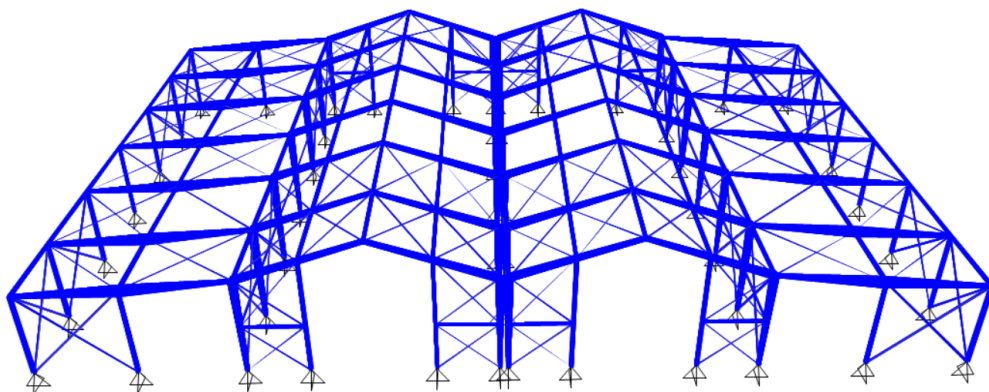




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΠΑΛΑΙΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ



Διπλωματική Εργασία  
**Χριστίνα Ευαγγελίου**

ΕΜΚ ΔΕ 2017 35

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

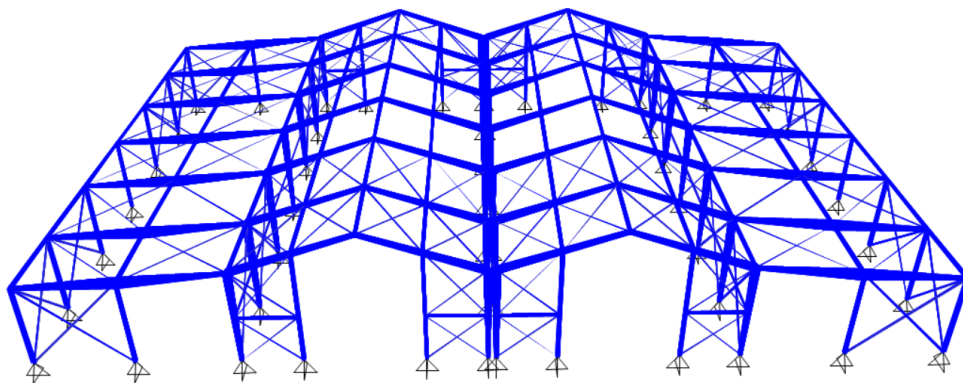
Αθήνα, Οκτώβριος 2017





National Technical University of Athens  
School of Civil Engineering  
Institute of Steel Structures

# RESEARCH OF MODIFICATION OF AN OLD INDUSTRIAL BUILDING WITH CRITERIA OF SUSTAINABILITY



Diploma Thesis

**Christina Evangeliou**

EMK ΔΕ 2017 35

Supervisor: Professor Charis Gantes

Athens, October 2017



Copyright © Χριστίνα Ευαγγελίου, 2017  
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 της 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 την συγγραφέα.

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

Copyright © Christina Evangeliou, 2017  
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).

Χριστίνα Ευαγγελίου (2017)  
Διερεύνηση μετατροπής παλαιού βιομηχανικού κτιρίου με κριτήρια βιωσιμότητας  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2017 35  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Christina Evangeliou (2017)  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2017 35  
Research of modification of an old industrial building with criteria of sustainability  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί την λήξη του πενταετούς κύκλου των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε ορισμένους ανθρώπους, η συμβολή και η συμπαράσταση των οποίων ήταν πολύτιμη και καθοριστική σε όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Χάρη Γαντέ. Οι υψηλού επιπέδου επιστημονικές του γνώσεις και η πολυετής εμπειρία του σε θέματα Σιδηρών κατασκευών, σε συνδυασμό με την άριστη ικανότητα του να μεταδίδει τις γνώσεις του, συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Η συνεχής καθοδήγησή του και η απεριόριστη υπομονή του, ενέπνεε ασφάλεια και εμπιστοσύνη. Ήταν πάντα πρόθυμος να αφιερώνει το χρόνο του και να προσφέρει συμβουλές, παρά το απαιτητικό του πρόγραμμα. Νιώθω ιδιαίτερη τιμή που συνεργάστηκα με έναν τόσο αξιόλογο άνθρωπο και πρότυπο καθηγητή.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Ψαρά και την κα. Κατερίνα Νταϊφώτη για τις χρήσιμες υποδείξεις τους σχετικά με την χρήση του λογισμικού SAP 2000.

Βέβαια, δεν θα μπορούσα να ξεχάσω την συμπαράσταση όλων των φίλων μου, που πίστεψαν σε εμένα και με ενθάρρυναν σε κάθε στάδιο των σπουδών μου. Για το λόγο αυτό ευχαριστώ ιδιαίτερω τους φίλους και συμφοιτητές μου, Νίκο Π. και Χρήστο, καθώς επίσης και την Ιωάννα, την Μαντώ, τον Γιάννη, τον Δημήτρη, την Εβίνα, την Έρση, τον Νίκο Ψ., τον Σαλίβερο και τον Σπύρο, για όλες εκείνες τις στιγμές που ζήσαμε μαζί κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Ολοκληρώνοντας, την μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη μου οφείλω στους γονείς μου, Ιωάννη και Θεοδώρα, αλλά και στην αδερφή μου Βασιλική για την απεριόριστη συμπαράστασή τους, την υπομονή και την αγάπη τους, αλλά και για όσα μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια της ζωής μου.

*Χριστίνα Ευαγγελίου*

*Οκτώβριος 2017*





*Στους γονείς μου, Ιωάννη και Θεοδώρα,  
τους ανθρώπους που με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2017 35

## **Διερεύνηση μετατροπής παλαιού βιομηχανικού κτιρίου με κριτήρια βιωσιμότητας**

**Χριστίνα Ευαγγελίου**

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Οκτώβριος 2017

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μετατροπή ενός παλαιού βιομηχανικού κτιρίου, με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή του, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένα κριτήρια βιωσιμότητας. Συγκεκριμένα, μελετάται αναλυτικά η συμπεριφορά του υφιστάμενου φορέα, με στόχο τον εντοπισμό των στατικών προβλημάτων του και διερευνάται η αντιμετώπισή τους μέσω της αναδιάταξης και ενίσχυσης της κατασκευής. Παράλληλα, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην δημιουργία μιας βιώσιμης κατασκευής που θα επιφέρει θετικά αποτελέσματα στο περιβάλλον, την οικονομία, αλλά και την κοινωνία.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται επεξήγηση της ευρύτερης έννοιας της βιωσιμότητας με ιστορικές αναφορές και τονίζεται η σημαντικότητα της εφαρμογής της σε όλους τους τομείς με έμφαση στον τομέα των κατασκευών, ενώ παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές παράμετροι που διακατέχει ως έννοια. Αναλύονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του χάλυβα, οι οποίες χαρακτηρίζουν την βιωσιμότητα των μεταλλικών κατασκευών σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους, από τον αρχικό σχεδιασμό τους μέχρι και την κατεδάφιση τους. Ακολούθως, περιγράφονται τα πλεονεκτήματα της ανακυκλωσιμότητας και επαναχρησιμοποίησης του χάλυβα και παρατίθενται παραδείγματα πραγματικών κατασκευών που ανακυκλώθηκαν ή επαναχρησιμοποιήθηκαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται ορισμένα συστήματα περιβαλλοντικής πιστοποίησης των κτιρίων, σύμφωνα με τα οποία αξιολογείται και επιβεβαιώνεται η βιώσιμη απόδοσή τους και παρέχεται η εξασφάλιση της ποιότητάς τους. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά, οι διαδικασίες και ο τρόπος βαθμολόγησης του κάθε συστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το κτίριο το οποίο πρόκειται να μετατραπεί, περιγράφοντας την ιστορική εξέλιξή του, από την κατασκευή του μέχρι σήμερα, και τους λόγους για τους οποίους θα πραγματοποιηθεί η επαναχρησιμοποίησή του. Δίνονται πληροφορίες και σχέδια για την αρχιτεκτονική μετατροπή του κτιρίου και την αλλαγή χρήσης του. Έπειτα, περιγράφεται αναλυτικά η γεωμετρία του κτιρίου και το στατικό σύστημα του φορέα, ενώ παρουσιάζονται και τα δομικά του στοιχεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι ιδιότητες του υλικού από το οποίο αποτελείται ο φορέας και γίνεται εκτενής αναφορά στον προσδιορισμό των φορτίων που καταπονούν την κατασκευή, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 1. Επιπλέον, περιγράφονται η διαδικασία προσδιορισμού των σεισμικών φορτίων και οι δύο μέθοδοι υπολογισμού της σεισμικής απόκρισης κατά τον Ευρωκώδικα 8, η ιδιομορφική φασματική ανάλυση και η ισοδύναμη στατική φόρτιση. Ορίζεται η διαδικασία προσδιορισμού των συνδυασμών φορτίσεων τόσο στην οριακή κατάσταση αστοχίας όσο και στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας. Ακολουθώς, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι απαιτούμενες κανονιστικές διατάξεις και οι έλεγχοι κατά τον Ευρωκώδικα 3 που αφορούν τις δύο οριακές καταστάσεις, αστοχίας και λειτουργικότητας. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και των ελέγχων του υφιστάμενου φορέα, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις, όπου γίνεται εμφανής η ανάγκη αναδιάρθρωσης και ενίσχυσης της κατασκευής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται μετατροπές ως προς το στατικό σύστημα του φορέα, είτε αντικαθιστώντας παλιά μέλη με νέα, είτε προσθέτοντας επιπλέον μέλη, όπου κρίνεται απαραίτητο, είτε ενισχύοντας τις παλιές διατομές με ελάσματα και γωνιακές ενισχύσεις, με σκοπό την βελτίωση της συμπεριφοράς του κτιρίου. Μελετάται εκ νέου ο φορέας και κατόπιν μερικών επαναλήψεων, η κατασκευή επαναδιαστασιολογείται ώστε να υπακούει σε όλες τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης και επιβεβαιώνεται η επάρκεια των παλαιών και νέων δομικών στοιχείων. Ακολουθώς, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις οι οποίες προάγουν την βιωσιμότητα της κατασκευής.

Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της μετατροπής του συγκεκριμένου βιομηχανικού κτιρίου και γενικότερα των κατασκευών.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2017 35

## **Research of modification of an old industrial building with criteria of sustainability**

**Christina Evangeliou**

Supervisor: Professor Charis Gantes

October 2017

### **ABSTRACT**

The present diploma thesis deals with the modification of an old industrial building, whose purpose is its reuse, considering some sustainability criteria. Specifically, the behavior of the existing structure is being studied extensively, aiming to identify its structural problems and investigate their solution through a rearrangement of the layout and reinforcement of the construction. Also, the construction of a sustainable structure is emphasized, which will have a positive impact on the environment, the economy and the society.

In the first chapter, the wider meaning of sustainability is explained using historical references and the significance of its application in all the sectors, especially in the construction industry, while the environmental, economic and social values are introduced. The important qualities of steel are analyzed, which characterize the sustainability of steel structures in their life cycle, from their initial design until their demolition. Subsequently, the advantages of recyclability and reusability of steel are described along with some real structures examples, which were recycled and reused.

In the second chapter, several environmental certification systems of buildings are described, according to which, their sustainability is evaluated and verified and their quality assurance is granted. Specifically, their fundamental characteristics are provided, along with the procedures and the evaluation method of each system.

In the third chapter, the building that is going to be modified is revealed, describing its historical development, from its construction to its current state, including the reasons of its reuse. Also, information and designs about its architectural modification and reuse are given. Finally, the geometry and the structural system of the building are described further, while its structural elements are presented.

In the fourth chapter, the properties of the structure's material are presented and there is an extended report concerning the determination of the loads stressing the structure, according to Eurocode 1 regulations. Additionally, the identification procedure of the seismic loads along with the

two methods of calculation of the seismic response according to Eurocode 8, the modal spectrum analysis and the equivalent static force, are described. The identification procedure of load combination is highlighted both at the limit state of failure and the limit state of functionality. All the required regulations and necessary checks, according to Eurocode 3, about both limit states, failure and functionality, are presented. At last, the results of the existing structure's analysis are provided, according to the regulations and it becomes obvious the necessity of the rearrangement and reinforcement of the structure model.

In the fifth chapter, modifications are made on the model of the structure, either by replacing old parts with new ones, or installing additional parts, wherever it is considered necessary, or reinforcing the existing cross-sections with steel plates and haunches, aiming the improvement of the building's behavior. Then, the structure is being studied all over again and after a few repetitions, it is re-dimensioned in order to comply with Eurocode 3 regulations. The final results of the analysis are listed and the adequacy of the old and new structural elements is evaluated. Finally, there are some proposals presented, which further the sustainability of the structure.

In the sixth and final chapter, the general conclusions of the diploma thesis are introduced along with some proposals for the further investigation of the old industrial building's modification and the reuse of structures in general.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ .....</b>	<b>1</b>
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.2	Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	1
1.3	ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	3
1.3.1	Σχεδιασμός κατασκευής.....	4
1.3.2	Φάση κατασκευής .....	5
1.3.3	Φάση λειτουργίας.....	6
1.3.4	Τέλος ωφέλιμης ζωής της κατασκευής .....	7
1.3.4.1	Ανακύκλωση .....	7
1.3.4.2	Επαναχρησιμοποίηση .....	13
<b>2</b>	<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ .....</b>	<b>19</b>
2.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	19
2.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	19
2.2.1	Σύστημα BREEAM.....	20
2.2.2	Σύστημα LEED .....	21
2.2.3	Σύστημα CASBEE .....	22
2.2.4	Σύστημα DGNB .....	23
<b>3</b>	<b>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ .....</b>	<b>25</b>
3.1	ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	25
3.2	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	27
3.3	ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	29
<b>4</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ.....</b>	<b>37</b>
4.1	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	37
4.2	ΔΡΑΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	38
4.2.1	Μόνιμα φορτία.....	38
4.2.2	Φορτίο χιονιού .....	38
4.2.3	Δράσεις ανέμου .....	42
4.2.4	Θερμοκρασιακές μεταβολές .....	60
4.2.5	Σεισμικές δράσεις.....	60
4.2.6	Συνδυασμοί φορτίσεων .....	62
4.3	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ .....	64
4.3.1	Οριακή κατάσταση αστοχίας .....	66
4.3.1.1	Έλεγχος διατομής .....	67

4.3.1.2	Έλεγχος μέλους.....	71
4.3.1.3	Υπολογισμοί .....	75
4.3.2	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας .....	93
4.3.2.1	Υπολογισμοί .....	94
4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
<b>5</b>	<b>ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>97</b>
5.1	ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	97
5.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	99
5.2.1	Οριακή κατάσταση αστοχίας - Υπολογισμοί .....	99
5.2.2	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας - Υπολογισμοί .....	112
5.3	ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	115
<b>6</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>117</b>
6.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	117
6.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	118
6.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	120
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>121</b>



# **1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**

## **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο κατασκευαστικός τομέας, παρόλο που αποτελεί στοιχείο ζωτικής σημασίας για την οικονομία κάθε χώρας, έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Μερικές από αυτές είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η υπέρμετρη κατανάλωση νερού, η παραγωγή αποβλήτων, καθώς επίσης και η εξάντληση των διαθέσιμων φυσικών πόρων. Συγκεκριμένα, στην Ευρώπη τα κτίρια ευθύνονται για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και ο κατασκευαστικός τομέας στο σύνολό του ευθύνεται για το 40% των συνολικά παραγόμενων αποβλήτων. Εξίσου σημαντική είναι και η αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη που απαιτεί συνεχώς την κατασκευή νέων έργων. Επομένως, η αναζήτηση ενός συγκεκριμένου πλαισίου βιωσιμότητας για το δομημένο περιβάλλον είναι εξαιρετικά σημαντική. Για να επιτευχθούν όμως οι στόχοι της βιώσιμης ανάπτυξης, χρειάζεται μια ριζική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο τα κτίρια σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και λειτουργούν. Θα πρέπει κατά την μελέτη της κατασκευής να εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πρόκειται να δημιουργηθούν από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο εφοδιασμός των υλικών, από τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή αλλά και από την λειτουργία του έργου. Αυτό σημαίνει κατανόηση των έργων, όχι μόνο όσον αφορά το τελικό αποτέλεσμα και τα οφέλη για την εκάστοτε επιχείρηση, αλλά και όσον αφορά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, την κοινωνία και τον κόσμο.

## **1.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

Με τους όρους «βιωσιμότητα» και «βιώσιμη ανάπτυξη» αποδίδουμε στα ελληνικά τους αγγλικούς όρους "sustainability" και "sustainable development" αντίστοιχα. Εναλλακτικά του όρου «βιώσιμη ανάπτυξη» χρησιμοποιούνται οι όροι «αειφορία», «ολοκληρωμένη, διατηρήσιμη ή διαρκής ή αειφόρος ανάπτυξη». Ο όρος «βιωσιμότητα» φαίνεται να είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός. Πρόκειται για μια έννοια κλειδί για την σημερινή εποχή και δεν είναι δυνατόν να αγνοηθεί τόσο από τους επιστήμονες που ασχολούνται με θέματα ανάπτυξης και περιβάλλοντος όσο και από κάθε πολίτη που προβληματίζεται για την εξέλιξη του περιβάλλοντος στο σύγχρονο κόσμο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η βιωσιμότητα μιας δραστηριότητας αφορά την μακροπρόθεσμη παράτασή της στο

μέλλον και δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη, παγιωμένη ιδέα, αλλά μια εξελικτική πορεία βελτίωσης της διαχείρισης των φυσικών και ανθρωπίνων συστημάτων μέσα από την καλύτερη κατανόηση και γνώση. Η βιωσιμότητα είναι μια έννοια πολύ ευρύτερη από την προστασία του περιβάλλοντος, διότι προϋποθέτει μακροπρόθεσμες πολιτιστικές αλλαγές. Ο γνωστότερος ορισμός της βιώσιμης ανάπτυξης ανήκει στην πρώην πρωθυπουργό της Νορβηγίας Gro Harlem Brundtland, η οποία με την έκθεσή της με τίτλο «Το κοινό μας μέλλον», που δημοσίευσε το 1987 στην WCED (World Commission for the Environment and Development – Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη), όρισε την αειφόρο ανάπτυξη ως «η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες των σύγχρονων γενεών χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την ικανότητα των επόμενων γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες». Έπειτα, το 1992 στη Διεθνή Συνδιάσκεψη του Ρίο διατυπώθηκαν για πρώτη φορά και επίσημα οι αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Εκεί η βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται ως «η ανάπτυξη που παρέχει μακροπρόθεσμα οικονομικά, κοινωνικά, περιβαλλοντικά οφέλη φροντίζοντας τις ανάγκες της παρούσας και των μελλοντικών γενεών». Στη συνέχεια, οι συνθήκες του Maastricht το 1992, του Amsterdam το 1997 και η Διεθνή Συνδιάσκεψη του Johannesburg το 2002 επιβεβαίωσαν την αναγκαιότητα της βιωσιμότητας και ενσωματώθηκαν στο Διεθνές Δίκαιο και το Δίκαιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

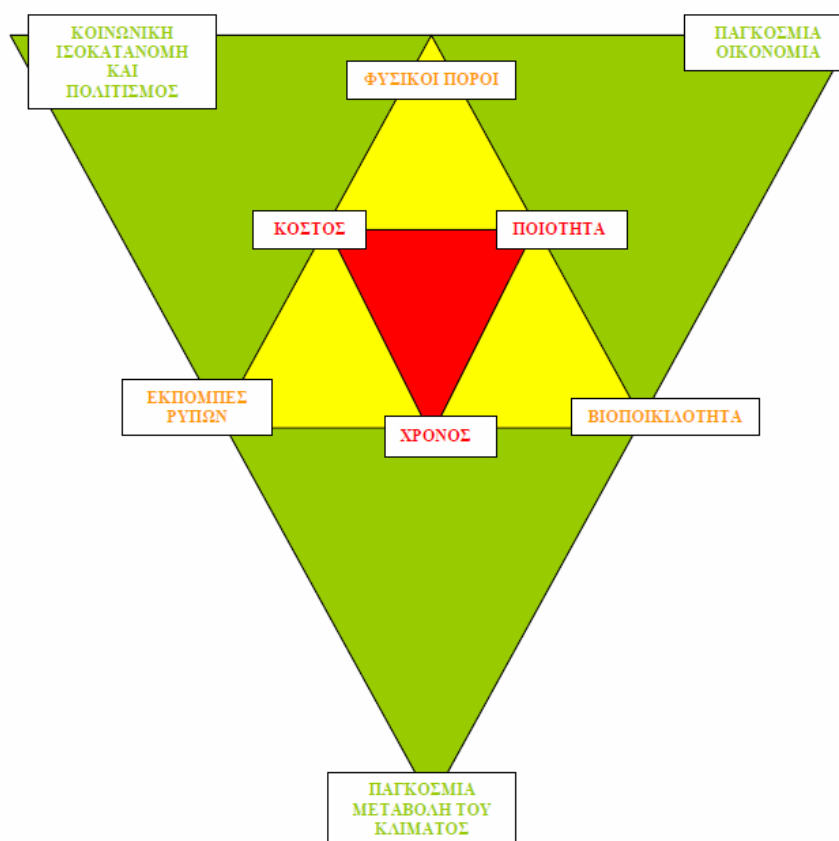
Ως εκ τούτου, η βιωσιμότητα είναι μια έννοια πολύπτυχη και πολυδιάστατη με περιβαλλοντικές αλλά και οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους, που παραστατικά απεικονίζεται με το ακόλουθο Σχήμα 1-1. Οι στόχοι της μπορούν να επιτευχθούν μόνο εάν και τα τρία στοιχεία (κοινωνία, περιβάλλον και οικονομία) ικανοποιούνται ταυτόχρονα και ισόρροπα. Αρχικά, προκειμένου να επιτευχθεί η περιβαλλοντική βιωσιμότητα, το φυσικό περιβάλλον θα πρέπει να διατηρεί την πλήρη λειτουργικότητα του και τη χρηστικότητα του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κύριος σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα, στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης, οφείλει να αναπτύσσεται με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος και την βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης των ανθρώπων. Όταν οι καλές επιχειρηματικές πρακτικές ενσωματώνονται στις κοινωνικές και περιβαλλοντικές πλευρές της βιωσιμότητας, το αποτέλεσμα είναι πολύ πιο ευεργετικό. Ένα καλό παράδειγμα είναι η αύξηση των επιδοτήσεων ή οι φορολογικές ελαφρύνσεις για την πράσινη ανάπτυξη. Τέλος, η κοινωνική βιωσιμότητα, αφορά τις αποφάσεις και τα έργα που προάγουν τη γενική βελτίωση της κοινωνίας. Οι μελλοντικές γενιές έχουν το δικαίωμα στην ίδια ή και καλύτερη ποιότητα ζωής με τις σημερινές γενιές.



Σχήμα 1-1: Το τρίπτυχο της αειφόρου ανάπτυξης [3]

### 1.3 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η βιωσιμότητα στις κατασκευές γενικότερα αφορά την δημιουργία και την διαχείριση ενός υγιούς δομημένου περιβάλλοντος, το οποίο θα βασίζεται στη λογική χρήση των φυσικών πόρων και στην υιοθέτηση οικολογικών αρχών. Στο Σχήμα 1-2 διακρίνονται οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των παραγόντων που απαιτούνται για την παραδοσιακή κατασκευαστική διαδικασία και εκείνων που απαιτούνται, σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο, για την δημιουργία βιώσιμων κατασκευών. Είναι ήδη γνωστό ότι οι παράγοντες που παίζουν βασικό ρόλο στην παραδοσιακή κατασκευαστική διαδικασία είναι το κόστος, η ποιότητα και ο χρόνος κατασκευής. Ωστόσο, για να επιτευχθεί η βιωσιμότητα της κατασκευής εισάγονται νέοι παράγοντες τους οποίους πρέπει να ακολουθήσει ο κατασκευαστικός τομέας. Οι παράγοντες αυτοί εστιάζουν στην λογική χρήση των φυσικών πόρων, στην μείωση των εκπομπών ρύπων κατά τη φάση της κατασκευής και της λειτουργίας και στην μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο οικοσύστημα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, εισάγονται επιπλέον ως παράγοντες η κοινωνική δικαιοσύνη και τα πολιτιστικά θέματα, η οικονομία και η μεταβολή του κλίματος.



Σχήμα 1-2: Η εξέλιξη της ιδέας των βιώσιμων κατασκευών [1]

Οι μεταλλικές κατασκευές είναι από τις πιο αποτελεσματικές επιλογές για να επιτευχθεί η βιωσιμότητα στον κατασκευαστικό τομέα αφού ο χάλυβας, χάρη στις ιδιότητές του, αποτελεί ένα από τα πιο βιώσιμα υλικά στον κόσμο καθώς έχει το μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Μερικές από τις ιδιότητες της βιωσιμότητας που σχετίζονται με τη χρήση του χάλυβα παρατίθενται περιληπτικά στον Πίνακα 1-1. Αυτές οι ιδιότητες είναι σχεδόν ίδιες για όλα τα κτίρια από χάλυβα είτε είναι κατοικίες, γραφεία, βιομηχανίες είτε δημόσια κτίρια.

Πίνακας 1-1: Ιδιότητες βιωσιμότητας των μεταλλικών κατασκευών

Χρησιμότητα	Είναι προκατασκευασμένη με αποδοτικές εργοστασιακές διαδικασίες με την ελάχιστη χρήση φυσικών πηγών και καθιστά δυνατή την δημιουργία κτιρίων μεγάλης διάρκειας και ευελιξίας
Ταχύτητα	Η ανέγερσή της εκτελείται ραγδαία στην τοποθεσία του έργου και έτσι μειώνεται η αναστάτωση
Βάρος	Είναι ελαφριά και αποδοτική ως προς τα υλικά, την ενέργεια, τη μεταφορά και τις εκπομπές ρύπων. Επίσης, το μικρό βάρος δίνει την δυνατότητα για κατακόρυφη επέκταση του κτιρίου και προσωρινή τοποθεσία
Απόβλητα	Είναι αποδοτική ως προς τα υλικά, παράγοντας χαμηλές ποσότητες αποβλήτων και τα περισσότερα από αυτά είναι ανακυκλώσιμα
Εκτέλεση	Ο χάλυβας είναι ένα εύκολα εκτελέσιμο υλικό, με ακριβείς διαστάσεις
Επιμέλεια	Παραδίδεται στην τοποθεσία στην ώρα της για την εγκατάσταση και μπορεί να κατασκευαστεί τοπικά
Ανθεκτικότητα	Έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλής ποιότητας αποκόμματα
Υγεία	Κατασκευάζεται με ασφαλείς και ελεγχόμενες διεργασίες, δημιουργώντας χαμηλές εκπομπές ρύπων
Ανακυκλωσιμότητα	Ο χάλυβας ανακυκλώνεται χωρίς ποιοτικές απώλειες
Επαναχρησιμοποίηση	Μπορεί εύκολα να αποσυναρμολογηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί

Στην συνέχεια, αναλύονται εκτενέστερα οι σημαντικότερες ιδιότητες των μεταλλικών κατασκευών που αναδεικνύουν την βιωσιμότητά τους σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους, από τον αρχικό σχεδιασμό τους μέχρι και την κατεδάφιση.

### 1.3.1 Σχεδιασμός κατασκευής

Ένας καλός σχεδιασμός με οικολογικές αρχές είναι απαραίτητος και καθοριστικός για την επίτευξη της βιωσιμότητας της κατασκευής σε όλη την διάρκεια ζωής της. Τα χαρακτηριστικά που αφορούν τον σχεδιασμό μιας βιώσιμης μεταλλικής κατασκευής είναι τα ακόλουθα:

- **Αποδοτικότητα χάλυβα:** Ο χάλυβας έχει μεγάλη αντοχή σε σχέση με το βάρος του. Έτσι, για κάθε δομικό στοιχείο δε χρησιμοποιείται περισσότερο υλικό από αυτό που είναι απαραίτητο για να επιτελέσει τη λειτουργία του, καθώς με τη χρήση χάλυβα καλύτερης ποιότητας επιτρέπεται η περαιτέρω μείωση στην ποσότητα του υλικού που απαιτείται ανά δομικό στοιχείο. Η άλλη πτυχή αποδοτικής χρήσης του υλικού περιέχει τη μείωση των αποβλήτων εξαιτίας των σχεδιαστικών προδιαγραφών.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Η χρήση της ενέργειας κατά τη λειτουργία της κατασκευής προκύπτει άμεσα από τη φάση σχεδιασμού. Ορίζοντας προϊόντα υψηλής ποιότητας και σταθερών ιδιοτήτων, συνδυασμένα με αποδοτικές κατασκευαστικές λύσεις που ενεργοποιούνται με τη χρήση του χάλυβα, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί αισθητά. Η χρήση λιγότερης ενέργειας θα έχει ως αποτέλεσμα πολλά οφέλη ως προς τη βιωσιμότητα.
- **Ευελιξία διαμόρφωσης χώρου:** Ο χάλυβας παρέχει στην κατασκευή τη δυνατότητα διάταξης και αναδιάταξης των χώρων. Για παράδειγμα, στις χαλύβδινες κατασκευές διευκολύνεται η επανατοποθέτηση των εσωτερικών τοίχων, η μετέπειτα συγχώνευση των δαπέδων καθώς και η εγκατάσταση ανελκυστήρων ή κλιμακοστασίων. Έτσι με τη χρήση του χάλυβα μπορεί να ληφθεί

υπόψη από τον σχεδιασμό η δυνατότητα μελλοντικής αλλαγής του κτιρίου, γεγονός που θα οδηγήσει στη μείωση των δαπανών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς έτσι λαμβάνεται περισσότερη αξία από τους ίδιους πόρους. Επίσης, οι εσωτερικοί χώροι με τη χρήση του χάλυβα μπορούν να είναι μεγάλοι χωρίς πολλά υποστυλώματα, διευκολύνοντας έτσι την αλλαγή της χρήσης του. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το κτίριο ενός σταθμού αυτοκινητοδρόμου, το οποίο αποτελείται από δοκούς μεγάλων ανοιγμάτων με κυκλικά διάκενα με σκοπό την δημιουργία ενός εύκαμπτου χώρου χωρίς υποστυλώματα (Σχήμα 1-3).



Σχήμα 1-3: Σταθμός αυτοκινητοδρόμου με δοκούς μεγάλων ανοιγμάτων [2]

- **Δυνατότητα προσωρινής κατασκευής:** Η δυνατότητα κατασκευής ελαφρών κτιρίων με την χρήση του χάλυβα και η εύκολη αποσυναρμολόγησή τους, κάνουν τον χάλυβα κατάλληλο για προσωρινά κτίρια. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να σχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε κτίρια για να λειτουργήσουν μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα και ύστερα να δημιουργήσουμε μια νέα κατασκευή είτε μεταφέροντας την παλιά σε άλλη τοποθεσία και μετατρέποντάς την, είτε απλά αλλάζοντας την χρήση της.
- **Αισθητική του κτιρίου:** Συχνά παραβλέπεται, αλλά θα πρέπει να εξετάζεται και η αισθητική των κτιρίων. Ο χάλυβας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους, δίνοντας στους αρχιτέκτονες πλήρη ευελιξία να καινοτομήσουν και να δημιουργήσουν συναρπαστικά κτίρια. Τα κτίρια προορίζονται για την κατοικία μας, τον χώρο εργασίας μας και χώρο του ελεύθερου χρόνου μας και ως εκ τούτου, το πώς φαίνονται και το πώς μας κάνουν να νιώθουμε είναι σημαντικό μέσα σε ένα κοινωνικό πλαίσιο. Τα κτίρια που έχουν καλή αισθητική τονώνουν και εμπνέουν τους χρήστες τους, που σημαίνει ότι έχουν περισσότερες πιθανότητες για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και έτσι γίνονται πιο βιώσιμα.

### 1.3.2 Φάση κατασκευής

Κατά την φάση κατασκευής ενός κτιρίου δημιουργούνται σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, η μεταλλική κατασκευή μπορεί να πετύχει αύξηση της αποδοτικότητας όσον αφορά την μείωση των αποβλήτων, το χρόνο, το κόστος, την ασφάλεια και την υγεία. Τα πλεονεκτήματα της μεταλλικής κατασκευής κατά την φάση λειτουργίας αναλύονται παρακάτω:

- **Προκατασκευή:** Ένα μεγάλο μέρος της χαλύβδινης κατασκευής εκτελείται στο εργοστάσιο υπό ελεγχόμενες συνθήκες και όχι στο εργοτάξιο. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται δομικά στοιχεία με εξασφαλισμένη ποιότητα για να ανταποκριθούν στις ειδικές απαιτήσεις του κάθε έργου. Σε αυτό το περιβάλλον, τα χαλύβδινα μέρη μπορούν εύκολα να τυποποιηθούν, ελεγχθούν και πιστοποιηθούν.

Η προκατασκευή των πλαισίων, των δομικών στοιχείων, των κόμβων κτλ. παρέχει ένα ασφαλέστερο εργασιακό περιβάλλον και διευκολύνει την ακριβή και ποιοτική εργασία.

- Απόβλητα της κατασκευής: Η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων αποτελεί μια προτεραιότητα για τον κατασκευαστικό τομέα. Στις κατασκευές από χάλυβα, με την δυνατότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας χαλύβδινων προϊόντων και σε σταθερές διαστάσεις, η δημιουργία αποβλήτων στο χώρο του εργοταξίου είναι ανεπαίσθητη. Οποιοδήποτε άχρηστο υλικό, που παράγεται κατά τη διάρκεια της φάσης κατασκευάσματος, μπορεί να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά στην διαδικασία παραγωγής χάλυβα.
- Χρόνος και κόστος: Η ταχύτητα ανέγερσης των μεταλλικών κατασκευών έχει μετατρέψει τον χάλυβα ως τη βασική επιλογή υλικού για τον κλάδο των κατασκευών. Η ταχύτητα κατασκευής προσφέρει ένα οικονομικό όφελος, το οποίο είναι θεμελιώδους σημασίας για την αειφόρο ανάπτυξη. Η μικρότερη περίοδος των διαδικασιών στο εργοτάξιο μειώνει τη διάρκεια χρηματοδότησης για την κατασκευή και οδηγεί στην παράδοση του κτιρίου σε λειτουργία πιο γρήγορα. Ένα παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή μιας αποθήκης και κέντρου διανομής στην Αγγλία, όπου η ανέγερση 1.600 τόνων δομικού χάλυβα διήρκεσε μόνο 21 ημέρες (Σχήμα 1-4).



Σχήμα 1-4: Αποθήκη και κέντρο διανομής, όπου η ανέγερση 1.600 τόνων δομικού χάλυβα διήρκεσε 21 ημέρες [2]

- Ασφάλεια και υγεία: Έρευνες αποδεικνύουν συνεχώς ότι ο χάλυβας είναι το ασφαλέστερο δομικό υλικό. Τα μέλη ενός κτιρίου κατασκευάζονται σε ένα ασφαλές, ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον και στη συνέχεια γίνεται η ανέγερση στο εργοτάξιο χωρίς την δημιουργία σκόνης και αποβλήτων. Σπάνια μπορεί να υπάρξει απαίτηση για επί τόπου κοπή των μελών στο εργοτάξιο. Επιπλέον, δεν υπάρχει η ανάγκη για πιθανές επικίνδυνες εργασίες καλουπώματος και χρονοβόρων χειρισμών κατά την σύνδεση με άλλα δομικά στοιχεία.

### 1.3.3 Φάση λειτουργίας

Κατά την λειτουργία των κατασκευών, το περιβάλλον δυσχεραίνεται λόγω της εκπομπής ρύπων και της κατανάλωσης ενέργειας. Ο σχεδιασμός των κτιρίων για μεγάλη διάρκεια ζωής αποτελεί μια από τις βασικές πτυχές της βιωσιμότητας. Με την χρήση του χάλυβα επεκτείνεται η ζωή των κτιρίων οδηγώντας σε οικονομικό όφελος και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η συνεχής κατασκευή

κτιρίων οδηγεί σε επιπλέον δαπάνες και είναι δυσμενής για το περιβάλλον. Κατά την φάση λειτουργίας οι μεταλλικές κατασκευές έχουν τα εξής βιώσιμα χαρακτηριστικά:

- **Αντοχή και ανθεκτικότητα:** Ο δομικός χάλυβας μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο από ότι η ίδια η λειτουργία του κτιρίου στο οποίο αποτελεί μέλος. Η αντοχή και η ανθεκτικότητα του χάλυβα προσφέρουν ασφάλεια και μεγάλη διάρκεια λειτουργικότητας στα μέλη, πράγμα που αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της βιώσιμης χρήσης των κατασκευών.
- **Συντήρηση:** Η συντήρηση των κτιρίων είναι μια σημαντική διαδικασία διότι επιτυγχάνει την μακροζωία τους. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υλικών επένδυσης υψηλής ποιότητας και βιωσιμότητας που είναι διαθέσιμα στην αγορά για την προστασία του χάλυβα από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Όταν αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό με ιδανικά προγράμματα συντήρησης, προσφέρουν μακροχρόνια προστασία, με αποτέλεσμα την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- **Απόδοση ενέργειας:** Η κατανάλωση ενέργειας κατά την λειτουργία του κτιρίου, είναι το βασικό ζήτημα της περιβαλλοντικής επίδοσής του. Ο χαλύβδινος σκελετός από μόνος έχει μια σημαντική επίδραση πάνω στην ενέργεια λειτουργίας, αλλά και η θερμική αποδοτικότητα του χαλύβδινου περιβλήματος είναι σημαντική. Τα περιβλήματα από χάλυβα αποτελούν μια καλή λύση για μόνωση, εξοικονομώντας έτσι μεγάλο ποσοστό ενέργειας αλλά και κόστους, καθώς δεν υπάρχουν διαρροές του κτιρίου κατά την θέρμανση και άρα μειώνεται κατά πολύ η κατανάλωση καύσιμων υλών.
- **Δυνατότητα αλλαγής της λειτουργίας:** Τον καιρό των ραγδαίων αλλαγών, τα βιώσιμα κτίρια πρέπει να μπορούν να δεχτούν αλλαγές σχετικά με την χρήση τους, τις υπηρεσίες τους, τον ηλεκτρισμό κτλ. Η χρήσιμη ζωή των κτιρίων από χάλυβα μπορεί να επεκταθεί με την αλλαγή των εσωτερικών χώρων, την επέκταση της κατασκευής εξωτερικά καθώς και την αναβάθμιση των περιβλημάτων. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα σε ένα υπάρχον κτίριο να προστεθούν επιπλέον όροφοι από μια ελαφρά κατασκευή, η οποία ελαχιστοποιεί το επιπρόσθετο φορτίο στο κτίριο και τα θεμέλια του. Οι νέοι μεταλλικοί όροφοι μπορούν να εμπλουτίσουν την λειτουργία του κτιρίου, να βελτιώσουν την εικόνα του αλλά και να αυξήσουν την κερδοφορία του. Με αυτούς τους τρόπους παρατείνεται η φάση λειτουργίας του κτιρίου, γεγονός που το καθιστά βιώσιμο.

### 1.3.4 Τέλος ωφέλιμης ζωής της κατασκευής

Πολλές φορές είναι αδύνατο ή ανεπιθύμητο να επεκταθεί η ζωή των κτιρίων μέσω της προσαρμογής και της ανακαίνισης και έτσι η αποδόμησή τους είναι αναπόφευκτη. Όταν αυτή η κατάληξη είναι αναγκαία, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξετάζεται η ελαχιστοποίηση των επιδράσεων που επιφέρει στο περιβάλλον. Θα πρέπει, λοιπόν, να βρεθούν λύσεις έτσι ώστε μετά την αποδόμηση του κτιρίου τα μέλη να μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα χωρίς να χρειαστεί να καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, δυσχεραίνοντας έτσι το περιβάλλον. Μια μεταλλική κατασκευή μπορεί να προσφέρει αυτή την δυνατότητα με πολλούς τρόπους, αναδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο την βιωσιμότητά της. Μετά το τέλος ζωής της, μπορεί να αποσυναρμολογηθεί τόσο εύκολα όσο εύκολα κατασκευάστηκε εξ' αρχής. Τα χαλύβδινα μέλη μιας παλιάς κατασκευής έχουν την δυνατότητα να επαναχρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία σε νέα κατασκευαστικά έργα ή να ανακυκλωθούν για την παραγωγή νέου χάλυβα. Αυτές οι δυνατότητες αναλύονται στην συνέχεια με την χρήση συγκεκριμένων παραδειγμάτων.

#### 1.3.4.1 Ανακύκλωση

Το παραδοσιακό τέλος του κύκλου ζωής των κτιρίων ήταν για πολλά χρόνια η κατεδάφιση και απομάκρυνση των υλικών τους σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ωστόσο, σήμερα καταβάλλεται μεγαλύτερη προσοχή στη χρήση δομικών υλικών που μπορούν να ανακτηθούν και να ανακυκλωθούν, όταν τα κτίρια φτάσουν στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Δεν είναι όλα τα δομικά υλικά

ανακυκλώσιμα, είτε γιατί είναι δύσκολο και αντισυμβαλλόμενο να ανακυκλωθούν, είτε γιατί από αυτά προκύπτουν μόνο προϊόντα χαμηλότερης ποιότητας ή λειτουργίας. Ένα κοινό παράδειγμα είναι το σκυρόδεμα, το οποίο συνήθως συνθλίβεται και επαναχρησιμοποιείται ως γέμισμα θεμελίων. Παρόλο που αυτό είναι ευεργετικό για το περιβάλλον, καθώς αποφεύγεται η υγειονομική ταφή, ωστόσο δεν αντικαθιστά την ανάγκη για νέους πόρους για την παραγωγή νέου σκυροδέματος. Υλικά όπως τα μέταλλα είναι πραγματικά ανακυκλώσιμα, δηλαδή μπορούν να ανακυκλωθούν ξανά και ξανά σε νέα προϊόντα της ίδιας ποιότητας και λειτουργίας. Ο χάλυβας είναι κατασκευασμένος από ένα ενιαίο μονολιθικό υλικό, γεγονός που τον καθιστά ικανό να χρησιμοποιηθεί εκ νέου ως πρώτη ύλη για την παραγωγή του ίδιου ή ενός διαφορετικού προϊόντος. Επίσης, ο χάλυβας είναι μαγνητικός και επομένως είναι εύκολο να διαχωριστεί με την χρήση μαγνήτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-5.



Σχήμα 1-5: Οι μαγνητικές ιδιότητες του χάλυβα απλοποιούν σε μεγάλο βαθμό τον διαχωρισμό [6]

Ο χάλυβας είναι το μοναδικό δομικό υλικό που μπορεί να ανακυκλωθεί πλήρως ξανά και ξανά σε νέο χάλυβα. Το μοναδικό αυτό χαρακτηριστικό δίνει στον χάλυβα μια υψηλή οικονομική αξία σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Στην Ευρώπη οι υποδομές ανάκτησης του χάλυβα με σκοπό την ανακύκλωσή του είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένες, με υψηλές αποδόσεις και έχουν τεθεί σε ισχύ εδώ και δεκαετίες.

Ένα παράδειγμα ανακύκλωσης του χάλυβα αποτελεί η ιστορία του κτιρίου Lackenby στο Teeside της Αγγλίας (Σχήμα 1-6). Πρόκειται για ένα κτίριο παραγωγής χάλυβα, το οποίο χτίστηκε το 1953 και είχε 330 μέτρα μήκος, 39 μέτρα ύψος και πάνω από 70 μέτρα πλάτος. Περίπου 20.000 τόνοι χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν στη δομή της κατασκευής. Ο χώρος αυτός υπηρέτησε ως μέρος των χαλυβουργιών μέχρι το 1976. Έπειτα, λόγω των υψηλών υποστυλωμάτων ο ελεύθερος χώρος ήταν μεγάλος και έτσι χρησιμοποιήθηκε ως αποθήκη υλικών χωρίς επιπλέον τροποποιήσεις. Αυτό αποτελεί και ένα παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης των κτιρίων. Το 2004 το κτίριο έχασε τη λειτουργία αποθήκευσης και πάρθηκε η απόφαση να κατεδαφιστεί με ελεγχόμενη έκρηξη.





Σχήμα 1-6: Χαλυβουργείο Lackenby, Teeside, Αγγλία [6]

Εξετάστηκε η επιλογή για την αποσυναρμολόγηση της κατασκευής στα αρχικά κατασκευαστικά μέρη αλλά υπήρχαν τρεις λόγοι για τους οποίους αυτό δεν ήταν δυνατό:

- Έλλειψη ασφαλούς πρόσβασης.
- Οι περισσότερες συνδέσεις στο κτίριο ήταν συγκολλητές, γεγονός που καθιστά αδύνατη την αποσυναρμολόγηση.
- Το κτίριο κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας μη τυποποιημένα πρότυπα χαλύβδινων διατομών.

Μετά την κατεδάφιση του κτιρίου, ανακτήθηκαν και ανακυκλώθηκαν όλα τα δομικά στοιχεία από χάλυβα, συμπεριλαμβανομένου και του χαλύβδινου οπλισμού που περιείχε το δάπεδο. Το σκυρόδεμα από την κατασκευή του δαπέδου θρυμματίστηκε και χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης. Κατά την απομάκρυνση από το σημείο της κατεδάφισης, τα απορρίμματα μεταφέρθηκαν στις αποθήκες θραυσμάτων, κόπηκαν σε κομμάτια μεγέθους κλιβάνου και μέσα σε έξι μήνες μετατράπηκαν ξανά σε πρώτη ύλη (Σχήμα 1-7).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 1-7: (α) θραύση χαλύβδινων δομικών στοιχείων, (β) Τοποθέτηση θραυσμάτων σε κάδους, (γ) Χαλύβδινα θραύσματα, (δ) Σύνθλιψη σκυροδέματος [2]

Με την ανακύκλωση του χάλυβα από το χαλυβουργείο του Lackenby εξοικονομήθηκε τόση ενέργεια όση χρειάζεται για να τροφοδοτήσει 3.700 νοικοκυριά για τις ενεργειακές τους ανάγκες για έναν ολόκληρο χρόνο. Από τον νέο χάλυβα που προέκυψε κατασκευάστηκαν χαλύβδινες διατομές, χαλυβδόφυλλα, πλάκες και ταινίες όπως φαίνονται στην Σχήμα 1-8.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1-8: (α) Χαλύβδινες διατομές, (β) Χαλύβδινες πλάκες, (γ) Χαλύβδινες ταινίες [2]

Πιο συγκεκριμένα, το κτίριο χαλυβουργείας Lackenby μετατράπηκε σε:

- Δομικό χάλυβα για την κατασκευή του 5<sup>ου</sup> τερματικού σταθμού του αεροδρομίου Χίθροου στο Λονδίνο (Σχήμα 1-9).
- Δομικό χάλυβα για την κατασκευή της νέας εξέδρας στο Οβάλ γήπεδο κρίκετ στο Λονδίνο (Σχήμα 1-10).

- Χαλυβδόφυλλα για την κατασκευή γέφυρας στον σιδηροδρομικό σταθμό Paddington στο Λονδίνο (Σχήμα 1-11).
- Χαλύβδινες πλάκες για τη κατασκευή των δοκών της γέφυρας του αυτοκινητόδρομου A249 στην περιοχή Σέπεϊ στο Ηνωμένο Βασίλειο (Σχήμα 1-12).
- Γαλβανισμένες λωρίδες χάλυβα για την δημιουργία ελαφρών κατασκευών από χάλυβα για χρήση κατοικίας.
- Λωρίδες χάλυβα οι οποίες δόθηκαν στο Βασιλικό Νομισματοκοπείο (Royal Mint) για την παραγωγή νομισμάτων αξίας 1 και 2 αγγλικές λίρες.
- Λωρίδες χάλυβα για την κατασκευή εξαρτημάτων για τα αυτοκίνητα.
- Χαλύβδινες πλάκες προσαρμοσμένες για την κατασκευή των πλοίων.



Σχήμα 1-9: Τερματικός σταθμός 5, Αεροδρόμιο Χίθρου, Αγγλία [6]



Σχήμα 1-10: Εξέδρα του γηπέδου Oval Cricket Ground στο Λονδίνο [6]



Σχήμα 1-11: Γέφυρα στον σιδηροδρομικό σταθμό Paddington στο Λονδίνο [6]



Σχήμα 1-12: Γέφυρα του αυτοκινητοδρόμου A249, Σέπει, Αγγλία [6]

#### 1.3.4.2 Επαναχρησιμοποίηση

Ένα δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό του χάλυβα, που τον καθιστά ως το πιο βιώσιμο δομικό υλικό στο χώρο των κατασκευών, είναι η δυνατότητά του να επαναχρησιμοποιηθεί λόγω της μεγάλης αντοχής και ανθεκτικότητάς του. Η επαναχρησιμοποίηση είναι μια διαδικασία, η οποία προσφέρει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα από την ανακύκλωση, εφόσον δεν απαιτείται κάποια περαιτέρω επεξεργασία που να είναι δυσμενής για το περιβάλλον. Για παράδειγμα, η επαναχρησιμοποίηση μιας χαλύβδινης δοκού στην υφιστάμενη μορφή της είναι καλύτερη επιλογή από την ανακύκλωσή της γιατί έτσι εξοικονομείται η ενέργεια που χρειάζεται για να μετατραπεί ο χάλυβας σε υγρή μορφή. Βεβαίως, το εμπόριο για προϊόντα από χάλυβα δεύτερης χρήσης είναι ακόμα σε πολύ αρχικό στάδιο, αλλά υπάρχει μια σημαντική πρόθεση για αύξηση της επαναχρησιμοποίησης του δομικού χάλυβα. Η επαναχρησιμοποίηση μπορεί να αφορά την αλλαγή χρήσης ενός κτιρίου, την επαναχρησιμοποίηση ολόκληρου του σκελετού για την δημιουργία νέας κατασκευής σε άλλη τοποθεσία, καθώς και την επαναχρησιμοποίηση κάποιων δομικών μελών του κτιρίου σε ένα νέο κτίριο ή για την επέκταση ενός υφιστάμενου, με καθόλου ή ελάχιστες τροποποιήσεις.

Υπάρχουν όμως και αρκετά εμπόδια που δυσκολεύουν την επαναχρησιμοποίηση των δομικών στοιχείων. Σημαντικά είναι τα τεχνικά εμπόδια όπως είναι η έλλειψη λεπτομερούς γνώσης των ιδιοτήτων του προϊόντος και του ιστορικού κατά την χρήση του, καθώς και η διασφάλιση της ποιότητας των επαναχρησιμοποιούμενων μελών. Επιπλέον εμπόδιο μπορεί να είναι η πιθανή μη ανθεκτικότητα τους στη διαδικασία αποδόμησης. Για παράδειγμα, οι ελαφρές κατασκευές πολλές φορές καταστρέφονται κατά την αποσυναρμολόγηση. Σημαντική, επίσης, είναι και η ανάγκη για επαρκή χώρο αποθήκευσης για τα μέλη που ανακτώνται από την αποσυναρμολόγηση της κατασκευής. Τέλος, η αποδόμηση σε αντίθεση με την κατεδάφιση απαιτεί προφυλάξεις για την υγεία και την ασφάλεια και δημιουργεί πρόσθετο κόστος.

Ένα παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης αποτελεί το κτίριο αποθήκης της αυτοκινητοβιομηχανίας Honda στην περιοχή Swindon της Αγγλίας. Το εν λόγω κτίριο, έκτασης 927m<sup>2</sup>, κατασκευάστηκε το 2001 και αποσυναρμολογήθηκε το 2004. Όλα τα μέλη που ανακτήθηκαν από την κατασκευή κατέληξαν σε μια

αποθήκη. Ο χαλύβδινος σκελετός πρώτα ελέγχθηκε για την κατάστασή του από έμπειρους κατασκευαστές, καθαρίστηκε και βιάστηκε ξανά. Τον Σεπτέμβριο του 2005, η δομή ξαναχτίστηκε σε διαφορετική τοποθεσία της περιοχής Swindon, ως το νέο κεντρικό κτίριο παραλαβής των εξαρτημάτων που αποστέλλονται στην Honda (Σχήμα 1-13). Η ανακατασκευή του κτιρίου διήρκησε μόνο μια εβδομάδα. Όλος ο βασικός σκελετός επαναχρησιμοποιήθηκε, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλικών πλακών της βάσης των υποστυλωμάτων, των συνδέσμων δυσκαμψίας ακόμα και των χαλύβδινων προϊόντων ψυχρής έλασης. Δυστυχώς, ήταν αδύνατον να επαναχρησιμοποιηθεί η επικάλυψη του κτιρίου λόγω της αλλαγής χρήσης του και των αλλαγών στους κανονισμούς. Ωστόσο, αποσυναρμολογήθηκε προσεκτικά και επαναχρησιμοποιήθηκε ως εσωτερική επένδυση για ηχομόνωση σε ένα άλλο κτίριο κοντά στην περιοχή Nottingham της Αγγλίας. Στο νέο κτίριο της Honda τοποθετήθηκε ένα νέο σύστημα επικάλυψης, το οποίο ικανοποιούσε τους τότε κτιριακούς κανονισμούς και τις εταιρικές απαιτήσεις.



Σχήμα 1-13: Επαναχρησιμοποίηση μεταλλικής κατασκευής – Honda, περιοχή Swindon [2]

Ένα δεύτερο παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης και επέκτασης μιας μεταλλικής κατασκευής είναι το κτίριο Blue Steel στην περιοχή Leeds της Αγγλίας. Το κτίριο αυτό, έκτασης 14.500m<sup>2</sup>, λειτούργησε αρχικά ως αποθήκη και κέντρο διανομής για το πολυκατάστημα Roundstretcher μέχρι το 2005. Το 2005 το κτίριο ανακαινίστηκε και δόθηκε στον νέο ιδιοκτήτη του, την εταιρεία ζυθοποιίας Carlsberg (Σχήμα 1-14). Η δυνατότητα επέκτασης των πλαισίων από χάλυβα ήταν το κλειδί για αυτό το έργο ανακαίνισης. Με την αύξηση του ύψους του κτιρίου, ο πρόσθετος αποθηκευτικός χώρος που δημιουργήθηκε σήμαινε ότι το χαλύβδινο πλαίσιο διατηρήθηκε για να παρέχει ένα σύγχρονο κτίριο αποθήκευσης και διανομής ικανό να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του νέου ενοικιαστή. Η διαδικασία ήταν πολύ απλή και ολόκληρο το έργο ανακαίνισης ολοκληρώθηκε σε μόλις εννέα μήνες. Μετά την απομάκρυνση και την ασφαλή απόρριψη της παλαιάς οροφής με αμιάντο και την ανακύκλωση της παλαιάς επικάλυψης από χάλυβα, οι υπάρχουσες τεγίδες, οι μηκίδες και οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας αφαιρέθηκαν προσεκτικά, επισημάνθηκαν και αποθηκεύτηκαν στο εργοτάξιο. Τα υφιστάμενα υποστυλώματα ελέγχθηκαν και προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να γίνει μια νέα προσθήκη. Προστέθηκαν

νέα υποστυλώματα μήκους 3m πάνω από το υπάρχοντα (Σχήμα 1-15) και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν ξανά οι τεγίδες, οι μηκίδες και οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Στο νέα κομμάτια των υποστυλωμάτων προστέθηκαν νέες μηκίδες και νέοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Επιπλέον, κατασκευάστηκε μια νέα διώροφη μεταλλική δομή στο εσωτερικό του κτιρίου για την χρήση γραφείων και εξωτερικά ένα μεγάλο στέγαστρο και χώροι φόρτωσης. Στο σύνολο του κτιρίου, προστέθηκε νέα επικάλυψη τύπου sandwich (χάλυβας εξωτερικά και αφρολέξ εσωτερικά) στους τοίχους και επένδυση ανοξειδωτού χάλυβα για την οροφή ώστε να εξασφαλίζεται η αεροστεγανότητα και η θερμομόνωση του κελύφους του κτιρίου σύμφωνα με τα σύγχρονα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης. Τέλος, ο αρχιτέκτονας χρησιμοποίησε μια παλέτα χρωμάτων τριών διαφορετικών αποχρώσεων για την ενίσχυση της εμφάνισης του νέου κτιρίου Blue Steel.



(a)



(β)

Σχήμα 1-14: (a) Το κτίριο Blue Steel πριν, (β) Το κτίριο Blue Steel μετά [2]



Σχήμα 1-15: Νέα υποστυλώματα 3 μέτρων για την κατακόρυφη επέκταση του φορέα [2]

Τρίτο παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης αποτελεί το κτίριο στη λεωφόρο Cambridge στην περιοχή Slough της Αγγλίας (Σχήμα 1-16). Το κτίριο, έκτασης 3.320m<sup>2</sup>, χτίστηκε το 2000 και ήταν μια αποθήκη όπου στην μπροστινή πλευρά περιείχε γραφεία. Το 2015, στο πλαίσιο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού για το επιχειρηματικό πάρκο Slough, το κτίριο μεταφέρθηκε σε ένα οικόπεδο ένα μίλι μακριά από την αρχική του τοποθεσία. Το αρχικό κτίριο είχε επικάλυψη από τούβλα στις τρεις πλευρές του. Στόχος ήταν να επαναχρησιμοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία της αρχικής κατασκευής και το έργο να κοστίσει λιγότερο από ότι θα κόστιζε η κατασκευή ενός νέου ισοδύναμου κτιρίου. Η μετεγκατάσταση ήταν περίπλοκη καθώς το κτίριο έπρεπε να αλλάξει την αρχική του διάταξη έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις πρόσβασης της νέας τοποθεσίας. Μετά την ανοικοδόμηση του παλαιού χαλύβδινου σκελετού προστέθηκε νέα επικάλυψη από χάλυβα και μια νέα στέγη λόγω των κινδύνων που υπάρχουν με την επαναχρησιμοποίηση παλιάς οροφής. Εκτός από την χαλύβδινη δομή, επαναχρησιμοποιήθηκαν στο νέο επανατοποθετημένο κτίριο τα τζάμια, οι σκάλες, οι θύρες φόρτωσης, οι προκατασκευασμένες δοκοί από σκυροδέμα (Σχήμα 1-17), η τοιχοποιία, η περίφραξη και ο ανελκυστήρας. Το έργο ολοκληρώθηκε σε 56 εβδομάδες και επιτεύχθηκε 56% λιγότερη χρήση άνθρακα και 25% εξοικονόμηση κόστους σε σύγκριση με την κατασκευή ενός νέου ισοδύναμου κτιρίου.



Σχήμα 1-16: Λεωφόρος 9 Cambridge, Slough, Αγγλία [2]



Σχήμα 1-17: Επανεγκατάσταση των προκατασκευασμένων δοκών σκυροδέματος [2]



Τέλος, μερικά παραδείγματα αλλαγής της χρήσης λειτουργίας των κτιρίων αποτελούν τα παρακάτω:

- Η κατασκευή Musée d'Orsay στο Παρίσι ήταν κάποτε σιδηροδρομικός σταθμός αλλά σήμερα, εδώ και μερικές δεκαετίες, λειτουργεί ως μουσείο (Σχήμα 1-18).
- Μια δεξαμενή καυσίμων στην περιοχή Naaldwijk της Ολλανδίας μετατράπηκε σε χώρο γραφείων (Σχήμα 1-19).
- Το σχολείο ROC Twente στην περιοχή Hengelo της Ολλανδίας ήταν προηγουμένως εργοστασιακός χώρος (Σχήμα 1-20).
- Σιλό αποθήκευσης άμμου και χαλκικών μετατράπηκαν σε χώρους γραφείων και studios (Σχήμα 1-21).



Σχήμα 1-18: Μουσείο Musée d'Orsay, Παρίσι [6]



Σχήμα 1-19: Από δεξαμενή σε γραφεία, Naaldwijk, Ολλανδία [6]



Σχήμα 1-20: Από εργοστασιακός χώρος σε σχολείο, ROC Twente, Hengelo, Ολλανδία [6]



Σχήμα 1-21: Από σιλό σε γραφεία και studios, U-trechters, Utrecht, Ολλανδία [6]

## **2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ**

### **2.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Τα κτίρια είναι κατάλληλα σχεδιασμένα έτσι ώστε να υπόκεινται στις απαιτήσεις του κώδικα των κτιρίων. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, αποτελεί αρχιτεκτονική και σχεδιαστική πρόκληση προκειμένου πέραν της τήρησης του κώδικα να εξασφαλιστεί και η βελτίωση της συνολικής απόδοσης του κτιρίου, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του κόστους. Τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται συνεχώς όλο και περισσότερα συστήματα αξιολόγησης, τα οποία αξιολογούν την ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση των κτιρίων, οι οποίες εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα της βιώσιμης ανάπτυξης.

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση βασίζεται στην ανάλυση του κύκλου ζωής των κτιρίων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά μακροπρόθεσμα οφέλη όπως είναι ο περιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η δημιουργία ασφαλέστερων, ως προς την υγεία, και πιο παραγωγικών χώρων και η μείωση του λειτουργικού κόστους. Για την ολοκληρωμένη πιστοποίηση των κτιρίων απαιτείται η αξιολόγηση πολλών παραμέτρων, όπως είναι η διαχείριση, η χρήση γης και οι μεταφορές. Ωστόσο, η διαχείριση των πηγών ενέργειας αποτελεί τον βασικότερο γνώμονα για την πιστοποίηση των κτιρίων. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η βιώσιμη κατασκευή προϋποθέτει όχι μόνο, νέες και περιβαλλοντικά προσανατολισμένες κατασκευές, αλλά και νέες, φιλικές προς το περιβάλλον, διαδικασίες λειτουργίας και συντήρησης των κτιρίων.

Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης ξεπερνά την περιβαλλοντική διάσταση και περιλαμβάνει εξίσου τους παράγοντες της οικονομικής και κοινωνικής βιωσιμότητας. Για αυτό το λόγο δημιουργείται η ανάγκη για την αξιολόγηση και την πιστοποίηση των κατασκευών, η οποία θα προσμετρά όλες τις παραμέτρους βιωσιμότητας των κατασκευών. Στη συνέχεια, περιγράφονται ορισμένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης, καθώς επίσης και ο

### **2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

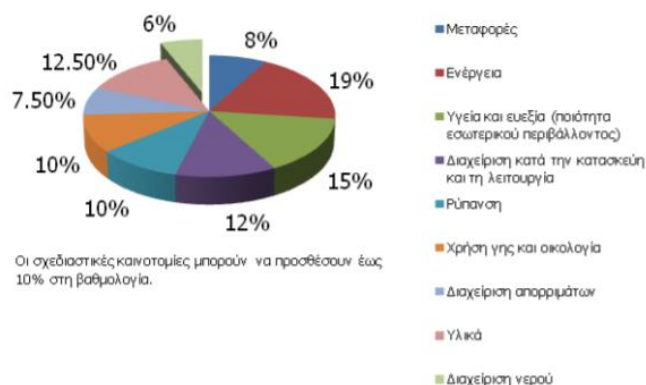
Η περιβαλλοντική πιστοποίηση κτιρίου είναι μια διαδικασία, κατά την οποία αξιολογείται και επιβεβαιώνεται η βιώσιμη απόδοση ενός κτιρίου, ενώ παράλληλα παρέχεται και η εξασφάλιση ποιότητας. Η περιβαλλοντική πιστοποίηση ενός κτιρίου μπορεί να γίνει με μια ή περισσότερες

μεθόδους. Ο κύριος άξονας των πιστοποιήσεων αυτών είναι το τρίπτυχο «σχεδιασμός - κατασκευή - χρήση» τα οποία θα πρέπει να διέπονται από τις αρχές της εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και της οικολογίας. Για να πιστοποιηθεί ένα κτήριο θα πρέπει να έχει μία αξιολογη βαθμολογία σε θέματα που αφορούν την εξοικονόμηση ενέργειας, τη σωστή διαχείριση του νερού, τη σωστή διαχείριση των αποβλήτων, τη χρήση πράσινων υλικών, την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης που προκαλείται κατά την διάρκεια της κατασκευής, την ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπων κατά την μεταφορά των υλικών αλλά και την οικολογία. Οι πλέον γνωστές και παγκοσμίως αναγνωρισμένες μέθοδοι κατά χρονολογική σειρά είναι:

### 2.2.1 Σύστημα BREEAM

Κατά την δεκαετία του 1990, το 'Building Research Establishment, LLC (BRE)' ξεκίνησε να χρησιμοποιεί μια μέθοδο περιβαλλοντικής εκτίμησης το BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method). Πρόκειται για το Βρετανικό σύστημα αξιολόγησης και πιστοποίησης αειφόρων κτιρίων BREEAM, το οποίο αποτέλεσε το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα περιβαλλοντικής αξιολόγησης. Σκοπός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η αντικειμενική μέτρηση της περιβαλλοντικής απόδοσης νέων και υφιστάμενων κτιρίων. Έχει την δυνατότητα να εφαρμόζεται σε κάθε είδους κτίριο, είτε πρόκειται για κατοικία, είτε πρόκειται για επαγγελματικό χώρο. Στα προσεχή χρόνια το BREEAM άρχισε να χρησιμοποιείται και σε άλλες χώρες συμπεριλαμβανομένων του Καναδά, Χονγκ Κονγκ και Νέας Ζηλανδίας, ενώ σήμερα θεωρείται μια από τις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους περιβαλλοντικής πιστοποίησης, σχεδόν σε όλον τον κόσμο. Συγκεκριμένα, με το σύστημα αυτό έχουν πιστοποιηθεί περισσότερα από 200.000 κτίρια κάθε είδους. Επίσης σε τακτά χρονικά διαστήματα το υπάρχον σύστημα αναβαθμίζεται έτσι ώστε να είναι συμβατό με τα νέα δεδομένα που προκύπτουν στον κατασκευαστικό κλάδο. Στην Ελλάδα μόνο ένα έργο, ένα συγκρότημα πολυκατοικιών, βρίσκεται στη διαδικασία αξιολόγησης για να πιστοποιηθεί κατά BREEAM.

Η αξιολόγηση του κτιρίου, σύμφωνα με την μέθοδο BREEAM, είναι χωρισμένη σε 10 κατηγορίες τα οποία περιλαμβάνουν διάφορα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά έχουν διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας, προκειμένου η τελική πιστοποίηση του κτιρίου να προέρχεται από ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια (Σχήμα 2-1). Κατά την διαδικασία αξιολόγησης το κτίριο συγκεντρώνει βαθμούς για κάθε κριτήριο που ικανοποιεί, ενώ υπάρχουν υποχρεωτικά όρια και κριτήρια, τα οποία διασφαλίζουν την περιβαλλοντική ποιότητα των κτιρίων.



Σχήμα 2-1: Ποσοστιαίος συντελεστής βαρύτητας των κατηγοριών BREAM 2008 για νέα κτίρια [9]

Η διαδικασία αξιολόγησης του κτιρίου πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά, γίνεται η ολοκλήρωση της μελέτης, που οδηγεί σε μια προσωρινή πιστοποίηση, ενώ η τελική πιστοποίηση δίνεται όταν το κτίριο παραδοθεί στους χρήστες του. Ανάλογα με την βαθμολογία που συγκεντρώνεται, η οποία εκφράζεται σε κλίμακα επί τοις 100, το κτίριο κατατάσσεται σε μία από τις εξής κατηγορίες:

- UNCLASSIFIED <30%,
- PASS ≥ 30%,
- GOOD ≥ 45%,
- VERY GOOD ≥ 55%,
- EXCELLENT ≥70%,
- OUTSTANDING ≥ 85%.

Για υπάρχοντα κτίρια οι παράγοντες που μελετώνται είναι οι εξής:

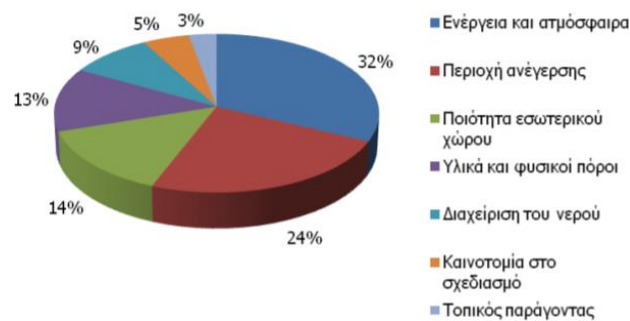
- Ενέργεια (24 βαθμοί):
- Συστήματα μεταφορών (6 βαθμοί)
- Ρύπανση (11 βαθμοί)
- Χρήση υλικών (31 βαθμοί)
- Κτιριακή διαχείριση (8 βαθμοί)
- Χρήσεις γης και οικολογία (9 βαθμοί)
- Άνεση και υγεία των διαμενόντων του κτιρίου (8 βαθμοί)
- Χρήση νερού (6 βαθμοί)

Την διενέργεια της αξιολόγησης αναλαμβάνουν ειδικά εκπαιδευμένοι επιθεωρητές, οι οποίοι συνεργάζονται με την ομάδα μελέτης και είναι υπεύθυνοι για την συγκέντρωση των απαραίτητων δικαιολογητικών ώστε να πιστοποιηθεί η περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου.

### 2.2.2 Σύστημα LEED

Το LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) δημιουργήθηκε το 1998 από το 'U.S. Green Energy and Environmental Design' στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και αποτελεί το δεύτερο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα περιβαλλοντικής αξιολόγησης διεθνώς. Όπως και το BREEAM, έτσι και το LEED έχει εφαρμογή σε νέα και υφιστάμενα κτίρια, κάθε είδους χρήσης, είτε είναι κατοικίες είτε επαγγελματικοί χώροι. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει ότι η πιστοποίηση των κτιρίων από το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι υψηλής ποιότητας. Σήμερα, η πιστοποίηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων χρησιμοποιείται από πολλές χώρες όπως ο Καναδάς, η Ινδία, η Ιταλία, η Σερβία και άλλες. Αξίζει να αναφερθεί πως στη Σερβία, ένα ιδιαίτερης σημασίας project, βρίσκεται στη διαδικασία του αρχικού σχεδιασμού, με στόχο να πιστοποιηθεί μετά την ολοκλήρωσή του, ως LEED Platinum. Μέχρι στιγμής έχουν πιστοποιηθεί κατά LEED περίπου 8.500 κτίρια, η πλειοψηφία των οποίων βρίσκονται στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Στην Ελλάδα ήδη τέσσερα έργα έχουν υποβάλει αίτηση για αξιολόγηση κατά LEED.

Το κτίριο αξιολογείται μέσω μιας κλίμακας 100 βαθμών, η οποία περιλαμβάνει πέντε κύριες κατηγορίες κριτηρίων περιβαλλοντικής επίδοσης και δύο επιπλέον κατηγορίες που αφορούν την καινοτομία στο σχεδιασμό και την προώθηση των περιβαλλοντικών αναγκών της περιοχής (Σχήμα 2-2). Επίσης, κάθε κριτήριο έχει διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας.



Σχήμα 2-2: Ποσοστιαίος συντελεστής βαρύτητας των κατηγοριών LEED για νέα κτίρια [9]

Για να λάβει ένα κτίριο την πιστοποίηση του LEED, θα πρέπει να ικανοποιεί τις αναγκαίες προϋποθέσεις, που ορίζονται αλλά και να συγκεντρώνει ορισμένους βαθμούς. Τα τέσσερα επίπεδα της συγκεκριμένης πιστοποίησης είναι τα εξής:

- Certified: 40 - 49 βαθμοί
- Silver: 50 - 59 βαθμοί
- Gold: 60 - 79
- Platinum: > 80 βαθμοί

Οι παράγοντες που μελετώνται για την βαθμολόγηση του κτιρίου είναι:

- Παράγοντες γενικής βιωσιμότητας (26 βαθμοί)
- Υδατική απόδοση (14 βαθμοί)
- Ενέργεια και ατμοσφαιρική ρύπανση (35 βαθμοί)
- Υλικά και φυσικοί πόροι (10 βαθμοί)
- Περιβαλλοντική ποιότητα εσωτερικού χώρου (15 βαθμοί)
- Καινοτομία στη λειτουργία του κτιρίου (6 βαθμοί)
- Επίτευξη αναπτυξιακών προτεραιοτήτων που θέτει η Περιφέρεια στην οποία ανήκει το κτίριο (4 βαθμοί)

### 2.2.3 Σύστημα CASBEE

Η εφαρμογή CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency), η οποία ξεκίνησε το 2001 από το 'Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC)', αποτελεί την άποψη της Ιαπωνίας για την περιβαλλοντική διαχείριση των κτιρίων. Πρόκειται για μια μέθοδο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιδόσεων των κτιρίων, η οποία αφορά όλα τα στάδια ζωής του κτιρίου. Η πρωτοτυπία της CASBEE σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα αξιολόγησης είναι ότι διαχωρίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις ενεργειακές επιδόσεις του κτιρίου. Εισάγεται έτσι ένας νέος δείκτης αξιολόγησης, ο οποίος ονομάζεται BEE (Building Environmental Efficiency).

Ο δείκτης αξιολόγησης BEE αποτελείται από δύο μέρη:

- Τις Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις του κτιρίου [Building Environmental Loadings – (L)], οι οποίες αντιστοιχούν στις επιπτώσεις που έχει το κτίριο έξω από τα όρια του οικοπέδου και
- Την περιβαλλοντική Ποιότητα και την Επίδοση του κτιρίου [Building Environmental Quality and Performance – (Q)], η οποία βασίζεται στην ικανοποίηση των χρηστών.

Κάθε ενότητα Q και L περιλαμβάνει τρεις κατηγορίες κριτηρίων. Στην κατηγορία Q οι κατηγορίες είναι:

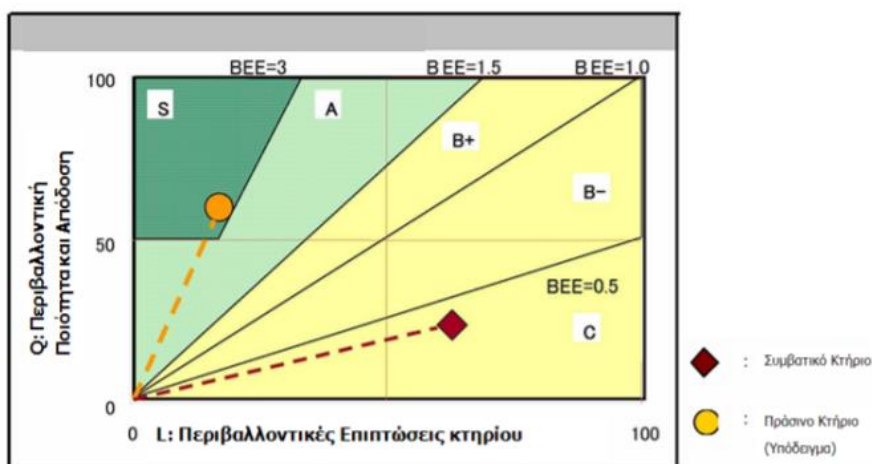
- το εσωτερικό περιβάλλον
- η ποιότητα των υποδομών
- ο εξωτερικός χώρος εντός οικοπέδου

ενώ η ενότητα L περιλαμβάνει τις κατηγορίες για:

- την ενέργεια
- τις πηγές φυσικών πόρων και τα υλικά, και
- το περιβάλλον εξωτερικά του οικοπέδου

Οι κατηγορίες αυτές περιλαμβάνουν κι άλλα κριτήρια, τα οποία συνολικά ανέρχονται στα 100 και από τα οποία διαμορφώνεται η τελική βαθμολογία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα με άξονες L και Q (Σχήμα 2-3). Τα κτίρια με την υψηλότερη βαθμολογία βρίσκονται στο σημείο του διαγράμματος με το χαμηλότερο L και το υψηλότερο Q. Κάθε κριτήριο μπορεί να βαθμολογηθεί από το 1 μέχρι το 5. Το 1 ορίζει την ικανοποίηση των ελάχιστων απαιτήσεων, το 3 μιας μέσης απόδοσης και το 5 μιας υψηλής απόδοσης. Το κτίριο κατατάσσεται σε 5 κατηγορίες, ανάλογα με την βαθμολογία που έχει συγκεντρώσει, οι οποίες είναι:

- C: BEE = 1 - 0,49
- B: BEE = 0,50 - 0,99
- B+: BEE = 1,00-1,49
- A: BEE = 1,50 – 2,99
- S: BEE = 3,00 – 5,00



Σχήμα 2-3: Κλίμακα βαθμολόγησης περιβαλλοντικών επιδόσεων κτιρίων σύμφωνα με το σύστημα CASBEE [9]

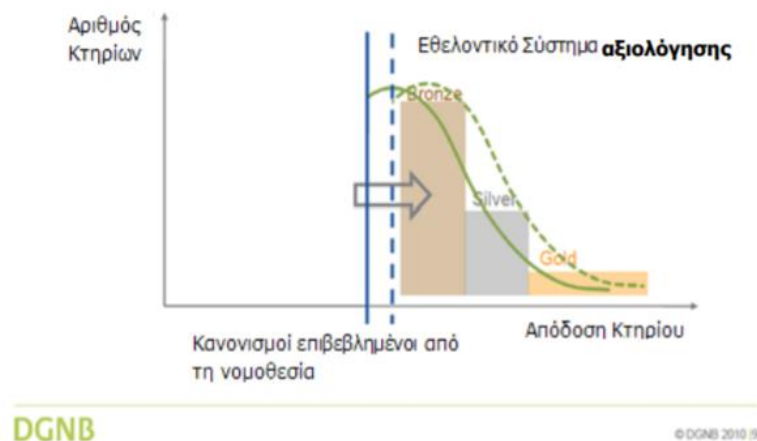
#### 2.2.4 Σύστημα DGNB

Το σύστημα DGNB (Deutsche Gesellschaft Fur Nachhaltiges Bauen – German Sustainable Building Council) αναπτύχθηκε στη Γερμανία, το 2009 και αποτελεί μια μέθοδο ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης των κτιρίων. Το σύστημα αυτό αφορά μια ολιστική προσέγγιση, καθώς περιλαμβάνει οικολογικά, οικονομικά αλλά και κοινωνικο-πολιτισμικά κριτήρια.

Η διαδικασία αξιολόγησης πραγματοποιείται με τη χρήση ενός λογισμικού, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού του κτιρίου, προκειμένου να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τις περιβαλλοντικές και ενεργειακές ιδιότητες του κτιρίου. Κάθε κριτήριο που περιλαμβάνει η αξιολόγηση αυτή, μπορεί να συγκεντρώσει 10 βαθμούς και έχει διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας στην τελική βαθμολογία, ανάλογα με τον τύπο του υπό εξέταση κτιρίου. Ανάλογα με τη βαθμολογία που συγκεντρώνει κάθε κτίριο αποκτά διαφορετικό επίπεδο πιστοποίησης, τα οποία είναι:

- Bronze 50 – 64,9%
- Silver 65 – 88,9%
- Gold 89 – 100%

Το σύστημα DGNB είναι ένα δυναμικό σύστημα, το οποίο συνεχώς αναπροσδιορίζεται, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων στον τομέα των κατασκευών. Επίσης, προωθεί την βελτίωση των νέων κτιρίων αλλά και των ανακαινιζόμενων. Η βελτίωση της απόδοσης των κτιρίων με τη χρήση του προγράμματος DGNB αναπαριστάται στο Σχήμα 2-4, στο οποίο η συνεχής πράσινη γραμμή αφορά τον αριθμό των σημερινών κτιρίων σε σχέση με την ενεργειακή τους απόδοση, ενώ η διακεκομμένη πράσινη γραμμή αναπαριστά την βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση των μελλοντικών νέων ή ανακαινιζόμενων κτιρίων.



Σχήμα 2-4: Βελτίωση της ποιότητας του συνόλου των κτιρίων, μέσω της υιοθέτησης ενός εθελοντικού συστήματος αξιολόγησης [9]



## **3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ**

### **3.1 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ**

Η Ελευσίνα επιλέχθηκε ως «Πολιτιστική Πρωτεύουσα της Ευρώπης 2021» από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και έτσι η Ελλάδα θα φιλοξενήσει την πολιτιστική πρωτεύουσα της Ευρώπης για τέταρτη φορά μετά την Αθήνα το 1985, τη Θεσσαλονίκη το 1997 και την Πάτρα το 2006. Σημειώνεται ότι οι πολιτιστικές πρωτεύουσες της Ευρώπης, ξεκίνησαν το 1985, με πρωτοβουλία της τότε υπουργού Πολιτισμού, Μελίνας Μερκούρη. Πρόκειται για έναν θεσμό που έχει στόχο να δώσει στους Ευρωπαίους την ευκαιρία να μάθουν περισσότερα για τον πολιτισμό κάθε χώρας, να απολαύσουν την κοινή ιστορία και τις κοινές αξίες τους και να αρχίσει διαπολιτισμικός διάλογος. Η επιλογή της Ελευσίνας έγινε χάρη σε έναν πρωτότυπο και πρωτοποριακό φάκελο υποψηφιότητας, προϊόν της κοινότητας των κατοίκων της με τίτλο «Μετάβαση στην Ευρηορία», ο οποίο σκοπεύει στην σύνδεση όλων των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων με την τέχνη και τον πολιτισμό, αντιμετωπίζοντας υπό ένα νέο πρίσμα τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις της εποχής μας. Κατά συνέπεια, προβλέπονται μεγάλα έργα υποδομής προκειμένου να στεγάσουν τις δράσεις και τις εκδηλώσεις του φεστιβάλ και να αναζωογονήσουν αισθητά την όψη της πόλης και το βιομηχανικό παρελθόν της. Ένα από τα έργα αυτά αποτελεί το κτίριο για το οποίο γίνεται η μελέτη στην παρούσα διπλωματική εργασία όπου πρόκειται να μετατραπεί από αποθήκη σε χώρο αθλητικών δραστηριοτήτων.

Το κτίριο εδράζεται στην περιοχή της Ελευσίνας και αποτελεί τμήμα του Θριάσιου Πεδίου, ενός από τα μεγαλύτερα βιομηχανικά και διαμετακομιστικά κέντρα της Ελλάδας και από τα λίγα που συνεχίζουν να αναπτύσσονται ακόμα. Η βιομηχανία στην Ελευσίνα αναπτύχθηκε εντατικά από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα με την ίδρυση και την εγκατάσταση εργοστασίων, κυρίως επί της ακτογραμμής, όπου συνεχίστηκε μέχρι το 1970. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η βιομηχανία συνέχισε την εξάπλωση της και στην ενδοχώρα του Θριάσιου Πεδίου με την δημιουργία μονάδων μεταλλικών κατασκευών, καθώς και χημικών και οικοδομικών μονάδων. Μια από αυτές τις νεότερες μεταλλικές κατασκευές στην είσοδο της πόλης αποτελεί το κτίριο για το οποίο γίνεται η μελέτη. Το κτίριο αυτό ανήκε στο συγκρότημα της Ελαιουργικής, το οποίο ιδρύθηκε στην Ελευσίνα το 1955 από την «Ελαιουργική – Κεντρική Συνεταιριστική Ένωση Ελαιοπαραγωγών Ελλάδος». Το κτίριο κατασκευάστηκε γύρω στο 1960 και η λειτουργία του ήταν η αποθήκευση δεξαμενών ελαιόλαδου, ενώ σήμερα αποτελεί μια μεγάλη κλειστή αποθήκη όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Ένα μέρος της αποθήκης λειτουργεί ως γυμναστήριο και χώρο εκπαίδευσης πολεμικών τεχνών ενώ το υπόλοιπο είναι άδειο και χρησιμοποιείται μερικές

φορές για εκδηλώσεις του δήμου. Παρακάτω δίνονται μερικές εικόνες με το εσωτερικό του κτιρίου σήμερα (Σχήμα 3-1, Σχήμα 3-2, Σχήμα 3-3 και Σχήμα 3-4)



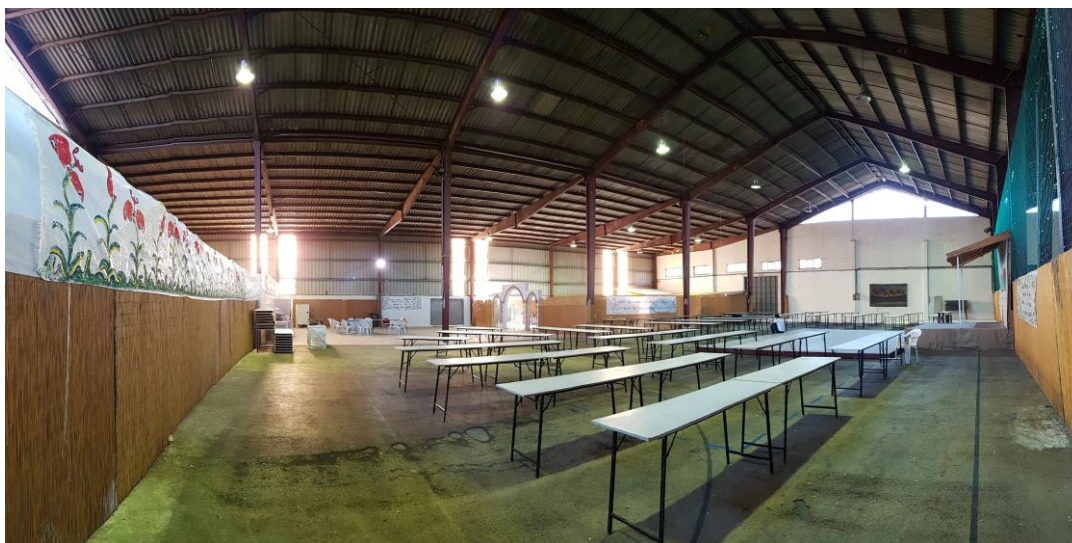
Σχήμα 3-1: Εσωτερική όψη του βιομηχανικού κτιρίου.



Σχήμα 3-2: Εσωτερική όψη του βιομηχανικού κτιρίου



Σχήμα 3-3: Εσωτερική όψη του βιομηχανικού κτιρίου



Σχήμα 3-4: Πανοραμική εσωτερική όψη του βιομηχανικού κτιρίου

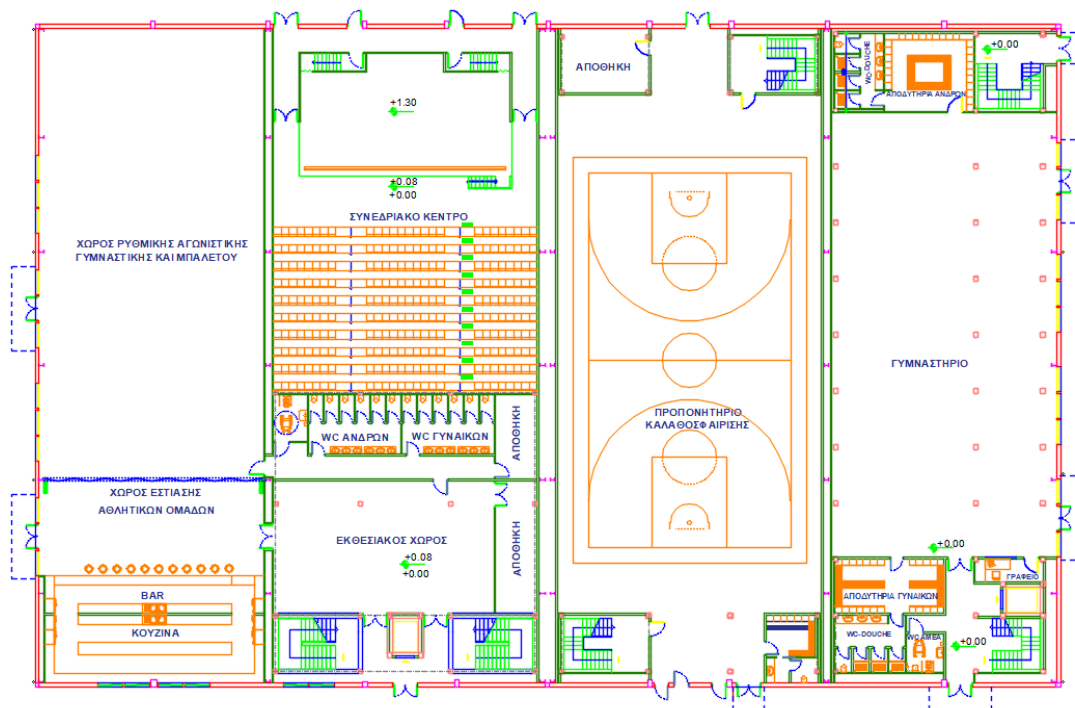
### 3.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το κτίριο, το οποίο σήμερα είναι μια μεγάλη κλειστή αποθήκη θα μετατραπεί όπως σημειώθηκε παραπάνω σε έναν πολυχώρο για αθλητικές δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, το νέο κτίριο πρόκειται να περιλαμβάνει:

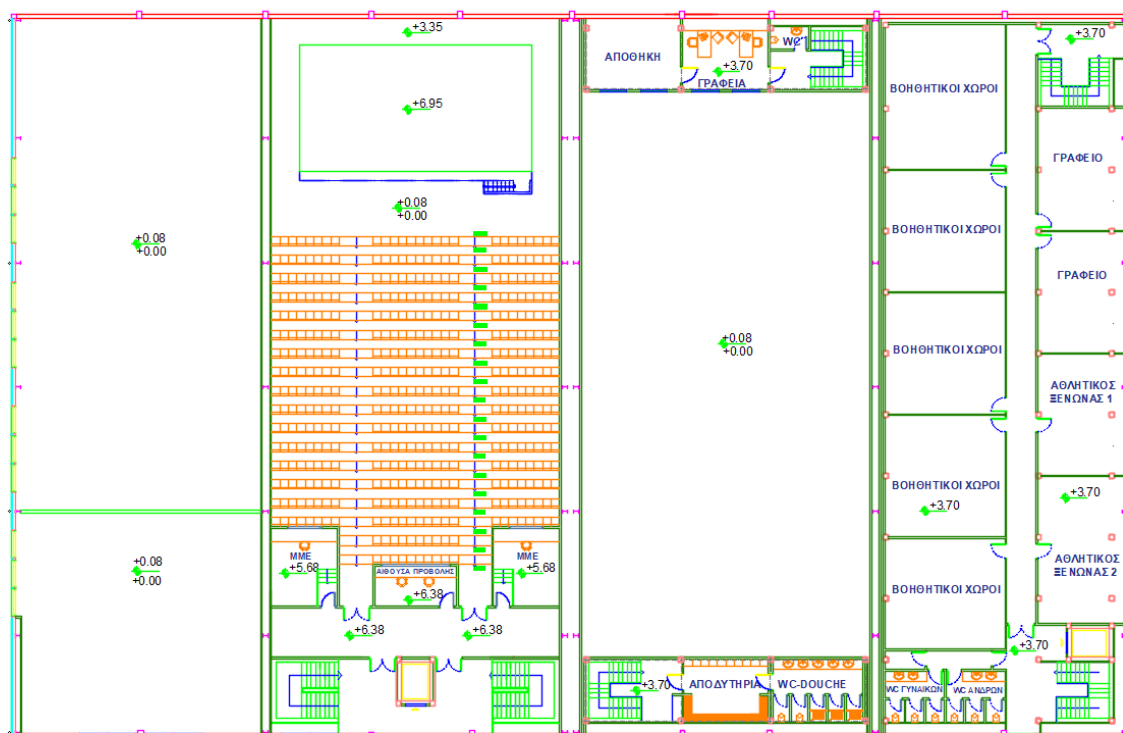
- Χώρο ρυθμικής αγωνιστικής γυμναστικής και μπαλέτου
- Συνεδριακό κέντρο (κινηματογράφο)
- Προπονητήριο καλαθοσφαίρισης

- Γυμναστήριο και χώρο ενδυνάμωσης
- Εκθεσιακό χώρο
- Κουζίνα και χώρο εστίασης των αθλητικών ομάδων
- Αποδυτήρια και τουαλέτες
- Χώρους εκαίδευσης και γραφεία
- Ιατρείο
- Αποθηκευτικούς χώρους
- Ανελκυστήρες και κλιμακοστάσια

Εντός του κεντρικού τμήματος, θα πραγματοποιηθούν νέες κατασκευές από μεταλλικούς φορείς, στατικά ανεξάρτητους με τους υφιστάμενους. Οι κατασκευές αυτές θα θεμελιωθούν σε νέες πεδιλοδοκούς οπλισμένου σκυροδέματος και θα μορφώσουν νέα πατάρια για την εξυπηρέτηση γραφειακών χώρων καθώς και τις κερκίδες και τους χώρους εξυπηρέτησης του κινηματογράφου. Η τελική προσομοίωση της αρχιτεκτονικής του κτιρίου απεικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα 3-5 και στο Σχήμα 3-6.



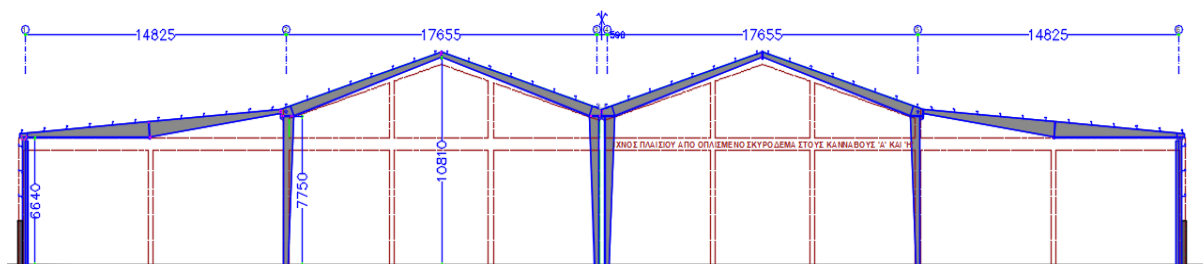
Σχήμα 3-5: Κάτοψη ισογείου



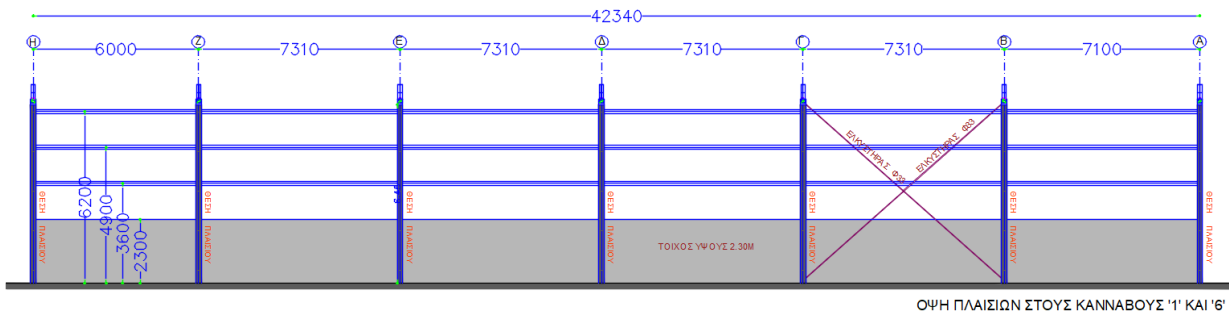
Σχήμα 3-6: Κάτοψη στάθμης +3.70m έως +6.38m

### 3.3 ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

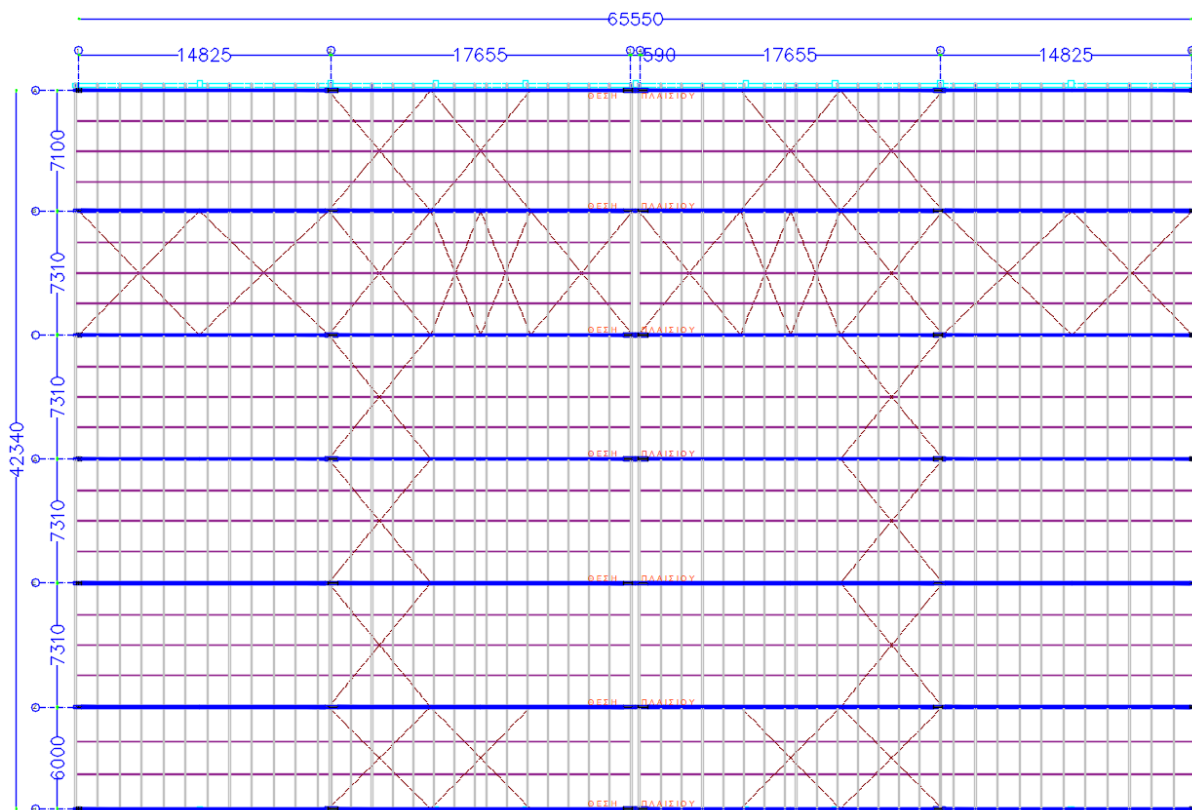
Το υφιστάμενο κτίριο είναι μονώροφο και το εμβαδόν του ανέρχεται στα 2.775m<sup>2</sup>. Έχει ορθογωνική κάτοψη διαστάσεων 65,55m x 42,34m, αποτελείται από 7 μεταλλικά πολύστυλα πλαίσια μεταβλητής διατομής διπλού ταυ διατεταγμένα παράλληλα μεταξύ τους με σχεδόν σταθερή απόσταση. Το ελάχιστο ύψος της οροφής είναι 6,6m και το μέγιστο 10,8m. Το κτίριο αποτελείται, επίσης, από δύο μονοκλινείς στέγες οι οποίες θεωρούνται επίπεδες αφού η κλίση τους είναι 4,28° και δύο δίκλινες με κλίση 19,12°. Οι προσόψεις του κτιρίου καλύπτονται από τοιχοποιία και στα υψηλότερα σημεία υπάρχουν τζάμια. Οι πλάγιες όψεις καλύπτονται από τοιχοποιία ύψους 2,3m από το έδαφος και πάνω από αυτή υπάρχει επικάλυψη χαλυβδόφυλλου. Επιπλέον, η στέγη του κτιρίου καλύπτεται από χαλυβδόφυλλο. Η όψη ενός τυπικού πλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 3-7 και η πλάγια όψη του κτιρίου φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Οι αποστάσεις μεταξύ των πλαισίων κατά την διεύθυνση γ, αλλά και οι αποστάσεις μεταξύ των υποστυλωμάτων σε κάθε πλαίσιο κατά χ φαίνονται στην κάτοψη (Σχήμα 3-9).



Σχήμα 3-7: Όψη ενός τυπικού πλαισίου

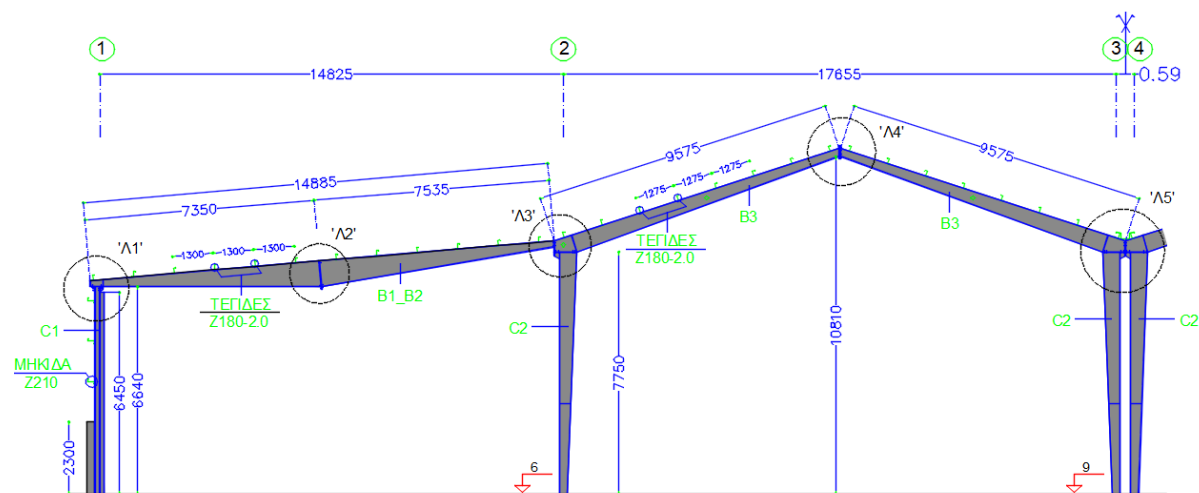


Σχήμα 3-8: Πλάγια όψη των πλαισίων



Σχήμα 3-9: Κάτοψη της στέγης του κτιρίου

Ο μεταλλικός φορέας θεωρήθηκε αρθρωμένος στη βάση του και οι συνδέσεις των κύριων δοκών με τα υποστυλώματα διαμορφώθηκαν στο κτίριο ως πακτώσεις (συνδέσεις ροπής). Οι κεφαλοδοκοί του φορέα είναι αμφιέριστες και ο έλεγχος τους έγινε ξεχωριστά. Επειδή το κτίριο είναι παλιό, τα υποστυλώματα δεν συνδέονται όλα μεταξύ τους με κεφαλοδοκό, παρά μόνο στα σημεία όπου βρίσκονται οι οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Για το λόγο αυτό, προστέθηκαν στο προσομοίωμα μερικές τεγίδες, οι οποίες παίζουν τον ρόλο της κεφαλοδοκού. Επιπλέον, οι τεγίδες, οι οποίες μεταφέρουν τα φορτία από τα εδραιωμένα σε αυτές φύλλα επικάλυψης στα δοκάρια, είναι διατεταγμένες ανά ίσες μεταξύ τους αποστάσεις (1,30m) και είναι αμφιέριστες. Τέλος, οι θέσεις των οριζόντιων και κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας, που παραλαμβάνουν τα οριζόντια φορτία του ανέμου και του σεισμού, διακρίνονται στο Σχήμα 3-9 και στο Σχήμα 3-8 αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3-10 φαίνεται το μισό συμμετρικό πλαίσιο με τα μήκη των δομικών στοιχείων και τις λεπτομέρειες τους.

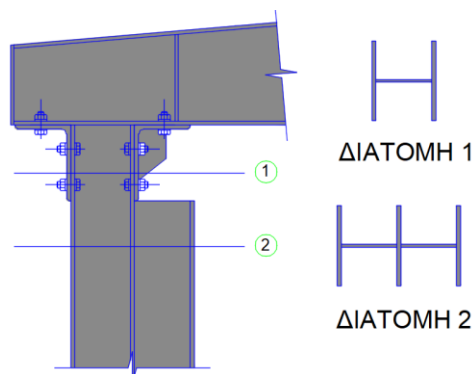


Σχήμα 3-10: Όψη του μισού συμμετρικού πλαισίου

Το στατικό σύστημα του υπό μελέτη κτιρίου αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

- Υποστυλώματα:

Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 6 υποστυλώματα, τα οποία δεν έχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και δεν αποτελούνται από την ίδια διατομή. Τα δύο ακραία υποστυλώματα (C1) έχουν σταθερή συγκολλητή διατομή από την βάση μέχρι το ύψος των 6,45m (Σχήμα 3-11 - Διατομή 2) και πάνω από αυτό το ύψος για επιπλέον 0,19m η διατομή του υποστυλώματος συνεχίζει ως διπλό ταυ (Σχήμα 3-11 - Διατομή 1). Τα χαρακτηριστικά των διατομών του υποστυλώματος C1 δίνονται στον Πίνακα 3-1.

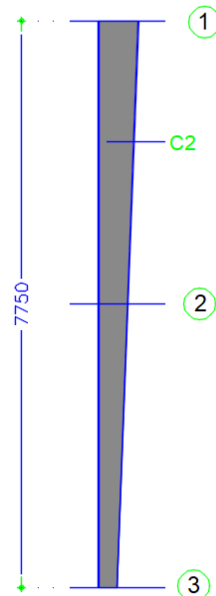


Σχήμα 3-11: Λεπτομέρεια Λ1: Σύνδεση μεταξύ υποστυλώματος C1 και δοκού B1\_B2

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά των διατομών του υποστυλώματος C1

Αριθμός διατομής	Τύπος διατομής	h	b	t <sub>r</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
		cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
1	Διπλό ταυ	16,00	20	1,0	0,6	48,40	2390,53	1333,59
2	Διπλό ταυ + ταυ	31,00	20	1,0	0,6	76,80	10224,4	2000,5

Τα υπόλοιπα 4 ενδιάμεσα υποστυλώματα (C2) του κάθε πλαισίου αποτελούνται από συγκολλητή μεταβλητή διατομή της οποίας το ύψος αυξάνεται γραμμικά από τη βάση μέχρι το ύψος των 7,75m ( Σχήμα 3-12). Τα χαρακτηριστικά των διατομών του υποστυλώματος C2 δίνονται στον Πίνακα 3-2.



Σχήμα 3-12: Όψη του υποστυλώματος C2 με τις τομές των υπό εξέταση διατομών

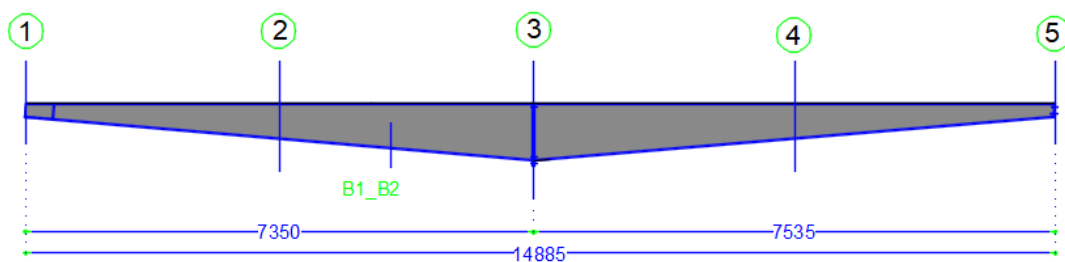
Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά των διατομών του υποστυλώματος C2

Αριθμός διατομής	Τύπος διατομής	h	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
		cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
1	Διπλό ταυ	55,50	20	0,7	0,4	49,64	26300,44	922,62
2	Διπλό ταυ	40,75	20	0,7	0,4	43,74	15639,22	933,54
3	Διπλό ταυ	26,00	20	0,7	0,4	37,84	4978,00	933,46

– Κύριες δοκοί (ζυγώματα):

Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 6 κύριες δοκούς, οι οποίες δεν έχουν την ίδια διατομή. Οι δύο ακραίες δοκοί (B1\_B2) μήκους 14,885m έχουν συγκολλητή μεταβλητή διατομή διπλού ταυ της οποίας το ύψος αυξάνεται γραμμικά από τα άκρα μέχρι το μέσο περίπου της δοκού, όπου βρίσκεται η μεγαλύτερη διατομή. Οι διαστάσεις των διατομών της δοκού B1\_B2 σε 5 χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3-13, δίνονται στον Πίνακα 3-3. Οι υπόλοιπες 4 ενδιάμεσες δοκοί (B3) μήκους 8,83m αποτελούνται από συγκολλητή μεταβλητή διατομή της οποίας το ύψος μειώνεται γραμμικά από τους κόμβους με τα υποστυλώματα, όπου βρίσκεται η μεγαλύτερη διατομή, μέχρι την σύνδεση τους με την ίδια δοκό του άλλου υποστυλώματος, όπου βρίσκεται η μικρότερη διατομή. Στο Σχήμα 3-14 δίνεται η όψη των ενδιάμεσων δοκών B3 και στον Πίνακα 3-4 τα χαρακτηριστικά των δύο ακραίων διατομών τους. Επιπλέον, στις δοκούς B3 υπάρχουν συστήματα άντωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-15. Πρόκειται για ράβδους οι οποίες συνδέουν το κάτω πέλμα της δοκού με τις τεγίδες, προσφέροντας έτσι πλευρική εξασφάλιση στα σημεία.

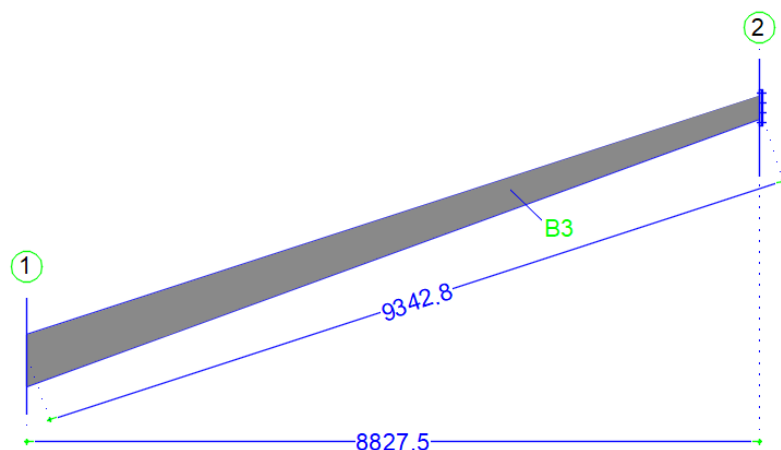




Σχήμα 3-13: Όψη της δοκού B1\_B2 με τις τομές των υπό εξέταση διατομών

Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά των διατομών της δοκού B1\_B2

Αριθμός διατομής	Τύπος διατομής	h	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
		cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
1	Διπλό ταυ	20,00	15	0,9	0,5	36,10	2715,48	506,44
2	Διπλό ταυ	51,50	15	0,9	0,5	51,85	35261,44	506,77
3	Διπλό ταυ	83,00	15	0,9	0,5	67,60	67807,4	507,10
4	Διπλό ταυ	51,75	15	0,9	0,5	51,975	35337,38	560,77
5	Διπλό ταυ	20,50	15	0,9	0,5	36,35	2867,37	506,44



Σχήμα 3-14: Όψη της δοκού B3 με τις τομές των υπό εξέταση διατομών

Πίνακας 3-4: Χαρακτηριστικά των διατομών της δοκού B3

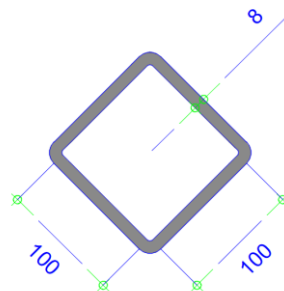
Αριθμός διατομής	Τύπος διατομής	h	b	t <sub>f,top</sub>	t <sub>f,bottom</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
		cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
1	Διπλό ταυ	55,00	15	0,7	0,8	0,4	43,90	21623,43	422,16
2	Διπλό ταυ	26,50	15	0,7	0,8	0,4	32,50	4240,45	422,01



Σχήμα 3-15: Συστήματα άντωσης των δοκών Β3.

– Κεφαλοδοκοί:

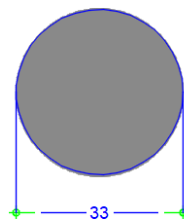
Οι κεφαλοδοκοί αποτελούνται από κοίλη τετραγωνική διατομή 100x100 (Σχήμα 3-16) και το μήκος τους διαφέρει ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των πλαισίων και το ύψος των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 3-16: Διατομή της κεφαλοδοκού

– Οριζόντιοι και κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:

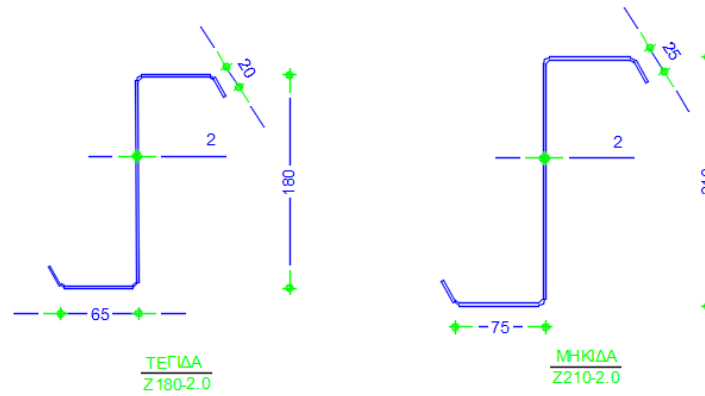
Οι οριζόντιοι και κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας αποτελούνται από διατομή σωλήνα  $\Phi 33$  (Σχήμα 3-17) και το μήκος τους διαφέρει ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των πλαισίων και το ύψος των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 3-17: Διατομή των οριζόντιων και κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας

– Τεγίδες και μηκίδες:

Οι τεγίδες και οι μηκίδες είναι διατομές ψυχρής έλασης. Οι τεγίδες έχουν διατομή Z180-2.0, ενώ οι μηκίδες Z210-2.0 (Σχήμα 3-18). Το μήκος τους διαφέρει ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των πλαισίων.



Σχήμα 3-18: Αριστερά η διατομή των τεγίδων και δεξιά η διατομή των μηκίδων



# 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ

## 4.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Όλα τα δομικά στοιχεία του κτιρίου είναι κατασκευασμένα από χάλυβα κατηγορίας S235 και οι ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής  $f_y$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_y$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_u$  δίνονται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 10025-2 και EN 1993-1-1. Τα χαρακτηριστικά του χάλυβα της κατασκευής παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Ιδιότητες δομικού χάλυβα για έλαση εν θερμώ (EN1993-1-1)

Πρότυπο και ποιότητα χάλυβα	Ονομαστικό πάχος του στοιχείου t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
S 235	235	360	215	360

Οι τιμές σχεδιασμού για τους κύριους συντελεστές υλικού των δομικών χαλύβων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς είναι οι εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας:  $E=210000\text{MPa}$
- Μέτρο διάτμησης:  $G\approx 81000\text{MPa}$
- Λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή:  $\nu=0,3$
- Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής:  $\alpha=12\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  (για  $T\leq 100^\circ\text{C}$ )
- Ειδικό βάρος:  $\gamma=78,5\text{kN/m}^3$
- Συντελεστές ασφαλείας για κτιριακά έργα:  $\gamma_{M0}=1,00$ ,  $\gamma_{M1}=1,00$ ,  $\gamma_{M2}=1,25$

## 4.2 ΔΡΑΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η κατασκευή θα πρέπει να αντιμετωπίζει όλες τις δράσεις και επιδράσεις από το περιβάλλον οι οποίες είναι πιθανό να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ζωής της και να παραμένει κατάλληλη για τη χρήση για την οποία προορίζεται σε όλη τη διάρκεια αυτή. Ανάλογα με τη χρήση, τη θέση και τη μορφή του έργου, προσδιορίζονται οι δράσεις με βάση τις οποίες θα γίνει η ανάλυση του φορέα, έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα δυσμενέστερα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη.

Οι δράσεις σχεδιασμού ενός κτιρίου καλύπτονται επαρκώς από το πεδίο εφαρμογής του Ευρωκώδικα 1. Δίνεται περιγραφή για διάφορες «καταστάσεις σχεδιασμού» που χρησιμεύουν, προκειμένου να ελεγχθεί μία κατασκευή έναντι κατάστασης αστοχίας και λειτουργικότητας, περιγράφοντας όλους τους συνδυασμούς δράσεων στις οποίες μπορεί να υποβληθεί η κατασκευή.

Η εκτίμηση των φορτίων και δυνάμεων που καταπονούν την κατασκευή δεν είναι πάντα δυνατό να γίνει με ακρίβεια. Η κατανομή μιας φόρτισης καθορίζεται συνήθως με παραδοχές και προσεγγίσεις, ακόμα και αν η φόρτιση είναι γνωστή. Τα φορτία που δρουν στην κατασκευή διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μόνιμα φορτία (G):
  - Ίδια βάρη της κατασκευής
  - Φύλλα επικάλυψης
- Μεταβλητές δράσεις (Q):
  - Φορτίο Χιονιού
  - Δράσεις ανέμου
  - Θερμοκρασιακές μεταβολές
- Σεισμικές δράσεις (E)

Θεωρήθηκε ότι τα κατακόρυφα φορτία ασκούνται στις κύριες δοκούς, λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες επιφάνειες επιρροής και από εκεί μεταβιβάζονται στα υπόλοιπα μέλη του φορέα. Αντίστοιχα, έγινε η θεώρηση ότι τα οριζόντια φορτία ασκούνται στα υποστυλώματα λαμβάνοντας τις αντίστοιχες επιφάνειες επιρροής και από εκεί μεταβιβάζονται στα υπόλοιπα μέλη του φορέα.

### 4.2.1 Μόνιμα φορτία

Μόνιμα φορτία καλούνται όλες οι δράσεις, οι οποίες αναμένεται να επενεργήσουν κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου αναφοράς και για την οποία η διαφοροποίηση του μεγέθους τους στο χρόνο είναι αμελητέα. Οι τιμές των μόνιμων φορτίων που δρουν στον υφιστάμενο φορέα είναι:

- Ίδιο βάρος χάλυβα:  $\gamma=78,5\text{kN/m}^3$
- Βάρος τειγίδων και μηκίδων:  $g=0,0535\text{kN/m}$
- Βάρος επικάλυψης:  $g=0,3\text{kN/m}^2$

Τα ίδια βάρη των δομικών στοιχείων υπολογίζονται από το πρόγραμμα, εκτός από αυτά των τειγίδων και των μηκίδων, εφόσον δεν λαμβάνονται υπόψη στο προσομοίωμα. Επομένως, υπολογίστηκε το βάρος τους και προστέθηκε στα μόνιμα φορτία.

### 4.2.2 Φορτίο χιονιού

Τα φορτία χιονιού προσδιορίζονται με βάση τις διατάξεις του EN1991-1-3 και αναφέρονται σε κτίρια ή σε έργα πολιτικού μηχανικού γενικά, για υψόμετρα κάτω των 1500m. Η δράση του χιονιού θεωρείται

στατική, μεταβλητή στον χρόνο και σταθερή στο χώρο. Το φορτίο δρα κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας και ασκείται στις στέγες (οριζόντιες ή μη) των κτιρίων. Το χιόνι μπορεί να συσσωρευτεί στις στέγες των κτιρίων με διάφορους τρόπους, αναλόγως τον τύπο της στέγης, τα θερμικά χαρακτηριστικά, την τραχύτητα της επιφάνειας της, το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κάτω από τη στέγη, την απόσταση των γειτονικών κτιρίων, τον περιβάλλοντα χώρο και τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής όπου βρίσκεται η κατασκευή. Σημαντικό επίσης είναι το κατά πόσο είναι εκτεθειμένη η οροφή στον άνεμο, οι θερμοκρασιακές μεταβολές και η πιθανότητα συγκέντρωσης λόγω κατακρήμνισης ή βροχόπτωσης.

Το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού  $s$  στη στέγη, προκύπτει από το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος  $s_k$  και το οποίο τροποποιείται με μια σειρά συντελεστών:

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_k \quad (4-1)$$

Όπου,

$\mu_i$  είναι ο συντελεστής σχήματος

$s_k$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους

$C_e$  είναι ο συντελεστής έκθεσης

$C_t$  είναι ο θερμικός συντελεστής

– Χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού  $s_k$ :

Το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού  $s_k$  στο έδαφος, εξαρτάται από την γεωγραφική θέση και το υψόμετρο της περιοχής. Κάθε χώρα χωρίζεται, με κλιματικά κριτήρια, σε περιοχές στις οποίες η τιμή του χαρακτηριστικού φορτίου στο έδαφος στην στάθμη της θάλασσας είναι σταθερή. Οι τρεις ζώνες στις οποίες χωρίζεται η Χώρα είναι οι εξής:

**Ζώνη Α:** Νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας

**Ζώνη Γ:** Νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, Σποράδες και Εύβοια

**Ζώνη Β:** Υπόλοιπη Χώρα

Επειδή το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος εξαρτάται, με παραβολικό τρόπο, και από το υψόμετρο της περιοχής, δίνεται η σχέση μεταβολής του χαρακτηριστικού φορτίου συναρτήσει του υψομέτρου. Η σχέση που προέκυψε για την Ελλάδα είναι:

$$s_k = s_{k,0} \times \left[ 1 + \left( \frac{A}{917} \right)^2 \right] \quad (4-2)$$

Όπου,

$s_{k,0}$  είναι το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος στην στάθμη της θάλασσας και το οποίο παίρνει τις τιμές 0,4, 0,8 και 1,7kPa για τις τρεις ζώνες Α, Β και Γ αντίστοιχα.

$A$  είναι το υψόμετρο της περιοχής σε m

Το κτίριο της μελέτης βρίσκεται στην περιοχή της Ελευσίνας, άρα στη Ζώνη Β, όπου η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στην στάθμη της θάλασσας είναι  $s_{k,0}=0.80\text{kN/m}^2$ . Επίσης, το υψόμετρο της συγκεκριμένης τοποθεσίας από την στάθμη της θάλασσας είναι ίσο με  $A=6\text{m}$ . Επομένως, από την

εξίσωση (4-2) η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους για περίοδο επαναφοράς 50 ετών είναι ίση με:

$$s_k = s_{k,0} \times \left[ 1 + \left( \frac{A}{917} \right)^2 \right] = 0,80 \times \left[ 1 + \left( \frac{6}{917} \right)^2 \right] = 0,80 \text{ kN/m}^2$$

– Συντελεστής έκθεσης  $C_e$  και θερμικός συντελεστής  $C_t$ :

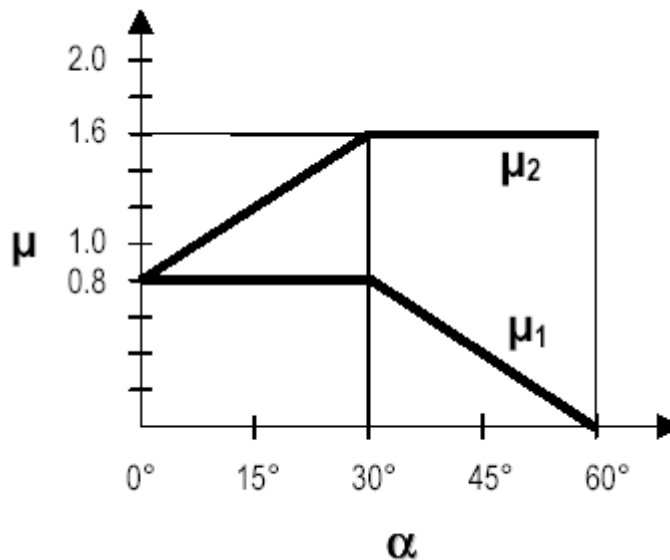
Η έκθεση μια κατασκευής στην δράση του ανέμου καθώς και η διάδοση της θερμότητας διαμέσου μιας μεμονωμένης στέγης επηρεάζουν την συσσώρευση του χιονιού στην στέγη. Για να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα αυτά, ο Ευρωκώδικας εισάγει τον συντελεστή έκθεσης  $C_e$  και τον θερμικό συντελεστή  $C_t$ . Γενικά, ο συντελεστής έκθεσης λαμβάνεται ίσο με την μονάδα:  $C_e=1$ . Ομοίως, ο θερμικός συντελεστής για κανονικές συνθήκες θερμικής μόνωσης της στέγης λαμβάνεται ίσος με την μονάδα:  $C_t=1$ .

– Συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού  $\mu_i$ :

Οι συντελεστές σχήματος της στέγης χρησιμοποιούνται για την αναγωγή του φορτίου χιονιού στο έδαφος σε φορτίο χιονιού στη στέγη. Η στέγη του υπό μελέτη κτιρίου είναι πολλών ανοιγμάτων. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή σχήματος λαμβάνονται υπόψη δύο μορφές κατανομής φορτίου πάνω στη στέγη, η ομοιόμορφη κατανομή μη παρασυρμένου χιονιού και η ανομοιόμορφη κατανομή παρασυρμένου χιονιού λόγω της κλίσης της στέγης. Οι τιμές του συντελεστή δίνονται στον Πίνακα 4-2 και φαίνονται στο Σχήμα 4-1 και Σχήμα 4-2:

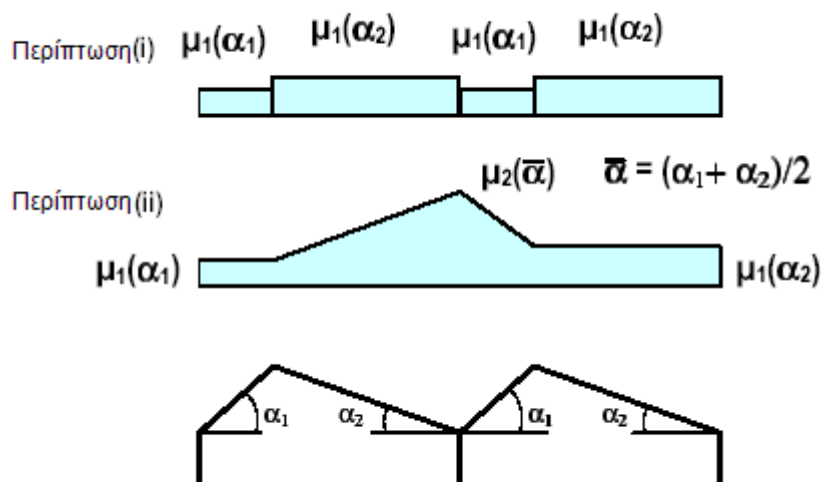
Πίνακας 4-2: Συντελεστές σχήματος φορτίου χιονιού.

Κλίση στέγης $\alpha$	$0 \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,80	$0,80 \times (60-\alpha) / 30$	0
$\mu_2$	$0,80 + 0,80 \times \alpha / 30$	1,60	-



Σχήμα 4-1: Συντελεστές σχήματος φορτίου χιονιού





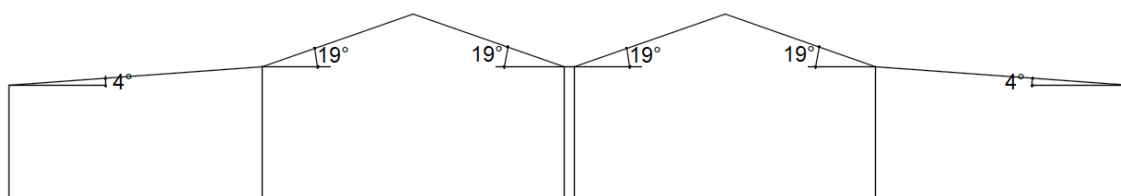
Σχήμα 4-2: Συντελεστής σχήματος φορτίου – χιονιού σε στέγες πολλών ανοιγμάτων

Οι συντελεστές σχήματος με βάση τις τιμές των γωνιών της στέγης του κτιρίου, που φαίνονται στο Σχήμα 4-3, προκύπτουν από τον Πίνακα 4-2 ως εξής:

Για  $\alpha_1=4^\circ$  προκύπτει:  $\mu_1(\alpha_1)=0,80$

Για  $\alpha_2=19^\circ$  προκύπτει:  $\mu_1(\alpha_2)=0,80$

Για  $\alpha=(\alpha_1+\alpha_2)/2=19^\circ$  προκύπτει:  $\mu_2(\alpha)=0,80+0,80 \times \alpha/30=0,80+0,80 \times 19/30=1,30$



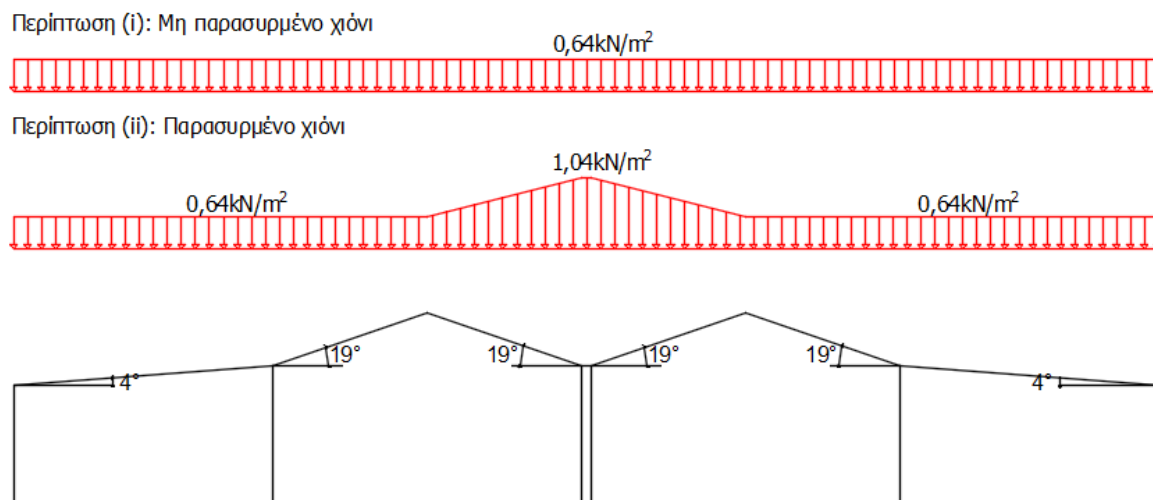
Σχήμα 4-3: Κλίσεις γωνιών της στέγης του υπό μελέτη κτιρίου

Επομένως, από την εξίσωση (4-1) προκύπτει το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στη στέγη για μη παρασυρμένο και παρασυρμένο χιόνι:

Περίπτωση (i):  $s_1 = \mu_1(\alpha_1) \times C_e \times C_t \times s_k = 0,80 \times 1,00 \times 1,00 \times 0,80 = 0,64 \text{ kN/m}^2$

Περίπτωση (ii):  $s_1 = 0,64$  και  $s_2 = \mu_1(\alpha_1) \times C_e \times C_t \times s_k = 0,80 \times 1,00 \times 1,00 \times 1,30 = 1,04 \text{ kN/m}^2$

Στο Σχήμα 4-4 φαίνονται οι φορτίσεις του χιονιού που προκύπτουν για κάθε άνοιγμα στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4-4: Περιπτώσεις φορτίσεων του χιονιού

Στο προσομοίωμα για λόγους απλοποίησης λήφθηκε υπόψη μόνο η κατανομή της περίπτωσης (ii) για παρασυρμένο χιόνι, η οποία είναι δυσμενέστερη.

### 4.2.3 Δράσεις ανέμου

Οι δράσεις λόγω ανέμου στις κατασκευές από χάλυβα, παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και αποτελούν σε πολλές περιπτώσεις τη βασική φόρτιση. Τα φορτία του ανέμου θεωρούνται στατικά γιατί η δυναμική τους επίδραση είναι μικρή και υπολογίζονται σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1991-1-4 για κτίρια και έργα ύψους μέχρι 200m. Οι δράσεις του ανέμου παρουσιάζουν διακυμάνσεις στο χρόνο και δρουν άμεσα ως πιέσεις επί των εξωτερικών επιφανειών κλειστών κατασκευών και, λόγω της πορώδους φύσης της εξωτερικής επιφάνειας, δρουν επίσης έμμεσα επί των εσωτερικών επιφανειών. Από τις αναπτυσσόμενες πιέσεις σε περιοχές της επιφάνειας προκύπτουν δυνάμεις κάθετες προς την επιφάνεια της κατασκευής ή των μεμονωμένων στοιχείων επικάλυψης.

Η πλέον σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό των δράσεων του ανέμου είναι η ταχύτητα του ανέμου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της ταχύτητας και της ασκούμενης πίεσης είναι η γεωγραφική θέση της κατασκευής, η φυσική της θέση, η τοπογραφία, η μέση ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνσή του, οι διαστάσεις του κτιρίου, το σχήμα της κατασκευής και η κλίση της στέγης. Η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται παρακάτω.

- Εξωτερική πίεση  $w_e$ :

Η πίεση του ανέμου που δρα κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής προκύπτει από την σχέση:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (4-3)$$

Όπου,

- $q_p$  είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής
- $c_{pe}$  είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης
- $z_e$  είναι το ύψος αναφοράς για την εξωτερική πίεση

– Εσωτερική πίεση  $w_i$ :

Η πίεση του ανέμου η οποία δρα κάθετα στις εσωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής προκύπτει από την σχέση:

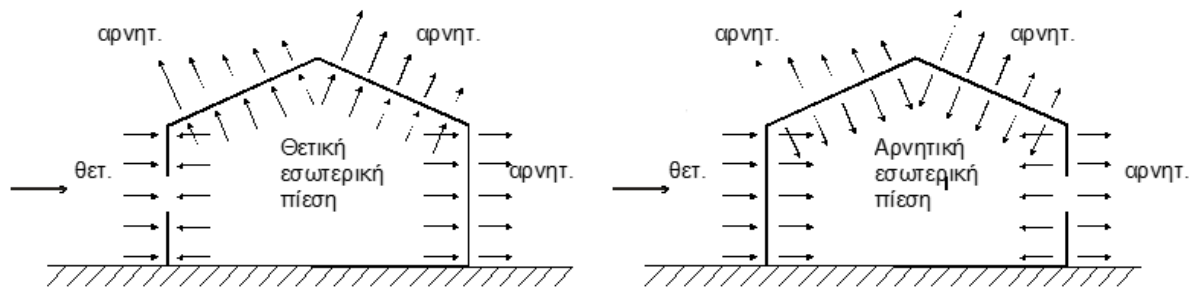
$$w_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (4-4)$$

Όπου,

$q_p$  είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής

$c_{pi}$  είναι ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης

$z_i$  είναι το ύψος αναφοράς για την εσωτερική πίεση



Σχήμα 4-5: Πίεση ανέμου επί επιφανειών

– Πίεση ταχύτητας αιχμής  $q_p(z)$ :

Η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος  $z$ , η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας, προσδιορίζεται από την σχέση:

$$q_p(z_i) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m(z) = c_e(z) \times q_b \quad (4-5)$$

Όπου,

$I_v(z)$  είναι η ένταση στροβιλισμού σε ύψος  $z$

$v_m(z)$  είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος

$\rho$  Είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας ( $\rho=1,25\text{Kg/m}^3$ )

$c_e(z)$  είναι ο συντελεστής έκθεσης. Δίνεται από την σχέση:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4-6)$$

Όπου,

$q_b$  είναι η βασική πίεση που δίνεται από την σχέση:

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (4-7)$$

Όπου,

$v_b$  είναι η βασική ταχύτητα ανέμου, που προσδιορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος

– Βασική ταχύτητα ανέμου  $v_b$ :

Η βασική ταχύτητα ανέμου δίνεται από την σχέση:

$$V_b = C_{dir} \times C_{season} \times V_{b,0} \quad (4-8)$$

Όπου,

$C_{dir}$  είναι ο συντελεστής διεύθυνσης, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με την μονάδα:  $c_{dir}=1,00$

$C_{season}$  είναι ο συντελεστής εποχής, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με την μονάδα:  $C_{season}=1,00$

$V_{b,0}$  είναι η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, η οποία είναι χαρακτηριστική μέση ταχύτητα ανέμου 10 λεπτών, ανεξάρτητα από την διεύθυνση του και την εποχή του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος, το οποίο ανήκει στην κατηγορία II, δηλαδή σε περιοχή με χαμηλή βλάστηση, όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων

Στο Εθνικό Προσάρτημα, η θεμελιώδη βασική ταχύτητα του ανέμου για την χώρα μας, ορίζεται ως  $v_{b,0}=33\text{m/sec}$  για τα νησιά και τα παράλια μέχρι 10km από την ακτή και σε  $v_{b,0}=27\text{m/sec}$  για την υπόλοιπη χώρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6: Χάρτης θεμελιώδους βασικής ταχύτητας του ανέμου

– Μέση ταχύτητα ανέμου  $v_m(z)$ :

Η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος δίνεται από την σχέση:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \quad (4-9)$$

Όπου,

$v_b$  είναι η βασική ταχύτητα ανέμου

$c_0(z)$  είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης, ο οποίος για επίπεδο έδαφος λαμβάνεται ίσος με την μονάδα:  $c_0(z)=1,00$

$c_r(z)$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας, ο οποίος υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$c_r(z) = K_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4-10)$$

$$c_r(z) = K_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ για } z \leq z_{\min} \quad (4-11)$$

Όπου,

$z_0$  είναι το μήκος τραχύτητας που δίνεται στον Πίνακα 4-3

$z_{\min}$  είναι το ελάχιστο ύψος της φορτιζόμενης επιφάνειας που δίνεται στον Πίνακα 4-3

$z_{\max}$  είναι το μέγιστο ύψος της φορτιζόμενης επιφάνειας και λαμβάνεται ίσο με 200m

$K_r$  είναι ο συντελεστής εδάφους, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$K_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4-12)$$

Όπου,

$z_{0,II}$  είναι το μήκος τραχύτητας για την κατηγορία εδάφους II που δίνεται στον Πίνακα 4-3

Πίνακας 4-3: Κατηγορίες εδάφους και παράμετροι εδάφους

Κατηγορία εδάφους		$z_0$ (m)	$z_{\min}$ (m)
0	Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0,003	1
I	Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,01	1
II	Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0,05	2
III	Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0,3	5
IV	Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m	1,0	10

– Ένταση στροβιλισμού ανέμου  $I_v(z)$ :

Η ένταση στροβιλισμού  $I_v(z)$  σε ύψος  $z$  υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4-13)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min} \quad (4-14)$$

Όπου,

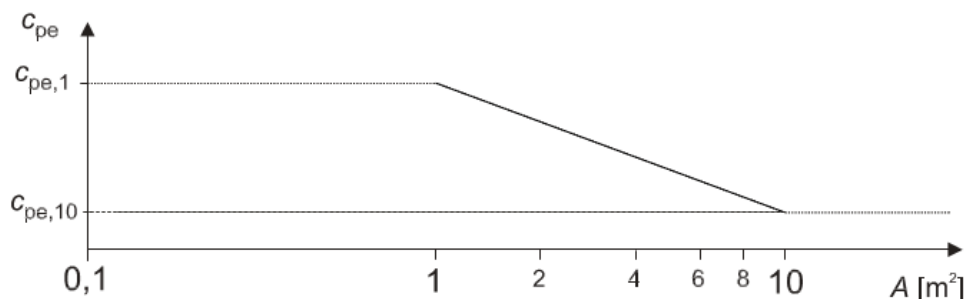
$k_I$  είναι ο συντελεστής στροβιλισμού. Η προτεινόμενη τιμή του είναι  $k_I=1,00$

$z_0$  είναι το μήκος τραχύτητας που δίνεται στον Πίνακα 4-3

$c_0(z)$  είναι ο συντελεστής αναγλύφου του εδάφους

– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης  $c_{pe}$ :

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για κτίρια και τμήματα κτιρίων εξαρτώνται από το μέγεθος της φορτιζόμενης επιφάνειας  $A$ , η οποία είναι η επιφάνεια της κατασκευής που δημιουργεί τη δράση του ανέμου στο υπολογιζόμενο τμήμα. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης δίνονται για φορτιζόμενες επιφάνειες  $A$  του  $1\text{m}^2$  και  $10\text{m}^2$  στο Σχήμα 4-7, ανάλογα με την διαμόρφωση του κτιρίου, ως  $c_{pe,1}$  για τους τοπικούς συντελεστές και ως  $c_{pe}$  για τους καθολικούς συντελεστές αντίστοιχα.



Σχήμα 4-7: Μεταβολή του συντελεστή εξωτερικής πίεσης σε κτίρια, συναρτήσει της φορτιζόμενης επιφάνειας  $A$

Το σχήμα βασίζεται στα ακόλουθα:

$$\text{Για } A \leq 1\text{m}^2 \quad \text{είναι} \quad c_{pe} = c_{pe,1} \quad (4-15)$$

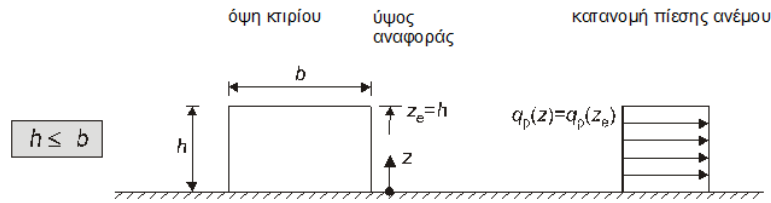
$$\text{Για } 1\text{m}^2 \leq A \leq 10\text{m}^2 \quad \text{είναι} \quad c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \times \log A \quad (4-16)$$

$$\text{Για } A \geq 10\text{m}^2 \quad \text{είναι} \quad c_{pe} = c_{pe,10} \quad (4-17)$$

– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης  $c_{pe}$  κατακόρυφων τοίχων κτιρίων ορθογωνικής κάτοψης:

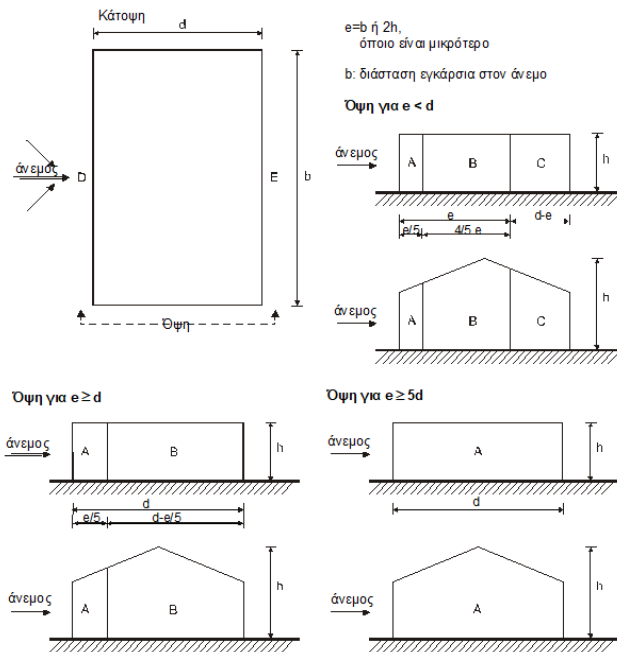
Ο προσδιορισμός του ύψους αναφοράς  $z_e$  για τους προσήνεμους τοίχους κτιρίων ορθογωνικής κάτοψης εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ του ύψους  $h$  και του πλάτους  $b$  του κτιρίου. Το ύψος της κατασκευής λαμβάνεται ως  $h=10,81\text{m}$ . Για άνεμο  $0^\circ$  το πλάτος είναι  $b=65,55\text{m}$  άρα  $h < b$  και για άνεμο

90° το πλάτος είναι  $b=42,34m$  άρα ισχύει  $h < b$ . Επομένως, η περίπτωση  $h < b$ , η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4-8, ισχύει και για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4-8: Ύψος αναφοράς  $z_e$  για ύψος κτιρίου μικρότερου του πλάτους του ( $h \leq b$ )

Οι κατακόρυφοι τοίχοι διαιρούνται σε ζώνες A, B, C, D και E και ορίζονται στο Σχήμα 4-9, ενώ οι τιμές των συντελεστών εξωτερικής πίεσης για κατακόρυφους τοίχους δίνονται στον Πίνακα 4-4.



Σχήμα 4-9: Ζώνες ανέμου για κατακόρυφους τοίχους

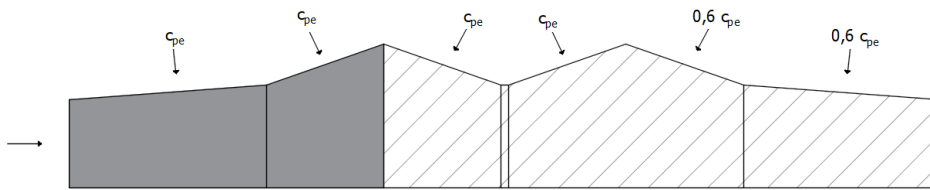
Πίνακας 4-4: Τιμές συντελεστών εξωτερικής πίεσης για κατακόρυφους τοίχους κτιρίων ορθογωνικής κάτοψης

Ζώνη	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης  $C_{pe}$  σε επαναλαμβανόμενες στέγες:

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για διεύθυνση ανέμου 0°, 90°, και 180° θα λαμβάνονται με την φορά που φαίνεται στο Σχήμα 4-10. Το πρώτο  $C_{pe}$  είναι το  $C_{pe}$  της οριζόντιας στέγης εφόσον  $\alpha < 5^\circ$ , το δεύτερο είναι το  $C_{pe}$  της μονοκλινούς στέγης με  $\alpha = 19^\circ$  και όλα τα επόμενα είναι τα είναι τα  $C_{pe}$  της δίκλινούς στέγης για  $\alpha = -19^\circ$ . Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών εξωτερικής πίεσης για κάθε ζώνη ανέμου για οριζόντιες, μονόκλινες και δίκλινες στέγες. Είναι

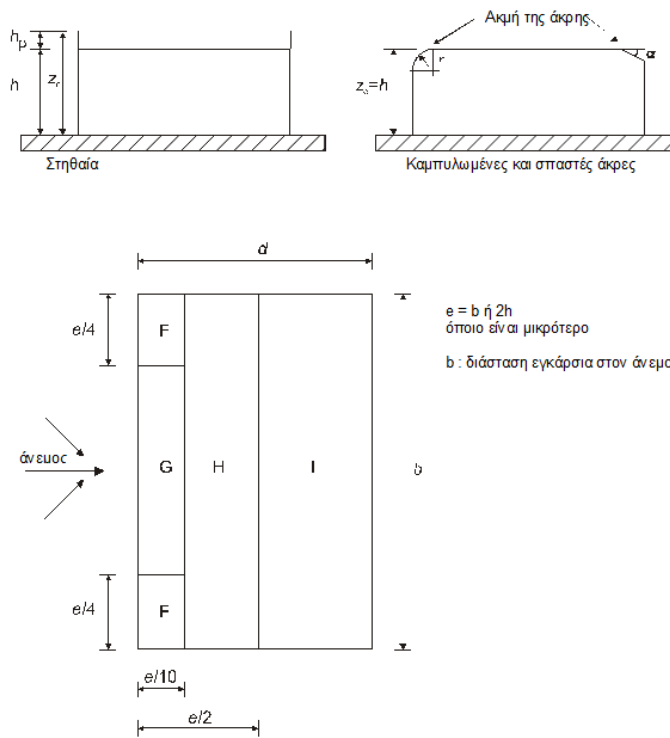
σημαντικό να σημειωθεί, ότι στις επαναλαμβανόμενες στέγες, οι ζώνες ανέμου F, G και J λαμβάνονται υπόψη μόνο στην προσήνεμη πλευρά ενώ οι ζώνες H και I λαμβάνονται υπόψη για κάθε άνοιγμα της επαναλαμβανόμενης στέγης.



Σχήμα 4-10: Διευθύνσεις εξωτερικών πιέσεων του ανέμου για το υπό μελέτη κτίριο

– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης  $c_{pe}$  σε οριζόντιες στέγες:

Οριζόντιες θεωρούνται οι στέγες με κλίση μεταξύ  $\pm 5^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η στέγη διαιρείται σε ζώνες F, G, H και I, ανάλογα τη φορά του ανέμου, σύμφωνα με το Σχήμα 4-11. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης των ζωνών αυτών δίνονται στον Πίνακα 4-5. Το ύψος αναφοράς  $z_e$  λαμβάνεται ίσο με  $h$ .



Σχήμα 4-11: Ζώνες ανέμου για οριζόντιες στέγες

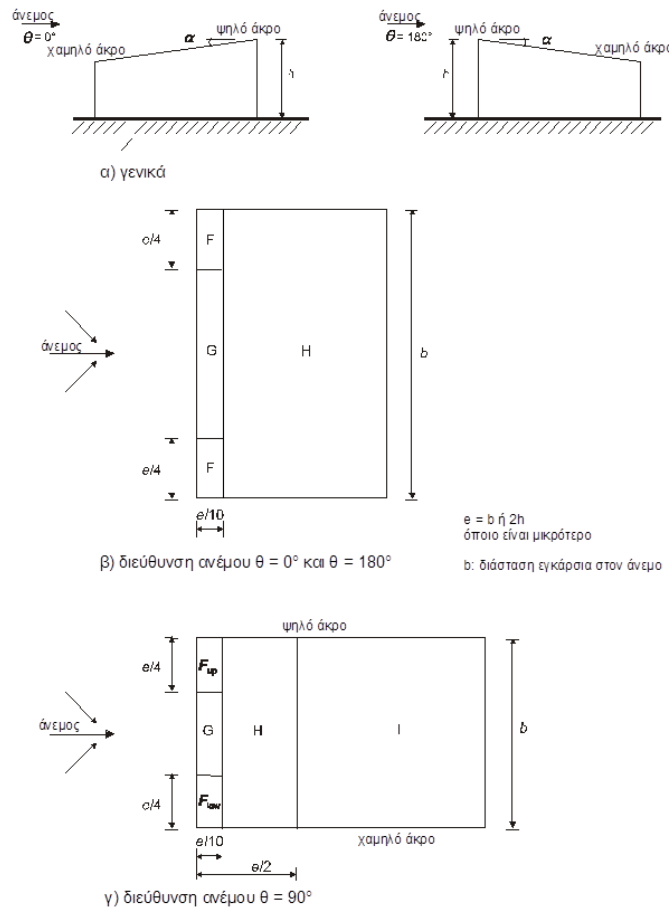
Πίνακας 4-5: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για οριζόντιες στέγες με αιχμηρά άκρα

Τύπος στέγης	Ζώνη							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Αιχμηρά άκρα	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2



– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης  $C_{pe}$  σε μονοκλινείς στέγες:

Η στέγη διαιρείται σε ζώνες F, G, H και I, ανάλογα τη φορά του ανέμου, σύμφωνα με το Σχήμα 4-12. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης των ζωνών αυτών δίνονται στον Πίνακα 4-6 για άνεμο  $\Theta=0^\circ$  και στον Πίνακα 4-7 για άνεμο  $\Theta=90^\circ$ . Το ύψος αναφοράς  $z_e$  λαμβάνεται ίσο με  $h$ .



Σχήμα 4-12: Ζώνες ανέμου για μονοκλινείς στέγες

Πίνακας 4-6: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για άνεμο διεύθυνσης  $0^\circ$  και  $180^\circ$  για μονοκλινείς στέγες με γωνία κλίσης  $5^\circ$ ,  $15^\circ$  και  $30^\circ$

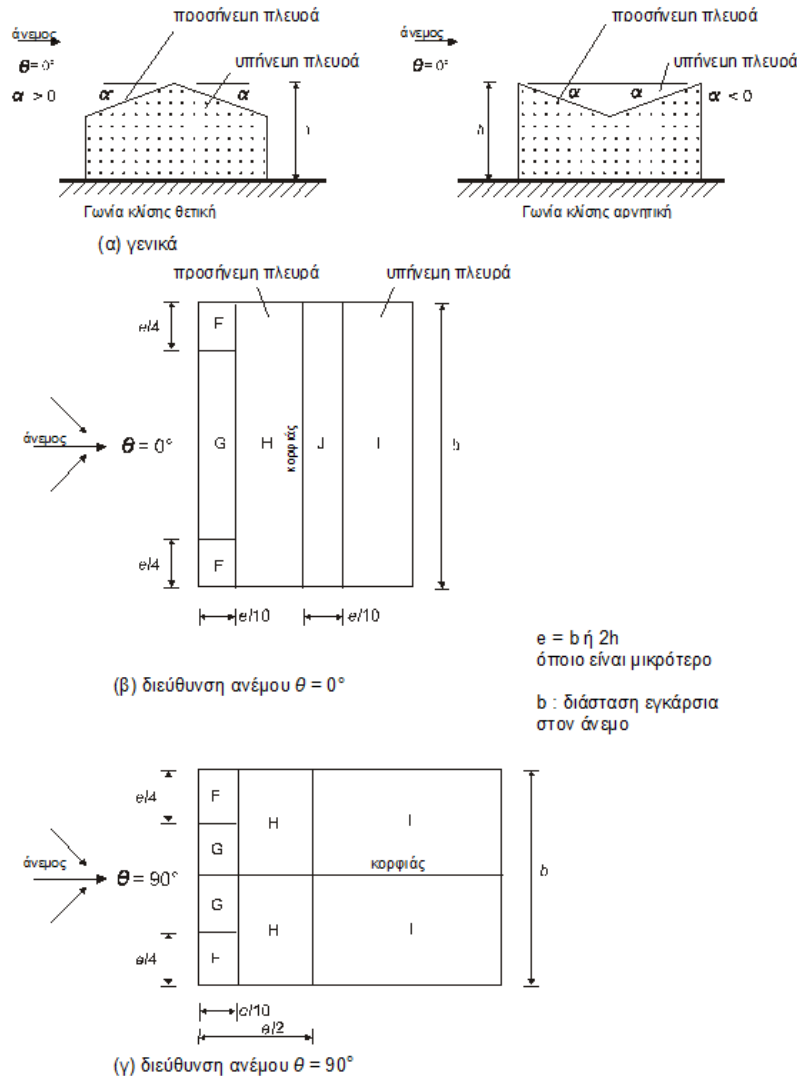
Γωνία κλίσης $\alpha$	Ζώνη για διεύθυνση ανέμου $\Theta=0^\circ$						Ζώνη για διεύθυνση ανέμου $\Theta=180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,1
	+0,0		+0,0		+0,0							
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							

Πίνακας 4-7: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για άνεμο διεύθυνσης 90° για μονοκλινείς στέγες με γωνία κλίσης 5°, 15° και 30°

Γωνία κλίσης α	Ζώνη για διεύθυνση ανέμου Θ=90°									
	F <sub>up</sub>		F <sub>low</sub>		G		H		I	
	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>
5°	-2,1	-2,6	-2,1	-2,4	-1,8	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
15°	-2,4	-2,9	-1,6	-2,4	-1,9	-2,5	-0,8	-1,2	-0,7	-1,2
30°	-2,1	-2,9	-1,3	-2,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,3	-0,8	-1,2

– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c<sub>pe</sub> σε δίκλινες στέγες:

Η στέγη διαιρείται σε ζώνες F, G, H, I και J, ανάλογα με τη φορά του ανέμου, σύμφωνα με το Σχήμα 4-13. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης των ζωνών αυτών δίνονται στον Πίνακα 4-8 για άνεμο Θ=0° και στον Πίνακα 4-9 για άνεμο Θ=90°. Το ύψος αναφοράς z<sub>e</sub> λαμβάνεται ίσο με h.



Σχήμα 4-13: Ζώνες ανέμου για μονοκλινείς στέγες

Πίνακας 4-8: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για άνεμο διεύθυνσης 0° για δίκλινες στέγες

Γωνία κλίσης α	Ζώνη για διεύθυνση ανέμου Θ=0°									
	F		G		H		I		J	
	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-2,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	

Πίνακας 4-9: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για άνεμο διεύθυνσης 90° για δίκλινες στέγες

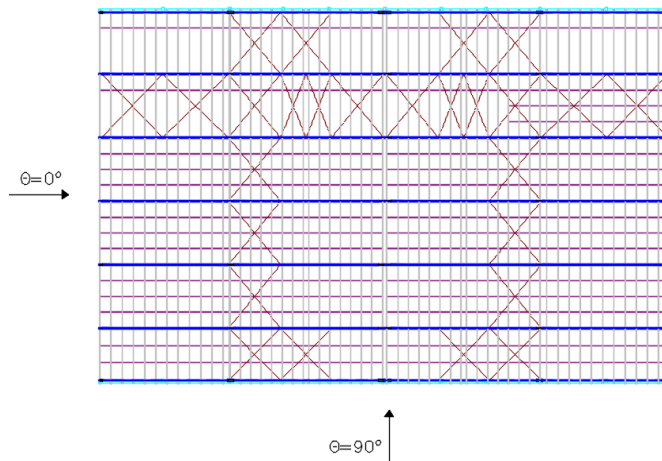
Γωνία κλίσης α	Ζώνη για διεύθυνση ανέμου Θ=90°							
	F		G		H		I	
	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>	C <sub>pe,10</sub>	C <sub>pe,1</sub>
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,9	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,9	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	

– Συντελεστές εσωτερικής πίεσης c<sub>pi</sub>:

Ο συντελεστής εσωτερική πίεση c<sub>pi</sub> εξαρτάται από το μέγεθος και την κατανομή των ανοιγμάτων στη συνολική επιφάνεια του κτιρίου. Λήφθηκαν υπόψη οι δυσμενείς τιμές του c<sub>pi</sub> δηλαδή +0,2 και -0,3.

– Υπολογισμός δράσεων ανέμου:

Το κτίριο μελέτης βρίσκεται στην περιοχή της Ελευσίνας άρα είναι σε απόσταση μικρότερη από 10km από την θάλασσα και έτσι η βασική ταχύτητα ανέμου θεωρήθηκε v<sub>b,0</sub>=33m/sec. Επίσης, το κτίριο ανήκει στην κατηγορία, II σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως. Υπολογίζονται οι δράσεις για δύο διευθύνσεις του ανέμου, για Θ=0° και Θ=90°. Στο Σχήμα 4-14 δίνονται σε κάτοψη οι διευθύνσεις του ανέμου που θα εξεταστούν.



Σχήμα 4-14

Η βασική ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται από την εξίσωση (4-8):

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} = 1,00 \times 1,00 \times 33 = 33 \text{ m/sec}$$

Για κατηγορία εδάφους II έχουμε από τον Πίνακα 4-3  $z_0=0,05\text{m}$  και  $z_{min}=2,00\text{m}$ . Επομένως, ο συντελεστής εδάφους σύμφωνα με την εξίσωση (4-12) είναι ίσος με:

$$K_r = 0,19 \times \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \times \left( \frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19$$

Ισχύει  $z_{min}=2,00\text{m} < z_e=10,81\text{m} < z_{max}=200\text{m}$ , άρα ο συντελεστής τραχύτητας σύμφωνα με την εξίσωση (4-10) είναι ίσος με:

$$c_r(z_e) = K_r \times \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) = 0,19 \times \ln\left(\frac{10,81}{0,05}\right) = 1,021$$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4-9) και είναι ίση με:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b = 1,021 \times 1,00 \times 33 = 33,71 \text{ m/sec}$$

Η ένταση στροβιλισμού από την εξίσωση (4-13) είναι:

$$I_v(z_e) = \frac{k_I}{c_0(z_e) \times \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} = \frac{1,00}{1,00 \times \ln\left(\frac{10,81}{0,05}\right)} = 0,186$$

Η πίεση ταχύτητας αιχμής σύμφωνα με την εξίσωση (4-5) ισούται με:

$$q_p(z_e) = [1 + 7 \times I_v(z_e)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m(z_e)^2 = [1 + 7 \times 0,186] \times \frac{1}{2} \times 0,00125 \times 33,71^2 = 1,63 \text{ kN/m}^2$$

Οι εσωτερικές πιέσεις λόγω ανέμου που προκύπτουν σύμφωνα με την εξίσωση (4-4) δίνονται στον Πίνακα 4-10.

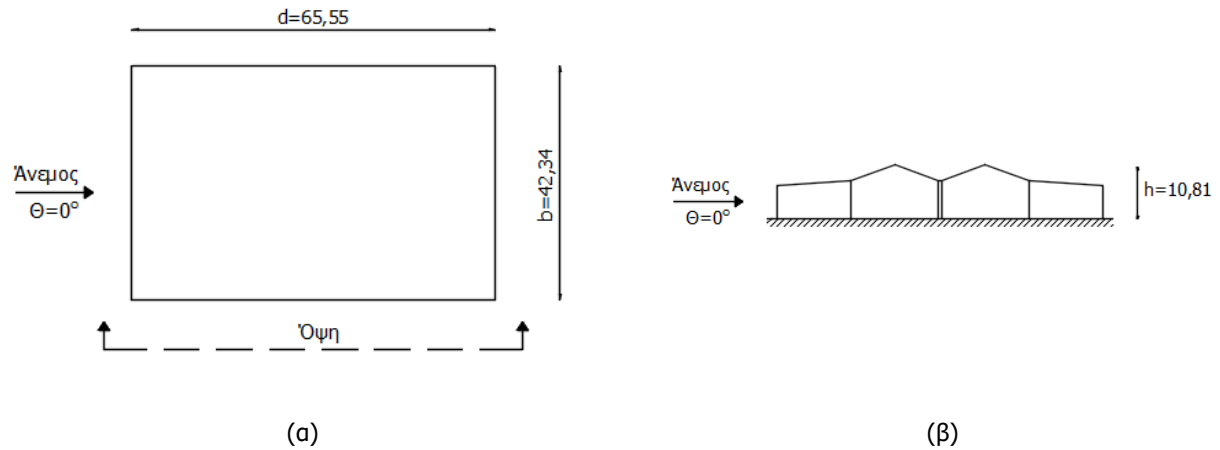
Πίνακας 4-10: Τελικές εσωτερικές πιέσεις του ανέμου

	Θετική εσωτερική πίεση	Αρνητική εσωτερική πίεση
$c_{pi}$	0,2	-0,3
$q_p(z_e)$	1,63	1,63
$w_i$	0,33	-0,49

Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης καθώς και οι εξωτερικές πιέσεις στους κατακόρυφους τοίχους και στη στέγη για τις δύο διευθύνσεις  $\Theta=0^\circ$  και  $\Theta=180^\circ$ .

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ  $\Theta=0^\circ$ :

Το κτίριο μελέτης έχει ύψος  $h=10,81m$ , πλάτος  $b=42,34m$  και μήκος  $d=65,55m$  όπως φαίνονται και στο Σχήμα 4-15. Ισχύει  $h < b$  άρα το ύψος αναφοράς είναι  $z_e=h=10,81m$ .



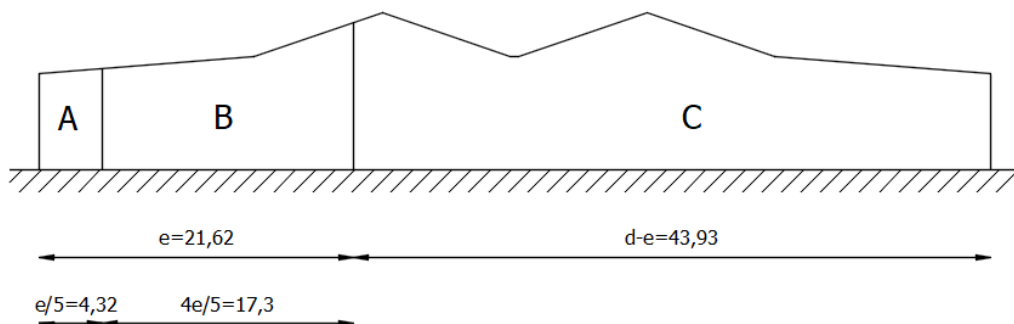
Σχήμα 4-15: (α) Κάτοψη κτιρίου και (β) όψη κτιρίου

Για τους κατακόρυφους τοίχους ισχύουν:

$$e = \min(b, 2 \times h) = \min(42,34, 2 \times 10,81) = \min(42,34, 21,62) = 21,62m \leq d = 65,55m$$

$$h/d = 10,81/65,55 = 0,165$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-8 για  $e < d$  προκύπτουν οι ζώνες των κατακόρυφων ζωνών όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-16.



Σχήμα 4-16: Ζώνες ανέμου των κατακόρυφων τοίχων του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=0^\circ$

Τα εμβαδά των ζωνών είναι:

$$A_A = 29,41m^2 > 10m^2$$

$$A_B = 137,92m^2 > 10m^2$$

$$A_C = 378,25m^2 > 10m^2$$

$$A_D = A_E = 281,14 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

Άρα σύμφωνα με την εξίσωση (4-15) προκύπτει ότι  $C_{pe} = C_{pe,10}$

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης που προκύπτουν από τον Πίνακα 4-4 για  $h/d = 0,165 < 0,25$ , καθώς και οι τελικές εξωτερικές πιέσεις που προκύπτουν από την (4-3), δίνονται στον Πίνακα 4-11.

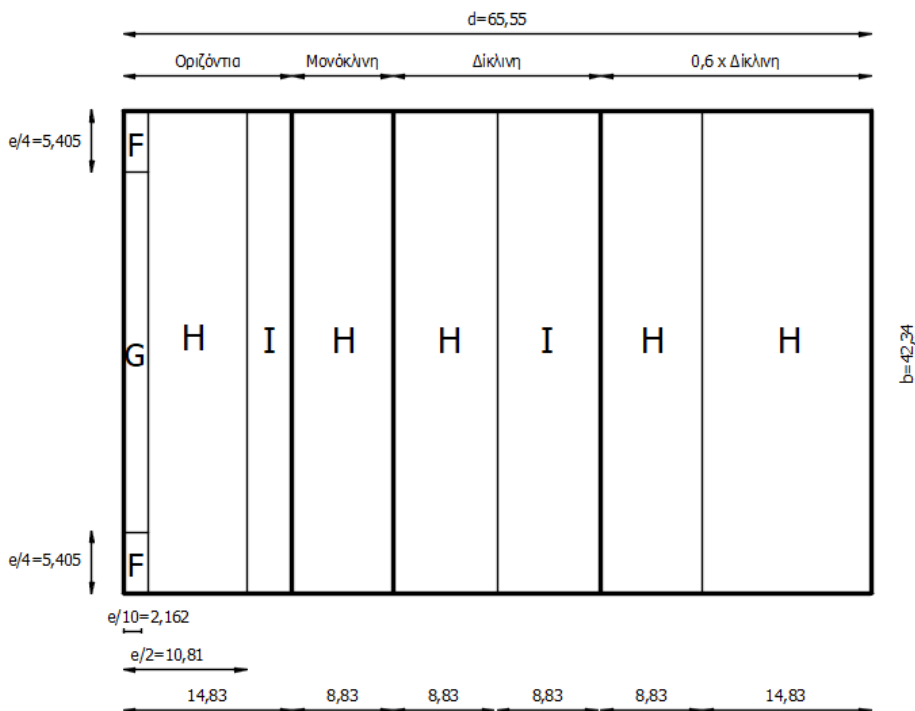
Πίνακας 4-11: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών των κατακόρυφων τοίχων του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta = 0^\circ$

Ζώνες	A	B	C	D	E
$C_{pe}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,7	-0,3
$q_p(z_e)$	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
$w_e$	-1,96	-1,31	-0,82	1,14	-0,49

Για στη στέγη ισχύουν:

$$e = \min(b, 2 \times h) = \min(42,34, 2 \times 10,81) = \min(42,34, 21,62) = 21,62 \text{ m} \leq d = 65,55 \text{ m}$$

Οι ζώνες που προκύπτουν για την επαναλαμβανόμενη στέγη φαίνονται στο Σχήμα 4-17.



Σχήμα 4-17: Ζώνες ανέμου της επαναλαμβανόμενης στέγης του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta = 0^\circ$

Τα εμβαδά των ζωνών για οριζόντια, μονόκλινη και δίκλινη στέγη, δίνονται στον Πίνακα 4-12.

Πίνακας 4-12: Εμβαδά ζωνών για οριζόντια, μονόκλινη και δίκλινη στέγη για άνεμο  $\Theta = 0^\circ$

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ		ΜΟΝΟΚΛΙΝΗ		ΔΙΚΛΙΝΗ	
$A_F = 11,69 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$	-	-	-	-
$A_G = 68,17 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$	-	-	-	-
$A_H = 366,16 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$	$A_H = 395,58 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$	$A_H = 395,57 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$
$A_I = 169,99 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$	-	-	$A_I = 395,57 \text{ m}^2$	$> 10 \text{ m}^2$

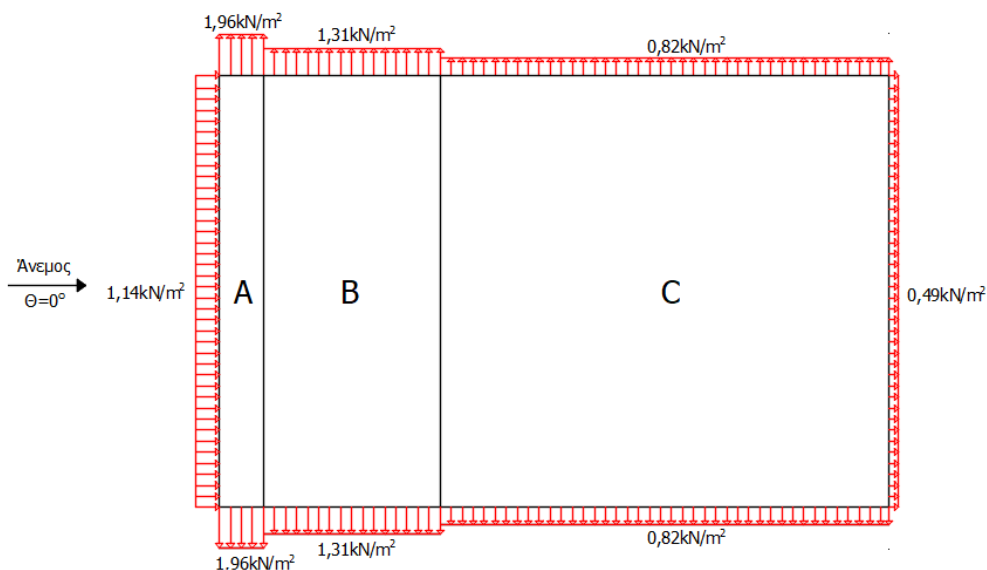
Άρα σύμφωνα με την εξίσωση (4-15) προκύπτει ότι  $C_{pe}=C_{pe,10}$

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για την οριζόντια στέγη προκύπτουν από τον Πίνακα 4-5 για αιχμηρά άκρα. Για την μονόκλινη στέγη προκύπτουν από τον Πίνακα 4-6 για γωνία κλίσης  $\alpha=19^\circ$  μέσω γραμμικής παρεμβολής. Για την δίκλινη στέγη προκύπτουν από τον Πίνακα 4-8 για γωνία κλίσης  $\alpha=-19^\circ$  μέσω γραμμικής παρεμβολής. Οι συντελεστές όλων των περιπτώσεων και οι τελικές εξωτερικές πιέσεις που προκύπτουν από την (4-3), δίνονται στον Πίνακα 4-13.

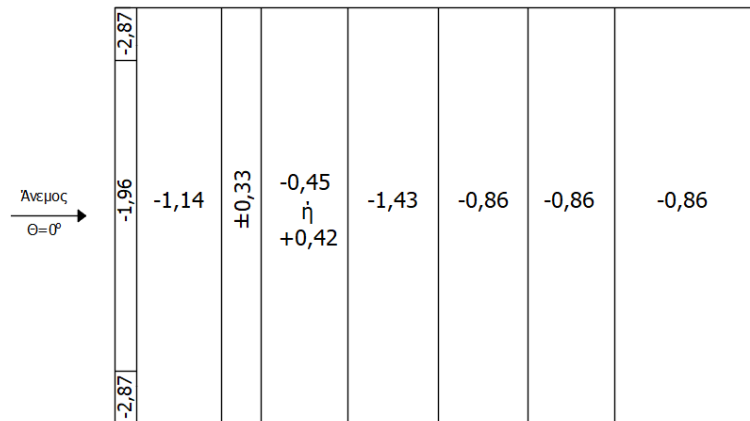
Πίνακας 4-13: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών της επαναλαμβανόμενης στέγης για κάθε άνοιγμα του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=0^\circ$

Ζώνες	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ				ΜΟΝΟΚΛΙΝΗ	ΔΙΚΛΙΝΗ		0,6xΔΙΚΛΙΝΗ
	F	G	H	I	H	H	I	H
$C_{pe}$	-1,8	-1,2	-0,7	0,2	-0,27	-0,87	-0,53	-0,52
				-0,2	0,25			
$q_p(z_e)$	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
$w_e$	-2,94	-1,96	-1,14	0,33	-0,45	-1,43	-0,86	-0,86
				-0,33	0,42			

Στα επόμενα σχήματα Σχήμα 4-18 και Σχήμα 4-19 δίνονται τα τελικά αποτελέσματα των εξωτερικών πιέσεων στους κατακόρυφους τοίχους και στην στέγη αντίστοιχα για διεύθυνση ανέμου  $\Theta=0^\circ$ .



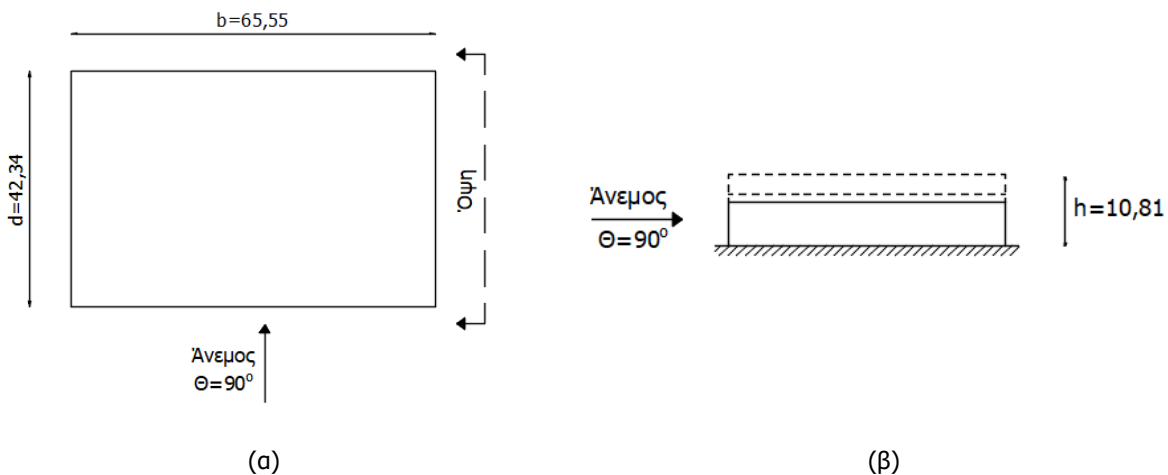
Σχήμα 4-18: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών των κατακόρυφων τοίχων του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=0^\circ$



Σχήμα 4-19: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών της στέγης του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=0^\circ$

#### ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ $\Theta=90^\circ$ :

Το κτίριο μελέτης έχει ύψος  $h=10,81\text{m}$ , πλάτος  $b=65,55\text{m}$  και μήκος  $d=42,34\text{m}$  όπως φαίνονται και στο Σχήμα 4-20. Ισχύει  $h < b$  άρα το ύψος αναφοράς είναι  $z_e=h=10,81\text{m}$ .



Σχήμα 4-20: (α) κάτοψη κτιρίου και (β) όψη κτιρίου

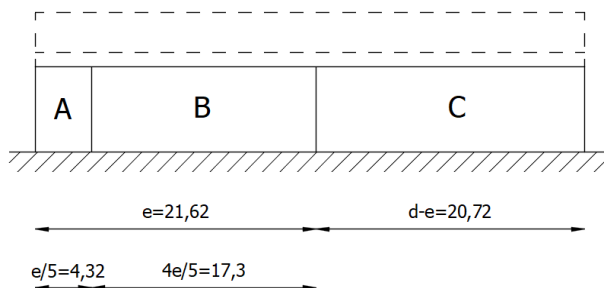
Για τους κατακόρυφους τοίχους ισχύουν:

$$e = \min(b, 2 \times h) = \min(65,55, 2 \times 10,81) = \min(65,55, 21,62) = 21,62\text{m} \leq d = 42,34\text{m}$$

$$h/d = 10,81/42,34 = 0,255$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-8 για  $e < d$  προκύπτουν οι ζώνες των κατακόρυφων ζωνών όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-21.





Σχήμα 4-21: Ζώνες ανέμου των κατακόρυφων τοίχων του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta = 90^\circ$

Τα εμβαδά των ζωνών είναι:

$$A_A = 28,71\text{m}^2 > 10\text{m}^2$$

$$A_B = 114,85\text{m}^2 > 10\text{m}^2$$

$$A_C = 137,58\text{m}^2 > 10\text{m}^2$$

$$A_D = A_E = 545,58\text{m}^2 > 10\text{m}^2$$

Άρα σύμφωνα με τη (4-15) προκύπτει ότι  $C_{pe} = C_{pe,10}$

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης που προκύπτουν από τον Πίνακα 4-4 για  $h/d = 0,255$  με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής, καθώς και οι τελικές εξωτερικές πιέσεις που προκύπτουν από την (4-3), δίνονται στον Πίνακα 4-14.

Πίνακας 4-14: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών των κατακόρυφων τοίχων του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta = 90^\circ$

Ζώνες	A	B	C	D	E
$C_{pe}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,701	-0,303
$q_p(z_e)$	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
$w_e$	-1,96	-1,31	-0,82	1,15	-0,50

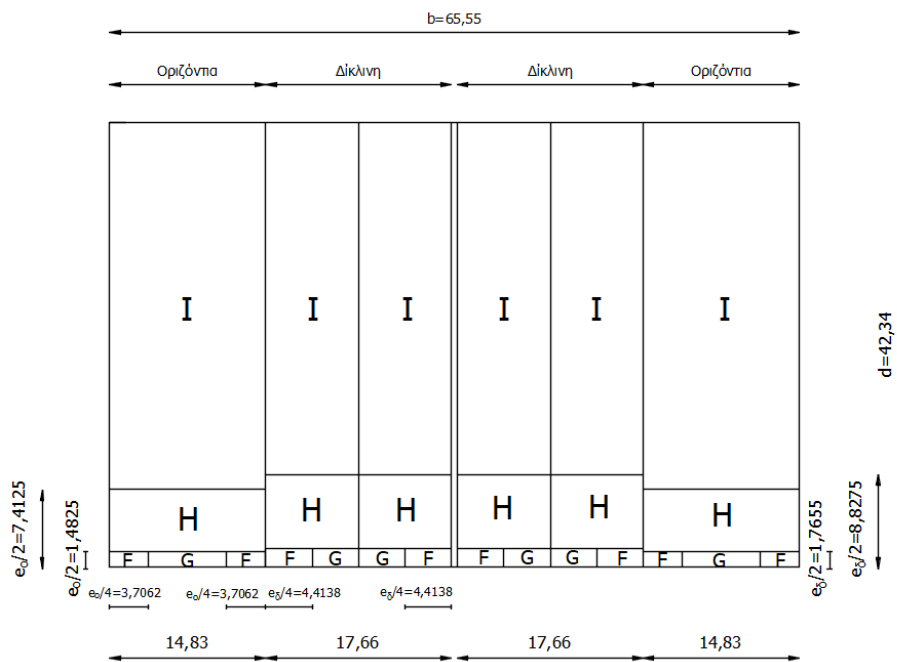
Για στη στέγη ισχύουν:

Σε κάθε άνοιγμα υπολογίζονται οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης. Επομένως, έχουμε δύο οριζόντιες και 2 δίκλινες στέγες.

$$e_{\text{οριζόντια}} = \min(b, 2 \times h) = \min(14,825, 2 \times 10,8, 1) = \min(14,825, 21,62) = 14,825\text{m} \leq d = 42,34\text{m}$$

$$e_{\text{δίκλινης}} = \min(b, 2 \times h) = \min(17,655, 2 \times 10,8, 1) = \min(17,655, 21,62) = 17,655\text{m} \leq d = 42,34\text{m}$$

Οι ζώνες που προκύπτουν για την στέγη φαίνονται στο Σχήμα 4-22.



Σχήμα 4-22: Ζώνες ανέμου της στέγης του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=90^\circ$

Τα εμβαδά των ζωνών για οριζόντια και δίκλινη στέγη, δίνονται στον Πίνακα 4-15.

Πίνακας 4-15: Εμβαδά ζωνών για οριζόντια και δίκλινη στέγη για άνεμο  $\Theta=90^\circ$

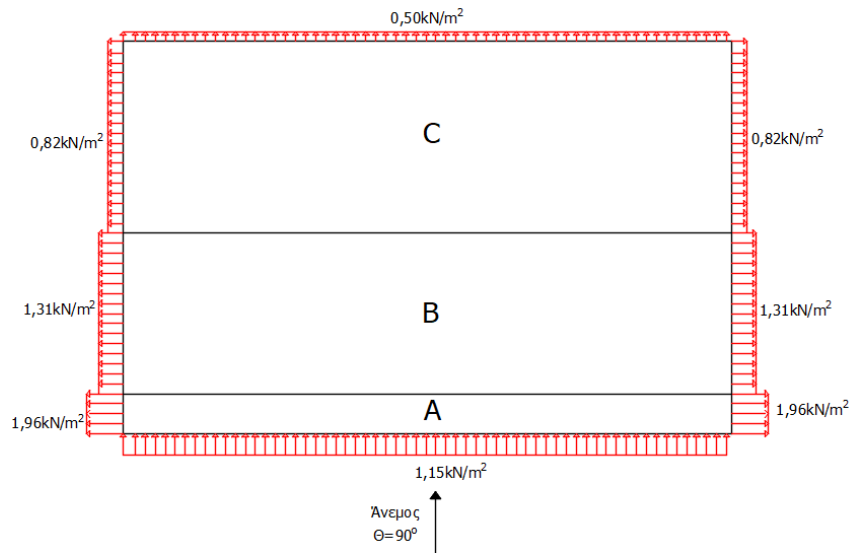
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ		ΔΙΚΛΙΝΗ	
$A_F=5,49\text{m}^2$	$<10\text{m}^2$	$A_F=8,25\text{m}^2$	$<10\text{m}^2$
$A_G=10,99\text{m}^2$	$>10\text{m}^2$	$A_G=8,25\text{m}^2$	$<10\text{m}^2$
$A_H=87,91\text{m}^2$	$>10\text{m}^2$	$A_H=65,98\text{m}^2$	$>10\text{m}^2$
$A_I=517,80\text{m}^2$	$>10\text{m}^2$	$A_I=313,10\text{m}^2$	$>10\text{m}^2$

Άρα σύμφωνα με τη (4-15) προκύπτει ότι  $c_{pe}=c_{pe,10}$ . Συγκεκριμένα για την ζώνη F στην οριζόντια στέγη και για τις ζώνες F και G στη δίκλινη στέγη ο συντελεστής προκύπτει από την (4-16). Οι τιμές λαμβάνονται για την οριζόντια στέγη από τον Πίνακα 4-5 για αιχμηρά άκρα και για τη δίκλινη από τον Πίνακα 4-9 για γωνία κλίσης  $\alpha=19^\circ$ . Οι συντελεστές όλων των περιπτώσεων και οι τελικές εξωτερικές πιέσεις που προκύπτουν από την (4-3), δίνονται στον Πίνακα 4-16.

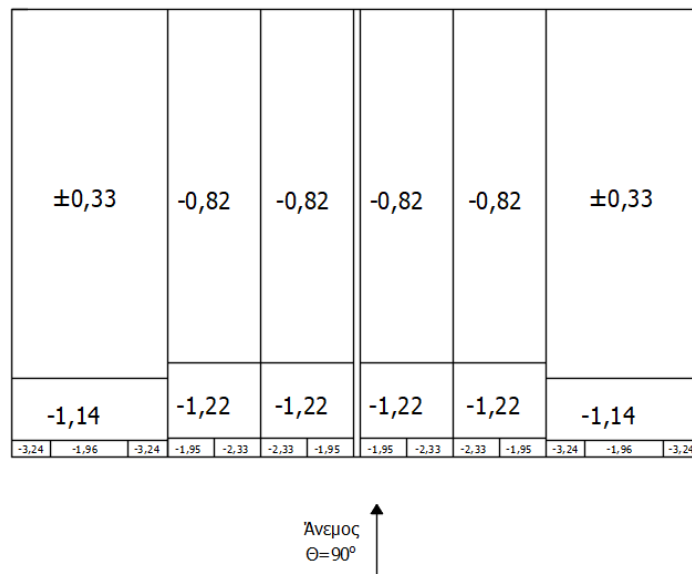
Πίνακας 4-16: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών της στέγης για κάθε άνοιγμα του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=90^\circ$

Ζώνες	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ				ΔΙΚΛΙΝΗ			
	F	G	H	I	F	G	H	I
$c_{pe}$	-1,982	-1,2	-0,7	$\frac{0,2}{-0,2}$	-1,195	-1,425	-0,745	-0,5
$q_p(z_e)$	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
$w_e$	-3,24	-1,96	-1,14	$\frac{0,33}{-0,33}$	-1,95	-2,33	-1,22	-0,82

Στα επόμενα σχήματα, Σχήμα 4-23 και Σχήμα 4-24, δίνονται τα τελικά αποτελέσματα των εξωτερικών πιέσεων στους κατακόρυφους τοίχους και στην στέγη για διεύθυνση ανέμου  $\Theta=90^\circ$ .



Σχήμα 4-23: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών των κατακόρυφων τοίχων του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=0^\circ$



Σχήμα 4-24: Τελικές εξωτερικές πιέσεις των ζωνών της στέγης του υπό μελέτη κτιρίου για άνεμο  $\Theta=90^\circ$

Επιπλέον, στο πρόγραμμα για την ανάλυση του υπό μελέτη κτιρίου έγινε η εισαγωγή και του ανέμου κατά την διεύθυνση  $\Theta=270^\circ$ , η δράση του οποίου είναι ίδια όμοια με τον άνεμο κατά  $\Theta=90^\circ$  αλλά αντισυμμετρική. Ο άνεμος για διεύθυνση  $\Theta=180^\circ$  δεν λήφθηκε υπόψη, καθώς ο φορέας είναι συμμετρικός κατά την διεύθυνση x.

#### 4.2.4 Θερμοκρασιακές μεταβολές

Τα θερμοκρασιακά φορτία θεωρούνται μεταβλητές και έμμεσες δράσεις και υπολογίζονται με βάση τις διατάξεις του EN1991-1-5. Τα φορτία που οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές προσδιορίζονται θεωρώντας ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας στα στοιχεία του φορέα, που οφείλεται στην μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (καλοκαίρι - χειμώνας) και προσδιορίζοντας τις χαρακτηριστικές τιμές μέγιστης διακύμανσης. Με σκοπό να ληφθούν υπόψη τα φορτία που επιβάλλονται στη κατασκευή λόγω συστολών ή διαστολών θεωρήθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T = \pm 20^{\circ}\text{C}$ , δηλαδή αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας όλων των μελών της κατασκευής σε σχέση με την θερμοκρασία συναρμολόγησης του.

#### 4.2.5 Σεισμικές δράσεις

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, τα σεισμικά αποτελέσματα μπορούν να υπολογιστούν με βάση τη γραμμική-ελαστική συμπεριφορά του φορέα. Προβλέπεται με τη χρήση του προγράμματος, η εφαρμογή των παρακάτω δύο μεθόδων γραμμικού υπολογισμού της σεισμικής απόκρισης:

- Ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης
- Ισοδύναμη στατική μέθοδος (Απλοποιημένη φασματική μέθοδος)

Με την ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης υπολογίζονται οι ιδιομορφές ταλάντωσης του συστήματος και οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες. Με τη χρήση του φάσματος απόκρισης σχεδιασμού υπολογίζεται για κάθε συνιστώσα του σεισμού η ακραία απόκριση που αντιστοιχεί σε κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης και με χωρική επαλληλία υπολογίζεται η πιθανή ακραία τιμή αυτής της απόκρισης.

Η ισοδύναμη στατική μέθοδος προκύπτει από την δυναμική φασματική μέθοδο με προσεγγιστική θεώρηση μόνον της θεμελιώδους ιδιομορφής ταλάντωσης για κάθε διεύθυνση υπολογισμού. Η απλοποίηση αυτή επιτρέπει τον άμεσο υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης με την βοήθεια ισοδύναμων σεισμικών δυνάμεων, οι οποίες εφαρμόζονται σαν στατικά φορτία επάνω στην κατασκευή. Η σεισμική δύναμη κατά την διεύθυνση  $x$  συμβολίζεται ως  $E_X$  ενώ κατά την διεύθυνση  $y$  ως  $E_Y$ .

Η σεισμική δράση σχεδιασμού εξαρτάται από την κατηγορία του εδάφους στο οποίο θεμελιώνεται η κατασκευή και τη σεισμικότητα της περιοχής. Στον Ευρωκώδικα 8 προδιαγράφονται πέντε κατηγορίες εδάφους A, B, C, D και E ανάλογα με τη στρωματογραφία και τις παραμέτρους που περιγράφουν τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων. Το κτίριο εδράζεται σε έδαφος κατηγορίας B, η οποία χαρακτηρίζεται από αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλικών, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος. Επίσης η θέση του κτιρίου κατατάσσεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, με ενεργό σεισμική επιτάχυνση εδάφους  $a=0,24g$ .

Η εδαφική επιτάχυνση κλιμακώνεται μέσα στην ίδια τη ζώνη ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας των έργων, μέσω του συντελεστή σπουδαιότητας  $\gamma_I$ , ο οποίος εκφράζει μικρότερες ή μεγαλύτερες απαιτήσεις απόκρισης. Τα κτίρια κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας ανάλογα με τις κοινωνικοοικονομικές συνέπειες που μπορεί να έχει ενδεχόμενη καταστροφή ή διακοπή της λειτουργίας τους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η κατασκευή μας ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας III (κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.), επομένως, έχει συντελεστή σπουδαιότητας  $\gamma_I=1,20$ .

#### Ελαστικό φάσμα απόκρισης:

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης εφαρμόζεται για σχεδιασμό κατασκευών, οι οποίες θέλουμε να συμπεριφέρονται ελαστικά στο σεισμό σχεδιασμού. Για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής

φόρτισης, η ελαστική επιτάχυνση σχεδιασμού σε κάθε περιοχή υπολογίζεται, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, από τις σχέσεις:

$$S_e(T) = a_g \times S \times \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \times (\eta \times 2,5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (4-18)$$

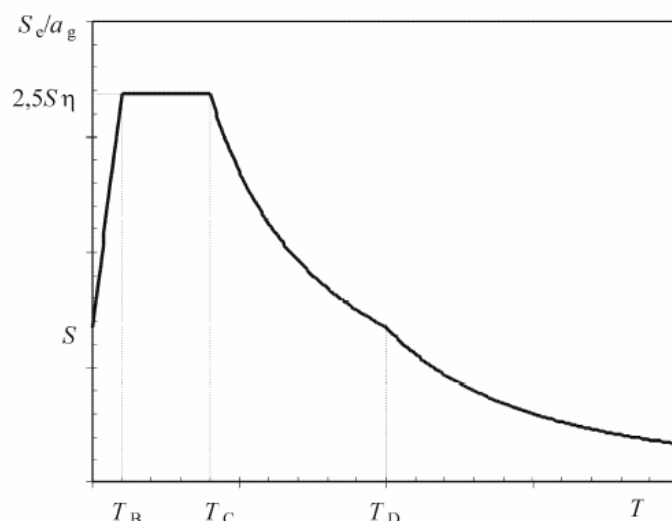
$$S_e(T) = a_g \times S \times \eta \times 2,5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (4-19)$$

$$S_e(T) = a_g \times S \times \eta \times 2,5 \times \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D \quad (4-20)$$

$$S_e(T) = a_g \times S \times \eta \times 2,5 \times \frac{T_C \times T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4\text{sec} \quad (4-21)$$

Όπου,

- $a_g$  είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού ( $a_g = \gamma_I \times a_{gR}$ )
- $S$  είναι ο συντελεστής εδάφους σύμφωνα με τον Πίνακα 4-17 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους
- $T_B$  είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στην αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και η τιμή της προκύπτει σύμφωνα με τον Πίνακα 4-17 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους
- $T_C$  είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στο τέλος της περιοχής σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και την αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής μετακίνησης. Η τιμή της προκύπτει σύμφωνα με τον Πίνακα 4-17 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους
- $T_D$  είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στο τέλος της περιοχής σταθερής φασματικής ταχύτητας και την αρχή της περιοχής σταθερής φασματικής ταχύτητας. Η τιμή της προκύπτει σύμφωνα με τον Πίνακα 4-17 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους
- $\eta$  Είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Η τιμή της απόσβεσης είναι  $\zeta=5\%$  άρα τίθεται  $\eta=1,00$



Σχήμα 4-25: Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για οριζόντια σεισμική δράση και για απόσβεση 5% σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Πίνακας 4-17: Συντελεστής εδάφους και χαρακτηριστικές περίοδοι φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Κατηγορία εδάφους	S	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
A	1,00	0,15	0,40	2,50
B	1,20	0,15	0,50	2,50
C	1,15	0,20	0,60	2,50
D	1,35	0,20	0,80	2,50
E	1,40	0,15	0,50	2,50

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα για έδαφος κατηγορίας Β, έχουμε:

$$S=1,20, T_B=0,15\text{sec}, T_C=0,50\text{sec}, T_D=2,50\text{sec}$$

#### 4.2.6 Συνδυασμοί φορτίσεων

Ανάλογα με το είδος, τη μορφή και τη θέση της κατασκευής, προσδιορίζονται οι διάφορες χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων, οι οποίες επενεργούν επ' αυτής. Οι δράσεις αυτές, πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές (επιμέρους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma$ ), συνδυάζονται μεταξύ τους καταλλήλως (συντελεστές συνδυασμού  $\psi$ ) για την οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας αντίστοιχα και στη συνέχεια εφαρμόζονται επί του φορέα. Οι δράσεις που υπεισέρχονται στους συνδυασμούς, επενεργούν και εκδηλώνονται ταυτόχρονα.

Οι συνδυασμοί σχεδιασμού για τον έλεγχο στην οριακή κατάσταση αστοχίας, είναι οι ακόλουθοι:

- Για καταστάσεις διάρκειας ή παροδικές:

$$\Sigma \gamma_G \times G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i}$$

- Καταστάσεις σχεδιασμού έναντι σεισμού:

$$\Sigma G_{k,j} + A_{Ed} + \Sigma \psi_{2,j} \times Q_{k,i}$$

Οι συνδυασμοί σχεδιασμού που ορίζονται για τον έλεγχο στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, είναι ο ακόλουθος:

- Χαρακτηριστικός συνδυασμός:

$$\Sigma G_{k,j} + Q_{k,1} + \Sigma \psi_{0,i} \times Q_{k,i}$$

Τα σύμβολα στους συνδυασμούς αυτούς είναι τα εξής:

$G_{k,j}$	χαρακτηριστική τιμή των μόνιμων δράσεων
$Q_{k,1}$	χαρακτηριστική τιμή της επικρατέστερης μεταβλητής δράσης
$Q_{k,i}$	χαρακτηριστική τιμή των λοιπών μεταβλητών δράσεων $i$ που συνυπάρχουν
$A_{Ed}$	τιμή σχεδιασμού της σεισμικής δράσης
$\gamma_{G,j}$	επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τη μόνιμη δράση $j$ σύμφωνα με τον Πίνακα 4-18
$\gamma_{Q,i}$	επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τη μεταβλητή δράση $i$ σύμφωνα με τον Πίνακα 4-18
$\psi_{0,i}, \psi_{1,i}, \psi_{2,i}$	Συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων σύμφωνα με τον Πίνακα 4-19

Πίνακας 4-18: Συντελεστές ασφαλείας

	Οριακές καταστάσεις αστοχίας		Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας	
	Δυσμενής επίδραση	Ευμενής επίδραση	Δυσμενής επίδραση	Ευμενής επίδραση
$\gamma_G$	1,35	1,00	1,00	1,00
$\gamma_Q$	1,50	0	1,00	0
$\gamma_E$	1,00	0	-	-

Πίνακας 4-19: Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών  $\psi_i$  για κτίρια

Δράσεις	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια, κατηγορία (EN1991-1-1)			
Κατηγορία A: κατοικίες, συνήθη κτίρια κατοικιών	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία B: χώροι γραφείων	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία E: χώροι αποθήκευσης	1,0	0,9	0,8
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων βάρος οχημάτων $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων $30\text{kN} \leq$ βάρος οχημάτων $\leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία H: στέγες	0	0	0
Φορτία χιονιού επάνω σε κτίρια (EN1991-1-3)			
Φιλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία, Σουηδία	0,7	0,5	0,2
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H > 1000\text{m}$	0,7	0,5	0,2
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H \leq 1000\text{m}$	0,5	0,2	0
Φορτία ανέμου σε κτίρια (EN1991-1-4)	0,6	0,2	0
Θερμοκρασία (εκτός πυρκαγιάς) σε κτίρια (EN1991-1-5)	0,6	0,5	0

Η εύρεση των συνδυασμών φορτίσεων έγινε με τη λογική που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-26 για την οριακή κατάσταση αστοχίας και στο Σχήμα 4-27 λειτουργικότητας. Ενώ τελικά, προέκυψαν 126 διαφορετικοί συνδυασμοί φορτίσεων για την οριακή κατάσταση αστοχία και 126 για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.

	Συνδυασμός δράσεων	Επιμέρους συντελεστές δράσεων				
		Μόνιμα	Χιόνι	Άνεμος	Θερμοκρασία	Σεισμός
Αστοχίας ULS	ULS 1	1.35	1.50			
	ULS 2	1.35	1.50	0.90		
	ULS 3	1.35	1.50		0.90	
	ULS 4	1.35	1.50	0.90	0.90	
	ULS 5	1.35;1.00		1.50		
	ULS 6	1.35;1.00	0.90	1.50		
	ULS 7	1.35;1.00		1.50	0.90	
	ULS 8	1.35;1.00	0.90	1.50	0.90	
	ULS 9	1.35			1.50	
	ULS 10	1.35	0.90		1.50	
	ULS 11	1.35		0.90	1.50	
	ULS 12	1.35	0.90	0.90	1.50	
Σεισμικός	SEISM	1.00	0.30			1.00

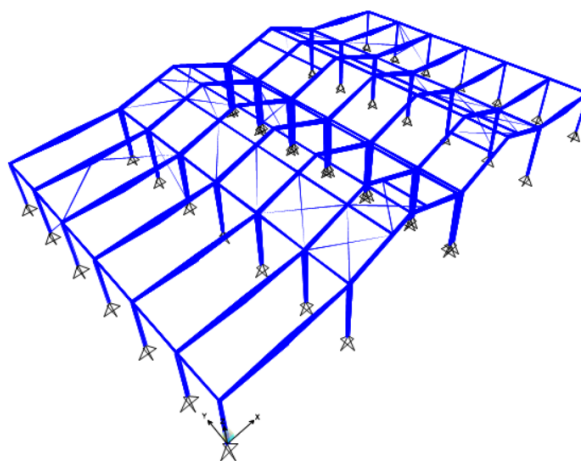
Σχήμα 4-26: Λογική υπολογισμού των συνδυασμών δράσεων ΟΚΑ

	Συνδυασμός δράσεων	Επιμέρους συντελεστές δράσεων				
		Μόνιμα	Χιόνι	Άνεμος	Θερμοκρασία	Σεισμός
Λειτουργικότητας SLS	SLS 1	1.00	1.00			
	SLS 2	1.00	1.00	0.60		
	SLS 3	1.00	1.00		0.60	
	SLS 4	1.00	1.00	0.60	0.60	
	SLS 5	1.00		1.00		
	SLS 6	1.00	0.60	1.00		
	SLS 7	1.00		1.00	0.60	
	SLS 8	1.00	0.60	1.00	0.60	
	SLS 9	1.00				1.00
	SLS 10	1.00	0.60			1.00
	SLS 11	1.00		0.60	1.00	
	SLS 12	1.00	0.60	0.60	1.00	

Σχήμα 4-27: Λογική υπολογισμού των συνδυασμών δράσεων ΟΚΛ

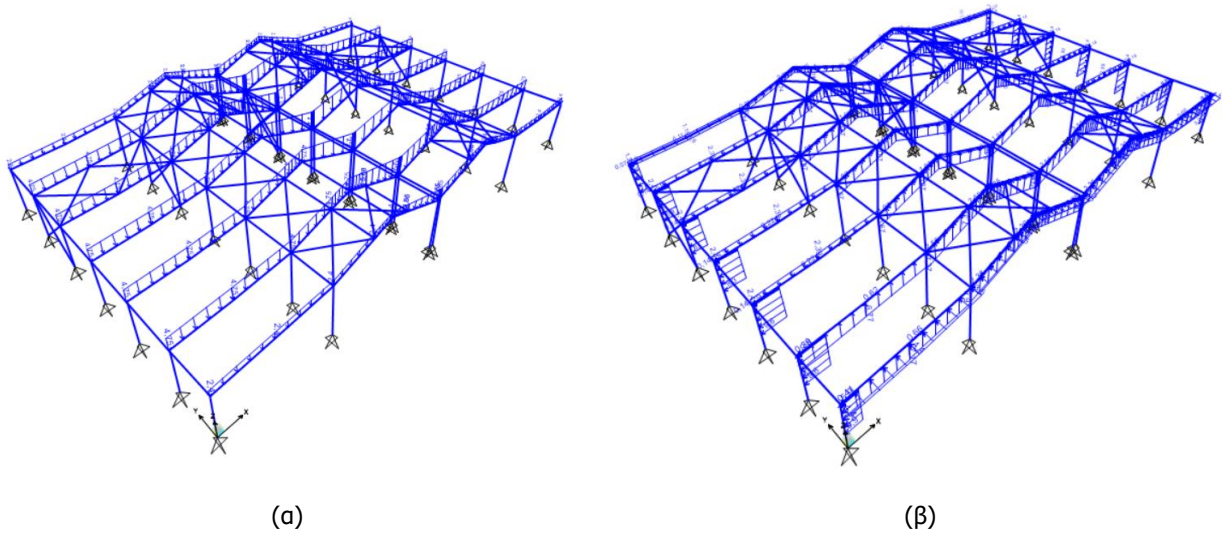
### 4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ

Η στατική ανάλυση του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος SAP 2000 v.19. Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός του φέροντος οργανισμού στο πρόγραμμα, δηλαδή ορίστηκαν οι αποστάσεις και οι διατομές των μελών. Στη συνέχεια, περάστηκαν στον φορέα τα φορτία που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4.2 ως γραμμικά φορτία πάνω στις δοκούς και τα υποστυλώματα λαμβάνοντας υπόψη της αντίστοιχες επιφάνειες επιρροής. Το ίδιο βάρος των μελών υπολογίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα ενώ ο σεισμός και τα φορτία λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα αφού πρώτα έγινε η εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων. Μέσω του προγράμματος βρέθηκαν τα εντατικά μεγέθη που καταπονούν τα στοιχεία της κατασκευής, για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων. Ο έλεγχος επάρκειας των διατομών και των μελών έγινε με το χέρι χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Στο Σχήμα 4-28 δίνεται η προσομοίωση του υφιστάμενου φορέα στο πρόγραμμα SAP 2000 και στο Σχήμα 4-29 δίνεται ενδεικτικά η φόρτιση του χιονιού και ενός από τα σενάρια του ανέμου για άνεμο  $\Theta=90^\circ$ .



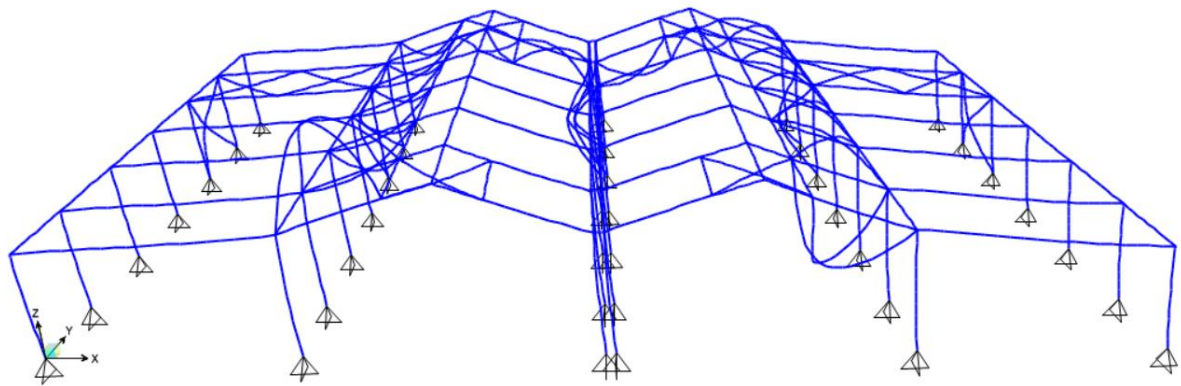
Σχήμα 4-28: Στατικό προσομοίωμα του υφιστάμενου φορέα στο πρόγραμμα SAP 2000



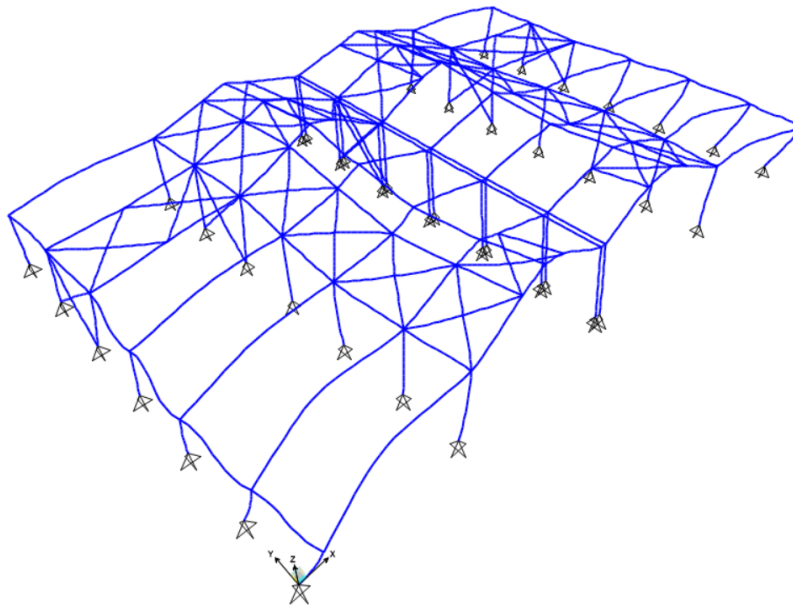


Σχήμα 4-29: (α) Φόρτιση του χιονιού και (β) φόρτιση του ανέμου για  $\Theta=90^\circ$

Κατά την ιδιομορφική φασματική ανάλυση που έγινε, παρατηρήθηκε ότι στις πρώτες ιδιομορφές λαμβάνει μέρος πολύ μικρό ποσοστό της μάζας. Επίσης, επισημαίνεται ότι απαιτήθηκαν αρκετές ιδιομορφές, έτσι ώστε το άθροισμα των δρυσών ιδιομορφικών μαζών να συμπληρώσει το 90% της συνολικής ταλαντούμενης μάζας του συστήματος κατά x και y. Στο Σχήμα 4-30 παρουσιάζεται η δεσπόζουσα ιδιομορφή λυγισμού του φορέα κατά την διεύθυνση x και στο Σχήμα 4-31 κατά y.



Σχήμα 4-30: Δεσπόζουσα ιδιομορφή λυγισμού κατά την διεύθυνση x



Σχήμα 4-31: Δεσπόζουσα ιδιομορφή λυγισμού κατά την διεύθυνση y

**4.3.1 Οριακή κατάσταση αστοχίας**

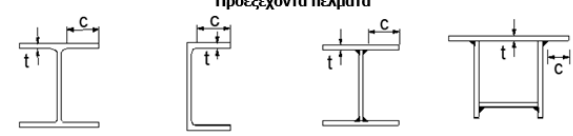
Η ανάλυση ενός φορέα και των στοιχείων από τα οποία συντίθεται, προϋποθέτει την επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης και ελέγχου. Υπάρχουν δύο μέθοδοι ανάλυσης για την οριακή κατάσταση αστοχία, η πλαστική και η ελαστική. Επομένως, ο έλεγχος ξεκινά με την κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες. Η κατάταξη μιας συγκεκριμένης διατομής εξαρτάται από το λόγο πλάτους προς πάχος  $c/t$  καθενός από τα (εν μέρει ή πλήρως) λόγω αξονικής δύναμης ή/και καμπτικής ροπής θλιβόμενα πλακοειδή στοιχεία της. Η κατάταξη γίνεται με βάση το Σχήμα 4-32, το Σχήμα 4-33 και το Σχήμα 4-34.

Εσωτερικά θλιβόμενα τμήματα			
Αξονας κάμψης		Αξονας κάμψης	
Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	όταν $a > 0,5$ : $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13a-1}$ όταν $a \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{36\epsilon}{a}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	όταν $a > 0,5$ : $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13a-1}$ όταν $a \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{a}$
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	όταν $\psi > -1$ : $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67+0,33\psi}$ όταν $\psi \leq -1^{(*)}$ : $c/t \leq 62\epsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$	235	275
	$\epsilon$	1,00	0,92
			355
			420
			460
			0,81
			0,75
			0,71

\*)  $\psi \leq -1$  εφαρμόζεται όπου η θλιπτική τάση  $\sigma < f_c$  είτε η εφελκυστική παραμόρφωση  $\epsilon_s > \epsilon_y/E$

Σχήμα 4-32: Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1)

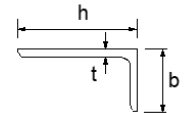
**Προεξέχοντα πέλματα**



Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη				
		Άκρο σε θλίψη	Άκρο σε εφελκυσμό			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Για $k_\sigma$ βλέπε EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Σχήμα 4-33: Κατάταξη προεξέχοντων ελασμάτων (EN1993-1-1)

**Γωνιακά**



Αναφορά επίσης στα "Προεξέχοντα πέλματα" (βλέπε φύλο 2 από 3)

Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία

Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη					
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)						
3	$h/t \leq 15\epsilon: \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
<b>Σωληνωτές διατομές</b>						
Κατηγορία	Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
<b>ΣΗΜΕΙΩΣΗ</b> Για $d/t > 90\epsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Σχήμα 4-34: Κατάταξη γωνιακών και σωληνωτών διατομών (EN1993-1-1)

4.3.1.1 Έλεγχος διατομής

– Έλεγχος σε αξονική δύναμη:

Για τα εφελκυσόμενα μέλη, η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης  $N_{Ed}$  σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 1,0 \tag{4-22}$$

Όπου,  $N_{pl,Rd}$  είναι η πλαστική αντοχή σχεδιασμού της πλήρους διατομής, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4-23)$$

Για τα θλιβόμενα μέλη, η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης  $N_{Ed}$  σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (4-24)$$

Όπου,  $N_{c,Rd}$  είναι η αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε ομοιόμορφα επιβεβλημένη θλίψη και καθορίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 ή 3} \quad (4-25)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4} \quad (4-26)$$

Όπου,  $A$  είναι η πλήρης διατομή και  $A_{eff}$  η ενεργός διατομή.

– Έλεγχος σε μονοαξονική κάμψη:

Η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης  $M_{Ed}$  σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (4-27)$$

Όπου,  $M_{c,Rd}$  είναι η αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη και καθορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις ως εξής:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1 ή 2} \quad (4-28)$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 3} \quad (4-29)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4} \quad (4-30)$$

– Έλεγχος σε διάτμηση:

Για τον πλαστικό έλεγχο της διάτμησης, δηλαδή για διατομές κατηγορίας 1 ή 2, η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας δύναμης  $V_{Ed}$  σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί την σχέση:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (4-31)$$

Όπου,  $V_{pl,Rd}$  είναι η πλαστική διατμητική αντοχή και δίνεται από την σχέση:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \times (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (4-32)$$

Όπου,  $A_v$  είναι η επιφάνεια διάτμησης το οποίο λήφθηκε για τις διατομές από το πρόγραμμα.

Για τον ελαστικό έλεγχο της διάτμησης, δηλαδή για διατομές κατηγορίας 3 ή 4, μπορεί να χρησιμοποιείται το παρακάτω κριτήριο για ένα κρίσιμο σημείο της διατομής:

$$\frac{T_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \times \gamma_{M0})} \leq 1,0 \quad (4-33)$$

Όπου,  $T_{Ed}$  είναι η διατμητική τάση της διατομής και ορίζεται από την σχέση:

$$T_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \quad \text{για διατομές I, φορτίο παράλληλο στον κορμό} \quad (4-34)$$

$$T_{Ed} = \frac{3}{2} \times \frac{V_{Ed}}{A_f} \quad \text{για διατομές I, φορτίο παράλληλο στα πέλματα} \quad (4-35)$$

$$T_{Ed} = 2 \times \frac{V_{Ed}}{A} \quad \text{για διατομές κοίλες κυκλικές} \quad (4-36)$$

Όπου,  $A_w$  είναι η επιφάνεια του κορμού και  $A_f$  είναι η επιφάνεια ενός πέλματος.

– Έλεγχος σε κάμψη και διάτμηση:

Όταν η δρώσα τέμνουσα δύναμη  $V_{Ed}$  είναι μεγαλύτερη από το 50% της πλαστικής διατμητικής αντοχής, πρέπει να λαμβάνεται ως αντοχή σχεδιασμού η απομειωμένη ροπή αντοχής, η οποία υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη για την επιφάνεια διάτμησης  $A_v$  τη μειωμένη τιμή της τάσης διαρροής:

$$(1 - \rho) \times f_y \quad (4-37)$$

Όπου,

$$\rho = \left( \frac{2 \times V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4-38)$$

και  $V_{pl,Rd}$  από τη σχέση (4-32).

– Έλεγχος σε κάμψη και αξονική για διατομές κατηγορίας 1 ή 2:

Το κριτήριο που θα πρέπει να ικανοποιείται είναι το παρακάτω:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + \left( \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (4-39)$$

Όπου,  $N_{pl,Rd}$  είναι η αξονική δύναμη σχεδιασμού διαρροής της διατομής και δίνεται από τη σχέση:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4-40)$$

Για διατομές διπλής συμμετρίας I και H ή άλλες διατομές με πέλματα, δεν απαιτείται μείωση της πλαστικής ροπής αντοχής περί τον άξονα γ-γ λόγω της επίδρασης της αξονικής δύναμης, όταν ικανοποιούνται συγχρόνως τα δύο παρακάτω κριτήρια:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \times N_{pl,Rd} \quad (4-41)$$

και

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4-42)$$

Όπου,  $h_w$  είναι η εσωτερική απόσταση μεταξύ των πελμάτων και  $t_w$  είναι το πάχος του κορμού.

Για διατομές διπλής συμμετρίας I και H ή άλλες διατομές με πέλματα, δεν απαιτείται μείωση της πλαστικής ροπής αντοχής περί τον άξονα z-z λόγω της επίδρασης της αξονικής δύναμης, όταν:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4-43)$$

Για ελατές και συγκολλητές διατομές I ή H με ίσα πέλματα, η απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής γίνεται ως εξής:

$$M_{N,y,Rd} = \min\{M_{pl,y,Rd} \times (1-n)/(1-0,5 \times n); M_{pl,y,Rd}\} \quad (4-44)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \times \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \quad \text{για } n > a \quad (4-45)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad \text{για } n \leq a \quad (4-46)$$

Όπου,

$$n = N_{Ed}/N_{pl,Rd} \quad (4-47)$$

$$a = \min\{(A - 2 \times b \times t_f)/A; 0,5\} \quad (4-48)$$

Για όρθογωνικές διατομές, ελατές ή συγκολλητές, η απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής γίνεται ως εξής:

$$M_{N,y,Rd} = \min\{M_{pl,y,Rd} \times (1-n)/(1-0,5 \times a_w); M_{pl,y,Rd}\} \quad (4-49)$$

$$M_{N,z,Rd} = \min\{M_{pl,z,Rd} \times (1-n)/(1-0,5 \times a_f); M_{pl,z,Rd}\} \quad (4-50)$$

Όπου, για κοίλες διατομές ισχύει:

$$a_w = \min\{(A - 2 \times b \times t)/A; 0,5\} \quad (4-51)$$

$$a_f = \min\{(A - 2 \times h \times t)/A; 0,5\} \quad (4-52)$$

Για την περίπτωση που έχουμε διαξονική κάμψη, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο επάρκειας της διατομής το παρακάτω κριτήριο αλληλεπίδρασης:

$$\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^{\alpha} + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^{\beta} \leq 1 \quad (4-53)$$

Όπου,

Για I και H διατομές:  $\alpha = 2$  και  $\beta = \max\{5 \times n; 1\}$

Για κοίλες κυκλικές διατομές:  $\alpha = \beta = 2$

Για κοίλες ορθογωνικές διατομές:  $\alpha = \beta = \min\{1,66/(1 - 1,13 \times n^2); 6\}$

Συντηρητικά μπορεί να ληφθεί:  $\alpha = \beta = 1$

– Έλεγχος σε κάμψη και αξονική για διατομές κατηγορίας 3:

Για διατομές κατηγορίας 3, όταν δεν υπάρχει σημαντική τέμνουσα δύναμη, η μέγιστη διαμήκης (ορθή) τάση  $\sigma_{x,Ed}$  πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4-54)$$

Όπου,  $\sigma_{x,Ed}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της διαμήκους τάσης λόγω συνδυασμού ροπής και αξονικής δύναμης.

#### 4.3.1.2 Έλεγχος μέλους

– Αντοχή μελών έναντι καμπτικού λυγισμού:

Ένα θλιβόμενο μέλος πρέπει να ελέγχεται έναντι λυγισμού ως εξής:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (4-55)$$

Όπου,

$N_{Ed}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης

$N_{b,Rd}$  είναι η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό, η οποία λαμβάνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A \times f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4-56)$$

Όπου,  $\chi$  είναι ο μειωτικός συντελεστής για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού. Σε μέλη υπό αξονική θλίψη, η τιμή του  $\chi$  για την κατάλληλη ανηγμένη λυγηρότητα  $\lambda$ , πρέπει να καθορίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού σύμφωνα με την σχέση:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (4-57)$$

Όπου,

$$\Phi = 0,5 \times \left[ 1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (4-58)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \equiv \frac{L_{cr}}{i} \times \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3} \quad (4-59)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \times \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4} \quad (4-60)$$

Όπου,

$\alpha$  είναι ο συντελεστής ατελειών, που δίνεται στον Πίνακα 4-20 ανάλογα με την καμπύλη λυγισμού που προκύπτει από το Σχήμα 4-35

$N_{cr}$  είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού βασισμένο στις ιδιότητες της πλήρους διατομής

$L_{cr}$  είναι το μήκος λυγισμού

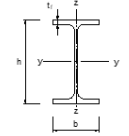
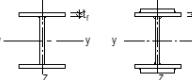

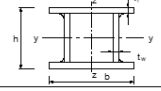
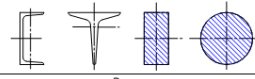

$i$  Είναι η ακτίνα αδράνειας περί τον αντίστοιχο άξονα, υπολογιζόμενη χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της πλήρους διατομής

$$\lambda_1 = \pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \times \varepsilon, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ σε N/mm}^2)$$

Πίνακας 4-20: Συντελεστές ατελειών  $\alpha$  (EN1993-1-1)

Καμπύλες λυγισμού	a0	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76



Διατομή	Όρια	Λυγισμός περί τον άξονα	Καμπύλη λυγισμού		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
 Ελάττες Διατομές	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	a a <sub>0</sub>	
			y-y z-z	b a	
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b a
			y-y z-z	d c	
 Συγκολλητές I-διατομές	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c		
		y-y z-z	c d		
 Κοίλες Διατομές	Εν θερμό έλαση	Κάθε	a	a <sub>0</sub>	
	Ψυχρή έλαση	Κάθε	c	c	
 Συγκολλητές επιτομαστές διατομές	Γενικά (εκτός των κατωτέρω) Μεγάλα πάχη ραφής: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Κάθε	b	b	
		Κάθε	c	c	
 U-, T- και συμμορφές διατομές		Κάθε	c	c	
 L-διατομές		Κάθε	b	b	

Σχήμα 4-35: Επιλογή καμπύλης λυγισμού

Για λυγηρότητα  $\bar{\lambda} \leq 0,2$  ή για  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$  δεν χρειάζεται έλεγχος έναντι καμπτικού λυγισμού.

– Αντοχή μελών έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού:

Μια πλευρικά μη προστατευόμενη δοκός που υπόκειται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα πρέπει να ελέγχεται έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ως εξής:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \tag{4-61}$$

Όπου,

$N_{Ed}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ροπής

$M_{b,Rd}$  είναι η ροπή αντοχής σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, η οποία λαμβάνεται από την παρακάτω σχέση:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times W_y \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \tag{4-62}$$

Όπου,

$W_y$  είναι η κατάλληλη ροπή αντίστασης της διατομής σύμφωνα με τον Πίνακα 4-21

$\chi_{LT}$  είναι ο μειωτικός συντελεστής για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, η τιμή του οποίου για την αντίστοιχη ανηγμένη λυγηρότητα  $\lambda_{LT}$ , πρέπει να καθορίζεται από την σχέση:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (4-63)$$

Όπου,

$$\Phi_{LT} = 0,5 \times \left[ 1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (4-64)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} \quad (4-65)$$

Όπου,

$\alpha_{LT}$  είναι ο συντελεστής ατελειών, που δίνεται στον Πίνακα 4-22 ανάλογα με την καμπύλη λυγισμού που προκύπτει από τον Πίνακα 4-23

$M_{cr}$  είναι η ελαστική κρίσιμη ροπή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{(k \times L^2)} \left\{ \left[ \left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \times L^2) \times G \times I_t}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2 \right]^{0,5} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right\} \quad (4-66)$$

Όπου,

$L$  είναι το μήκος του μέλους μεταξύ των σημείων πλευρικής εξασφάλισης

$C_1, C_2, C_3$  είναι ο συντελεστές λόγω της μορφής του διαγράμματος των ροπών, σύμφωνα με τους πίνακες ENV1993-1-1/1992 Πιν. F.1.1 και ENV1993-1-1/1992 Πιν. F.1.1

$K, k_w$  Είναι συντελεστές ίσοι με τη μονάδα,  $k = k_w = 1,0$

$I_w, I_t$  είναι η σταθερά στρέβλωσης και η σταθερά στρέψης αντίστοιχα

$z_g$  είναι η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς τον άξονα γ-γ

$z_j$  είναι η τεταγμένη του κέντρου διάτμησης ως προς τον κεντροβαρικό άξονα γ-γ

Πίνακας 4-21: Επιλογή της κατάλληλης ροπής αντίστασης, ανάλογα με την κατηγορία διατομής

Κατηγορία	1 ή 2	3	4
$W_y$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$

Πίνακας 4-22: Συντελεστές ατελειών  $\alpha_{LT}$  (EN1993-1-1)

Καμπύλες λυγισμού	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών $\alpha_{LT}$	0,21	0,34	0,49	0,76

Πίνακας 4-23: Επιλογή καμπύλης λυγισμού (EN1993-1-1)

Διατομή	Όρια	Καμπύλη λυγισμού
Ελατές διατομές I	$h/b \leq 2$	a

	$h/b > 2$	b
Συγκολλητές διατομές I	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Άλλες διατομές	-	d

Για λυγηρότητα  $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$  ή για  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,04$  δεν χρειάζεται έλεγχος έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Επίσης, δοκοί με κάποιους τύπους διατομών, όπως τετραγωνικές ή κυκλικές κοίλες διατομές, κατασκευασμένοι κυκλικοί σωλήνες ή τετραγωνικές κιβωτοειδείς διατομές δεν είναι ευαίσθητες σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

– Αντοχή μελών υπό κάμψη και θλίψη:

Μέλη που υπόκεινται σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη πρέπει να ικανοποιούν τι σχέσεις:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \times \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4-67)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \times \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \times \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4-68)$$

Όπου,

$N_{Ed}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$  είναι οι τιμές σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης και των μεγίστων ροπών ως προς τους άξονες y-y και άξονες z-z κατά μήκος του μέλους, αντίστοιχα

$\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$  είναι οι ροπές λόγω της μετατόπισης του κεντροβαρικού άξονα για διατομές κατηγορίας 4

$\chi_y, \chi_z$  είναι οι μειωτικοί συντελεστές λόγω καμπτικού λυγισμού από την σχέση (4-57)

$\chi_{LT}$  Είναι ο μειωτικός συντελεστής λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού από την σχέση (4-63)

$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$  Είναι οι συντελεστές αλληλεπίδρασης σύμφωνα με την μέθοδο Β του Ευρωκώδικα 3

Πίνακας 4-24: Τιμές για  $N_{Rk} = f_y \times A_i$ ,  $M_{i,Rk} = f_y \times W_i$  και  $\Delta M_{i,Ed}$

Κατηγορία	1	2	3	4
$A_i$	A	A	A	$A_{eff}$
$W_y$	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
$W_z$	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Για μέλη που δεν υπόκεινται σε στρεπτική παραμόρφωση το  $\chi_{LT}$  είναι  $\chi_{LT}=1,0$ .

#### 4.3.1.3 Υπολογισμοί

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των δομικών στοιχείων του φορέα σε έλεγχο διατομής και μέλους για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φορτίσεων, σύμφωνα με τις

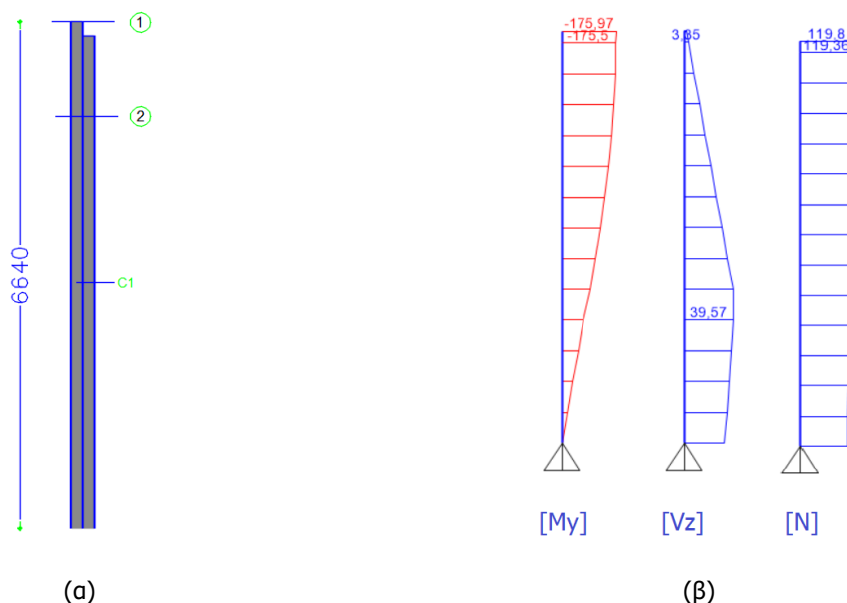
διαδικασίες που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 4.3.1.1 και 4.3.1.2 αντίστοιχα. Οι τεγίδες και οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας δεν ελέγχθηκαν επειδή πρόκειται να αφαιρεθούν.

– Ακραία υποστυλώματα C1:

Στο Σχήμα 4-36 δίνονται τα χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο διατομής και μέλους του υποστυλώματος C1 καθώς και η διαδικασία κατάταξης των διατομών σε κατηγορίες προκειμένου να προσδιοριστεί η μέθοδος ελέγχου. Από την κατάταξη των διατομών προκύπτει ότι και οι δύο διατομές είναι κατηγορίας 1, άρα θα ακολουθήσει πλαστικός έλεγχος. Τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν από την στατική ανάλυση δίνονται στο Σχήμα 4-37, καθώς επίσης και η θέση των διατομών ελέγχου. Στο Σχήμα 4-38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου των διατομών και στο Σχήμα 4-39 ο έλεγχος μέλους για τον συνδυασμό της μέγιστης ροπής και τον συνδυασμό της μέγιστης θλιπτικής αξονικής δύναμης. Ο έλεγχος μέλους έγινε λαμβάνοντας υπόψη μόνο την διατομή 1, καθώς η διατομή 2 έχει μήκος μόνο 0,19m και έτσι είναι δύσκολο να λυγίσει.

Χαρακτηριστικά διατομών:														
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	16	14	20	1	0,6	48,40	2390,53	1333,59	9,60	33,33	298,82	133,36	329,40	201,26
2	31	14	20	1	0,6	76,80	10224,40	2000,50	19,24	52,96	659,64	200,05	731,00	302,52
Κατηγορία διατομών:														
Διατομή	Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή					
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος				
1	14	0,6	23,33	1	9,7	1	9,70	1	1	Πλαστικός				
2	14	0,6	23,33	1	9,7	1	9,70	1	1	Πλαστικός				

Σχήμα 4-36: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των διατομών του υποστυλώματος C1



Σχήμα 4-37: (α) Θέσεις των διατομών ελέγχου και (β) εντατικά μεγέθη για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρπισης του υποστυλώματος C1

Έλεγχος διατομών - Πλαστικός Έλεγχος:								
Κάμψη και διάτμηση:								
Διατομή	$V_{pl,Rd}$ (kN)		$V_{Ed}$ (kN)		$0,5*V_{pl,Rd}$		$V_{Ed}$ (kN)	
1	130,25	>	3,351	επαρκεί	65,13	>	3,351	όχι απομείωση
2	261,04	>	3,351	επαρκεί	130,52	>	3,351	όχι απομείωση
Κάμψη και αξονική:								
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	$N_{pl,Rd}$ (kN)		$N_{Ed}$ (kN)				
1	48,40	1137,4	>	119,804	επαρκεί			
2	76,80	1804,8	>	119,359	επαρκεί			
Διατομή	$0,25*N_{pl,Rd}$		$N_{Ed}$ (kN)		$0,5*hw*tw*fy/\gamma_{M0}$		$N_{Ed}$ (kN)	
1	284,35	>	119,804	όχι απομείωση	98,7	<	119,804	απομείωση
2	451,2	>	119,359	όχι απομείωση	197,4	>	119,359	όχι απομείωση
Διατομή	n	a	$M_{pl,Rd}$ (kNm)	$M_{N,Rd}$ (kNm)		$M_{Ed}$ (kNm)		
1	0,11	0,17	77,41	75,84	<	175,9748	δεν επαρκεί	
2	-	-	171,79	171,79	<	175,50	δεν επαρκεί	

Σχήμα 4-38: Έλεγχος διατομής του υποστυλώματος C1

Έλεγχος μέλους:										
Ισοδύναμο μήκος, διεύθυνση y-y:										
$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$L_c$ (cm)	$K_c$ (cm <sup>3</sup> )	$I_{12}$ (cm <sup>4</sup> )	$L_{12}$ (cm)	$K_{12}$ (cm <sup>3</sup> )	$n_1$	$n_2$	$\beta$	$L_{cr,y}$ (cm)	
10224,40	664	15,40	35261,438	1482,5	35,68	0,30	1	2,2	1460,8	
Ισοδύναμο μήκος, διεύθυνση z-z:										
$L_{cr,yz}$ (cm)										
664										
Μικροί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση y-y:										
Διατομή	$\lambda_1$	$i_y$	$\lambda_y$	καμπ. Λυγ.	a	$\Phi_y$	$\chi_y$			
2	93,91	11,54	1,35	b	0,34	1,60	0,40			
Μικροί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση z-z:										
Διατομή	$\lambda_1$	$i_z$	$\lambda_z$	καμπ. Λυγ.	a	$\Phi_z$	$\chi_z$			
2	93,91	5,10	1,39	c	0,49	1,75	0,35			
Μικροί συντελεστές λόγω κάμψης:										
Διατομή	L (cm)	$C_1$	E	G	$I_z$ (cm <sup>4</sup> )	$I_t$ (cm <sup>4</sup> )	$I_w$ (cm <sup>6</sup> )	$M_{cr}$ (kNcm)	$W_{pl,y}$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{LT}$
2	664	1,879	21000	8100	2000,50	22,016	450112,5	35981,348	731,00	0,691
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$					
2	1,55	c	0,49	0,859	0,730					
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:										
Διατομή	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	R							
2	175,50	171,79	1,40	>	1	δεν επαρκεί				
Έλεγχος για μέγιστη θλιπτική δύναμη:										
$N_{Ed}$	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$k_{yy}$	$R_y$					
167,686	111,1632	1804,80	171,79	1,26	1,35	>	1	δεν επαρκεί		
				$k_{zy}$	$R_z$					
				0,76	0,93	<	1	επαρκεί		

Σχήμα 4-39: Έλεγχος μέλους του υποστυλώματος C1

Παρατηρούμε ότι, κατά τον έλεγχο των διατομών, η διατομή 1 δεν επαρκεί έναντι κάμψης με μεγάλη διαφορά, ενώ η διατομή 2 δεν επαρκεί για πολύ λίγο, γεγονός που είναι λογικό εφόσον είναι

μεγαλύτερη. Επίσης, ο έλεγχος μέλους δεν επαρκεί, με κρισιμότερη την περίπτωση της μέγιστης ροπής και με βαθμό αξιοποίησης  $R=1,40 > 1$ .

– Ενδιάμεσα υποστυλώματα C2:

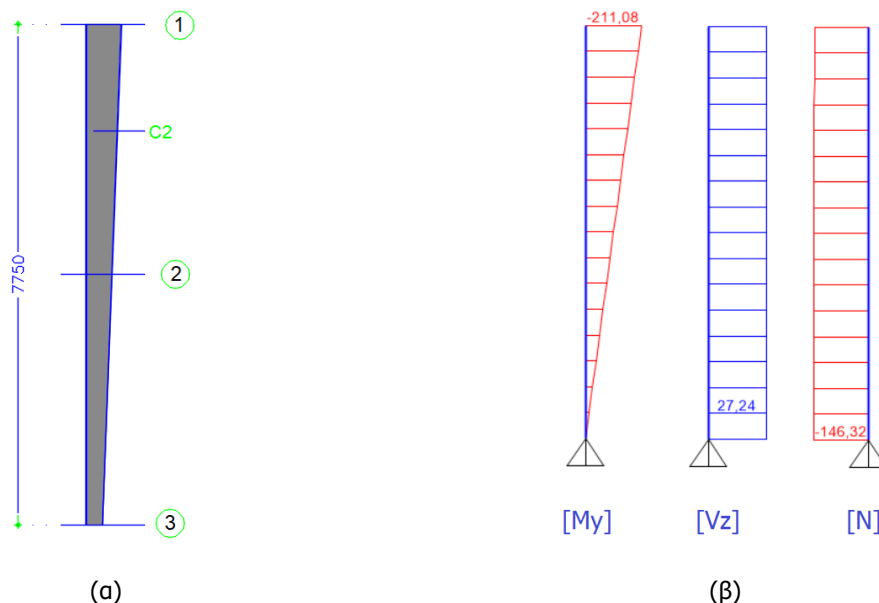
Στο Σχήμα 4-40 δίνονται τα χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο διατομής και μέλους του υποστυλώματος C2 καθώς και η διαδικασία κατάταξης των διατομών σε κατηγορίες προκειμένου να προσδιοριστεί η μέθοδος ελέγχου. Από την κατάταξη των διατομών προκύπτει ότι η διατομή 1 είναι κατηγορίας 4 και οι διατομές 2 και 3 είναι κατηγορίας 3. Παρόλο που η διατομή 1 είναι κατηγορίας 4, ο έλεγχός της έγινε ως διατομή κατηγορίας 3, διότι όπως διαπιστώθηκε δεν επαρκεί ως κατηγορία 3 και έτσι δεν θα επαρκεί ούτε ως κατηγορία 4. Τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν από την στατική ανάλυση δίνονται στο Σχήμα 4-41, καθώς επίσης και η θέση των διατομών ελέγχου. Στο Σχήμα 4-42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου των διατομών.

Χαρακτηριστικά διατομών:														
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	55,5	54,1	20	0,7	0,4	49,64	26300,44	933,62	22,20	23,33	947,76	93,36	1059,88	142,16
2	40,75	39,35	20	0,7	0,4	43,74	15639,22	933,54	16,30	23,33	665,34	93,35	737,30	141,57
3	26	24,6	20	0,7	0,4	37,84	4978,00	933,46	10,40	23,33	382,92	93,35	414,72	140,98

Κατηγορία διατομών:										
Διατομή	Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή	
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος
1	54,1	0,4	135,25	4	9,8	0,7	14,00	1	4	Ελαστικός
2	39,35	0,4	98,375	3	9,8	0,7	14,00	1	3	Ελαστικός
3	24,6	0,4	61,5	3	9,8	0,7	14,00	1	3	Ελαστικός

Σχήμα 4-40: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των διατομών του υποστυλώματος C2



Σχήμα 4-41: (α) Θέσεις των διατομών ελέγχου και (β) εντατικά μεγέθη για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης του υποστυλώματος C2

Έλεγχος διατομών - Ελαστικός Έλεγχος:								
Έλεγχος ορθών τάσεων:								
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$\sigma_{x,N}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,My}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/\gamma_{M0}$	
1	-143,66	-211,08	-2,89	-22,27	-25,17	>	23,5	δεν επαρκεί
2	-145,08	-105,54	-3,32	-15,86	-19,18	<	23,5	επαρκεί
3	-146,32	0,00	-3,87	0,00	-3,87	<	23,5	επαρκεί
Έλεγχος Διαμητικών τάσεων:								
Διατομή	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$V_{Ed}$ (kN)	$\tau_{ed,xz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/(\sqrt{3}\gamma_{M0})$			
1	21,64	27,24	1,26	<	13,57		επαρκεί	
2	15,74	27,24	1,73	<	13,57		επαρκεί	
3	9,84	27,24	2,77	<	13,57		επαρκεί	
Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises:								
Διατομή	$\sigma_{VM}$		$f_y/\gamma_{M0}$					
1	25,26	>	23,5				δεν επαρκεί	
2	19,41	<	23,5				επαρκεί	
3	6,16	<	23,5				επαρκεί	

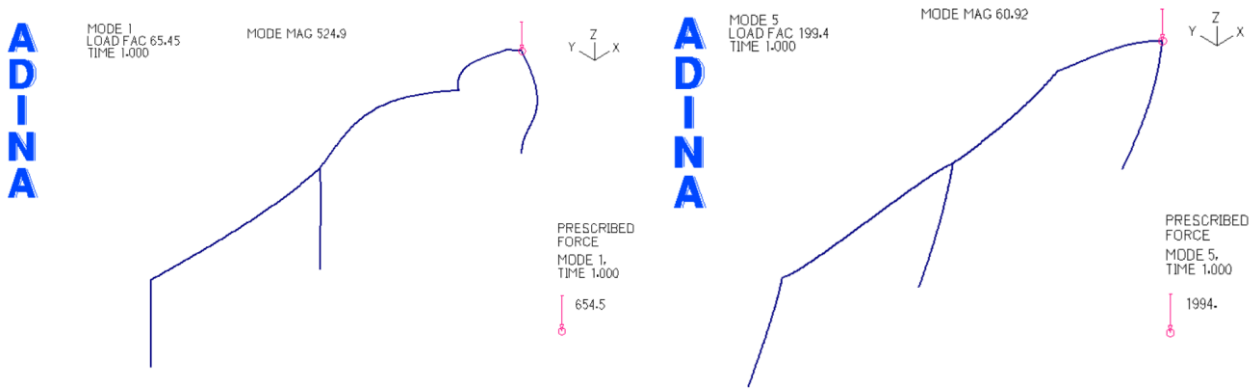
Σχήμα 4-42: Έλεγχος διατομής του υποστυλώματος C2

Στην συνέχεια, για τον έλεγχο του μέλους έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι υπολογισμού, λόγω του ότι το υποσύλωμα αποτελείται από μεταβλητή διατομή. Κατά την πρώτη μέθοδο, πραγματοποιήθηκε γραμμική ανάλυση λυγισμού (linear buckling analysis) με τη χρήση του προγράμματος ADINA, από την οποία λήφθηκαν τα κρίσιμα φορτία Euler, προκειμένου να υπολογιστούν οι μειωτικοί συντελεστές του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Κατά την δεύτερη μέθοδο, υπολογίστηκε το ισοδύναμο μήκος λυγισμού και οι μειωτικοί συντελεστές του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Ακολούθως, αφού έγινε ο υπολογισμός των μειωτικών συντελεστών για κάθε διατομή ελέγχου, η διαδικασία συνεχίστηκε και στις δύο περιπτώσεις σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι και με τους δύο τρόπους ως μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης λήφθηκε εκείνος που προκύπτει από την μέγιστη κρίσιμη ροπή,  $M_{cr}$ , των διατομών.

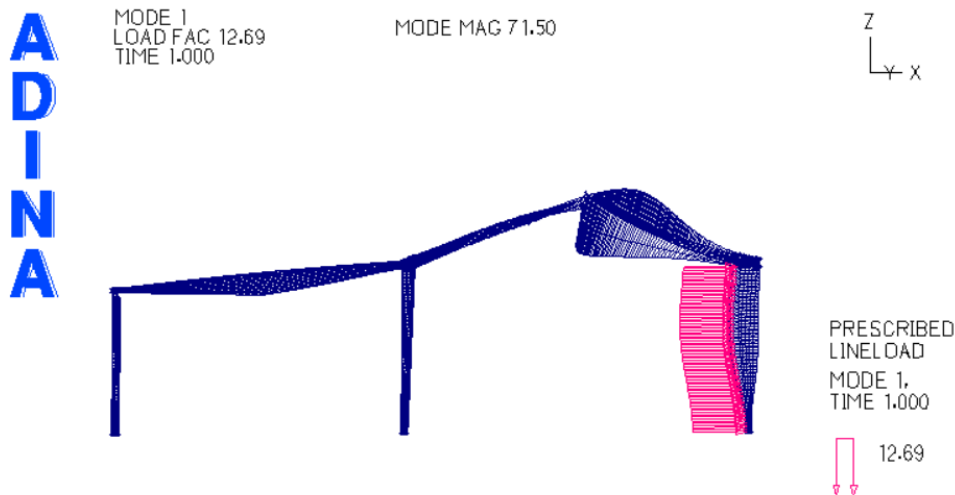
Αρχικά, για την υλοποίηση της πρώτης μεθόδου, προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ADINA το μισό συμμετρικό πλαίσιο του φορέα με στοιχεία δοκού (beam elements) και ασκήθηκε αξονικό θλιπτικό φορτίο στο αντίστοιχο μέλος, έτσι ώστε να προκύψει καμπτικός λυγισμός. Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε και με επιφανειακά στοιχεία (shell elements), στο οποίο ασκήθηκε γραμμικά καταναμημένο φορτίο στο αντίστοιχο μέλος, έτσι ώστε να προκύψει πλευρικός λυγισμός. Στην βάση των υποστυλωμάτων οι στηρίξεις είναι αρθρώσεις ενώ στις δοκούς δεσμεύτηκε η μετατόπιση εκτός επιπέδου στα σημεία όπου υπάρχει σύνδεση με τους οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε γραμμική ανάλυση λυγισμού (linear buckling analysis) και στους δύο φορείς.

Από την προσομοίωση του φορέα με στοιχεία δοκού λήφθηκε το κρίσιμο αξονικό φορτίο Euler,  $N_{cr}$  για τον λυγισμό εκτός επιπέδου του μέλους από την πρώτη ιδιομορφή, (Σχήμα 4-43) και το κρίσιμο αξονικό φορτίο Euler,  $N_{cr}$  για τον λυγισμό εντός επιπέδου του μέλους από την πέμπτη ιδιομορφή (Σχήμα 4-43). Ακολούθως, από την προσομοίωση του φορέα με επιφανειακά λήφθηκε το κρίσιμο γραμμικά καταναμημένο φορτίο Euler,  $q_{cr}$  (Σχήμα 4-44) από τις αντίστοιχες ιδιομορφές λυγισμού. Με τη βοήθεια του προγράμματος SAP 2000, αφού προσομοιώθηκε το μισό συμμετρικό πλαίσιο και ασκήθηκε μοναδιαίο γραμμικά καταναμημένο φορτίο, λήφθηκε το εντατικό μέγεθος της ροπής  $M_{q=1}$  (Σχήμα 4-45). Με τον πολλαπλασιασμό του  $q_{cr}$  από το πρόγραμμα ADINA και της ροπής  $M_{q=1}$  από το

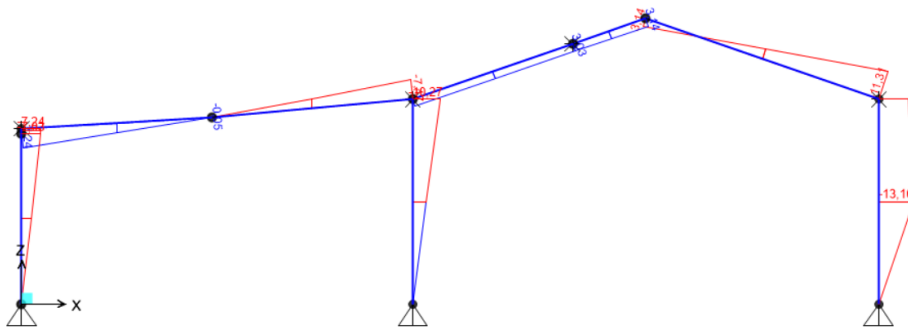
πρόγραμμα SAP 2000, προέκυψε η κρίσιμη ελαστική ροπή  $M_{cr}$ . Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια βασίζεται στους τύπους του Ευρωκώδικα 3 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-46.



Σχήμα 4-43: Ιδιομορφές για λυγισμό (α) εκτός επιπέδου και (β) εντός επιπέδου από την γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με στοιχεία δοκού για το υποστύλωμα C2



Σχήμα 4-44: Ιδιομορφή πλευρικού λυγισμού από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με επιφανειακά στοιχεία για το υποστύλωμα C2



Σχήμα 4-45: Διάγραμμα ρομών λόγω της επιβολής μοναδιαίου γραμμικά καταμεμημένου φορτίο στο υποστύλωμα C2



Έλεγχος μέλους - ADINA													
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνσης z-z:						Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνσης γ-γ:							
N <sub>cr,z</sub> = 654,5 (1η ιδιομορφή)						N <sub>cr,y</sub> = 1994 (5η ιδιομορφή)							
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	λ <sub>z</sub>	Καμπ. Λυγ.	α	Φ <sub>z</sub>	χ <sub>z</sub>	Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	λ <sub>y</sub>	Καμπ. Λυγ.	α	Φ <sub>y</sub>	χ <sub>y</sub>
1	49,64	1,335	c	0,49	1,669	0,374	1	49,64	0,765	b	0,34	0,889	0,746
2	43,74	1,253	c	0,49	1,543	0,409	2	43,74	0,718	b	0,34	0,846	0,773
3	37,84	1,166	c	0,49	1,416	0,451	3	37,840	0,668	b	0,34	0,803	0,802
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:													
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	α <sub>LT</sub>	Κατηγορ. Διατ.	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	α <sub>cr</sub> (ADINA)	M <sub>q=1</sub> (kNcm)	M <sub>cr</sub> (kNcm)	λ <sub>LT</sub>	Φ <sub>LT</sub>	χ <sub>LT</sub>		
1	2,78	d	0,76	4	947,76	12,69	1131,11	14353,79	1,246	1,673	0,358		
2	2,04	d	0,76	3	665,34	12,69	1316,34	16704,35	0,967	1,260	0,484		
3	1,30	c	0,49	3	382,92	12,69	1316,34	16704,35	0,734	0,900	0,704		
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:													
Διατομή	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Ed,y</sub> (kNm)	N <sub>Rk</sub> (kN)	M <sub>y,Rk</sub> (kNm)	k <sub>sy</sub>	k <sub>yy</sub>							
1	143,656	211,0824	1166,54	222,72	0,861	1,076							
2	145,077	105,5412	1027,89	156,36	0,863	1,079							
3	146,318	0	889,24	89,99	0,866	1,082							
Βαθμοί αξιοποίησης:													
Διατομή	R <sub>s,N</sub>	R <sub>s,M<sub>y</sub></sub>											
1	0,329	1,685	2,014	>	1	δεν επαρκεί							
2	0,345	1,204	1,548	>	1	δεν επαρκεί							
3	0,365	0,000	0,365	<	1	επαρκεί							
Διατομή	R <sub>y,N</sub>	R <sub>y,M<sub>y</sub></sub>											
1	0,165	2,107	2,272	>	1	δεν επαρκεί							
2	0,182	1,504	1,687	>	1	δεν επαρκεί							
3	0,205	0,000	0,205	<	1	επαρκεί							

Σχήμα 4-46: Έλεγχος μέλους του υποστυλώματος C2 με τη χρήση του προγράμματος ADINA

Με τον δεύτερο τρόπο, ο έλεγχος του μέλους έγινε ακολουθώντας την διαδικασία του Ευρωκώδικα 3 και τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 4-47.

Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα											
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνσης z-z:						Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνσης γ-γ:					
Διατομή	L <sub>cr,z</sub> (cm)	λ <sub>1</sub>	ι <sub>z</sub>	λ <sub>z</sub>	Καμπ. Λυγ.	α	Φ <sub>z</sub>	χ <sub>z</sub>			
1	775	93,91	4,34	1,903	c	0,49	2,728	0,214			
2	775	93,91	4,62	1,786	c	0,49	2,484	0,238			
3	775	93,91	4,97	1,662	c	0,49	2,238	0,268			
Διατομή	L <sub>cr,y</sub> (cm)	λ <sub>1</sub>	ι <sub>y</sub>	λ <sub>y</sub>	Καμπ. Λυγ.	α	Φ <sub>y</sub>	χ <sub>y</sub>			
1	775	93,91	23,02	0,359	b	0,34	0,591	0,942			
2	775	93,91	18,91	0,436	b	0,34	0,635	0,911			
3	775	93,91	11,47	0,719	b	0,34	0,847	0,773			
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:											
Διατομή	Κατηγορ. Διατ.	L (cm)	C <sub>1</sub>	E	G	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )	M <sub>cr</sub> (kNcm)	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	λ <sub>LT</sub>
1	4	775	1,879	21000	8100	930,27	5,73	698407,33	18048,01	947,76	1,111
2	3	775	1,879	21000	8100	933,54	5,41	374351,33	14028,28	665,34	1,056
3	3	775	1,879	21000	8100	933,46	5,10	149374,60	10275,46	382,92	0,936
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	α <sub>LT</sub>	Φ <sub>LT</sub>	χ <sub>LT</sub>						
1	2,78	d	0,76	1,463	0,414						
2	2,04	d	0,76	1,382	0,440						
3	1,30	c	0,49	1,118	0,578						
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:											
Διατομή	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Ed,y</sub> (kNm)	N <sub>Rk</sub> (kN)	M <sub>y,Rk</sub> (kNm)	k <sub>sy</sub>	k <sub>yy</sub>					
1	143,656	211,0824	1166,54	222,72	0,822	1,028					
2	145,077	105,5412	1027,89	156,36	0,832	1,041					
3	146,318	0	889,24	89,99	0,874	1,092					
Βαθμοί αξιοποίησης:											
R <sub>s,N</sub>	R <sub>s,M<sub>y</sub></sub>										
0,577	1,883	2,459	>	1	δεν επαρκεί						
0,594	1,357	1,951	>	1	δεν επαρκεί						
0,615	0,000	0,615	<	1	επαρκεί						
R <sub>y,N</sub>	R <sub>y,M<sub>y</sub></sub>										
0,131	2,354	2,484	>	1	δεν επαρκεί						
0,155	1,697	1,851	>	1	δεν επαρκεί						
0,213	0,000	0,213	<	1	επαρκεί						

Σχήμα 4-47: Έλεγχος μέλους του υποστυλώματος C2 με βάση τον Ευρωκώδικα 3

Συνολικά για το υποστύλωμα C2, παρατηρούμε ότι, ο έλεγχος διατομής δεν επαρκεί για την διατομή 1 ενώ για τις διατομές 2 και 3 επαρκεί. Ο έλεγχος μέλους δεν επαρκεί για καμία διατομή. Επίσης, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ελέγχου του μέλους είναι σχετικά κοντά και για τους επόμενους ελέγχους, μετά την ενίσχυση του φορέα, ο έλεγχος του μέλους θα γίνεται μόνο με την χρήση των τύπων του Ευρωκώδικα 3.

– Δοκός B1\_B2:

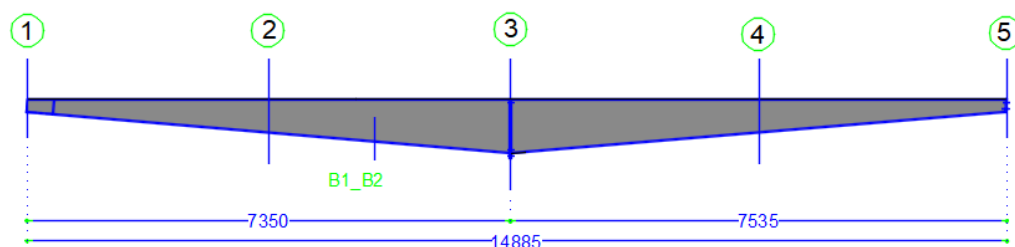
Στο Σχήμα 4-48 δίνονται τα χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο διατομής και μέλους της δοκού B1\_B2, καθώς και η διαδικασία κατάταξης των διατομών σε κατηγορίες προκειμένου να προσδιοριστεί η μέθοδος του ελέγχου. Παρόλο που η διατομή 3 είναι κατηγορίας 4, ο έλεγχός της έγινε ως διατομή κατηγορίας 3, διότι όπως διαπιστώθηκε δεν επαρκεί για έλεγχο μέλους ως κατηγορία 3 και έτσι δεν θα επαρκεί ούτε ως κατηγορία 4. Επομένως, για τις διατομές 1 και 5 έγινε πλαστικός έλεγχος ενώ για τις διατομές 2, 3 και 4 έγινε ελαστικός έλεγχος. Η θέση των διατομών ελέγχου της δοκού δίνονται στο Σχήμα 4-49 και τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν από την στατική ανάλυση δίνονται στο Σχήμα 4-50. Στο Σχήμα 4-51 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου των διατομών 1 και 5 για πλαστικό έλεγχο και στο Σχήμα 4-52 των διατομών 2, 3 και 4 για ελαστικό έλεγχο.

Χαρακτηριστικά διατομών:														
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	20	18,2	15	0,9	0,5	36,1	2715,48	506,44	10	22,5	271,55	67,53	299,26	102,39
2	51,5	49,7	15	0,9	0,5	51,85	35261,438	506,768			952,731	67,569	1115,893	104,356
3	83	81,2	15	0,9	0,5	67,6	67807,4	507,1	41,5	22,5	1633,91	67,61	1932,53	106,33
4	51,75	49,95	15	0,9	0,5	51,975	35337,382	506,77			956,828	67,569	1120,421	104,372
5	20,5	18,7	15	0,9	0,5	36,35	2867,37	506,44	10,25	22,5	279,74	67,53	308,31	102,42

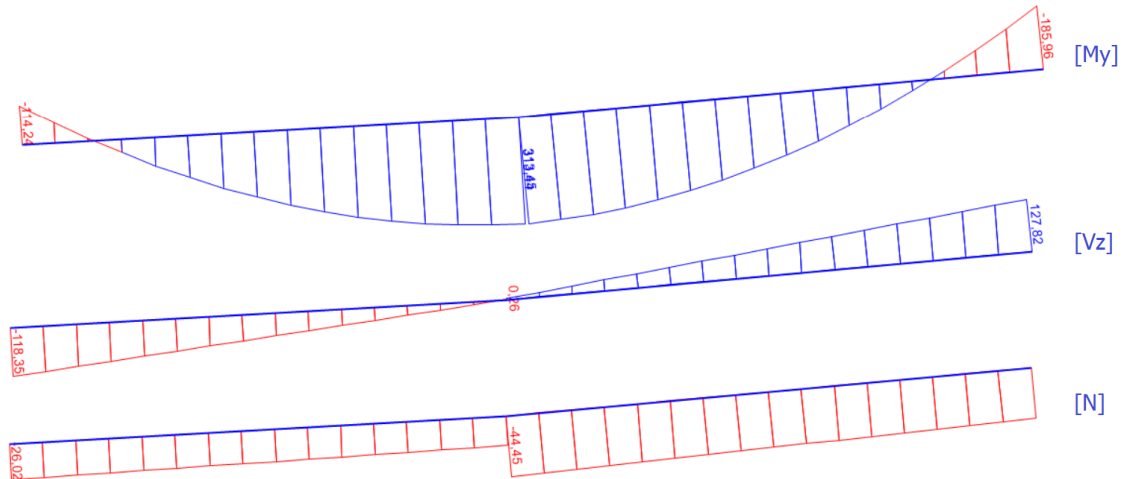
  

Κατηγορία διατομών:										
Διατομή	Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή	
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος
1	18,2	0,5	36,4	2	7,25	0,9	8,06	1	2	Πλαστικός
2	49,7	0,5	99,4	3	7,25	0,9	8,06	1	3	Ελαστικός
3	81,2	0,5	162,4	4	7,25	0,9	8,06	1	4	Ελαστικός
4	49,95	0,5	99,9	3	7,25	0,9	8,06	1	3	Ελαστικός
5	18,7	0,5	37,4	2	7,25	0,9	8,06	1	2	Πλαστικός

Σχήμα 4-48: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των διατομών της δοκού B1\_B2



Σχήμα 4-49: Θέσεις των διατομών ελέγχου της δοκού B1\_B2



Σχήμα 4-50: Εντατικά μεγέθη της δοκού B1\_B2 για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης

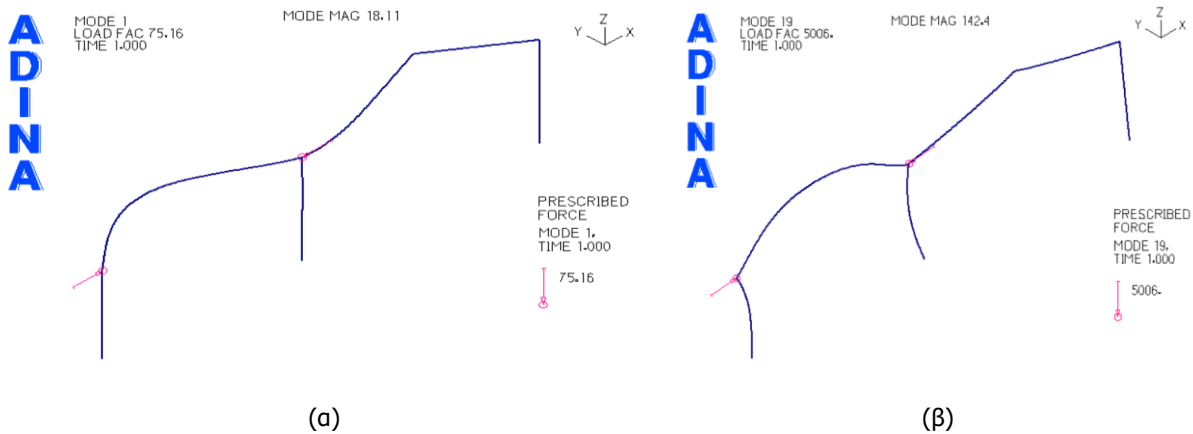
Έλεγχος διατομών 1, 5 - Πλαστικός Έλεγχος:										
Κάμψη και διάτμηση:										
Διατομή	$V_{pl,Rd,z}$ (kN)		$V_{ed,z}$ (kN)		$0,5 \cdot V_{pl,Rd,z}$		$V_{ed,z}$ (kN)	$\rho$	$M_{v,Rd,y}$ (kNm)	
1	135,68	>	119,692	επαρκεί	67,84	<	119,692	απομείωση	0,584	29,24
5	139,07	>	90,457	επαρκεί	69,53	<	90,457	απομείωση	0,091	65,89
Διατομή	$V_{pl,Rd,y}$ (kN)		$V_{ed,y}$ (kN)		$0,5 \cdot V_{pl,Rd,y}$		$V_{ed,y}$ (kN)			
1	305,27	>	0,07	επαρκεί	152,64	>	0,07	δχι απομείωση		
5	305,27	>	0	επαρκεί	152,64	>	0	δχι απομείωση		
Κάμψη και αξονική:										
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	$N_{pl,Rd}$ (kN)		$N_{ed}$ (kN)						
1	36,1	848,35	>	12,638	επαρκεί					
5	36,35	854,225	>	32,986	επαρκεί					
Διατομή	$0,25 \cdot N_{pl,Rd}$		$N_{ed}$ (kN)		$0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}$		$N_{ed}$ (kN)		$h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}$	$N_{ed}$ (kN)
1	212,0875	>	12,638	δχι απομείωση	106,925	>	12,638	δχι απομείωση	213,85	12,638
5	213,55625	>	32,986	δχι απομείωση	109,8625	>	32,986	δχι απομείωση	219,725	32,986
Διατομή	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$M_{pl,Rd,y}$ (kNm)	$M_{pl,Rd,z}$ (kNm)	$\eta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
1	175,75	0,43	29,24	24,06	0,015	2	1	36,15	<	1
5	207,78	0,01	65,89	24,07	0,039	2	1	9,94	<	1

Σχήμα 4-51: Έλεγχος διατομής των διατομών 1 και 5 της δοκού B1\_B2 για πλαστικό έλεγχο

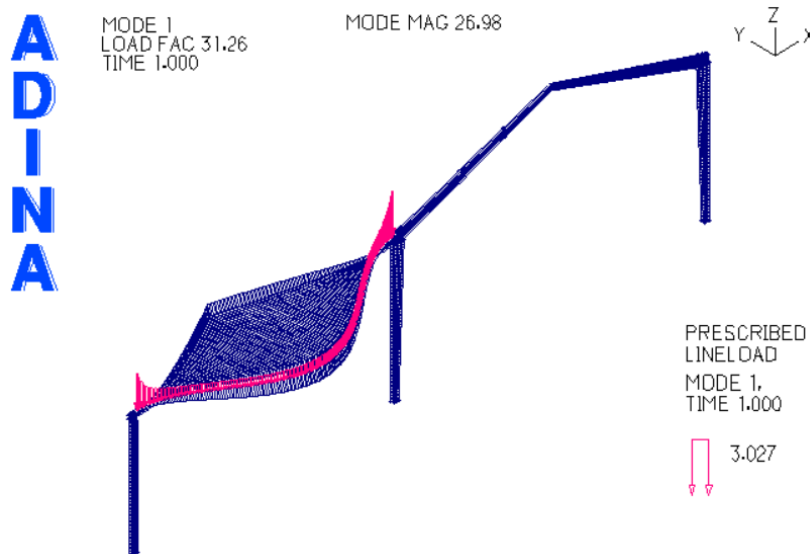
Έλεγχος διατομών 2, 3, 4 - Ελαστικός Έλεγχος:									
Έλεγχος ορθών τάσεων:									
Διατομή	$N_{ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$\sigma_{x,N}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,My}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,Mz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y / \gamma_{M0}$
2	6,94	214,68	0,6017	0,13	22,53	0,89	23,56	>	23,5
3	-21,47	313,44	0,1013	-0,32	19,18	0,15	-19,65	<	23,5
4	-24,96	187,10	0,1566	-0,48	19,55	0,23	-20,27	<	23,5
Έλεγχος Διατμητικών τάσεων:									
Διατομή	$V_{ed,z}$ (kN)	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ed,xz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$				
2	-53,56	24,85	2,155	<	13,57	επαρκεί			
3	0,26	40,60	0,006	<	13,57	επαρκεί			
4	61,20	24,98	2,450	<	13,57	επαρκεί			
Διατομή	$V_{ed,y}$ (kN)	$A_f$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ed,xy}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$				
2	0,03	27	0,002	<	13,57	επαρκεί			
3	-0,02	27	-0,001	<	13,57	επαρκεί			
4	-0,11	27	-0,006	<	13,57	επαρκεί			
Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises:									
Διατομή	$\sigma_{VM}$		$f_y / \gamma_{M0}$						
2	23,85	>	23,5	δεν επαρκεί					
3	19,65	<	23,5	επαρκεί					
4	20,71	<	23,5	επαρκεί					

Σχήμα 4-52: Έλεγχος διατομής των διατομών 2, 3 και 4 της δοκού B1\_B2 για ελαστικό έλεγχο

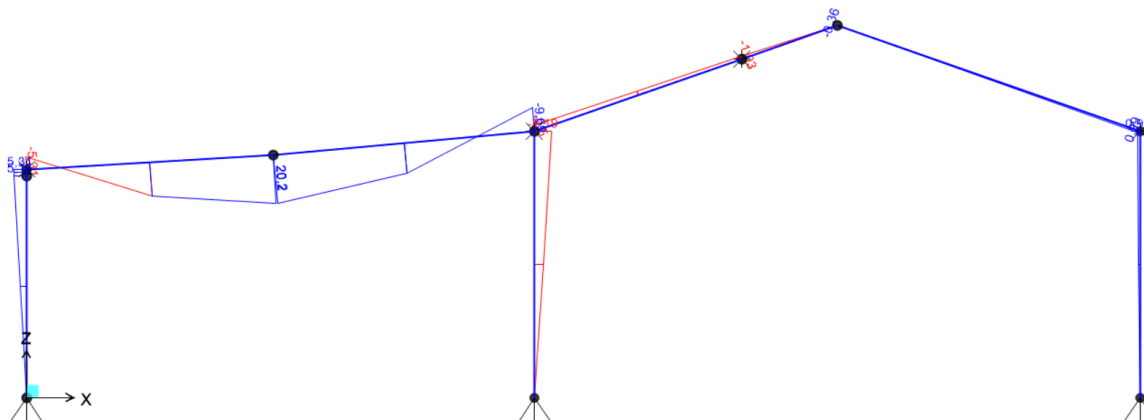
Η δοκός B1\_B2 αποτελείται από μεταβλητή διατομή έτσι ο έλεγχος μέλους έγινε, όπως και προηγουμένως στο υποσύλωμα C2, δηλαδή με τις δύο μεθόδους. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα ADINA (Σχήμα 4-53 και Σχήμα 4-54) και από το SAP 2000 (Σχήμα 4-55) για μοναδιαία κατανεμημένη φόρτιση, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο. Στο Σχήμα 4-56 και στο Σχήμα 4-57 δίνονται τα αποτελέσματα από τους ελέγχους των δύο μεθόδων αντίστοιχα.



Σχήμα 4-53: Ιδιομορφές για λυγισμό (α) εκτός επιπέδου και (β) εντός επιπέδου από την γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με στοιχεία δοκού για τη δοκό B1\_B2



Σχήμα 4-54: Ιδιομορφή πλευρικού λυγισμού από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με επιφανειακά στοιχεία για τη δοκό B1\_B2



Σχήμα 4-55: Διάγραμμα ροπών λόγω της επιβολής μοναδιαίου γραμμικά καταμεμημένου φορτίου στη δοκό B1\_B2

Έλεγχος μέλους - ADINA												
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση z-z:						Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση γ-γ:						
N <sub>cr,z</sub> = 75,16 (1η ιδιομορφή)						N <sub>cr,y</sub> = 5006 (19η ιδιομορφή)						
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	λ <sub>z</sub>	a	Φ <sub>z</sub>	χ <sub>z</sub>	Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	λ <sub>y</sub>	a	Φ <sub>y</sub>	χ <sub>y</sub>	
1	36,1	3,360	0,49	6,918	0,077	1	36,1	0,412	0,34	0,621	0,921	
2	51,85	4,026	0,49	9,543	0,055	2	51,85	0,493	0,34	0,672	0,887	
3	67,6	4,597	0,49	12,145	0,043	3	67,600	0,563	0,34	0,720	0,855	
4	51,975	4,031	0,49	9,564	0,055	4	51,975	0,494	0,34	0,672	0,887	
5	36,35	3,371	0,49	6,960	0,077	5	36,35	0,413	0,34	0,622	0,921	
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:												
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	a	Κατηγ. Διατ.	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	q <sub>cr</sub> (ADINA)	M <sub>d=1</sub> (kNcm)	M <sub>cr</sub> (kNcm)	λ <sub>LT</sub>	Φ <sub>LT</sub>	χ <sub>LT</sub>
1	1,33	c	0,49	2	299,26	102,39	3,027	530,77	1606,64	2,092	3,152	0,181
2	3,43	d	0,76	3	952,731	67,569	3,027	1394,65	4221,61	2,303	3,951	0,140
3	5,53	d	0,76	4	1633,91	67,61	3,027	2019,84	6114,06	2,506	4,516	0,121
4	3,45	d	0,76	3	956,828	67,569	3,027	1254,09	3796,13	2,434	4,310	0,127
5	1,37	c	0,49	2	308,31	102,42	3,027	968,54	2931,77	1,572	2,072	0,292
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:												
Διατομή	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Ed,y</sub> (kNm)	M <sub>Ed,z</sub> (kNm)	N <sub>Rk</sub> (kN)	M <sub>v,Rk</sub> (kNm)	M <sub>z,Rk</sub> (kNm)	k <sub>zy</sub>	k <sub>z</sub>	k <sub>yy</sub>	k <sub>z</sub>		
1		175,75	0,428	848,35	70,33	24,06						
2		214,68	0,602	1218,48	223,89	15,88						
3	21,465	313,44	0,101	1588,60	383,97	15,89	0,804	1,872	1,005	1,872		
4	24,962	187,10	0,157	1221,41	224,85	15,88	0,805	1,901	1,007	1,901		
5		207,78	0,014	854,23	72,45	24,07						
Βαθμοί αξιοποίησης:												
Διατομή	R <sub>z,N</sub>	R <sub>z,M<sub>y</sub></sub>	R <sub>z,M<sub>z</sub></sub>	R <sub>z</sub>								
1		20,677	0,018	20,695	>	1	δεν επαρκεί					
2		7,933	0,038	7,971	>	1	δεν επαρκεί					
3	0,316	5,432	0,012	5,760	>	1	δεν επαρκεί					
4	0,373	5,545	0,019	5,937	>	1	δεν επαρκεί					
5		23,727	0,001	23,727	>	1	δεν επαρκεί					
Διατομή	R <sub>y,N</sub>	R <sub>y,M<sub>y</sub></sub>	R <sub>y,M<sub>z</sub></sub>	R <sub>y</sub>								
1		20,677	0,018	20,695	>	1	δεν επαρκεί					
2		7,933	0,038	7,971	>	1	δεν επαρκεί					
3	0,016	6,790	0,012	6,818	>	1	δεν επαρκεί					
4	0,023	6,931	0,019	6,973	>	1	δεν επαρκεί					
5		23,727	0,001	23,727	>	1	δεν επαρκεί					

Σχήμα 4-56: Έλεγχος μέλους της δοκού B1\_B2 με τη χρήση του προγράμματος ADINA

Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα														
Μεωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση z-z:														
Διατομή	$L_{cr,z}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_z$	$\lambda_z$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_z$	$\chi_z$						
1	1486,87	93,91	3,75	4,227	c	0,49	10,421	0,050						
2	1486,87	93,91	3,13	5,064	c	0,49	14,515	0,036						
3	1486,87	93,91	2,74	5,781	c	0,49	18,575	0,028						
4	1486,87	93,91	3,12	5,070	c	0,49	14,548	0,035						
5	1486,87	93,91	3,73	4,242	c	0,49	10,486	0,050						
Μεωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση y-y:														
Διατομή	$L_{cr,y}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_y$	$\lambda_y$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_y$	$\chi_y$						
1	1486,87	93,91	8,67	1,825	b	0,34	2,443	0,246						
2	1486,87	93,91	26,08	0,607	b	0,34	0,754	0,833						
3	1486,87	93,91	31,67	0,500	b	0,34	0,676	0,884						
4	1486,87	93,91	26,07	0,607	b	0,34	0,754	0,833						
5	1486,87	93,91	8,88	1,783	b	0,34	2,358	0,256						
Μεωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:														
Διατομή	Κατηγ. Διατ.	L (cm)	$C_1$	$C_2$	E	G	$I_z$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$I_w$ (cm <sup>6</sup> )	$z_g$ (cm)	$M_{cr}$ (kNm)	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{LT}$	
1	2	1486,87	1,285	1,562	21000	8100	506,44	8,05	46188,59	10	1568,64	299,26	2,117	
2	3	1486,87	1,285	1,562	21000	8100	506,77	9,36	324377,13	25,75	1334,40	952,73	4,096	
3	4	1486,87	1,285	1,562	21000	8100	507,10	10,67	854515,48	41,5	1402,55	1633,91	5,232	
4	3	1486,87	1,285	1,562	21000	8100	506,77	9,37	327591,65	25,875	1334,20	956,83	4,105	
5	2	1486,87	1,285	1,562	21000	8100	506,44	8,07	48638,50	10,25	1560,08	308,31	2,155	
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$									
1	1,3	c	0,49	3,211	0,178									
2	3,4	d	0,76	10,370	0,050									
3	5,5	d	0,76	16,100	0,032									
4	3,5	d	0,76	10,411	0,050									
5	1,4	c	0,49	3,301	0,172									
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:														
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$M_{z,Rk}$ (kNm)	$k_{zy}$	$k_{zz}$	$k_{yy}$	$k_{yz}$				
1		175,75	0,428	848,35	70,33	24,06								
2		214,6814	0,602	1218,48	223,89	15,88								
3	21,465	313,4403	0,101	1588,60	383,97	15,89	0,804	2,698	1,005	2,698				
4	24,962	187,0995	0,157	1221,41	224,85	15,88	0,807	2,752	1,009	2,752				
5		207,78	0,014	854,23	72,45	24,07								
Βαθμοί αξιοποίησης:														
Διατομή	$R_{z,N}$	$R_{z,M_y}$	$R_{z,M_z}$	$R_z$										
1		14,060	0,018	14,078	>	1								δεν επαρκεί
2		5,394	0,038	5,432	>	1								δεν επαρκεί
3	0,490	4,592	0,017	5,099	>	1								δεν επαρκεί
4	0,576	4,681	0,027	5,284	>	1								δεν επαρκεί
5		16,134	0,001	16,134	>	1								δεν επαρκεί
Διατομή	$R_{y,N}$	$R_{y,M_y}$	$R_{y,M_z}$	$R_y$										
1		14,060	0,018	14,078	>	1								δεν επαρκεί
2		5,394	0,038	5,432	>	1								δεν επαρκεί
3	0,015	4,614	0,017	4,646	>	1								δεν επαρκεί
4	0,025	4,723	0,027	4,774	>	1								δεν επαρκεί
5		16,134	0,001	16,134	>	1								δεν επαρκεί

Σχήμα 4-57: Έλεγχος μέλους της δοκού B1\_B2 με βάση τον Ευρωκώδικα 3

Παρατηρούμε ότι, ο έλεγχος μέλους για την δοκό B1\_B2 δεν ικανοποιείται και έχει μεγάλο βαθμό αξιοποίησης. Συγκεκριμένα, με την πρώτη μέθοδο (ADINA) ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε  $R=23,727>1$  ενώ με την δεύτερη μέθοδο (Ευρωκώδικας) προέκυψε  $R=16,134>1$ . Το γεγονός αυτό είναι εν μέρει λογικό καθώς η δοκός έχει μήκος 14,825m και στους υπολογισμούς δεν λήφθηκε υπόψη καμία πλευρική εξασφάλιση. Επομένως, ο μεγάλος βαθμός αξιοποίησης μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πιθανόν οι τεγίδες να προσφέρουν κάποια πλευρική εξασφάλιση και έτσι πραγματοποιήθηκε ξανά ο έλεγχος μέλους λαμβάνοντας ως ισοδύναμο μήκος λυγισμού την απόσταση μεταξύ των τεγίδων, δηλαδή  $L_{cr}=1,30m$ . Τα αποτελέσματα του ελέγχου δίνονται στο Σχήμα 4-58 όπου ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε κατά πολύ μικρότερος,  $R=3,507>1$ . Ωστόσο, σίγουρα δεν μπορούμε να

δεχθούμε σαν λύση πλευρικής εξασφάλισης την συνεισφορά των τεγίδων και έτσι αργότερα. Τέλος, η διαφορά που υπάρχει μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης μεθόδου μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι συνωριακές συνθήκες στο πρόγραμμα ADINA, που προσφέρουν πλευρική εξασφάλιση, είναι ελλειπείς σε σχέση με την πραγματικότητα και γι αυτό το λόγο δίνει δυσμενέστερα αποτελέσματα.

Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα													
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση z-z:													
Διατομή	$L_{cr,z}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_z$	$\lambda_z$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_z$	$\chi_z$					
1	130,00	93,91	3,75	0,370	c	0,49	0,610	0,913					
2	130,00	93,91	3,13	0,443	c	0,49	0,658	0,874					
3	130,00	93,91	2,74	0,505	c	0,49	0,703	0,840					
4	130,00	93,91	3,12	0,443	c	0,49	0,658	0,874					
5	130,00	93,91	3,73	0,371	c	0,49	0,611	0,913					
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση y-y:													
Διατομή	$L_{cr,y}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_y$	$\lambda_y$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_y$	$\chi_y$					
1	1482,50	93,91	8,67	1,820	b	0,34	2,432	0,247					
2	1482,50	93,91	26,08	0,605	b	0,34	0,752	0,834					
3	1482,50	93,91	31,67	0,498	b	0,34	0,675	0,885					
4	1482,50	93,91	26,07	0,605	b	0,34	0,752	0,834					
5	1482,50	93,91	8,88	1,777	b	0,34	2,348	0,258					
Μειωτικοί συντελεστές λόγω κάμψης:													
Διατομή	Κατηγορ. Διατ.	L (cm)	$C_1$	$C_2$	E	G	$I_z$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$I_w$ (cm <sup>6</sup> )	$z_0$ (cm)	$M_{cr}$ (kNcm)	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{LT}$
1	2	130,00	1,285	1,562	21000	8100	506,44	8,05	46188,59	10	23724,29	299,26	0,544
2	3	130,00	1,285	1,562	21000	8100	506,77	9,36	324377,13	25,75	59287,25	952,73	0,615
3	4	130,00	1,285	1,562	21000	8100	507,10	10,67	854515,48	41,5	95859,26	1633,91	0,633
4	3	130,00	1,285	1,562	21000	8100	506,77	9,37	327591,65	25,875	59575,78	956,83	0,614
5	2	130,00	1,285	1,562	21000	8100	506,44	8,07	48638,50	10,25	24257,95	308,31	0,547
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$								
1	1,3	c	0,49	0,733	0,818								
2	3,4	d	0,76	0,846	0,700								
3	5,5	d	0,76	0,865	0,688								
4	3,5	d	0,76	0,846	0,700								
5	1,4	c	0,49	0,734	0,817								
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:													
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$M_{z,Rk}$ (kNm)	$k_{zy}$	$k_{zz}$	$k_{yy}$	$k_{yz}$			
1		175,75	0,428	848,35	70,33	24,06							
2		214,6814	0,602	1218,48	223,89	15,88							
3	21,465	313,4403	0,101	1588,60	383,97	15,89	0,804	1,005	1,005	1,005			
4	24,962	187,0995	0,157	1221,41	224,85	15,88	0,807	1,006	1,009	1,006			
5		207,78	0,014	854,23	72,45	24,07							
Βαθμοί αξιοποίησης:													
Διατομή	$R_{z,N}$	$R_{z,M_y}$	$R_{z,M_z}$	$R_z$									
1		3,056	0,018	3,074	>	1	δεν επαρκεί						
2		1,172	0,038	1,210	>	1	δεν επαρκεί						
3	0,016	0,998	0,006	1,021	>	1	δεν επαρκεί						
4	0,023	1,017	0,010	1,051	>	1	δεν επαρκεί						
5		3,507	0,001	3,507	>	1	δεν επαρκεί						
Διατομή	$R_{y,N}$	$R_{y,M_y}$	$R_{y,M_z}$	$R_y$									
1		3,056	0,018	3,074	>	1	δεν επαρκεί						
2		1,172	0,038	1,210	>	1	δεν επαρκεί						
3	0,015	1,003	0,006	1,024	>	1	δεν επαρκεί						
4	0,024	1,026	0,010	1,061	>	1	δεν επαρκεί						
5		3,507	0,001	3,507	>	1	δεν επαρκεί						

Σχήμα 4-58: Έλεγχος μέλους της δοκού B1\_B2 με βάση τον Ευρωκώδικα 3, λαμβάνοντας τις τεγίδες ως πλευρική εξασφάλιση

Συνολικά για την δοκό B1\_B2, παρατηρούμε ότι κατά τον έλεγχο διατομής οι ακραίες διατομές δεν επαρκούν ενώ οι ενδιάμεσες επαρκούν. Ωστόσο, ο έλεγχος μέλους είναι δυσμενέστερος για όλα τα σημεία της δοκού και συγκεκριμένα στις ακραίες διατομές, οι οποίες είναι μικρότερες. Τέλος, για τους

επόμενους ελέγχους, μετά την ενίσχυση του φορέα, ο έλεγχος του μέλους θα γίνεται μόνο με την χρήση των τύπων του Ευρωκώδικα 3.

– Δοκός Β3:

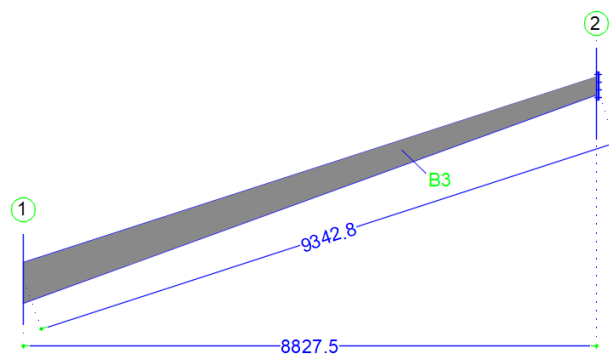
Στο Σχήμα 4-59 δίνονται τα χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο διατομής και μέλους της δοκού Β3, καθώς και η διαδικασία κατάταξης των διατομών σε κατηγορίες προκειμένου να προσδιοριστεί η μέθοδος του ελέγχου. Παρόλο που η διατομή 1 είναι κατηγορίας 4, ο έλεγχός της έγινε ως διατομή κατηγορίας 3, διότι όπως διαπιστώθηκε δεν επαρκεί ως κατηγορία 3 και έτσι δεν θα επαρκεί ούτε ως κατηγορία 4. Η θέση των διατομών ελέγχου της δοκού δίνονται στο Σχήμα 4-60 και τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν από την στατική ανάλυση δίνονται στο Σχήμα 4-61. Στο Σχήμα 4-62 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου των διατομών.

Χαρακτηριστικά διατομών:															
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f,top</sub>	t <sub>f,bottom</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>y,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	55	53,5	15	0,7	0,8	0,4	43,9	21623,43	422,16	22	18,75	761,67	56,29	895,17	86,52
2	26,5	25	15	0,7	0,8	0,4	32,5	4240,45	422,01	10,6	18,75	307,02	56,27	350,82	85,38

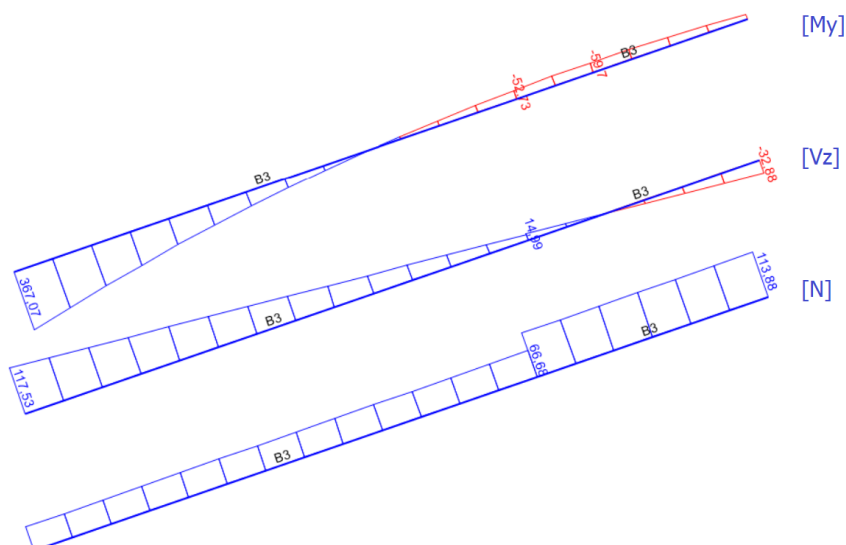
  

Κατηγορία διατομών:															
Διατομή	Κορμός:				Άνω Πέλμα:				Κάτω Πέλμα:				Διατομή		
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος	
1	53,5	0,4	133,75	4	7,3	0,7	10,43	1	7,3	0,8	9,13	1	4	Ελαστικός	
2	25	0,4	62,5	3	7,3	0,7	10,43	1	7,3	0,8	9,13	1	3	Ελαστικός	

Σχήμα 4-59: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των διατομών της δοκού Β3



Σχήμα 4-60 Θέσεις των διατομών ελέγχου της δοκού Β3



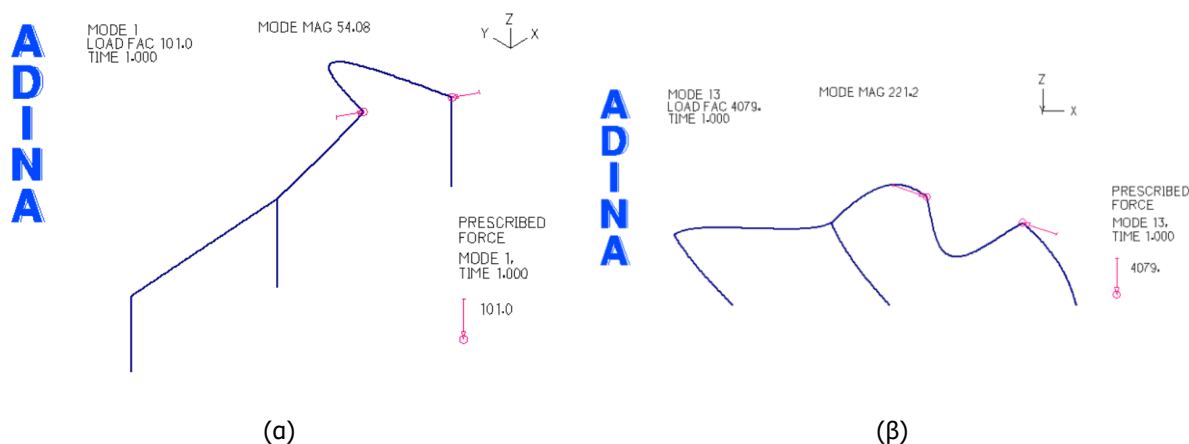


Σχήμα 4-61: Εντατικά μεγέθη της δοκού B3 για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης

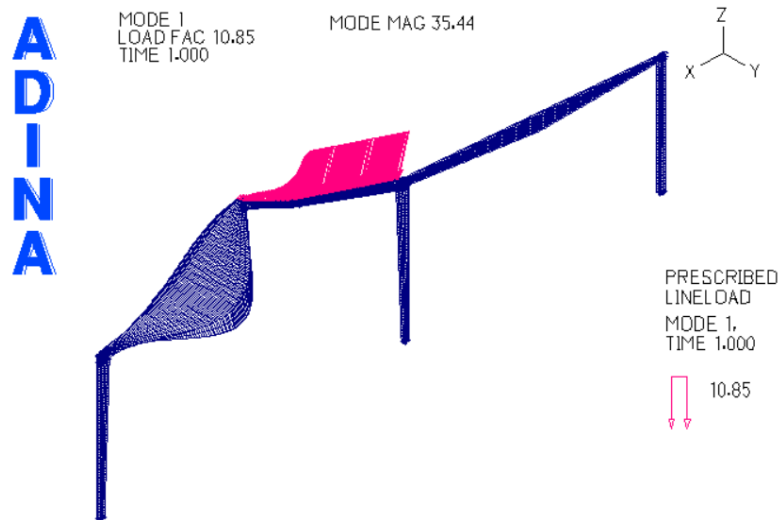
Έλεγχος διατομών - Ελαστικός Έλεγχος:								
Έλεγχος ορθών τάσεων:								
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$\sigma_{x,N}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,M_y}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/\gamma_{M0}$	
1	60,78	367,07	1,38	48,19	49,58	>	23,5	δεν επαρκεί
2	21,91	63,82	0,67	20,79	21,46	<	23,5	επαρκεί
Έλεγχος Διατμητικών τάσεων:								
Διατομή	$V_{ed,z}$ (kN)	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ed,xz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/(\sqrt{3}\gamma_{M0})$			
1	117,53	21,40	5,492	<	13,57		επαρκεί	
2	-10,14	10,00	10,000	<	13,57		επαρκεί	
Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises:								
Διατομή	$\sigma_{VM}$		$f_y/\gamma_{M0}$					
1	50,48	>	23,5				δεν επαρκεί	
2	27,58	>	23,5				δεν επαρκεί	

Σχήμα 4-62: Έλεγχος διατομής των διατομών της δοκού B3

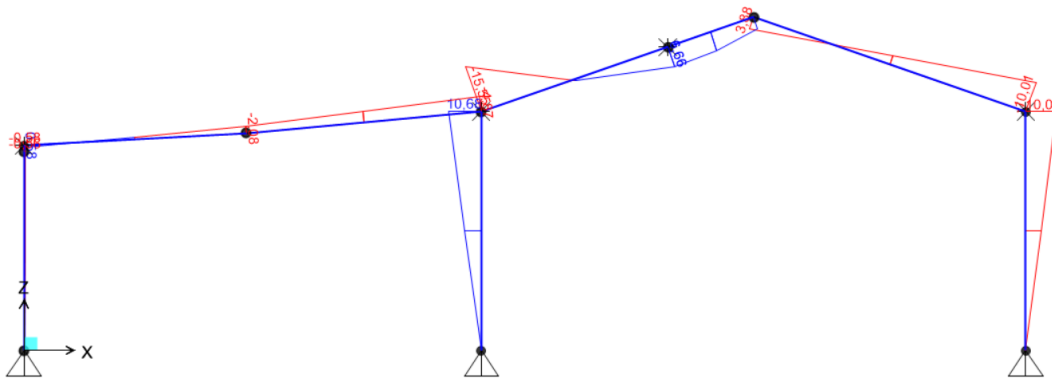
Η δοκός B3 αποτελείται από μεταβλητή διατομή έτσι ο έλεγχος μέλους έγινε, όπως και προηγουμένως στο υποστύλωμα C2, δηλαδή με δύο τρόπους. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα ADINA (Σχήμα 4-63 και Σχήμα 4-64) και το SAP 2000 (Σχήμα 4-65), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο. Στο Σχήμα 4-66 και στο Σχήμα 4-67 δίνονται τα αποτελέσματα από τους ελέγχους των δύο μεθόδων αντίστοιχα.



Σχήμα 4-63: Ιδιομορφές για λυγισμό (α) εκτός επιπέδου και (β) εντός επιπέδου από την γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με στοιχεία δοκού για τη δοκό B3



Σχήμα 4-64: Ιδιομορφή πλευρικού λυγισμού από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) με επιφανειακά στοιχεία για τη δοκό B3



Σχήμα 4-65: Διάγραμμα ροπών λόγω της επιβολής μοναδιαίου γραμμικά κατανομημένου φορτίου στη δοκό B3

Έλεγχος μέλους - ADINA						Μικρωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση z-z:					
Μικρωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση z-z:						Μικρωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση y-y:					
$N_{cr,z} = 101$ (1η ιδιομορφή)						$N_{cr,y} = 4079$ (19η ιδιομορφή)					
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	$\lambda_z$	a	$\Phi_z$	$\chi_z$	Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	$\lambda_y$	a	$\Phi_y$	$\chi_y$
1	43,9	3,196	0,49	6,341	0,085	1	43,9	0,503	0,34	0,678	0,883
2	32,5	2,750	0,49	4,906	0,112	2	32,5	0,433	0,34	0,633	0,913
Μικρωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:											
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	a	Κατηγ. Διατ.	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	$q_{cr}$ (ADINA)	$M_{q=1}$ (kNcm)	$M_{cr}$ (kNcm)	$\lambda_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$
1	3,67	d	0,76	4	761,67	10,85	442,15	4797,3275	1,932	3,024	0,187
2	1,77	c	0,49	3	307,02	10,85	181,32	1967,322	1,915	2,754	0,211
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:											
Διατομή	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	R								
1	367,07	178,99	10,971	>	1	δεν επαρκεί					
2	63,82	72,15	4,732	>	1	δεν επαρκεί					

Σχήμα 4-66: Έλεγχος μέλους της δοκού B3 με την χρήση του προγράμματος ADINA

<b>Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα</b>											
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:											
Διατομή	Κατηγορ. Διατ.	L (cm)	C <sub>1</sub>	E	G	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )	M <sub>cr</sub> (kNcm)	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	λ <sub>LT</sub>
1	4	934,282	1,285	21000	8100	422,16	5,42	310610,82	4412,39	761,67	2,014
2	3	934,282	1,285	21000	8100	422,01	4,81	69954,75	3031,93	307,02	1,543
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	α <sub>LT</sub>	Φ <sub>LT</sub>	χ <sub>LT</sub>						
1	3,67	d	0,76	3,218	0,175						
2	1,77	c	0,49	2,019	0,301						
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:											
Διατομή	M <sub>Ed,y</sub> (kNm)	M <sub>y,Rk</sub> (kNm)	R								
1	367,07	178,99	11,745	>	1	δεν επαρκεί					
2	63,82	72,15	5,066	>	1	δεν επαρκεί					

Σχήμα 4-67: Έλεγχος μέλους της δοκού B3 με βάση τον Ευρωκώδικα 3

Παρατηρούμε ότι, ο έλεγχος μέλους για την δοκό B3 δεν ικανοποιείται και έχει μεγάλο βαθμό αξιοποίησης. Συγκεκριμένα, με την πρώτη μέθοδο (ADINA) ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε  $R=10,971 > 1$  ενώ με την δεύτερη μέθοδο (Ευρωκώδικας) προέκυψε  $R=11,745 > 1$ . Το γεγονός αυτό είναι εν μέρει λογικό καθώς η δοκός έχει μήκος 9,343m και στους υπολογισμούς δεν λήφθηκε υπόψη καμία πλευρική εξασφάλιση. Στην συγκεκριμένη δοκό όμως υπάρχουν συστήματα άντωσης, τα οποία προσφέρουν πλευρική εξασφάλιση μειώνοντας το ισοδύναμο μήκος λυγισμού. Έτσι, επαναλήφθηκε η διαδικασία ελέγχου του μέλους με ισοδύναμο μήκος  $L_{cr}=1,30m$ . Τα αποτελέσματα του ελέγχου δίνονται στο Σχήμα 4-68 όπου ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε κατά πολύ μικρότερος,  $R=2,246 > 1$ .

<b>Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα</b>											
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:											
Διατομή	Κατηγορ. Διατ.	L (cm)	C <sub>1</sub>	E	G	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )	M <sub>cr</sub> (kNcm)	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	λ <sub>LT</sub>
1	4	130	1,285	21000	8100	422,16	5,42	310610,82	181496,77	761,67	0,314
2	3	130	1,285	21000	8100	422,01	4,81	69954,75	87547,98	307,02	0,287
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	α <sub>LT</sub>	Φ <sub>LT</sub>	χ <sub>LT</sub>						
1	3,67	d	0,76	0,593	0,913						
2	1,77	c	0,49	0,563	0,956						
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:											
Διατομή	M <sub>Ed,y</sub> (kNm)	M <sub>y,Rk</sub> (kNm)	R								
1	367,07	178,99	2,246	>	1	δεν επαρκεί					
2	63,82	72,15	0,969	<	1	επαρκεί					

Σχήμα 4-68: Έλεγχος μέλους της δοκού B3 με βάση τον Ευρωκώδικα 3, λαμβάνοντας υπόψη τα συστήματα άντωσης

Συνολικά για την δοκό B3, παρατηρούμε ότι, οι έλεγχοι διατομής και μέλους δεν επαρκούν για καμία διατομή. Επίσης, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ελέγχου του μέλους είναι σχετικά κοντά και έτσι για τους επόμενους ελέγχους μετά την ενίσχυση του φορέα, ο έλεγχος του μέλους θα γίνεται μόνο με την χρήση των τύπων του Ευρωκώδικα 3.

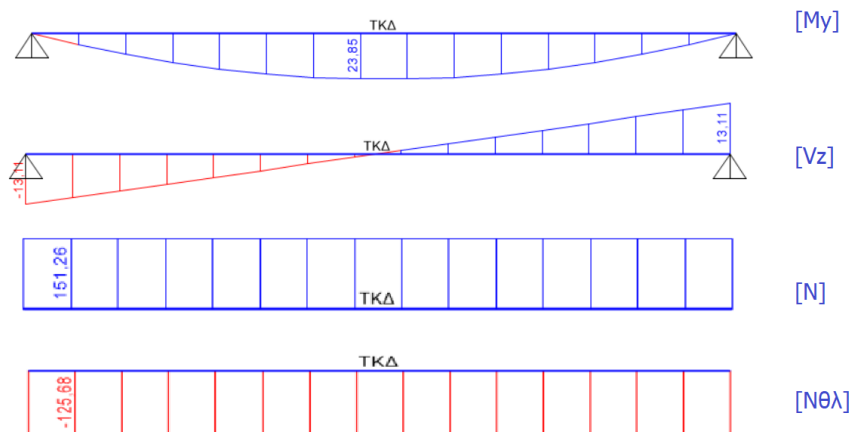
#### – Κεφαλοδοκός:

Η κεφαλοδοκός ελέγχθηκε ξεχωριστά ως αμφιέριστη, εφαρμόζοντας εκ νέου τα φορτία με επιφάνεια επιρροής 1,30m. Οι αξονικές δυνάμεις λήφθηκαν από τον καθολικό φορέα. Στο Σχήμα 4-69 δίνονται τα χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο διατομής και μέλους της κεφαλοδοκού, καθώς και η διαδικασία κατάταξης της διατομής σε κατηγορία προκειμένου να

προσδιοριστεί η μέθοδος του ελέγχου. Η διατομή είναι κατηγορίας 1 και πραγματοποιήθηκε πλαστικός έλεγχος. Τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού που προέκυψαν από την στατική ανάλυση δίνονται στο Σχήμα 4-70. Στο Σχήμα 4-71 παρουσιάζεται ο έλεγχος διατομής και στο Σχήμα 4-72 ο έλεγχος μέλους.

Χαρακτηριστικά διατομής:								
h	h <sub>w</sub>	b	t	A	I	A <sub>v</sub>	W <sub>el</sub>	W <sub>pl</sub>
cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
10	9,2	10	0,4	15,36	236,34	8,00	47,27	55,33
Κατηγορία διατομής:								
Διατομή								
c	t	c/t	Κατηγορία	Έλεγχος				
9,2	0,4	23	1	Πλαστικός				

Σχήμα 4-69: Χαρακτηριστικά της διατομής της κεφαλοδοκού



Σχήμα 4-70: Εντατικά μεγέθη της δοκού B3 για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης

Έλεγχος διατομής - Πλαστικός Έλεγχος:							
Κάμψη και διάτμηση:							
V <sub>pl,Rd</sub> (kN)		V <sub>Ed</sub> (kN)		0,5*V <sub>pl,Rd</sub>		V <sub>Ed</sub> (kN)	
108,54	>	13,11	επαρκεί	54,27	>	13,11	όχι απομείωση
Κάμψη και αξονική:							
A (cm <sup>2</sup> )	N <sub>pl,Rd</sub> (kN)		N <sub>Ed</sub> (kN)				
15,36	360,96	>	151,264	επαρκεί			
0,25*N <sub>pl,Rd</sub>		N <sub>Ed</sub> (kN)		2*0,5*h <sub>w</sub> *t <sub>w</sub> *f <sub>y</sub> /γ <sub>M0</sub>		N <sub>Ed</sub> (kN)	
90,24	<	151,264	απομείωση	86,48	<	151,264	απομείωση
n	a	M <sub>pl,Rd</sub> (kNm)	M <sub>N,Rd</sub> (kNm)			M <sub>Ed</sub> (kNm)	
0,42	0,48	13,00	9,93	<		23,85	δεν επαρκεί

Σχήμα 4-71: Έλεγχος διατομής της κεφαλοδοκού

Έλεγχος μέλους							
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής:							
$L_{cr}$ (cm)	$\lambda_1$	$i$	$\lambda$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi$	$\chi$
731,00	93,91	3,92	1,984	a	0,21	2,656	0,226
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:							
$\chi_{LT}$							
1,000	(κοίλη ορθογωνική διατομή)						
Έλεγχος:							
$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	R			
125,68	23,85	360,96	13,00	3,374	>	1	δεν επαρκεί

Σχήμα 4-72: Έλεγχος μέλους της κεφαλοδοκού

Πατηρούμε ότι η κεφαλοδοκός δεν επαρκεί σε έλεγχο διατομής αλλά ούτε και σε έλεγχο μέλους με βαθμό αξιοποίησης  $R=3,374 > 1$ .

#### 4.3.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Εκτός από τους ελέγχους στην οριακή κατάσταση αστοχίας, βασικοί είναι και οι έλεγχοι στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, οι οποίοι ασχολούνται με την επιβεβαίωση, ότι οι μετατοπίσεις της κατασκευής δεν είναι υπερβολικές κάτω από κανονικές συνθήκες χρήσης. Τόσο οι μετατοπίσεις, όσο και οι ταλαντώσεις σχετίζονται περισσότερο με τη δυσκαμψία παρά με την αντοχή του φορέα. Επειδή οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας αναφέρονται στη συμπεριφορά του φορέα υπό συνθήκες λειτουργίας, ο έλεγχος γίνεται με τους αντίστοιχους συνδυασμούς φορτίων.

Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει προσδιορισμό βελών και σύγκρισή τους με τα επιτρεπόμενα όρια, τα οποία εξαρτώνται από το είδος των φερόντων και μη φερόντων στοιχείων. Το συνολικό βέλος  $\delta_{max}$  αποτελείται από επιμέρους συνιστώσες, ως εξής:

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0 \quad (4-69)$$

Όπου,

$\delta_1$  είναι το βέλος λόγω μόνιμων δράσεων

$\delta_2$  είναι το βέλος των μεταβλητών δράσεων

$\delta_0$  είναι το αρχικό αντιβέλος (αν υπάρχει) της δοκού στην αφόρτιστη κατάσταση

Οι οριακές τιμές των κατακόρυφων βελών κάμψης ορίζονται στον Πίνακα 4-25 όπου L το είναι το άνοιγμα της δοκού.

Πίνακας 4-25: Οριακές τιμές κατακόρυφων παραμορφώσεων (EN1993-1-1)

Φορέας	Όρια	
	$\delta_{max}$	$\delta_2$
Μη βατές στέγες	L/200	L/250
Πατώματα και βατές στέγες	L/250	L/300

Οι οριακές τιμές των οριζόντιων βελών κάμψης στην κορυφή των υποστυλωμάτων είναι:

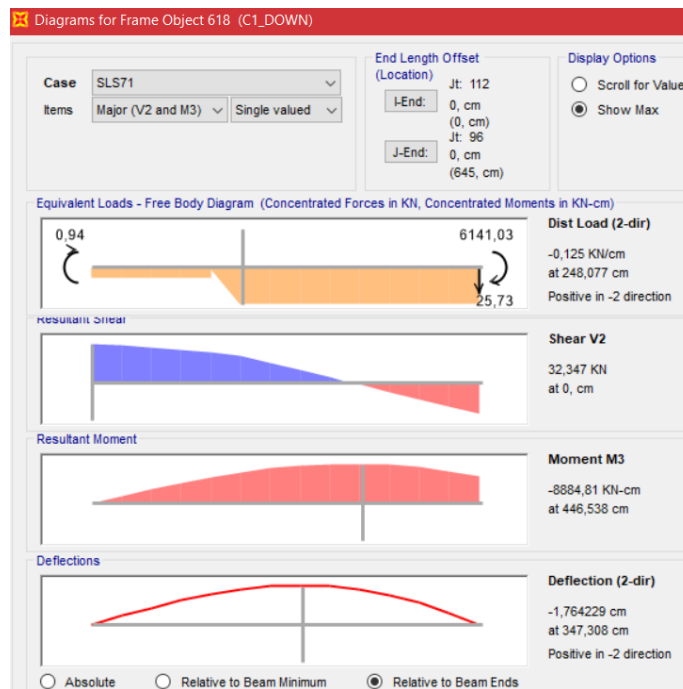
- Βιομηχανικά πλαίσια χωρίς γερανογέφυρες:  $h/150$
- Άλλα μονώροφα κτίρια:  $h/300$
- Πολυώροφα κτίρια:  $h/300$  ανά όροφο

#### 4.3.2.1 Υπολογισμοί

Παρακάτω γίνεται ο έλεγχος των βελών κάμψης για τα δομικά στοιχεία. Για τα κατακόρυφα βέλη κάμψης η οριακή τιμή λαμβάνεται ως  $L/200$ , δηλαδή για μη βατή στέγη, ενώ για τα οριζόντια βέλη ως λαμβάνεται  $h/150$ , δηλαδή για βιομηχανικά πλαίσια χωρίς γερανογέφυρες. Τα βέλη που προκύπτουν σε κάθε μέλος λαμβάνονται από το πρόγραμμα SAP 2000.

- Υποσύλωμα C1:

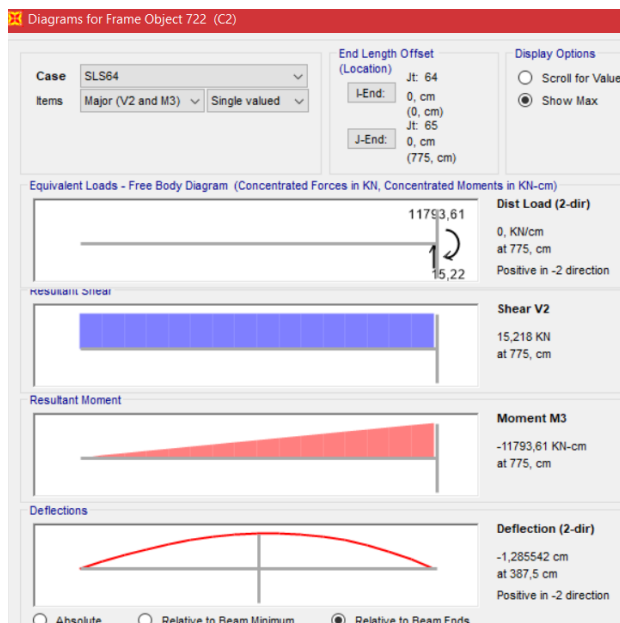
Το ύψος του υποστυλώματος C1 είναι  $h=6,64\text{m}$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{\max}=h/150=664/150=4,42\text{cm}$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 4-73. Επομένως, ισχύει:  $w=1,764\text{cm} < \delta_{\max}=4,42\text{cm}$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 4-73: Οριζόντια παραμόρφωση του υποστυλώματος C1

- Υποσύλωμα C2:

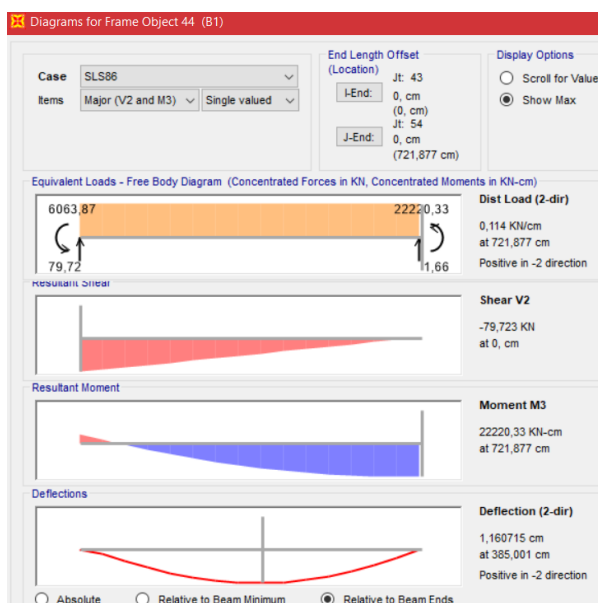
Το ύψος του υποστυλώματος C2 είναι  $h=7,75\text{m}$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{\max}=h/150=775/150=5,167\text{cm}$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 4-74. Επομένως, ισχύει:  $w=1,286\text{cm} < \delta_{\max}=5,167\text{cm}$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 4-74: Οριζόντια παραμόρφωση του υποστυλώματος C2

– Δοκός B1 B2:

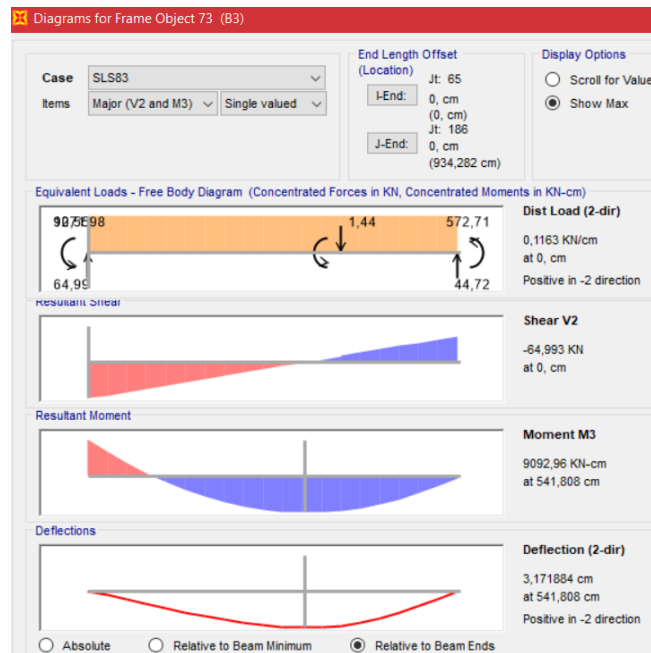
Το μήκος της δοκού είναι  $L=14,825m$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{max}=L/200=1482,5/200=7,41cm$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 4-75. Επομένως, ισχύει:  $w=1,286cm < \delta_{max}=7,41cm$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 4-75: Κατακόρυφη παραμόρφωση της δοκού B1\_B2

– Δοκός B3:

Το μήκος της δοκού είναι  $L=9,343m$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{max}=L/200=943/200=4,72cm$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 4-76. Επομένως, ισχύει:  $w=3,172cm < \delta_{max}=4,72cm$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 4-76: Κατακόρυφη παραμόρφωση της δοκού B3

#### 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο έλεγχος του υφιστάμενου φορέα στην οριακή κατάσταση αστοχίας μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κατασκευή έχει πολλά προβλήματα ως προς την στατικότητα της. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που οδήγησαν στην μη ικανοποίηση των ελέγχων από όλα τα δομικά στοιχεία. Αρχικά, στην προσομοίωση ο φορέας δέχεται φορτία τα οποία αναφέρονται σε δυσμενείς συνθήκες, οι οποίες έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιθανό η κατασκευή να μην έχει δεχτεί στην πραγματικότητα τα φορτία με τα οποία έγιναν οι έλεγχοι και έτσι να μην έχει οδηγηθεί σε αστοχίες. Επιπλέον, την περίοδο που κατασκευάστηκε το κτίριο δεν υπήρχε μεγάλη εμπειρία σχετικά με τις μεταλλικές κατασκευές και έτσι το κτίριο εμφανίζει αρκετά κατασκευαστικά λάθη. Επίσης, οι κανονισμοί συνεχώς βελτιώνονται, επομένως είναι φυσικό επακόλουθο μια κατασκευή του 1960 να μην ικανοποιεί τους νέους περιορισμούς.

Προκειμένου να αλλάξει η χρήση του κτιρίου και να έχει ενεργή δραστηριότητα, είναι απαραίτητο να γίνουν στοχευμένες ενισχύσεις, έτσι ώστε όλα τα δομικά στοιχεία να επαρκούν έναντι των περιορισμών. Με αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθούν οι πιθανές αστοχίες στο μέλλον.



# 5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

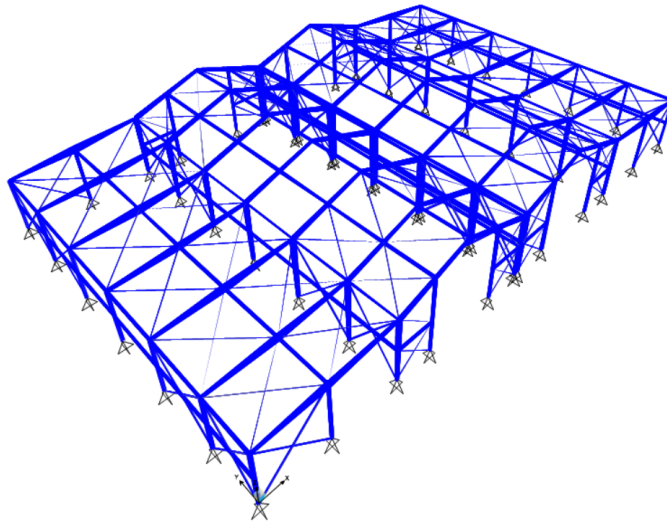
## 5.1 ΑΝΑΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Όπως διαπιστώθηκε στο κεφάλαιο 4, η κατασκευή για να χρησιμοποιηθεί εκ νέου και να είναι ασφαλής, είναι απαραίτητο να ενισχυθεί, καθώς προέκυψε ότι έχει πολλά προβλήματα στην στατικότητα της. Σημαντικότερη ίσως είναι, σε πρώτη φάση, η αναδιάταξη του φορέα με στόχο την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων και στη συνέχεια η ενίσχυση των διατομών για πλήρη ικανοποίηση των ελέγχων.

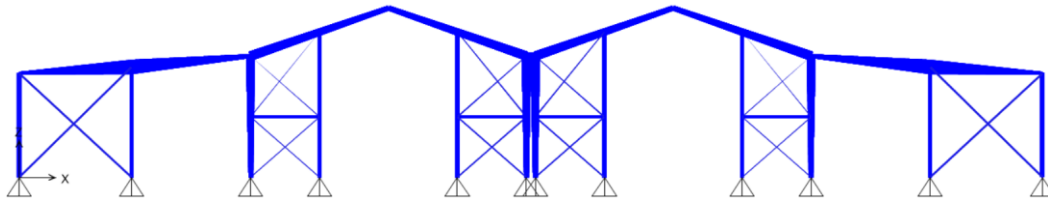
Αρχικά, πρόκειται να αφαιρεθούν από την κατασκευή μερικά από τα δομικά στοιχεία, τα οποία είναι παλιά και η λειτουργία τους δεν προσφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τα δομικά στοιχεία που θα αφαιρεθούν θα αντικατασταθούν από νέες διατομές. Επίσης, θα προστεθούν νέα δομικά στοιχεία, όπου είναι απαραίτητο, με σκοπό να βελτιωθεί η ευστάθεια του φορέα. Μετά την νέα αναδιάταξη που θα προκύψει, οι παλιές διατομές θα ενισχυθούν με ελάσματα, όπου κριθεί απαραίτητο, προκειμένου να ικανοποιούν τους ελέγχους.

Ένα από τα δομικά στοιχεία που θα αφαιρεθούν είναι οι τεγίδες, λόγω του ότι η επικάλυψη στη στέγη έχει φθαρεί και έτσι οι τεγίδες έχουν σχεδόν άμεση επαφή με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να έχουν υποστεί ζημιές. Οι νέες τεγίδες θα είναι διατομής ΙΡΕ. Επίσης, θα αντικατασταθούν οι υπάρχουσες κεφαλοδοκοί και θα προστεθούν νέες στα σημεία όπου δεν υπήρχαν και είναι απαραίτητες. Οι νέες κεφαλοδοκοί θα είναι διατομής ΗΕΑ. Θα προστεθούν, ακόμα, όπου χρειάζεται, δοκοί κοίλης κυκλικής διατομής που θα συνδέουν τα μέσα τον υποστυλωμάτων και θα προσφέρουν πλευρική εξασφάλιση σε αυτά, μειώνοντας έτσι το ισοδύναμο μήκος λυγισμού στο μισό. Επιπροσθέτως, όλοι οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας, κατακόρυφοι και οριζόντιοι, θα αντικατασταθούν από κοίλες κυκλικές διατομές, διότι οι προηγούμενες ήταν λεπτές ράβδοι, οι οποίες είχαν μεγάλη λυγηρότητα και δεν παρείχαν επαρκή πλευρική στήριξη στα υποστυλώματα και ευστάθεια στον φορέα.

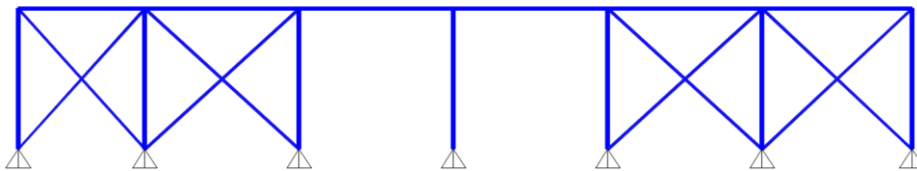
Το στατικό προσομοίωμα που προέκυψε από τις παραπάνω αλλαγές δίνεται στο Σχήμα 5-1. Επίσης, στο Σχήμα 5-2 απεικονίζεται η νέα όψη του πλαισίου στις προσόψεις του κτιρίου, ενώ τα ενδιάμεσα πλαίσια παραμένουν ίδια με προηγούμενως. Στο Σχήμα 5-3 απεικονίζονται οι ακραίες πλάγιες όψεις και στο Σχήμα 5-4 οι ενδιάμεσες πλάγιες όψεις.



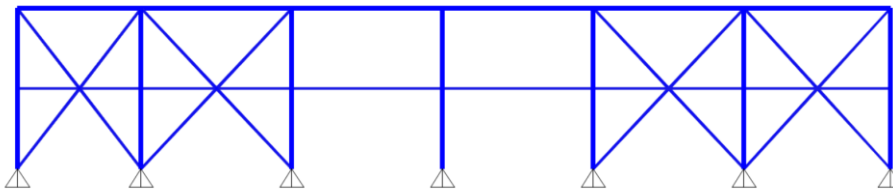
Σχήμα 5-1: Νέα διάταξη του του φορέα της κατασκευής



Σχήμα 5-2: Νέα όψη του πλαισίου στις προσόψεις του κτιρίου



Σχήμα 5-3: Νέα πλάγια όψη στα άκρα του φορέα



Σχήμα 5-4: Νέα πλάγια όψη ενδιάμεσα του φορέα

Οι νέες διατομές που προστέθηκαν είναι κατασκευασμένες από χάλυβα κατηγορίας S355 και οι ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής  $f_y$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_t$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_u$  δίνονται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 10025-2 και EN 1993-1-1. Τα χαρακτηριστικά του χάλυβα της κατασκευής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1: Ιδιότητες δομικού χάλυβα για έλαση εν θερμώ (EN1993-1-1)

Πρότυπο και ποιότητα χάλυβα	Ονομαστικό πάχος του στοιχείου t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>u</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>u</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
S 355	355	510	335	470

Οι ακριβείς διατομές των δομικών στοιχείων που προστέθηκαν, καθώς και οι ενισχύσεις των παλαιών διατομών, προέκυψαν ύστερα από επαναλήψεις και ο έλεγχός τους παρουσιάζεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5.2.

## 5.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

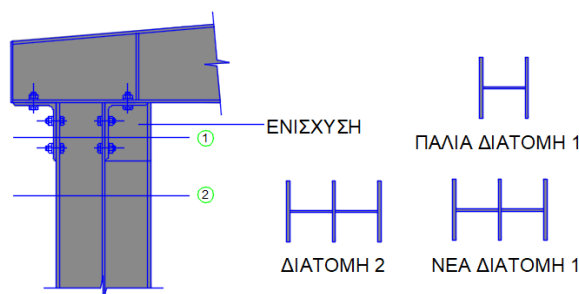
Σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκε η αναδιάταξη του φορέα χωρίς να γίνει ενίσχυση των διατομών. Διαμορφώθηκαν εκ νέου τα φορτία που έχουν προκύψει από το κεφάλαιο 4.2 λόγω των αλλαγών. Από την στατική ανάλυση μέσω του προγράμματος SAP 2000 v.19, βρέθηκαν τα εντατικά μεγέθη που καταπονούν τα στοιχεία της κατασκευής, για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων. Παρατηρήθηκε ότι, αυτή η αλλαγή από μόνη της ήταν απαραίτητη και καθοριστική, καθώς είχε σαν αποτέλεσμα πολλά από τα δομικά στοιχεία να επαρκούν στους περιορισμούς χωρίς καμία ενίσχυση στη διατομή τους. Στην συνέχεια, έπειτα από επαναλήψεις προέκυψαν και οι ενισχύσεις που χρειάζονται για να ικανοποιούνται πλήρως όλοι οι έλεγχοι.

### 5.2.1 Οριακή κατάσταση αστοχίας - Υπολογισμοί

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων όλων των δομικών στοιχείων του φορέα για την οριακή κατάσταση αστοχίας. Αφού εντοπίστηκαν ο δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης για κάθε μέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος διατομής και μέλους, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 4.3.1.1 και 4.3.1.2 αντίστοιχα.

#### – Ακραία υποστυλώματα C1:

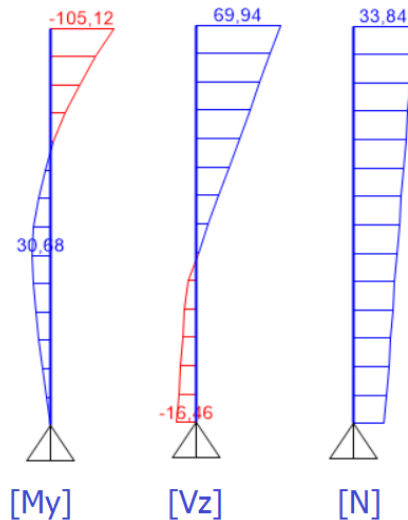
Για το υποστυλόμετρο C1 επιλέχθηκε ενιαία διατομή από την βάση μέχρι το άνω άκρο η διατομή 2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-5, με σκοπό την ενίσχυση της άνω διατομής, η οποία είναι μικρή και δεν επαρκεί. Δεν πραγματοποιήθηκε καμία επιπλέον ενίσχυση στη διατομή, καθώς διαπιστώνεται από τους ελέγχους ότι κάτι τέτοιο δεν απαιτείται. Τα χαρακτηριστικά της διατομής δίνονται στο Σχήμα 5-6. Στο Σχήμα 5-7 δίνονται τα εντατικά μεγέθη, ενώ στο Σχήμα 5-8 ο έλεγχος διατομής και στο Σχήμα 5-9 ο έλεγχος μέλους.



Σχήμα 5-5: Ενίσχυση της διατομής του υποστυλώματος C1

Χαρακτηριστικά διατομής:													
h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
31	14	20	1	0,6	76,8	10224,4	2000,5	19,24	52,96	659,64	200,05	731	302,52
Κατηγορία διατομής:													
Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή					
c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος				
14	0,6	23,33	1	9,7	1	9,70	1	1	Πλαστικός				

Σχήμα 5-6: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες της νέας διατομής του υποστυλώματος C1



Σχήμα 5-7: Εντατικά μεγέθη για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης του υποστυλώματος C1

Έλεγχος διατομής - Πλαστικός Έλεγχος:							
Κάμψη και διάτμηση:							
V <sub>pl,Rd</sub> (kN)		V <sub>Ed</sub> (kN)		0,5*V <sub>pl,Rd</sub>		V <sub>Ed</sub> (kN)	
261,04	>	69,94	επαρκεί	130,52	>	69,94	όχι απομείωση
Κάμψη και αξονική:							
A (cm <sup>2</sup> )	N <sub>pl,Rd</sub> (kN)		N <sub>Ed</sub> (kN)				
76,8	1804,8	>	33,835	επαρκεί			
0,25*N <sub>pl,Rd</sub>		N <sub>Ed</sub> (kN)		2*0,5*h <sub>w</sub> *t <sub>w</sub> *f <sub>y</sub> /γM0		N <sub>Ed</sub> (kN)	
451,2	>	33,835	όχι απομείωση	197,4	>	33,835	όχι απομείωση
M <sub>pl,Rd</sub>		M <sub>Ed</sub> (kNm)					
171,79	>	105,12	επαρκεί				

Σχήμα 5-8: Έλεγχος διατομής του υποστυλώματος C1

<b>Έλεγχος μέλους:</b>									
Μικτωκοί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση γ-γ:									
$\lambda_1$	$L_{cr,y}$ (cm)	$i_y$	$\lambda_y$	καμπ. Λυγ.	a	$\Phi_y$	$\chi_y$		
93,91	664	11,54	0,61	b	0,34	0,76	0,83		
Μικτωκοί συντελεστές λόγω αξονικής, διεύθυνση z-z:									
$\lambda_1$	$L_{cr,yz}$ (cm)	$i_z$	$\lambda_z$	καμπ. Λυγ.	a	$\Phi_z$	$\chi_z$		
93,91	664	5,10	1,39	c	0,49	1,75	0,35		
Μικτωκός συντελεστής λόγω κάμψης:									
L (cm)	$C_1$	E	G	$I_z$	$I_t$	$I_w$	$M_{cr}$ (kNcm)	$W_{pl,y}$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{LT}$
664	1,879	21000	8100	2000,5	22,016	450113	35981,34753	731	0,691
h/b	Καμπ. Λυγ.	$a_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$					
1,55	c	0,49	0,859	0,730					
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:									
$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	R							
105,12	171,79	0,838	<	1	επαρκεί				
Έλεγχος για μέγιστη θλιπτική δύναμη:									
$N_{Ed}$	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$k_{yy}$	$R_y$				
188,55	70,54	1804,80	171,79	1,05	0,72	<	1	επαρκεί	
				$k_{zy}$	$R_z$				
				0,63	0,65	<	1	επαρκεί	

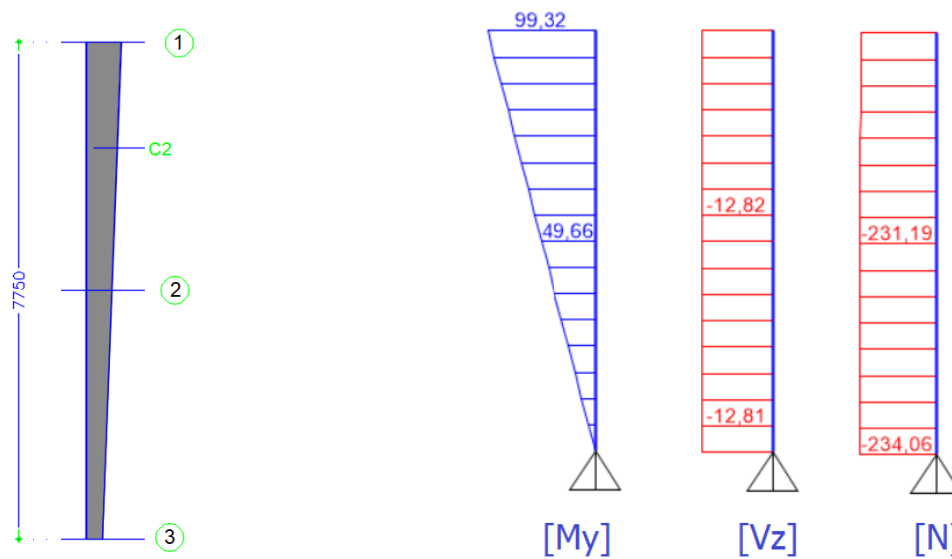
Σχήμα 5-9: Έλεγχος μέλους του υποστυλώματος C1

– Ενδιάμεσα υποστυλώματα C2:

Για το υποστυλώμα C2 δεν πραγματοποιήθηκε καμία επιπλέον ενίσχυση στη διατομή του, καθώς διαπιστώνεται από τους ελέγχους ότι κάτι τέτοιο δεν απαιτείται. Ωστόσο, κατά την αναδιάταξη του φορέα προστέθηκε νέο μέλος μεταξύ των υποστυλωμάτων C2, μια κοίλη κυκλική διατομή διαστάσεων 127x4, η οποία προσφέρει πλευρική εξασφάλιση, μειώνοντας το ισοδύναμο μήκος λυγισμού του υποστυλώματος στο μισό. Τα χαρακτηριστικά της διατομής δίνονται στο Σχήμα 5-10. Στο Σχήμα 5-11 δίνονται τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού, ενώ στο Σχήμα 5-12 ο έλεγχος διατομής και στο Σχήμα 5-13 ο έλεγχος μέλους. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η διατομή 1, ελέγχθηκε ως διατομή κατηγορίας 4, δηλαδή με απομειωμένα χαρακτηριστικά.

<b>Χαρακτηριστικά διατομών:</b>														
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>y,z</sub>	A <sub>y,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1	55,5	54,1	20	0,7	0,4	49,64	26300,44	933,62	22,20	23,33	947,76	93,36	1059,88	142,16
2	40,75	39,35	20	0,7	0,4	43,74	15639,22	933,54	16,30	23,33	665,34	93,35	737,30	141,57
3	26	24,6	20	0,7	0,4	37,84	4978,00	933,46	10,40	23,33	382,92	93,35	414,72	140,98
<b>Κατηγορία διατομών:</b>														
Διατομή	Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή					
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος				
1	54,1	0,4	135,3	4	9,8	0,7	14,00	1	4	Ελαστικός				
2	39,35	0,4	98,38	3	9,8	0,7	14,00	1	3	Ελαστικός				
3	24,6	0,4	61,5	3	9,8	0,7	14,00	1	3	Ελαστικός				

Σχήμα 5-10: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των διατομών του υποστυλώματος C2



Σχήμα 5-11: (α) Θέσεις των διατομών ελέγχου και (β) εντατικά μεγέθη για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης του υποστυλώματος C2

<b>Έλεγχος διατομών - Ελαστικός Έλεγχος:</b>									
Έλεγχος ορθών τάσεων:									
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$\sigma_{x,N}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,M_y}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/\gamma_{M0}$		
2	-232,39	49,66	-5,31	7,46	-12,78	<	23,5	επαρκεί	
3	-234,06	0,00	-6,19	0,00	-6,19	<	23,5	επαρκεί	
Έλεγχος Διαμητικών τάσεων:									
Διατομή	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$V_{Ed}$ (kN)	$\tau_{ed,xz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/(\sqrt{3}*\gamma_{M0})$				
2	15,74	-12,82	-0,81	<	13,57			επαρκεί	
3	9,84	-12,82	-1,30	<	13,57			επαρκεί	
Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises:									
Διατομή	$\sigma_{VM}$		$f_y/\gamma_{M0}$						
2	12,85	<	23,5					επαρκεί	
3	6,58	<	23,5					επαρκεί	
<b>Έλεγχος της διατομής1 με απομειωμένη διατομή (κατηγορία 4):</b>									
Διατομή	$A_{eff}$ (cm <sup>2</sup> )	$W_{eff,y}$	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$N_{Rd,eff}$ (kN)	$M_{Rd,eff,y}$ (kNm)	n		
3	36,18	924,19	229,27	99,32	850,26	217,18	0,73	>	1 επαρκεί

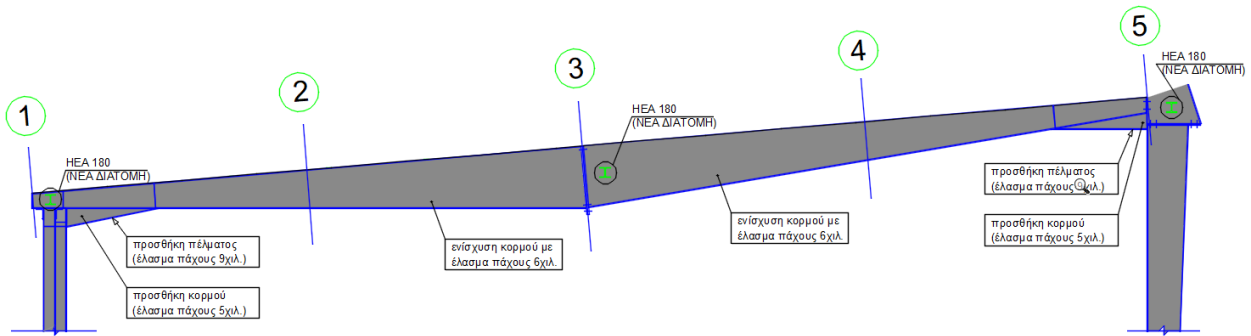
Σχήμα 5-12: Έλεγχος των διατομών του υποστυλώματος C2

Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα											
Μικρωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση z-z:											
Διατομή	$L_{cr,z}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_z$	$\lambda_z$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_z$	$\chi_z$			
1	387,5	93,91	5,06	0,815	c	0,49	0,983	0,653			
2	387,5	93,91	4,62	0,893	c	0,49	1,069	0,604			
3	387,5	93,91	4,97	0,831	c	0,49	1,000	0,643			
Μικρωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση y-y:											
Διατομή	$L_{cr,y}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_y$	$\lambda_y$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_y$	$\chi_y$			
1	775	93,91	26,29	0,314	b	0,34	0,569	0,959			
2	775	93,91	18,91	0,436	b	0,34	0,635	0,911			
3	775	93,91	11,47	0,719	b	0,34	0,847	0,773			
Μικρωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:											
Διατομή	Κατηγ. Διατ.	L (cm)	$C_1$	E	G	$I_z$ (cm <sup>4</sup> )	$I_t$ (cm <sup>4</sup> )	$I_w$ (cm <sup>6</sup> )	$M_{cr}$ (kNcm)	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{LT}$
1	4	387,5	1,879	21000	8100	926,76	5,73	695774,01	67431,71	947,76	0,575
2	3	387,5	1,879	21000	8100	933,54	5,41	374351,33	50500,32	665,34	0,556
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$						
1	2,78	d	0,76	0,808	0,727						
2	2,04	d	0,76	0,790	0,740						
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:											
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$k_{zy}$	$k_{yy}$					
1	229,27	99,32	850,26	217,18	0,842	1,053					
2	232,39	49,66	1027,89	156,36	0,852	1,065					
3	234,06	0,00	889,24	89,99	0,918	1,147					
Βαθμοί αξιοποίησης:											
Διατομή	$R_{z,N}$	$R_{z,My}$	$R_z$								
1	0,413	0,530	0,943	<	1	επαρκεί					
2	0,374	0,372	0,746	<	1	επαρκεί					
3	0,409	-	0,409	<	1	επαρκεί					
Διατομή	$R_{y,N}$	$R_{y,My}$	$R_y$								
1	0,281	0,662	0,943	<	1	επαρκεί					
2	0,248	0,465	0,713	<	1	επαρκεί					
3	0,341	-	0,341	<	1	επαρκεί					

Σχήμα 5-13: Έλεγχος μέλους του υποστυλώματος C2

## – Δοκός B1 B2:

Η δοκός B1\_B2 ενισχύθηκε στον κορμό της με ένα έλασμα πάχους 6mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-15, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί. Επιπλέον, προστέθηκαν γωνιακές ενισχύσεις στα άκρα της δοκού (Σχήμα 5-14), καθώς εκεί οι διατομές είναι μικρότερες και δεν επαρκούν στον έλεγχο διατομής και μέλους με μεγάλους βαθμούς αξιοποίησης. Επίσης, θα πρέπει να τοποθετηθούν συστήματα άντωσης, στις θέσεις των τεγίδων, δηλαδή ανά 0,65m, έτσι ώστε να αποκτήσει η δοκός στα σημεία πλευρικές εξασφαλίσεις. Τα χαρακτηριστικά της διατομής δίνονται στο Σχήμα 5-15. Στο Σχήμα 5-16 δίνονται τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού, ενώ στο Σχήμα 5-17 ο έλεγχος των διατομών 1 και 5 και στο Σχήμα 5-18 ο έλεγχος των διατομών 2, 3 και 4. Επιπλέον στο Σχήμα 5-19 δίνεται ο έλεγχος μέλους. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ενίσχυσης του κορμού η μεσαία διατομή της δοκού, η οποία ήταν κατηγορίας 4, μετατράπηκε σε διατομή κατηγορίας 3 και έτσι δεν χρειάστηκε ο έλεγχος με απομειωμένη διατομή.



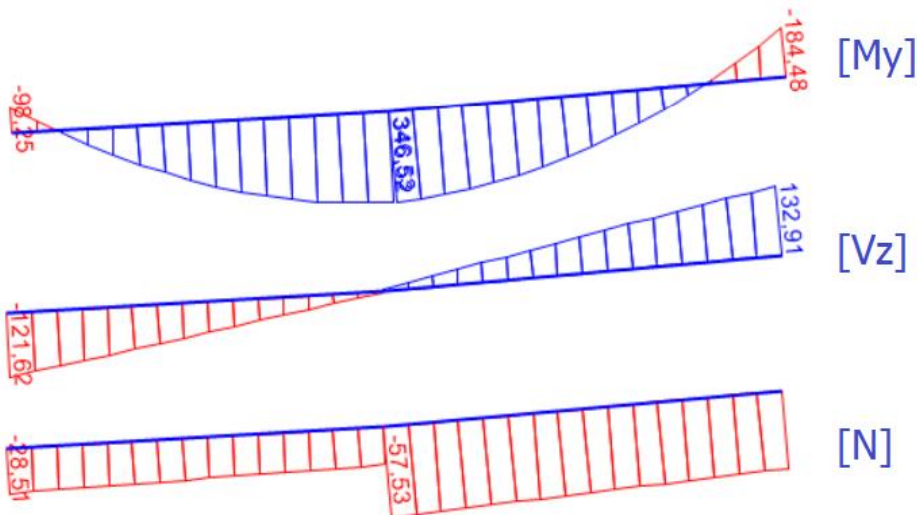
Σχήμα 5-14: Ενισχύσεις της δοκού B1\_B2

Χαρακτηριστικά διατομών:															
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>	
	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	
1	39,1	18,2	15	0,9	1,1	69,62	13156,02	761,58	27,37	38,88	625,05	101,54	794,85	158,52	
2	55,5	53,7	15	0,9	1,1	86,07	34319,62	512,21	61,05	22,50	1236,74	68,29	1530,11	117,49	
3	83	81,2	15	0,9	1,1	116,32	94576,76	515,26	91,30	22,50	2278,96	68,70	2921,55	125,81	
4	51,75	49,95	15	0,9	1,1	81,95	28879,44	511,79	56,93	22,50	1116,11	68,24	1372,60	116,36	
5	40,1	18,7	15	0,9	1,1	85,77	16271,30	764,93	47,90	34,66	789,40	101,99	983,35	165,56	

Κατηγορία διατομών:															
Διατομή	Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή						
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος					
1	18,2	1,1	16,5	1	6,95	0,9	7,72	1	1	Πλαστικός					
2	53,7	1,1	48,8	3	6,95	0,9	7,72	1	3	Ελαστικός					
3	81,2	1,1	73,8	3	6,95	0,9	7,72	1	3	Ελαστικός					
4	49,95	1,1	45,4	3	6,95	0,9	7,72	1	3	Ελαστικός					
5	18,7	1,1	17,0	1	6,95	0,9	7,72	1	1	Πλαστικός					

Σχήμα 5-15: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των ενισχυμένων διατομών της δοκού B1\_B2



Σχήμα 5-16: Εντατικά μεγέθη για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης της δοκού B1\_B2



**Έλεγχος διατομών 1, 5 - Πλαστικός Έλεγχος:**

Κάμψη και δάτμηση:

Διατομή	$V_{pl,Rd,z}$ (kN)		$V_{ed,z}$ (kN)		$0,5*V_{pl,Rd,z}$		$V_{ed,z}$ (kN)	
1	371,39	>	88,804	επαρκεί	185,70	>	88,804	όχι απομείωση
5	649,91	>	124,221	επαρκεί	324,96	>	124,221	όχι απομείωση

Διατομή	$V_{pl,Rd,y}$ (kN)		$V_{ed,y}$ (kN)		$0,5*V_{pl,Rd,y}$		$V_{ed,y}$ (kN)	
1	527,46	>	0,377	επαρκεί	263,73	>	0,377	όχι απομείωση
5	470,31	>	0	επαρκεί	235,16	>	0	όχι απομείωση

Κάμψη και αξονική:

Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	$N_{pl,Rd}$ (kN)		$N_{Ed}$ (kN)	
1	69,62	1636,07	>	76,17	επαρκεί
5	85,77	2015,595	>	45,59	επαρκεί

Διατομή	$0,25*N_{pl,Rd}$		$N_{Ed}$ (kN)		$2*0,5*hw*tw*fy/\gamma_{M0}$		$N_{Ed}$ (kN)		$2*hw*tw*fy/\gamma_{M0}$		$N_{Ed}$ (kN)	
1	409,0175	>	76,17	όχι απομείωση	342,16	>	76,17	όχι απομείωση	6629,35	>	76,17	όχι απομείωση
5	503,89875	>	45,59	όχι απομείωση	483,395	>	45,59	όχι απομείωση	966,79	>	45,59	όχι απομείωση

Διατομή	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$M_{pl,Rd,y}$ (kNm)	$M_{pl,Rd,z}$ (kNm)	$\eta$	$\alpha$	$\beta$	$r$			
1	105,72	1,765	186,79	37,25	0,047	2	1	0,37	>	1	επαρκεί
5	195,64	0,018	231,09	38,91	0,023	2	1	0,72	>	1	επαρκεί

Σχήμα 5-17: Έλεγχος διατομής των διατομών 1 και 5 της δοκού B1\_B2 για πλαστικό έλεγχο

**Έλεγχος διατομών 2, 3, 4 - Ελαστικός Έλεγχος:**

Έλεγχος ορθών τάσεων:

Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$\sigma_{x,N}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,M_y}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,M_z}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/\gamma_{M0}$
2	-26,03	233,47	-0,0208	-0,30	18,88	-0,03	-19,15	<	23,5
3	-57,53	346,52	-0,0888	-0,49	15,21	-0,13	-15,57	<	23,5
4	-53,49	203,34	0	-0,65	18,22	0,00	-18,87	<	23,5

Έλεγχος Διαμητικών τάσεων:

Διατομή	$V_{ed,z}$ (kN)	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ed,xz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/(\sqrt{3}*\gamma_{M0})$	
2	-61,28	59,07	1,037	<	13,57	επαρκεί
3	-0,73	89,32	0,008	<	13,57	επαρκεί
4	69,65	54,95	1,268	<	13,57	επαρκεί

Διατομή	$V_{ed,y}$ (kN)	$A_f$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ed,xy}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/(\sqrt{3}*\gamma_{M0})$	
2	-0,031	27	0,002	<	13,57	επαρκεί
3	-0,030	27	0,002	<	13,57	επαρκεί
4	0,015	27	0,001	<	13,57	επαρκεί

Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises:

Διατομή	$\sigma_{VM}$		$f_y/\gamma_{M0}$	
2	19,23	<	23,5	επαρκεί
3	15,57	<	23,5	επαρκεί
4	19,00	<	23,5	επαρκεί

Σχήμα 5-18 Έλεγχος διατομής των διατομών 2, 3 και 4 της δοκού B1\_B2 για ελαστικό έλεγχο

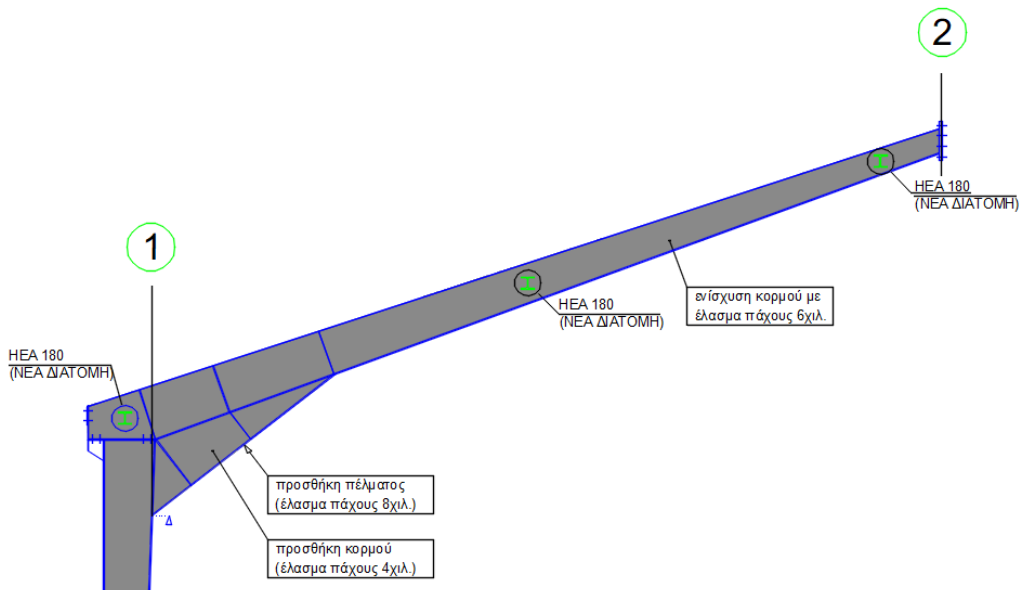
Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα														
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση z-z:														
Διατομή	$L_{cr,z}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_z$	$\lambda_z$	Καμπ. Λυγ.	a	$\Phi_z$	$\chi_z$						
1	65,00	93,91	3,31	0,209	c	0,49	0,524	0,995						
2	65,00	93,91	2,44	0,284	c	0,49	0,561	0,957						
3	65,00	93,91	2,10	0,329	c	0,49	0,586	0,934						
4	65,00	93,91	2,50	0,277	c	0,49	0,557	0,961						
5	65,00	93,91	2,99	0,232	c	0,49	0,535	0,984						
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση y-y:														
Διατομή	$L_{cr,y}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_y$	$\lambda_y$	Καμπ. Λυγ.	a	$\Phi_y$	$\chi_y$						
1	1486,87	93,91	13,75	1,152	b	0,34	1,325	0,505						
2	1486,87	93,91	19,97	0,793	b	0,34	0,915	0,729						
3	1486,87	93,91	28,51	0,555	b	0,34	0,715	0,859						
4	1486,87	93,91	18,77	0,843	b	0,34	0,965	0,697						
5	1486,87	93,91	13,77	1,149	b	0,34	1,322	0,506						
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:														
Διατομή	Κατηγ. Διατ.	L (cm)	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	$W_z$ (cm <sup>3</sup> )	$C_1$	$C_2$	E	G	$I_z$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$I_w$ (cm <sup>6</sup> )	$z_a$ (cm)	$M_{Ed}$ (kNm)	$\lambda_{LT}$
1	1	65,00	794,85	158,52	1,285	1,562	21000	8100	761,58	27,08	277833,20	19,55	267054,34	0,264
2	3	65,00	1236,74	68,29	1,285	1,562	21000	8100	512,21	31,11	381742,16	27,75	257609,22	0,336
3	3	65,00	2278,96	68,70	1,285	1,562	21000	8100	515,26	43,32	868259,85	41,5	389600,04	0,371
4	3	65,00	1116,11	68,24	1,285	1,562	21000	8100	511,79	29,45	330836,92	25,875	239749,94	0,331
5	1	65,00	983,35	165,56	1,285	1,562	21000	8100	764,93	27,53	293854,63	20,05	275228,35	0,290
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$									
1	2,6	d	0,76	0,559	0,950									
2	3,7	d	0,76	0,608	0,897									
3	5,5	d	0,76	0,634	0,872									
4	3,5	d	0,76	0,604	0,901									
5	2,7	d	0,76	0,576	0,931									
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:														
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{Ed,z}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$M_{z,Rk}$ (kNm)	$k_y$	$k_z$	$k_{yy}$	$k_{yz}$				
1		105,72	1,7651	1636,07	186,79	37,25								
2	26,03	233,47	0,0208	2022,65	290,63	16,05	0,807	1,002	1,008	1,002				
3	57,53	346,52	0,0888	2733,52	535,56	16,14	0,807	1,004	1,008	1,004				
4	53,49	203,34	0,0000	1925,71	262,29	16,04	0,816	1,005	1,020	1,005				
5		195,64	0,0182	2015,60	231,09	38,91								
Βαθμοί αξιοποίησης:														
Διατομή	$R_{z,N}$	$R_{z,M_y}$	$R_{z,M_z}$	$R_z$										
1		0,649	0,047	0,697	<	1							επαρκεί	
2	0,013	0,744	0,001	0,758	<	1							επαρκεί	
3	0,023	0,599	0,006	0,627	<	1							επαρκεί	
4	0,029	0,726	0,000	0,755	<	1							επαρκεί	
5		0,971	0,000	0,972	<	1							επαρκεί	
Διατομή	$R_{y,N}$	$R_{y,M_y}$	$R_{y,M_z}$	$R_y$										
1		0,649	0,047	0,697	<	1							επαρκεί	
2	0,018	0,930	0,001	0,948	<	1							επαρκεί	
3	0,025	0,748	0,006	0,779	<	1							επαρκεί	
4	0,040	0,907	0,000	0,947	<	1							επαρκεί	
5		0,971	0,000	0,972	<	1							επαρκεί	

Σχήμα 5-19: Έλεγχος μέλους της δοκού B1\_B2

## – Δοκός B3:

Η δοκός B3 ενισχύθηκε στον κορμό της με ένα έλασμα πάχους 6mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-20, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί. Επιπλέον, προστέθηκαν γωνιακές ενισχύσεις στο ένα άκρο της δοκού (Σχήμα 5-20), καθώς εκεί η διατομή είναι μικρότερη και δεν επαρκεί στον έλεγχο διατομής και μέλους με μεγάλους βαθμούς αξιοποίησης. Επίσης, επειδή οι παλιές τεγίδες θα αφαιρεθούν, θα αφαιρεθούν και τα συστήματα άντωσης που προϋπήρχαν. Για το λόγο αυτό θα τοποθετηθούν νέα συστήματα άντωσης, στις θέσεις των τεγίδων ανά δύο, δηλαδή ανά 1,30m, έτσι ώστε να αποκτήσει η δοκός στα σημεία αυτά πλευρικές εξασφαλίσεις. Τα χαρακτηριστικά της διατομής δίνονται στο Σχήμα 5-21. Στο Σχήμα 5-22 δίνονται τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού, ενώ στο Σχήμα 5-23 ο έλεγχος της διατομής 1 και στο Σχήμα 5-24 ο έλεγχος της διατομής 2. Επίσης στο Σχήμα 5-25 περιγράφεται ο έλεγχος μέλους. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ενίσχυσης του κορμού η διατομή 1

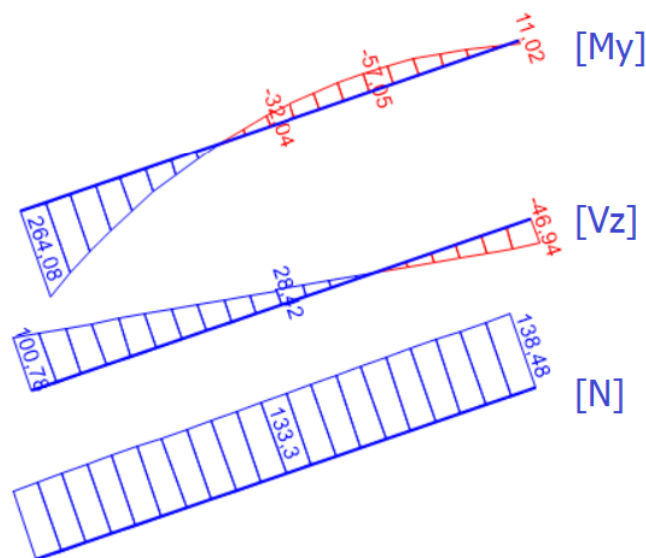
της δοκού, η οποία ήταν κατηγορίας 4, μετατράπηκε σε διατομή κατηγορίας 3 και έτσι δεν χρειάστηκε ο έλεγχος με απομειωμένη διατομή.



Σχήμα 5-20: Ενισχύσεις της δοκού B3

Χαρακτηριστικά διατομών:																
Διατομή	h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f,top</sub>	t <sub>f,bottom</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>	
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	
1	109,3	53,5	15	0,7	0,8	1	109,40	133663,32	651,62	61,73	33,32	2158,75	86,88	3160,83	144,89	
2	26,5	25	15	0,7	0,8	1	47,50	5025,54	423,96	26,50	18,75	369,03	56,53	445,41	90,63	
Κατηγορία διατομών:																
Διατομή	Κορμός:				Άνω Πέλμα:				Κάτω Πέλμα:				Διατομή			
	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος		
1	53,5	1	53,5	3	7	0,7	10,00	1	7	0,8	8,75	1	3	Ελαστικός		
2	25	1	25	1	7	0,7	10,00	1	7	0,8	8,75	1	1	Πλαστικός		

Σχήμα 5-21: Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των ενισχυμένων διατομών της δοκού B3



Σχήμα 5-22: Εντατικά μεγέθη για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης της δοκού B3

Έλεγχος διατομής 1 - Ελαστικός Έλεγχος:								
Έλεγχος ορθών τάσεων:								
Διατομή	$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$\sigma_{x,N}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,M_y}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/\gamma_{M0}$	
1	128,65	264,08	1,18	12,23	13,41	<	23,5	επαρκεί
Έλεγχος Διατμητικών τάσεων:								
Διατομή	$V_{ed,z}$ (kN)	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ed,xz}$ (kN/cm <sup>2</sup> )		$f_y/(\sqrt{3}\gamma_{M0})$			
1	100,78	107,00	0,942	<	13,57		επαρκεί	
Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises:								
Διατομή	$\sigma_{VM}$		$f_y/\gamma_{M0}$					
1	13,51	<	23,5				επαρκεί	

Σχήμα 5-23: Πλαστικός έλεγχος της διατομής 1 της δοκού B3

Έλεγχος διατομής 2 - Πλαστικός Έλεγχος:								
Κάμψη και διάτμηση:								
Διατομή	$V_{pl,Rd,z}$ (kN)		$V_{ed,z}$ (kN)		$0,5*V_{pl,Rd,z}$		$V_{ed,z}$ (kN)	
2	359,54	>	54,054	επαρκεί	179,77	>	54,054	όχι απομείωση
Κάμψη και αξονική:								
Διατομή	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$N_{pl,Rd}$ (kN)		$N_{Ed}$ (kN)				
2	47,50	1116,25	>	142,363	επαρκεί			
Διατομή	$0,25*N_{pl,Rd}$		$N_{Ed}$ (kN)		$0,5*hw*tw*f_y/\gamma_{M0}$		$N_{Ed}$ (kN)	
2	279,0625	>	142,363	όχι απομείωση	293,75	>	142,363	όχι απομείωση
Διατομή	$M_{pl,Rd,y}$ (kNm)		$M_{Ed,y}$ (kNm)					
2	104,67	>	63,83	επαρκεί				

Σχήμα 5-24: Ελαστικός έλεγχος της διατομής 2 της δοκού B3

Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα												
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:												
Διατομή	Κατηγορ. Διατ.	L (cm)	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	$W_z$ (cm <sup>3</sup> )	$C_1$	E	G	$I_z$ (cm <sup>4</sup> )	$I_t$ (cm <sup>4</sup> )	$I_w$ (cm <sup>6</sup> )	$M_{cr}$ (kNcm)	$\lambda_{LT}$
1	3	130	2158,75	86,88	1,285	21000	8100	651,62	25,81	1919522,48	559820,40	0,301
2	1	130	445,41	90,63	1,285	21000	8100	423,96	12,61	70277,71	90975,09	0,339
Διατομή	h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$							
1	7,29	d	0,76	0,584	0,923							
2	1,77	c	0,49	0,592	0,929							
Έλεγχος για μέγιστη ροπή:												
Διατομή	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	R									
1	264,08	507,31	0,564	<	1	επαρκεί						
2	63,83	104,67	0,661	<	1	επαρκεί						

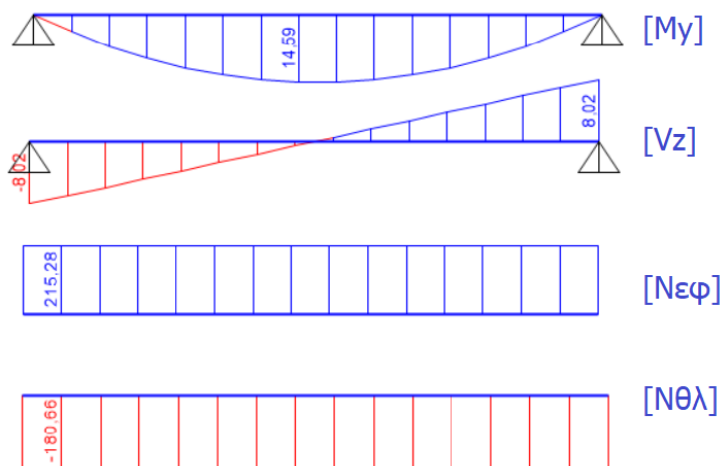
Σχήμα 5-25: Έλεγχος μέλους της δοκού B3

– Κεφαλοδοκός:

Η κεφαλοδοκός ελέγχθηκε ξεχωριστά ως αμφιέρειστη, εφαρμόζοντας εκ νέου τα φορτία με επιφάνεια επιρροής 0,65m. Τα αξονικά φορτία λήφθηκαν από τον καθολικό φορέα. Η διατομή που προέκυψε για τις κεφαλοδοκούς είναι η HEA 180 και στο Σχήμα 5-26 δίνονται τα χαρακτηριστικά της. Επιπλέον, στο Σχήμα 5-27 δίνονται τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού, ενώ στο Σχήμα 5-28 ο έλεγχος διατομής και στο σχήμα ο έλεγχος μέλους.

Χαρακτηριστικά διατομής:													
h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
17,1	12,2	18	0,95	0,6	45,30	2510,00	925,00	7,32	19,83	294,00	103,00	325,00	157,00
Κατηγορία διατομής:													
Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή					
c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος				
12,2	0,60	20,33	1	8,7	0,95	9,16	1	1	Πλαστικός				

Σχήμα 5-26: Χαρακτηριστικά και κατηγορία διατομής της κεφαλοδοκού



Σχήμα 5-27: Εντατικά μεγέθη της κεφαλοδοκού για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης

Έλεγχος διατομής - Πλαστικός Έλεγχος:							
Κάμψη και διάτμηση:							
V <sub>pl,Rd</sub> (kN)		V <sub>Ed</sub> (kN)		0,5*V <sub>pl,Rd</sub>		V <sub>Ed</sub> (kN)	
149,93	>	8,02	επαρκεί	74,96	>	8,02	όχι απομείωση
Κάμψη και αξονική:							
A (cm <sup>2</sup> )	N <sub>pl,Rd</sub> (kN)		N <sub>Ed</sub> (kN)				
45,30	1608,15	>	215,28	επαρκεί			
0,25*N <sub>pl,Rd</sub>		N <sub>Ed</sub> (kN)		0,5*hw*tw*fy/γM0		N <sub>Ed</sub> (kN)	
402,0375	>	215,28	όχι απομείωση	129,93	<	215,28	απομείωση
M <sub>pl,Rd</sub> (kNm)	η	a	M <sub>N,pl,Rd</sub> (kNm)		M <sub>Ed</sub> (kNm)		
115,38	0,13	0,25	107,10	>	14,59	επαρκεί	

Σχήμα 5-28: Έλεγχος διατομής της κεφαλοδοκού

<b>Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα</b>												
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση z-z:												
$L_{cr,z}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_z$	$\lambda_z$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_z$	$\chi_z$					
731,00	76,41	4,52	2,117	c	0,49	3,211	0,178					
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής διεύθυνση y-y:												
$L_{cr,y}$ (cm)	$\lambda_1$	$i_y$	$\lambda_y$	Καμπ. Λυγ.	$\alpha$	$\Phi_y$	$\chi_y$					
731,00	76,41	7,44	1,285	b	0,34	1,510	0,434					
Μειωτικός συντελεστής λόγω κάμψης:												
L (cm)	$C_1$	$C_2$	E	G	$I_z$	$I_t$	$I_w$	$z_g$ (cm)	$M_{cr}$ (kNcm)	$W_{ply}$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda_{LT}$	
731,00	1,132	0,459	21000	8100	925	8,16	60315,2	8,55	5015,47	325	1,517	
h/b	Καμπ. Λυγ.	$\alpha_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$								
0,95	a	0,21	1,788	0,365								
Έλεγχος:												
$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Ed,y}$ (kNm)	$N_{Rk}$ (kN)	$M_{y,Rk}$ (kNm)	$k_{zy}$	$k_{yy}$							
180,66	14,59	1608,15	115,38	0,769	1,281							
Βαθμοί αξιοποίησης:												
$R_{z,N}$	$R_{z,My}$	$R_z$										
0,632	0,266	0,898	<	1	επαρκεί							
$R_{y,N}$	$R_{y,My}$	$R_y$										
0,259	0,443	0,702	<	1	επαρκεί							

Σχήμα 5-29: Έλεγχος μέλους της κεφαλοδοκού

– Οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:

Η διατομή που προέκυψε για τους νέους οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι η κοίλη κυκλική διατομή CHS 48.3x2.6 και στο Σχήμα 5-30 δίνονται τα χαρακτηριστικά της. Για τους οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας θεωρούμε ότι το ένα μέλος θλίβεται και το αφήνουμε να λυγίσει ενώ το άλλο μέλος δέχεται την διπλάσια εφελκυστική αξονική δύναμη. Η δύναμη αυτή προκύπτει από τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίσεων  $N_{Ed}=58,154\text{kN}$ . Στο Σχήμα 5-31 παρουσιάζεται ο έλεγχος διατομής.

Χαρακτηριστικά διατομής:						Κατηγορία διατομής:				
d	t	A	I	$W_{el}$	$W_{pl}$	d	t	d/t	Κατηγορία	Έλεγχος
cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm			
4,83	0,26	3,73	9,78	4,05	5,44	4,83	0,26	18,58	1	Πλαστικός

Σχήμα 5-30: Χαρακτηριστικά και κατηγορία διατομής των οριζόντιων συνδέσμων δυσκαμψίας

Έλεγχος διατομής - Πλαστικός Έλεγχος:					
Κάμψη και διάτμηση:					
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	$N_{pl,Rd}$ (kN)		$2*N_{Ed}$ (kN)	
1	3,73	132,415	>	116,3	επαρκεί

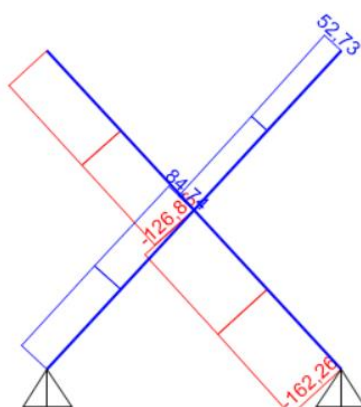
Σχήμα 5-31: Έλεγχος διατομής των οριζόντιων συνδέσμων δυσκαμψίας

– Κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:

Η διατομή που προέκυψε για τους νέους οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι η κοίλη κυκλική διατομή CHS 127x4 και στο Σχήμα 5-32 δίνονται τα χαρακτηριστικά της. Επιπλέον, στο Σχήμα 5-33 δίνονται τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού, ενώ στο Σχήμα 5-34 ο έλεγχος διατομής και ο έλεγχος μέλους.

Χαρακτηριστικά διατομής:						Κατηγορία διατομής:				
d	t	A	I	W <sub>el</sub>	W <sub>pl</sub>	d	t	d/t	Κατηγορία	Έλεγχος
cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm			
12,7	0,4	15,46	292,6	46,08	60,54	12,7	0,4	31,75	1	Πλαστικός

Σχήμα 5-32: Χαρακτηριστικά και κατηγορία διατομής των κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας



Σχήμα 5-33: Εντατικά μεγέθη των κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας

Έλεγχος διατομής - Πλαστικός Έλεγχος:							
Κάμψη και διάτμηση:							
Διατομή	A (cm <sup>2</sup> )	N <sub>pl,Rd</sub> (kN)		N <sub>Ed</sub> (kN)			
1	15,46	548,83	>	180,661	επαρκεί		
Έλεγχος μέλους - Με βάση τον Ευρωκώδικα							
Μειωτικοί συντελεστές λόγω αξονικής:							
L <sub>cr</sub> (cm)	λ <sub>1</sub>	i	λ	Καμπ. Λυγ.	α	Φ	χ
484,00	76,41	4,35	1,456	a	0,21	1,692	0,392
Βαθμός αξιοποίησης:							
N <sub>Ed</sub> (kN)	N <sub>Rk</sub> (kN)	R					
162,23	548,83	0,755	<	1	επαρκεί		

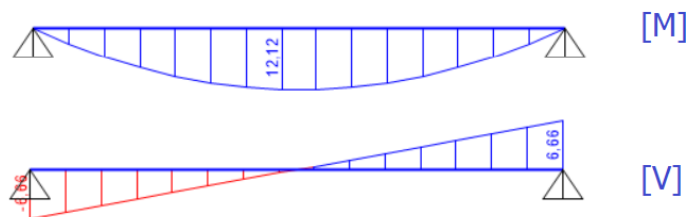
Σχήμα 5-34: Έλεγχος μέλους και διατομής των κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας

– Τεγίδες:

Η διατομή που προέκυψε για τις νέες οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι η διατομή IPE100 και στο Σχήμα 5-35 δίνονται τα χαρακτηριστικά της. Επιπλέον, στο Σχήμα 5-36 δίνονται τα εντατικά μεγέθη του δυσμενέστερου συνδυασμού, ενώ στο Σχήμα 5-37 ο έλεγχος διατομής της τεγίδας. Δεν απαιτείται έλεγχος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού.

Χαρακτηριστικά διατομής:													
h	h <sub>w</sub>	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>v,z</sub>	A <sub>v,y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>
cm	cm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
5,5	9,2	10	0,57	0,41	10,30	171,00	15,90	4,10	5,23	34,20	5,79	39,40	9,15
Κατηγορία διατομής:													
Κορμός:				Πέλματα:				Διατομή					
c	t	c/t	Κατηγορία	c	t	c/t	Κατηγορία	Κατηγορία	Έλεγχος				
9,2	0,41	22,44	1	4,795	0,57	8,41	1	1	Πλαστικός				

Σχήμα 5-35: Χαρακτηριστικά και κατηγορία διατομής της τεγίδας



Σχήμα 5-36: Εντατικά μεγέθη της τεγίδας για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης

Έλεγχος διατομής- Πλαστικός έλεγχος:							
Κάμψη και διάτμηση:							
V <sub>pl,Rd,z</sub> (kN)		V <sub>ed,z</sub> (kN)		0,5*V <sub>pl,Rd,z</sub>		V <sub>ed,z</sub> (kN)	
84,03	>	6,66	επαρκεί	42,02	>	6,66	όχι απομείωση
M <sub>pl,Rd,y</sub> (kNm)		M <sub>Ed,y</sub> (kNm)					
13,99	>	12,12	επαρκεί				

Σχήμα 5-37: Έλεγχος διατομής της τεγίδας

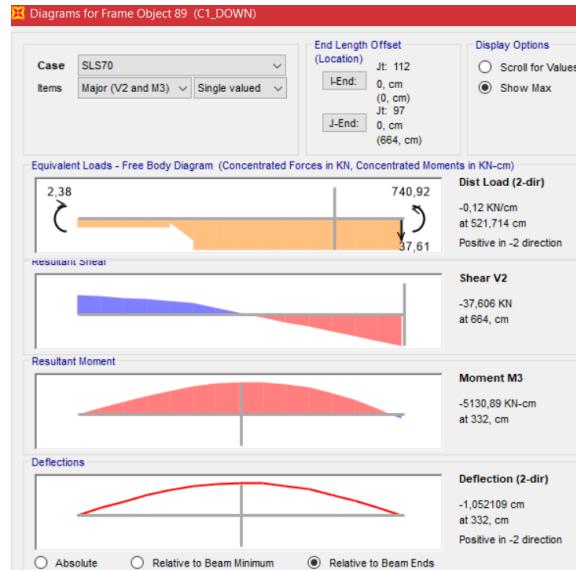
### 5.2.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας - Υπολογισμοί

Παρακάτω γίνεται ο έλεγχος των βελών κάμψης για τα δομικά στοιχεία. Για τα κατακόρυφα βέλη κάμψης η οριακή τιμή λαμβάνεται ως  $L/200$ , δηλαδή για μη βατή στέγη, ενώ για τα οριζόντια βέλη ως λαμβάνεται  $h/300$ , δηλαδή για μονώροφα κτίρια λόγω της αλλαγής χρήσης του κτιρίου. Τα βέλη που προκύπτουν σε κάθε μέλος λαμβάνονται από το πρόγραμμα SAP 2000.

#### – Υποστυλώμα C1:

Το ύψος του υποστυλώματος C1 είναι  $h=6,64\text{m}$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{\max}=h/150=664/300=2,21\text{cm}$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 5-38. Επομένως, ισχύει:  $w=1,052\text{cm} < \delta_{\max}=2,21\text{cm}$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.

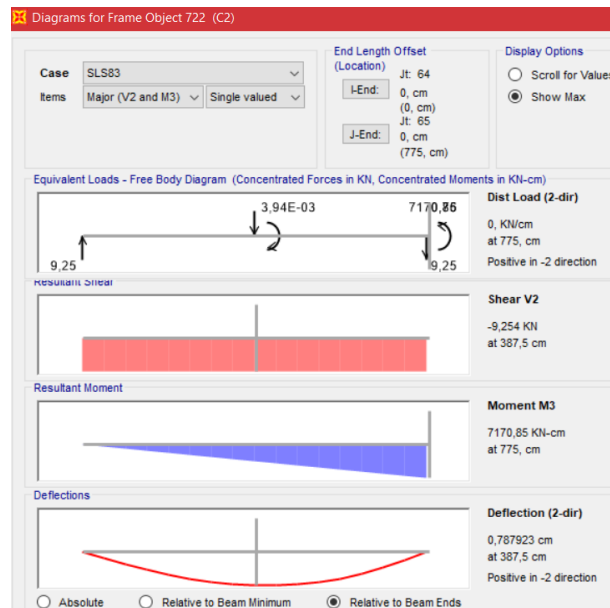




Σχήμα 5-38: Οριζόντια παραμόρφωση του υποστυλώματος C1

## – Υποστώλιωμα C2:

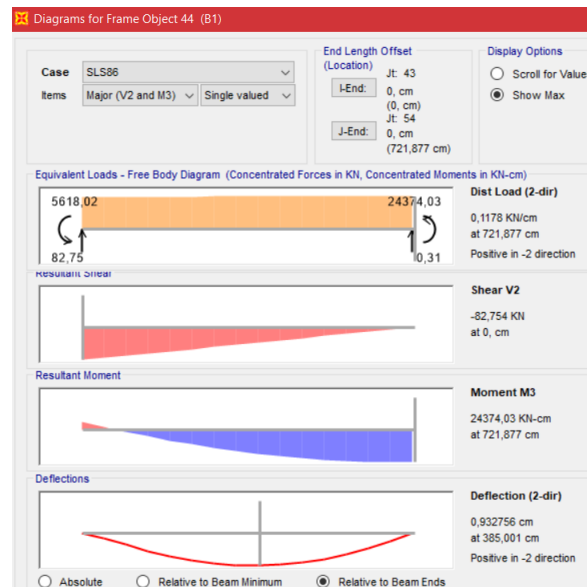
Το ύψος του υποστυλώματος C2 είναι  $h=7,75\text{m}$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{\max}=h/150=775/300=2,58\text{cm}$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 5-39. Επομένως, ισχύει:  $w=0,788\text{cm} < \delta_{\max}=2,58\text{cm}$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 5-39: Οριζόντια παραμόρφωση του υποστυλώματος C2

– Δοκός B1 B2:

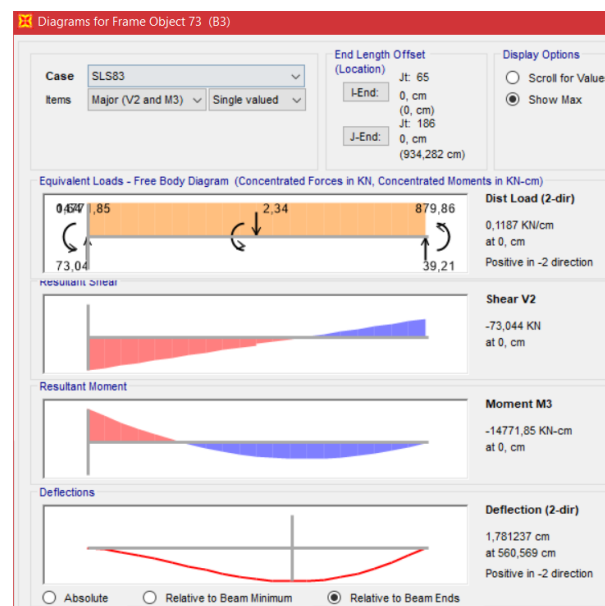
Το μήκος της δοκού είναι  $L=14,825\text{m}$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{\max}=L/200=1482,5/200=7,41\text{cm}$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 5-40. Επομένως, ισχύει:  $w=1,286\text{cm} < \delta_{\max}=7,41\text{cm}$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 5-40: Κατακόρυφη παραμόρφωση της δοκού B1\_B2

– Δοκός B3:

Το μήκος της δοκού είναι  $L=9,343\text{m}$ , άρα η οριακή τιμή του βέλους κάμψης προκύπτει  $\delta_{\max}=L/200=943/200=4,72\text{cm}$ . Το οριζόντιο βέλος κάμψης που προέκυψε δίνεται στο Σχήμα 5-41. Επομένως, ισχύει:  $w=1,781\text{cm} < \delta_{\max}=4,72\text{cm}$ , άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.



Σχήμα 5-41: Κατακόρυφη παραμόρφωση της δοκού B3

### 5.3 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης μιας παλιάς κατασκευής, αποτελεί από μόνη της ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της βιωσιμότητας των μεταλλικών κατασκευών. Για παράδειγμα, εάν επιλεγόταν να κατασκευαστεί ένα νέο κτίριο, το οποίο θα προοριζόταν από την αρχή ως χώρος για αθλητικές δραστηριότητες, θα είχε ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος, αλλά και την αύξηση του κόστους. Παράλληλα, το παλιό κτίριο θα παρέμενε ανεκμετάλλευτο, επιδεινώνοντας έτσι τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω των εκπομπών ρύπων που εκπέμπουν τα κτίρια. Επομένως, η διαδικασία μετατροπής του συγκεκριμένου βιομηχανικού κτιρίου, είναι πολύ σημαντική και οδηγεί σε πολλά οφέλη για το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία.

Στην συνέχεια, περιγράφονται ορισμένες επιπλέον λύσεις, οι οποίες στοχεύουν και εκείνες με την σειρά τους στην επίτευξη της βιωσιμότητας της κατασκευής. Συγκεκριμένα, οι λύσεις αυτές είναι οι εξής:

- Πολλά από τα δευτερεύοντα δομικά στοιχεία της κατασκευής πρόκειται να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν με νέα. Προτείνεται, λοιπόν, να αποσυναρμολογηθούν και στη συνέχεια να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των νέων δομικών στοιχείων που θα τοποθετηθούν στην κατασκευή. Με αυτό τον τρόπο τα χαλύβδινα μέλη που θα αφαιρεθούν, δεν θα οδηγηθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής, δυσχεραίνοντας έτσι το περιβάλλον. Επίσης, έτσι αποτρέπεται η συμβολή στην εξάντληση των φυσικών πόρων. Άλλο, ένα πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι η μείωση του κόστους για την παραγωγή των νέων δομικών στοιχείων.
- Θα πρέπει η κατασκευή να μετατραπεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχει την δυνατότητα να αλλάξει ξανά την χρήση της, εκμεταλλεύοντας την στο έπακρο. Για το λόγο αυτό, προτείνεται οι συνδέσεις των νέων μελών να πραγματοποιηθούν με την χρήση κοχλιώσεων, όσο αυτό είναι εφικτό, έτσι ώστε το κτίριο να μπορεί να μετατραπεί μελλοντικά εκ νέου, εάν και εφόσον χρειαστεί. Οι κοχλιωτές συνδέσεις έχουν ως πλεονέκτημα την γρήγορη και εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση τους. Επιπροσθέτως, οι νέες διατομές που πρόκειται να προστεθούν θα πρέπει να είναι τυποποιημένες, ελατές διατομές, σταθερής διατομής και όχι συγκολλητές μεταβλητές διατομές, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να αποσυναρμολογούνται εύκολα χωρίς να υποστούν ζημιές.
- Οι επικαλύψεις της οροφής και οι πλαγιοκαλύψεις, πρόκειται να αφαιρεθούν, διότι είναι παλιές και δεν προσφέρουν την επιθυμητή λειτουργία τους, καθώς επίσης, επειδή έχουν υποστεί σοβαρές ζημιές λόγω της άμεσης έκθεσης τους με το εξωτερικό περιβάλλον. Για τις νέες επικαλύψεις μια καλή πρόταση είναι η τοποθέτηση θερμομονωτικών πάνελ. Πρόκειται για σύνθετα μονολιθικά πάνελ, τα οποία αποτελούνται από δύο γαλβανισμένα και προβαμμένα χαλυβδοελάσματα μεταξύ των οποίων υπάρχει σκληρός αφρός πολυουρεθάνης (σχήμα). Τα θερμομονωτικά πάνελ, παράγονται από φιλικά προς το περιβάλλον υλικά, χαρακτηρίζονται ως οικολογικά και δεν θεωρούνται επιβλαβή. Η εφαρμογή τους εξασφαλίζει το μέγιστο θερμομονωτικό, υγρομονωτικό και αισθητικό αποτέλεσμα. Επίσης, παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία και επειδή είναι αυτοσβενδόμενο υλικό δεν εξαπλώνει τη φωτιά.
- Τα παράθυρα των κτιρίων συντελούν σε ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση κατά τη θέρμανση και τη ψύξη του χώρου, καθώς από αυτά μεταφέρεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η αντικατάσταση των υαλοπινάκων με ενεργειακούς είναι η αμεσότερη, απλούστερη και πιο αποδοτική παρέμβαση που μπορεί να γίνει σε ένα υπάρχον κτίριο, προκειμένου να αναβαθμιστεί ενεργειακά. Συγκεκριμένα, οι θερμικές απώλειες σε σχέση με τους απλούς υαλοπίνακες μειώνονται κατά 40%. Οι ενεργειακοί υαλοπίνακες αποτελούνται από διάφανο γυαλί, το οποίο έχει επιστρωση μικροσκοπικών μεταλλικών οξειδίων στη μια πλευρά του, η οποία δεν επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό χώρο στο εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο και αντίστροφα. Δεν έχουν

κανένα όριο ζωής και δεν απαιτούν καμία ειδική συντήρηση. Επίσης, συμβάλουν στη μείωση του ετήσιου κόστους θέρμανσης και ψύξης, αλλά κυρίως συμβάλλουν ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος.

- Επιπροσθέτως, είναι απαραίτητη η επιλογή του τρόπου θέρμανσης, έτσι ώστε να είναι οικονομικός και φιλικός προς το περιβάλλον. Μια εξέλιξη στον τομέα της θέρμανσης τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο θεωρείται ένα οικολογικό προϊόν και αποτελεί σύγχρονη μορφή ενέργειας, η οποία κατά την χρήση της δεν παράγει μεταλλικούς ρύπους, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι για τον άνθρωπο. Αυτός ο τρόπος θέρμανσης έχει ως πλεονέκτημα τον υψηλό βαθμό απόδοσης με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Το κόστος συντήρησης των εγκαταστάσεων είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το κόστος του πετρελαίου.
- Τέλος, προτείνεται η τοποθέτηση φωτιστικών σωμάτων τεχνολογίας LED στο κτίριο με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα των φωτιστικών σωμάτων τεχνολογίας LED είναι ο πολύ μεγάλος χρόνος ζωής των λαμπτήρων άνω των 50.000 ωρών, που μεταφράζεται σε 12ωρη λειτουργία του φωτιστικού ανά ημέρα σε 11,4 χρόνια ζωής, η μηδαμινή συντήρησή τους, η καλή σχέση απόδοσης / κατανάλωσης (lm/W), η άμεση έναυσή τους, η ικανότητά τους να μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-40 °C), η δυνατότητα ελέγχου και διαχείρισής τους κατά περίπτωση ακόμα και από απομακρυσμένα σημεία, η καλύτερη χρωματική απόδοση και κυρίως η εντυπωσιακή εξοικονόμηση ενέργειας, σε σχέση με τα παλαιά ενεργοβόρα και χαμηλής απόδοσης φωτιστικά.

## 6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την διερεύνηση μετατροπής ενός παλαιού βιομηχανικού κτιρίου, από χώρο αποθήκευσης σε χώρο αθλητικών δραστηριοτήτων. Η μετατροπή του κτιρίου βασίζεται στην στατική βελτίωση του υφιστάμενου φορέα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην δημιουργία μιας βιώσιμης κατασκευής, η οποία θα συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο έγινε πλήρης περιγραφή της έννοια της βιωσιμότητας, παραθέτοντας ιστορικές αναφορές. Αναπτύχθηκαν οι περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί παράγοντες που διέπουν την βιωσιμότητα και τονίστηκε η σημασία της εφαρμογής της βιωσιμότητας στις κατασκευές. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν πλήρως οι ιδιότητες των μεταλλικών κατασκευών, οι οποίες αναδεικνύουν την βιωσιμότητα σε όλες της φάσεις ζωής μιας κατασκευής. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε κατά το τέλος της ωφέλιμης ζωής του κτιρίου, μέσω της διατύπωσης των πλεονεκτημάτων της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του χάλυβα. Έπειτα, περιγράφηκαν ορισμένα παραδείγματα πραγματικών κατασκευών στην Ευρώπη, τα οποία είτε ανακυκλώθηκαν, είτε επαναχρησιμοποιήθηκαν, δημιουργώντας πολλά οφέλη σε όλους τομείς. Επίσης, στο δεύτερο κεφάλαιο, έγινε αναφορά στα συστήματα περιβαλλοντικής πιστοποίησης των κτιρίων, περιγράφοντας την διαδικασία και τον τρόπο βαθμολόγησης του κάθε συστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το κτίριο, το οποίο αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Εξηγήθηκαν οι λόγοι για τους οποίους το συγκεκριμένο κτίριο πρόκειται να αλλάξει χρήση και αναφέρθηκαν οι αρχιτεκτονικές μετατροπές που πρόκειται να υποστεί το κτίριο, έτσι ώστε να μπορέσει να αντεπεξέλθει στην νέα του χρήση. Ακολούθως, έγινε αναλυτική περιγραφή της γεωμετρίας και του στατικού συστήματος του υφιστάμενου φορέα και δόθηκαν τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της συμπεριφοράς του υφιστάμενου φορέα με βάση τις σημερινές κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα. Αρχικά, έγινε περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού των φορτίων που επιβάλλονται στην κατασκευή κατά τον Ευρωκώδικα 3, καθώς και εκείνη των σεισμικών φορτίων κατά τον Ευρωκώδικα 8. Ο προσδιορισμός της σεισμικής απόκρισης έγινε σύμφωνα με δύο μεθόδους, την ιδιομορφία φασματική ανάλυση και την ισοδύναμη στατική μέθοδο. Στη συνέχεια αφού διατυπώθηκαν αναλυτικά οι κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 για τους έλεγχους διατομής και μέλους, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και των

αντίστοιχων ελέγχων για όλα τα δομικά μέλη. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ότι ο υφιστάμενος φορέας έχει πολλά προβλήματα στην στατικότητα του και η ανάγκη αναδιάταξης και ενίσχυσής του ήταν απαραίτητη.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι μετατροπές που έγιναν προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά του κτιρίου. Οι μετατροπές αυτές αφορούν την αφαίρεση μελών του υφιστάμενου φορέα και την αντικατάστασή τους με νέα, καθώς επίσης και την προσθήκη νέων δομικών στοιχείων σε θέσεις όπου κρίθηκε απαραίτητο. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του νέου φορέα και έπειτα από μερικές επαναλήψεις, πέρα από τις ακριβείς διατομές που υπολογίστηκαν για τα νέα δομικά στοιχεία, προέκυψε και η ανάγκη ενίσχυσης των παλαιών διατομών, έτσι ώστε η κατασκευή να υπακούει σε όλες τις κανονιστικές διατάξεις. Κρίθηκε επίσης αναγκαία η προσθήκη γωνιακών ενισχύσεων στις συνδέσεις των δοκών με τα υποστυλώματα. Τέλος, διατυπώθηκαν ορισμένες προτάσεις για την βελτίωση της βιωσιμότητας της κατασκευής και της ενεργειακής της απόδοσης, ελαχιστοποιώντας έτσι τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά και το κόστος, που πρόκειται να προκύψουν κατά την ανακαίνιση και τη νέα λειτουργία της κατασκευής.

## 6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διερεύνηση μετατροπής του παλαιού βιομηχανικού κτιρίου, με στόχο την επαναχρησιμοποίησή του, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων και ελέγχων του υφιστάμενου φορέα, τη διαδικασία αναδιάταξης και ενίσχυσής του, καθώς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των ελέγχων του νέου, ενισχυμένου φορέα. Ωστόσο, σημαντικά συμπεράσματα προκύπτουν και από την διαδικασία μετατροπής της παλαιάς κατασκευής σε μια νέα, βιώσιμη και ενεργειακά αποδοτική κατασκευή.

Συγκεκριμένα, κατά την ανάλυση του υφιστάμενου φορέα και την διεξαγωγή των ελέγχων, σύμφωνα με τι κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρώντας τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην υπάρχουσα κατασκευή από κάθε συνδυασμό φόρτισης, μέσω της στατικής ανάλυσης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η δυσμενέστερη φόρτιση προέρχεται από τον συνδυασμό των κατακόρυφων φορτίων του χιονιού και του ανέμου. Όσον αφορά τα οριζόντια φορτία, ο άνεμος προκύπτει δυσμενέστερος σε σχέση με τα σεισμικά φορτία. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η σεισμική απόκριση, που προέκυψε από την ιδιομορφική φασματική ανάλυση, δεν διαφέρει πολύ από εκείνη της ισοδύναμης στατικής φόρτισης.
- Ο έλεγχος επάρκειας των διατομών, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα, δεν ικανοποιείται σε κανένα δομικό στοιχείο της κατασκευής, γεγονός που οδηγεί στην αναγκαιότητα ενίσχυσης του φορέα.
- Κατά τον έλεγχο των μελών έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, γίνεται εμφανής η ύπαρξη αρκετών προβλημάτων ως προς την ευστάθεια της κατασκευής. Η έλλειψη των κεφαλοδοκών σε πολλά σημεία του φορέα, στα οποία η ύπαρξή τους είναι απαραίτητη, σε συνδυασμό με την ανεπαρκή λειτουργία των συνδέσμων δυσκαμψίας, λόγω της λυγηρής διατομής τους και του ελάχιστου αριθμού τους, αλλά και λόγω των μεγάλων ανοιγμάτων των δοκών χωρίς πλευρικές εξασφαλίσεις, οδήγησε στην μη επάρκεια των δομικών στοιχείων έναντι των ελέγχων μέλους. Από τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων ελέγχων προέκυψαν βαθμοί αξιοποίησης κατά πολύ μεγαλύτεροι της μονάδας, γεγονός που αποδεικνύει την αναγκαιότητα αναδιάταξης και ενίσχυσης του φορέα.
- Για τον έλεγχο των μελών έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι υπολογισμού. Κατά την πρώτη μέθοδο, πραγματοποιήθηκε γραμμική ανάλυση λυγισμού (linear

buckling analysis) με τη χρήση του προγράμματος ADINA, ενώ κατά την δεύτερη μέθοδο υπολογίστηκε το ισοδύναμο μήκος λυγισμού, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές.

- Συγκεντρωτικά, συμπεραίνεται ότι η υπάρχουσα κατασκευή δεν ικανοποιεί τους περιορισμούς των σημερινών κανονισμών που διέπουν τον σχεδιασμό μιας μεταλλικής κατασκευής. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο βασικούς παράγοντες. Αρχικά, κατά την προσομοίωση, ο φορέας δέχεται φορτία τα οποία αναφέρονται σε δυσμενείς συνθήκες φορτίσεων, οι οποίες έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης στην κατασκευή κατά την διάρκεια ζωής της. Αυτό σημαίνει ότι, η κατασκευή είναι πιθανό να μην έχει δεχτεί στην πραγματικότητα τα φορτία με τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι και για αυτό το λόγο να μην έχει οδηγηθεί σε σημαντικές αστοχίες. Επιπλέον, την περίοδο που κατασκευάστηκε το κτίριο δεν υπήρχε μεγάλη εμπειρία σχετικά με τις μεταλλικές κατασκευές και έτσι το κτίριο εμφανίζει αρκετά κατασκευαστικά λάθη. Επίσης, οι κανονισμοί συνεχώς βελτιώνονται, επομένως είναι απολύτως λογικό μια κατασκευή του 1960 να μην ικανοποιεί τους νέους περιορισμούς.

Έπειτα από την ανάλυση και τον έλεγχο του υφιστάμενου κτιρίου, ακολούθησε η αναδιάταξη και ενίσχυση του φορέα, λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα που προέκυψαν στη στατικότητα του φορέα. Με την ανάλυση του νέου ενισχυμένου φορέα και τον έλεγχο επάρκειας των δομικών στοιχείων, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, προέκυψαν τα εξής:

- Με την αφαίρεση των οριζόντιων και κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας και την τοποθέτηση νέων σε περισσότερες θέσεις και με διατομές καλύτερης απόδοσης, όπως είναι οι κοίλες κυκλικές που επιλέχθηκαν, επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός πιο δύσκαμπτου συστήματος. Σε αυτό συνέβαλε και η προσθήκη κεφαλοδοκών στα σημεία όπου δεν υπήρχαν και ήταν απαραίτητες, καθώς επίσης και η αντικατάσταση των παλαιών από νέες καλύτερης διατομής. Οι αλλαγές αυτές στην διάταξη του φορέα φάνηκαν καθοριστικές, καθώς από τους πρώτους κίβλους ελέγχους, χωρίς την εφαρμογή επιπλέον ενισχύσεων στις διατομές, πολλά από τα δομικά στοιχεία ικανοποίησαν τους περιορισμούς των κανονισμών.
- Στα ακραία υποστυλώματα των πλαισίων δεν κρίθηκε απαραίτητη η ενίσχυση της διατομής παρά μόνο στο άνω άκρο των υποστυλωμάτων, όπου η διατομή ήταν μικρότερη και δεν ικανοποιούνταν τοπικά οι έλεγχοι. Επιλέχθηκε η ενίσχυσή της, δημιουργώντας μια νέα διατομή ίδια με εκείνη της βάσης του υποστυλώματος, έτσι ώστε να υπακούει στους περιορισμούς των κανονισμών.
- Στα ενδιάμεσα υποστυλώματα των πλαισίων προέκυψε αδυναμία επάρκειας της διατομής τους κατά τον έλεγχο έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, λόγω της καταπόνησής τους από μεγάλη θλιπτική αξονική δύναμη και καμπτική ροπή. Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί πλευρική εξασφάλιση των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων με τη χρήση δοκού, γεγονός που οδήγησε στην ικανοποίηση των ελέγχων, αφού το ισοδύναμο μήκος λυγισμού μειώθηκε στο μισό. Με αυτόν τον τρόπο, δεν χρειάστηκε περαιτέρω ενίσχυση της διατομής του υποστυλώματος.
- Για τις ακραίες οριζόντιες δοκούς των πλαισίων, λόγω του μεγάλου μήκους τους και της έλλειψης πλευρικών εξασφαλίσεων, προέκυψε απαραίτητη η προσθήκη ελάσματος πάχους 6mm στον κορμό της διατομής τους και η τοποθέτηση γωνιακών ενισχύσεων (haunch) στα σημεία σύνδεσης των δοκών με τα υποστυλώματα. Απαραίτητη προέκυψε, επίσης, η τοποθέτηση συστημάτων άντωσης στα σημεία ύπαρξης των τεγίδων, δηλαδή ανά 0,65m.
- Για τις ενδιάμεσες κεκλιμένες δοκούς των πλαισίων, λόγω του μεγάλου μήκους τους και της έλλειψης πλευρικών εξασφαλίσεων, προέκυψε απαραίτητη η προσθήκη ελάσματος πάχους 6mm στον κορμό της διατομής τους και η τοποθέτηση γωνιακών ενισχύσεων (haunch) στα σημεία

σύνδεσης των δοκών με τα υποστυλώματα. Απαραίτητη προέκυψε, επίσης, η τοποθέτηση συστημάτων άντωσης στα σημεία ύπαρξης των τεγίδων ανά δύο, δηλαδή ανά 1,30m.

Τέλος, κατά την διερεύνηση μετατροπή της κατασκευής, με στόχο την ανάδειξη της βιωσιμότητάς της, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ενός παλαιού βιομηχανικού κτιρίου, αποτελεί από μόνη της ένα βασικό χαρακτηριστικό της βιωσιμότητας των μεταλλικών κατασκευών. Η επαναχρησιμοποίηση ενός κτιρίου είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορούν να προκύψουν πολλά μελλοντικά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ανάγκη κατασκευής ενός νέου κτιρίου. Θα πρέπει λοιπόν, να παροτρύνεται η επαναχρησιμοποίηση των παλαιών μεταλλικών κατασκευών που έχουν σταματήσει να λειτουργούν και η ύπαρξη τους ρυπαίνει το περιβάλλον.
- Η ανακύκλωση των χαλύβδινων στοιχείων, που έχουν φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους, επιτυγχάνει την αποφυγή τοποθέτησής τους στους χώρους υγειονομικής ταφής, μια λύση που δυσχεραίνει το περιβάλλον. Η αξιοποίηση τους, ως πρώτη ύλη, για την παραγωγή νέων δομικών μελών είναι εφικτή, καθώς ο χάλυβας έχει την δυνατότητα να ανακυκλώνεται χωρίς να χάνει την ποιότητα των ιδιοτήτων του.
- Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, μέσω της αντικατάστασης επικαλύψεων με νέα θερμομονωτικά και υγραπομονωτικά υλικά, της χρήση του φυσικού αερίου ως μορφή ενέργειας, η αντικατάσταση των υαλοπινάκων με ενεργειακούς υαλοπίνακες και η τοποθέτηση φωτιστικών τεχνολογίας LED, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στις κατασκευές. Μερικά από αυτά είναι η δημιουργία ενός υγιούς χώρου, η προστασία του περιβάλλοντος και η μείωση του κόστους κατά την λειτουργία του κτιρίου.

### 6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας περί μετατροπής του βιομηχανικού κτιρίου, που προέκυψαν έπειτα από την πραγματοποίηση αναλύσεων και ελέγχων, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα για την σωστή και ασφαλή επαναχρησιμοποίησή του. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζαν οι παρακάτω προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Διερεύνηση της ευστάθειας των μελών με μεταβλητή διατομή, με τη χρήση μη γραμμικών αναλύσεων, με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που προέκυψαν από τις γραμμικές αναλύσεις και τους ελέγχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Λεπτομερής έλεγχος των συνδέσεων, υφιστάμενων και νέων, λόγω του ότι στα σημεία εκείνα υπάρχει συνήθως η μεγαλύτερη φθορά των κτιρίων, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης των τάσεων.
- Λεπτομερής κοστολόγηση του εξοπλισμού, που προτάθηκε για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, με σκοπό της βελτιστοποίηση της σχέσης μεταξύ ποιότητας και κόστους, η οποία πέρα από την περιβαλλοντική βιωσιμότητα θα καθορίσει και την οικονομική βιωσιμότητα του κτιρίου.
- Τέλος, προτείνεται η μελέτη και διερεύνηση μετατροπής κι άλλων παλαιών μεταλλικών κατασκευών που δεν λειτουργούν πια και δεν χρησιμοποιούνται με κανέναν τρόπο, έτσι ώστε να διαμορφωθεί ένα βιώσιμο δομημένο περιβάλλον, επιφέροντας σημαντικά οφέλη τόσο στο περιβάλλον και την οικονομία, όσο και στο σύνολο της κοινωνίας.



## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τ. Γιαννακοπούλου, "Εισαγωγή στις βιώσιμες κατασκευές", Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θράκη, Ελλάδα, 2005.
- [2] <https://www.steelconstruction.info>
- [3] "Βιώσιμη ανάπτυξη και βιωσιμότητα", Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θράκη, Ελλάδα, 2005.
- [4] Γ. Γονιάδης και Μ. Λαμπρίδη, "Εισαγωγή στη βιώσιμη ανάπτυξη", Εγχειρίδιο φοιτητών του μεταπτυχιακού προγράμματος στη Διαχείριση Περιβάλλοντος και τη Βιώσιμη Ανάπτυξη, Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, 2015.
- [5] J. Widman, "Sustainability of steel-framed buildings". Swedish Institute of Steel Construction, SBI, 2005.
- [6] <http://www.sustainableinsteel.eu>
- [7] S. P. Kostova, "Sustainability in Construction", Bachelor's thesis, HAMK University of Applied Sciences, Finland, 2014.
- [8] Κ. Αξαρλή και Β. Μπαμπούρης, "Μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης και πιστοποίησης των κτιρίων (LEED, BREEAM, και CASBEE)", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Ελλάδα, Θεσσαλονίκη.
- [9] Γ. Ζώσης, "Θεώρηση του κύκλου ζωής για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων στην περίπτωση οικοδομικών υλικών και έργων", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ελλάδα, Αθήνα, 2012.
- [10] Ε. Κούτλα, "Σύστημα περιβαλλοντικής αξιολόγησης LEED", Μεταπτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα Διοίκησης και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Ελλάδα, Θεσσαλονίκη, 2015.
- [11] Α. Δ. Φραγκούλη, "Ενεργειακή αναβάθμιση 20<sup>ου</sup> Δημοτικού Σχολείου του Δήμου Αιγάλεω", Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Ελλάδα, Αθήνα, 2012.
- [12] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος και Γ. Ιωαννίδης, "Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα με παραδείγματα εφαρμογής", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2013.
- [13] EN1991-1-3, 2003: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow

loads, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

- [14] EN1991-1-4, 2003: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [15] Ν. Μαλακάτας και Κ. Τρέζος, “Σημειώσεις για την χρήση των Ευροκωδίκων: EN 1990:, Βάσεις σχεδιασμού των φερουσών κατασκευών και EN 1991: Δράσεις επί των κατασκευών”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, ΙΕΚΕΜ-ΤΕΕ, Αθήνα, Ελλάδα, 2011.
- [16] EN1998-1, 2004: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance , Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels, Belgium.
- [17] Ι. Ψυχάρης, “Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας - Τεύχος 1”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα, 2016.
- [18] Ε. Κίρτας και Γ. Παναγόπουλος, “Προσομοίωση κατασκευών σε προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή - Εφαρμογές με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP 2000”, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Σέρρες, Ελλάδα, 2015.