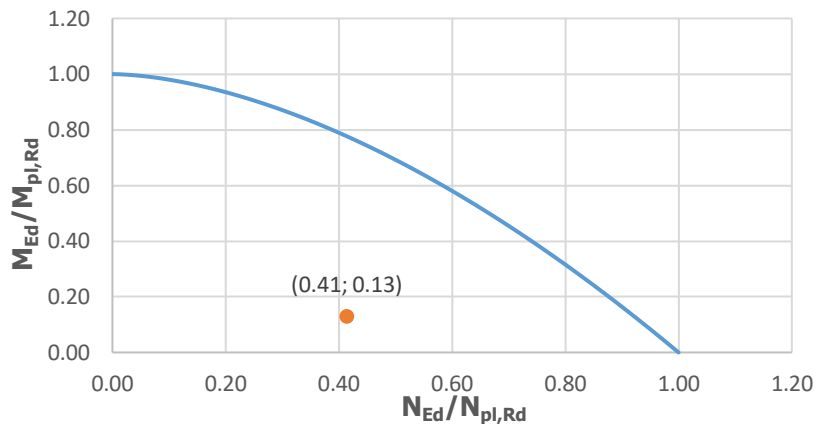
Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{599.4 \text{ kNm}}{3588.1 \text{ kNm}} = 0.17$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 4-51). Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας.

Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονική δύναμης και ροπής.

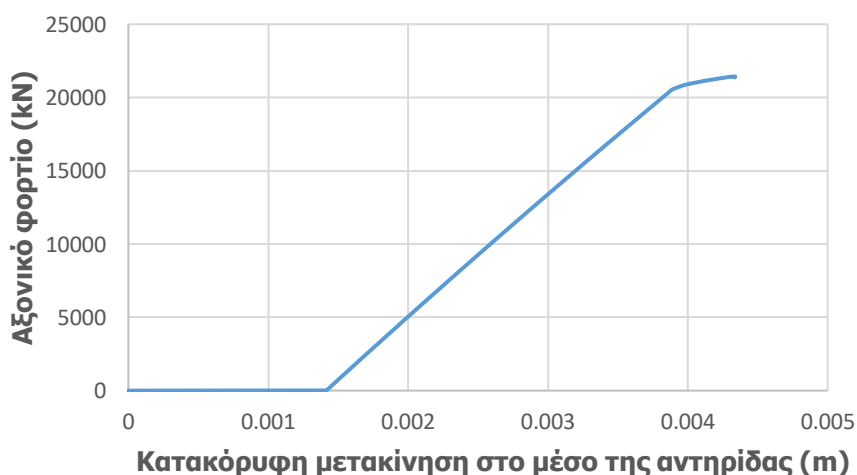


Σχήμα 4-51: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/40 αντηρίδας κάτω στάθμης

#### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-52, Σχήμα 4-53) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-52: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 4-53: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/40 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

$$P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} \quad (4-63)$$

Όπου:  $\Lambda$ =φορτικός συντελεστής (εξάγεται από το ADINA) και  $N_{Ed}$ =δρώσα αξονική δύναμη σχεδιασμού Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-63) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 2.04 \cdot 10502.55 \Rightarrow P_u = 21425.2\text{kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{10502.55\text{kN}}{21425.2\text{kN}} = 0.49$$

Ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης είναι πολύ μικρός, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Και τούτο γιατί, όπως έχει ήδη αναφερθεί ανωτέρω, η CHS610/40 επαρκεί οριακά ως αντηρίδα κάτω στάθμης για την περίπτωση που δεν υφίστανται καθόλου διαγώνια στοιχεία. Στο παρόν σύστημα αντιστήριξης υπάρχουν και κατακόρυφα και οριζόντια διαγώνια στοιχεία δικτυώματος που προστατεύουν το μέλος της αντηρίδας έναντι λυγισμού. Επομένως είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή η CHS610/40 θα επαρκεί άνετα ως διατομή αντηρίδας της κάτω στάθμης.

### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS610/20 αντηρίδων κάτω στάθμης

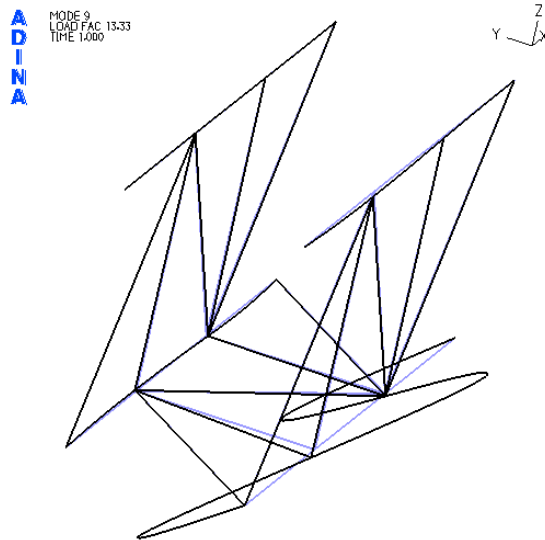
$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 10203.6\text{kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

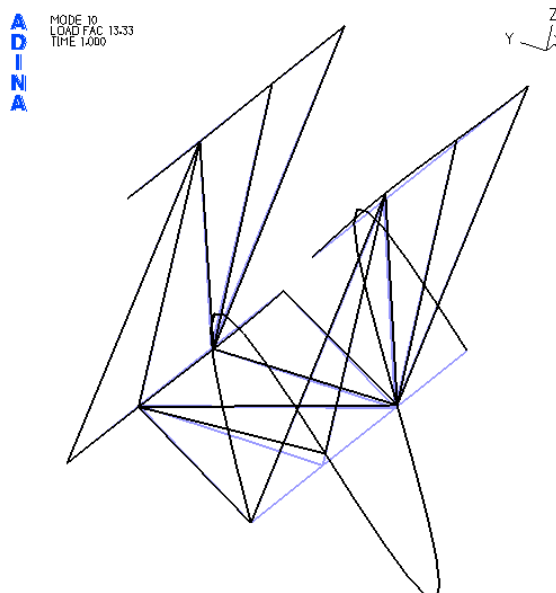
Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 9,10 για την μία αντηρίδα, και των ιδιομορφών 11,12 για την άλλη αντηρίδα όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Οι ιδιομορφές αυτές είναι λοξές, κάτι το οποίο δεν προκαλεί ανησυχία διότι ουσιαστικά το σχήμα της ιδιομορφής είναι η προβολή της λοξής αυτής ιδιομορφής στις διευθύνσεις y-y και z-z. Δεν επιλέγεται όμως μία λοξή ιδιομορφή για κάθε αντηρίδα με στόχο να χρησιμοποιηθεί η προβολή της στις διευθύνσεις y-y και z-z, αλλά για κάθε αντηρίδα χρησιμοποιούνται και οι 2 λοξές ιδιομορφές της, και για μέγεθος ατέλειας στην διεύθυνση y-y

χρησιμοποιείται εκείνη η ιδιομορφή της οποίας η προβολή στην διεύθυνση αυτή δίνει μεγαλύτερο σχήμα. Ομοίως για το μέγεθος της ατέλειας στην διεύθυνση z-z.

Επειδή οι ιδιομορφές 9,10 είναι ακριβώς ίδιες με τις 11,12 αντιστοίχως, με την μόνη διαφορά ότι αναφέρονται σε διαφορετική αντηρίδα, παρουσιάζονται μόνο οι ιδιομορφές 9 και 10. Η 9<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 4-54) και η 10<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 4-55).



Σχήμα 4-54: 9<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz για την διατομή CHS610/20 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού



Σχήμα 4-55: 10<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS610/20 αντηρίδας κάτω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδα αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4-19. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-56, Σχήμα 4-57) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-56: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/20 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού



Σχήμα 4-57: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/20 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed} = 10203.6 \text{ kN}$ .

Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών στην περίπτωση της CHS610/20 έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που παρουσιάστηκαν ανωτέρω για την CHS610/40. Η μόνη διαφοροποίηση είναι ως προς το μέγεθος των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο οι τιμές των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών (Πίνακας 4-21).

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/20 αντηρίδων κάτω στάθμης

Πίνακας 4-21: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS610/20

$N_{Ed}$ (kN)	10235
$M_{Ed,y}$ (kNm)	367.5
$M_{Ed,z}$ (kNm)	462.5
$V_{Ed,y}$ (kN)	299.8
$V_{Ed,z}$ (kN)	232.6

Στον Πίνακα 4-21 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA.

Παρατηρώντας τον ανωτέρω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος της αξονικής σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) διαφοροποιήθηκε λίγο σε σχέση με την αρχική τιμή του που είχε εκτιμηθεί. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από το ότι στο παρόν σύστημα αντιστήριξης, σε αντίθεση με το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας, υπάρχουν και οι χιαστί σύνδεσμοι, των οποίων η μία συνιστώσα της αξονικής είναι επί της διεύθυνσης της αντηρίδας, επομένως η συνιστώσα αυτή διαφοροποιεί λίγο το μέγεθος της αξονικής της αντηρίδας. Όπως και να έχει ο έλεγχος γίνεται με το δυσμενέστερο μέγεθος της αξονικής, το οποίο είναι αυτό που αναγράφεται στον Πίνακα 4-21.

$$N_{Ed} = 10235 \text{ kN}, M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 590.7 \text{ kNm}, V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 379.5 \text{ kN}$$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-44) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$\text{Είναι: } V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 379.5 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 4840.9 \text{ kN} \Rightarrow 379.5 \text{ kN} \leq 2420.45 \text{ kN}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (4-45).

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 4621.04 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{10235 \text{ kN}}{13171 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 862 \text{ kNm}$$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.78$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.24$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

Άρα η διατομή CHS610/20 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.



### Βαθμός αξιοποίησης

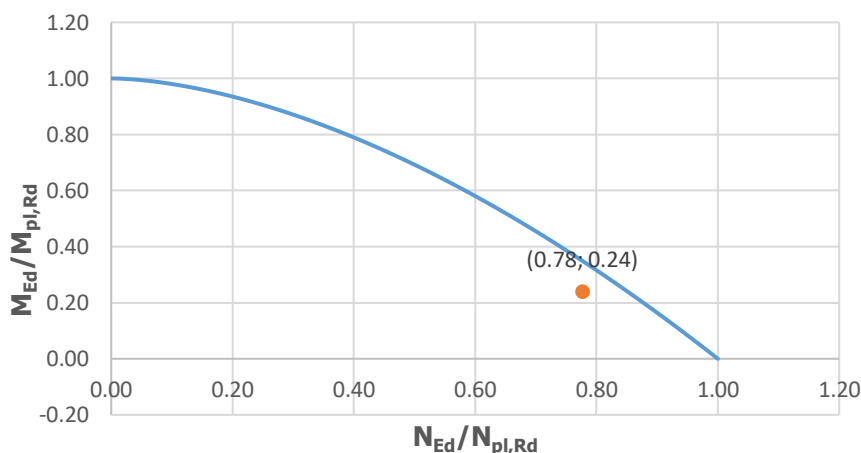
Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{590.7\text{kNm}}{862\text{kNm}} = 0.69$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 4-58). Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας.

Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονική δύναμης και ροπής.



Σχήμα 4-58: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/20 αντηρίδας κάτω στάθμης

### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-52, Σχήμα 4-53) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:

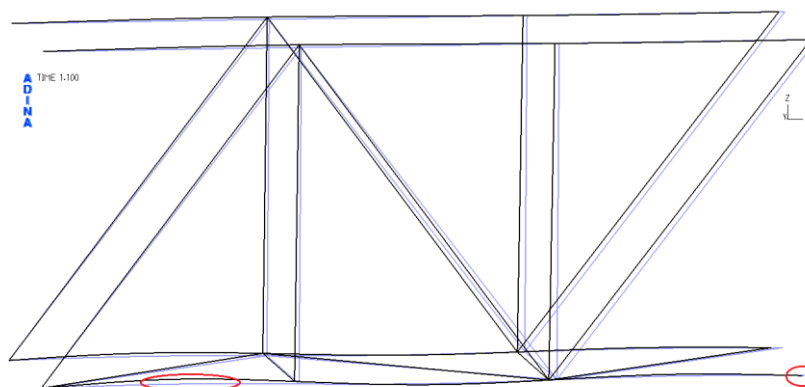


Σχήμα 4-59: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/20 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 4-60: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/20 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Παρατηρώντας τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας (Σχήμα 4-59, Σχήμα 4-60) γίνεται αντιληπτό ότι σε αρχικό στάδιο καθώς το μέγεθος του αξονικά επιβαλλόμενου φορτίου αυξάνεται, η μετακίνηση, είτε οριζόντια είτε κατακόρυφη, είναι πρακτικώς μηδαμινή και σε μετέπειτα στάδιο μεγαλώνει απότομα με μικρή προσαύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην πλαστικοποίηση της κρίσιμης διατομής στην αντηρίδας της κάτω στάθμης, η οποία κρίσιμη αυτή διατομή βρίσκεται περίπου στο μέσο του μεσαίου φαντώματος. Η πλαστικοποίηση αρχίζει να εκδηλώνεται από εκείνη την χρονική στιγμή όπου η κλίση του δρόμου ισορροπίας αρχίζει να μειώνεται και να αποκλίνει από την κατακόρυφο μέχρις ότου οριζοντιωθεί, όπου εκεί θα υφίσταται πλέον η πλήρης πλαστικοποίηση της διατομής. Από το Σχήμα 4-61 γίνεται φανερό το ότι ενώ το θλιπτικά αξονικά επιβαλλόμενο φορτίο έχει φτάσει σε ένα αξιόλογο μέγεθος, και επομένως στο μέλος της αντηρίδας της κάτω στάθμης τα ακριανά φαντώματα έχουμε παραμορφωθεί, το μεσαίο φάντωμα είναι πρακτικώς ανεπηρέαστο. Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή, όπου το φορτίο θα έχει αυξηθεί κατά λίγο, έχει αρχίσει η πλαστικοποίηση της κρίσιμης διατομής και κατ' επέκταση αρχίζει να εκδηλώνεται μετακίνηση, οριζόντια και κατακόρυφη, στο μεσαίο φάντωμα της αντηρίδας της κάτω στάθμης.



Σχήμα 4-61: Παραμορφωσική εικόνα συστήματος αντιστήριξης με αντηρίδα άνω και κάτω στάθμης διατομής CHS508/16 και CHS610/20 αντιστοίχως, στην αρχή της ανάλυσης GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-63) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 1.098 \cdot 10203.6 \Rightarrow P_u = 11203.55 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{10203.6 \text{ kN}}{11203.55 \text{ kN}} = 0.911$$

Ο βαθμός αξιοποίησης που προκύπτει είναι μεγάλος, δηλαδή η CHS610/20 μπορεί να χαρακτηριστεί ως οριακή διατομή, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση διατομών δομικών μελών μεταξύ διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης.

Στο σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας ως οριακή διατομή είχε προκύψει η CHS610/40. Ενώ στο παρόν σύστημα αντιστήριξης η οριακή διατομή που προκύπτει είναι η CHS610/20. Επομένως, γίνεται αντιληπτό, ότι η απομείωση στο εμβαδόν του χρησιμοποιούμενου χάλυβα είναι πολύ μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για εξοικονόμηση χάλυβα της τάξεως του:

$$\frac{716 \text{ cm}^2 - 371 \text{ cm}^2}{716 \text{ cm}^2} = 48\%$$

Άρα, αν επιλεγεί να υλοποιηθεί το παρόν σύστημα αντιστήριξης, θα υπάρξει εξοικονόμηση υλικού του χάλυβα για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης της τάξεως του 48%.

#### 4.2.3.3 Γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη

Η διατομή CHS508/16 των αντηρίδων της άνω στάθμης έχει προκύψει ως οριακή λαμβάνοντας υπόψιν την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής κατά την οποία είναι μόνη της, δηλαδή δεν έχει κάποια πλευρική εξασφάλιση. Στην 2<sup>η</sup> φάση της κατασκευής, όπου έχουν τοποθετηθεί και τα οριζόντια και τα κατακόρυφα χιαστί, εξασφαλίζεται πλέον κατακόρυφως. Επομένως, αναμένεται πλέον να μην είναι τόσο οριακή όσο ήταν στην 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής, αφού τα κατακόρυφα χιαστί ενισχύουν κατά κάποιο τρόπο το σύστημα αντιστήριξης της άνω στάθμης.

Υπενθυμίζεται ότι στο μέλος της αντηρίδας εμφανίζεται γεωμετρική μη γραμμικότητα αφού οι στηρίξεις της παρουσιάζουν υψομετρική διαφορά  $A/6$ , όπου  $A$  είναι το ύψος της διατομής, αν αυτή είναι διπλού ταυ, ή  $A$  είναι η διάμετρος της διατομής, αν αυτή είναι κοίλη κυκλική. Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η γραμμική ανάλυση δεν επαρκεί από μόνη της για την διαστασιολόγηση του μέλους και είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί και μη γραμμική ανάλυση.

Τα εντατικά μεγέθη ( $M, Q, N$ ) της άνω στάθμης, λόγω των φορτίων που προαναφέρθηκαν στην υποπαράγραφο 4.2.1.3, με βάση τα οποία θα γίνει ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας έχουν προκύψει από επαλληλία, με χρήση των κατάλληλων συντελεστών σχεδιασμού (1.35 και 1.50), των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις δυο ομάδες προσομοιωμάτων της 2<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής.

Όπως αναφέρθηκε και στη γενική περιγραφή της υποπαράγραφου 4.2.3 που παρουσιάστηκε ανωτέρω, η διατομή της άνω στάθμης είναι η CHS508/16. Από την υποπαράγραφο 4.2.3.2 προσδιορίστηκε και η οριακή διατομή των αντηρίδων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάτω στάθμη, που είναι η CHS610/20. Επομένως, με βάση την τελική αυτή διαμόρφωση του συστήματος αντιστήριξης (2<sup>η</sup> φάση κατασκευής), ακολουθεί ο έλεγχος επάρκειας διατομής και μέλους της αντηρίδας άνω στάθμης.

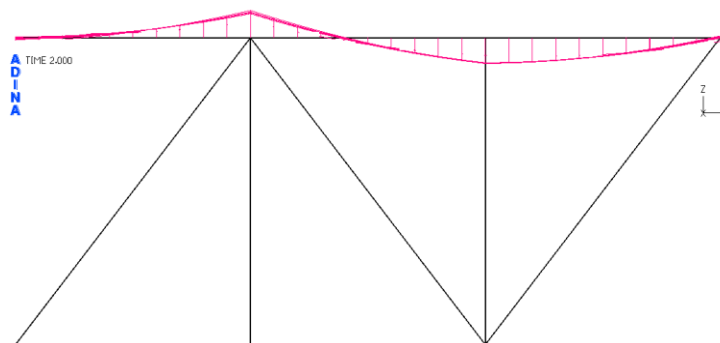
Στον Πίνακα 4-22 παρουσιάζονται οι διατομές των δομικών μελών που θα χρησιμοποιηθούν στα προσομοιώματα της 2<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής για τον έλεγχο των αντηρίδων της άνω στάθμης.

Πίνακας 4-22: Διατομές δομικών μελών στη 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής

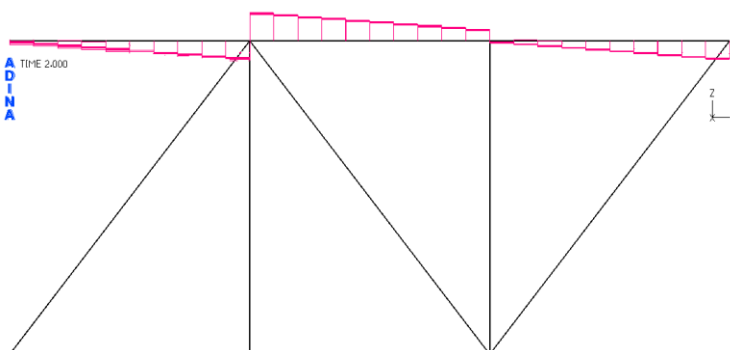
Μέλη από χάλυβα	Μέλη από σκυρόδεμα
Αντηρίδες άνω στάθμης: CHS 508/16 Αντηρίδες κάτω στάθμης: CHS 610/20 Τραβέρσες: 2HEB450 Στοιχεία δικτυώματος: CHS168.3/6.3	Κεφαλόδεσμοι(ΒxΗ): 1.20m x 1.00m Πάσσαλοι: D=1.00m

### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών διατομής CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης

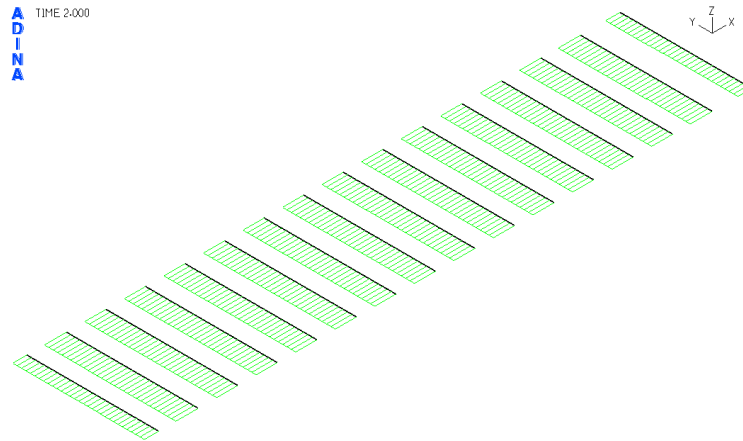
Παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών από γραμμική στατική ανάλυση 1<sup>ης</sup> τάξης.



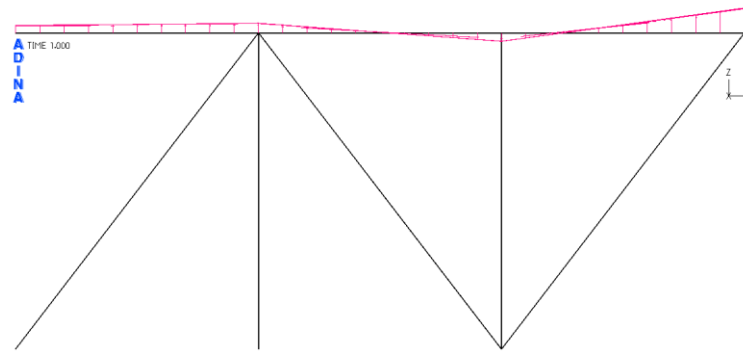
Σχήμα 4-62: Διάγραμμα καμπικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 λόγω ιδίου βάρους και ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=52.04\text{kNm}$



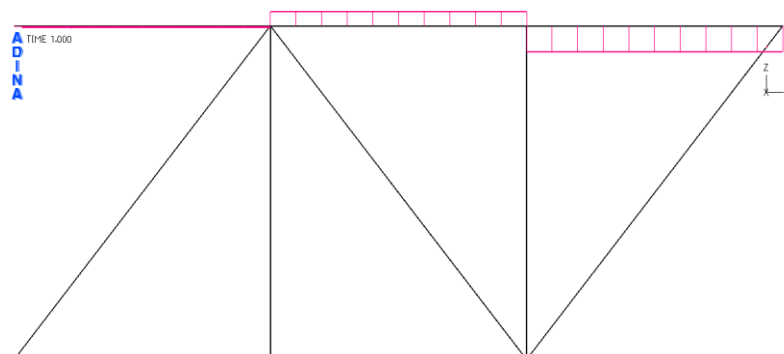
Σχήμα 4-63: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 λόγω ιδίου βάρους και ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_z=20.08\text{kN}$



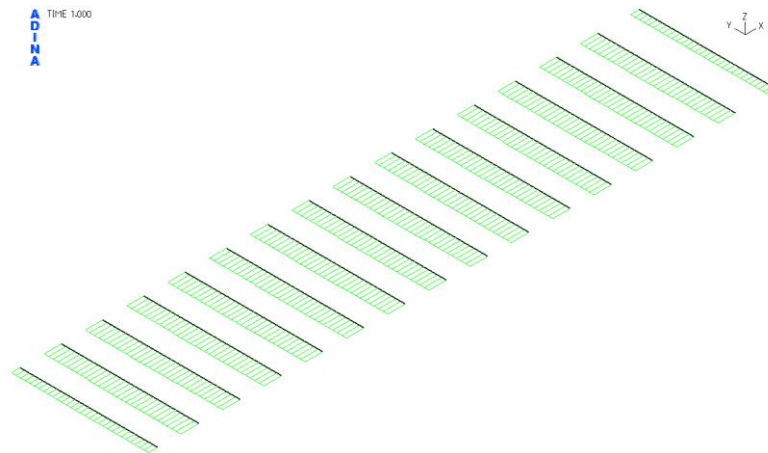
Σχήμα 4-64: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS508/16 λόγω ωθήσεων γαιών από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=1988\text{kN}$



Σχήμα 4-65: Διάγραμμα καμπικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $M_y=24.87\text{kNm}$



Σχήμα 4-66: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $V_z=6.67\text{kN}$



Σχήμα 4-67: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής από γραμμικές αναλύσεις με μέγιστη τιμή  $N=443.5\text{kN}$

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 4-23 στον οποίο υπολογίζονται, με βάση τα ανωτέρω αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και με βάση τον συνδυασμό φόρτισης  $1.35G+1.35\Omega\Gamma+1.50\Delta T$  του Πίνακα 4-2, τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού. Αξιοποιώντας τα κάτωθι μεγέθη σχεδιασμού, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της αντηρίδας CHS610/40.

Πίνακας 4-23: Υπολογισμός μεγεθών σχεδιασμού

Ιδίων Βάρους + Ωθήσεις Γαιών		Θερμοκρασία		Μεγέθη Σχεδιασμού	
N	1988	N	443.5	$N_{Ed}$ (kN)	3349.05
$M_y$	52.04	$M_y$	9.18	$M_{Ed,y}$ (kNm)	84.02
$M_z$	0	$M_z$	0	$M_{Ed,z}$ (kNm)	0
$V_y$	0	$V_y$	0	$V_{Ed,y}$ (kN)	0
$V_z$	20.08	$V_z$	6.48	$V_{Ed,z}$ (kN)	36.83

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση  $y-y$  και στην  $z-z$ , γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed}=3349.05\text{kN}$ ,  $M_{Ed}=\sqrt{M_{Ed,y}^2+M_{Ed,z}^2}=84.02\text{kNm}$ ,  $V_{Ed}=\sqrt{V_{Ed,y}^2+V_{Ed,z}^2}=36.83\text{kN}$

### Έλεγχος επάρκειας διατομής αντηρίδων άνω στάθμης διατομής CHS508/16

Τα δεδομένα για την διατομή CHS508/16 είναι:

$f_y=35.5\text{MPa}$  (χάλυβας S355)

$E=21000\text{ kN/cm}^2$

$\gamma_{M_0}=1.00$

$A=247\text{cm}^2$

$A_v=\frac{2 \cdot A}{\pi}=157\text{cm}^2$

$I=74909\text{cm}^4$

$W_{pl}=3874\text{cm}^3$

Εύρεση κατηγορίας διατομής

Αν επαληθεύεται η εξ. (4-64) τότε η διατομή είναι κατηγορίας 1. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι γενικότερη απαίτηση, οι διατομές που χρησιμοποιούνται να είναι κατηγορίας 1.

$$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \quad (4-64)$$

Είναι χάλυβας S355, επομένως  $\varepsilon=0.81$ .

$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \Rightarrow \frac{508}{16} \leq 50 \cdot 0.81^2 \Rightarrow 31.75 \leq 32.81$ , επομένως η διατομή είναι κατηγορίας 1. Άρα θα πραγματοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

#### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-65)$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-66)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (4-67)$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (4-65), (4-66) και (4-67) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{247 \text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 8768.5 \text{kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{3874 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 1375.3 \text{kNm}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{157 \text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3222.9 \text{kN}$$

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-68) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (4-68)$$

Είναι:  $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 36.83 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 3222.9 \text{kN} \Rightarrow 36.83 \text{kN} \leq 1611.45 \text{kN}$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (4-69).

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}), \text{ όπου } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (4-69)$$

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1-n^{1.7}) = 1375.3 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3349.05 \text{ kN}}{8768.5 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 1107.49 \text{ kNm}$$

### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{84.02 \text{ kNm}}{1107.49 \text{ kNm}} = 0.08$$

### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.38$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.06$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

### **Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης**

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

Χρειάζεται επιπροσθέτως να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχών  $N_{Rk}$  και  $M_{Rk}$  από τις εξ. (4-70) και (4-71) αντιστοίχως.

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (4-70)$$

$$M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y \quad (4-71)$$

$$\text{Είναι: } N_{Rk} = A \cdot f_y = 247 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 8768.5 \text{ kN} \text{ και } M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 3874 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 1375.3 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

#### 1. Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της αντηρίδας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

#### 2. Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

*Για λυγισμό περί τον γ-γ άξονα*

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-72)$$

Όπου η εξ. (4-72) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:



$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4-73)$$

$$L_{cr,y} = k \cdot L \quad (4-74)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (4-75)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-73), (4-74) και (4-75) προκύπτει:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 5\text{m} = 5\text{m}, \text{ όπου:}$$

- $k=1.00$  (για θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα του εξεταζόμενου τμήματος)
- $L=5\text{m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων). Λόγω της ύπαρξης των κατακορύφων χιαστί εξασφαλίζεται πλήρως η αντηρίδα στα κοινά τους σημεία (δες υποπαράγραφο 4.4.1), επομένως το μήκος λυγισμού της μειώνεται στο 1/3 του συνολικού της μήκους.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{74909\text{cm}^4}{247\text{cm}^2}} = 17.41\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{5\text{m}}{17.41\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.376$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών ( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_y$ :

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] \quad (4-76)$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \quad (4-77)$$

Από την εξ. (4-76) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.376 - 0.2) + 0.376^2] = 0.589$$

Επομένως από την εξ. (4-77) προκύπτει μειωτικός συντελεστής  $\chi$  ίσος με:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.589 + \sqrt{0.589^2 - 0.376^2}} = 0.959$$

Για λυγισμό περί τον z-z άξονα

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-78)$$

Όπου η εξ. (4-78) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 15\text{m} = 15\text{m}$ , όπου:

- $k = 1.00$  (για θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα της αντηρίδας)
- $L = 15\text{m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων). Δεν υπάρχουν οριζόντια χιαστί μεταξύ των αντηρίδων της άνω στάθμης ώστε να την εξασφαλίζουν πλήρως σε κάποιες θέσεις στο εσωτερικό της, επομένως το μήκος λυγισμού ισούται με το συνολικό μήκος της αντηρίδας.

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{74909\text{cm}^4}{247\text{cm}^2}} = 17.41\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{15\text{m}}{20.21\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 1.128$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού a.

Συντελεστής ατελειών(a):

$a = 0.21$  για καμπύλη λυγισμού a.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_z$ :

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] \quad (4-79)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad (4-80)$$

Από την εξ. (4-79) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (1.128 - 0.2) + 1.128^2] = 1.233$$

Επομένως, από την εξ. (4-80), ο μειωτικός συντελεστής  $\chi_z$  είναι ίσος με:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1.233 + \sqrt{1.233^2 - 1.128^2}} = 0.577$$

3. Συντελεστές αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$ Υπολογισμός συντελεστών  $C_m$  ισοδύναμης ομοιόμορφης ροής:Πίνακας 4-24: Συντελεστές  $C_m$ 

Συντελεστής ροής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	y-y	z-z
$C_{mz}$	z-z	y-y

Από τον Πίνακα 4-24 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροής.

Για άξονα κάμψης y-y τα κατακόρυφα χιαστί εξασφαλίζουν πλήρως το μέλος της αντηρίδας στους κοινούς τους κόμβους (δες υποπαράγραφο 4.4.1). Επομένως σχηματίζονται 3 φατνώματα. Ο υπολογισμός του  $C_{my}$  θα γίνει με βάση τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου, από άποψη εντατικών μεγεθών, φατνώματος, δηλαδή του μεσαίου. Επαλληλίζοντας τα διαγράμματα ροών περί τον y-y του μεσαίου φατνώματος (Σχήμα 4-62 και Σχήμα 4-65) προκύπτει η μορφή του 2<sup>ου</sup> διαγράμματος ροών του πίνακα B3 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Στον Πίνακα 4-25 παρουσιάζονται οι τιμές ροών στα άκρα και στο μέσο του μεσαίου φατνώματος της αντηρίδας άνω στάθμης όπως έχουν προκύψει από τα 2 εναλλακτικά χωρικά προσομοιώματα που έχουν μορφωθεί.

Πίνακας 4-25: Τιμές ροών στα άκρα του ακριανού φατνώματος της αντηρίδας άνω στάθμης

	Μ στο άκρο (kNm)	Μ στο μέσο (kNm)	Μ στο άλλο άκρο (kNm)
Λόγω θερμοκρασιακού φορτίου	9.18	2.2	-8.29
Λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών + ιδίου βάρους	52.04	6.58	-26.96

Τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν και τους συντελεστές σχεδιασμού 1.35 και 1.50. Επομένως είναι:

$$M \text{ στο άκρο} = 1.35 \cdot 52.04 \text{ kNm} + 1.50 \cdot 9.18 \text{ kNm} = 84.02 \text{ kNm}$$

$$M \text{ στο μέσο} = 1.35 \cdot 6.58 \text{ kNm} + 1.50 \cdot 2.2 \text{ kNm} = 12.18 \text{ kNm}$$

$$M \text{ στο άλλο άκρο} = 1.35 \cdot (-26.96 \text{ kNm}) + 1.50 \cdot (-8.29 \text{ kNm}) = -48.83 \text{ kNm}$$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$M_h = -48.83 \text{ kNm}$$

$$M_s = 12.18 \text{ kNm}$$

$$(a) \alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{12.18 \text{ kNm}}{-48.83 \text{ kNm}} \Rightarrow \alpha_s = -0.25$$

$$(b) \psi = \frac{-48.83 \text{ kNm}}{84.02 \text{ kNm}} \Rightarrow \psi = -0.581$$

(γ) ομοιόμορφο φορτίο, αφού το ιδίον βάρος και το θερμοκρασιακό φορτίο επιβάλλονται ομοιόμορφα στο μέλος της αντηρίδας

$$\text{Με βάση τα (α), (β), (γ) προκύπτει: } C_{my} = 0.1 \cdot (1 - \psi) - 0.8 \cdot \alpha_s \geq 0.4 \Rightarrow C_{my} = 0.4$$

Από την φόρτιση λόγω ιδίου βάρους, ωθήσεων γαιών και θερμοκρασίας, όπως γίνεται αντιληπτό από τον Πίνακα 4-23 είναι  $M_z=0\text{kNm}$ .

Επομένως στον σύνθετο έλεγχο, λόγω κάμψης και θλίψης, οι συντελεστές  $k_{zz}$  και  $k_{yz}$  δεν υπολογίζονται διότι από την στιγμή που  $M_z=0\text{kNm}$  δεν έχουν κάποιο φυσικό νόημα. Άρα κατ' επέκταση ούτε ο συντελεστής ροπής  $C_{mz}$  υπολογίζεται.

#### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος της αντηρίδας είναι εξασφαλισμένο στα άκρα του ώστε να μην παραμορφώνεται στρεπτικά και επιπλέον δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο στην αντηρίδα. Επομένως, το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας B.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα B.1.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (4-81)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (4-82)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-81) και (4-82) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 4-26.

Πίνακας 4-26: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.428
$k_{zy}$	0.257

#### 4. Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-83)$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-84)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-83) και (4-84) προκύπτει:

$$0.40 + 0.03 = 0.43 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-83)}$$

$$0.66 + 0.02 = 0.68 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-84)}$$

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τους ανωτέρω ελέγχους (διατομής και μέλους) γίνεται αντιληπτό ότι κρισιμότερος είναι ο έλεγχος μέλους της αντηρίδας, αφού τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας του μέλους είναι πολύ πιο κοντά στη μονάδα σε σχέση με τα αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας της διατομής.

Επίσης διαπιστώνεται ότι δυναμικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και μικρότερη διατομή, αφού οι έλεγχοι διατομής και μέλους έχουν ακόμα περιθώριο μέχρι την οριακή τους τιμή που είναι η μονάδα. Αλλά κάτι τέτοιο δεν είναι ρεαλιστικό διότι η CHS508/16 έχει προκύψει ως κρίσιμη διατομή από την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής. Δηλαδή με λίγα λόγια, το συμπέρασμα που εξαγεται δεν είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερη διατομή, αφού κάτι τέτοιο δεν επιτρέπεται από την φάση 1 της κατασκευής, αλλά ότι οι κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι, που ενεργοποιούνται στην φάση 2 της κατασκευής, προσφέρουν κάποιου είδους εξασφάλιση στο μέλος της αντηρίδας και κατ' επέκταση το προστατεύουν από τον λυγισμό του.

Επιπροσθέτως παρατηρώντας τον έλεγχο μέλους, γίνεται αντιληπτό, ότι λόγω της ενεργοποίησης μόνο των κατακόρυφων χιαστί, αφού οριζόντια δεν υφίστανται στην άνω στάθμη, δυσχεραίνεται ο λυγισμός περί τον γ-γ άξονα, ενώ αντιθέτως ο λυγισμός περί τον z-z άξονα είναι κρίσιμος διότι δεν υπάρχει πλευρική εξασφάλιση στην οριζόντια διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, ο έλεγχος που αναφέρεται στον λυγισμό της αντηρίδας περί τον z-z άξονα έχει τιμή 0.68, που είναι κοντά στη μονάδα, σε αντίθεση με τον άλλο έλεγχο, που αναφέρεται στον λυγισμό της αντηρίδας περί τον γ-γ άξονα, και έχει τιμή 0.43, η οποία είναι αρκετά μικρότερη του 0.68.

Στον Πίνακα 4-27 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας για κάθε μία από τις διατομές που εξετάστηκαν ανωτέρω.

Πίνακας 4-27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας – Άνω στάθμη

		CHS508/16
Έλεγχος επάρκειας διατομής	$N_{Ed}/N_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.38
	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1.0$	0.06
Έλεγχος επάρκειας μέλους	$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$ $\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$	0.43
	$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$ $\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0$	0.68

#### 4.2.3.4 Μη γραμμικές αναλύσεις – Άνω στάθμη

Στόχος είναι να διερευνηθεί αν η υψομετρική διαφορά D/6 των στηρίξεων της αντηρίδας (γεωμετρική μη γραμμικότητα) επηρεάζει την εντατική της κατάσταση ή όχι. Το θλιπτικά επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο στο μη γραμμικό προσομοίωμα, του συστήματος των αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης με διατομή αντηρίδων άνω στάθμης CHS508/16 και αντηρίδων κάτω στάθμης CHS610/20, έχει προκύψει σύμφωνα με τον συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.35ΩΓ+1.50ΔΤ, αξιοποιώντας τις τιμές των αξονικών δυνάμεων των γραμμικών προσομοιωμάτων λόγω των φορτίων του ίδιου βάρους, των ωθήσεων γαιών και της ομοιόμορφης θερμοκρασίας.

Εισάγεται γεωμετρική ατέλεια λόγω καμπυλότητας του φορέα με το σχήμα των ιδιομορφών λυγισμού που θα προκύψουν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) και μέγεθος συμβατό με τις καμπύλες λυγισμού του EC3 για τον χρησιμοποιούμενο τύπο διατομής.

Η χρησιμοποιούμενη κοίλη κυκλική διατομή της αντηρίδας είναι θερμής έλασης και ποιότητας χάλυβα S355. Επομένως αντιστοιχεί στην καμπύλη λυγισμού a.

Άρα, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5 (Πίνακας 5.1 του EN1993-1-1) προκύπτει μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για το μέλος της αντηρίδας όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-28. Λόγω της ύπαρξης μόνο κατακόρυφων διαγώνιων στοιχείων για τις αντηρίδες της άνω στάθμης, το μήκος λυγισμού για λυγισμό περί τον γ-γ άξονα ισούται με  $L/3$ , αφού τα κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία εξασφαλίζουν πλήρως το μέλος της αντηρίδας στους κοινούς κόμβους (δες υποπαράγραφο 4.4.1), ενώ για λυγισμό περί τον z-z άξονα, όπου δεν υφίσταται πλευρική εξασφάλιση, το μήκος λυγισμού ισούται με  $L$ .

Πίνακας 4-28: Μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας για την κοίλη κυκλική διατομή της αντηρίδας

<b>Λυγισμός περί τον άξονα γ-γ</b>	$e_{o,el} = (L/3)/300$	$e_{o,pl} = (L/3)/250$
	0.017m	0.02m
<b>Λυγισμός περί τον άξονα z-z</b>	$e_{o,el} = L/300$	$e_{o,pl} = L/250$
	0.05m	0.06m

Οι διατομές των αντηρίδων της κάτω στάθμης είναι κατηγορίας 1. Επομένως από τη στιγμή που θα υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος και διαστασιολόγηση, λαμβάνεται υπόψιν το πλαστικό μέγεθος ατέλειας ( $e_{o,pl}$ ), και όχι το ελαστικό ( $e_{o,el}$ ).

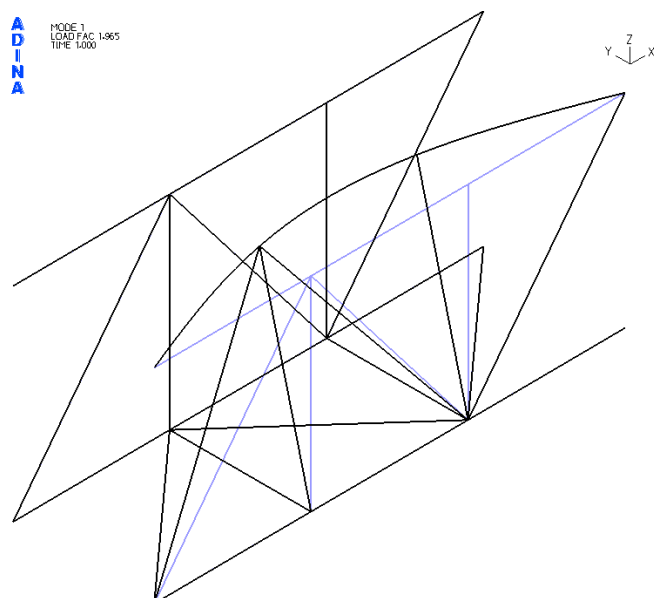
Από τη στιγμή που διερευνάται η συμπεριφορά των αντηρίδων της άνω στάθμης, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ως σχήμα αρχικής ατέλειας γραμμικός συνδυασμός ιδιομορφών των αντηρίδων της στάθμης αυτής. Η λογική αυτή εξηγείται αναλυτικά στην τελευταία παράγραφο της υποπαραγράφου 4.2.3.2.

### Μη γραμμικές αναλύσεις για διατομή CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης

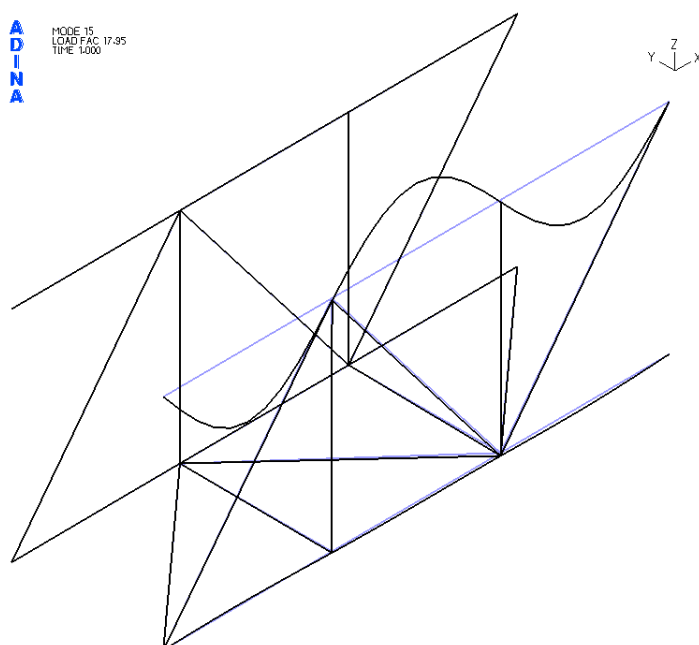
$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_G + 1.35 \cdot N_{Qr} + 1.50 \cdot N_{\Delta T} = 3349.05 \text{ kN}$$

#### Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού τρισδιάστατου προσομοιώματος της αντηρίδας προκύπτει το σχήμα της ατέλειας που θα χρησιμοποιηθεί στις μη γραμμικές αναλύσεις. Εφαρμόζεται ατέλεια και κατά τις 2 διευθύνσεις ως γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών 1,11 για την μία αντηρίδα, και των ιδιομορφών 2,12 για την άλλη αντηρίδα όπως φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Επειδή οι ιδιομορφές 1,11 είναι ακριβώς ίδιες με τις 2,12 αντιστοίχως, με την μόνη διαφορά ότι αναφέρονται σε διαφορετική αντηρίδα, παρουσιάζονται μόνο οι ιδιομορφές 1 και 11. Η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πραγματοποιείται στο οριζόντιο επίπεδο xy (Σχήμα 4-42) και η 11<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xz (Σχήμα 4-43).



Σχήμα 4-68: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο οριζόντιο επίπεδο xy για την διατομή CHS508/16 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού



Σχήμα 4-69: 11<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού στο κατακόρυφο επίπεδο xy για την διατομή CHS508/16 αντηρίδας άνω στάθμης από γραμμική ανάλυση λυγισμού

#### Ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA)

Θεωρώντας την αντηρίδα αμφιέριστη πραγματοποιείται ελαστοπλαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA) υπό το αξονικό φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}$ , προκειμένου να υπολογιστούν οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης.

Στην αντηρίδα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο ( $N_{Ed}$ ) και επιβάλλεται ατέλεια ( $e_{o,pl}$ ) όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 4-19. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-70, Σχήμα 4-71) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-70: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

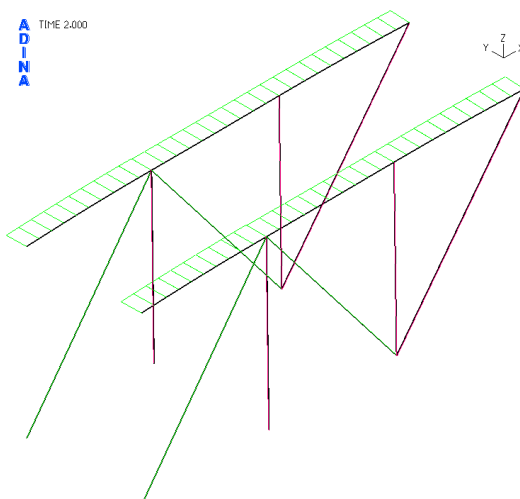


Σχήμα 4-71: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GNIA έως το αξονικό φορτίο σχεδιασμού

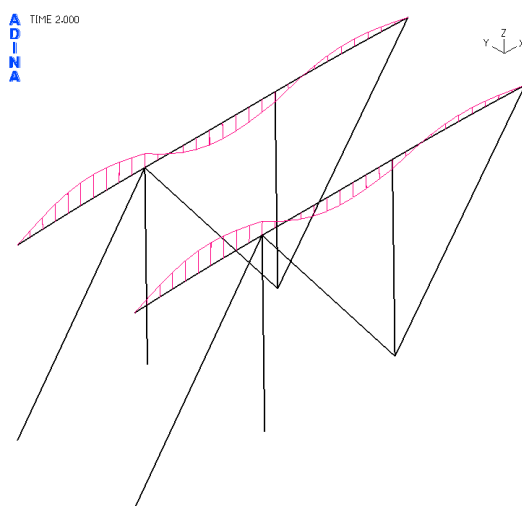
Τα διαγράμματα περιγράφουν την εξέλιξη της μετακίνησης στο μέσο της αντηρίδας στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά από τη μηδενική τιμή ως το φορτίο σχεδιασμού  $N_{Ed}=3349.05\text{kN}$ .

Στο τέλος της ανάλυσης η ένταση της αντηρίδας περιγράφεται από τα ακόλουθα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 4-72), καμπικών ροπών (Σχήμα 4-73, Σχήμα 4-74) και τεμνουσών δυνάμεων (Σχήμα 4-75, Σχήμα 4-76).

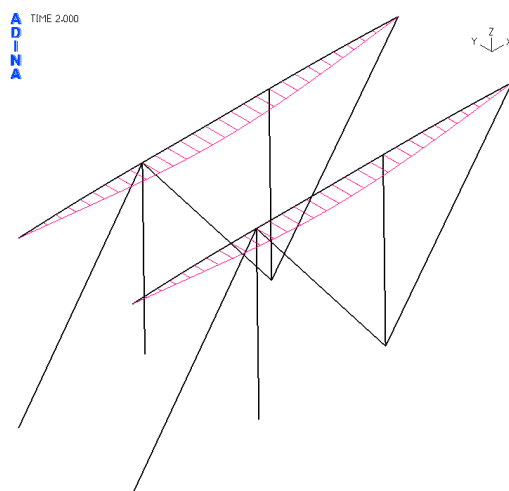




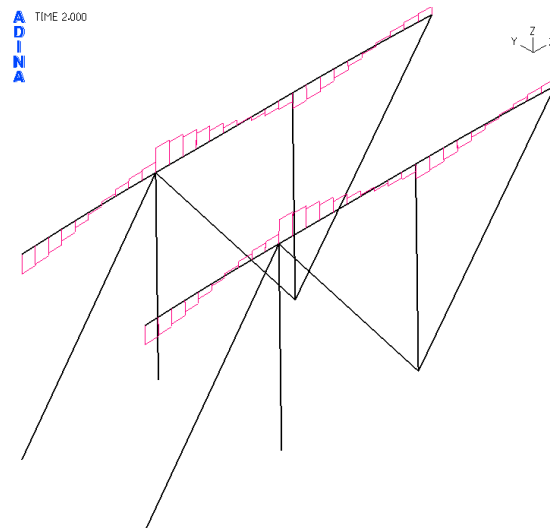
Σχήμα 4-72: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $N=3521\text{kN}$



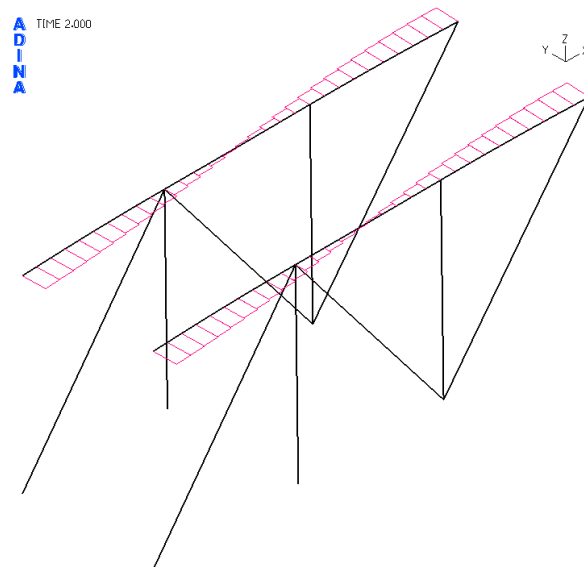
Σχήμα 4-73: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_y=121.1\text{kN}$



Σχήμα 4-74: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $M_z=419.2\text{kN}$



Σχήμα 4-75: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_z=80.98\text{kN}$



Σχήμα 4-76: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$  αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 στο τέλος της ανάλυσης GNIA με μέγιστη τιμή  $V_y=89.04\text{kN}$

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης

Πίνακας 4-29: Μεγέθη σχεδιασμού για την CHS508/16

$N_{Ed}$ (kN)	3521
$M_{Ed,y}$ (kNm)	121.1
$M_{Ed,z}$ (kNm)	419.2
$V_{Ed,y}$ (kN)	89.04
$V_{Ed,z}$ (kN)	80.98

Στον Πίνακα 4-29 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών εκτελώντας ανάλυση GNIA.

Παρατηρώντας τον ανωτέρω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος της αξονικής σχεδιασμού ( $N_{Ed}$ ) διαφοροποιήθηκε λίγο σε σχέση με την αρχική τιμή του που είχε εκτιμηθεί. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από το ότι στο παρόν σύστημα αντιστήριξης, σε αντίθεση με το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης

αντηρίδας, υπάρχουν και οι χιαστί σύνδεσμοι, των οποίων η μία συνιστώσα της αξονικής είναι επί της διεύθυνσης της αντηρίδας, επομένως η συνιστώσα αυτή διαφοροποιεί λίγο το μέγεθος της αξονικής της αντηρίδας. Όπως και να έχει ο έλεγχος γίνεται με το δυσμενέστερο μέγεθος της αξονικής, το οποίο είναι αυτό που αναγράφεται στον Πίνακα 4-29.

$$N_{Ed} = 3349.05 \text{ kN}, M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 436.3 \text{ kNm}, V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 120.4 \text{ kN}$$

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον αντίστοιχο έλεγχο επάρκειας διατομής που έγινε στις γραμμικές αναλύσεις.

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (4-68) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$\text{Είναι: } V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 120.4 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 8768.5 \text{ kN} \Rightarrow 120.4 \text{ kN} \leq 4384.25 \text{ kN}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ. (4-69).

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 1375.27 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3349.05 \text{ kN}}{8768.5 \text{ kN}} \right)^{1.7} \right] = 1083.7 \text{ kNm}$$

#### Έλεγχος επάρκειας

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι λόγοι, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα, τόσο καλύτερα, διότι αυτό σημαίνει ότι η διατομή αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

Προκύπτει:  $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.40$  και  $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.32$ . Όπως διαπιστώνεται και οι δυο λόγοι είναι μικρότεροι της μονάδας.

Άρα η διατομή CHS50816 επαρκεί, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής που γίνεται επιπροσθέτως ώστε να ληφθεί υπόψιν και η μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έχει ληφθεί ήδη υπόψιν μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης GNIA που πραγματοποιήθηκε και η οποία έδωσε τα ανωτέρω δρώντα μεγέθη σχεδιασμού με βάση τα οποία έγινε ο έλεγχος επάρκειας της διατομής.

#### Βαθμός αξιοποίησης

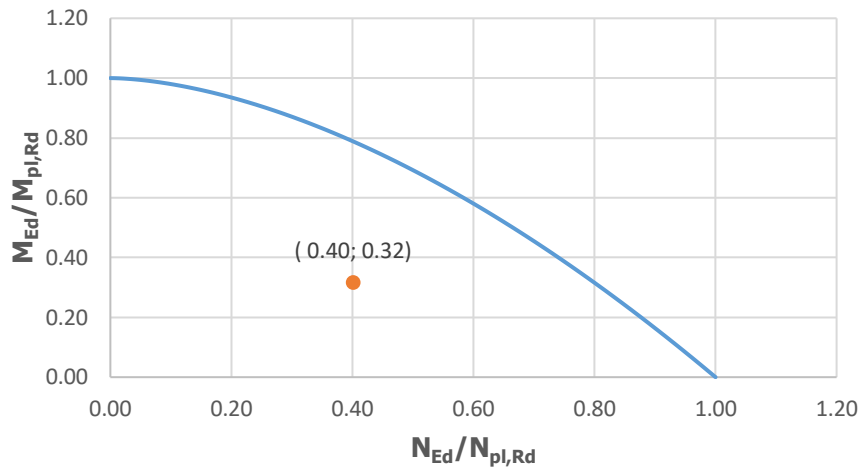
Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{436.3 \text{ kNm}}{1083.7 \text{ kNm}} = 0.40$$

Ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά ως ο λόγος των αποστάσεων της αρχής των αξόνων Ο έως την κουκίδα, προς την απόσταση από την αρχή των αξόνων Ο έως εκείνο το σημείο της περιβάλλουσας, το οποίο βρίσκεται στην προέκταση της ευθείας που ενώνει το Ο με την κουκίδα.

Το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σύνθετο έλεγχο αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης, αξιολογείται στη συνέχεια και οπτικά, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που ακολουθεί (Σχήμα 4-77). Στο παρακάτω διάγραμμα η <μπλε> γραμμή έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη σχέση αλληλεπίδρασης  $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7})$ , όπου  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  και αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας.

Η περιοχή κάτω από τη μπλε γραμμή είναι ασφαλής ενώ πάνω από τη γραμμή η διατομή αστοχεί. Με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το ζεύγος της δρώσας αξονική δύναμης και ροπής.

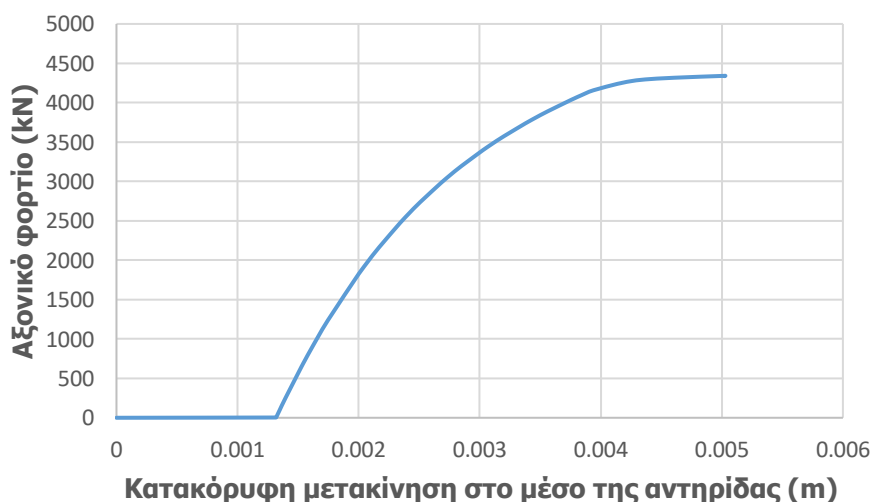


Σχήμα 4-77: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M,N και πλαστικός έλεγχος επάρκειας διατομής CHS508/16 αντηρίδας άνω στάθμης

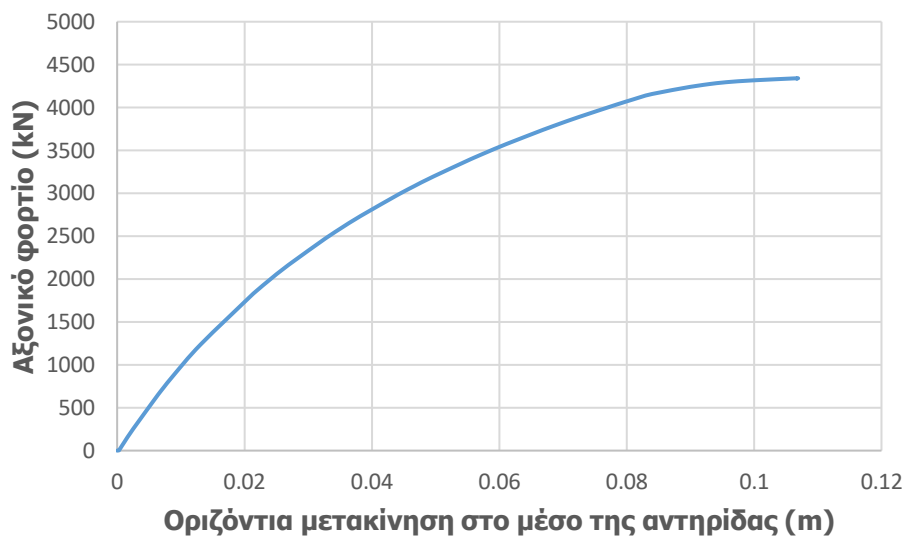
#### Ελαστοπλαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλειες (GMNIA)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση τύπου GMNIA, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται μέσω του δρόμου ισορροπίας που ακολουθεί. Στην ανάλυση αυτή, μετά την εφαρμογή των αρχικών ατελειών και του ίδιου βάρους ασκείται οριζόντιο θλιπτικό φορτίο, το οποίο προσαυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου ο δρόμος ισορροπίας οριζοντιωθεί. Το μέγιστο σημείο (οριακό σημείο) αντιστοιχεί σε κατάρρευση του φορέα.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-78, Σχήμα 4-79) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας:



Σχήμα 4-78: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA



Σχήμα 4-79: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο από ανάλυση GMNIA

Από τους ανωτέρω δρόμους ισορροπίας προκύπτει το οριακό φορτίο κατάρρευσης ( $P_u$ ) του συστήματος αντιστήριξης της άνω στάθμης.

$$P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} \quad (4-85)$$

Όπου:  $\Lambda$ =φορτικός συντελεστής (εξάγεται από το ADINA) και  $N_{Ed}$ =δρώσα αξονική δύναμη σχεδιασμού Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-85) προκύπτει:  $P_u = \Lambda \cdot N_{Ed} = 1.296 \cdot 3349.05 \Rightarrow P_u = 4340.37 \text{ kN}$

Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής ορίζεται ως ο λόγος της δρώσας αξονικής δύναμης σχεδιασμού προς την οριακή αξονική δύναμη που μπορεί να αντέξει το μέλος της αντηρίδας. Επομένως είναι:

$$\text{Βαθμός αξιοποίησης} = \frac{N_{Ed}}{P_u} = \frac{3349.05 \text{ kN}}{4340.37 \text{ kN}} = 0.77$$

Ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης είναι μικρότερος συγκριτικά με τον βαθμό αξιοποίησης (0.923) που προέκυψε για την περίπτωση των αντηρίδων άνω στάθμης χωρίς πλευρική εξασφάλιση (οριζόντια και κατακόρυφη). Δηλαδή είναι λιγότερη κρίσιμη η κατάσταση αυτή, κάτι που είναι λογικό, διότι η κατακόρυφη εξασφάλιση ενισχύει κατά κάποιον τρόπο το μέλος της αντηρίδας, επομένως είναι πιο δύσκολη η εκτροπή του από την θέση ισορροπίας. Στην παρούσα περίπτωση, λόγω ύπαρξης μόνο κατακόρυφης, και όχι και οριζόντιας, δικτύωσης, είναι φανερό ότι η εκτροπή του μέλους της αντηρίδας θα πραγματοποιηθεί κατά κύριο λόγο στο οριζόντιο επίπεδο xy, δηλαδή στην διεύθυνση εκείνη η οποία είναι λιγότερο ενισχυμένη.

#### 4.2.3.5 Σύνοψη

Για την κάτω στάθμη, τόσο οι γραμμικές αναλύσεις όσο και οι μη γραμμικές αναλύσεις (GNIA, GMNIA) έδειξαν οριακή επάρκεια της διατομής CHS610/20 της αντηρίδας. Επομένως παρατηρείται σύγκλιση στα αποτελέσματα μεταξύ γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων.

Για την άνω στάθμη, λόγω της ύπαρξης των κατακορύφων χιαστί ενισχύθηκαν κατά κάποιο τρόπο οι αντηρίδες της στάθμης αυτής, επομένως δεν είναι τόσο κρίσιμη η διατομή CHS508/16 όσο ήταν στην 1<sup>η</sup> φάση της κατασκευής, παρόλο που ο λυγισμός στο οριζόντιο επίπεδο παραμένει κρίσιμος διότι δεν εξασφαλίζεται στο επίπεδο αυτό. Το ότι στην περίπτωση της 2<sup>ης</sup> φάσης της κατασκευής η CHS508/16 είναι λιγότερο κρίσιμη σε σχέση με την 1<sup>η</sup> φάση της κατασκευής επαληθεύεται από τα αποτελέσματα ελέγχων επάρκειας τόσο των γραμμικών όσο και των μη γραμμικών αναλύσεων (GNIA, GMNIA).

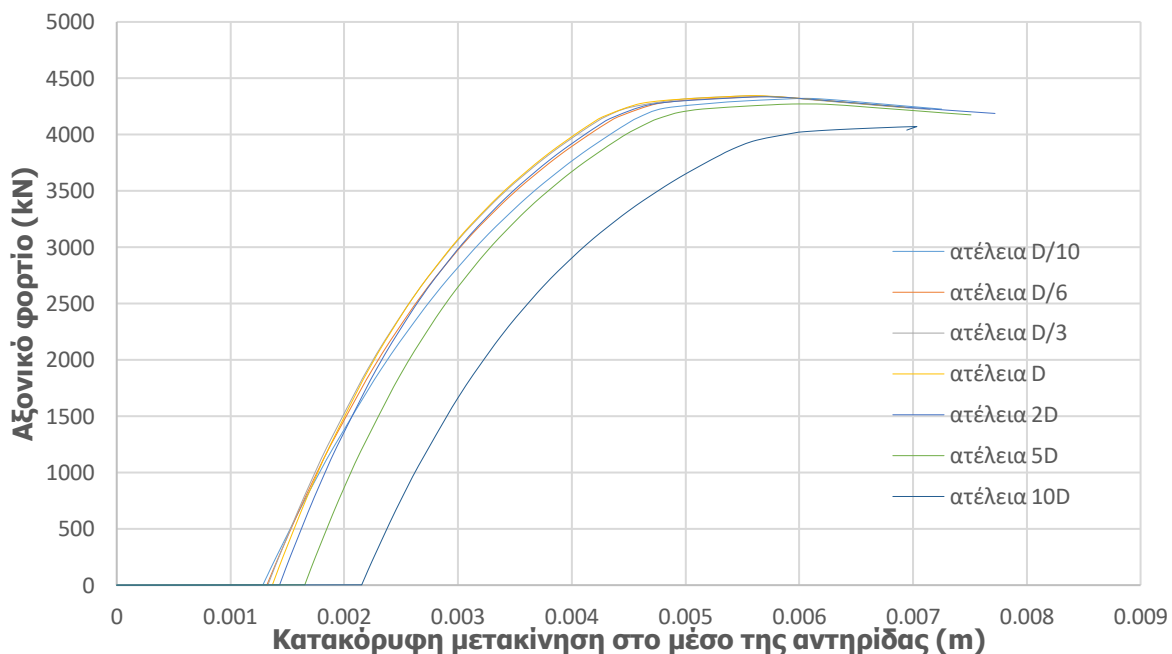
Συγκεντρωτικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τις αντηρίδες της άνω στάθμης θα χρησιμοποιηθεί διατομή CHS508/16, για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης διατομή CHS610/20 και για τα διαγώνια στοιχεία (οριζόντια και κατακόρυφα) διατομή CHS168.3/6.3.

#### 4.2.4 Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας

Στόχος είναι να εξεταστεί το πώς επηρεάζει το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων (γεωμετρική ατέλεια) την οριακή αντοχή του μέλους της αντηρίδας. Στον παρόν σύστημα αντιστήριξης η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στηρίξεων είναι  $D/6$ , και παρουσιάζονται και άλλες πιθανές μορφές υψομετρικών διαφορών.

Για την εκάστοτε στάθμη, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας, που προκύπτουν από ανάλυση GMNIA, για διάφορες τιμές της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων.

##### 4.2.4.1 Άνω στάθμη (CHS508/16)



Σχήμα 4-80: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη υψομετρικών διαφορών

Από το ανωτέρω συγκριτικό διάγραμμα (Σχήμα 4-80) προκύπτει ότι:

- Για υψομετρική διαφορά στηρίξεων μικρότερη από  $2D$ , το οριακό φορτίο παραμένει ίδιο.
- Για υψομετρική διαφορά μεγαλύτερη από  $2D$ , όσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά, τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, για υψομετρική διαφορά στηρίξεων έως και  $5D$  παρατηρείται πολύ μικρή, έως αμελητέα, απομείωση του οριακού φορτίου. Αντιθέτως, για υψομετρικές διαφορές μεγαλύτερες του  $5D$  η οριακή αντοχή του μέλους της αντηρίδας διαφοροποιείται σημαντικά και παρατηρείται σημαντική απομείωση της οριακής αυτής αντοχής.

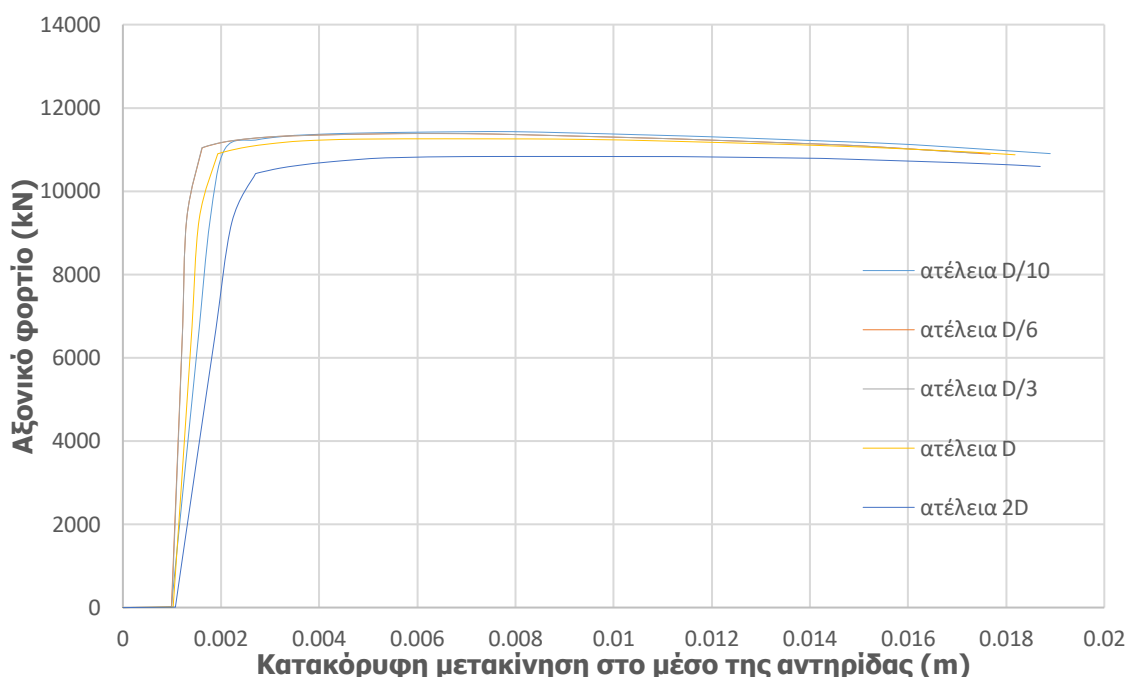
Αναλυτική εξήγηση που ερμηνεύει τη συμπεριφορά αυτή της αντηρίδας, για τις διάφορες τιμές των υψομετρικών διαφορών των στηρίξεων της, παρουσιάζεται στην υποπαράγραφο 3.2.4.1.

Το συμπέρασμα είναι ότι για ρεαλιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών, τα οποία είναι αυτά πλησίον του  $D/6$ , δεν υπάρχει διαφοροποίηση ως προς το οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Το προκύπτων

αυτό στοιχείο είναι ιδιαίτερος σημαντικό, διότι δείχνει ουσιαστικά ότι αυτή η υψομετρική διαφορά των στηρίξεων, δηλαδή αυτό το στοιχείο μη γραμμικότητας, δεν παίζει κάποιο ρόλο, μιλώντας πάντα για ρεαλιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών.

Επομένως, από τη στιγμή που αυτή η μη γραμμικότητα δεν επηρεάζει την οριακή αντοχή της αντηρίδας, η μη γραμμική ανάλυση δεν έχει να προσφέρει κάτι. Άρα αναμένεται τα αποτελέσματα από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις να ταυτίζονται. Και τούτο επαληθεύεται, αφού για την άνω στάθμη, από την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής, ως οριακή διατομή προκύπτει η CHS508/16 είτε προσεγγίζοντας το πρόβλημα με γραμμικές είτε με μη γραμμικές αναλύσεις.

#### 4.2.4.2 Κάτω στάθμη (CHS610/20)



Σχήμα 4-81: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/20 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη υψομετρικών διαφορών

Ποιοτικώς παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με αυτή των αντηρίδων της άνω στάθμης. Πιο συγκεκριμένα από το Σχήμα 4-81 γίνεται αντιληπτό ότι για υψομετρική διαφορά των στηρίξεων των αντηρίδων έως D, η οριακή αντοχή της αντηρίδας είναι ίδια. Αντίθετα για μεγαλύτερο μέγεθος υψομετρικής διαφοράς η οριακή αντοχή μειώνεται.

Η μόνη διαφοροποίηση στην περίπτωση αυτή είναι ότι για υψομετρικές διαφορές στηρίξεων 5D και 10D, δηλαδή για επαρκώς μη ρεαλιστικές υψομετρικές διαφορές στηρίξεων, η συμπεριφορά του μέλους της αντηρίδας διαφοροποιείται σημαντικά, άρα κατ' επέκταση και η μορφή του δρόμου ισορροπίας θα είναι διαφορετική. Για το λόγο αυτό δεν παρατίθενται αυτοί οι δρόμοι ισορροπίας στο ανωτέρω γράφημα.

Επίσης άλλη μια διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με την συμπεριφορά των αντηρίδων άνω στάθμης, είναι ως προς τη σχέση επιβαλλόμενης δύναμης και αναπτυσσόμενης κατακόρυφης μετακίνησης. Πιο συγκεκριμένα για τις αντηρίδες άνω στάθμης, καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο το μέγεθος της κατακόρυφης μετακίνησης αυξάνει. Υπάρχει δηλαδή μια περίπου γραμμική συμπεριφορά έως ότου πραγματοποιηθεί η πλαστικοποίηση του μέλους της αντηρίδας στην κρίσιμη διατομή του. Αντιθέτως για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης, καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο, η αναπτυσσόμενη κατακόρυφη μετακίνηση είναι πολύ μικρή έως αμελητέα, και ξαφνικά υπάρχει απότομη

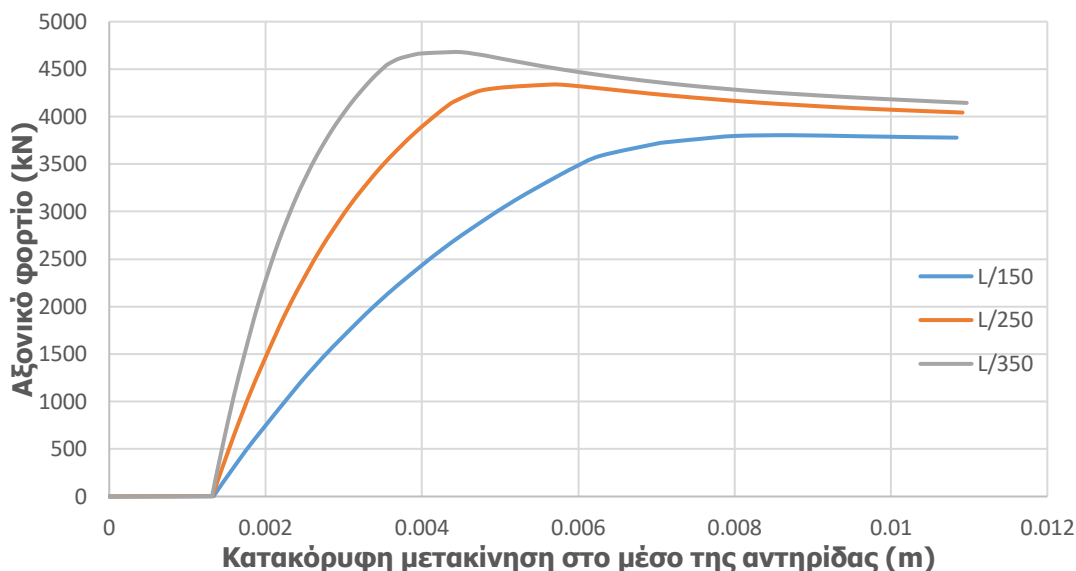
αύξηση της μετακίνησης αυτής η οποία οφείλεται σε πλαστικοποίηση του μέλους της αντηρίδας στην κρίσιμη διατομή του.

#### 4.2.5 Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας

Στόχος είναι να εξεταστεί το πώς επηρεάζει το μέγεθος της ατέλειας την οριακή αντοχή του μέλους της αντηρίδας. Στον παρόν σύστημα αντιστήριξης θεωρείται δεδομένη η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στηρίξεων, η οποία είναι ίση με  $D/6$ , και εξετάζονται διαφορετικά μεγέθη ατελειών. Ο EC3 επιβάλλει για την περίπτωση επιλογής κοίλης κυκλικής διατομής, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5 (Πίνακας 5.1 του EN1993-1-1), ατέλεια μεγέθους  $L/250$ . Παρουσιάζονται επιπροσθέτως οι περιπτώσεις χρησιμοποίησης λίγο μεγαλύτερης και λίγο μικρότερης ατέλειας.

Για την εκάστοτε στάθμη, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας, που προκύπτουν από ανάλυση GMNIA, για διάφορες τιμές μεγέθους ατελειών.

##### 4.2.5.1 Άνω στάθμη (CHS508/16)



Σχήμα 4-82: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας άνω στάθμης διατομής CHS508/16 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη ατελειών

Από το ανωτέρω συγκριτικό διάγραμμα (Σχήμα 4-82) προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας.

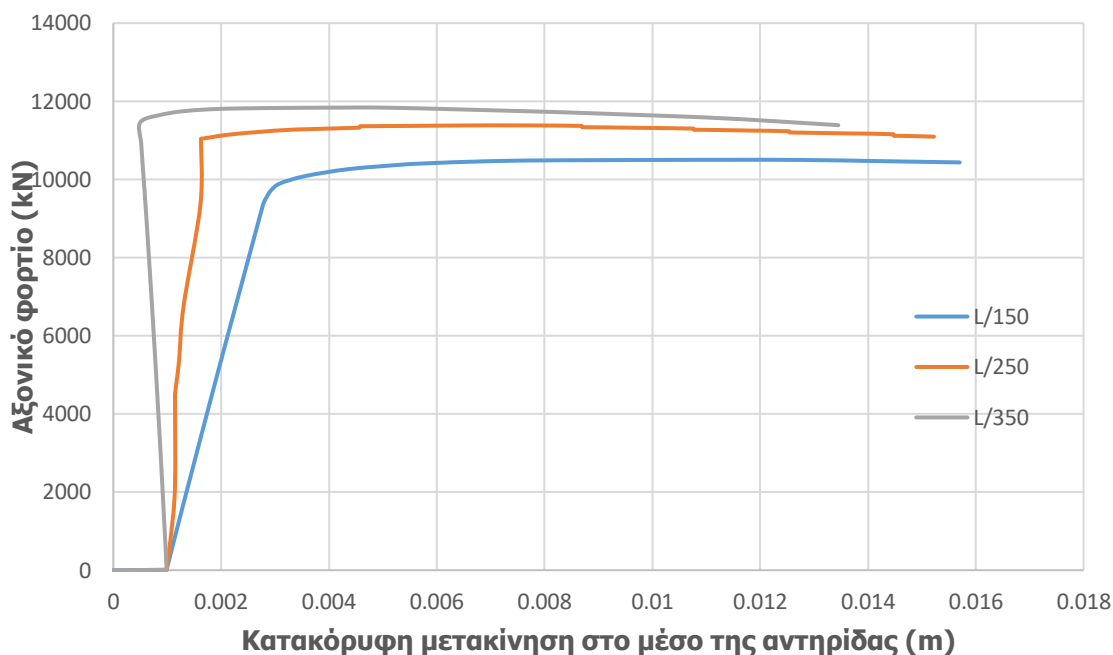
Και τούτο είναι λογικό, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τελική κατακόρυφη βύθιση του μέλους της αντηρίδας, αφού το αρχικό βέλος (ατέλεια), το οποίο θα συνεχίσει να αυξάνεται με την επιβολή όλο και μεγαλύτερου αξονικού φορτίου, είναι μεγαλύτερο. Επομένως, λόγω μεγαλύτερης βύθισης, οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης αυξάνονται ταχύτερα κάτι που οδηγεί σε γρηγορότερη πλαστικοποίηση στην κρίσιμη διατομή του μέλους της αντηρίδας και κατ' επέκταση απαιτείται μικρότερη προσαύξηση ( $\Lambda$ ) του αξονικά επιβαλλόμενου φορτίου του μέλους της αντηρίδας ώστε να επιτευχθεί εν τέλει η πλαστικοποίηση, και άρα αστοχία (αναλυτική εξήγηση στην υποπαράγραφο 3.2.4.1). Μικρότερος φορτικός συντελεστής, ισοδυναμεί με μικρότερο οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Αυτή είναι η ποιοτική ερμηνεία του συμπεράσματος που προκύπτει από το Σχήμα 4-82.

Επίσης γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 4-82, ότι χρησιμοποίηση λίγο μικρότερης ατέλειας (L/350) δεν οδηγεί σε τόσο μεγάλη αύξηση του οριακού φορτίου, όσο είναι η αντίστοιχη πτώση του λόγω



χρησιμοποίησης λίγο μεγαλύτερης ατέλειας (L/150). Επομένως, είναι απαραίτητο κάθε φορά να χρησιμοποιείται το ρεαλιστικό μέγεθος ατέλειας. Συμπερασματικά, αν χρησιμοποιηθεί μικρότερο μέγεθος ατέλειας, σε σχέση με το πραγματικό, η αύξηση του οριακού φορτίου είναι μικρή. Αντίθετα αν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο μέγεθος ατέλειας, σε σχέση με το πραγματικό, η πτώση του οριακού φορτίου είναι αξιοσημείωτη, κάτι που υποδηλώνει ότι μικρή αύξηση της ατέλειας οδηγεί σε σημαντική πτώση των αντοχών του μέλους της αντηρίδας.

#### 4.2.5.2 Κάτω στάθμη (CHS610/20)



Σχήμα 4-83: Δρόμος ισορροπίας αντηρίδας κάτω στάθμης διατομής CHS610/20 για μετακίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο από ανάλυση GMNIA για διάφορα μεγέθη ατελειών

Αναμένεται ακριβώς η ίδια συμπεριφορά με αυτή των αντηρίδων της άνω στάθμης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-83 και ερμηνεύεται ποιοτικά με τον ίδιο τρόπο όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως για την άνω στάθμη.

### 4.3 Διαστασιολόγηση Τραβερσών

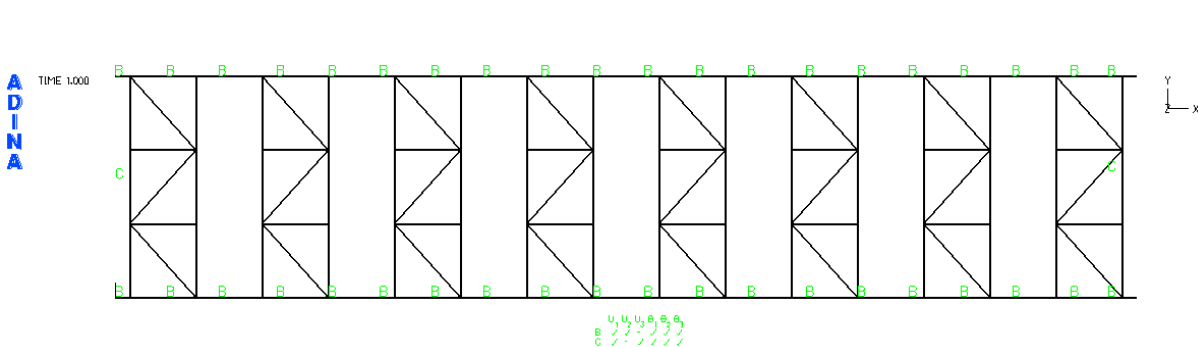
#### 4.3.1 Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος

Η περιγραφή του προσανατολισμού της διατομής της τραβέρσας, των συνθηκών στηρίξεών της καθώς και ο γενικότερος ρόλος της παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 3.3. Αυτό που αξίζει να ξανά επισημανθεί είναι ότι το μέλος της τραβέρσας δεν παρουσιάζει κάποια μη γραμμικότητα γεωμετρίας ή υλικού. Επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η λειτουργία του και οι απαιτήσεις ελέγχου του είναι οι συνήθεις. Άρα η τραβέρσα θα ελεγχθεί με βάση τα εντατικά μεγέθη που θα προκύψουν από γραμμικές αναλύσεις.

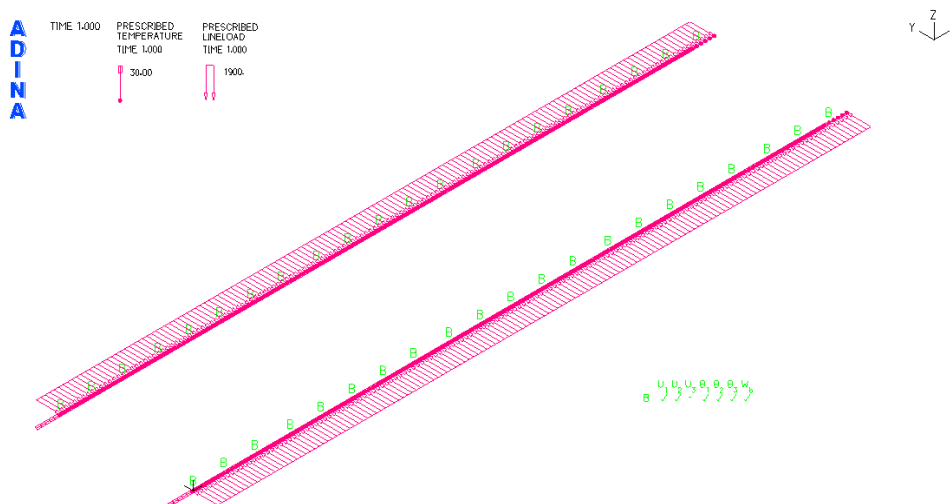
Η τραβέρσα διαστασιολογείται με βάση τον στατικό συνδυασμό φόρτισης  $1.35 \cdot G + 1.35 \cdot \Omega + 1.50 \cdot \Delta T$  του Πίνακα 4-2. Η θερμοκρασιακή μεταβολή, λήφθηκε, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 ίση με  $\Delta T = 20^\circ$  και το φορτίο ωθήσεων γαιών σύμφωνα με τις τιμές των μεγεθών, άνω και κάτω στάθμης, που υποδεικνύει ο Πίνακας 4-3. Το γραμμικό φορτίο των ωθήσεων γαιών επιβάλλεται στον κεφαλόδεσμο και

στην τραβέρσα (άνω και κάτω στάθμη του χωρικού προσομοιώματος αντιστοίχως). Το φορτίο λόγω ιδίου βάρους και ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής επιβάλλεται σε όλα τα μέλη του συστήματος αντιστήριξης, τα οποία αποτελούνται τόσο από χάλυβα όσο και από σκυρόδεμα.

Στο Σχήμα 4-84 παρουσιάζεται το χωρικό προσομοίωμα του μέλους της τραβέρσας με τις αντηρίδες κάτω στάθμης και τους οριζόντιους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Στο Σχήμα 4-85 παρουσιάζονται οι φορτίσεις του μέλους της τραβέρσας.



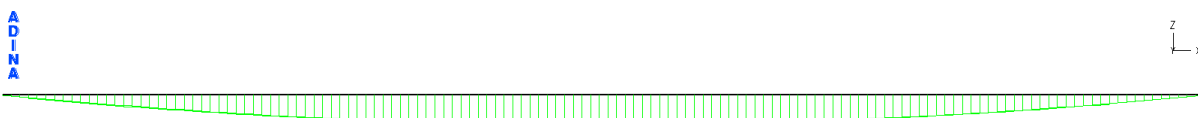
Σχήμα 4-84: Χωρικό προσομοίωμα μέλους τραβέρσας, αντηρίδων κάτω στάθμης και οριζόντιων χιαστί συνδέσμων



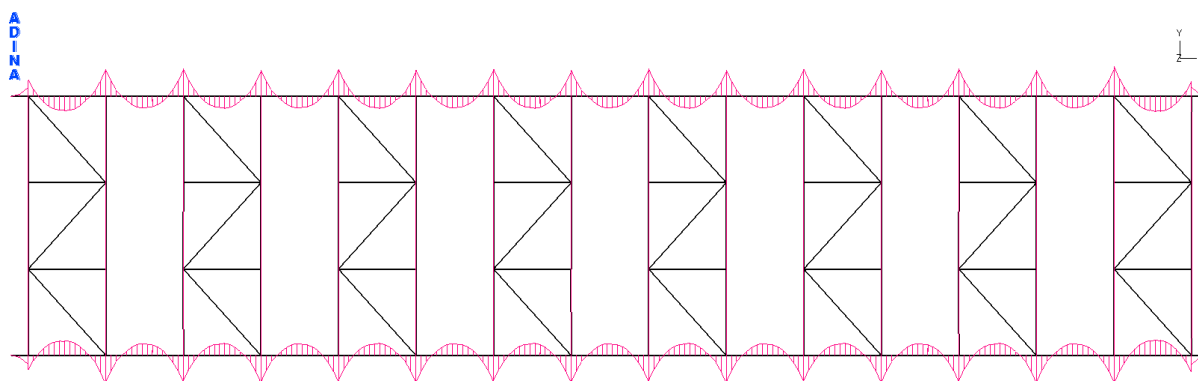
Σχήμα 4-85: Επιβαλλόμενο φορτίο ωθήσεων γαιών και ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής στο μέλος της τραβέρσας

### 4.3.2 Γραμμικές αναλύσεις

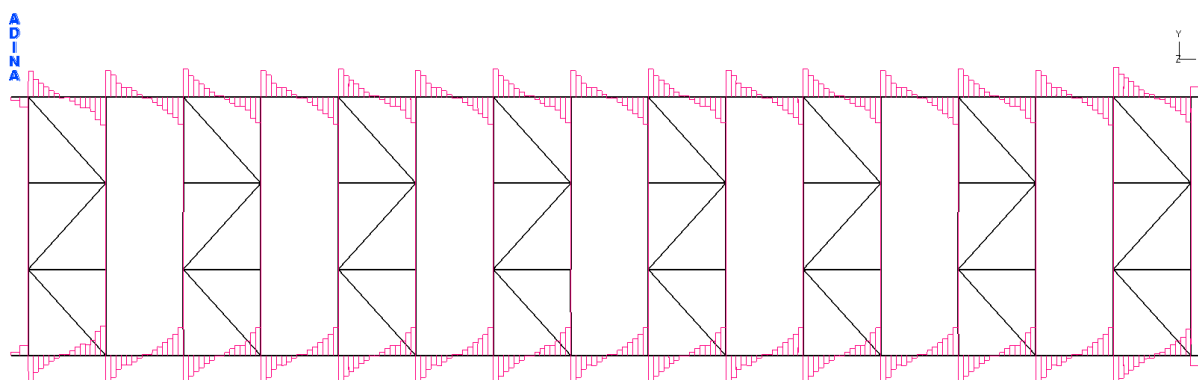
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-86, Σχήμα 4-87, Σχήμα 4-88) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον ανωτέρω συνδυασμό φόρτισης.



Σχήμα 4-86: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή N=465.1kN



Σχήμα 4-87: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $M_y=2738.6\text{kNm}$



Σχήμα 4-88: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $V_z=4055.3\text{kN}$

Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που εμφανίζονται στα ανωτέρω διαγράμματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4-30 και διαφοροποιούνται στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα. Αξιοποιώντας τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού του Πίνακα 4-30, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της τραβέρσας 2HEB450.

Παρατηρώντας τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών, γίνεται αντιληπτό, ότι η εικόνα της εντατικής κατάστασης επαναλαμβάνεται αυτούσια σε κάθε φάτνωμα, και διαφοροποιείται μόνο στο πρώτο και στο τελευταίο φάτνωμα, όπου η εντατική κατάσταση στα ακριανά αυτά φάτνωμα είναι ίδια λόγω συμμετρίας φορέα και φόρτισης. Επομένως, με βάση την ανωτέρω παρατήρηση, οι κρίσιμες θέσεις ελέγχου που προκύπτουν είναι:

- Το άνοιγμα και η στήριξη του τυχόν κεντρικού φαντώματος (Γενική περίπτωση), και κατά προτίμηση του μεσαίου φαντώματος, διότι εκεί η αξονική είναι μέγιστη.
- Το άνοιγμα και η στήριξη του 1<sup>ου</sup> φαντώματος (ή ισοδύναμα του τελευταίου φαντώματος).

Επίσης, υφίσταται και το διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  και τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$ , τα οποία αναπτύσσονται λόγω του ίδιου βάρους της τραβέρσας. Αλλά το μέγεθος της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής έντασης που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και επιπλέον η τιμή του είναι περίπου μηδενική στις κρίσιμες θέσεις ελέγχου. Για τις υπόλοιπες θέσεις, όπου έχει κάποια μικρή τιμή, τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη είναι αρκετά μικρότερα από ότι είναι στις κρίσιμες θέσεις. Επομένως, κρίνονται λιγότερο δυσμενείς οι θέσεις ελέγχου όπου το  $M_z$  και η  $V_y$  έχουν κάποιο μέγεθος, έστω και μικρό. Για το λόγο αυτό παραλείπεται τελείως η αναφορά στο διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  και τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$ .

Πίνακας 4-30: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού για την τραβέρσα 2HEB450

	<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
Γενική περίπτωση					
Άνοιγμα	465.08	1208	0	0	376.6
Στήριξη	460.7	2708.5	0	0	3878.1
1 <sup>ο</sup> φάτνωμα					
Άνοιγμα	89.6	1466.4	0	0	142
Στήριξη	142.3	2738.6	0	0	4055.3
0.5m από την Στήριξη	136.7	1789.5	0	0	3346.1
0.10m από την Στήριξη	125.2	783.9	0	0	2097.6
0.6m από την Στήριξη	132.87	1454.3	0	0	2929.9

**Έλεγχος επάρκειας διατομής (2HEB450)**

Η διατομή 2HEB450 διαστασιολογείται ως μια HEB450 με τις μισές τιμές των εντατικών μεγεθών.

Στον Πίνακα 4-31 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της HEB450, οι τιμές σχεδιασμού για τους συντελεστές των υλικών καθώς και οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας.

Πίνακας 4-31: Δεδομένα – HEB450

<b>h</b> (mm)	450	<b>A</b> (cm <sup>2</sup> )	218
<b>b</b> (mm)	300	<b>A<sub>v</sub></b> (cm <sup>2</sup> )	79.68
<b>t<sub>f</sub></b> (mm)	26	<b>I<sub>y</sub></b> (cm <sup>4</sup> )	79890
<b>t<sub>w</sub></b> (mm)	14	<b>I<sub>z</sub></b> (cm <sup>4</sup> )	11720
<b>r</b> (mm)	27	<b>W<sub>el,y</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	3551
<b>f<sub>y</sub></b> (kN/cm <sup>2</sup> )	35.5	<b>W<sub>el,z</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	781
<b>E</b> (kN/cm <sup>2</sup> )	21000	<b>W<sub>pl,y</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	3982
γ <sub>M0</sub>	1.00	<b>W<sub>pl,z</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	1198

**Εύρεση κατηγορίας διατομής της 2HEB450**

Η γενικότερη απαίτηση είναι ότι οι διατομές του συστήματος αντιστήριξης, άρα και της τραβέρσας, πρέπει να είναι κατηγορίας 1.

– Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2α)

Η διατομή της τραβέρσας υπόκειται σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 33 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} + \frac{b}{2}\right)}{t_f} = \frac{300\text{mm}}{26\text{mm}} = 11.5 \leq 26.7 = 33 \cdot \epsilon$$

– Κατάταξη προεξέχοντων ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2β)

Το προεξέχων πέλμα υπόκειται σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 9 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} = \frac{116\text{mm}}{26\text{mm}} = 4.5 \leq 7.3 = 9 \cdot \varepsilon$$

Αφού ικανοποιούνται και οι δυο ανωτέρω ανισότητες, η διατομή είναι κατηγορίας 1.

#### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

Από τη στιγμή που η 2HEB450 είναι κατηγορίας 1, είναι επιτρεπτό να υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος. Αξιοποιώντας τις εξ. (4-3), (4-4), (4-5), (4-6) και (4-7) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{218\text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 7739\text{kN}$$

$$M_{pl,Rd,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{3982\text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 1413.6\text{kNm}$$

$$M_{pl,Rd,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{1198\text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 425.29\text{kNm}$$

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{79.68\text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1633.1\text{kN}$$

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{79.68\text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1633.1\text{kN}$$

#### **Άνοιγμα – Γενική περίπτωση**

Στον Πίνακα 4-32 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση του ανοίγματος – Γενική περίπτωση.

Πίνακας 4-32: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – Γενική περίπτωση)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
232.5	604	0	0	188.3

#### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 816.55\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 188.3\text{kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 188.3\text{kN} \leq 816.55\text{kN}$$

Επομένως, αφού ικανοποιείται η εξ. (4-8), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

Κάμψη και αξονική δύναμη

Η διατομή ΗΕΒ450 είναι διατομή διπλής συμμετρίας σχήματος Ι. Επομένως, το αν θα υπάρξει απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω αξονικής, καθορίζεται από το αν ικανοποιούνται οι εξ. (4-86), (4-87), (4-88) ή όχι.

$$N_{Ed} \leq 0.25 \cdot N_{pl,Rd} \quad (4-86)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-87)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4-88)$$

Αντικαθιστώντας στις ανωτέρω εξισώσεις προκύπτει:

$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.12 \leq 1.00$  και  $\frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{Mo})} = 0.24 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{Mo})} = 0.12 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος του δρώντος μεγέθους προς το μέγεθος αντοχής.

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{604 \text{ kNm}}{1413.6 \text{ kNm}} = 0.43 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{425.29 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{188.3 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.12$$

Στήριξη – Γενική περίπτωση

Στον Πίνακα 4-33 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση της στήριξης – Γενική περίπτωση.

Πίνακας 4-33: Μεγέθη σχεδιασμού (Στήριξη – Γενική περίπτωση)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
230.35	1354.3	0	0	1939.1

Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1 \text{ kN} \Leftarrow 0 \text{ kN} \leq 816.55 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1939.1 \text{ kN} \geq 1633.1 \text{ kN}$$

Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενισχυτικού ελάσματος. Στόχος είναι η ενίσχυση του κορμού, ώστε να μπορεί να παραληφθεί από τη διατομή η τέμνουσα σχεδιασμού.

Πίνακας 4-34: Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος

<b>Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος</b>	
b (mm)	340
t (mm)	20

Η επιλογή των διαστάσεων του ενισχυτικού ελάσματος (Πίνακας 4-34) έγινε με την εξής λογική:

Το ύψος του ενισχυτικού ελάσματος μπορεί να εκτείνεται το πολύ μέχρι το σημείο εκείνο του κορμού όπου αρχίζει η καμπύλωση της διατομής. Επομένως, το μέγιστο επιτρεπτό ύψος είναι ίσο με:

$$b_{\text{ελάσματος}} = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r \Rightarrow b_{\text{ελάσματος}} = 450 - 2 \cdot 26 - 2 \cdot 27 \Rightarrow b_{\text{ελάσματος}} = 344 \text{mm}$$

Άρα επιλέγεται έλασμα ύψους  $b=340\text{mm}$ . Επίσης, ένα σύνηθες πάχος ελάσματος είναι 20mm.

#### Νέα χαρακτηριστικά διατομής

Το έλασμα τοποθετείται εκατέρωθεν του κορμού, δηλαδή σε κάθε κορμό αντιστοιχούν 2 ελάσματα. Άρα το νέο εμβαδόν κορμού, το οποίο θα κληθεί να παραλάβει την τέμνουσα σχεδιασμού, είναι:

$$A_v = A_v + 2 \cdot (b \cdot t) \quad (4-89)$$

Στον Πίνακα 4-35 παρουσιάζονται τα νέα χαρακτηριστικά της διατομής.

Πίνακας 4-35: Νέα χαρακτηριστικά διατομής

<b><math>A_v</math> (cm<sup>2</sup>)</b>	215.68
$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	4420.56
$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	4420.56

Επομένως ο έλεγχος έναντι τέμνουσας γίνεται ως εξής:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 4420.56 \text{kN} \Rightarrow 0 \text{kN} \leq 2210.28 \text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1939.1 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 4420.56 \text{kN} \Rightarrow 1939.1 \text{kN} \leq 2210.28 \text{kN}$$

Αφού ικανοποιείται η εξ. (4-8), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-86), (4-87), (4-88) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.12 \leq 1.00 \text{ και } \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M0})} = 0.23 \leq 1.00, \text{ άρα είναι } M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \text{ (δεν χρειάζεται}$$

απομείωση).

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0})} = 0.12 \leq 1.00, \text{ άρα είναι } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \text{ (δεν χρειάζεται απομείωση).}$$

Η χρήση του ενισχυτικού ελάσματος δεν βοηθάει στην παραλαβή της ροπής σχεδιασμού. Για αυτό στους ανωτέρω υπολογισμούς δεν εισάγεται με κάποιο τρόπο η ύπαρξη του ενισχυτικού ελάσματος. Τοποθετήθηκε αποκλειστικά για την ενίσχυση της διατομής έναντι τέμνουσας δύναμης.

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1354.3 \text{kNm}}{1413.6 \text{kNm}} = 0.96 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{kN}}{4420.56 \text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{425.29\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1939.1\text{kN}}{4420.56\text{kN}} = 0.44$$

Η ανωτέρω διαδικασία ελέγχου επαναλαμβάνεται αυτούσια για το άνοιγμα και τη στήριξη του 1<sup>ου</sup> φαντώματος. Προκύπτει ότι για το άνοιγμα δεν απαιτείται χρήση ενισχυτικού ελάσματος ενώ για το στήριγμα είναι επιτακτική η χρήση του.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και οι βαθμοί αξιοποίησης για το άνοιγμα και το στήριγμα του 1<sup>ου</sup> φαντώματος.

### Άνοιγμα – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα

Στον Πίνακα 4-36 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση του ανοίγματος – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα.

Πίνακας 4-36: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
44.8	733.2	0	0	71

Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{733.2\text{kNm}}{1413.6\text{kNm}} = 0.52 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{1633.1\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{425.29\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{71\text{kN}}{1633.1\text{kN}} = 0.04$$

### Στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα

Στον Πίνακα 4-37 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση της στήριξης – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα.

Πίνακας 4-37: Μεγέθη σχεδιασμού (Στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
71.15	1369.3	0	0	2027.7

Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1369.3\text{kNm}}{1413.6\text{kNm}} = 0.97 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{4420.56\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{425.29\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2027.7\text{kN}}{4420.56\text{kN}} = 0.46$$

Από το βαθμό αξιοποίησης σχετικά με την καμπτική ροπή  $M_y$  παρατηρείται οριακή ικανοποίηση των απαιτήσεων, αφού οι βαθμοί αξιοποίησης στο άνοιγμα και στο στήριγμα είναι ίσοι με 0.96 και 0.97 αντιστοίχως.

Επίσης, όπως διαπιστώθηκε από τους ελέγχους διατομής για το άνοιγμα (Γενική περίπτωση και 1<sup>ο</sup> Φάντωμα) δεν απαιτείται η χρήση ενισχυτικού ελάσματος. Είναι φανερό, ότι δεν είναι σωστό από άποψη σχεδιασμού να εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα σε όλο το μήκος της τραβέρσας, και για λόγους οικονομίας αλλά και επειδή μια τέτοια θεώρηση καθιστά υπερβολικά υπέρ της ασφαλείας τον σχεδιασμό της τραβέρσας. Επομένως, τίθεται άμεσα ο προβληματισμός μέχρι ποιο μήκος εκατέρωθεν της εκάστοτε στήριξης θα εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα. Θα εξεταστεί ποιο είναι το απαιτούμενο μήκος στο οποίο πρέπει να εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα, εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φαντώματος. Και επειδή η περιοχή της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φαντώματος είναι η δυσμενέστερη περιοχή, από άποψη αναπτυσσόμενων



εντατικών μεγεθών, το μήκος ελάσματος που θα υπολογιστεί σίγουρα θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις, για παραλαβή της τέμνουσας σχεδιασμού, της περιοχής γύρω από όποια άλλη στήριξη.

#### Σε απόσταση 0.5m από τη στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα

Στον Πίνακα 4-38 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.5m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα.

Πίνακας 4-38: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.5m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
68.35	894.75	0	0	1673.1

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 816.55\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1673.1\text{kN} \geq 1633.1\text{kN}$$

Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση ενισχυτικού ελάσματος μέχρι και σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φατνώματος. Βέβαια παρατηρείται οριακή μη ικανοποίηση του ελέγχου έναντι τέμνουσας, επομένως αναμένεται το έλασμα να εκτείνεται σε απόσταση λίγο μεγαλύτερη των 0.5m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φατνώματος.

#### Σε απόσταση 1.00m από τη στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα

Στον Πίνακα 4-39 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.10m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα.

Πίνακας 4-39: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.10m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
62.6	391.95	0	0	1048.8

#### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 816.55\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1048.8\text{kN} \geq 0.5 \cdot 1633.1\text{kN} \Rightarrow 1048.8\text{kN} \geq 816.55\text{kN}$$

Επομένως απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της καμπτικής αντίστασης της διατομής σε  $M_{V,Rd}$ .

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4-90)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-90) προκύπτει συντελεστής απομείωσης "ρ" ίσος με:

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot 1048.8\text{kN}}{1633.1\text{kN}} - 1 \right)^2 \Rightarrow \rho = 0.08$$

Για διατομές με ίσα πέλματα καμπτόμενες περί τον ισχυρό άξονα, ανεξάρτητα κατηγορίας, είναι:

$$M_{V,y,Rd} = \min \left\{ \left( W_{pl,y} - \frac{\rho}{4} \cdot \frac{A_v^2}{t_w} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} ; M_{c,y,Rd} \right\} \quad (4-91)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-91) προκύπτει:

$$M_{V,y,Rd} = 1381.1 \text{ kN}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-86), (4-87), (4-88) προκύπτει:

$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.03 \leq 1.00$  και  $\frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{Mo})} = 0.06 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,y,Rd} = M_{V,y,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{Mo})} = 0.03 \leq 1.00$ , άρα είναι  $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$  (δεν χρειάζεται απομείωση).

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{391.95 \text{ kNm}}{1381.1 \text{ kNm}} = 0.28 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{425.29 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1048.8 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.64$$

Από τον βαθμό αξιοποίησης έναντι τέμνουσας (ίσος με 0.64), διαπιστώνεται ότι η διατομή της αντηρίδας μπορεί να παραλάβει την τέμνουσα σχεδιασμού, αποφεύγοντας την χρήση του ενισχυτικού ελάσματος. Δηλαδή η ίδια η διατομή έχει ακόμα περιθώριο να παραλάβει και μεγαλύτερη τέμνουσα. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η οριακή απόσταση είναι κάπου μεταξύ 0.5m και 1.00m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φαντώματος. Παρόλο που η μεταξύ απόσταση των 2 θέσεων είναι μικρή, δηλαδή η όποια οριακή απόσταση, η οποία θα υπολογιστεί στη συνέχεια, θα απέχει λίγο από την 1.00m, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί και να μην χρησιμοποιηθεί υπέρ της ασφαλείας και απλουστευτικά η απόσταση των 0.10m διότι αυτό το κέρδος από το μικρότερο μήκος του ενισχυτικού ελάσματος, αθροζόμενο γύρω από όλες τις στηρίξεις του συστήματος αντιστήριξης, είναι εν τέλει αξιόλογο. Επομένως συμφέρει να χρησιμοποιηθεί το μικρότερο μήκος του ενισχυτικού ελάσματος καθαρά για λόγους οικονομίας.

Επαναλαμβάνεται ο ανωτέρω έλεγχος για απόσταση 0.6m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φαντώματος, διότι από την στιγμή που για απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φαντώματος οριακά απαιτείται η χρήση του ενισχυτικού ελάσματος, εκτιμάται ότι για απόσταση μεγαλύτερη των 0.6m το ενισχυτικό έλασμα θα είναι αχρείαστο.

#### **Σε απόσταση 0.6m από τη στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα**

Στον Πίνακα 4-40 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.6m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα.

Πίνακας 4-40: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.6m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάντωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
66.43	727.15	0	0	1465

#### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (4-8) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 1633.1 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 816.55 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1465 \text{ kN} \geq 0.5 \cdot 1633.1 \text{ kN} \Rightarrow 1465 \text{ kN} \geq 816.55 \text{ kN}$$

Επομένως απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της καμπτικής αντίστασης της διατομής σε  $M_{V,Rd}$  και αντικαθιστώντας στην εξ. (4-90) προκύπτει συντελεστής απομείωσης "ρ" ίσος με:

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot 1465 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} - 1 \right)^2 \Rightarrow \rho = 0.63$$

Εν τέλει από την εξ. (4-91) προκύπτει:

$$M_{V,y,Rd} = 1159.8 \text{ kN}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-86), (4-87), (4-88) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 0.03 \leq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{Mo})} = 0.07 \leq 1.00, \quad \text{άρα είναι } M_{N,y,Rd} = M_{V,y,Rd} \quad (\text{δεν χρειάζεται απομείωση}).$$

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{Mo})} = 0.03 \leq 1.00, \quad \text{άρα είναι } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad (\text{δεν χρειάζεται απομείωση}).$$

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{727.15 \text{ kNm}}{1159.8 \text{ kNm}} = 0.63 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{425.29 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1465 \text{ kN}}{1633.1 \text{ kN}} = 0.90$$

Ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης (0.90) είναι μεγάλος. Δηλαδή οριακά η διατομή της τραβέρσας μπορεί να παραλάβει από μόνη της την τέμνουσα σχεδιασμού χωρίς την βοήθεια του ενισχυτικού ελάσματος.

Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ενισχυτικό έλασμα πρέπει να εκτείνεται εκατέρωθεν της εκάστοτε στήριξης, σε μήκος ίσο με 0.6m.

Από κατασκευαστικής απόψεως, τα ενισχυτικά ελάσματα συγκολλούνται στον κορμό της εκάστοτε HEB450, πριν οι δυο HEB450 συγκολληθούν μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί το σχήμα της διατομής της τραβέρσας.

#### **Έλεγχος μέλους (2HEB450)**

Το μέλος της τραβέρσας στηρίζεται κατακόρυφως σε κοντούς προβόλους που εξέχουν από τους πασσάλους, δεσμεύεται οριζοντίως από τις αντηρίδες οι οποίες έχουν αρκετά μεγάλη διατομή ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι κρατούν ακλόνητο το σημείο επαφής τους με την τραβέρσα και επίσης από την εξωτερική πλευρά της τραβέρσας υπάρχει το έδαφος το οποίο έχει επενδυθεί με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15cm. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την μεγάλη διατομή της αντηρίδας και την μικρή επιβαλλόμενη θλιπτική αξονική δύναμη, συνηγορούν στο ότι το μέλος της αντηρίδας δεν κινδυνεύει από λυγισμό του μέλους τους. Αλλά για λόγους πληρότητας, θα παρουσιαστεί στην συνέχεια ο έλεγχος μέλους της τραβέρσας αξιοποιώντας τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού που έχουν προκύψει από τις ανωτέρω γραμμικές αναλύσεις.

Στην περίπτωση ελέγχου του λυγισμού του μέλους, δεν είναι σωστό να γίνει η θεώρηση που έγινε στον έλεγχο διατομής, το ότι δηλαδή μπορεί να εξεταστεί η μισή διατομή (HEB450) με τα μισά εντατικά μεγέθη αντί όλης της διατομής με τα συνολικά εντατικά μεγέθη. Και τούτο γιατί στον λυγισμό παίζει

ρόλο η γεωμετρία της διατομής. Επομένως χρειάζεται η συνολική διατομή για μπορέσει να ελεγχθεί η συμπεριφορά της έναντι λυγισμού.

Επίσης, παρατηρώντας το διάγραμμα αξονικών δυνάμεων της τραβέρσας (Σχήμα 4-86) γίνεται αντιληπτό, ότι αξιόλογο μέγεθος αξονικής δύναμης υπάρχει στο κεντρικό μέρος της τραβέρσας. Άρα εκεί αναμένεται να υπάρχει ο μεγαλύτερος κίνδυνος έναντι λυγισμού και όχι προς τα άκρα της τραβέρσας, αφού εκεί η αξονική δύναμη έχει πολύ μικρό, έως και αμελητέο, μέγεθος.

Τα δεδομένα και η κατηγορία διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

#### Παράμετροι αντοχής

Αξιοποιώντας τις εξ. (4-3) και (4-20) προκύπτει:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{436 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 15478 \text{ kN} \quad \text{και} \quad N_{Rk} = A \cdot f_y = 436 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 15478 \text{ kN}$$

Από τις εξ. (4-6) και (4-7) προκύπτει:

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{159.36 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3266.2 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{159.36 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3266.2 \text{ kN}$$

Τα μεγέθη  $M_{pl,y,Rd}$  και  $M_{pl,z,Rd}$  υπολογίστηκαν με βάση την θεώρηση καταπόνησης της διατομής της τραβέρσας υπό καθαρή κάμψη στην κατάσταση πλήρους διαρροής. Και προκύπτει:

$$M_{pl,y,Rd} = 2864.1 \text{ kNm} \quad \text{και} \quad M_{y,Rk} = 2864.1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = 2254.8 \text{ kNm} \quad \text{και} \quad M_{z,Rk} = 2254.8 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

#### 1. Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της τραβέρσας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

#### 2. Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\text{Από την εξ. (4-24) προκύπτει } \lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4.$$

Στο οριζόντιο επίπεδο η τραβέρσα εξασφαλίζεται πλήρως από τις αντηρίδες, επομένως το μήκος λυγισμού ισούται με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών αντηρίδων. Άρα είναι  $L_{cr,y} = 4.5 \text{ m}$ .

Βέβαια αυτή είναι προσέγγιση υπέρ της ασφαλείας. Και τούτο γιατί, η σύνδεση αντηρίδας – τραβέρσας γίνεται με τους κοχλίες εκτός της διατομής της σύνδεσης, επομένως η σύνδεση τείνει προς πάκτωση και όχι προς απλή στήριξη. Αλλά επειδή δεν είναι και πάκτωση ώστε να μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι

$L_{cr,y}=0.5 \cdot 4.5\text{m}=2.25\text{m}$ , γίνεται η προσέγγιση, υπέρ της ασφαλείας, της απλής στήριξης της τραβέρσας επί της αντηρίδας. Επομένως θεωρείται απλουστευτικά, και υπέρ της ασφαλείας, ότι  $L_{cr,y}=4.5\text{m}$ .

Στο κατακόρυφο επίπεδο η τραβέρσα εδράζεται ακλόνητα στους βραχείς προβόλους που εξέρχουν από τους πασσάλους. Επομένως το μήκος λυγισμού στην κατακόρυφη διεύθυνση ισούται με  $L_{cr,z}=3.6\text{m}$ .

Οι ροπές αδρανείας υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις (εξ.(4-26)):

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{159780\text{cm}^4}{436\text{cm}^2}} = 19.14\text{cm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{121540\text{cm}^4}{436\text{cm}^2}} = 16.70\text{cm}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στις εξ. (4-23) και (4-29) προκύπτει:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{4.5\text{m}}{19.14\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.308$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{3.6\text{m}}{16.70\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.282$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για συγκολλητή κιβωτοειδείς διατομή, με  $b/t_f < 30$ , εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού c.

Συντελεστής ατελειών(α):

$a=0.49$  για καμπύλη λυγισμού c.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή χ:

Από τις εξ. (4-27) και (4-30) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.308 - 0.2) + 0.308^2] = 0.574$$

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.282 - 0.2) + 0.282^2] = 0.560$$

Επομένως ο μειωτικός συντελεστής χ είναι (εξ.(4-28) και (4-31)):

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.574 + \sqrt{0.574^2 - 0.308^2}} = 0.945$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.560 + \sqrt{0.560^2 - 0.282^2}} = 0.958$$

3. Συντελεστές αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  και σύνθετος έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Πίνακας 4-41: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροπής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	y-y	z-z
$C_{mz}$	z-z	y-y

Από τον Πίνακα 4-41 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροπής.

Ανάλογα με το φάτνωμα ελέγχου διαφοροποιούνται οι τιμές των  $M_h$  και  $M_s$  και κατ' επέκταση οι τιμές των συντελεστών  $C_m$  και άρα και των συντελεστών αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση της τραβέρσας, τα φάτνωμα ελέγχου είναι δύο. Το 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και το κεντρικό φάτνωμα στο οποίο η αξονική δύναμη έχει την μέγιστη τιμή.

Θα υπολογιστούν ξεχωριστά για καθένα από τα φάτνωμα ελέγχου οι συντελεστές αλληλεπίδρασης και θα ακολουθήσει ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, οι τιμές του διαγράμματος καμπτικών ροπών  $M_z$  είναι μικρές και επομένως είναι αμελητέο μπροστά στα υπόλοιπα διαγράμματα εντατικών μεγεθών. Άρα η ύπαρξή του παραλείπεται και απλουστευτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι  $M_z=0\text{kNm}$ .

Επομένως στον σύνθετο έλεγχο, λόγω κάμψης και θλίψης, οι συντελεστές  $k_{zz}$  και  $k_{yz}$  δεν υπολογίζονται διότι από την στιγμή που  $M_z=0\text{kNm}$  δεν έχουν κάποιο φυσικό νόημα. Άρα κατ' επέκταση ούτε ο συντελεστής ροπής  $C_{mz}$  υπολογίζεται.

### 1ο Φάτνωμα

Παρατηρώντας το διάγραμμα ροπών (Σχήμα 4-87) προκύπτουν τα εξής μεγέθη ροπής:

- στο άκρο ίση με  $M_h=-2739\text{kNm}$
- στο μέσο ίση με  $M_s=1466.4\text{kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$- a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{1466.4\text{kNm}}{-2739\text{kNm}} \Rightarrow a_s = -0.54$$

- $\psi=1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το φορτίο ωθήσεων, από το οποίο προκαλείται το διάγραμμα ροπών, επιβάλλεται ομοιόμορφα στο μέλος της τραβέρσας

Άρα προκύπτει:  $C_{my}=0.1-0.8 \cdot a_s=0.1-0.8 \cdot (-0.54) \Rightarrow C_{my}=0.528 < 0.4$

### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Επί το δυσμενέστερο, θεωρείται ότι η αξονική δύναμη είναι σταθερή στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και ίση με τη μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Άρα είναι  $N_{Ed}=142.3\text{kN}$ .

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας B.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα B.1.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (4-92)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (4-93)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-94) και (4-95) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 4-42.

Πίνακας 4-42: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.529
$k_{zy}$	0.317

#### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z=0\text{kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-94)$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (4-95)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-94) και (4-95) προκύπτει:

$$0.01+0.56=0.57 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-94)}$$

$$0.01+0.33=0.34 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-95)}$$

#### Κεντρικό Φάτνωμα

Παρατηρώντας το διάγραμμα ροπών (Σχήμα 4-87) προκύπτουν τα εξής μεγέθη ροπής:

– στο άκρο ίση με  $M_h=-2708.5\text{kNm}$

– στο μέσο ίση με  $M_s=1208\text{kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$- a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{1208\text{kNm}}{-2708.5\text{kNm}} \Rightarrow a_s = -0.45$$

–  $\psi=1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες

– ομοιόμορφο φορτίο, αφού το φορτίο ωθήσεων, από το οποίο προκαλείται το διάγραμμα ροπών, επιβάλλεται ομοιόμορφα στο μέλος της τραβέρσας

$$\text{Άρα προκύπτει: } C_{my} = 0.1 - 0.8 \cdot a_s = 0.1 - 0.8 \cdot (-0.45) \Rightarrow C_{my} = 0.457 \geq 0.4$$

#### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. B).

Επί το δυσμενέστερο, θεωρείται ότι η αξονική δύναμη είναι σταθερή στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και ίση με τη μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Άρα είναι  $N_{Ed}=465.08\text{kN}$ .

Ο πίνακας Β.1 αφορά διατομές I και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας Β.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα Β.1.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-92) και (4-93) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 4-43.

Πίνακας 4-43: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.459
$k_{zy}$	0.275

#### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Είναι  $M_z=0\text{kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-94) και (4-95) προκύπτει:

$$0.03+0.44=0.48 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-94)}$$

$$0.03+0.29=0.32 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-95)}$$

Συμπερασματικά, κοιτώντας τους ελέγχους επάρκειας μέλους και για τα δυο αυτά φατνώματα ελέγχου, γίνεται αντιληπτό ότι η τραβέρσα δεν διατρέχει κανένα κίνδυνο λυγισμού του μέλους της.

#### 4.3.3 Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής

Η λογική και γενικότερα ο τρόπος προσέγγισης εξεζητήθηκαν αναλυτικά στην υποπαράγραφο 3.3.3. Επομένως κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα αυτής της παραμετρικής διερεύνησης.

Στον Πίνακα 4-44 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο μέλος της τραβέρσας για διάφορες τιμές δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής, οι οποίες εκφράζονται ως ποσοστό της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.

Πίνακας 4-44: Δυσκαμψία ελατηρίων τριβής – Μέγιστη αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη N

Δυσκαμψία ελατηρίων τριβής (ως ποσοστό της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων)	Αξονική δύναμη N(kN)
5%	129.9
10%	249.8
20%	468.3
30%	662.3
40%	835.6
50%	991.3

Αυτό που πρέπει επίσης να εξεταστεί είναι κατά πόσο επηρεάζει η αύξηση της αξονικής δύναμης την ικανοποίηση των ελέγχων διατομής και μέλους της τραβέρσας. Για το λόγο αυτό θα παρουσιαστούν συνοπτικά στην συνέχεια οι έλεγχοι διατομής και μέλους της τραβέρσας για το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή για την αξονική που αναπτύσσεται στο μέλος της τραβέρσας για δυσκαμψία ελατηρίων τριβής ίση με το 50% της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.



**Έλεγχος επάρκειας διατομής για δυσκαμψία ίση με το 50% της εδαφικής δυσκαμψίας**

Πραγματοποιώντας στο υπολογιστικό φύλλο EXCEL τον έλεγχο διατομής σε κάθε μια από τις θέσεις ελέγχου που έχουν αναφερθεί ανωτέρω, παρατηρείται ότι δεν διαφοροποιείται απολύτως τίποτα σε σχέση με τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει για δυσκαμψία ελατηρίων τριβής ίση με το 20% της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων.

Και τούτο γιατί η αύξηση της αξονικής δύναμης  $N$  που προκύπτει δεν επηρεάζει την απαίτηση για χρήση ή όχι ενισχυτικού ελάσματος, αφού αυτό καθορίζεται αποκλειστικά από το μέγεθος της τέμνουσας δύναμης το οποίο παραμένει ίδιο. Επίσης από τους ελέγχους για απομείωση της ροπής αντοχής έναντι αξονικής προκύπτει ότι δεν χρειάζεται απομείωση. Δηλαδή το μέγεθος της αξονικής δεν είναι τόσο μεγάλο ώστε να απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής. Επομένως οι βαθμοί αξιοποίησης παραμένουν ακριβώς οι ίδιοι.

**Έλεγχος επάρκειας μέλους για δυσκαμψία ίση με το 50% της εδαφικής δυσκαμψίας**

Στον έλεγχο μέλους η μόνη διαφοροποίηση που προκύπτει για την περίπτωση αυτή σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η δυσκαμψία των ελατηρίων τριβής ισούταν με το 20% της εδαφικής δυσκαμψίας, είναι ως προς την τιμή των συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$  και  $k_{zy}$ . Δηλαδή λόγω του ότι διαφοροποιείται το μέγεθος της αξονικής δύναμης στις θέσεις ελέγχου, διαφοροποιούνται κατ'επέκταση και οι τιμές των συντελεστών αλληλεπίδρασης και πιο συγκεκριμένα αυξάνουν, διότι το μέγεθος της αξονικής είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση αυτή (EN1993-1-1 Παρ. Β, Πίν. Β1).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται για την εκάστοτε θέση ελέγχου οι νέες τιμές των συντελεστών αλληλεπίδρασης (Πίνακας 4-45, Πίνακας 4-46) καθώς και ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας.

**1ο Φάτνωμα**

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Πίνακας 4-45: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.530
$k_{zy}$	0.318

**Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη**

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-94) και (4-95) προκύπτει:

$$0.02 + 0.56 = 0.58 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-94)}$$

$$0.02 + 0.33 = 0.35 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-95)}$$

**Κεντρικό φάτνωμα**

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Πίνακας 4-46: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.461
$k_{zy}$	0.276

**Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη**

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (4-94) και (4-95) προκύπτει:

$$0.07 + 0.48 = 0.55 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-94)}$$

$$0.07 + 0.29 = 0.36 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (4-95)}$$

Παρατηρείται ότι ο έλεγχος μέλους έγινε λίγο δυσμενέστερος, κάτι που είναι απολύτως λογικό αφού ο πρώτος όρος του ελέγχου, που εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της  $N$ , αυξάνει και επίσης αυξάνει λίγο

και δεύτερος όρος του ελέγχου λόγω της μικρής αύξησης των συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$  και  $k_{zy}$ . Και πάλι όμως, όπως φαίνεται και από τον έλεγχο, το μέλος της τραβέρσας δεν διατρέχει απολύτως κανένα κίνδυνο λυγισμού του μέλους του.

#### **4.4 Διαστασιολόγηση Δικτυωμάτων**

##### **4.4.1 Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος**

Στο σύστημα αντιστήριξης χρησιμοποιούνται κατακόρυφοι και οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Οι μεν πρώτοι συνδέουν τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης, οι δε δεύτεροι συνδέουν τις αντηρίδες της κάτω στάθμης.

Στο προσομοίωμα αυτοί οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας έχουν θεωρηθεί ως στοιχεία δικτυώματος (truss elements). Αυτό αυτομάτως σημαίνει ότι το μέλος του χιαστί συνδέσμου δυσκαμψίας γίνεται αντιληπτό από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (ADINA) ως ένα πεπερασμένο στοιχείο με ελευθερώσεις ροπών στα άκρα του. Οι ελευθερώσεις ροπών στα άκρα του είναι αποδεκτές, διότι η σύνδεση του χιαστί με το μέλος της αντηρίδας είναι αρθρωτή. Από την άλλη, το ότι το μέλος αυτό δεν διακριτοποιείται σε περισσότερα του ενός πεπερασμένα στοιχεία, σημαίνει αυτομάτως ότι ο λυγισμός του χιαστί μέλους γίνεται δύσκολα αντιληπτός από το ADINA. Επομένως πρέπει να ελεγχθεί ξεχωριστά ο λυγισμός αυτός, και πιο συγκεκριμένα πρέπει να εκτιμηθεί η απομείωση της αξονικής αντοχής του χιαστί μέλους λόγω κινδύνου πλευρικού λυγισμού, και να συγκριθεί με την δρώσα θλιπτική αξονική δύναμη.

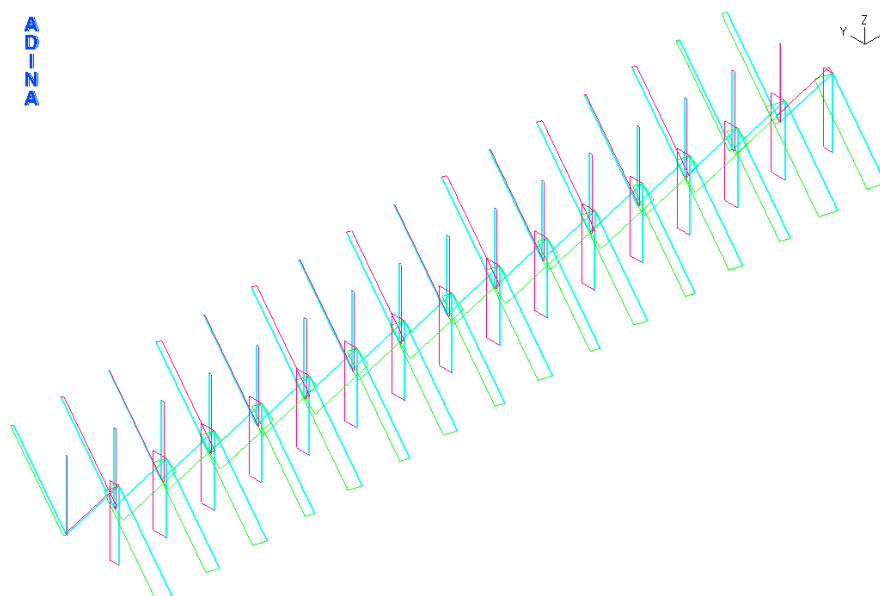
Τα στοιχεία δικτυώματος δέχονται μόνο αξονική ένταση, η οποία μπορεί να είναι είτε θλιπτική είτε εφελκυστική. Το ενδιαφέρον στρέφεται στο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής δύναμης, αφού αυτή είναι η αιτία του πλευρικού λυγισμού του μέλους. Επίσης δεν παρουσιάζουν κάποιο στοιχείο μη γραμμικότητας, είτε γεωμετρίας είτε υλικού. Επομένως τα μεγέθη σχεδιασμού μπορούν να εκτιμηθούν αποκλειστικά μέσω γραμμικών αναλύσεων. Αλλά μεμονωμένα από το όλο σύστημα αντιστήριξης, έχει εξεταστεί μη γραμμικά ένα τμήμα της αντιστήριξης το οποίο επαναλαμβάνεται σε όλο το μήκος της εκσκαφής ανά 4.5m. Άρα προκύπτουν εντατικά μεγέθη σχεδιασμού για τα χιαστί μέλη και από μη γραμμικές αναλύσεις. Τα μεγέθη αυτά είναι αποδεκτά και θα χρησιμοποιηθούν στον ανωτέρω έλεγχο, διότι οι μη γραμμικές αναλύσεις είναι πιο ακριβείς από ότι οι γραμμικές, αφού στο παρόν σύστημα αντιστήριξης υπάρχουν μέλη (αντηρίδες) στα οποία εμφανίζονται στοιχεία μη γραμμικότητας.

Αυτό σε ότι αφορά την επάρκεια της διατομής του χιαστί μέλους. Πρώτα όμως πρέπει να εξεταστεί αν οι διατομές των χιαστί μελών επαρκούν για να παρέχουν πλευρική εξασφάλιση στις αντηρίδες. Από τις αναλύσεις LBA, που πραγματοποιήθηκαν αρχικά για το σύστημα των αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης συνδεδεμένων μεταξύ τους με οριζόντια και κατακόρυφα χιαστί, καθώς και από την παραμορφωσιακή εικόνα των μη γραμμικών αναλύσεων GNIA, GMNIA που έγιναν στο σύστημα αυτό, προκύπτει ότι η διατομή CHS168.3/6.3 των χιαστί μελών (κατακορύφων και οριζοντίων) επαρκεί για να προσφέρει πλευρική εξασφάλιση στα μέλη των αντηρίδων στους κόμβους σύνδεσής τους.

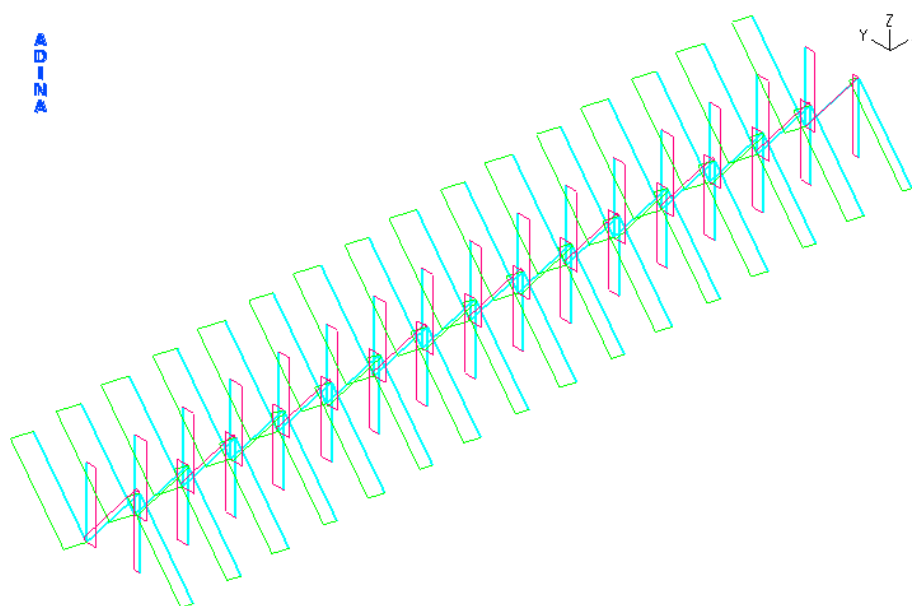
Αφού ικανοποιείται η ανωτέρω απαίτηση της πλευρικής εξασφάλισης των αντηρίδων, εξετάζεται στην συνέχεια η επάρκεια έναντι πλευρικού λυγισμού των χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας. Θα ελεγχθούν ξεχωριστά τα κατακόρυφα και οριζόντια χιαστί αξιοποιώντας τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη τόσο από τις γραμμικές όσο και από τις μη γραμμικές αναλύσεις.

##### **4.4.2 Κατακόρυφα Χιαστί**

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-89, Σχήμα 4-90) παρουσιάζεται η αξονική ένταση των κατακορύφων χιαστί που προκύπτει από γραμμικές αναλύσεις.



Σχήμα 4-89: Αξονική ένταση κατακορύφων χιαστί λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών και ίδιου βάρους με μέγιστη τιμή  $N=112.9\text{kN}$



Σχήμα 4-90: Αξονική ένταση κατακορύφων χιαστί λόγω φορτίου ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής με μέγιστη τιμή  $N=31.7\text{kN}$

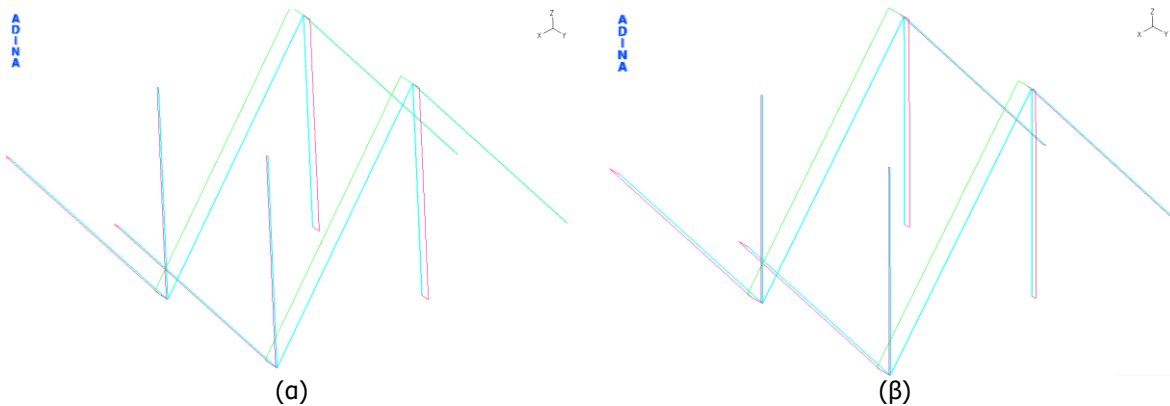
Λόγω του φορτίου των ωθήσεων γαιών και του ίδιου βάρους το αναπτυσσόμενο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής ισούται με  $N=112.9\text{kN}$ . Λόγω του φορτίου της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής ισούται με  $N=31.72\text{kN}$ . Από τα ανωτέρω σχήματα (Σχήμα 4-89, Σχήμα 4-90) παρατηρείται ότι η μέγιστη θλιπτική αξονική εμφανίζεται μεν σε διαγώνιο μέλος αλλά όχι στο ίδιο διαγώνιο μέλος σε καθένα από τα δυο προσομοιώματα. Για λόγους απλούστευσης, και ταυτοχρόνως υπέρ της ασφαλείας, θεωρείται ότι παρουσιάζεται στο ίδιο διαγώνιο μέλος.

Επομένως προκύπτει:  $N_{ed}=1.35 \cdot 112.9+1.50 \cdot 31.72 \Rightarrow N_{ed}=200\text{kN}$

Στα προσομοιώματα των μη γραμμικών αναλύσεων, όπως αναφέρθηκε εκτενώς και στην υποπαράγραφο 4.2.3.2, για την μελέτη των αντηρίδων της άνω στάθμης χρησιμοποιούνται οι ιδιομορφές των άνω

αντηρίδων ενώ για την μελέτη των αντηρίδων της κάτω στάθμης χρησιμοποιούνται οι ιδιομορφές των κάτω αντηρίδων. Για λόγους πληρότητας θα αξιοποιηθεί η θλιπτική αξονική δύναμη σχεδιασμού και από τα δυο αυτά μη γραμμικά προσομοιώματα. Αναμένεται η θλιπτική αξονική που θα προκύψει από τα δυο ξεχωριστά μη γραμμικά προσομοιώματα να είναι διαφορετική, αφού οι ιδιομορφές που χρησιμοποιούνται σε καθένα από αυτά τα μη γραμμικά προσομοιώματα είναι διαφορετικές, άρα αναμένεται διαφορετική η συμπεριφορά του συνολικού συστήματος.

Στο Σχήμα 4-91 παρουσιάζεται η θλιπτική αξονική σχεδιασμού των κατακορύφων χιαστί για την περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι ιδιομορφές της άνω στάθμης και κάτω στάθμης αντιστοίχως.



Σχήμα 4-91: Αξονική ένταση κατακορύφων χιαστί (α) χρησιμοποιώντας τις ιδιομορφές των αντηρίδων άνω στάθμης, με μέγιστη τιμή  $N=178.8\text{kN}$  (β) χρησιμοποιώντας τις ιδιομορφές των αντηρίδων κάτω στάθμης, με μέγιστη τιμή  $N=231.5\text{kN}$

Από το Σχήμα 4-91(α) προκύπτει  $N_{Ed}=178.8\text{kN}$  και από το Σχήμα 4-91(β) προκύπτει  $N_{Ed}=231.5\text{kN}$ .

Παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των μη γραμμικών αναλύσεων το δυσμενέστερο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής παρουσιάζεται σε διαγώνιο μέλος, αλλά όχι σε ακριανό διαγώνιο μέλος, όπως παρουσιαζόταν στα γραμμικά προσομοιώματα (Σχήμα 4-89, Σχήμα 4-90). Όπως και να έχει, στον έλεγχο θα χρησιμοποιηθεί το μήκος διαγώνιου μέλους.

Ο έλεγχος επάρκειας θα γίνει με το δυσμενέστερο μέγεθος θλιπτικής αξονικής σχεδιασμού, που εμφανίζεται στο διαγώνιο μέλος των κατακορύφων χιαστί, και το οποίο προκύπτει από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις.

Επομένως είναι:  $N_{Ed}=\max(200\text{kN},178.8\text{kN},231.5\text{kN})=231.5\text{kN}$

Γίνεται αντιληπτό ότι δεν επηρέασε κάπου η παραδοχή που έγινε ανωτέρω για την αξονική σχεδιασμού που προέκυψε από τις γραμμικές αναλύσεις, δηλαδή η θεώρηση ότι έστω η θλιπτική αξονική λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών και ιδίου βάρους εμφανίζεται στο ίδιο διαγώνιο μέλος με την θλιπτική αξονική λόγω θερμοκρασίας. Άρα δεν είναι ότι υπολογίστηκε μια υπερβολική αξονική σχεδιασμού από τις γραμμικές αναλύσεις, αφού όπως προκύπτει οι μη γραμμικές αναλύσεις δίνουν μεγαλύτερη αξονική σχεδιασμού.

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{f}_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-96)$$

Όπου η εξ. (4-96) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4-97)$$

$$L_{cr} = k \cdot L \quad (4-98)$$

$$i = i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4-99)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (4-97), (4-98), (4-99) προκύπτει:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot \sqrt{(5\text{m})^2 + (6.5\text{m})^2} = 8.2\text{m}$ , διότι  $k=1.00$  αφού τα άκρα του μέλους του χιαστί είναι αρθρωτά.

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{1053\text{cm}^4}{32.1\text{cm}^2}} = 5.73\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \frac{8.2\text{m}}{5.73\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 1.873$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού a.

Συντελεστής ατελειών (a):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού a.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή χ:

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (4-100)$$

$$x = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (4-101)$$

Από την εξ. (4-100) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (1.873 - 0.2) + 1.873^2] = 2.43$$

Επομένως από την εξ. (4-101) προκύπτει μειωτικός συντελεστής x ίσος με:

$$x = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2.43 + \sqrt{2.43^2 - 1.873^2}} = 0.251$$

Υπολογισμός αντοχής:

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} \quad (4-102)$$

Από την εξ. (4-102) η απομειωμένη αντοχή είναι ίση με:

$$N_{b,Rd} = \frac{0.251 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 32.1 \text{cm}^2}{1.00} \Rightarrow N_{b,Rd} = 260 \text{kN}$$

Άρα εν τέλει προκύπτει  $N_{Ed} = 231.5 \text{kN} \leq 260 \text{kN} = N_{b,Rd}$

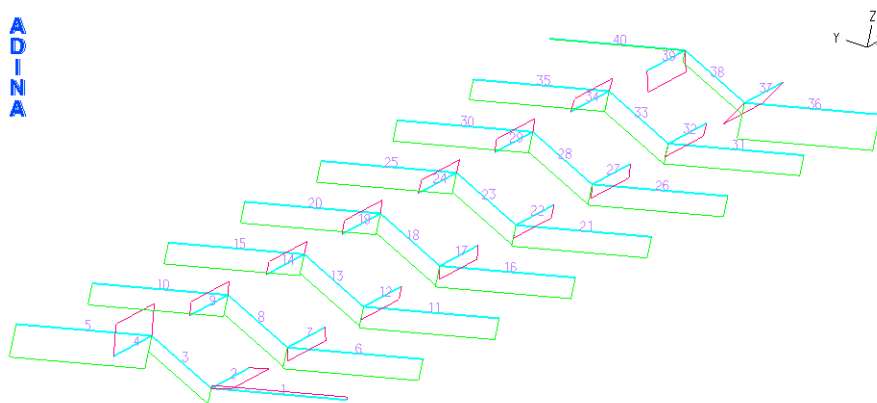
Βαθμός αξιοποίησης:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{231.5 \text{kN}}{260 \text{kN}} = 0.890$$

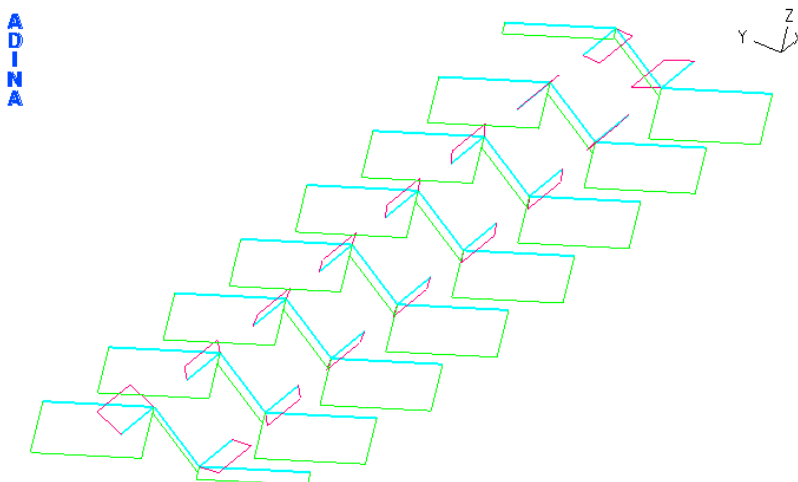
Επομένως, η CHS168.3/6.3 μπορεί να χαρακτηριστεί ως η βέλτιστη διατομή για τα κατακόρυφα δικτύωματα διότι και εξασφαλίζει τις αντηρίδες στους κοινούς τους κόμβους αλλά και αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό, όπως φαίνεται από τον ανωτέρω έλεγχο έναντι καμπτικού λυγισμού.

#### 4.4.3 Οριζόντια Χιαστί

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-92, Σχήμα 4-93) παρουσιάζεται η αξονική ένταση των οριζόντιων χιαστί που προκύπτει από γραμμικές αναλύσεις.



Σχήμα 4-92: Αξονική ένταση οριζόντιων χιαστί κάτω στάθμης λόγω φορτίου ωθήσεων γαιών και ίδιου βάρους με μέγιστη τιμή  $N=131.4 \text{kN}$

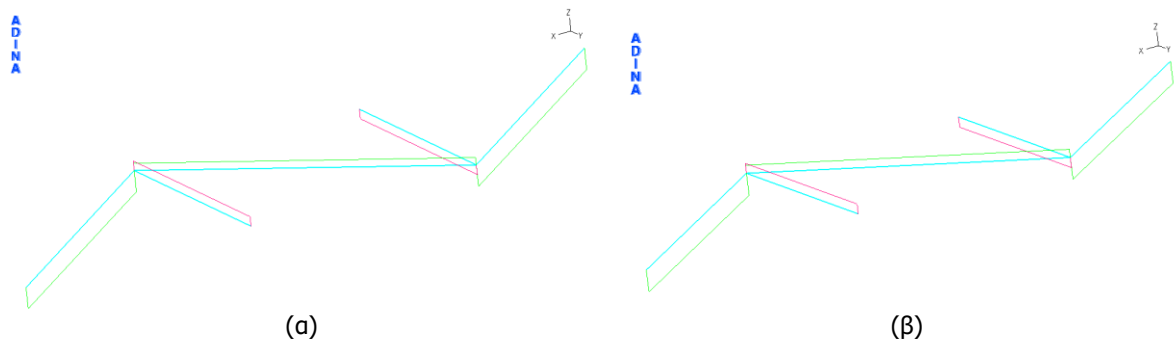


Σχήμα 4-93: Αξονική ένταση οριζόντιων χιαστί κάτω στάθμης λόγω φορτίου ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής με μέγιστη τιμή  $N=48.41 \text{kN}$

Λόγω του φορτίου των ωθήσεων γαιών και του ίδιου βάρους το αναπτυσσόμενο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής ισούται με  $N=131.4\text{kN}$ . Λόγω του φορτίου της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής ισούται με  $N=48.41\text{kN}$ . Από τα ανωτέρω σχήματα (Σχήμα 4-92, Σχήμα 4-93) παρατηρείται ότι η μέγιστη θλιπτική αξονική εμφανίζεται στο ίδιο διαγώνιο μέλος. Επομένως, δεν χρειάζεται να γίνει η απλουστευτική παραδοχή που έγινε στα κατακόρυφα χιαστί, αφού τώρα τα εντατικά μεγέθη που επαλληλίζονται αναφέρονται στο ίδιο μέλος.

Άρα προκύπτει:  $N_{Ed}=1.35 \cdot 131.4 + 1.50 \cdot 48.41 \Rightarrow N_{Ed}=250\text{kN}$

Στο Σχήμα 4-94 παρουσιάζεται η θλιπτική σχεδιασμού των οριζόντιων χιαστί για την περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι ιδιομορφές της άνω στάθμης και κάτω στάθμης αντιστοίχως.



Σχήμα 4-94: Αξονική ένταση οριζόντιων χιαστί κάτω στάθμης (α) χρησιμοποιώντας τις ιδιομορφές των αντηρίδων άνω στάθμης με μέγιστη τιμή  $N=248.4\text{kN}$  (β) χρησιμοποιώντας τις ιδιομορφές των αντηρίδων κάτω στάθμης με μέγιστη τιμή  $N=255\text{kN}$

Από το Σχήμα 4-94 (α) προκύπτει  $N_{Ed}=248.4\text{kN}$  και από το Σχήμα 4-94 (β) προκύπτει  $N_{Ed}=255\text{kN}$ .

Παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των μη γραμμικών αναλύσεων το δυσμενέστερο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής παρουσιάζεται σε διαγώνιο μέλος, και μάλιστα σε ακριανό διαγώνιο μέλος, όπως δηλαδή προκύπτει και από τα προσομοιώματα στα οποία έγιναν γραμμικές αναλύσεις. Επομένως στον έλεγχο θα χρησιμοποιηθεί το μήκος του διαγώνιου οριζόντιου χιαστί.

Ο έλεγχος επάρκειας θα γίνει με το δυσμενέστερο μέγεθος θλιπτικής αξονικής σχεδιασμού, που εμφανίζεται στο διαγώνιο μέλος των οριζόντιων χιαστί, και το οποίο προκύπτει από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις.

Επομένως είναι:  $N_{Ed}=\max(250\text{kN}, 248.4\text{kN}, 255\text{kN})=255\text{kN}$

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot \sqrt{(5\text{m})^2 + (4.5\text{m})^2} = 6.73\text{m}$ , διότι  $k=1.00$  αφού τα άκρα του μέλους της χιαστί είναι αρθρωτά.

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{1053\text{cm}^4}{32.1\text{cm}^2}} = 5.73\text{cm}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στην εξ. (4-96) προκύπτει:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \frac{6.73\text{m}}{5.73\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 1.537$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi$ :

Από την εξ. (4-100) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (1.537 - 0.2) + 1.537^2] = 1.822$$

Επομένως από την εξ. (4-101) προκύπτει μειωτικός συντελεστής  $\chi$  ίσος με:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1.822 + \sqrt{1.822^2 - 1.537^2}} = 0.357$$

Υπολογισμός αντοχής:

Από την εξ. (4-102) η απομειωμένη αντοχή είναι ίση με:

$$N_{b,Rd} = \frac{0.357 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 32.1 \text{cm}^2}{1.00} \Rightarrow N_{b,Rd} = 370 \text{kN}$$

Άρα εν τέλει προκύπτει  $N_{Ed} = 255 \text{kN} \leq 370 \text{kN} = N_{b,Rd}$

Βαθμός αξιοποίησης:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{255 \text{kN}}{370 \text{kN}} = 0.689$$

Από τον ανωτέρω βαθμό αξιοποίησης γίνεται αντιληπτό ότι η CHS168.3/6.3 αξιοποιείται σε επαρκή βαθμό. Και σε συνδυασμό με το ότι εξασφαλίζει πλήρως τις αντηρίδες στους κοινούς τους κόμβους, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η CHS168.3/6.3 είναι αποδεκτή ως διατομή των οριζόντιων δικτυωμάτων.



# 5 ΚΛΕΙΣΤΟ ΧΩΡΙΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

## 5.1 Γενικά

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η μελέτη των τραβερσών και των διαγωνίων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα άκρα της εκσκαφής, στην περίπτωση που το χωρίο της εκσκαφής είναι κλειστό. Πιο συγκεκριμένα, δεν θα διαφοροποιηθεί η εντατική κατάσταση σε όλα τα δομικά μέλη του συστήματος αντιστήριξης στην περίπτωση του κλειστού χωρίου εκσκαφής. Η μόνη διαφοροποίηση που θα υπάρξει είναι στα εντατικά μεγέθη των τραβερσών και των κεφαλοδέσμων (ο σχεδιασμός των οποίων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας) διότι στην περίπτωση του κλειστού χωρίου εκσκαφής το μέγεθος της αξονικής αυξάνεται ραγδαία σε σχέση με το μέγεθος της αξονικής που αναπτύσσεται στα ανωτέρω δομικά μέλη όταν η εκσκαφή αντιστηρίζεται μόνο στις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές της. Τέλος, θα μελετηθούν δυο εναλλακτικοί τρόποι διαμόρφωσης του χωρίου εκσκαφής στα άκρα του, με στόχο να διερευνηθεί ποιος από τους δύο τρόπους είναι ευμενέστερος από άποψη αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών και κατ' επέκταση απαιτούμενων διατομών των δομικών μελών.

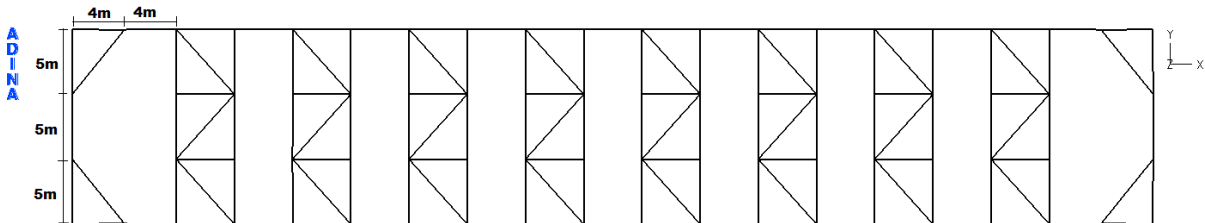
## 5.2 Περιγραφή χωρικού προσομοιώματος

Η περιγραφή του προσανατολισμού της διατομής της τραβέρσας, των συνθηκών στηρίξεών της καθώς και ο γενικότερος ρόλος της παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 3.3. Η μόνη προσθήκη είναι ότι οι τραβέρσες και οι κεφαλόδεσμοι κατά την διεύθυνση Y στηρίζονται κατακορύφως ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, όπως οι τραβέρσες και οι κεφαλόδεσμοι κατά την διεύθυνση X. Δηλαδή οι τραβέρσες εδράζονται σε βραχείς προβόλους οι οποίοι εξέχουν ανά τρίτη θέση πάσσαλου και οι κεφαλόδεσμοι εδράζονται στον εκάστοτε πάσσαλο. Επίσης, αυτό που αξίζει να ξανά επισημανθεί είναι ότι, το μέλος της τραβέρσας δεν παρουσιάζει κάποια μη γραμμικότητα γεωμετρίας ή υλικού. Επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η λειτουργία του και οι απαιτήσεις ελέγχου του είναι οι συνήθεις. Ομοίως και για τα διαγώνια μέλη που θα χρησιμοποιηθούν στα άκρα της εκσκαφής. Άρα η τραβέρσα και τα διαγώνια μέλη θα ελεγχθούν με βάση τα εντατικά μεγέθη που θα προκύψουν από γραμμικές αναλύσεις.

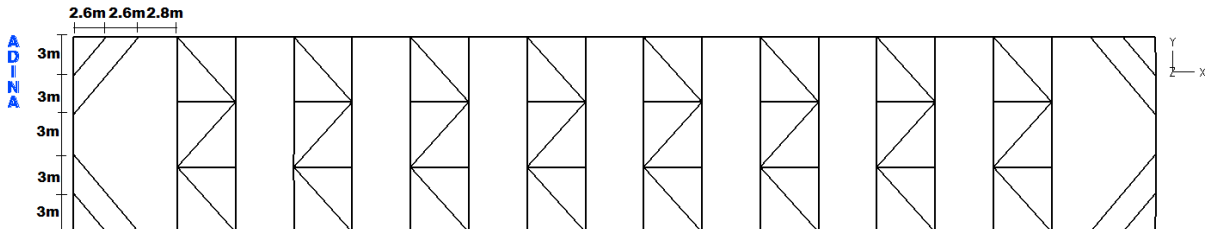
### 5.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χωρικού προσομοιώματος προσωρινής αντιστήριξης παρουσιάζονται αναλυτικά στην υποπαράγραφο 2.2.3. Αυτό που πρέπει στην παρούσα φάση να τονιστεί είναι ότι τα διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να ισομοιράζουν το ελεύθερο μήκος του εκάστοτε τμήματος. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση που χρησιμοποιείται ένα διαγώνιο στοιχείο στο κάθε άκρο της εκσκαφής, στόχος είναι να ισομοιράσει το μήκος της τραβέρσας που είναι κατά την διεύθυνση Y και το ελεύθερο μήκος της τραβέρσας που είναι κατά X, δηλαδή το μήκος από το άκρο της τραβέρσας έως την θέση εκείνη όπου συνδέεται η πρώτη αντηρίδα με το μέλος της τραβέρσας. Ακριβώς η ίδια λογική εφαρμόζεται και για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δύο διαγώνια στοιχεία στο κάθε άκρο της εκσκαφής.

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-1, Σχήμα 5-2) απεικονίζονται τα δύο εναλλακτικά προσομοιώματα για τη μόρφωση του συστήματος αντιστήριξης στα άκρα της εκσκαφής καθώς και τα ελεύθερα μήκη που προκύπτουν μετά την τοποθέτηση των διαγωνίων στοιχείων.



Σχήμα 5-1: Σύστημα με ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Απεικόνιση γεωμετρικών διαστάσεων



Σχήμα 5-2: Σύστημα με δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Απεικόνιση γεωμετρικών διαστάσεων

Επιπροσθέτως πρέπει να επισημανθεί ότι η σύνδεση μεταξύ των τραβερσών που είναι σε διαφορετικές διευθύνσεις καθώς και η σύνδεση του εκάστοτε διαγωνίου στοιχείου με το αντίστοιχο μέλος της τραβέρσας είναι αρθρωτή.

Τέλος, για την άνω στάθμη δεν χρειάζεται να εφαρμοστούν και οι δύο ανωτέρω εναλλακτικές (Σχήμα 5-1, Σχήμα 5-2), αλλά εφαρμόζεται αποκλειστικά αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1. Και τούτο γιατί το φορτίο ωθήσεων γαιών στη άνω στάθμη είναι αρκετά μικρότερο συγκριτικά με αυτό της κάτω στάθμης, επομένως τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στα δομικά μέλη της άνω στάθμης είναι αρκετά μικρότερα σε σχέση με αυτά που αναπτύσσονται στα δομικά μέλη της κάτω στάθμης.

Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση της 2<sup>ης</sup> διάταξης στα άκρα της εκσκαφής το φορτίο παραλαμβάνεται από δυο διαγώνιες, άρα η καταπόνηση μοιράζεται πλέον σε δυο διαγώνιες και δεν παραλαμβάνεται μόνο από μία. Επιπροσθέτως μειώνεται η όξυνση των εντατικών μεγεθών M, N, V στα σημεία σύνδεσης διαγωνίου με τραβέρσα διότι και η αξονική που μεταφέρεται σημειακά από την διαγώνιο στην τραβέρσα είναι μικρότερη, αφού πλέον το αξονικό φορτίο μεταφέρεται από δυο μέλη, αλλά και η εξασφάλιση του μέλους της τραβέρσας είναι σε περισσότερες θέσεις, άρα τα μέγιστα μεγέθη των εντατικών μεγεθών M, V μειώνονται. Με λίγα λόγια αναμένεται η 2<sup>η</sup> διάταξη να οδηγήσει σε μικρότερες απαιτήσεις σε ότι αφορά

το μέγεθος της διατομής τόσο για το μέλος της τραβέρσας όσο και για τα διαγώνια μέλη. Αυτή η αναγκαιότητα, δηλαδή η διαμόρφωση αποδοτικότερης διάταξης ώστε τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στα διαγώνια μέλη της άνω στάθμης να είναι μικρότερα, δεν υφίσταται, διότι τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη της άνω στάθμης είναι εξ' αρχής σχετικώς μικρά, άρα και ένα διαγώνιο μέλος με σύνηθες μέγεθος διατομής να χρησιμοποιηθεί θα επαρκεί.

### 5.2.2 Εδαφικά ελατήρια

Όπως αναφέρθηκε και στην υποπαράγραφο 2.2.4 μια εύλογη, και ταυτοχρόνως υπέρ της ασφαλείας, προσέγγιση είναι η θεώρηση του δείκτη εδάφους ίσο με  $K_s=40000\text{kN/m}^3$ . Ο δείκτης εδάφους πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμη γραμμική δυσκαμψία για να μπορέσει να εισαχθεί ως παράμετρος στην ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

$$K=K_s \cdot A \quad (5-1)$$

Η γραμμική δυσκαμψία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ. (5-1), όπου  $A$  είναι το εμβαδόν επιρροής του εκάστοτε κόμβου του μέλους της τραβέρσας το οποίο εξαρτάται από την πυκνότητα της διακριτοποίησης που έχει γίνει στο μέλος αυτό. Στα προσομοιώματα της παρούσας διερεύνησης η διακριτοποίηση που πραγματοποιήθηκε τόσο στα μέλη των κεφαλοδέσμων όσο και στα μέλη των τραβερσών είναι ανά 0.5m και στην διαμήκη και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Επομένως το εμβαδόν επιρροής ισούται με:

$$A=\left(\frac{0.5\text{m}}{2}+\frac{0.5\text{m}}{2}\right)\cdot\left(\frac{0.5\text{m}}{2}+\frac{0.5\text{m}}{2}\right)=0.25\text{m}^2$$

Άρα η γραμμική δυσκαμψία του εκάστοτε κόμβου είναι ίση με:

$$K=K_s \cdot A \Rightarrow K=40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0.25\text{m}^2 \Rightarrow K=10000 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Αυτό σε ότι αφορά την εγκάρσια εδαφική αντίσταση, η οποία στην παρούσα διερεύνηση δεν ενδιαφέρει αυτή καθ' αυτή, διότι στόχος είναι να μελετηθεί το μέλος της τραβέρσας και τα διαγώνια μέλη στα άκρα της εκσκαφής, τα οποία επηρεάζονται κυρίως από το μεγάλο μέγεθος της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης. Επομένως, ενδιαφέρει κυρίως η εδαφική αντίσταση κατά την διεύθυνση επιβολής της αξονικής δύναμης, η οποία οφείλεται στην τριβή μεταξύ του μέλους της τραβέρσας και της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η τριβή αυτή προσομοιώνεται μέσω γραμμικών ελατηρίων των οποίων η δυσκαμψία κυμαίνεται μεταξύ 5% έως 50% της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων. Στην παρούσα διερεύνηση θα εξεταστεί το δυσμενέστερο σενάριο, το οποίο επιτυγχάνεται για μέγεθος δυσκαμψίας ελατηρίων τριβής ίσο με το 50% της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων. Και τούτο γιατί, όσο μεγαλύτερη διαμήκη αντίσταση παρουσιάζεται στο μέλος της τραβέρσας, τόσο μεγαλύτερη αξονική ένταση αναπτύσσεται στο μέλος λόγω δράσης – αντίδρασης, επομένως η κατάσταση για το μέλος της τραβέρσας είναι δυσμενέστερη, και κατ' επέκταση η απαίτηση σε μέγεθος διατομής μεγαλύτερη.

$$\text{Επομένως είναι: } K_h=50\% \cdot K \Rightarrow K_h=50\% \cdot 10000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \Rightarrow K_h=5000 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Η ελατηριακή αντίσταση λόγω τριβής εφαρμόζεται στους κεφαλοδέσμους και τις τραβέρσες που είναι κατά  $X$  και κατά  $Y$ , αφού οι μεν κεφαλόδεσμοι είναι σε επαφή με το έδαφος και στις δυο αυτές διευθύνσεις, και οι δε τραβέρσες έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος το οποίο έχει επιστρωθεί και στις 4 πλευρές της εκσκαφής, άρα αναπτύσσεται τριβή μεταξύ τραβέρσας και επιφάνειας εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στις δυο διευθύνσεις.

### 5.2.3 Φορτία – Συνδυασμοί Φόρτισης

Στις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψη το ίδιο βάρος των δομικών μελών, η επιρροή της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής και οι ωθήσεις γαιών. Οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1: Συνδυασμοί φόρτισης

Στατικά φορτία	1.35G + 1.35ΩΓ + 1.50ΔΤ
Σεισμικά φορτία	1.35G + 1.00ΩΓΣ + 1.50ΔΤ

Η διαστασιολόγηση της τραβέρσας και των διαγώνιων στοιχείων στα άκρα της εκσκαφής πραγματοποιείται με βάση τον στατικό συνδυασμό φόρτισης του Πίνακα 5-1.

Η θερμοκρασιακή μεταβολή, λήφθηκε, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ίση με  $\Delta T=20^\circ$  και οι ωθήσεις γαιών, που ασκούνται στην άνω και κάτω στάθμη στο μέλος του κεφαλοδέσμου και της τραβέρσας αντιστοιχώς, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2. Οι τιμές αυτές των ωθήσεων γαιών είναι οι δυσμενέστερες που μπορούν να εμφανιστούν και έχουν προκύψει από τη γεωτεχνική μελέτη.

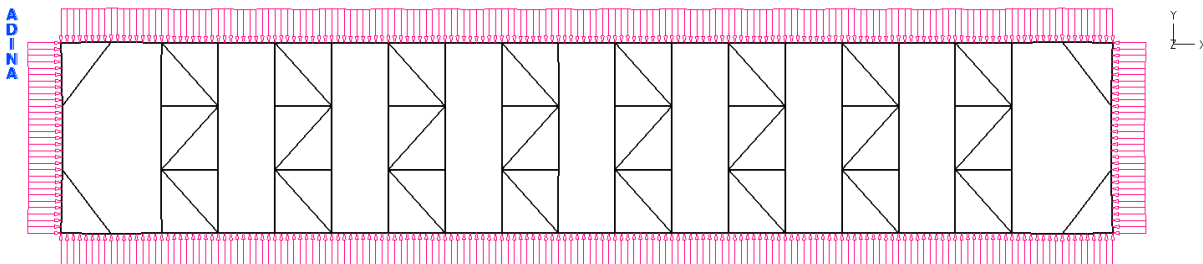
Πίνακας 5-2: Φορτία ωθήσεων γαιών

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
428kN/m	1407kN/m

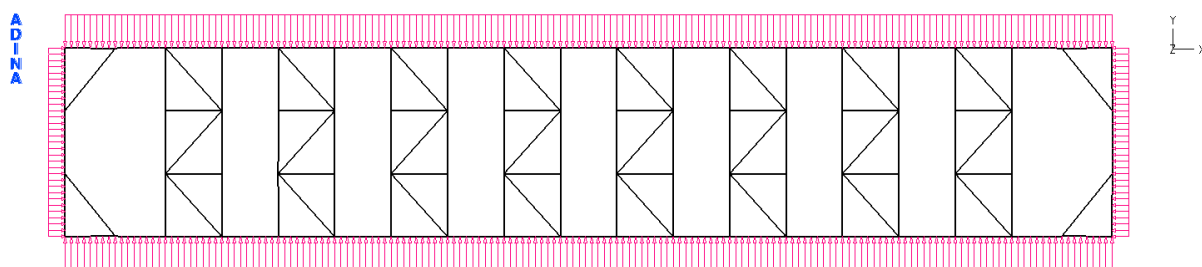
Το γραμμικό φορτίο των ωθήσεων γαιών επιβάλλεται στον κεφαλόδεσμο και στην τραβέρσα (άνω και κάτω στάθμη του χωρικού προσομοιώματος αντιστοιχώς). Το φορτίο λόγω ίδιου βάρους και ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής επιβάλλεται σε όλα τα μέλη του συστήματος αντιστήριξης, τα οποία αποτελούνται τόσο από χάλυβα όσο και από σκυρόδεμα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι είναι ορθό από γεωτεχνικής απόψεως να εξεταστεί και η περίπτωση όπου τα φορτία λόγω ωθήσεων γαιών στη μικρή και στη μεγάλη πλευρά της εκσκαφής της ίδιας στάθμης να μην είναι ίσα, αλλά στην μικρή πλευρά το κατανεμημένο φορτίο να ισούται με το μισό κατανεμημένο φορτίο της μεγάλης πλευράς. Οπότε, για το εκάστοτε από τα συστήματα διαμόρφωσης του χωρίου εκσκαφής στα άκρα του που παρουσιάστηκαν ανωτέρω (Σχήμα 5-1, Σχήμα 5-2), θα γίνουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην μία τα φορτία και των δυο πλευρών της εκσκαφής θα είναι ίσα, και στην άλλη το φορτίο στην μικρή πλευρά θα ισούται με το μισό της μεγάλης.

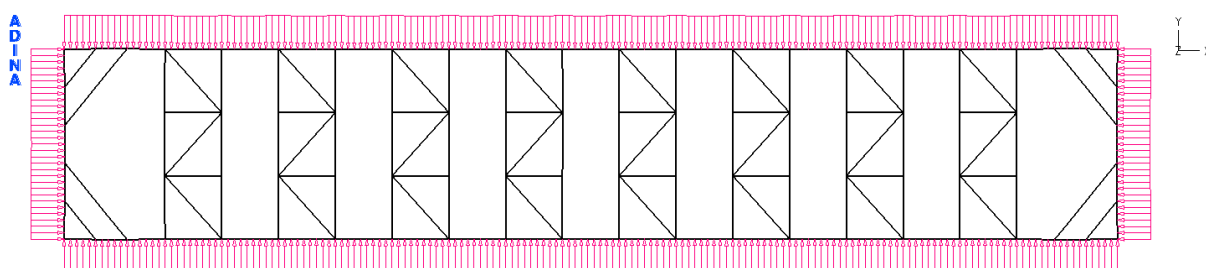
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-3, Σχήμα 5-4, Σχήμα 5-5, Σχήμα 5-6) παρουσιάζονται οι φορτίσεις λόγω ωθήσεων γαιών που θα εξεταστούν σε καθένα από τα συστήματα διαμόρφωσης στα άκρα της εκσκαφής (Σχήμα 5-1, Σχήμα 5-2). Σε κάθε μία από τις παρακάτω διαφορετικές περιπτώσεις το φορτίο λόγω ίδιου βάρους και λόγω ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής επιβάλλεται με τον ίδιο τρόπο. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί σχηματικά μόνο το φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών, αφού αυτό διαφοροποιείται από περίπτωση σε περίπτωση.



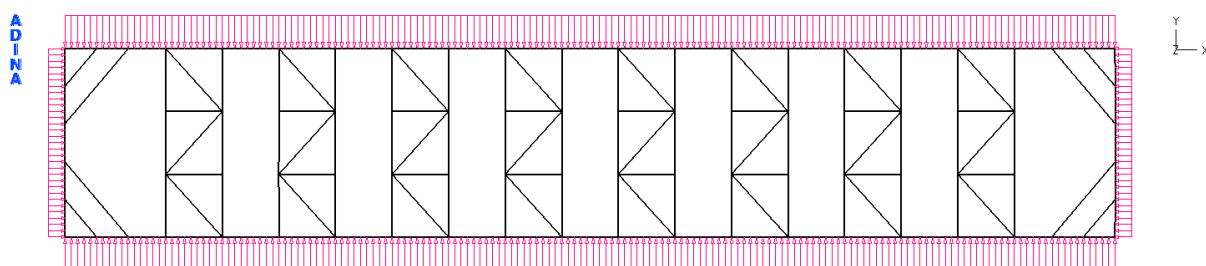
Σχήμα 5-3: Σύστημα με ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μικρή πλευρά της εκσκαφής ίσο με το κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μεγάλη πλευρά της εκσκαφής



Σχήμα 5-4: Σύστημα με ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μικρή πλευρά της εκσκαφής ίσο με το μισό κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μεγάλη πλευρά της εκσκαφής



Σχήμα 5-5: Σύστημα με ένα δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μικρή πλευρά της εκσκαφής ίσο με το κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μεγάλη πλευρά της εκσκαφής



Σχήμα 5-6: Σύστημα με δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μικρή πλευρά της εκσκαφής ίσο με το μισό κατανεμημένο φορτίο λόγω ωθήσεων γαιών στην μεγάλη πλευρά της εκσκαφής

### 5.3 Διαστασιολόγηση τραβερσών

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι έλεγχοι διατομής και μέλους σε κάθε μία από τις διευθύνσεις X και Y, για καθένα από τα ανωτέρω εναλλακτικά συστήματα που τίθενται προς διερεύνηση (Σχήμα 5-3, Σχήμα 5-4, Σχήμα 5-5, Σχήμα 5-6).

Στόχος είναι η εκτίμηση των οριακών διατομών των μελών των τραβερσών που ικανοποιούν τις απαιτήσεις έναντι των επιβαλλόμενων εντατικών μεγεθών. Επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν οριακές διατομές ώστε να έχει νόημα η σύγκριση μεταξύ διατομών δομικών μελών διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης τα οποία όμως υπόκεινται στην ίδια φόρτιση, αλλά και μεταξύ διατομών των δομικών μελών του ίδιου συστήματος αντιστήριξης, όταν αυτό υπόκειται σε διαφορετική φόρτιση κάθε φορά.

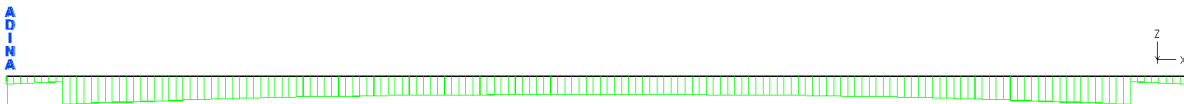
### 5.3.1 Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.1 λόγω του ότι το χωρίο εκσκαφής είναι πλέον κλειστό, μεταβιβάζεται μεγάλο μέγεθος αξονικής δύναμης στα μέλη των τραβερσών κατά X και κατά Y, κάτι το οποίο απομειώνει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή της διατομής της αντηρίδας. Επομένως η διατομή 2HEB450, που χρησιμοποιήθηκε μέχρι στιγμής και αφορά χωρίο εκσκαφής το οποίο αντιστηρίζεται μόνο στις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές του, δεν επαρκεί πλέον και είναι επιτακτική η χρήση μεγαλύτερων διατομών.

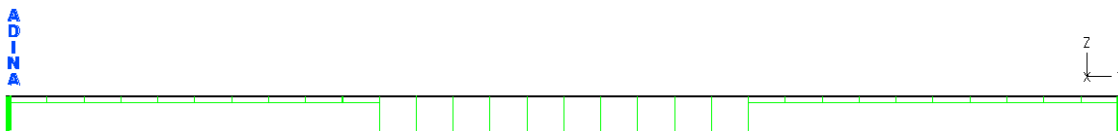
Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία μέσω των ελέγχων διατομής και μέλους των τραβερσών στις διευθύνσεις X και Y προέκυψε οριακή διατομή για την τραβέρσα στην διεύθυνση X και για την τραβέρσα στην διεύθυνση Y η 2HEB800. Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που ακολουθούν (Σχήμα 5-7, Σχήμα 5-8, Σχήμα 5-9, Σχήμα 5-10) προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω οριακές διατομές για τις τραβέρσες της διεύθυνσης X και Y.

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών τραβέρσας 2HEB800 κάτω στάθμης

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-7, Σχήμα 5-8, Σχήμα 5-9, Σχήμα 5-10) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον στατικό συνδυασμό φόρτισης του Πίνακα 5-1.



Σχήμα 5-7: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=13007\text{kN}$  – Διαμήκης διεύθυνση

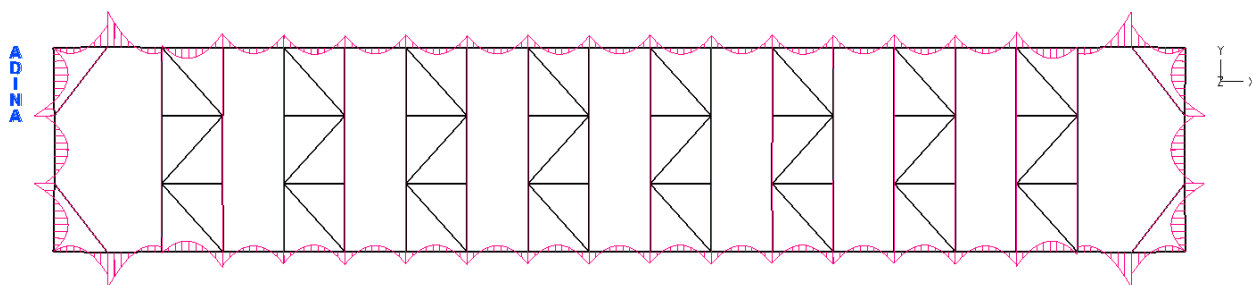


Σχήμα 5-8: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=13865.7\text{kN}$  – Εγκάρσια διεύθυνση

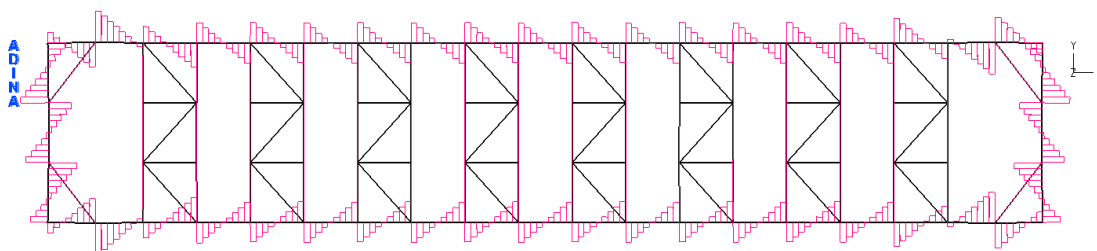
Ένα σημαντικό ερώτημα που τίθεται είναι αν η ανωτέρω μορφή των διαγραμμάτων είναι αναμενόμενη ή όχι. Είναι αναμενόμενη διότι:

- Στις θέσεις όπου καταλήγει το διαγώνιο στοιχείο στην τραβέρσα παρατηρείται άλμα στο διάγραμμα αξονικών δυνάμεων, αφού το διαγώνιο στοιχείο μεταφέρει αξονική δύναμη. Επομένως η συνιστώσα της αξονικής του διαγωνίου στοιχείου στην διεύθυνση της τραβέρσας προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα θλιπτική αξονική της τραβέρσας
- Παρατηρώντας τη μορφή του συστήματος στα άκρα της εκσκαφής είναι ουσιαστικά σαν ένα πλαίσιο σχήματος "Π" το οποίο δέχεται κατανεμημένο φορτίο στο ζυγώμα (τραβέρσα διεύθυνσης Y) και η αναπτυσσόμενη αξονική στο σημείο σύνδεσης τραβέρσας διεύθυνσης X και διαγωνίων στοιχείων είναι ουσιαστικά η αντίδραση στήριξης που εμφανίζεται στο πλαίσιο λόγω της επιβολής του κατανεμημένου αυτού φορτίου. Η αντίδραση στήριξης πρέπει να προκύπτει ίση με  $\frac{q \cdot L}{2}$ , όπου  $q$  = κατανεμημένο φορτίο ζυγώματος και  $L$ =μήκος ζυγώματος. Αν συγκριθεί η τιμή αυτή με την υπάρχουσα αξονική στο σημείο σύνδεσης τραβέρσας – διαγωνίου στοιχείου θα προκύψει ποσοστό απόκλισης <5% (αποδεκτό ποσοστό). Επομένως είναι ορθό το σκεπτικό μετάβασης του φορτίου ωθήσεων γαιών που επιβάλλεται στην τραβέρσα διεύθυνσης Y ως αξονική στο μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση X.

- Σε ένα τυχαίο κόμβο της τραβέρσας (είτε κατά Χ είτε κατά Υ) η διαφορά των τιμών των αξονικών δυνάμεων εκατέρωθεν του κόμβου αυτού δίνει μέγεθος ίσο με την δύναμη αντίστασης λόγω τριβής ( $F=K \cdot x$ , όπου  $x$ =μετακίνηση του κόμβου στην εκάστοτε διεύθυνση). Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η αντίσταση λόγω τριβής ενεργοποιείται και προκαλεί απομείωση στο μέγεθος της θλιπτικής αξονικής της τραβέρσας, όπως φαίνεται και από τα ανωτέρω διαγράμματα.
- Για διάφορες τιμές δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής, από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες τιμές, παρατηρείται η αναμενόμενη, βραδύτερη ή ταχύτερη αντιστοίχως, απομείωση της αξονικής με το μήκος.



Σχήμα 5-9: Διάγραμμα καμπτικών ρομών  $M_y$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $M_y=5965.6\text{kNm}$ – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-10: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $V_z=5957\text{kN}$  – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση

Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που εμφανίζονται στα ανωτέρω διαγράμματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5-3 και διαφοροποιούνται στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα καθώς και στο σημείο σύνδεσης της τραβέρσας με το διαγώνιο μέλος. Αξιοποιώντας τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού του Πίνακα 5-3, θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος διατομής και μέλους της τραβέρσας 2HEB800.

Παρατηρώντας τα ανωτέρω διαγράμματα εντατικών μεγεθών, γίνεται αντιληπτό, ότι η εικόνα της εντατικής κατάστασης επαναλαμβάνεται αυτούσια σε κάθε φάτνωμα, και διαφοροποιείται μόνο στο πρώτο και στο τελευταίο φάτνωμα καθώς και στα σημεία σύνδεσης της τραβέρσας με το αντίστοιχο διαγώνιο μέλος, όπου η εντατική κατάσταση στις συμμετρικές θέσεις είναι ίδια λόγω συμμετρίας φορέα και φόρτισης. Επομένως, με βάση την ανωτέρω παρατήρηση, οι κρίσιμες θέσεις ελέγχου που προκύπτουν είναι:

- Το άνοιγμα και η στήριξη του τυχόν κεντρικού φαντώματος (Γενική περίπτωση), και κατά προτίμηση του μεσαίου φαντώματος, διότι εκεί η αξονική είναι μέγιστη. (αφορά τραβέρσα διεύθυνσης Χ και Υ)
- Το άνοιγμα και η στήριξη του 1<sup>ου</sup> φαντώματος ( ή ισοδύναμα του τελευταίου φαντώματος). (αφορά τραβέρσα διεύθυνσης Χ)
- Η θέση σύνδεσης της τραβέρσας με το διαγώνιο μέλος. (αφορά τραβέρσα διεύθυνσης Χ και Υ)

Επίσης, υφίσταται και το διάγραμμα καμπτικών ρομών  $M_z$  και τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$ , τα οποία αναπτύσσονται λόγω του ίδιου βάρους της τραβέρσας. Αλλά το μέγεθος της τέμνουσας δύναμης και της

καμπτικής έντασης που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και επιπλέον η τιμή του είναι περίπου μηδενική στις κρίσιμες θέσεις ελέγχου. Για τις υπόλοιπες θέσεις, όπου έχει κάποια μικρή τιμή, τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη είναι αρκετά μικρότερα από ότι είναι στις κρίσιμες θέσεις. Επομένως, κρίνονται λιγότερο δυσμενείς οι θέσεις ελέγχου όπου το  $M_z$  και η  $V_y$  έχουν κάποιο μέγεθος, έστω και μικρό. Για το λόγο αυτό παραλείπεται τελείως η αναφορά στο διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_z$  και τεμνουσών δυνάμεων  $V_y$ .

Πίνακας 5-3: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού για την τραβέρσα 2HEB800

	<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
Εντατικά μεγέθη για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση X					
Γενική περίπτωση					
Άνοιγμα	8508.5	1545.1	0	0	6
Στήριξη	8417.2	3301.8	0	0	3877
1 <sup>ο</sup> φάτνωμα					
Άνοιγμα	12026.2	2779.4	0	0	61.61
Στήριξη	11511.2	4189.6	0	0	4687
0.5m από την Στήριξη	11062.1	1846.1	0	0	3737.3
Σύνδεση διαγωνίου μέλους – τραβέρσας					
Στήριξη	13007	5965.6	0	0	5957
0.5m από την Στήριξη	12872.1	3461.9	0	0	5007.3
Εντατικά μεγέθη για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση Y					
Σύνδεση διαγωνίου μέλους – τραβέρσας					
Άνοιγμα	13836.5	3490.2	0	0	474.4
Στήριξη	13865.7	5145.3	0	0	5302.8
0.5m από την Στήριξη	13854.1	307.81	0	0	4273.3

### 5.3.1.1 Έλεγχος επάρκειας διατομής τραβέρσας

#### Διεύθυνση X

Η διατομή 2HEB800 διαστασιολογείται ως μια HEB800 με τις μισές τιμές των εντατικών μεγεθών.

Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της HEB800, οι τιμές σχεδιασμού για τους συντελεστές των υλικών καθώς και οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας.

Πίνακας 5-4: Δεδομένα – HEB800

<b>h</b> (mm)	800	<b>A</b> (cm <sup>2</sup> )	334
<b>b</b> (mm)	300	<b>A<sub>v</sub></b> (cm <sup>2</sup> )	161.58
<b>t<sub>f</sub></b> (mm)	33	<b>I<sub>y</sub></b> (cm <sup>4</sup> )	359100
<b>t<sub>w</sub></b> (mm)	17.5	<b>I<sub>z</sub></b> (cm <sup>4</sup> )	14900
<b>r</b> (mm)	30	<b>W<sub>el,y</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	8980
<b>f<sub>y</sub></b> (kN/cm <sup>2</sup> )	35.5	<b>W<sub>el,z</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	994
<b>E</b> (kN/cm <sup>2</sup> )	21000	<b>W<sub>pl,y</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	10229
$\gamma_{Mo}$	1.00	<b>W<sub>pl,z</sub></b> (cm <sup>3</sup> )	1553

#### Εύρεση κατηγορίας διατομής της 2HEB800

Η γενικότερη απαίτηση είναι ότι οι διατομές του συστήματος αντιστήριξης, άρα και της τραβέρσας, πρέπει να είναι κατηγορίας 1.

– Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2a)



Η διατομή της τραβέρσας υπόκειται σε θλίψη, επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 33 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} + \frac{b}{2}\right)}{t_f} = \frac{300\text{mm}}{33\text{mm}} = 9.1 \leq 26.7 = 33 \cdot \epsilon$$

– Κατάταξη προεξηχόντων ελασμάτων (EN1993-1-1 παρ.5.5, Πίν. 5.2β)

Το προεξέχων πέλμα υπόκειται σε θλίψη, , επομένως το όριο του λόγου  $c/t$ , ώστε η διατομή να είναι κατηγορίας, 1 είναι  $c/t \leq 9 \cdot \epsilon$ , όπου  $\epsilon=0.81$  αφού ο χάλυβας είναι ποιότητας S355.

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\frac{c}{t} = \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} = \frac{111.25\text{mm}}{33\text{mm}} = 3.4 \leq 7.3 = 9 \cdot \epsilon$$

Αφού ικανοποιούνται και οι δυο ανωτέρω ανισότητες, η διατομή είναι κατηγορίας 1.

#### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

Από τη στιγμή που η 2HEB800 είναι κατηγορίας 1, είναι επιτρεπτό να υλοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-2)$$

$$M_{pl,Rd,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-3)$$

$$M_{pl,Rd,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-4)$$

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (5-5)$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (5-2), (5-3), (5-4), (5-5) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{334\text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 11857\text{kN}$$

$$M_{pl,Rd,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{10229\text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 3631.3\text{kNm}$$

$$M_{pl,Rd,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{1553\text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 551.3\text{kNm}$$

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{161.58 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3311.6 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{161.58 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 3311.6 \text{ kN}$$

### Άνοιγμα – Γενική περίπτωση

Στον Πίνακα 5-5 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση του ανοίγματος – Γενική περίπτωση.

Πίνακας 5-5: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – Γενική περίπτωση)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
4254.25	772.55	0	0	3

### Κάμψη και διάτμηση

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (5-6)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-6) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 1655.8 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 3 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6 \text{ kN} \Rightarrow 6 \text{ kN} \leq 1655.8 \text{ kN}$$

Επομένως, αφού ικανοποιείται η εξ. (5-6), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η διατομή ΗΕΒ800 είναι διατομή διπλής συμμετρίας σχήματος Ι. Επομένως, το αν θα υπάρξει απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω αξονικής, καθορίζεται από το αν ικανοποιούνται οι εξ. (5-7), (5-8) και (5-9) ή όχι.

$$N_{Ed} \leq 0.25 \cdot N_{pl,Rd} \quad (5-7)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-8)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-9)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-7) και (5-8) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 1.44 \geq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{Mo})} = 1.87 \geq 1.00, \quad \text{άρα απαιτείται απομείωση και είναι:}$$

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ M_{pl,y,Rd} \cdot \left( \frac{1-n}{1-0.5 \cdot a} \right); M_{pl,y,Rd} \right\} \quad (5-10)$$

$$\text{Όπου: } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \text{ και } a = \min\left\{\left(\frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A}\right); 0.5\right\}$$

Αντικαθιστώντας στις ανωτέρω εξισώσεις και στην συνέχεια στην εξ. (5-10) προκύπτει:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{4254.25\text{kN}}{11857\text{kN}} \Rightarrow n = 0.359$$

$$a = \min\left\{\left(\frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A}\right); 0.5\right\} = \min\left\{\left(\frac{334\text{cm}^2 - 2 \cdot 300\text{mm} \cdot 33\text{mm}}{334\text{cm}^2}\right); 0.5\right\} \Rightarrow a = 0.407$$

$$M_{N,y,Rd} = \min\left\{3631.3\text{kNm} \cdot \left(\frac{1-0.359}{1-0.5 \cdot 0.407}\right); 3631.3\text{kNm}\right\} \Rightarrow M_{N,y,Rd} = 2923.63\text{kNm}$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-9) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{Mo})} = 0.93 \leq 1.00, \text{ άρα είναι } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \text{ (δεν χρειάζεται απομείωση)}.$$

### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος του δρώντος μεγέθους προς το μέγεθος αντοχής.

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{772.55\text{kNm}}{2923.63\text{kNm}} = 0.26 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{3311.6\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{551.3\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{3\text{kN}}{3311.6\text{kN}} = 0.001$$

### **Στήριξη – Γενική περίπτωση**

Στον Πίνακα 5-6 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση της στήριξης – Γενική περίπτωση.

Πίνακας 5-6: Μεγέθη σχεδιασμού (Στήριξη – Γενική περίπτωση)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
4208.6	1650.9	0	0	1938.5

### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-6) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 1655.8\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1938.5\text{kN} \geq 0.5 \cdot 3311.6\text{kN} \Rightarrow 1938.5\text{kN} \geq 1655.8\text{kN}$$

Επομένως απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω τέμνουσας.

Ο συντελεστής απομείωσης ( $\rho$ ) υπολογίζεται από την εξ. (5-11).

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1\right)^2 \quad (5-11)$$

Αντικαθιστώντας στην ανωτέρω εξίσωση προκύπτει:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot 1938.5}{3311.6} - 1\right)^2 \Rightarrow \rho = 0.0292$$

Για διατομές με ίσα πέλματα καμπτόμενες περί τον ισχυρό άξονα, η απομειωμένη ροπή αντοχής υπολογίζεται από την εξ. (5-12).

$$M_{V,Rd} = \min \left\{ \left[ W_{pl,y} - \frac{\rho}{4} \cdot \frac{A_v^2}{t_w} \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Mo}} ; M_{pl,Rd} \right\} \quad (5-12)$$

Αντικαθιστώντας στην ανωτέρω εξίσωση είναι:

$$M_{V,Rd} = \min \left\{ \left[ 10229 \text{cm}^3 - \frac{0.0292}{4} \cdot \frac{(161.58 \text{cm}^2)^2}{17.5 \text{mm}} \right] \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} ; 3631.3 \text{kNm} \right\} \Rightarrow M_{V,Rd} = 3592.7 \text{kNm}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-7), (5-8) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 1.42 \geq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{Mo})} = 1.85 \geq 1.00, \quad \text{άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα με την εξ. (5-10) προκύπτει:}$$

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ 3592.7 \text{kNm} \cdot \left( \frac{1-0.355}{1-0.5 \cdot 0.407} \right) ; 3592.7 \text{kNm} \right\} \Rightarrow M_{N,y,Rd} = 2909.9 \text{kNm}$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-9) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{Mo})} = 0.92 \leq 1.00, \quad \text{άρα είναι } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad (\text{δεν χρειάζεται απομείωση}).$$

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1650.9 \text{kNm}}{2909.9 \text{kNm}} = 0.57 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{kN}}{3311.6 \text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{kNm}}{551.3 \text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1938.5 \text{kN}}{3311.6 \text{kN}} = 0.59$$

#### **Άνοιγμα – 1° Φάτνωμα**

Στον Πίνακα 5-7 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση του ανοίγματος – 1° Φάτνωμα.

Πίνακας 5-7: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – 1° Φάτνωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
6013.1	1389.7	0	0	30.8

Επαναλαμβάνεται αυτούσια η διαδικασία ελέγχου που υλοποιήθηκε στο Άνοιγμα – Γενική περίπτωση, και εν τέλει προκύπτουν οι παρακάτω βαθμοί αξιοποίησης.

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1389.7 \text{kNm}}{2247.3 \text{kNm}} = 0.62 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{kN}}{3311.6 \text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{kNm}}{535.6 \text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{30.8 \text{kN}}{3311.6 \text{kN}} = 0.01$$

Είναι φανερό ότι βαθμοί αξιοποίησης στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους του ανοίγματος – Γενική περίπτωση, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό διότι παρατηρώντας τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών, η εντατική κατάσταση στο άνοιγμα του 1<sup>ου</sup> φανώματος είναι δυσμενέστερη από αυτή του ανοίγματος – Γενική περίπτωση.

### Στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα

Στον Πίνακα 5-8 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού για την περίπτωση της στήριξης – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα.

Πίνακας 5-8: Μεγέθη σχεδιασμού (Στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
5755.6	2094.8	0	0	2343.5

Η διαδικασία ελέγχου διαφοροποιείται στην περίπτωση αυτή σε σχέση με την αντίστοιχη που είχε ακολουθηθεί στην περίπτωση της Στήριξης – Γενική περίπτωση. Και τούτο γιατί, όπως γίνεται αντιληπτό από τα κάτω, η απομείωση της ροπής αντοχής λόγω τέμνουσας είναι μεγάλη, επομένως η εναπομένουσα ροπή αντοχής δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των εντατικών μεγεθών. Για το λόγο αυτό είναι επιτακτική η χρήση ενισχυτικού ελάσματος στον κορμό της διατομής της τραβέρσας.

### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-6) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 1655.8\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 2343.5\text{kN} \geq 0.5 \cdot 3311.6\text{kN} \Rightarrow 2343.5\text{kN} \geq 1655.8\text{kN}$$

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, αν απομειωθεί η ροπή αντοχής λόγω τέμνουσας, μετά η διατομή δεν θα μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των υπολοίπων εντατικών μεγεθών.

Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενισχυτικού ελάσματος. Στόχος είναι η ενίσχυση του κορμού, ώστε να μπορεί να παραληφθεί από τη διατομή η τέμνουσα σχεδιασμού.

Πίνακας 5-9: Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος κορμού

<b>Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος</b>	
b (mm)	670
t (mm)	20

Η επιλογή των διαστάσεων του ενισχυτικού ελάσματος (Πίνακας 5-9) έγινε με την εξής λογική:

Το ύψος του ενισχυτικού ελάσματος μπορεί να εκτείνεται το πολύ μέχρι το σημείο εκείνο του κορμού όπου αρχίζει η καμπύλωση της διατομής. Επομένως, το μέγιστο επιτρεπτό ύψος είναι ίσο με:

$$b_{\text{ελάσματος}} = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r \Rightarrow b_{\text{ελάσματος}} = 800 - 2 \cdot 33 - 2 \cdot 30 \Rightarrow b_{\text{ελάσματος}} = 674\text{mm}$$

Άρα επιλέγεται έλασμα ύψους  $b=670\text{mm}$ . Επίσης, ένα σύνηθες πάχος ελάσματος είναι  $20\text{mm}$ .

### Νέα χαρακτηριστικά διατομής

Το έλασμα τοποθετείται εκατέρωθεν του κορμού, δηλαδή σε κάθε κορμό αντιστοιχούν 2 ελάσματα. Άρα το νέο εμβαδόν κορμού, το οποίο θα κληθεί να παραλάβει την τέμνουσα σχεδιασμού, είναι:

$$A_v = A_v + 2 \cdot (b \cdot t) \tag{5-13}$$

Στον Πίνακα 5-10 παρουσιάζονται τα νέα χαρακτηριστικά της διατομής.

Πίνακας 5-10: Νέα χαρακτηριστικά διατομής

$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	429.58
$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	8804.54
$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	8804.54

Επομένως ο έλεγχος έναντι τέμνουσας γίνεται ως εξής:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 8804.54 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 4402.3 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 2343.5 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 8804.54 \text{ kN} \Rightarrow 2343.5 \text{ kN} \leq 4402.3 \text{ kN}$$

Αφού ικανοποιείται η εξ. (5-6), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-7), (5-8) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 1.94 \geq 1.00 \text{ και } \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M0})} = 2.52 \geq 1.00, \text{ άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα}$$

με την εξ. (5-10) προκύπτει:

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ 3631.3 \text{ kNm} \cdot \left( \frac{1-0.485}{1-0.5 \times 0.407} \right); 3636.1 \text{ kNm} \right\} \Rightarrow M_{N,y,Rd} = 2346.3 \text{ kNm}$$

Γίνεται αντιληπτή η ραγδαία μείωση της πλαστικής ροπής αντοχής λόγω της αξονικής δύναμης. Επομένως, είναι εμφανής η αρνητική επιρροή του μεγέθους της αξονικής δύναμης στην αντοχή της διατομής.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-9) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0})} = 1.26 \geq 1.00, \text{ άρα απαιτείται απομείωση και είναι:}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right], n \geq a \quad (5-14)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}, n \leq a \quad (5-15)$$

Στην παρούσα περίπτωση είναι  $n=0.485 > 0.407$ , άρα αντικαθιστώντας στην εξ. (5-14) προκύπτει:

$$M_{N,z,Rd} = 551.3 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0.485-0.407}{1-0.407} \right)^2 \right] \Rightarrow M_{N,z,Rd} = 541.7 \text{ kNm}$$

Η χρήση του ενισχυτικού ελάσματος δεν βοηθάει στην παραλαβή της ροπής σχεδιασμού. Για αυτό στους ανωτέρω υπολογισμούς δεν εισάγεται με κάποιο τρόπο η ύπαρξη του ενισχυτικού ελάσματος. Τοποθετήθηκε αποκλειστικά για την ενίσχυση της διατομής έναντι τέμνουσας δύναμης.

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{2094.8 \text{ kNm}}{2346.3 \text{ kNm}} = 0.89 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{8804.54 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{541.7 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2343.5 \text{ kN}}{8804.54 \text{ kN}} = 0.27$$

Από τους ανωτέρω βαθμούς αξιοποίησης γίνεται αντιληπτό ότι λόγω δρώσας αξονικής και δρώσας ροπής η ροπή αντοχής της διατομής σχεδόν εξαντλείται. Επομένως ήταν ορθή η επιλογή χρήσης ενισχυτικού ελάσματος στον κορμό της διατομής διότι αν απαιτούνταν και απομείωση της ροπής αντοχής λόγω τέμνουσας, τότε θα προέκυπτε βαθμός αξιοποίησης έναντι ροπής μεγαλύτερος της μονάδας.

Είναι φανερό, ότι δεν είναι σωστό από άποψη σχεδιασμού να εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα σε όλο το μήκος της τραβέρσας, και για λόγους οικονομίας αλλά και επειδή μια τέτοια θεώρηση καθιστά υπερβολικά υπέρ της ασφαλείας τον σχεδιασμό της τραβέρσας. Επομένως, τίθεται άμεσα ο προβληματισμός μέχρι ποιο μήκος εκατέρωθεν της εκάστοτε στήριξης θα εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα. Θα εξεταστεί ποιο είναι το απαιτούμενο μήκος στο οποίο πρέπει να εκτείνεται το ενισχυτικό έλασμα, εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> φατνώματος.

### Σε απόσταση 0.5m από τη στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα

Στον Πίνακα 5-11 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.3m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα.

Πίνακας 5-11: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.3m από την στήριξη – 1<sup>ο</sup> Φάτνωμα)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
5531.1	923	0	0	1868.7

### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-6) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 1655.8 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 1868.7 \text{ kN} \geq 0.5 \cdot 3311.6 \text{ kN} \Rightarrow 1868.7 \text{ kN} \geq 1655.8 \text{ kN}$$

Επομένως απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω τέμνουσας.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-11) προκύπτει συντελεστής απομείωσης (ρ) ίσος με:

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot 1868.7}{3311.6} - 1 \right)^2 \Rightarrow \rho = 0.0165$$

Από την εξ. (5-12) προκύπτει:

$$M_{V,Rd} = \min \left\{ \left[ 10229 \text{ cm}^3 - \frac{0.0165}{4} \cdot \frac{(161.58 \text{ cm}^2)^2}{17.5 \text{ mm}} \right] \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00}; 3631.3 \text{ kNm} \right\} \Rightarrow M_{V,Rd} = 3609.4 \text{ kNm}$$

### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-7), (5-8) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 1.87 \geq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M0})} = 2.43 \geq 1.00, \quad \text{άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα}$$

με την εξ. (5-10) προκύπτει:

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ 3609.4 \text{ kNm} \cdot \left( \frac{1 - 0.466}{1 - 0.5 \times 0.407} \right); 3609.4 \text{ kNm} \right\} \Rightarrow M_{N,y,Rd} = 2417.98 \text{ kNm}$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-9) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M_0})} = 1.21 \geq 1.00, \text{ άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα με την εξ. (5-14) προκύπτει:}$$

$$M_{N,z,Rd} = 551.3 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0.466 - 0.407}{1 - 0.407} \right)^2 \right] \Rightarrow M_{N,z,Rd} = 545.8 \text{ kNm}$$

#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{923 \text{ kNm}}{2417.98 \text{ kNm}} = 0.38 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{3311.6 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{545.8 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{1868.7 \text{ kN}}{3311.6 \text{ kN}} = 0.56$$

Από τους ανωτέρω βαθμούς αξιοποίησης γίνεται φανερό ότι σε απόσταση 0.5m από την στήριξη του 1<sup>ου</sup> φαντώματος δεν είναι επιτακτική η χρήση ενισχυτικού ελάσματος στον κορμό. Δηλαδή η διατομή μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις χωρίς κάποια ενίσχυση. Άρα, αν το έλασμα εκτείνεται μέχρι απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της στήριξης δεν τίθεται απολύτως κανένας κίνδυνος μη ικανοποίησης του ελέγχου διατομής σε κάποια από τις θέσεις μεταξύ της στήριξης και αυτής σε απόσταση 0.5m από την στήριξη.

#### Θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους - τραβέρσας

Στον Πίνακα 5-12 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού στη θέση σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα.

Πίνακας 5-12: Μεγέθη σχεδιασμού (Στη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους με τραβέρσα)

N (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>z</sub> (kNm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>z</sub> (kN)
6503.5	2982.8	0	0	2978.5

#### Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-6) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 1655.8 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 2978.5 \text{ kN} \geq 0.5 \cdot 3311.6 \text{ kN} \Rightarrow 2978.5 \text{ kN} \geq 1655.8 \text{ kN}$$

Όπως και στην περίπτωση της Στήριξης – 1<sup>ο</sup> φάντωμα, σε πρώτη φάση αποφεύγεται η απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής έναντι τέμνουσας μέσω της χρήσης ενισχυτικού ελάσματος στον κορμό.

Οι διαστάσεις του ενισχυτικού ελάσματος και τα νέα χαρακτηριστικά της διατομής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-9 και Πίνακα 5-10 αντιστοίχως.

Επομένως ο έλεγχος έναντι τέμνουσας γίνεται ως εξής:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 8804.54 \text{ kN} \Rightarrow 0 \text{ kN} \leq 4402.3 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 2978.5 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot 8804.54 \text{ kN} \Rightarrow 2978.5 \text{ kN} \leq 4402.3 \text{ kN}$$

Αφού ικανοποιείται η εξ. (5-6), δεν απαιτείται απομείωση λόγω τέμνουσας της ροπής αντοχής της διατομής.

Λαμβάνοντας υπόψιν την απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω αξονικής προκύπτει εν τέλει βαθμός αξιοποίησης σε ότι αφορά το μέγεθος της ροπής ίσος με:



$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{2982.8\text{kNm}}{2058.7\text{kNm}} = 1.45 > 1.00.$$

Επομένως, παρόλο που χρησιμοποιήθηκε ενισχυτικό έλασμα στον κορμό, άρα δεν υπήρξε επιπλέον απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω τέμνουσας, πάλι η διατομή δεν επαρκεί για να παραλάβει την επιβαλλόμενη ροπή στη θέση αυτή. Για το λόγο αυτό συνίσταται η χρήση ενισχυτικού ελάσματος στα πέλματα της διατομής 2HEB800 της τραβέρσας.

Το ζητούμενο είναι πώς θα ενισχυθεί η διατομή της τραβέρσας. Γενικά προτιμάται η συμμετρική ενίσχυση της διατομής, δηλαδή η χρήση ενισχυτικών ελασμάτων και στα δύο πέλματα της διατομής. Η διατομή της τραβέρσας είναι από την μία πλευρά ελεύθερη και από την άλλη είναι σε επαφή με υλικό πάχους 80mm το οποίο μεσολαβεί μεταξύ της τραβέρσας και της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ενισχυτικό έλασμα πάχους 15mm στο εκάστοτε πέλμα. Άρα, από την πλευρά όπου βρίσκεται το υλικό αυτό πάχους 80mm, θα έχει τοπικά στην περιοχή ενίσχυσης της διατομής πάχος 80-15=65mm.

Στον Πίνακα 5-13 παρουσιάζονται οι διαστάσεις του ενισχυτικού ελάσματος των πελμάτων.

Πίνακας 5-13: Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος πέλματος

Διαστάσεις ενισχυτικού ελάσματος	
b (mm)	300
t <sub>r1</sub> (mm)	15
t <sub>r2</sub> (mm)	15

Στον έλεγχο διατομής, όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω, ελέγχεται η μισή διατομή (δηλαδή η HEB800) με τα μισά εντατικά μεγέθη. Επομένως εξετάζεται η ενίσχυση της HEB800. Αξιοποιείται όλο το πλάτος του πέλματος (300mm) της και επιλέγεται αυθαίρετα το πάχος ίσο με 15mm, το οποίο είναι μικρότερο από το πάχος του πέλματος, άρα αποδεκτή αυτή η τιμή. Αν προκύψει μικρός βαθμός αξιοποίησης τότε θα γίνει αναθεώρηση και θα χρησιμοποιηθεί μικρότερο πάχος ελάσματος.

Στον Πίνακα 5-14 παρουσιάζονται τα βελτιωμένα μεγέθη αντοχής της διατομής.

Πίνακας 5-14: Νέα χαρακτηριστικά διατομής

A (cm <sup>2</sup> )	424
M <sub>pl,y,Rd</sub> (kN)	4416.30
N <sub>pl,Rd</sub> (kN)	15052

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-7), (5-8) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 1.73 \geq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{M0})} = 2.85 \geq 1.00, \quad \text{άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα}$$

με την εξ. (5-10) προκύπτει:

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ 4416.3\text{kNm} \cdot \left( \frac{1-0.432}{1-0.5 \cdot 0.500} \right); 4416.3\text{kNm} \right\} \Rightarrow M_{N,y,Rd} = 3344.2\text{kNm}$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-9) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0})} = 1.43 \geq 1.00, \quad \text{άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα με την εξ. (5-15) προκύπτει:}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \Rightarrow M_{N,z,Rd} = 551.3\text{kNm}$$

Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{2982.8\text{kNm}}{3344.2\text{kNm}} = 0.89 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{8804.54\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{551.3\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2978.5\text{kN}}{8804.54\text{kN}} = 0.56$$

Από τον βαθμό αξιοποίησης έναντι ροπής γίνεται αντιληπτό ότι παρόλο που χρησιμοποιηθήκαν ενισχυτικά ελάσματα στον κορμό και στα πέλματα, πάλι ο βαθμός αξιοποίησης είναι πολύ μεγάλος. Δηλαδή η αναγκαιότητά τους κρίνεται επιτακτική.

Το ζητούμενο στην περίπτωση αυτή είναι μέχρι ποια απόσταση εκατέρωθεν του σημείου σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα θα εκτείνονται τα ενισχυτικά αυτά ελάσματα.

**Σε απόσταση 0.5m από τη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους - τραβέρσας**

Στον Πίνακα 5-15 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.5m από τη θέση σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα.

Πίνακας 5-15: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.5m από τη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους με τραβέρσα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
6436.1	1730.95	0	0	2503.7

Κάμψη και διάτμηση

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-6) προκύπτει:

$$V_{Ed,y} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd,y} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 0.5 \cdot 3311.6\text{kN} \Rightarrow 0\text{kN} \leq 1655.8\text{kN}$$

$$V_{Ed,z} \geq V_{pl,Rd,z} \Rightarrow 2503.7\text{kN} \geq 0.5 \cdot 3311.6\text{kN} \Rightarrow 2503.7\text{kN} \geq 1655.8\text{kN}$$

Επομένως απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής λόγω τέμνουσας.

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-11) προκύπτει συντελεστής απομείωσης ( $\rho$ ) ίσος με:

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot 2503.7}{3311.6} - 1 \right)^2 \Rightarrow \rho = 0.2622$$

Από την εξ. (5-12) προκύπτει:

$$M_{V,Rd} = \min \left\{ \left[ 10229\text{cm}^3 - \frac{0.2622}{4} \cdot \frac{(161.58\text{cm}^2)^2}{17.5\text{mm}} \right] \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00}; 3631.3\text{kNm} \right\} \Rightarrow M_{V,Rd} = 3284.2\text{kNm}$$

Κάμψη και αξονική δύναμη

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-7), (5-8) προκύπτει:

$$\frac{N_{Ed}}{0.25 \cdot N_{pl,Rd}} = 2.17 \geq 1.00 \quad \text{και} \quad \frac{N_{Ed}}{(0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f / \gamma_{Mo})} = 2.82 \geq 1.00, \quad \text{άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα}$$

με την εξ. (5-10) προκύπτει:

$$M_{N,y,Rd} = \min \left\{ 3284.2\text{kNm} \cdot \left( \frac{1-0.543}{1-0.5 \cdot 0.407} \right); 3284.2\text{kNm} \right\} \Rightarrow M_{N,y,Rd} = 1885.35\text{kNm}$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5-9) προκύπτει:

$\frac{N_{Ed}}{(h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0})} = 1.41 \geq 1.00$ , άρα απαιτείται απομείωση και σύμφωνα με την εξ. (5-14) προκύπτει:

$$M_{N,z,Rd} = 551.3 \text{ kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0.543 - 0.407}{1 - 0.407} \right)^2 \right] \Rightarrow M_{N,z,Rd} = 522.5 \text{ kNm}$$

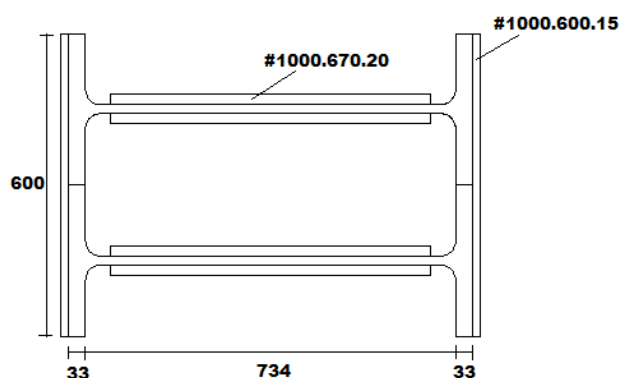
#### Βαθμός αξιοποίησης

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1730.95 \text{ kNm}}{1885.35 \text{ kNm}} = 0.92 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{3311.6 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{522.5 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2503.7 \text{ kN}}{3311.6 \text{ kN}} = 0.76$$

Οι βαθμοί αξιοποίησης τόσο έναντι ροπήs όσο και έναντι τέμνουσας είναι μεγάλοι. Αυτό σημαίνει ότι σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της θέσης σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα, η διατομή της τραβέρσας οριακά μπορεί να ανταπεξέλθει από μόνη της στις απαιτήσεις των εντατικών μεγεθών. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο, τα ενισχυτικά ελάσματα τόσο του κορμού όσο και των πελμάτων να εκτείνονται σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της θέσης αυτής.

Στο Σχήμα 5-11 απεικονίζεται η ενίσχυση της διατομής 2HEB800 της τραβέρσας με χρήση ενισχυτικών ελασμάτων κορμού και πελμάτων, διαστάσεων που έχουν προκύψει ανωτέρω, και εκτείνονται σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν του σημείου σύνδεσης του διαγωνίου στοιχείου με την τραβέρσα, δηλαδή συνολικά εκτείνονται σε απόσταση 1.00m.



Σχήμα 5-11: Ενίσχυση διατομής τραβέρσας 2HEB800 με ενισχυτικά ελάσματα κορμού και πελμάτων τα οποία εκτείνονται σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν του σημείου σύνδεσης διαγωνίου στοιχείου με τραβέρσα

#### Διεύθυνση Y

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής HEB00, η κατηγορία της διατομής της τραβέρσας και τα μεγέθη αντοχής της, έχουν αναφερθεί εκτενώς στην αρχή της υποπαραγράφου 5.3.1.1. Επομένως παρουσιάζονται κατευθείαν οι έλεγχοι διατομής στις κρίσιμες θέσεις ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, οι κρίσιμες θέσεις στην διεύθυνση αυτή της τραβέρσας είναι το άνοιγμα και η στήριξη (σύνδεση διαγωνίου μέλους με τραβέρσα) του μεσαίου φατνώματος.

#### Θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους - τραβέρσας

Στον Πίνακα 5-16 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού στη θέση σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα.

Πίνακας 5-16: Μεγέθη σχεδιασμού (Στη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους με τραβέρσα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
6932.9	2572.7	0	0	2651.4

Η κατάσταση είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε για τη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους με τραβέρσα κατά τη μελέτη στην διεύθυνση X. Δηλαδή παρόλο που χρησιμοποιήθηκε εξ' αρχής ενισχυτικό έλασμα στον κορμό, η υπάρχουσα ροπή αντοχής δεν επαρκεί για να καλύψει τις απαιτήσεις αφού προκύπτει βαθμός αξιοποίησης ίσος με:

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{2572.7\text{kNm}}{1893.6\text{kNm}} = 1.36 > 1.00, \text{ επομένως κρίνεται απαραίτητη η αύξηση της ροπής αντοχής της}$$

διατομής μέσω της χρήσης ενισχυτικού ελάσματος στα πέλματα. Χρησιμοποιώντας ακριβώς τα ίδια ενισχυτικά ελάσματα πελμάτων με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη στην διεύθυνση X, προκύπτει εν τέλει οι εξής βαθμοί αξιοποίησης:

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1730.95\text{kNm}}{3176.24\text{kNm}} = 0.81 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{8804.54\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{551.3\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2651.4\text{kN}}{8804.54\text{kN}} = 0.30$$

Άρα με χρήση ενισχυτικών ελασμάτων στο κορμό και στα πέλματα προκύπτουν αποδεκτοί βαθμοί αξιοποίησης, δηλαδή μικρότεροι της μονάδας.

Το ζητούμενο, και στην περίπτωση αυτή, είναι μέχρι ποια απόσταση εκατέρωθεν της θέσης αυτής θα εκτείνονται τα ενισχυτικά αυτά ελάσματα.

#### **Σε απόσταση 0.5m από τη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους - τραβέρσας**

Στον Πίνακα 5-17 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού σε απόσταση 0.5m από τη θέση σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα.

Πίνακας 5-17: Μεγέθη σχεδιασμού (Σε απόσταση 0.5m από τη θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους με τραβέρσα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub>(kN)</b>
6927.1	153.9	0	0	2136.7

Ο έλεγχος στην θέση αυτή γίνεται χωρίς την χρήση κανενός βοηθητικού ελάσματος. Δηλαδή κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί αν η διατομή μπορεί να ανταπεξέλθει από μόνη της στις απαιτήσεις των εντατικών μεγεθών στην θέση αυτή.

Λαμβάνοντας υπόψη την απομείωση της ροπής αντοχής λόγω τέμνουσας και αξονικής, προκύπτουν οι κάτωθι βαθμοί αξιοποίησης:

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{153.9\text{kNm}}{1837.5\text{kNm}} = 0.08 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0\text{kN}}{3311.6\text{kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0\text{kNm}}{502.2\text{kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2136.7\text{kN}}{3311.6\text{kN}} = 0.65$$

Από τους ανωτέρω βαθμούς αξιοποίησης γίνεται αντιληπτό ότι το μόνο αξιόλογο δρών μέγεθος σε απόσταση 0.5m από την θέση σύνδεσης διαγωνίου μέλους – τραβέρσας είναι η τέμνουσα, η οποία από ότι φαίνεται είναι επαρκώς μικρότερη από την τέμνουσα αντοχής. Οπότε μία αρκετά ασφαλής θεώρηση είναι να εκτείνονται τα ενισχυτικά ελάσματα κορμού και πελμάτων σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της θέσης σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με την τραβέρσα.

### Άνοιγμα – Μεσαίο Φάτνωμα

Στον Πίνακα 5-18 παρουσιάζονται τα μεγέθη σχεδιασμού στη θέση του ανοίγματος του μεσαίου φατνώματος.

Πίνακας 5-18: Μεγέθη σχεδιασμού (Άνοιγμα – Μεσαίο Φάτνωμα)

<b>N (kN)</b>	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	<b>V<sub>y</sub> (kN)</b>	<b>V<sub>z</sub> (kN)</b>
6918.3	1745.1	0	0	237.2

Χωρίς την χρήση ενισχυτικών ελασμάτων, ούτε κορμού ούτε πελμάτων, προκύπτουν οι εξής βαθμοί αξιοποίησης:

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{1745.1 \text{ kNm}}{1899.2 \text{ kNm}} = 0.92 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{0 \text{ kN}}{3311.6 \text{ kN}} = 0.00$$

$$\frac{M_{Ed,z}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0 \text{ kNm}}{534.2 \text{ kNm}} = 0.00 \quad \frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{237.2 \text{ kN}}{3311.6 \text{ kN}} = 0.07$$

Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται η διατομή επαρκεί οριακά για την παραλαβή της δρώσας ροής.

#### 5.3.1.2 Έλεγχος επάρκειας μέλους τραβέρσας

Το μέλος της τραβέρσας στηρίζεται κατακορύφως σε κοντούς προβόλους που εξέχουν από τους πασσάλους, δεσμεύεται οριζοντίως από τις αντηρίδες οι οποίες έχουν αρκετά μεγάλη διατομή ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι κρατούν ακλόνητο το σημείο επαφής τους με την τραβέρσα και επίσης από την εξωτερική πλευρά της τραβέρσας υπάρχει το έδαφος το οποίο έχει επενδυθεί με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15cm. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την μεγάλη διατομή της αντηρίδας, συνηγορούν στο ότι είναι εύλογο το μέλος της τραβέρσας να μην κινδυνεύει από λυγισμό του μέλους του. Βέβαια, πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το μέγεθος της επιβαλλόμενης θλιπτικής αξονικής στο μέλος της τραβέρσας είναι αξιόλογο. Επομένως κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος μέλους της τραβέρσας και κατά τις δύο διευθύνσεις X, Y.

Στην περίπτωση ελέγχου του λυγισμού του μέλους, δεν είναι σωστό να γίνει η θεώρηση που έγινε στον έλεγχο διατομής, το ότι δηλαδή μπορεί να εξεταστεί η μισή διατομή (HEB800) με τα μισά εντατικά μεγέθη αντί όλης της διατομής με τα συνολικά εντατικά μεγέθη. Και τούτο γιατί στον λυγισμό παίζει ρόλο η γεωμετρία της διατομής. Επομένως χρειάζεται η συνολική διατομή για μπορέσει να ελεγχθεί η συμπεριφορά της έναντι λυγισμού.

#### Διεύθυνση X

Τα κρίσιμα φατνώματα ελέγχου είναι το 1<sup>ο</sup> φάτνωμα (ή ισοδύναμα το τελευταίο) και το κεντρικό φάτνωμα (Γενική Περίπτωση). Τα φατνώματα στην περιοχή σύνδεσης διαγωνίου - τραβέρσας δεν είναι τόσο κρίσιμα όσο τα ανωτέρω, καταρχάς γιατί το μήκος λυγισμού περί τον γ-γ είναι 4m αντί 4.5m και επίσης διότι τα εντατικά μεγέθη έχουν μεγάλες τιμές μόνο στο σημείο σύνδεσης της διαγωνίου με την τραβέρσα. Στις υπόλοιπες θέσεις έχουν αρκετά μικρότερες τιμές συγκριτικά με αυτές που παρουσιάζονται στα ανωτέρω φατνώματα ελέγχου.

Τα δεδομένα και η κατηγορία διατομής προσδιορίστηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής που πραγματοποιήθηκε κατά την διεύθυνση X.

#### Παράμετροι αντοχής

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \tag{5-16}$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (5-2) και (5-16) προκύπτει:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{668 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 23714 \text{ kN} \text{ και } N_{Rk} = A \cdot f_y = 668 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 23714 \text{ kN}$$

Από την εξ. (5-5) προκύπτει:

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{323.15 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 6623.3 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{323.15 \text{ cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 6623.3 \text{ kN}$$

Τα μεγέθη  $M_{pl,y,Rd}$  και  $M_{pl,z,Rd}$  υπολογίστηκαν με βάση την θεώρηση καταπόνησης της διατομής της τραβέρσας υπό καθαρή κάμψη στην κατάσταση πλήρους διαρροής. Και προκύπτει:

$$M_{pl,y,Rd} = 7064.6 \text{ kNm} \text{ και } M_{y,Rk} = 7064.6 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = 3476.7 \text{ kNm} \text{ και } M_{pl,z,Rd} = 3476.7 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

#### 1) Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της τραβέρσας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

#### 2) Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (5-17)$$

Όπου η εξ. (5-17) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5-18)$$

$$L_{cr} = k \cdot L \quad (5-19)$$

$$i = i_y = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5-20)$$

Από την εξ. (5-18) προκύπτει  $\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$

Στο οριζόντιο επίπεδο η τραβέρσα εξασφαλίζεται πλήρως από τις αντηρίδες, επομένως το μήκος λυγισμού ισούται με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών αντηρίδων. Άρα είναι  $L_{cr,y} = 4.5 \text{ m}$ .

Βέβαια αυτή είναι προσέγγιση υπέρ της ασφαλείας. Και τούτο γιατί, η σύνδεση αντηρίδας – τραβέρσας γίνεται με τους κοχλίες εκτός της διατομής της σύνδεσης, επομένως η σύνδεση τείνει προς πάκτωση και

όχι προς απλή στήριξη. Αλλά επειδή δεν είναι και πάκτωση ώστε να μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι  $L_{cr,y}=0.5 \cdot 4.5\text{m}=2.25\text{m}$ , γίνεται η προσέγγιση, υπέρ της ασφαλείας, της απλής στήριξης της τραβέρσας επί της αντηρίδας. Επομένως θεωρείται απλουστευτικά, και υπέρ της ασφαλείας, ότι  $L_{cr,y}=4.5\text{m}$ .

Στο κατακόρυφο επίπεδο η τραβέρσα εδράζεται ακλόνητα στους βραχείς προβόλους που εξέρχουν από τους πασσάλους. Επομένως το μήκος λυγισμού στην κατακόρυφη διεύθυνση ισούται με  $L_{cr,z}=3.6\text{m}$ .

Οι ροπές αδρανείας υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις (εξ.(5-20)):

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{718200\text{cm}^4}{668\text{cm}^2}} = 32.79\text{cm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{180100\text{cm}^4}{668\text{cm}^2}} = 16.42\text{cm}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στην εξ. (5-17) προκύπτει:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{4.5\text{m}}{32.79\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.180$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{3.6\text{m}}{16.42\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.287$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για συγκολλητή κιβωτιοειδείς διατομή, με  $b/t_f < 30$ , εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού c.

Συντελεστής ατελειών(a):

$a=0.49$  για καμπύλη λυγισμού c.

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή χ:

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (5-21)$$

$$x = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (5-22)$$

Από την εξ. (5-21) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.18 - 0.2) + 0.18^2] = 0.511$$

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.287 - 0.2) + 0.287^2] = 0.562$$

Επομένως ο μειωτικός συντελεστής x είναι (εξ.(5-22)):

$$x_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.511 + \sqrt{0.511^2 - 0.180^2}} = 1.00$$

$$x_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.562 + \sqrt{0.562^2 - 0.287^2}} = 0.956$$

Παρατηρείται ότι οι μειωτικοί συντελεστές επηρεάζουν εν τέλει ελάχιστα της αξονική αντοχή της διατομής της τραβέρσας.

3) Συντελεστές αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  και σύνθετος έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Πίνακας 5-19: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροπή	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	γ-γ	z-z
$C_{mz}$	z-z	γ-γ

Από τον Πίνακα Πίνακας 5-19 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροπή.

Ανάλογα με το φάτνωμα ελέγχου διαφοροποιούνται οι τιμές των  $M_h$  και  $M_s$  και κατ' επέκταση οι τιμές των συντελεστών  $C_m$  και άρα και των συντελεστών αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση της τραβέρσας, τα φατνώματα ελέγχου είναι δύο. Το 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και το κεντρικό φάτνωμα (Γενική περίπτωση).

Θα υπολογιστούν ξεχωριστά για καθένα από τα φατνώματα ελέγχου οι συντελεστές αλληλεπίδρασης και θα ακολουθήσει ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, οι τιμές του διαγράμματος καμπτικών ροών  $M_z$  είναι μικρές και επομένως είναι αμελητέο μπροστά στα υπόλοιπα διαγράμματα εντατικών μεγεθών. Άρα η ύπαρξή του παραλείπεται και απλουστευτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι  $M_z=0\text{kNm}$ .

Επομένως στον σύνθετο έλεγχο, λόγω κάμψης και θλίψης, οι συντελεστές  $k_{zz}$  και  $k_{yz}$  δεν υπολογίζονται διότι από την στιγμή που  $M_z=0\text{kNm}$  δεν έχουν κάποιο φυσικό νόημα. Άρα κατ' επέκταση ούτε ο συντελεστής ροπή  $C_{mz}$  υπολογίζεται.

### 1ο Φάτνωμα

Παρατηρώντας το διάγραμμα καμπτικών ροών  $v$  (Σχήμα 5-9) προκύπτουν τα εξής μεγέθη ροπή:

- στο άκρο ίση με  $M_h = -4189.6\text{kNm}$
- στο μέσο ίση με  $M_s = 2779.4\text{kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. Β), είναι:

$$- a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{2779\text{kNm}}{-4189.6\text{kNm}} \Rightarrow a_s = -0.66$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το φορτίο ωθήσεων, από το οποίο προκαλείται το διάγραμμα ροών, επιβάλλεται ομοιόμορφα στο μέλος της τραβέρσας

Άρα προκύπτει:  $C_{my} = 0.1 - 0.8 \cdot a_s = 0.1 - 0.8 \cdot (-0.66) \Rightarrow C_{my} = 0.631 \geq 0.4$

### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα B.1 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Επί το δυσμενέστερο, θεωρείται ότι η αξονική δύναμη είναι σταθερή στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και ίση με τη μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Άρα είναι  $N_{Ed} = 11511.2\text{kN}$ .

Ο πίνακας B.1 αφορά διατομές I και RHS. Η διατομή της τραβέρσας είναι συγκολλητή διατομή δυο διατομών τύπου I. Τα προεξέχοντα τμήματα των πελμάτων της διατομής μπορούν απλουστευτικά να παραλειφθούν, επομένως η διατομή μετατρέπεται σε τύπου RHS. Άρα μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχες εξισώσεις του πίνακα B.1 (εξ. (5-23), (5-24)).



$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (5-23)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (5-24)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-23) και (5-24) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 5-20.

Πίνακας 5-20: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.625
$k_{zy}$	0.375

### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z = 0 \text{ kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (5-25)$$

$$\frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} \leq 1.0 \quad (5-26)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-25) και (5-26) προκύπτει:

$$0.49 + 0.37 = 0.86 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-25)}$$

$$0.51 + 0.22 = 0.73 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-26)}$$

### **Κεντρικό Φάτνωμα**

Παρατηρώντας το διάγραμμα ροπών (Σχήμα 5-9) προκύπτουν τα εξής μεγέθη ροπής:

- στο άκρο ίση με  $M_h = -3301.8 \text{ kNm}$
- στο μέσο ίση με  $M_s = 1545.1 \text{ kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. B), είναι:

$$- a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{1545.1 \text{ kNm}}{-3301.8 \text{ kNm}} \Rightarrow a_s = -0.47$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες
- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το φορτίο ωθήσεων, από το οποίο προκαλείται το διάγραμμα ροπών, επιβάλλεται ομοιόμορφα στο μέλος της τραβέρσας

Άρα προκύπτει:  $C_{my} = 0.1 - 0.8 \cdot \alpha_s = 0.1 - 0.8 \cdot (-0.47) \Rightarrow C_{my} = 0.474 \geq 0.4$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα Β.1 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Επί το δυσμενέστερο, θεωρείται ότι η αξονική δύναμη είναι σταθερή στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα και ίση με τη μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Άρα είναι  $N_{Ed} = 8508.5 \text{ kN}$ .

Ο πίνακας Β.1 αφορά διατομές Ι και RHS. Η διατομή της τραβέρσας είναι συγκολλητή διατομή δυο διατομών τύπου Ι. Τα προεξέχοντα τμήματα των πελμάτων της διατομής μπορούν απλουστευτικά να παραλειφθούν, επομένως η διατομή μετατρέπεται σε τύπου RHS. Άρα μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχες εξισώσεις του πίνακα Β.1 (εξ. (5-23), (5-24)).

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-23) και (5-24) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 5-21.

Πίνακας 5-21: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	0.471
$k_{zy}$	0.283

Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z = 0 \text{ kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-25) και (5-26) προκύπτει:

$$0.36 + 0.22 = 0.58 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-25)}$$

$$0.38 + 0.13 = 0.51 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-26)}$$

Συμπερασματικά, κοιτώντας τους ελέγχους επάρκειας μέλους και για τα δυο αυτά φάτνωμα ελέγχου, γίνεται αντιληπτό ότι ο όρος της αξονικής δύναμης στον έλεγχο έχει αυξηθεί ραγδαία σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το χωρίο εκσκαφής αντιστηριζόταν μόνο στις δυο μεγάλες πλευρές του, κάτι το οποίο είναι λογικό διότι η θλιπτική αξονική που επιβάλλεται στο μέγεθος της τραβέρσας είναι μεγάλη. Επίσης παρατηρείται ότι ο έλεγχος μέλους είναι κρισιμότερος στο 1<sup>ο</sup> φάτνωμα, αφού τα εντατικά μεγέθη εκεί είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά που αναπτύσσονται στο κεντρικό φάτνωμα.

### **Διεύθυνση Y**

Το κρισιμότερο φάτνωμα ελέγχου είναι αποκλειστικά το μεσαίο φάτνωμα. Όμως, για λόγους πληρότητας, πραγματοποιείται ο έλεγχος μέλους και στο ακριανό φάτνωμα, διότι παρόλο το ότι το μέγεθος της αξονικής στο φάτνωμα αυτό είναι αρκετά πιο μικρό σε σχέση με αυτό του μεσαίου φάτνωματος, η τιμή της ροπής στο άνοιγμα και στη στήριξη είναι αξιοσημείωτη. Άρα εν τέλει τα φάτνωμα ελέγχου είναι δύο.

Τα δεδομένα και η κατηγορία διατομής προσδιορίστηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής που πραγματοποιήθηκε κατά την διεύθυνση Y.

Επαναλαμβάνεται ακριβώς η ίδια διαδικασία με αυτή που ακολουθήθηκε κατά την μελέτη στην διεύθυνση X. Η μόνη διαφοροποίηση στην περίπτωση αυτή είναι ότι το μήκος λυγισμού για λυγισμό περί τον y-y

άξονα είναι ίσο με 5m, και όχι με 4.5m, διότι τα διαγώνια στοιχεία, τα οποία είναι αυτά που λειτουργούν ως στήριξη για την τραβέρσα της διεύθυνσης αυτής και εμποδίζουν τον λυγισμό της περί τον γ-γ άξονα, ισομοιράζουν το μήκος της τραβέρσας ανά 5m. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν απευθείας τα τελικά αποτελέσματα των ελέγχων για το εκάστοτε φάτνωμα ελέγχου.

### **Μεσαίο Φάτνωμα**

#### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z=0\text{kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-25) και (5-26) προκύπτει:

$$0.58+0.23=0.81 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-25)}$$

$$0.61+0.14=0.75 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-26)}$$

### **Ακριανό Φάτνωμα**

#### Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

Ακολουθεί ο σύνθετος έλεγχος επάρκειας του μέλους της αντηρίδας. Είναι  $M_z=0\text{kNm}$ , επομένως ο τρίτος όρος του ελέγχου παραλείπεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται η θεώρηση, υπέρ της ασφαλείας, ότι η αξονική είναι σταθερή στο φάτνωμα και ίση με την μεγαλύτερη τιμή της που παρουσιάζεται στο φάτνωμα αυτό. Ομοίως και για την ροπή  $M_y$  χρησιμοποιείται στον έλεγχο η μέγιστη τιμή ροπής που παρουσιάζεται στο φάτνωμα, που είναι στη στήριξη.

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-25) και (5-26) προκύπτει:

$$0.10+0.49=0.59 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-25)}$$

$$0.11+0.29=0.40 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-26)}$$

Από τους ανωτέρω ελέγχους και στα δυο φάτνωματά είναι φανερό ότι κρισιμότερος είναι ο έλεγχος στο μεσαίο φάτνωμα σε σχέση με το κεντρικό, διότι στο φάτνωμα αυτό τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά του ακριανού φάτνωματος.

#### 5.3.1.3 Σύνοψη

Συμπερασματικά, με βάση τα αποτελέσματα των ελέγχων διατομής και μέλους που πραγματοποιήθηκαν για τα μέλη των τραβερσών στις διευθύνσεις X και Y, προκύπτουν τα εξής:

Για το μέλος της τραβέρσας κατά την διεύθυνση X απαιτείται ενίσχυση της διατομής 2HEB800 στη θέση στήριξης του 1<sup>ου</sup> και του τελευταίου φάτνωματος με χρήση ενισχυτικού ελάσματος στον κορμό διαστάσεων 670mm x 20mm και στη θέση σύνδεσης διαγωνίου στοιχείου με τραβέρσα με ενισχυτικό έλασμα κορμού ίδιων διαστάσεων και ενισχυτικό έλασμα πέλματος διαστάσεων 600mm x 15mm. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις τα ενισχυτικά ελάσματα θα εκτείνονται μέχρι απόσταση 0.5m εκατέρωθεν των θέσεων αυτών.

Για το μέλος της τραβέρσας κατά την διεύθυνση Y απαιτείται ενίσχυση της διατομής 2HEB800 στη θέση σύνδεσης διαγωνίου στοιχείου με τραβέρσα με ενισχυτικό έλασμα κορμού και πέλματος με διαστάσεις

ακριβώς ίδιες όπως ανωτέρω και το οποίο θα εκτείνεται μέχρι απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της θέσης αυτής.

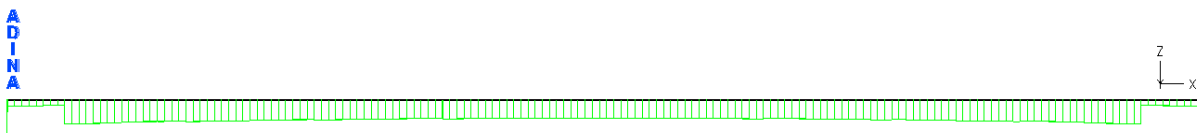
Από άποψη λυγισμού του μέλους, οι τραβέρσες και των δύο διευθύνσεων δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο. Το μόνο που πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί είναι ότι υπάρχει ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού του μέλους της τραβέρσας, όπου δηλαδή και τα 83.5m της τραβέρσας της διεύθυνσης X, ή 15m αντιστοίχως για την τραβέρσα της διεύθυνσης Y, να μετακινηθούν προς τα πάνω λόγω του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου. Αυτή η μορφή παραμορφωσιακής εικόνας μπορεί να εμφανιστεί διότι οι βραχείς πρόβολοι δεσμεύουν την κίνηση του μέλους της τραβέρσας μόνο προς τα κάτω και όχι και προς τα πάνω. Άρα, για να αποφευχθεί αυτή η παραμορφωσιακή εικόνα λόγω λυγισμού, κρίνεται σκόπιμο κατά την διαδικασία της κατασκευής να υπάρξει τέτοια διαμόρφωση στη θέση απλής έδρασης της τραβέρσας πάνω στον εκάστοτε βραχύ πρόβολο, ώστε στις θέσεις αυτές να μην υπάρχει κατακόρυφη δέσμευση μόνο για κίνηση προς τα κάτω αλλά και για κίνηση προς τα πάνω.

### 5.3.2 Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

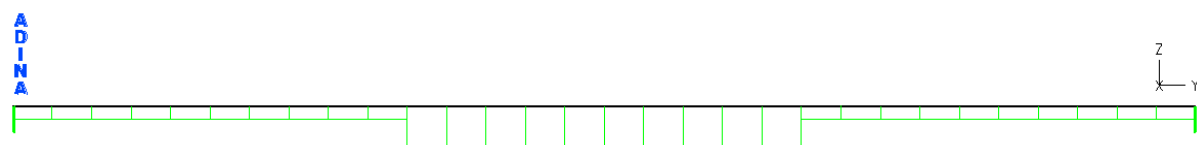
Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία μέσω των ελέγχων διατομής και μέλους των τραβερσών στις διευθύνσεις X και Y προέκυψε οριακή διατομή για την τραβέρσα στην διεύθυνση X και για την τραβέρσα στην διεύθυνση Y η 2HEB700 και η 2HEB650 αντιστοίχως. Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που ακολουθούν (Σχήμα 5-12, Σχήμα 5-13, Σχήμα 5-14, Σχήμα 5-15) προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω οριακές διατομές για τις τραβέρσες της διεύθυνσης X και Y.

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών τραβέρσας κάτω στάθμης

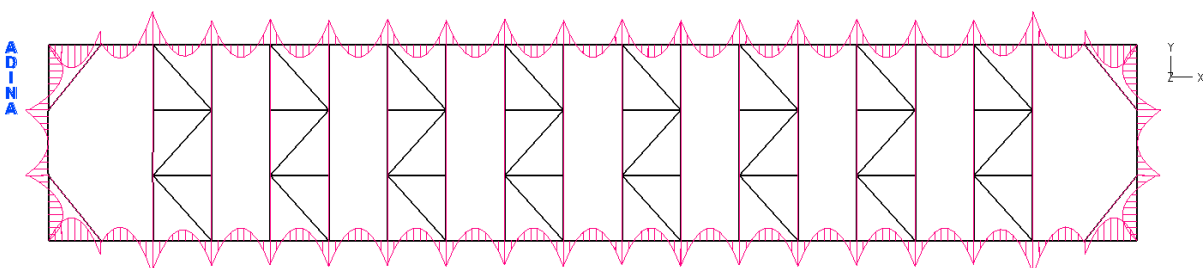
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-12, Σχήμα 5-13, Σχήμα 5-14, Σχήμα 5-15) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον στατικό συνδυασμό φόρτισης του Πίνακα 5-1.



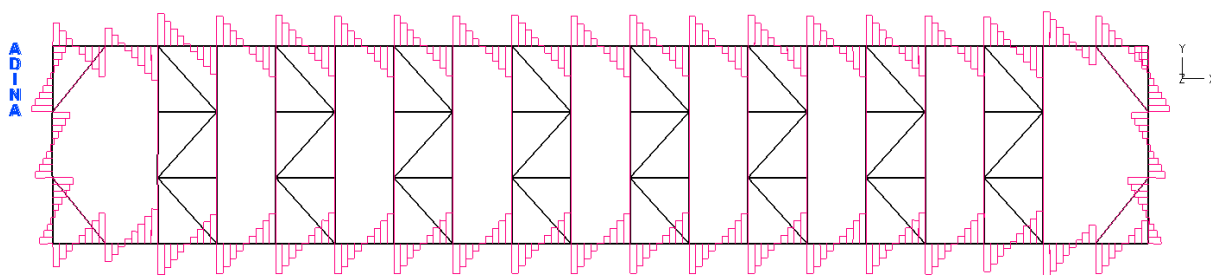
Σχήμα 5-12: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=6383.5\text{kN}$ – Διαμήκης διεύθυνση



Σχήμα 5-13: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=10259.6\text{kN}$  – Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-14: Διάγραμμα καμπικών ροπών  $M_y$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $M_y=4553.9\text{kNm}$ – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-15: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $V_z = 4372.3\text{kN}$  – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση

Εφαρμόζοντας την ίδια ακριβώς λογική με αυτή που ακολουθήθηκε στις υποπαραγράφους 5.3.1.1 και 5.3.1.2, πραγματοποιούνται οι έλεγχοι διατομής και μέλους για τις τραβέρσες και κατά τις δύο διευθύνσεις X, Y και εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση X απαιτείται η χρήση της διατομής 2HEB700, η οποία πρέπει να ενισχυθεί τοπικά με ενισχυτικό έλασμα κορμού διαστάσεων 580mm x 20mm, το οποίο θα εκτείνεται σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της στήριξης του 1<sup>ου</sup> και του τελευταίου φατνώματος.

Για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση Y απαιτείται η χρήση της διατομής 2HEB650, χωρίς να απαιτείται τοπικά η ενίσχυσή της σε κάποια θέση.

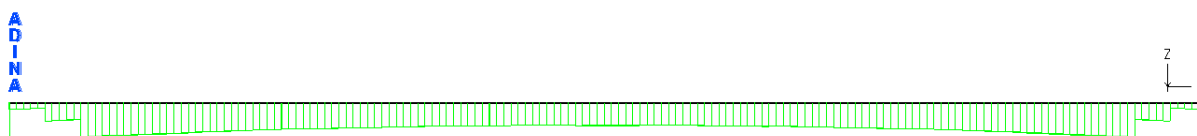
Από άποψη λυγισμού του μέλους, οι τραβέρσες και των δύο διευθύνσεων δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο. Το μόνο που πρέπει να τονιστεί είναι αυτό που αναφέρθηκε και στην υποπαραγράφο 5.3.1.3, ότι δηλαδή υπάρχει ο κίνδυνος λυγισμού του συνολικού μήκους της τραβέρσας, και πιο συγκεκριμένα να μετακινηθεί όλο το μέλος προς τα πάνω αφού δεν εμποδίζεται από κάτι. Για το λόγο αυτό, στην επί τόπου τοποθέτηση των τραβερσών επί των βραχέων προβόλων, πρέπει να υπάρξει ειδική διαμόρφωση ώστε να εμποδίζεται η κατακόρυφη κίνηση όχι μόνο προς τα κάτω αλλά και προς τα πάνω.

### 5.3.3 Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

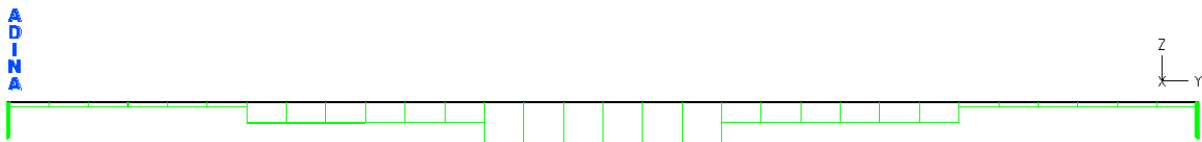
Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία μέσω των ελέγχων διατομής και μέλους των τραβερσών στις διευθύνσεις X και Y προέκυψε οριακή διατομή για την τραβέρσα στην διεύθυνση X και για την τραβέρσα στην διεύθυνση Y η 2HEB800 και η 2HEB650 αντιστοίχως. Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που ακολουθούν (Σχήμα 5-16, Σχήμα 5-17, Σχήμα 5-18, Σχήμα 5-19) προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω οριακές διατομές για τις τραβέρσες της διεύθυνσης X και Y.

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών τραβέρσας κάτω στάθμης

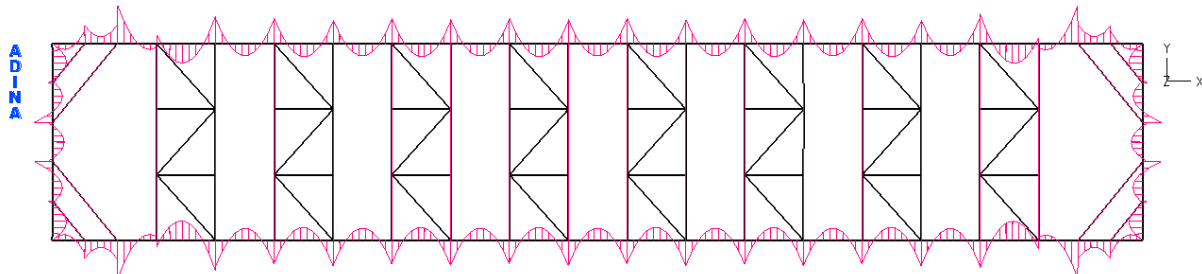
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-16, Σχήμα 5-17, Σχήμα 5-18, Σχήμα 5-19) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον στατικό συνδυασμό φόρτισης του Πίνακα 5-1.



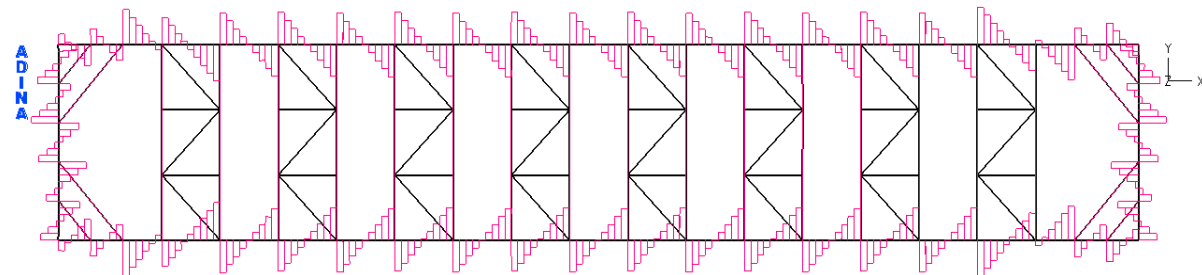
Σχήμα 5-16: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=12740.1\text{kN}$ – Διαμήκης διεύθυνση



Σχήμα 5-17: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=14042.3\text{kN}$  – Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-18: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $M_y=4641.8\text{kNm}$ – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-19: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $V_z =4567.6\text{kN}$  – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση

Εφαρμόζοντας την ίδια ακριβώς λογική με αυτή που ακολουθήθηκε στις υποπαραγράφους 5.3.1.1 και 5.3.1.2, πραγματοποιούνται οι έλεγχοι διατομής και μέλους για τις τραβέρσες και κατά τις δύο διευθύνσεις  $X$ ,  $Y$  και εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Το μέγεθος του διαγράμματος αξονικών δυνάμεων δεν μεταβάλλεται σε σχέση με την περίπτωση της υποπαραγράφου 5.3.1. Δηλαδή παρά την νέα αυτή διαμόρφωση, το αξονικό φορτίο που πρέπει να παραλάβουν οι δύο τραβέρσες της διεύθυνσης  $X$  και οι άλλες δύο της διεύθυνσης  $Y$ , ισούται με το μισό κατανομημένο της μικρής και της μεγάλης πλευράς αντιστοίχως. Η διαφορά είναι ότι λόγω της χρήσης δύο διαγωνίων στοιχείων στο κάθε άκρο της εκσκαφής, η μετάβαση της αξονικής στο μέλος της τραβέρσας γίνεται πιο ομαλά, με συνέπεια η απομείωση της ροπής αντοχής λόγω του μεγέθους της αξονικής να μην είναι τόσο μεγάλη στην εκάστοτε διατομή. Άρα η διατομή της τραβέρσας θα επαρκεί από μόνη της σε περισσότερες θέσεις ή αν χρειάζεται ενίσχυση, τα ενισχυτικά ελάσματα που θα απαιτούνται θα είναι μικρότερων διαστάσεων σε σχέση με αυτά της υποπαραγράφου 5.3.1, κάτι το οποίο γίνεται φανερό και από τα παρακάτω.

Για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση  $X$  υφίστανται ακριβώς οι ίδιες απαιτήσεις με αυτές που παρουσιάστηκαν για το μέλος της τραβέρσας στην ίδια διεύθυνση αλλά με χρησιμοποίηση ενός διαγωνίου στοιχείου στο κάθε άκρο της εκσκαφής (5.3.1) και όχι δύο, όπως είναι στην περίπτωση αυτή. Η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι λόγω της νέας αυτής διαμόρφωσης του χωρίου της εκσκαφής στα άκρα του, τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη ( $M$ ,  $V$ ) στο μέλος της τραβέρσας είναι λίγο απομειωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη της περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ένα διαγώνιο μέλος στο κάθε άκρο της εκσκαφής. Επομένως, μπορεί να απαιτείται η χρησιμοποίηση ίδιας διατομής, δηλαδή της

2HEB800 αλλά τα ενισχυτικά ελάσματα κορμού και πελμάτων θα είναι μικρότερων διαστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, στην στήριξη του 1<sup>ου</sup> και του τελευταίου φατνώματος απαιτείται ενισχυτικό έλασμα διαστάσεων 670mm x 10mm, και όχι πάχους 20mm που είχε χρειαστεί στην περίπτωση της υποπαραγράφου 5.3.1, το οποίο θα εκτείνεται σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν των στηρίξεων αυτών. Επίσης, για τη θέση σύνδεσης του διαγωνίου μέλους με το μεγάλο μήκος με την τραβέρσα, απαιτείται ενισχυτικό έλασμα κορμού ίδιων διαστάσεων με ανωτέρω και ενισχυτικό έλασμα πελμάτων διαστάσεων 600mm x 5mm, και όχι πάχους 15mm που είχε χρειαστεί στην περίπτωση της υποπαραγράφου 5.3.1, τα οποία θα εκτείνονται σε απόσταση 0.5m εκατέρωθεν της θέσης αυτής.

Για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση Y απαιτείται η χρήση της διατομής 2HEB650, χωρίς να απαιτείται τοπικά η ενίσχυσή της σε κάποια θέση.

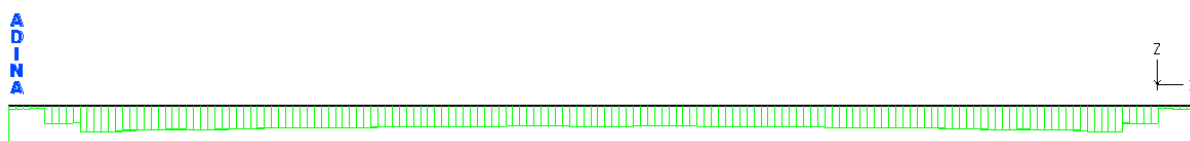
Από άποψη λυγισμού του μέλους, οι τραβέρσες και των δύο διευθύνσεων δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο. Το μόνο που πρέπει να τονιστεί είναι αυτό που αναφέρθηκε και στην υποπαραγράφο 5.3.1.3, ότι δηλαδή υπάρχει ο κίνδυνος λυγισμού του συνολικού μήκους της τραβέρσας, και πιο συγκεκριμένα να μετακινηθεί όλο το μέλος προς τα πάνω αφού δεν εμποδίζεται από κάτι. Για το λόγο αυτό, στην επί τόπου τοποθέτηση των τραβερσών επί των βραχέων προβόλων, πρέπει να υπάρξει ειδική διαμόρφωση ώστε να εμποδίζεται η κατακόρυφη κίνηση όχι μόνο προς τα κάτω, αλλά και προς τα πάνω.

#### 5.3.4 Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

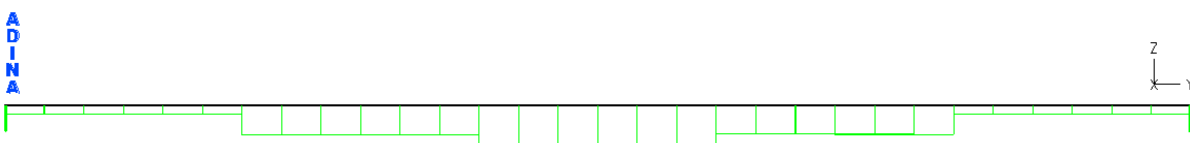
Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία μέσω των ελέγχων διατομής και μέλους των τραβερσών στις διευθύνσεις X και Y προέκυψε οριακή διατομή για την τραβέρσα στην διεύθυνση X και για την τραβέρσα στην διεύθυνση Y η 2HEB700 και η 2HEB450 αντιστοίχως. Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που ακολουθούν (Σχήμα 5-20, Σχήμα 5-21, Σχήμα 5-22, Σχήμα 5-23) προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω οριακές διατομές για τις τραβέρσες της διεύθυνσης X και Y.

#### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών τραβέρσας κάτω στάθμης

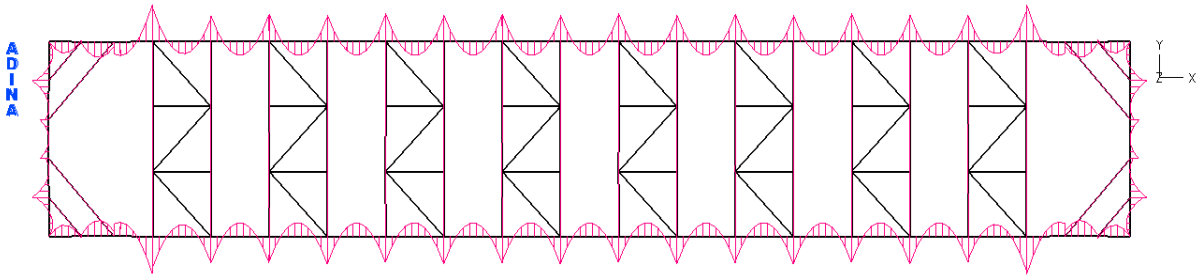
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-20, Σχήμα 5-21, Σχήμα 5-22, Σχήμα 5-23) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον στατικό συνδυασμό φόρτισης του Πίνακα 5-1.



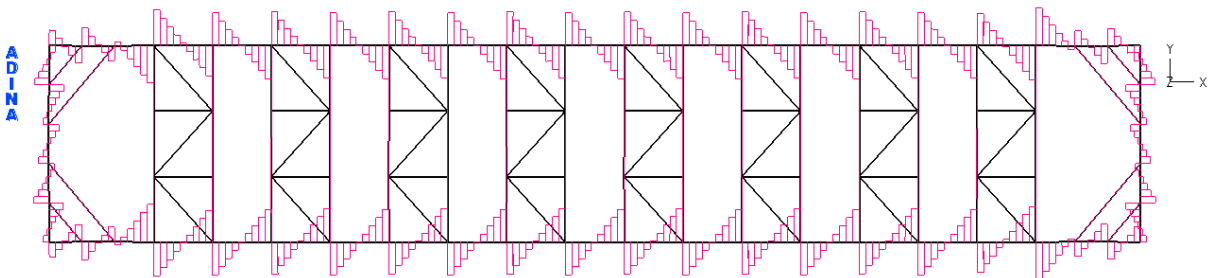
Σχήμα 5-20: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=6378.8\text{kN}$  – Διαμήκης διεύθυνση



Σχήμα 5-21: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $N=10250.8\text{kN}$  – Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-22: Διάγραμμα καμπτικών ροπών  $M_y$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $M_y=4482.5\text{kNm}$ – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5-23: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων  $V_z$  τραβέρσας με μέγιστη τιμή  $V_z = 4363.6\text{kN}$  – Διαμήκης και Εγκάρσια διεύθυνση

Εφαρμόζοντας την ίδια ακριβώς λογική με αυτή που ακολουθήθηκε στις υποπαραγράφους 5.3.1.1 και 5.3.1.2, πραγματοποιούνται οι έλεγχοι διατομής και μέλους για τις τραβέρσες και κατά τις δύο διευθύνσεις  $X$ ,  $Y$  και εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση  $X$  απαιτείται η διατομή 2HEB700, η οποία πρέπει να ενισχυθεί τοπικά με ενισχυτικό έλασμα κορμού διαστάσεων  $580\text{mm} \times 10\text{mm}$ , το οποίο θα εκτείνεται σε απόσταση  $0.5\text{m}$  εκατέρωθεν της στήριξης του  $1^{\text{ου}}$  και του τελευταίου φαντώματος.

Για το μέλος της τραβέρσας στην διεύθυνση  $Y$  απαιτείται η χρήση της διατομής 2HEB450, χωρίς να απαιτείται τοπικά η ενίσχυσή της σε κάποια θέση.

Από άποψη λυγισμού του μέλους, οι τραβέρσες και των δύο διευθύνσεων δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο. Το μόνο που πρέπει να τονιστεί είναι αυτό που αναφέρθηκε και στην υποπαραγράφο 5.3.1.3, ότι δηλαδή υπάρχει ο κίνδυνος λυγισμού του συνολικού μήκους της τραβέρσας, και πιο συγκεκριμένα να μετακινηθεί όλο το μέλος προς τα πάνω αφού δεν εμποδίζεται από κάτι. Για το λόγο αυτό, στην επί τόπου τοποθέτηση των τραβερσών επί των βραχέων προβόλων, πρέπει να υπάρξει ειδική διαμόρφωση ώστε να εμποδίζεται η κατακόρυφη κίνηση όχι μόνο προς τα κάτω, αλλά και προς τα πάνω.

## 5.4 Διαστασιολόγηση διαγωνίων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι έλεγχοι διατομής και μέλους των διαγωνίων μελών στα άκρα της εκσκαφής, για καθένα από τα εναλλακτικά συστήματα που τίθενται προς διερεύνηση (Σχήμα 5-3, Σχήμα 5-4, Σχήμα 5-5, Σχήμα 5-6).

Στόχος είναι η εκτίμηση των οριακών διατομών των διαγωνίων μελών που ικανοποιούν τις απαιτήσεις έναντι των επιβαλλόμενων εντατικών μεγεθών. Επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν οριακές διατομές ώστε να έχει νόημα η σύγκριση μεταξύ διατομών των διαγωνίων μελών διαφορετικών συστημάτων αντιστήριξης τα οποία όμως υπόκεινται στην ίδια φόρτιση, αλλά και μεταξύ διατομών των διαγωνίων μελών του ίδιου συστήματος αντιστήριξης, όταν αυτό υπόκειται σε διαφορετική φόρτιση κάθε φορά.



Τα διαγώνια μέλη που χρησιμοποιούνται στα άκρα του χωρίου της εκσκαφής αποτελούν στοιχεία δοκού, και όχι στοιχεία δικτύωματος. Δηλαδή πέραν της αξονικής, μπορούν να παραλάβουν ροπή και τέμνουσα περί των δύο αξόνων  $y-y$  και  $z-z$  της διατομής. Επίσης συνίσταται να χρησιμοποιηθεί κοίλη κυκλική διατομή (CHS) για τα διαγώνια αυτά μέλη, αφού είναι επιθυμητή η ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση.

Σε ότι αφορά τα διαγώνια στοιχεία της άνω στάθμης, πρέπει στο σημείο αυτό να ξανά επισημανθεί, ότι θα χρησιμοποιηθεί ένα διαγώνιο στοιχείο σε κάθε άκρο της εκσκαφής, είτε υφίσταται ένα είτε δύο διαγώνια στοιχεία στο κάθε άκρο της εκσκαφής στην κάτω στάθμη. Δηλαδή οι ανωτέρω διατάξεις που παρουσιάστηκαν αφορούν αποκλειστικά την κάτω στάθμη του χωρίου εκσκαφής.

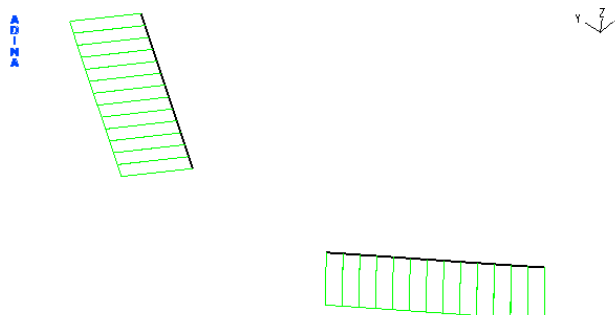
#### 5.4.1 Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά $Y$ ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά $X$

##### 5.4.1.1 Κάτω στάθμη

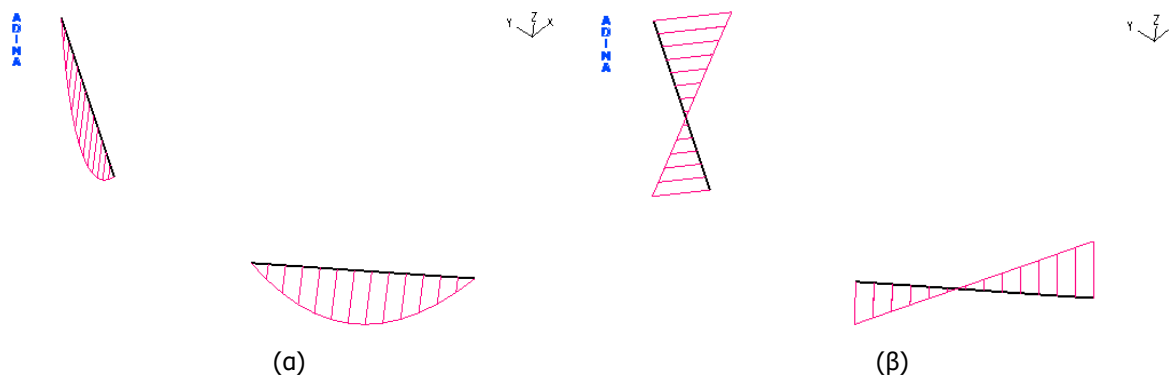
Έπειτα από επαναληπτική διαδικασία μέσω των ελέγχων διατομής και μέλους των διαγωνίων μελών προέκυψε οριακή διατομή η CHS610/40. Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που ακολουθούν (Σχήμα 5-24, Σχήμα 5-25, Σχήμα 5-26) προκύπτουν χρησιμοποιώντας την ανωτέρω οριακή διατομή.

##### Διαγράμματα εντατικών μεγεθών διαγωνίου μέλους κάτω στάθμης

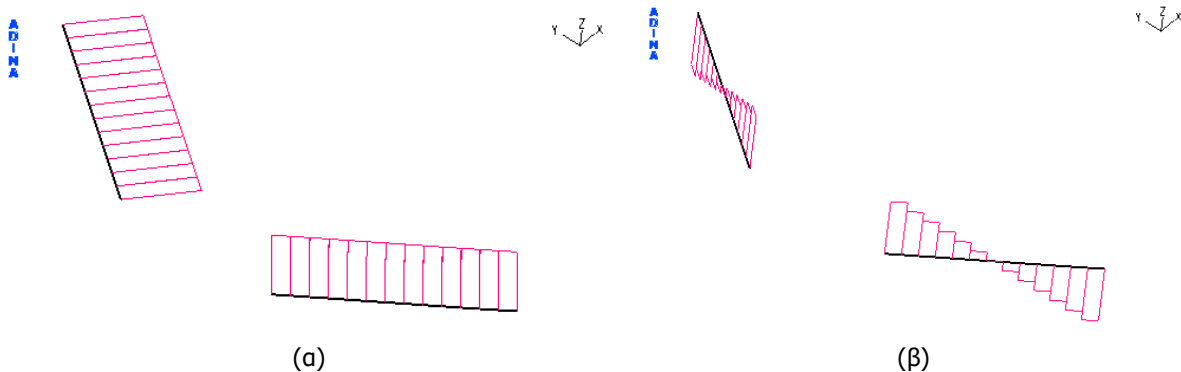
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-24, Σχήμα 5-25, Σχήμα 5-26) παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζοντας τον στατικό συνδυασμό φόρτισης του Πίνακα 5-1.



Σχήμα 5-24: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων  $N$  με μέγιστη τιμή  $N=15610.2\text{kN}$



Σχήμα 5-25: Διάγραμμα καμπτικών ρομών (α)  $M_y$  με μέγιστη τιμή  $M_y=37.95\text{kNm}$  (β)  $M_z$  με μέγιστη τιμή  $M_z=2215.3\text{kNm}$



Σχήμα 5-26: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων (α)  $V_y$  με μέγιστη τιμή  $V_y=989.3\text{kN}$  (β)  $V_z$  με μέγιστη τιμή  $V_z=22.01\text{kN}$

Στο Σχήμα 5-25 (α) παρατηρείται στα άκρα του διαγώνιου μέλους ότι η ροπή είναι μηδενική, κάτι το οποίο είναι πολύ λογικό διότι η σύνδεση διαγώνιου μέλους με τραβέρσα είναι αρθρωτή.

Η διατομή της αντηρίδας είναι κοίλη κυκλική, επομένως παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Για το λόγο αυτό, αντί να εξετάζεται η αντηρίδα ξεχωριστά στη διεύθυνση  $y-y$  και στην  $z-z$ , γίνεται επαλληλία των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών και έτσι ο έλεγχος γίνεται κατά μία διεύθυνση, αυτή της συνισταμένης του αντίστοιχου εντατικού μεγέθους.

Επομένως είναι:  $N_{Ed} = 15610.2\text{kN}$ ,  $M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} = 2215.63\text{kNm}$ ,  $V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,y}^2 + V_{Ed,z}^2} = 989.54\text{kN}$

Βέβαια, πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι οι μέγιστες τιμές των  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$  δεν εμφανίζονται στην ίδια θέση, άρα δεν είναι σωστό να γίνει η επαλληλία των μεγίστων τιμών. Αλλά η  $M_{Ed,y}$  είναι πολύ μικρότερη της  $M_{Ed,z}$ , επομένως η επαλληλία δεν παίζει και τόσο ρόλο αφού το μέγεθος της συνισταμένης είναι πλησίον της  $M_{Ed,z}$ .

### Έλεγχος επάρκειας διατομής CHS610/40 διαγωνίων μελών

Τα δεδομένα για την διατομή CHS610/40 είναι:

$f_y = 35.5\text{MPa}$  (χάλυβας S355)

$E = 21000\text{ kN/cm}^2$

$\gamma_{Mo} = 1.00$

$A = 716\text{cm}^2$

$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi} = 456\text{cm}^2$

$I = 292333\text{cm}^4$

$W_{pl} = 13017\text{cm}^3$

#### Εύρεση κατηγορίας διατομής

Αν επαληθεύεται η εξ.(5-27) τότε η διατομή είναι κατηγορίας 1. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι γενικότερη απαίτηση, οι διατομές που χρησιμοποιούνται να είναι κατηγορίας 1.

$$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \epsilon^2 \quad (5-27)$$

Είναι χάλυβας S355, επομένως  $\epsilon = 0.81$ .

$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \varepsilon^2 \Rightarrow \frac{610}{40} \leq 50 \cdot 0.81^2 \Rightarrow 15.25 \leq 32.81$ , επομένως η διατομή είναι κατηγορίας 1. Άρα θα πραγματοποιηθεί πλαστικός έλεγχος.

#### Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-28)$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-29)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} \quad (5-30)$$

Αξιοποιώντας τις εξ. (5-28), (5-29) και (5-30) προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{716 \text{cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 25418 \text{kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{13017 \text{cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1.00} = 4621 \text{kNm}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{Mo}} = \frac{456 \text{cm}^2 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3}}}{1.00} = 9342.5 \text{kN}$$

#### Κάμψη και διάτμηση

Στην περίπτωση που ισχύει η εξ. (5-31) δεν απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής.

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \quad (5-31)$$

$$\text{Είναι: } V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd} \Rightarrow 989.54 \text{kN} \leq 0.5 \cdot 9342.5 \text{kN} \Leftarrow 989.54 \text{kN} \leq 4671.3 \text{kN}$$

#### Κάμψη και αξονική δύναμη

Η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω παρουσίας αξονικής δύναμης υπολογίζεται από την εξ.(5-32).

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}), \text{ όπου } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (5-32)$$

$$\text{Επομένως είναι: } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) = 4621 \text{kNm} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{15610.2 \text{kN}}{25418 \text{kN}} \right)^{1.7} \right] = 2603.6 \text{kNm}$$

#### Βαθμός αξιοποίησης

Ο βαθμός αξιοποίησης υπολογίζεται ως ο λόγος της δρώσας ροπής προς την ροπή αντοχής.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{2215.63 \text{kNm}}{2603.6 \text{kNm}} = 0.85$$

**Έλεγχος επάρκειας**

Η επάρκεια της διατομής αξιολογείται από το λόγο της δρώσας αξονικής προς την πλαστική αξονική αντοχής και από το λόγο της δρώσας ροπής προς την πλαστική ροπή αντοχής. Και οι δυο αυτοί λόγοι πρέπει να προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

$$\text{Προκύπτει: } \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0.61 \text{ και } \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 0.48 .$$

**Έλεγχος επάρκειας μέλους διατομής CHS610/40 διαγωνίων μελών**

Τα δεδομένα, η κατηγορία και οι παράμετροι αντοχής της διατομής εκτιμήθηκαν προηγουμένως στον έλεγχο διατομής.

Χρειάζεται επιπροσθέτως να υπολογιστούν οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχών  $N_{Rk}$  και  $M_{Rk}$  από τις εξ. (5-33) και (5-34) αντιστοίχως.

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (5-33)$$

$$M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y \quad (5-34)$$

$$\text{Είναι: } N_{Rk} = A \cdot f_y = 716 \text{ cm}^2 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 25418 \text{ kN} \text{ και } M_{Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 13017 \text{ cm}^3 \cdot 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 4621 \text{ kNm}$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, στον έλεγχο μέλους, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με  $\gamma_{M1} = 1.00$ .

1. Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ( $\chi_{LT}$ )

Δεν υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο μέλος της αντηρίδας, διότι η διατομή είναι κλειστή. Επομένως  $\chi_{LT} = 1.00$ .

2. Μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού ( $\chi$ )

*Για λυγισμό περί τον γ-γ άξονα*

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (5-35)$$

Όπου η εξ. (5-35) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5-36)$$

$$L_{cr,y} = k \cdot L \quad (5-37)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (5-38)$$

Αντικαθιστώντας στις εξ. (5-36), (5-37) και (5-38) προκύπτει:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 6.40\text{m} = 6.40\text{m}$ , όπου:

- $k=1.00$  (για θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα του εξεταζόμενου τμήματος)
- $L = \sqrt{4^2 + 5^2} = 6.40\text{m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων)

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{292333\text{cm}^4}{716\text{cm}^2}} = 20.21\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{6.40\text{m}}{20.21\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.415$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_y$ :

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] \quad (5-39)$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \quad (5-40)$$

Από την εξ. (5-39) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_y = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.415 - 0.2) + 0.415^2] = 0.609$$

Επομένως από την εξ. (5-40) προκύπτει μειωτικός συντελεστής  $\chi$  ίσος με:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.609 + \sqrt{0.609^2 - 0.415^2}} = 0.949$$

*Για λυγισμό περί τον z-z άξονα*

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (5-41)$$

Όπου η εξ. (5-41) ισχύει για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και είναι:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4$$

$L_{cr} = k \cdot L = 1.00 \cdot 6.40\text{m} = 6.40\text{m}$ , όπου:

- $k=1.00$  (για θεώρηση απλών στρεπτικών στηρίξεων στα άκρα της αντηρίδας)
- $L = \sqrt{4^2 + 5^2} = 6.40\text{m}$  (μήκος δοκού μεταξύ εξασφαλισμένων σημείων)

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{292333\text{cm}^4}{716\text{cm}^2}} = 20.21\text{cm}$$

Επομένως είναι:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{6.40\text{m}}{20.21\text{cm}} \cdot \frac{1}{76.4} = 0.415$$

Καμπύλη λυγισμού:

Από τον Πίνακα 6.2 του Ευρωκώδικα (EN1993-1-1) για κοίλη κυκλική διατομή, εν θερμώ έλασης και χάλυβα S355 προκύπτει καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Συντελεστής ατελειών( $a$ ):

$a=0.21$  για καμπύλη λυγισμού  $a$ .

Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi_z$ :

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] \quad (5-42)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad (5-43)$$

Από την εξ. (5-42) αντικαθιστώντας τις τιμές των μεγεθών που έχουν εκτιμηθεί ανωτέρω, προκύπτει:

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.21 \cdot (0.415 - 0.2) + 0.415^2] = 0.609$$

Επομένως, από την εξ. (5-43), ο μειωτικός συντελεστής  $\chi_z$  είναι ίσος με:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.609 + \sqrt{0.609^2 - 0.415^2}} = 0.949$$

### 3. Συντελεστές αλληλεπίδρασης $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Υπολογισμός συντελεστών  $C_m$  ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

Πίνακας 5-22: Συντελεστές  $C_m$

Συντελεστής ροπής	Άξονας κάμψης	Σημεία εξασφαλιζόμενα κατά την διεύθυνση
$C_{my}$	γ-γ	z-z
$C_{mz}$	z-z	γ-γ

Από τον Πίνακα 5-22 γίνεται αντιληπτό ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση του άξονα κάμψης και των σημείων εξασφάλισης, ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ροπής.

Από το διάγραμμα ροπών περί τον γ-γ άξονα (Σχήμα 5-24(α)) προκύπτει ροπή:

- Στο άκρο ίση με  $M_h = 0\text{kNm}$
- Στο μέσο ίση με  $M_s = 37.95\text{kNm}$

Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα B.3 (EN1993-1-1 Παρ. Β), είναι:

$$a_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{0\text{kNm}}{37.95\text{kNm}} \Rightarrow a_h = 0$$

- $\psi = 1.00$ , διότι οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι ίσες

- ομοιόμορφο φορτίο, αφού το ιδίον βάρος και το θερμοκρασιακό φορτίο επιβάλλονται ομοιόμορφα στο μέλος της αντηρίδας

Άρα προκύπτει:  $C_{my} = 0.95 + 0.05 \cdot a_h = 0.95 + 0.05 \cdot 0 \Rightarrow C_{my} = 0.95$

Από το Σχήμα 5-24(β) γίνεται αντιληπτό ότι το διάγραμμα ροπών περί τον z-z άξονα είναι γραμμικό. Επομένως αντιστοιχεί στο 1<sup>ο</sup> διάγραμμα του πίνακα Β.3 και οι τιμές στα άκρα του διαγράμματος είναι:

– Μ στο ένα άκρο = -2215.3kNm

– Μ στο άλλο άκρο = 3631.8kNm

Άρα προκύπτει  $\psi = \frac{-2215.3\text{kNm}}{3631.8\text{kNm}} = -0.61$  και κατ' επέκταση είναι:

$C_{mz} = 0.6 + 0.4 \cdot \psi \Rightarrow C_{mz} = 0.6 + 0.4 \cdot (-0.61) \Rightarrow C_{mz} = 0.356 \leq 0.4$ , άρα εν τέλει  $C_{mz} = 0.40$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$

Το μέλος της αντηρίδας είναι εξασφαλισμένο στα άκρα του ώστε να μην παραμορφώνεται στρεπτικά και επιπλέον δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο στην αντηρίδα. Επομένως, το μέλος δεν υπόκειται σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Άρα οι συντελεστές αλληλεπίδρασης θα υπολογιστούν με βάση τον Πίνακα Β.1 (EN1993-1-1 Παρ. Β).

Ο πίνακας Β.1 αφορά διατομές Ι και RHS. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγιστικά θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας Β.1, αφού η διατομή της αντηρίδας δεν είναι RHS αλλά CHS, για την οποία δεν γίνεται λόγος στον πίνακα Β.1.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (5-44)$$

$$k_{zy} = 0.6 \cdot k_{yy} \quad (5-45)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{mz} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{x_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (5-46)$$

$$k_{yz} = 0.6 \cdot k_{zz} \quad (5-47)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-44), (5-45), (5-46) και (5-47) προκύπτουν οι τιμές αλληλεπίδρασης στον Πίνακα 5-23.

Πίνακας 5-23: Τιμές συντελεστών αλληλεπίδρασης

$k_{yy}$	1.082
$k_{zy}$	0.649
$k_{zz}$	0.456
$k_{yz}$	0.273

#### 4. Έλεγχος επάρκειας υπό κάμψη και θλίψη

$$\frac{N_{Ed}}{x_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{x_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0 \quad (5-48)$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1.0 \quad (5-49)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στις εξ. (5-48) και (5-49) προκύπτει:

$$0.65+0.01+0.13=0.79 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-48)}$$

$$0.65+0.01+0.22=0.88 \leq 1.00, \text{ από την εξ. (5-49)}$$

Παρατηρώντας τόσο τον έλεγχο διατομής όσο και τον έλεγχο μέλους του διαγώνιου στοιχείου, γίνεται αντιληπτό ότι η CHS610/40 αποτελεί οριακή διατομή, αφού οι έλεγχοι ικανοποιούνται σχετικώς οριακά, ή ισοδύναμα ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής είναι μεγάλος.

#### 5.4.1.2 Άνω στάθμη

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ελέγχων επαναλαμβάνεται και για τα διαγώνια μέλη της άνω στάθμης. Η μορφή των διαγραμμάτων των εντατικών μεγεθών είναι ακριβώς η ίδια με τη μόνη διαφοροποίηση ως προς το μέγεθος των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Το φορτίο ωθήσεων γαιών στην άνω στάθμη είναι αρκετά μικρότερο από αυτό της κάτω στάθμης, οπότε και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στην άνω στάθμη θα είναι αρκετά μικρότερα από τα αντίστοιχα του διαγώνιου μέλους της κάτω στάθμης.

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω λογική προκύπτει οριακή διατομή η CHS355.6/12.5, η οποία φυσικά είναι κατηγορίας 1 (βασική απαίτηση).

#### 5.4.2 Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία με αυτή που παρουσιάστηκε στις υποπαραγράφους 5.4.1.1 και 5.4.1.2 προκύπτει οριακή διατομή κάτω στάθμης η CHS610/25 και άνω στάθμης η CHS219.1/10.

#### 5.4.3 Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

Στην περίπτωση αυτή στην κάτω στάθμη υπάρχουν δύο διαγώνια στοιχεία σε κάθε άκρο της εκσκαφής. Το ένα διαγώνιο στοιχείο έχει μήκος  $L=\sqrt{2.5^2+3^2}=3.90\text{m}$  και το άλλο  $L=\sqrt{5^2+6^2}=7.81\text{m}$ . Τα διαγώνια αυτά στοιχεία θα ελεγχθούν ξεχωριστά και θα εξαχθεί οριακή διατομή για κάθε ένα από αυτά. Ακολουθώντας την διαδικασία της υποπαραγράφου 5.4.1.1 προκύπτει οριακή διατομή για το διαγώνιο στοιχείο με μήκος 7.81m η CHS610/30 και για το διαγώνιο στοιχείο με μήκος 3.90m η CHS508/20.

Για την άνω στάθμη, όπως έχει ξαναδιατυπωθεί, παραμένει το σύστημα με χρήση ενός διαγώνιου στοιχείου στα άκρα της εκσκαφής. Επομένως, όπως προέκυψε ανωτέρω (υποπαραγράφος 5.4.1.2) η κρίσιμη διατομή είναι η CHS355.6/12.5.

#### 5.4.4 Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά Y ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά X

Ακολουθώντας την διαδικασία της υποπαραγράφου 5.4.1.1 προκύπτει για την κάτω στάθμη οριακή διατομή για το διαγώνιο στοιχείο με μήκος 7.81m η CHS508/16 και για το διαγώνιο στοιχείο με μήκος 3.90m η CHS508/16.

Για την άνω στάθμη, αφού χρησιμοποιείται μόνο ένα διαγώνιο μέλος, σύμφωνα με το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στην υποπαραγράφο 5.4.2 είναι κρίσιμη διατομή η CHS219.1/10.



### 5.4.5 Σύνοψη

Από τη μελέτη του κλειστού χωρίου εκσκαφής προέκυψε αρκετά μεγαλύτερη απαίτηση σε διατομή του μέλους της τραβέρσας, σε σύγκριση με την απαίτηση που υπήρχε στην περίπτωση του χωρίου εκσκαφής το οποίο αντιστηρίζονταν μόνο στις δυο αντικριστές μεγάλες πλευρές. Και τούτο είναι λογικό, διότι στην περίπτωση αυτή μεταβιβάζεται μεγάλο μέγεθος αξονικής δύναμης στο μέλος της τραβέρσας, κάτι το οποίο προκαλεί μεγάλη απομείωση στη ροπή αντοχής της διατομής. Επομένως κρίνεται απαραίτητο η χρήση μεγαλύτερης διατομής και σε κάποιες θέσεις, όπως προέκυψε από την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου, ενίσχυση με ενισχυτικά ελάσματα στον κορμό και στα πέλματα της διατομής.

Στο σύστημα με τα δύο διαγώνια στοιχεία στο κάθε άκρο της εκσκαφής, λόγω του ότι η τραβέρσα δεσμεύεται σε περισσότερες θέσεις, δηλαδή λόγω του ότι τα ελεύθερα ανοίγματα έχουν μικρότερο μήκος, τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη είναι μικρότερα. Αυτό έχει ως συνέπεια η απαίτηση σε μέγεθος διατομής να είναι μικρότερη και οι διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων ενισχυτικών ελασμάτων να είναι μικρότερες, σε σύγκριση με το σύστημα με ένα διαγώνιο στοιχείο σε κάθε άκρο της εκσκαφής.

Επίσης, λόγω της ύπαρξης δύο διαγωνίων στοιχείων, η αξονική που μεταβιβάζονταν μόνο από ένα διαγώνιο στοιχείο, τώρα μεταβιβάζεται από δύο, άρα η καταπόνηση έναντι αξονικής του εκάστοτε διαγωνίου στοιχείου είναι μικρότερη. Αυτό συνεπάγεται και μικρότερη απαίτηση σε μέγεθος κοίλης κυκλικής διατομής (CHS), κάτι το οποίο επαληθεύεται από τις υποπαραγράφους 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 και 5.4.4.

Τέλος, όσα διαγώνια στοιχεία και να χρησιμοποιηθούν (στην παρούσα περίπτωση έως δύο), το μέλος της τραβέρσας θα παραλάβει εν τέλει δεδομένο μέγεθος αξονικής δύναμης. Η διαφορά είναι ότι όσο περισσότερα διαγώνια στοιχεία χρησιμοποιούνται, τόσο πιο σταδιακά μεταβιβάζεται το μέγεθος στο μέλος της τραβέρσας και τόσο μικρότερο μήκος του μέλους αυτού είναι που υφίσταται το συνολικό μέγεθος της αξονικής δύναμης. Επομένως, με βάση την ανωτέρω εξήγηση, ο κίνδυνος λυγισμού είναι μικρότερος στην περίπτωση του συστήματος με δυο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής.

Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι η χρήση δυο διαγωνίων στο κάθε άκρο της εκσκαφής είναι ευνοϊκότερη από άποψη:

- αναπτυσσομένων εντατικών μεγεθών στο μέλος της τραβέρσας και στο διαγώνιο μέλος
- μεγέθους απαιτούμενης διατομής μέλους τραβέρσας και διαγωνίου μέλους
- κινδύνου λυγισμού του μέλους της τραβέρσας

Άρα είναι φανερό ότι προτιμάται το σύστημα διαμόρφωσης με δύο διαγώνια στοιχεία στο κάθε άκρο της εκσκαφής.



## 6 ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 Περίληψη

Το σύστημα προσωρινής αντιστήριξης μορφώνεται με μεταλλικές αντηρίδες σε δύο στάθμες (άνω και κάτω στάθμη). Οι αντηρίδες της κάτω στάθμης έχουν κοίλες κυκλικές διατομές (CHS) θερμής έλασης. Οι αντηρίδες της άνω στάθμης έχουν είτε κοίλες κυκλικές διατομές (CHS) θερμής έλασης, σε περιοχές όπου δεν διατάσσονται διαγώνιοι σύνδεσμοι (οριζόντιοι και κατακόρυφοι) μεταξύ των αντηρίδων για τη μείωση του μήκους λυγισμού τους, είτε διατομές διπλού ταυ τύπου HEM, σε θέσεις όπου διατάσσονται τέτοιοι διαγώνιοι σύνδεσμοι.

Επισημαίνεται ότι οι οριζόντιοι διαγώνιοι σύνδεσμοι μπορούν να τοποθετηθούν μαζί με τις αντηρίδες της άνω στάθμης, ενώ για την τοποθέτηση των αντίστοιχων κατακόρυφων συνδέσμων πρέπει η εκσκαφή να προχωρήσει μέχρις ότου τοποθετηθούν και οι αντηρίδες της κάτω στάθμης. Αυτό σημαίνει ότι οι αντηρίδες της άνω στάθμης θα λειτουργούν πάντοτε με πλευρική εξασφάλιση στο οριζόντιο επίπεδο, όμως θα αναγκαστούν να λειτουργήσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς πλευρική εξασφάλιση σε κατακόρυφο επίπεδο. Αυτό δικαιολογεί σε τέτοιες περιπτώσεις την επιλογή διατομών τύπου διπλού ταυ, προσανατολισμένων έτσι ώστε ο ισχυρός τους άξονας να ενεργοποιείται για κάμψη σε κατακόρυφο επίπεδο. Η χρήση διαγωνίων στοιχείων πλευρικής εξασφάλισης επελέγη σε περιπτώσεις που χωρίς αυτά θα υπήρχε απαίτηση πολύ μεγάλων και εμπορικά μη διαθέσιμων διατομών CHS για τις αντηρίδες.

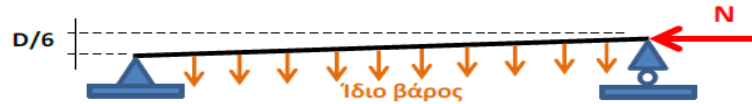
Μελετώνται δύο εναλλακτικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης:

- Σύστημα Αντιστήριξης Μεμονωμένων Αντηρίδων (Κεφάλαιο 3)
- Σύστημα Αντιστήριξης με Χιαστί Συνδέσμους μεταξύ των Αντηρίδων (Κεφάλαιο 4)

Μορφώνονται δύο τύποι προσομοιωμάτων στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA στα οποία εκτελούνται γραμμικές αναλύσεις. Από την περιβάλλουσα των αποτελεσμάτων των γραμμικών στατικών αναλύσεων αυτών των προσομοιωμάτων λαμβάνονται εντατικά μεγέθη με βάση τα οποία γίνεται διαστασιολόγηση των διαγωνίων μελών και των τραβερσών, σύμφωνα με τις διατάξεις του EC3. Για τα δομικά αυτά μέλη δεν κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μη γραμμικών αναλύσεων, δεδομένου ότι η λειτουργία και οι απαιτήσεις ελέγχου τους είναι οι συνήθεις.

Επίσης, με βάση τα ανωτέρω δυσμενή εντατικά μεγέθη γίνεται μια προδιαστασιολόγηση των αντηρίδων και των δυο σταθμών και λαμβάνονται αξονικές δυνάμεις για τις αντηρίδες, οι οποίες εν συνεχεία εισάγονται ως αξονικά φορτία σχεδιασμού στις μη γραμμικές αναλύσεις, με βάση τις οποίες γίνεται η

διαστασιολόγηση των αντηρίδων. Επισημαίνεται ότι για τις αντηρίδες δεν κρίνεται επαρκής η διαστασιολόγηση με γραμμικές αναλύσεις και εφαρμογή των διατάξεων του EC3, διότι δεν θα ήταν έτσι δυνατόν να ληφθεί αξιόπιστα υπόψη η κανονιστική απαίτηση θεώρησης αρχικών ατελειών λόγω υψομετρικής διαφοράς των σημείων στήριξης (Σχήμα 6-1) ίση με  $A/6$  (όπου  $A=H$  αν η διατομή είναι διπλού ταυ ή  $A=D$  αν η διατομή είναι κοίλη κυκλική).



Σχήμα 6-1: Υψομετρική διαφορά στηρίξεων ίση με  $D/6$  – γεωμετρική μη γραμμικότητα

Παρατηρώντας το Σχήμα 6-1 είναι φανερό ότι το στατικό σύστημα της αντηρίδας είναι άρθρωση – κύλιση στα άκρα της. Θα ήταν πιο ακριβές αν και στα δυο άκρα της αντηρίδας υπήρχε κύλιση, και όχι άρθρωση – κύλιση και το αξονικό θλιπτικό φορτίο να επιβαλλόταν και στα 2 άκρα, και όχι μόνο στο ένα όπως παρουσιάζεται ανωτέρω. Στην περίπτωση αυτή θα απαιτούνταν επιπλέον και η δέσμευση σε ένα κόμβο της αντηρίδας σε ότι αφορά την διαμήκη κίνησή της, έτσι ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα σχηματισμού του μητρώου στιβαρότητας και κατ' επέκταση να μπορεί να ολοκληρωθεί η μη γραμμική ανάλυση. Είτε χρησιμοποιηθεί το πιο ρεαλιστικό αυτό στατικό σύστημα, είτε το ανωτέρω (Σχήμα 6-1), προκύπτουν οι ίδιοι ακριβώς δρόμοι ισορροπίας. Επομένως, δεν τίθεται κανένα θέμα αμφισβήτησης της αξιοπιστίας του αρχικού μη γραμμικού προσομοιώματος, το οποίο μορφώνεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Υλοποιώντας τις ανωτέρω γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις, επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν, στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, διατομές χαλύβδινων δομικών μελών, οι οποίες να είναι οριακές, δηλαδή να ικανοποιούν οριακά τις απαιτήσεις των μελών αυτών έναντι των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Και τούτο γιατί μόνο τότε είναι δίκαιη η σύγκριση μεταξύ των διατομών ιδίων χαλύβδινων δομικών μελών που ανήκουν όμως σε διαφορετικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης. Στην περίπτωση που δεν υπήρχε η ανάγκη σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων προσωρινής αντιστήριξης για λόγους εκτίμησης του αποδοτικότερου, από διάφορες απόψεις, συστήματος και γινόταν μια απλή διαστασιολόγηση, είναι φανερό ότι θα χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερες διατομές, ώστε να υπάρξει μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας.

Τέλος, μελετάται και η περίπτωση του κλειστού χωρίου εκσκαφής, στο οποίο το μέγεθος της επιβαλλόμενης αξονικής στα μέλη των τραβερσών αυξάνεται ραγδαία σε σχέση με την περίπτωση όπου το χωρίο εκσκαφής αντιστηρίζεται μόνο στις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές του. Διερευνώνται τέσσερις περιπτώσεις, στις οποίες υλοποιούνται γραμμικές αναλύσεις και εξάγονται οι οριακές διατομές των τραβερσών και των διαγωνίων μελών που βρίσκονται στα άκρα της εκσκαφής. Με βάση τις ανωτέρω οριακές διατομές, τα διαγράμματα αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών και τα αποτελέσματα ελέγχων διατομής και μέλους εξάγεται η βέλτιστη διαμόρφωση του χωρίου εκσκαφής στα άκρα του. Οι περιπτώσεις αυτές είναι οι εξής:

- Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $Y$  ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $X$
- Ένα διαγώνιο στοιχείο στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $Y$  ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $X$
- Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $Y$  ίσο με το φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $X$
- Δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής – Φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $Y$  ίσο με το μισό φορτίο ωθήσεων γαιών κατά  $X$

## 6.2 Συμπεράσματα

### Εκτίμηση εμβαδού επιρροής στην επιφάνεια της εκσκαφής λόγω διαστολής της αντηρίδας

Εκτιμάται ένας απλοποιημένος τρόπος υπολογισμού του εμβαδού επιρροής, λόγω διαστολής της αντηρίδας, στην επιφάνεια της εκσκαφής. Για το λόγο αυτό μορφώνεται το προσομοίωμα της αντηρίδας η οποία στα άκρα της, κατά την διαμήκη διεύθυνση, φέρει θλιπτικά εδαφικά ελατήρια με τιμή δυσκαμψίας  $K=K_s \cdot A$ , όπου  $K_s$  = τιμή δείκτη εδάφους και  $A$  = εμβαδόν επιρροής και φορτίζεται με ομοιόμορφο θερμοκρασιακό φορτίο  $\Delta T$ . Η ισορροπία του μέλους της αντηρίδας επιτυγχάνεται όταν η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο μέλος της λόγω  $\Delta T$ , αντισταθμίζεται από την αναπτυσσόμενη εδαφική αντίσταση. Από αυτήν την εξίσωση ισορροπίας εκτιμάται το εμβαδόν επιρροής  $A$  με τον απλοποιημένο αυτό τρόπο.

Επίσης, από το τρισδιάστατο χωρικό προσομοίωμα το οποίο έχει διακριτοποιηθεί με ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εκτιμάται το εμβαδόν επιρροής  $A$  της αντηρίδας, με βάση τις θέσεις πάνω στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περιοχή εκατέρωθεν της τυχούσας αντηρίδας όπου το μέγεθος της δύναμης των θλιπτικών ελατηρίων είναι διάφορο του μηδενός,

Συγκρίνοντας τις τιμές των εμβαδών επιρροής που προκύπτουν με βάση τον απλοποιημένο τρόπο προσέγγισης και με βάση τη συμπεριφορά του σύνθετου τρισδιάστατου χωρικού προσομοιώματος, προκύπτει ποσοστό απόκλισης <5% (αποδεκτό ποσοστό απόκλισης). Άρα είναι επιτρεπτό σε τέτοιες περιπτώσεις αντί να μορφώνονται σύνθετα μοντέλα με μεγάλο βαθμό διακριτοποίησης και πλήθος πεπερασμένων στοιχείων, να εφαρμόζονται απλοποιητικές διαδικασίες όπως η ανωτέρω.

### Διαστασιολόγηση Αντηρίδων

Ο έλεγχος επάρκειας των αντηρίδων γίνεται μέσω τριών διαφορετικών τρόπων προσέγγισης, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Έλεγχος επάρκειας διατομής και μέλους της αντηρίδας με βάση τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από γραμμικές αναλύσεις
- Μη γραμμική ανάλυση GNIA και έλεγχος επάρκειας διατομής με βάση τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από τη μη γραμμική ανάλυση GNIA
- Μη γραμμική ανάλυση GMNIA

Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό, ότι ο έλεγχος επάρκειας της αντηρίδας γίνεται με βάση τον πιο απλουστευτικό έως και τον πιο σύνθετο τρόπο, με στόχο την σύγκριση των αποτελεσμάτων επάρκειας που προκύπτουν από τους ανωτέρω διαφορετικούς τρόπους ελέγχου.

### Σύστημα Αντιστήριξης Μεμονωμένων Αντηρίδων

Το σύστημα αυτό μορφώνεται με χρήση αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης οι οποίες δεν θα συνδέονται μεταξύ τους με διαγώνια στοιχεία (οριζόντια ή κατακόρυφα). Επομένως, από την ανωτέρω μόρφωση του συστήματος αντιστήριξης, γίνεται αντιληπτό ότι η διατομή που θα επιλεγεί για τις αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης είναι κοίλη κυκλική (CHS) και ότι στην ανάλυση και σχεδιασμό δεν παίζει ρόλο η ακολουθία των φάσεων κατασκευής αφού οι αντηρίδες άνω και κάτω στάθμης δεν συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία και κατ' επέκταση λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Οι τελικές οριακές διατομές των αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης, έπειτα από διερεύνηση που προέκυψε μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων, παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 6-1.

Πίνακας 6-1: Τελικές οριακές διατομές αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
CHS508/16	CHS610/40

Εξετάστηκαν και μικρότερες διατομές, αλλά απορρίφθηκαν διότι δεν υπήρχε επάρκεια και μέσω των τριών διαφορετικών τρόπων διεξαγωγής των ελέγχων. Πιο συγκεκριμένα, για την διατομή CHS457/16 αντηρίδων άνω στάθμης δεν ικανοποιούνταν οι έλεγχοι επάρκειας με κανέναν από τους ανωτέρω τρόπους διεξαγωγής των ελέγχων. Για την διατομή CHS610/30 αντηρίδων κάτω στάθμης ο έλεγχος μέσω γραμμικών αναλύσεων και μέσω μη γραμμικών αναλύσεων τύπου GNIA έδειξε ότι επαρκεί οριακά. Όμως η ακριβέστερη ανάλυση, που είναι η GMNIA, έδειξε οριακή μη επάρκεια, αφού ο προκύπτων βαθμός αξιοποίησης ήταν λίγο μεγαλύτερος της μονάδας, κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό. Επομένως για λόγους ασφάλειας, αφού δεν υπάρχει συμφωνία ως προς τον έλεγχο επάρκειας της αντηρίδας και από τους τρεις διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης του ελέγχου, απορρίπτεται η CHS610/30 και επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ως οριακή η αμέσως μεγαλύτερη διατομή.

#### Σύστημα Αντιστήριξης με Χιαστί Συνδέσμους μεταξύ των Αντηρίδων

Στο εξεταζόμενο σύστημα αντιστήριξης χρησιμοποιούνται οριζόντια διαγώνια στοιχεία μεταξύ των αντηρίδων της ίδιας στάθμης και κατακόρυφα διαγώνια στοιχεία μεταξύ των αντηρίδων των δύο σταθμών. Από τη μόρφωση αυτή του συστήματος αντιστήριξης είναι φανερό ότι η ακολουθία των φάσεων κατασκευής παίζει ρόλο, αφού κατά την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής οι αντηρίδες της άνω στάθμης θα διαθέτουν μόνο οριζόντια εξασφάλιση ενώ κατά την 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής θα διαθέτουν επιπροσθέτως και κατακόρυφη εξασφάλιση. Επομένως το μέλος της αντηρίδας της άνω στάθμης οφείλει να μελετηθεί σε κάθε μια από τις δυο αυτές περιπτώσεις, σε αντίθεση με το μέλος της αντηρίδας της κάτω στάθμης, το οποίο με το που τοποθετείται εξασφαλίζεται και κατά τις δυο διευθύνσεις (οριζοντίως και κατακόρυφως).

Στο τέλος της 1<sup>ης</sup> φάσης κατασκευής προέκυψε, έπειτα από ανάλυση μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων, οριακή διατομή διπλού ταυ για τις αντηρίδες της άνω στάθμης η HEM340. Από το σύστημα αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας προκύπτει οριακή διατομή για τις αντηρίδες της άνω στάθμης η CHS508/16. Συγκρίνοντας τα εμβαδά τους είναι:  $A_{HEM340} = 316\text{cm}^2 > 247\text{cm}^2 = A_{CHS508/16}$ . Επομένως εκ πρώτης όψεως συμφέρει από άποψη οικονομίας η CHS508/16. Λαμβάνοντας όμως ταυτοχρόνως υπόψη και το εμβαδόν των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων (διατομή CHS168.3/6.3) που χρησιμοποιούνται μεταξύ των αντηρίδων διατομής διπλού ταυ της άνω στάθμης καθώς και την υπαρκτή κατασκευαστική δυσκολία τοποθέτησης αυτών των διαγωνίων στοιχείων, καθίσταται η λύση χρησιμοποίησης διατομής διπλού ταυ με οριζόντια χιαστί στοιχεία εντελώς ασύμφορη. Συνίσταται λοιπόν η λύση χρησιμοποίησης μεμονωμένης αντηρίδας διατομής CHS508/16 για την άνω στάθμη, αφού είναι καλύτερη και από άποψη κόστους υλικού δομικού χάλυβα και από άποψη κατασκευαστικής ευκολίας.

Με βάση την ανωτέρω διαπίστωση, το μέλος της αντηρίδας της άνω στάθμης εξετάζεται στην 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη ως διατομή την CHS508/16. Έπειτα από διεξαγωγή των ελέγχων επάρκειας μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων, προκύπτει ότι η CHS508/16 είναι λιγότερο κρίσιμη σε σχέση την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής. Αναμένεται, αν δεν είναι το ίδιο κρίσιμη να είναι τουλάχιστον λίγο λιγότερο κρίσιμη σε σχέση με την 1<sup>η</sup> φάση κατασκευής. Και τούτο γιατί δεν υφίστανται οριζόντια διαγώνια στοιχεία που να εξασφαλίζουν το μέλος της αντηρίδας, επομένως παραμένει κρίσιμος ο λυγισμός στο οριζόντιο επίπεδο. Αλλά λόγω της ύπαρξης των κατακόρυφων διαγωνίων στοιχείων, δυσχεραίνεται κατά κάποιο τρόπο η εκτροπή στο οριζόντιο επίπεδο, κάτι το οποίο καθιστά την διατομή CHS508/16 αντηρίδων άνω στάθμης στην 2<sup>η</sup> φάση κατασκευής (τελική εικόνα συστήματος αντιστήριξης) λιγότερο κρίσιμη.

Οι τελικές οριακές διατομές των αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης, έπειτα από διερεύνηση που προέκυψε μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων, παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 6-2.

Πίνακας 6-2: Τελικές οριακές διατομές αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης συστήματος αντιστήριξης μεμονωμένης αντηρίδας

Άνω στάθμη	Κάτω στάθμη
CHS508/16	CHS610/20

Παρατηρώντας τις οριακές διατομές που προκύπτουν από τα ανωτέρω εναλλακτικά συστήματα αντιστήριξης, προκύπτει διαφοροποίηση ως προς το μέγεθος της διατομής της αντηρίδας της κάτω στάθμης. Το ποσοστό απόκλισης των εμβαδών των δύο χρησιμοποιούμενων διατομών, CHS610/40 και CHS610/20, είναι:

$$\frac{716\text{cm}^2 - 371\text{cm}^2}{716\text{cm}^2} = 48\%$$

Άρα, πρόκειται για εξοικονόμηση υλικού του χάλυβα για τις αντηρίδες της κάτω στάθμης της τάξεως του 48%.

Τέλος, σε ότι αφορά και τα δύο ανωτέρω εναλλακτικά συστήματα αντιστήριξης πρέπει να τονιστεί, ότι μια διατομή για να είναι αποδεκτή, δεν αρκεί μόνο να μπορεί να ανταπεξέλθει έναντι των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών και ο βαθμός αξιοποίησής της να είναι μεγάλος. Πρέπει επίσης να παρουσιάζονται μετακινήσεις στην αντηρίδα, οριζοντίως και κατακορύφως, οι οποίες να είναι αποδεκτές, δηλαδή να είναι εντός ανεκτών ορίων. Παρατηρώντας τους δρόμους ισορροπίας των αντηρίδων άνω και κάτω στάθμης που φτάνουν μέχρι την τιμή του αξονικού φορτίου σχεδιασμού, διαπιστώνεται ότι οι μετακινήσεις φτάνουν το πολύ μέχρι 6cm. Αλλά αυτές οι μετακινήσεις αφορούν την ΟΚΑ, δηλαδή την κατάσταση κατά την οποία στόχος είναι να μην καταρρεύσει η κατασκευή και ας παρουσιαστούν μεγάλες μετακινήσεις. Επομένως, για συνήθεις καταστάσεις (ΟΚΛ), όπου το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο έχει περίπου μέγεθος το μισό από αυτό του σχεδιασμού, οι μετακινήσεις που παρουσιάζονται είναι το πολύ 3cm, το οποίο γενικά είναι ανεκτό μέγεθος αναπτυσσόμενης μετακίνησης.

#### **Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας**

Και στα δύο εναλλακτικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης, έπειτα από παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς των στηρίξεων της αντηρίδας, προκύπτει ότι για ρεαλιστικά μεγέθη υψομετρικών διαφορών, τα οποία είναι αυτά πλησίον του D/6, δεν υπάρχει διαφοροποίηση στο οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό, διότι δείχνει ουσιαστικά ότι αυτή η υψομετρική διαφορά των στηρίξεων, δηλαδή αυτό το στοιχείο μη γραμμικότητας, δεν παίζει κάποιο ρόλο στην οριακή αντοχή του μέλους της αντηρίδας.

Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η μη γραμμική ανάλυση δεν έχει να προσφέρει κάτι. Άρα αναμένεται τα αποτελέσματα από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις αν όχι να ταυτίζονται, να είναι τουλάχιστον πολύ κοντά μεταξύ τους. Αυτό επαληθεύεται σε όλα τα αντίστοιχα σημεία στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

#### **Παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας**

Και στα δύο εναλλακτικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης, έπειτα από παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της ατέλειας του μέλους της αντηρίδας, προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μικρότερο προκύπτει το οριακό φορτίο αντοχής της αντηρίδας. Και τούτο είναι λογικό, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τελική κατακόρυφη βύθιση του μέλους της αντηρίδας, αφού το αρχικό βέλος (ατέλεια), το οποίο θα συνεχίσει να αυξάνεται με την επιβολή όλο και μεγαλύτερου αξονικού φορτίου, είναι μεγαλύτερο.

Επίσης, από τα σχήματα αυτής της συγκεκριμένης παραμετρικής διερεύνησης, γίνεται αντιληπτό ότι αν χρησιμοποιηθεί μικρότερο μέγεθος ατέλειας, σε σχέση με το πραγματικό, η αύξηση του οριακού φορτίου είναι μικρή. Αντίθετα αν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο μέγεθος ατέλειας, σε σχέση με το πραγματικό, η πτώση του οριακού φορτίου είναι αξιοσημείωτη, κάτι που υποδηλώνει ότι μικρή αύξηση της ατέλειας οδηγεί σε σημαντική πτώση των αντοχών του μέλους της αντηρίδας.

Τέλος, παρατηρείται ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος της ατέλειας, τόσο μικρότερη είναι η κλίση του δρόμου ισορροπίας, δηλαδή τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το σύστημα των αντηρίδων της κάτω στάθμης. Και τούτο είναι λογικό διότι όσο λιγότερο ατελές είναι το μέλος της αντηρίδας, τόσο η αντοχή του είναι πιο κοντά στην ιδεατή (μηδενικό μέγεθος αρχικής ατέλειας). Δηλαδή τόσο δυσκολότερο είναι να αποκλίνει από την αρχική του θέση, άρα και τόσο δυσκολότερο να αποκτήσουν σημαντικό μέγεθος οι ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης, καθώς επιβάλλεται στα άκρα του θλιπτικό αξονικό φορτίο.

### **Διαστασιολόγηση Τραβερσών**

Και στα δύο εναλλακτικά συστήματα προσωρινής αντιστήριξης το χωρίο εκσκαφής αντιστηρίζεται αποκλειστικά στις δύο μεγάλες αντικριστές πλευρές του. Επομένως τα μέλη των τραβερσών αναπτύσσουν αξονική δύναμη μόνο λόγω του επιβαλλόμενου θερμοκρασιακού φορτίου σε αυτές. Το μέγεθος του αναπτυσσόμενου αξονικού φορτίου είναι τόσο μικρό σε σχέση με τα μεγέθη αντοχής της διατομής 2HEB450, που δεν προκαλείται καμία απομείωση στην ροπή αντοχής της διατομής της τραβέρσας και κατ'επέκταση αυτή επαρκεί χωρίς να διατρέχει απολύτως κανέναν κίνδυνο. Το μόνο που απαιτείται είναι ενίσχυση του κορμού της στη στήριξη του 1<sup>ου</sup> φατνώματος με χρήση ενισχυτικού ελάσματος διαστάσεων 340mm x 20mm, για λόγους επάρκειας του ελέγχου διατομής στην θέση αυτή.

Επιπροσθέτως πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της δυσκαμψίας των ελατηρίων τριβής. Όσο μεγαλύτερη είναι η δυσκαμψία των ελατηρίων τριβής, τόσο μεγαλύτερη αξονική αντίσταση παρουσιάζεται στο μέλος της τραβέρσας κατά την αυξομείωση του μήκους του λόγω ΔΤ, άρα το μέγεθος της αξονικής της τραβέρσας μεγαλώνει.

Για το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή για δυσκαμψία ελατηρίων τριβής ίση με το 50% του μεγέθους της δυσκαμψίας των εγκαρσίων εδαφικών ελατηρίων, προκύπτει ότι η διατομή 2HEB450 επαρκεί.

### **Διαστασιολόγηση Δικτυωμάτων**

Η διατομή που χρησιμοποιείται για τα οριζόντια και κατακόρυφα στοιχεία δικτυώματος είναι η CHS168.3/6.3. Ο έλεγχος μέλους πραγματοποιείται με βάση την δυσμενέστερη θλιπτική αξονική δύναμη που ασκείται στο στοιχείο δικτυώματος και η οποία προκύπτει είτε από γραμμικές είτε από μη γραμμικές αναλύσεις.

Οι βαθμοί αξιοποίησης των οριζοντίων και κατακορύφων στοιχείων δικτυώματος είναι αρκετά μεγάλοι. Επομένως δεν έχει νόημα να πραγματοποιηθεί παραμετρική διερεύνηση ως προς το μέγεθος της διατομής των διαγωνίων με στόχο τον εντοπισμό οριακής διατομής, αφού η υπάρχουσα διατομή μπορεί να χαρακτηριστεί ως οριακή.

### **Κλειστό Χωρίο Εκσκαφής**

Από τη μελέτη του κλειστού χωρίου εκσκαφής προέκυψε αρκετά μεγαλύτερη απαίτηση σε διατομή του μέλους της τραβέρσας, σε σύγκριση με την απαίτηση που υπήρχε στην περίπτωση του χωρίου εκσκαφής το οποίο αντιστηρίζονταν μόνο στις δυο αντικριστές μεγάλες πλευρές. Και τούτο είναι λογικό, διότι στην περίπτωση αυτή μεταβιβάζεται μεγάλο μέγεθος αξονικής δύναμης στο μέλος της τραβέρσας, κάτι το οποίο προκαλεί μεγάλη απομείωση στη ροπή αντοχής της διατομής. Επομένως κρίνεται απαραίτητο η χρήση μεγαλύτερης διατομής και σε κάποιες θέσεις ενίσχυση με ενισχυτικά ελάσματα στον κορμό και στα πέλματα της διατομής.



Στο σύστημα με τα δύο διαγώνια στοιχεία στο κάθε άκρο της εκσκαφής, λόγω του ότι η τραβέρσα δεσμεύεται σε περισσότερες θέσεις, δηλαδή λόγω του ότι τα ελεύθερα ανοίγματα έχουν μικρότερο μήκος, τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη είναι μικρότερα. Αυτό έχει ως συνέπεια η απαίτηση σε μέγεθος διατομής να είναι μικρότερη και οι διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων ενισχυτικών ελασμάτων να είναι μικρότερες, σε σύγκριση με το σύστημα με ένα διαγώνιο στοιχείο σε κάθε άκρο της εκσκαφής.

Επίσης, λόγω της ύπαρξης δύο διαγωνίων στοιχείων, η αξονική που μεταβιβάζονταν μόνο από ένα διαγώνιο στοιχείο, τώρα μεταβιβάζεται από δύο, άρα η καταπόνηση έναντι αξονικής του εκάστοτε διαγωνίου στοιχείου είναι μικρότερη. Αυτό συνεπάγεται και μικρότερη απαίτηση σε μέγεθος κοίλης κυκλικής διατομής (CHS).

Τέλος, όσα διαγώνια στοιχεία και να χρησιμοποιηθούν (στην παρούσα περίπτωση έως δύο), το μέλος της τραβέρσας θα παραλάβει εν τέλει δεδομένο μέγεθος αξονικής δύναμης. Η διαφορά είναι ότι όσο περισσότερα διαγώνια στοιχεία χρησιμοποιούνται, τόσο πιο σταδιακά μεταβιβάζεται η αξονική δύναμη στο μέλος της τραβέρσας και τόσο μικρότερο μήκος του μέλους αυτού είναι που υφίσταται το συνολικό μέγεθος της αξονικής δύναμης. Επομένως, με βάση την ανωτέρω εξήγηση, ο κίνδυνος λυγισμού είναι μικρότερος στην περίπτωση του συστήματος με δύο διαγώνια στοιχεία στα άκρα της εκσκαφής.

Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι η χρήση δυο διαγωνίων στο κάθε άκρο της εκσκαφής είναι ευνοϊκότερη από άποψη:

- αναπτυσσομένων εντατικών μεγεθών στο μέλος της τραβέρσας και στο διαγώνιο μέλος
- μεγέθους απαιτούμενης διατομής μέλους τραβέρσας και διαγωνίου μέλους
- κινδύνου λυγισμού του μέλους της τραβέρσας

Άρα είναι φανερό ότι προτιμάται το σύστημα διαμόρφωσης με δύο διαγώνια στοιχεία στο κάθε άκρο της εκσκαφής.



## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Πιπιλάκης Κ. (2010). Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- [2] Γεωργιάδης Κ., Γεωργιάδης Μ. (2009). Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- [3] Eurocode 3, "Design of steel structures Part 1.1: General rules and rules for buildings", CEN Brussels 2004, CEN document EN 1993-1-1, 2004.
- [4] Ghasemian M., Mortazavi M., Schmidt L.C. (1999), "Behaviour of hollow curved steel struts subjected to compressive load", Journal of Constructional Steel Research, Vol.52, PP219-234, UK.
- [5] Robertson A. (1925), "The strength of Struts", Selected Engineering Paper No.28 I.C.E.
- [6] Fan al Shawi (2001), "Stiffness of restraint for steel struts with elastic end supports", Structures & Buildings 146(2): 153-159.
- [7] Fan al Shawi (1998), "Determination of restraint forces for steel struts", Structures & Buildings 128(3): 282-289.
- [8] Y. C. Tan & C. M. Chow, "Design of Retaining Wall and Support for Deep Basement Construction – A Malaysian Experience", G & P Geotechnics Sdn Bhd, Kuala Lumpur, Malaysia.

