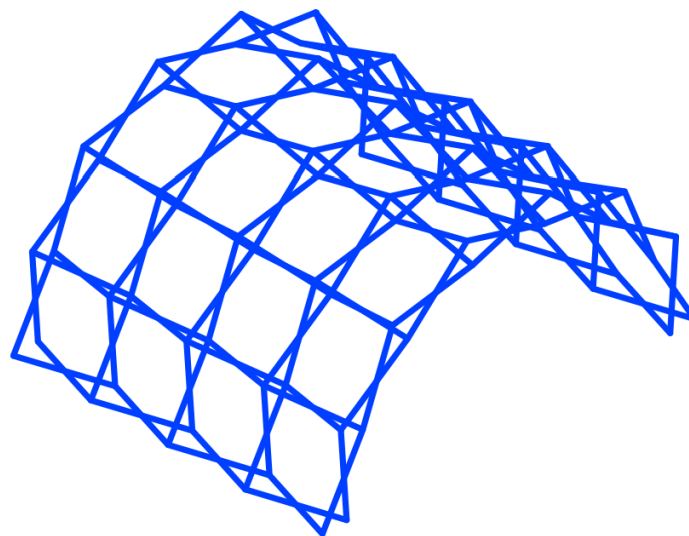




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Πτυσσόμενων Στεγάστρων για Αντιμετώπιση Έκτακτων Αναγκών



Διπλωματική Εργασία
Γεώργιος Δ. Πανταζής

EMK ΔΕ 2022 8

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Πτυσσόμενων Στεγάστρων για Αντιμετώπιση Έκτακτων Αναγκών



Διπλωματική Εργασία
Γεώργιος Δ. Πανταζής

EMK ΔΕ 2022 8

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Copyright © Γεώργιος Δ. Πανταζής, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Georgios D. Pantazis, 2022

All Rights Reserved

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

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

Γεώργιος Δ. Πανταζής (2022)
Σχεδιασμός Πτυσσόμενων Στεγάστρων για Αντιμετώπιση Έκτακτων Αναγκών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2022 8
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Georgios D. Pantazis (2022)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2022 8
Design of Deployable Shelters for Emergency Response
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Acknowledgements

«This research has been supported by the ADDOPTML project: "ADDitively Manufactured OPTimized Structures by means of Machine Learning" (No: 101007595) belonging to the Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) Research and Innovation Staff Exchange (RISE) H2020-MSCA-RISE-2020»

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ολοκληρώνεται ένας ακόμα κύκλος σπουδών, και πραγματοποιείται ένα ακόμα βήμα στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της, αλλά και για την προθυμία του να προσφέρει γνώσεις και συμβουλές σε ζητήματα επιστημονικά και μη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και την αδερφή μου, που στηρίζουν κάθε επιλογή μου, και ιδιαίτερα την Κλεοπάτρα μου, που ήταν μαζί μου σε όλο αυτό το ταξίδι, και σε κάθε ταξίδι.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2022 8

Σχεδιασμός Πτυσσόμενων Στεγαστρων για Αντιμετώπιση Έκτακτων Αναγκών Γεώργιος Δ. Πανταζής

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Ιούλιος 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση πτυσσόμενων στεγαστρων, πηγάζει από την ανάγκη για την ταχύτατη ανέγερση μίας προσωρινής κατασκευής, η οποία θα στεγάσει ανθρώπινες δραστηριότητες ή υπηρεσίες. Τέτοιες κατασκευές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών, όπως φυσικές ή ανθρωπογενείς καταστροφές, για την προσωρινή διαμονή των πληγέντων, ή την παροχή υπηρεσιών αποκατάστασης σε αυτούς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα πτυσσόμενο κυλινδρικό στέγαστρο εσωτερικών διαστάσεων κάτοψης 6.00x5.72m, και μέγιστου εσωτερικού ύψους 3.00m, του οποίου ο φορέας αποτελείται από ραβδωτά ψαλιδωτά στοιχεία από αλουμίνιο. Βασικό αντικείμενο μελέτης, αποτέλεσε η διαστασιολόγηση των ψαλιδωτών στοιχείων αλλά και των χαλύβδινων κόμβων μεταξύ αυτών. Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η συνδεσμολογία μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων, αλλά και οι εκκεντρότητες που εισάγονται στο στατικό σύστημα λόγω των διατομών τους, και των διαστάσεων των κόμβων, η διαστασιολόγηση του φορέα πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση των ραβδωτών στοιχείων μέσω μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού (GMNA), στο λογισμικό ADINA [5]. Η προσομοίωση ψαλιδωτών στοιχείων του φορέα έγινε μέσω γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων δοκού, ενώ έγινε η θεώρηση άκαμπτων κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων, οι οποίοι εισήχθησαν στο προσομοίωμα μέσω των περιοριστικών εξισώσεων του λογισμικού. Κατά το στάδιο αυτό, κρίθηκε αναγκαία η προσομοίωση ενός συστήματος δυσκαμψίας μέσω καλωδιωτών στοιχείων μικρής διαμέτρου, για την παραλαβή φορτίων κατά τη διαμήκη διεύθυνση του στεγαστρου, λόγω της ευκαμψίας του φορέα στη διεύθυνση αυτή.

Στη συνέχεια έγινε διερεύνηση της επιρροής των γεωμετρικών ατελειών στη συμπεριφορά του φορέα, μέσω μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA). Σαν σχήμα αρχικών ατελειών χρησιμοποιήθηκαν οι απαραίτητες ιδιομορφές λυγισμού, που προέκυψαν από γραμμικές αναλύσεις λυγισμού που προηγήθηκαν.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση τριών χαλύβδινων κόμβων, μέσω επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων σε διάταξη σταυρού, και η προσομοίωση των κοχλιών σύνδεσης μέσω γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων δοκού, και σχολιάστηκε η επιρροή τους στη συμπεριφορά του φορέα, σε σχέση με το αρχικό προσομοίωμα.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2022 8

Design of Deployable Shelters for Emergency Response **Georgios D. Pantazis**

Supervisor: Professor Charis Gantes
July 2022

ABSTRACT

The need for the design and implementation of deployable shelters stems from the necessity for the rapid erection of a temporary structure, in order to house human activities or services. These constructions are particularly useful in cases of emergency, such as natural or man-made disasters, for the temporary accommodation of the affected, or the provision of rehabilitation services to them.

In this thesis, a deployable cylindrical canopy with internal dimensions of 6.00x5.72m plan view, and a maximum internal height of 3.00m, whose structural system consists of scissor - like elements, was studied. The main object of the study was the design of the scissor elements, and the steel joints between them. Due to the complexity presented by the connections between the scissor elements, and the eccentricities introduced into the static system due to their cross-sections, and the dimensions of the joints, the design of the structure was carried out in three stages.

Initially, the design of the scissor - like elements was carried out through Nonlinear Geometry and Material Analysis (GMNA), in the ADINA software [5]. The scissor elements were simulated using linear beam finite elements, while rigid links between the scissor elements were considered, which were added into the simulation through the software's constraint equations. During this stage, it was considered necessary to simulate a bracing system through small diameter cable elements, to receive external loads in the longitudinal direction of the roof, due to the flexibility of the structure in this direction.

Subsequently, the influence of geometric imperfections on the structural system behaviour was investigated through Nonlinear Geometry and Material Analysis with Imperfections (GMNIA). The necessary buckling modes, obtained from previous Linear Buckling Analyses, were used as an initial imperfection shape.

Finally, the simulation of three steel joints, through surface finite elements in a cruciform arrangement, and the simulation of the connection bolts through linear beam finite elements were carried out, and their influence on the behaviour of the structure, in relation to the original simulation, was discussed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	7
1.1	ΓΕΝΙΚΑ	7
1.2	ΜΕΜΒΡΑΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	8
1.3	ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	10
1.4	ΑΝΑΔΙΠΛΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	11
1.5	ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΨΑΛΙΔΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	12
1.5.1	Ψαλιδωτά στοιχεία	13
1.5.2	Επικαλύψεις ψαλιδωτών κατασκευών	14
2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	17
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	17
2.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΟΡΕΑ	17
2.3	ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΨΑΛΙΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	19
3	ΔΡΑΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	23
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
3.2	ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ	23
3.2.1	Ίδιο βάρος ραβδωτών στοιχείων	23
3.2.2	Ίδιο βάρος συνδέσεων	24
3.2.3	Ίδιο βάρος επικάλυψης	24
3.2.4	Ίδιο βάρος συρματόσχοινων	24
3.3	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ	24
3.3.1	Φορτίο χιονιού	24
3.3.1.1	Συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού μ_i	25
3.3.1.2	Συντελεστής έκθεσης C_e και θερμικός συντελεστής C_t	25
3.3.1.3	Χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους s_k	26
3.3.1.4	Φορτίο χιονιού και προσομοίωση	27
3.3.2	Δράσεις ανέμου	28
3.3.2.1	Εξωτερική πίεση w_e	28
3.3.2.2	Εσωτερική πίεση w_i	28
3.3.2.3	Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$	28
3.3.2.4	Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe}	30
3.3.2.5	Συντελεστής εσωτερικής πίεσης c_{pi}	35
3.3.2.6	Επαλληλία πιέσεων	35
3.3.2.7	Υπολογισμός δράσης ανέμου για το στέγαστρο που μελετάται	36
3.4	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ	42
3.4.1	Οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)	42

3.4.2	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ).....	43
3.4.3	Επιμέρους συντελεστές και συντελεστές συνδυασμού	43
3.4.4	Συνδυασμοί δράσεων	44
4	ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ ΨΑΛΙΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	47
4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	47
4.2	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ.....	48
4.2.1	Σχεδιασμός γεωμετρίας προσομοιώματος.....	48
4.2.2	Ραβδωτά στοιχεία	49
4.2.3	Προσομοίωση συστήματος δυσκαμψίας από καλωδιωτά στοιχεία	50
4.2.4	Προσομοίωση κόμβων και συνδεσμολογίας.....	50
4.2.5	Δράσεις επί της κατασκευής.....	52
4.2.6	Υλικό ραβδωτών στοιχείων	54
4.3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ	55
4.3.1	Προσομοίωση και γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόμβων	55
4.3.2	Υλικό κόμβων και κοχλιών	57
4.4	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	57
4.4.1	Τύποι αναλύσεων.....	58
4.4.1.1	Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)	58
4.4.1.2	Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας	58
4.4.1.3	Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)	58
5	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΟΡΕΑ.....	59
5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	59
5.2	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	59
5.2.1	Οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)	59
5.2.2	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ).....	60
5.3	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΛΩΝ	60
5.4	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	61
5.4.1	Παράμετρος λυγηρότητας	61
5.4.2	Κατάταξη διατομών κατά EN1999	64
5.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	65
5.5.1	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ).....	65
5.5.2	Οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)	67
5.5.2.1	Συνδυασμός φόρτισης ULS_LC3: Άνεμος κατά Χ	68
5.5.2.2	Συνδυασμός φόρτισης ULS_LC6: Άνεμος κατά Υ	75
5.6	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	78
5.6.1	Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων λυγισμού (LBA)	78
5.6.2	Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA).....	80
5.7	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	82

5.7.1 Προσομοίωση κόμβου και συνδεσμολογίας	82
5.7.2 Επιρροή της προσομοίωσης των χαλύβδινων κόμβων στη συμπεριφορά του φορέα ..	85
5.7.3 Συμπεριφορά χαλύβδινου κόμβου	95
5.8 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ	96
5.8.1 Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις κοχλίων	97
5.8.2 Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας	98
5.8.3 Αντοχή σε διάτμηση του κοχλία	99
5.8.4 Αντοχή διατομών των μελών σε εφελκυσμό	99
5.9 ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	100
5.9.1 Ράβδοι αλουμινίου ψαλιδωτών στοιχείων	101
5.9.2 Χαλύβδινοι κόμβοι	102
5.9.3 Κοχλίες, ροδέλες και περικόχλια	102
5.9.4 Συρματόσχοινα και εξαρτήματα συστήματος δυσκαμψίας	103
5.9.5 Μεμβράνη επικάλυψης	103
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
6.2 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ	106
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΩ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ MATLAB	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ	115
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ULS_LC3: Άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση	115
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ULS_LC6: Άνεμος κατά τη διαμήκη διεύθυνση	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ	119

1 ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι πτυσσόμενες κατασκευές, είναι κατασκευές οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το σχήμα τους από μία κλειστή, σε μία ανοικτή μορφή. Ως κλειστή μορφή, λογίζεται η κατάσταση της κατασκευής, στην οποία είναι δυνατή η αποθήκευση ή η μεταφορά της από το χώρο αποθήκευσης, στο χώρο ανέγερσης. Αντίθετα, ως ανοικτή μορφή λογίζεται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η κατασκευή μετά την ανέγερση, και για όσο χρόνο χρησιμοποιείται. Κατά τη διάρκεια της ζωής της, μία πτυσσόμενη κατασκευή μπορεί να μεταβεί από την κλειστή στην ανοικτή μορφή, και αντίστροφα, πολλές φορές.

Ανάλογα με το στατικό τους σύστημα, οι πτυσσόμενες κατασκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στους εξής τύπους [6]:

- Μεμβρανικές κατασκευές
- Πνευματικές κατασκευές
- Αναδιπλούμενες κατασκευές
- Ψαλιδωτές κατασκευές

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τέτοιων κατασκευών, ποικίλουν σε σχέση με τις συμβατικές κατασκευές. Βασικό πλεονέκτημα των πτυσσόμενων κατασκευών, είναι η δυνατότητά τους να μεταφέρονται από ένα σημείο σε ένα άλλο, η ταχύτατη ανέγερση αλλά και αποσυναρμολόγησή τους, και ο μεγάλος λόγος του όγκου κατά την ανοικτή μορφή, προς τον όγκο στην κλειστή μορφή. Αντίθετα, τα κύρια μειονεκτήματα των πτυσσόμενων κατασκευών, είναι η πολυπλοκότητα και το κόστος της ανάλυσης και διαστασιολόγησής τους [6].

Λόγω του πλεονεκτήματος της μεταφοράς και της ταχύτητας ανέγερσης, οι πτυσσόμενες κατασκευές χρησιμοποιούνται κυρίως για προσωρινές περιστάσεις, όπως για την στέγαση προσωρινών υπαίθριων εκθέσεων, ως καταφύγια ή σημεία αποκατάστασης σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών κ.λπ. (Εικόνα 1-1).

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται σύντομη περιγραφή των τεσσάρων τύπων πτυσσόμενων κατασκευών, με ιδιαίτερη έμφαση στις ψαλιδωτές κατασκευές, που είναι το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 1-1: Πτυσσόμενη κατασκευή για την προσωρινή στέγαση Κινητής Μονάδας Υγείας του ΕΟΔΥ, για την εκτέλεση test Covid-19 [www.news.gr]

1.2 ΜΕΜΒΡΑΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι μεμβρανικές κατασκευές είναι εξαιρετικά ελαφριά συστήματα τα οποία μπορούν να παραλάβουν σημαντικά φορτία, όταν είναι κυρτές και προεντεταμένες. Τέτοια συστήματα είναι οι απλές τέντες από φύλλα πολυαιθυλενίου (μουςαμάδες), και οι σκηνές.

Τα φύλλα πολυαιθυλενίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία από τη βροχή ή τη σκίαση κάποιου υπαίθριου χώρου (Εικόνα 1-2), για την προστασία δεξαμενών, τη συλλογή βρόχινου νερού, την επικάλυψη ανεμοφρακτών. Ως μέλος συστημάτων στέγασης, αποτελούν μία άμεση και με χαμηλό κόστος λύση και διατίθενται στο εμπόριο σε πακέτα, τα οποία περιλαμβάνουν κάποια δομικά μέλη και εργαλεία στερέωσης. Παρόλα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αυτοσχέδια μέλη και εργαλεία για τη στερέωση των φύλλων, έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα [23].



Εικόνα 1-2: Τέντα από φύλλο πολυαιθυλενίου για σκίαση στην υπαίθρο [www.lazada.com]

Οι σκηνές είναι ελαφριές κατασκευές αποτελούμενες από ένα μεταλλικό σκελετό, ο οποίος καλύπτεται από προεντεταμένες συνθετικές μεμβράνες (Εικόνα 1-3). Η χρήση τους αφορά αποκλειστικά τη στέγαση ανθρώπων, είτε σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών, ως καταφύγια έπειτα από καταστροφικά φυσικά φαινόμενα (σεισμοί, πλημμύρες κ.λπ.), είτε για λόγους αναψυχής (διαμονή στην ύπαιθρο κ.α.). Πρόκειται για μεμβρανικές κατασκευές οι οποίες υπερτερούν έναντι των απλών φύλλων πολυαιθυλενίου, λόγω της σταθερότητας της οποίας προσφέρει ο μεταλλικός σκελετός που διαθέτουν, αλλά και της επιπλέον προστασίας που παρέχουν οι περιμετρικές μεμβράνες.



Εικόνα 1-3: «Οικογενειακή» σκηνή κατασκευασμένη από χαλύβδινο σκελετό, με επικάλυψη από συνθετική μεμβράνη [www.alpinter.com]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων κατασκευών, αποτελούν «οικογενειακές» σκηνές της εταιρίας ALPINTER SA [18]. Πιο συγκεκριμένα, η σκηνή «RED Tent» (Εικόνα 1-4), είναι μία μεμβρανική κατασκευή που μπορεί να μεταφερθεί με ευκολία, καθώς ζυγίζει μόλις 30 κιλά, και οι διαστάσεις της στην κλειστή μορφή είναι 115x40x40cm. Στην ανοικτή μορφή, οι διαστάσεις της σκηνής είναι 380x380cm και το ύψος στο κέντρο 260cm, πράγμα που σημαίνει ότι ο όγκος στην ανοικτή μορφή είναι περίπου 200 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με την κλειστή.



Εικόνα 1-4: Φάσεις ανέγερσης και ανοικτή μορφή σκηνής «RED Tent» [www.alpinter.com]

1.3 ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Με τον όρο «πνευματικές», καλούνται οι κατασκευές που αποτελούνται από λεπτά μεμβρανικά στοιχεία, τα οποία εντύνονται μέσω συμπιεσμένου αέρα που βρίσκεται εντός αυτών. Στις περισσότερες περιπτώσεις τέτοιων κατασκευών, είναι απαραίτητη η περιοδική αναπλήρωση του αέρα, μέσω εξωτερικών πηγών.

Κύριο πλεονέκτημα τέτοιων κατασκευών, είναι το γεγονός ότι ο όγκος που καταλαμβάνουν κατά την κλειστή μορφή τους είναι πολύ μικρός, και προσφέρουν τη δυνατότητα της εύκολης και γρήγορης ανέγερσης, καθώς και αποσυναρμολόγησης. Τέλος, δίνουν στο σχεδιαστή την ευχέρεια της δημιουργίας διάφορων σχημάτων, πράγμα που καθιστά την κάθε πνευματική κατασκευή μοναδική.

Οι πνευματικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται ως καταφύγια σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών, έχουν κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεμβρανικές κατασκευές με το σημαντικότερο να είναι το γεγονός ότι το κόστος τους δεν είναι αμελητέο σε σχέση με αντίστοιχες μεμβρανικές κατασκευές. Επιπλέον, το σχήμα τους, καθώς και η αντοχή τους σε εξωτερικά φορτία, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαφορά της εξωτερικής πίεσης (φορτία ανέμου, χιονιού) με την εσωτερική πίεση (συμπιεσμένος αέρας), η οποία είναι μεταβαλλόμενη. Τέλος, οι επιφάνειες των μεμβρανών θα πρέπει να είναι προστατευμένες από καταστροφές που οφείλονται στο εξωτερικό περιβάλλον, καθώς οποιαδήποτε φθορά σε αυτές θα μπορούσε να προκαλέσει από απώλεια ικανότητας παραλαβής εξωτερικών φορτίων, έως και κατάρρευση [21].

Στην Εικόνα 1-5, παρουσιάζεται μία πνευματική κατασκευή η οποία σχεδιάστηκε από τους Hariri Pontarini Architects στο Οντάριο του Καναδά, για τη στέγαση πολιτιστικών δραστηριοτήτων. Η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελείται από φουσκωτά τόξα, τα οποία συνδέονται μέσω μεμβρανών στη διαμήκη διεύθυνση. Οι παράμετροι που οδήγησαν τους αρχιτέκτονες στην επιλογή του συγκεκριμένου δομικού συστήματος, ήταν ο περιορισμένος χρόνος ανέγερσης αλλά και η δυσκολία στην κατασκευή θεμελίωσης μεγάλου όγκου [20].



Εικόνα 1-5: Ontario Celebration Zone, πνευματική κατασκευή στο Οντάριο του Καναδά [www.blackwell.ca]

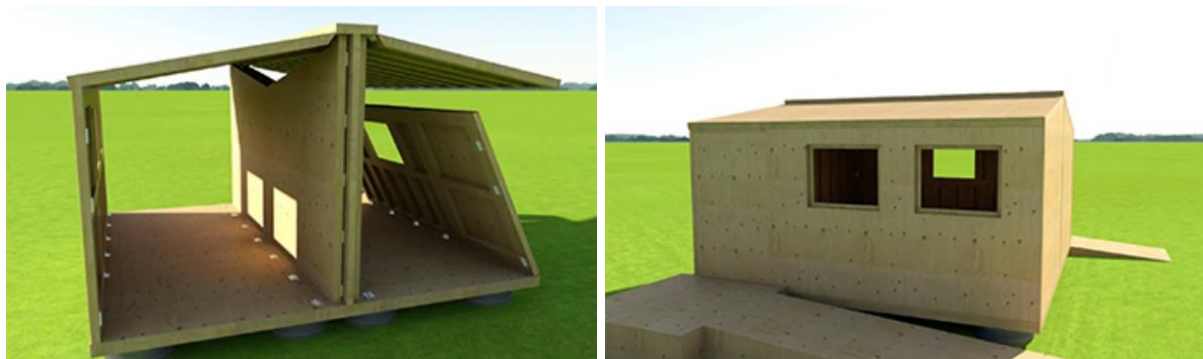


Εικόνα 1-6: Ontario Celebration Zone - λεπτομέρεια θεμελίωσης [Doron Meinhard]

1.4 ΑΝΑΔΙΠΛΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι αναδιπλούμενες κατασκευές αποτελούνται από μία σειρά επιφανειακών στοιχείων, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους μέσω συνεχών αρθρώσεων, επιτρέποντας τη σχετική στροφή των επιφανειών γύρω από τον άξονα των συνδεόμενων ακμών. Όλες οι επιφάνειες μπορούν να διπλωθούν σε μία επίπεδη στοίβα, και να ξεδιπλωθούν σε μία τρισδιάστατη κατασκευή. Οι κατασκευές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα ελαφριές ούτε οικονομικές σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους πτυσσόμενων κατασκευών που περιγράφηκαν, παρόλα αυτά έχουν το πλεονέκτημα της γρήγορης ανέγερσης και της άμεσης χρήσης, καθώς μετά την αναδίπλωσή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς την προσθήκη επιπλέον στοιχείων [21].

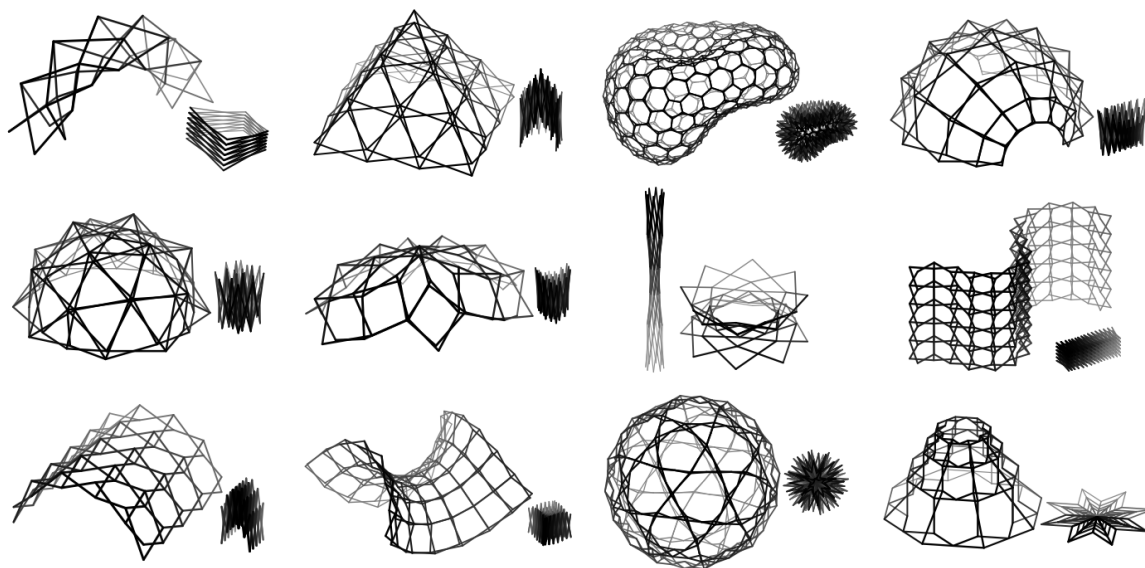
Το 2015, η Extremis Technology σχεδίασε ένα φορητό αναδιπλούμενο καταφύγιο για περιπτώσεις έκτακτων αναγκών, το οποίο είναι γνωστό με το όνομα «Hush» (Εικόνα 1-7). Η ανέγερση του Hush μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μόλις 30-60 λεπτά από ένα μη έμπειρο εργάτη, και δεν απαιτεί τη χρήση επιπλέον μελών ή εργαλείων. Το προϊόν αυτό αποτελεί εφεύρεση, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή προστασίας σε σεισμογενείς περιοχές, και επιπλέον είναι κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από υλικά φιλικά προς το περιβάλλον [21].



Εικόνα 1-7: Καταφύγιο Hush [Extremis Technology]

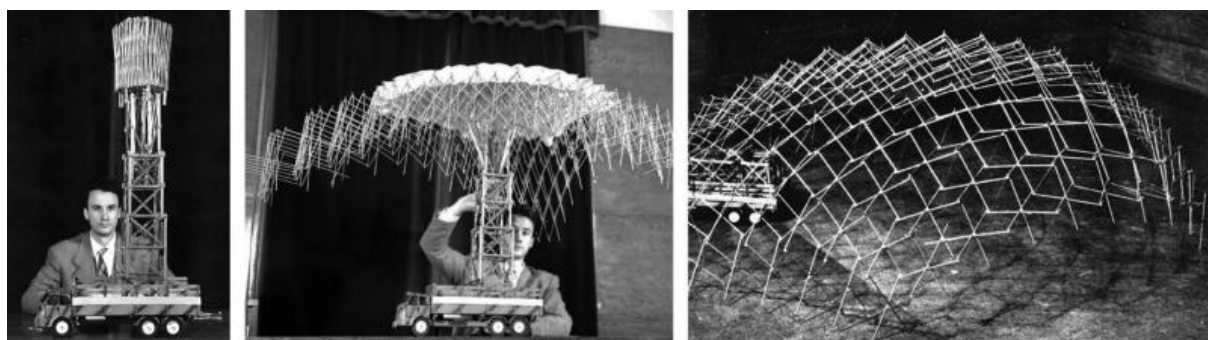
1.5 ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΨΑΛΙΔΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι πτυσσόμενες ψαλιδωτές κατασκευές αποτελούνται από πλέγματα ραβδωτών στοιχείων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το σχήμα και τον όγκο τους σε πολύ λίγο χρόνο. Τα περισσότερα ψαλιδωτά πλέγματα μεταβάλλουν το σχήμα τους από ένα φορητό όγκο ράβδων σε μία διευρυμένη λειτουργική κατασκευή, χρήσιμη για τη στέγαση δραστηριοτήτων προσωρινού χαρακτήρα. Η ανέγερση τέτοιων κατασκευών, μπορεί να γίνει εύκολα και γρήγορα, χωρίς την απαίτηση ιδιαίτερων μέσων και δεξιοτήτων. Μετά τη χρήση τους μπορούν ταχύτατα να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση και να αποθηκευτούν, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ξανά στο μέλλον [17].



Σχήμα 1-1: Διάφορες μορφές πτυσσόμενων ψαλιδωτών πλεγμάτων σε δύο φάσεις αναδίπλωσης [K Roovers, 2017]

Η γεωμετρία και η «κίνηση» του φορέα κατά την αναδίπλωση, εξαρτάται από τη γεωμετρία των ψαλιδωτών στοιχείων από τα οποία αποτελείται, δηλαδή από τη μορφή και τον τρόπο σύνδεσης των ράβδων των πλεγμάτων ανά δύο. Θεμελιώδη παραδείγματα πτυσσόμενων ψαλιδωτών κατασκευών αποτελούν το κινητό θέατρο που σχεδιάστηκε από τον Pinero το 1961 (Εικόνα 1-8), και το πτυσσόμενο στέγαστρο της πισίνας της Σεβίλλης, που σχεδιάστηκε από τον Escrig το 1993 (Εικόνα 1-9) [21].



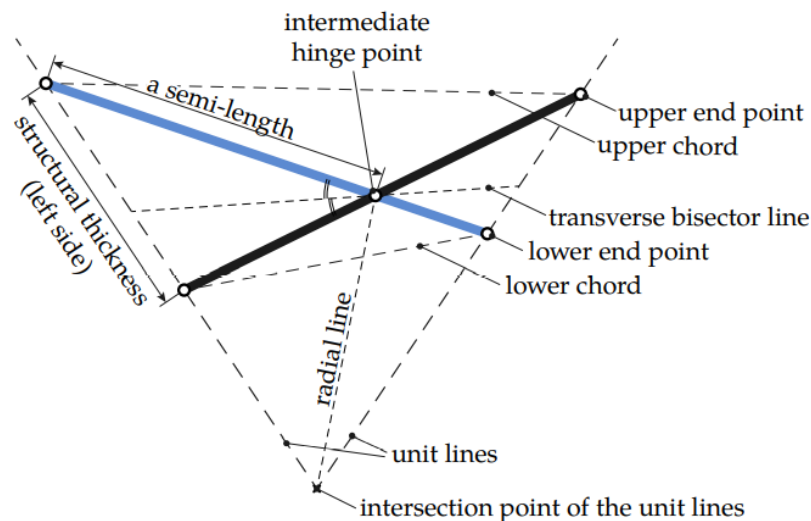
Εικόνα 1-8: Κινητό θέατρο του Pinero, αναδίπλωση του προσομοιώματος [Escrig, 2012]



Εικόνα 1-9: Πτυσσόμενο στέγαστρο της πισίνας της Σεβίλλης [Escrig, 2012]

1.5.1 Ψαλιδωτά στοιχεία

Τα ψαλιδωτά στοιχεία (scissor units ή scissor like elements – SLE), αποτελούνται από δύο ραβδωτά στοιχεία τα οποία συνδέονται αρθρωτά σε ένα ενδιάμεσο σημείο (intermediate hinge point). Η σύνδεση των δύο ράβδων είναι τέτοια έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ελευθερία της σχετικής στροφής γύρω από τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδό τους, με ταυτόχρονη δέσμευση όλων των υπόλοιπων βαθμών ελευθερίας.

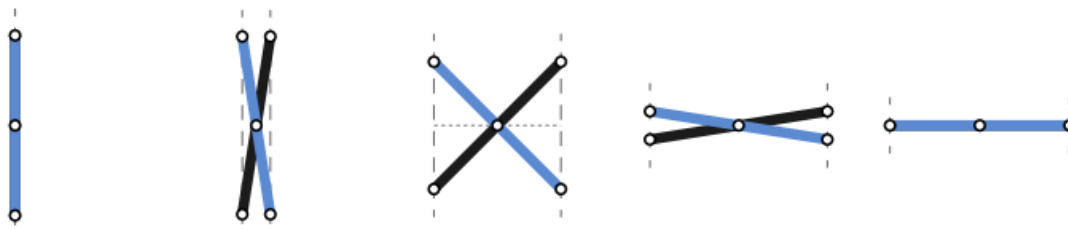


Σχήμα 1-2: Γενική μορφή ψαλιδωτού στοιχείου [Roovers, 2017]

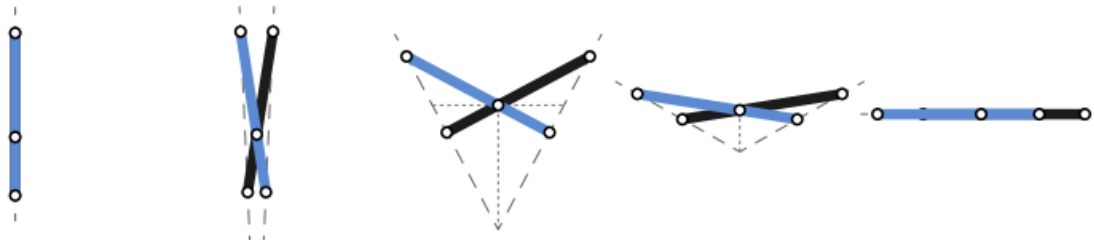
Στο Σχήμα 1-2 παρουσιάζεται η γενική μορφή ενός ψαλιδωτού στοιχείου. Ανάλογα με τη γεωμετρία των ράβδων και τη θέση του ενδιάμεσου σημείου σύνδεσης, η λειτουργία του κάθε ψαλιδωτού στοιχείου μπορεί να είναι διαφορετική, δίνοντας στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να αποδώσει διάφορες μορφές στην κάθε ψαλιδωτή κατασκευή, ανάλογα με τις γεωμετρικές απαιτήσεις τόσο του αναδιπλωμένου φορέα, όσο και του κλειστού, ή ακόμα και του τρόπου «κίνησης» κατά την αναδίπλωση.

Η θέση του ενδιάμεσου σημείου σύνδεσης αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο που καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του ψαλιδωτού στοιχείου, καθώς από αυτή καθορίζονται τα μήκη των δύο τμημάτων στα οποία χωρίζεται η κάθε ράβδος (semi – length) και κατ' επέκταση το βαθμό σύγκλισης των αξόνων που περνούν από τα άκρα των δύο ράβδων (unit lines). Στην περίπτωση που οι άξονες αυτοί παραμένουν παράλληλοι σε κάθε φάση αναδίπλωσης, το ψαλιδωτό στοιχείο κατατάσσεται στην κατηγορία των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων (translational scissor units), που αποτελεί την απλούστερη κατηγορία (Σχήμα 1-3). Αντίθετα, εάν οι άξονες των ακραίων κόμβων συγκλίνουν και

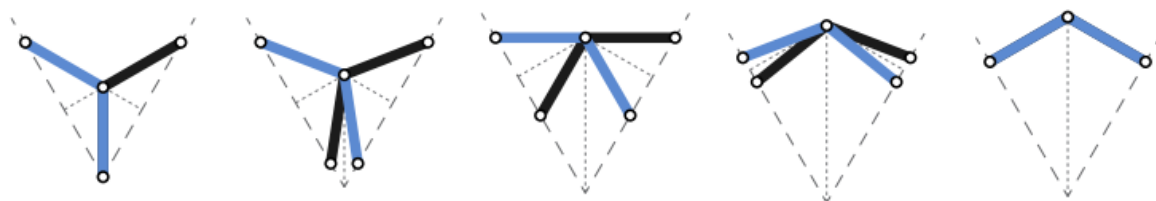
τέμνονται σε κάποιο σημείο (intersection point of the unit lines), τότε το ψαλιδωτό στοιχείο κατατάσσεται στην κατηγορία των πολικών ψαλιδωτών στοιχείων (polar scissor units), εάν οι ράβδοι είναι ευθύγραμμες (Σχήμα 1-4), ή στην κατηγορία των γωνιωδών ψαλιδωτών στοιχείων (angular scissor units) εάν οι δύο ράβδοι είναι τεθλασμένες (Σχήμα 1-5).



Σχήμα 1-3: Φάσεις αναδίπλωσης μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων [Roovers, 2017]



Σχήμα 1-4: Φάσεις αναδίπλωσης πολικών ψαλιδωτών στοιχείων [Roovers, 2017]



Σχήμα 1-5: Φάσεις αναδίπλωσης γωνιωδών ψαλιδωτών στοιχείων [Roovers, 2017]

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται οι βασικές κανονικές μορφές των ψαλιδωτών στοιχείων που κατατάσσονται στις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν. Σημειώνεται ότι για κάθε κατηγορία υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης μη κανονικών σχηματισμών, οι οποίοι παρέχουν μεγαλύτερη ποικιλία τόσο στην τελική μορφή της κατασκευής, όσο και στην «κίνηση» της αναδίπλωσης, οι οποίοι ωστόσο υπακούν στον κανόνα της παραλληλίας η μη των αξόνων των ακραίων κόμβων που αναφέρθηκε παραπάνω.

1.5.2 Επικάλυψις ψαλιδωτών κατασκευών

Ως επικάλυψη τέτοιων κατασκευών, χρησιμοποιούνται κυρίως εφελκόμενες μεμβράνες, οι οποίες εκτός από μέσο επικάλυψις, συμμετέχουν ενεργά στη δυσκαμψία της κατασκευής και την παραλαβή φορτίων, μέσω της εφελκυστικής τους αντοχής.



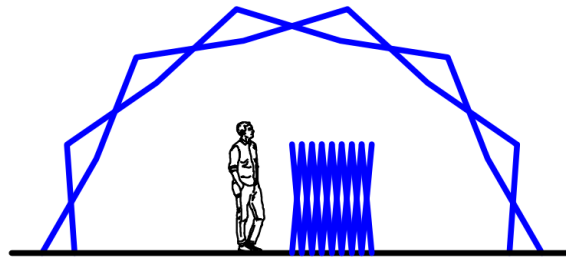
Εικόνα 1-10: Επικάλυψη στεγάστρου μέσω εφελκόμενων μεμβρανών [www.alm-tmsl.com]

Τέτοιου είδους μεμβράνες, αποτελούνται από ένα πλεκτό ύφασμα, το οποίο επικαλύπτεται από συνθετικά πολυμερή. Η αντοχή και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μεμβρανών καθορίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη σύσταση των πλεκτών υφασμάτων, ενώ οι στρώσεις των πολυμερών ενισχύουν την αντοχή τους στο χρόνο, αφού λειτουργούν ως προστασία από φθορές, και τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους (αδιαβροχοποίηση, ανακλαστικότητα κ.α.). Τα υφάσματα μπορεί να συντίθενται από νήματα πολυεστέρα, ή υαλονήματα, σε διάφορα μοτίβα ύφανσης, ενώ το υλικό επίστρωσης είναι από πολυβινυλχλωρίδιο (PVC), ή πολυτετραφθοροαιθυλενίο (PTFE). Το βάρος των εφελκόμενων μεμβρανών ποικίλει, ανάλογα με την κατηγορία αντοχής τους.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

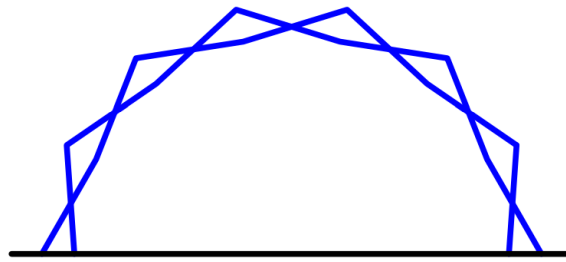
Ο φορέας του στεγάστρου που μελετήθηκε, κατατάσσεται στην κατηγορία των πτυσσόμενων ψαλιδωτών κατασκευών. Βασική ιδέα για την επιλογή αυτού του δομικού συστήματος αποτέλεσε η δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς, και η ταχύτητα ανέγερσης σε περίπτωση έκτακτων αναγκών, με χρήση απλού εξοπλισμού. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται συνοπτική περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του φορέα, τόσο σε ό,τι αφορά τις διαστάσεις και τον αριθμό των ψαλιδωτών στοιχείων, όσο και στη γεωμετρία των στοιχείων μέσω των οποίων συνδέονται.



Σχήμα 2-1: Σύγκριση όγκου ανοικτής και κλειστής θέσης

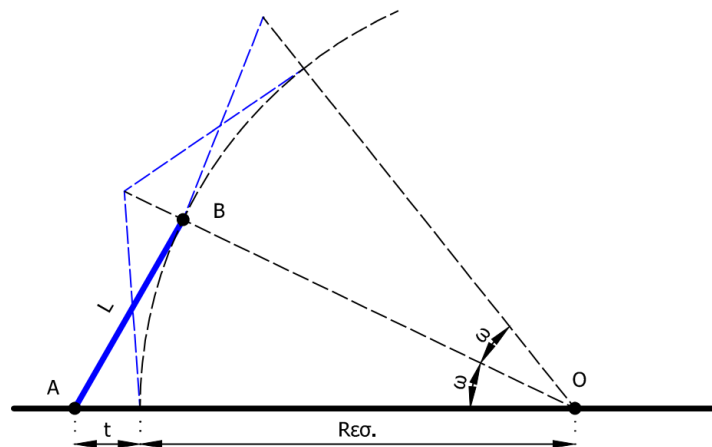
2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΟΡΕΑ

Ο φορέας που μελετήθηκε αποτελείται από ημικυκλικά τόξα στην εγκάρσια διεύθυνση, τα οποία αποτελούνται από πολικά ψαλιδωτά στοιχεία, και συνδέονται μέσω μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Βασικός περιορισμός για το σχεδιασμό των ψαλιδωτών στοιχείων ήταν το ίδιο μήκος για όλες τις ράβδους που θα χρησιμοποιηθούν, παράμετρος που αποτελεί βέλτιστη λύση για τη μείωση του όγκου της κατασκευής κατά την αποθήκευση. Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός τυπικού τόξου.



Σχήμα 2-2: Σκαριφηματική αποτύπωση επίπεδου τόξου αποτελούμενου από 7 πολικά ψαλιδωτά στοιχεία (polar SLE)

Ο σχεδιασμός της βασικής γεωμετρίας ξεκίνησε από τον καθορισμό της εσωτερικής ακτίνας του τόξου της κατασκευής, ήτοι 3.00m. Στη συνέχεια προσδιορίστηκε το κατασκευαστικό πάχος (structural thickness), δηλαδή το πάχος του κάθε τόξου στην ανοικτή μορφή (0.45m), και ο αριθμός των ψαλιδωτών στοιχείων σε κάθε τόξο, ίσος με επτά (7). Οι παράμετροι αυτές καθορίστηκαν ως εύλογα γεωμετρικά μεγέθη έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση [11], και είναι αρκετές για τον προσδιορισμό του μήκους των ράβδων των ψαλιδωτών στοιχείων και κατ' επέκταση της γεωμετρίας της κατασκευής.



Σχήμα 2-3: Υπολογισμός μήκους ραβδωτών στοιχείων

Για τον υπολογισμό του μήκους των ραβδωτών στοιχείων, αρκεί η εφαρμογή του νόμου συνημιτόνων, στο τρίγωνο AOB (Σχήμα 2-3) ως εξής:

$$L = \sqrt{R_{\varepsilon\sigma.}^2 + (R_{\varepsilon\sigma.} + t)^2 - 2 \cdot R_{\varepsilon\sigma.} \cdot (R_{\varepsilon\sigma.} + t) \cdot \cos(\omega)} \quad (2-1)$$

Όπου:

L είναι το μήκος των ράβδων.

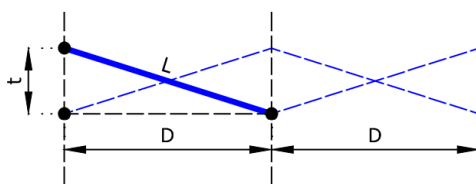
$R_{\varepsilon\sigma.}$ είναι η εσωτερική ακτίνα του στεγάστρου.

t είναι το κατασκευαστικό πάχος του στεγάστρου.

ω είναι η γωνία που σχηματίζουν οι άξονες που περνούν από τα άκρα των ράβδων ενός ψαλιδωτού στοιχείου (unit lines) στην ανοικτή θέση της κατασκευής.

Εφαρμόζοντας τη Σχέση (2-1) για $R_{\varepsilon\sigma.}=3.00\text{m}$, $t=0.45\text{m}$ και $\omega=180^\circ/7$ (για 7 ψαλιδωτά στοιχεία ανά τόξο), προκύπτει το μήκος των ράβδων $L=1.50\text{m}$.

Με δεδομένο το παραπάνω μήκος και για τις ράβδους των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων στην εγκάρσια διεύθυνση, προκύπτει η απόσταση των τόξων κατά την ανοικτή θέση του στεγάστρου.



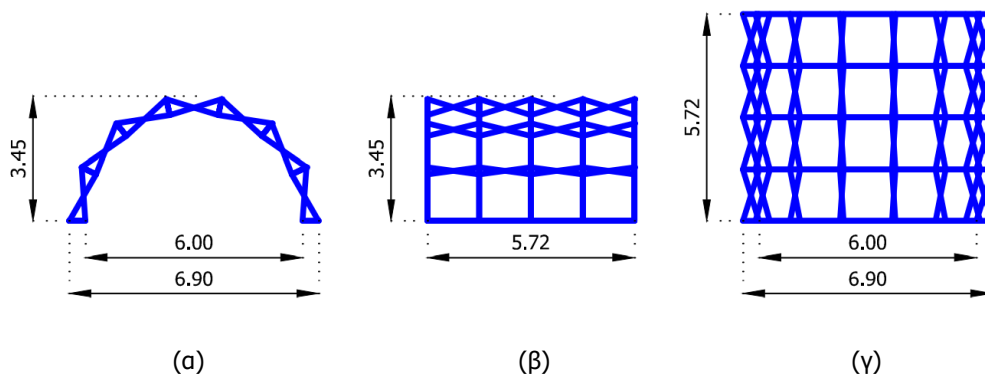
Σχήμα 2-4: Υπολογισμός απόστασης εγκάρσιων τόξων

Με εφαρμογή του πυθαγόρειου θεωρήματος στα τρίγωνα που δημιουργούνται στο Σχήμα 2-4, η απόσταση D των εγκάρσιων τόξων κατά την ανοικτή θέση του στεγάστρου, δίνεται από τη Σχέση (2-2) και ισούται με 1.43m. Βάσει της απόστασης αυτής επιλέχθηκε ο αριθμός των τόξων να ισούται με πέντε (5), έτσι ώστε το μήκος του στεγάστρου στη διαμήκη διεύθυνση να αντιστοιχεί σε $4 \times 1.43 = 5.72\text{m}$.

$$D = \sqrt{L^2 - t^2} = \sqrt{1.50^2 - 0.45^2} \rightarrow D = 1.43\text{m} \quad (2-2)$$

Συνοψίζοντας, η γεωμετρία του στεγάστρου που μελετήθηκε χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη, που αφορούν την ανοικτή μορφή του:

- Εσωτερικό ύψος στεγάστρου: 3.00m.
- Εσωτερικές διαστάσεις κάτοψης: 6.00x5.72m.
- Πάχος στεγάστρου: 0.45m.
- Μήκος ραβδωτών στοιχείων: 1.50m.



Σχήμα 2-5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά στην εγκάρσια (α) και τη διαμήκη (β) διεύθυνση. Κάτοψη στεγάστρου (γ)

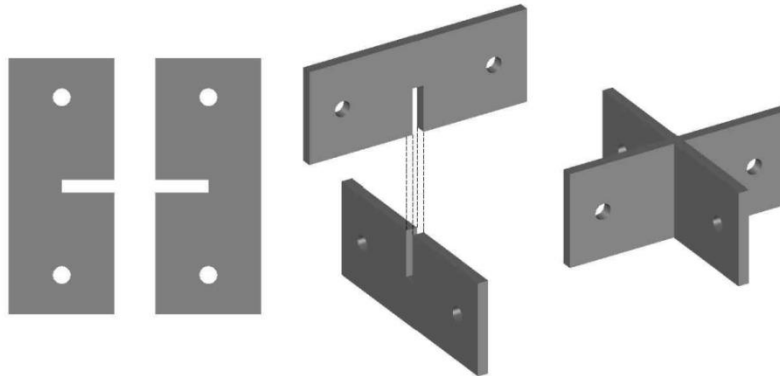
Σημειώνεται ότι στην παρούσα φάση, ως μήκος ραβδωτών στοιχείων λογίστηκε το μήκος των ράβδων μεταξύ των κέντρων βάρους των κόμβων, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι εκκεντρότητες που οφείλονται στη διατομή των ράβδων αλλά και στη γεωμετρία των ίδιων των κόμβων. Το τελικό μήκος των ράβδων υπολογίστηκε μετά τη διαστασιολόγηση του φορέα, με χρήση πολυπλοκότερων αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στο λογισμικό Matlab, και παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

2.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΨΑΛΙΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τη σύνδεση των ραβδωτών στοιχείων μεταξύ τους, επιλέχθηκε η απλούστερη μορφή κόμβου σύνδεσης, η οποία αποτελείται από δύο επίπεδα χαλύβδινα ελάσματα συνδεδεμένα μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα σταυρό (Σχήμα 2-6). Για λόγους απλότητας, αλλά και για την εξοικείωση με μεθόδους που προκύπτουν από την εξέλιξη της τεχνολογίας, στην παρούσα Δ.Ε. υιοθετείται η παραδοχή ότι οι κόμβοι είναι κατασκευασμένοι εξολοκλήρου μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (3d

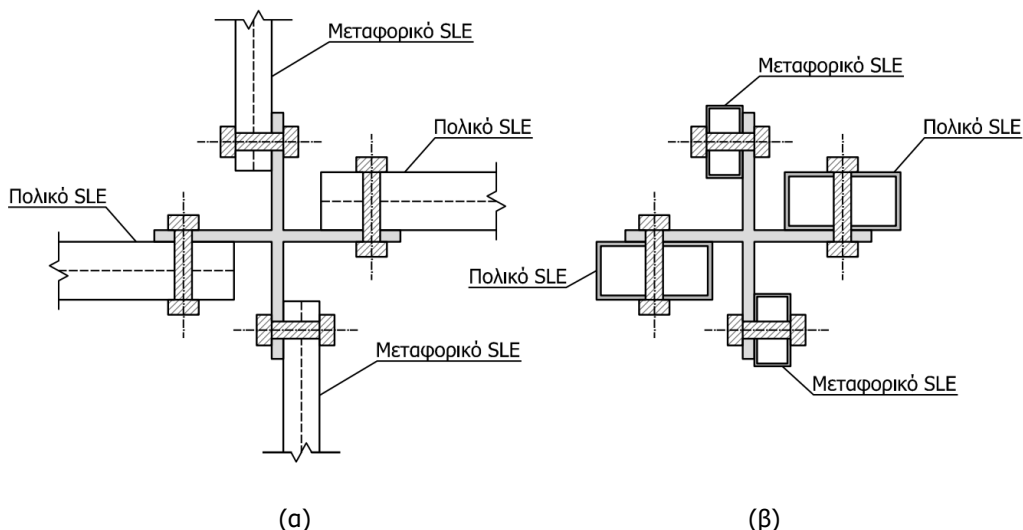
printing). Για το λόγο αυτό δε γίνεται αναφορά σε κάποια συγκόλληση μεταξύ των ελασμάτων, και ο κόμβος λογίζεται ως ένα στερεό.

Η γεωμετρία των ελασμάτων σχεδιάστηκε έτσι ώστε οι σύνδεσμοι να είναι συμμετρικοί ως προς τον άξονα που δημιουργείται από την τομή των ελασμάτων. Κάθε κόμβος διαθέτει τέσσερις οπές, στις οποίες γίνεται η σύνδεση των ράβδων που συντρέχουν σε αυτόν, μέσω κοχλιών από χάλυβα. Με εξαίρεση τους ακραίους κόμβους του στεγάστρου, σε κάθε εσωτερικό κόμβο συντρέχουν τέσσερις ράβδοι εναλλάξ, δύο που αντιστοιχούν σε πολικά ψαλιδωτά στοιχεία και δύο που αντιστοιχούν σε μεταφορικά.



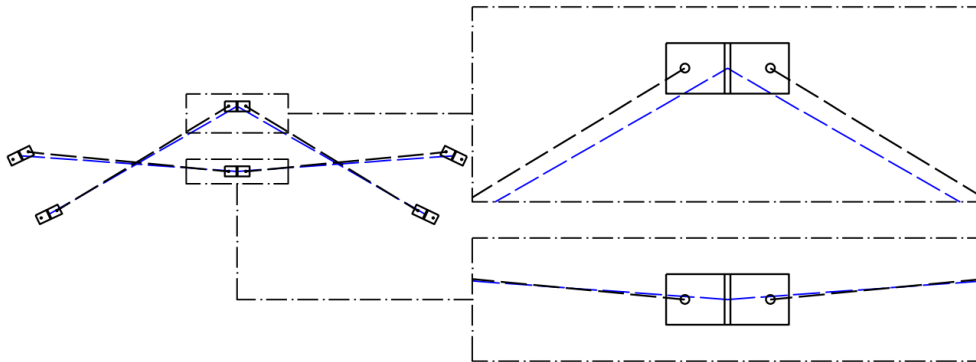
Σχήμα 2-6: Κόμβος ψαλιδωτών στοιχείων

Οι διαστάσεις των χαλύβδινων κόμβων, καθώς και η διάμετρος και η θέση των οπών, δεν ήταν δυνατό να καθοριστούν από την αρχή, καθώς είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τις διατομές των ράβδων. Επίσης, το πάχος των ελασμάτων εισάγει μία εκκεντρότητα στη γεωμετρία του φορέα, επιπλέον αυτής που οφείλεται στις ίδιες τις διατομές των ράβδων, που επηρεάζει τη διαστασιολόγηση. Στο Σχήμα 2-7, παρουσιάζεται σκαριφηματικά η συνδεσμολογία των ψαλιδωτών στοιχείων, σε δύο θέσεις, στην ανοικτή και την κλειστή.



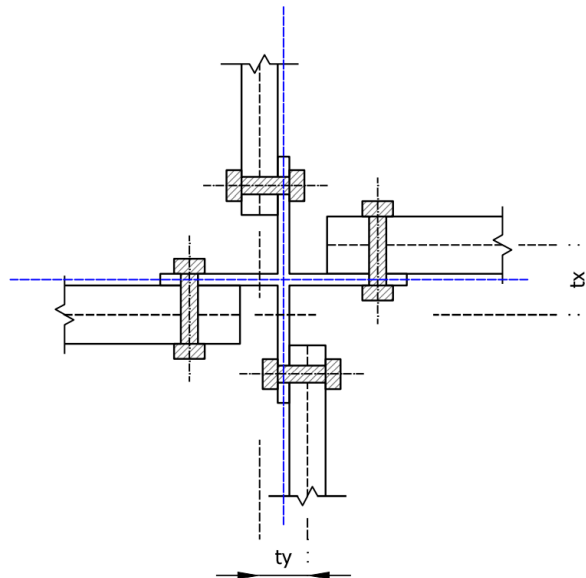
Σχήμα 2-7: Διάταξη κόμβου στην ανοικτή (α) και την κλειστή (β) θέση του στεγάστρου (κάτοψη)

Στο Σχήμα 2-8, παρουσιάζεται η απόκλιση των αξόνων των ράβδων (μαύρο χρώμα) από τους θεωρητικούς άξονες (μπλε χρώμα), η οποία οφείλεται στην απόσταση των οπών από το κέντρο βάρους του κόμβου.



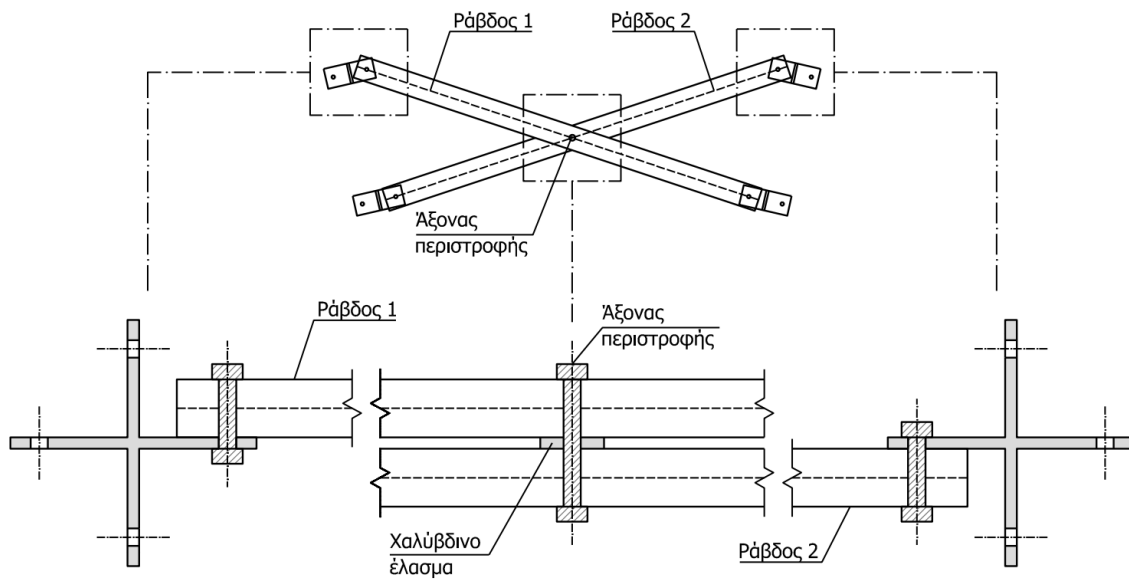
Σχήμα 2-8: Απόκλιση αξόνων ράβδων λόγω των κόμβων στην ανοικτή θέση (όψη)

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2-9, απεικονίζεται η εκκεντρότητα της σύνδεσης η οποία οφείλεται στο πάχος των ελασμάτων του κόμβου, αλλά και στο πλάτος της διατομής των ράβδων.



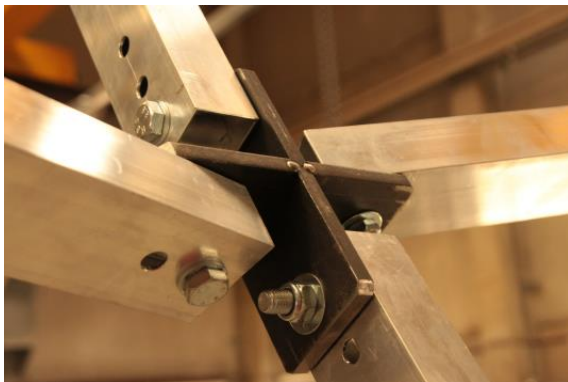
Σχήμα 2-9: Εκκεντρότητα λόγω του πάχους των ελασμάτων του κόμβου, και του πλάτους της διατομής των ράβδων (κάτοψη)

Σε ό,τι αφορά τη σύνδεση των ράβδων κάθε ψαλιδωτού στοιχείου, αυτή υλοποιήθηκε με ένα κοχλία στη θέση του ενδιάμεσου σημείο (intermediate hinge point). Λόγω της εκκεντρότητας που οφείλεται στο πάχος των ελασμάτων των κόμβων, μεταξύ των δύο ράβδων είναι απαραίτητη η παρεμβολή ενός ελάσματος (σε μορφή παχιάς ροδέλας), αντίστοιχου πάχους με αυτό των κόμβων (Σχήμα 2-10).

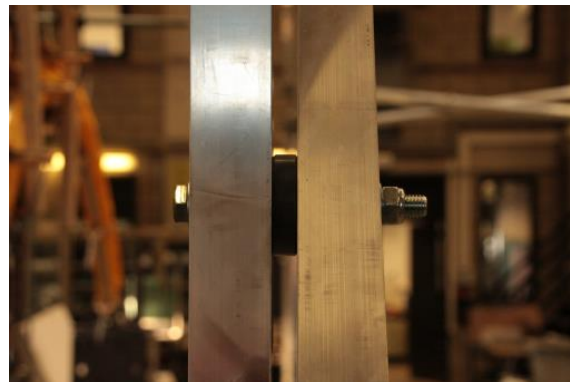


Σχήμα 2-10: Λεπτομέρεια σύνδεσης ράβδων ψαλιδωτού στοιχείου (όψη, κατόψεις)

Η διαστασιολόγηση της κατασκευής που μελετήθηκε, αποτελεί αποτέλεσμα μίας επαναληπτικής διαδικασίας αναλύσεων, λόγω των εκκεντροτήτων που εισάγονται στο φορέα, και οφείλονται κάθε φορά στις προκύπτουσες διαστάσεις των ράβδων αλλά και του κόμβου. Για την έναρξη των επαναλήψεων, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη διδακτορική διατριβή του Aushim Koumar [21], στο πανεπιστήμιο των Βρυξελλών. Τα τελικά μεγέθη των στοιχείων του στεγάστρου που προέκυψαν μετά το πέρας των επαναλήψεων, αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους.



(α)



(β)

Εικόνα 2-1: Κόμβος ψαλιδωτών στοιχείων (α) και ενδιάμεση σύνδεση ράβδων (β) σε πραγματική κατασκευή [Koumar, 2016]

3 ΔΡΑΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, με το οποίο αλληλεπιδρά μία κατασκευή, και σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της, προσδιορίζονται οι δράσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό. Κατά το σχεδιασμό, γίνεται η διαστασιολόγηση του φορέα, έτσι ώστε να ικανοποιείται η ευστάθεια και η λειτουργικότητα.

Στην παρούσα εργασία, τα φορτία που λήφθηκαν υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Μόνιμα φορτία (G):
 - Ίδιο βάρος ραβδωτών στοιχείων.
 - Ίδιο βάρος συνδέσεων.
 - Ίδιο βάρος επικάλυψης.
- Μεταβλητές δράσεις (Q):
 - Φορτίο χιονιού.
 - Δράσεις ανέμου.

Ο υπολογισμός των μεγθών των παραπάνω δράσεων, καθώς και οι παραδοχές που αφορούν την προσομοίωση αυτών, βασίζονται στα πρότυπα EN1990[10] και EN1991[11].

Δεδομένου ότι τα πτυσσόμενα στέγαστρα προορίζονται για εφήμερη χρήση, οι θερμοκρασιακές μεταβολές καθώς και οι σεισμικές δράσεις αμελούνται.

Η εφαρμογή των σχέσεων που αναφέρονται παρακάτω, καθώς και οι παραδοχές που υιοθετούνται, αφορούν το στέγαστρο που μελετάται, με τη θεώρηση της τοποθέτησής του στον οικισμό Δαμάσι του Δήμου Τυρνάβου (Ν. Λάρισας), που επλήγη από τον τελευταίο μεγάλο σεισμό που πραγματοποιήθηκε στην Ελλάδα το 2021 (μέχρι τον Μάιο του 2021).

3.2 ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ

3.2.1 Ίδιο βάρος ραβδωτών στοιχείων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σαν υλικό για τα ραβδωτά στοιχεία της κατασκευής, θεωρήθηκε το αλουμίνιο. Σύμφωνα με το Μέρος 1-1 του EN1991, το ίδιο βάρος του αλουμινίου λαμβάνεται ίσο με

$\gamma_{ai}=27.0\text{kN/m}^3$. Το ίδιο βάρος των ραβδωτών στοιχείων, επιλέχθηκε να λαμβάνεται υπόψη αυτόματα κατά την προσομοίωση, στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.2 Ίδιο βάρος συνδέσεων

Σαν υλικό για τις συνδέσεις επιλέχθηκε ο δομικός χάλυβας. Σύμφωνα με το Μέρος 1-1 του EN1991, το ίδιο βάρος του δομικού χάλυβα λαμβάνεται ίσο με $\gamma_{st}=78.5\text{kN/m}^3$. Για τον υπολογισμό του ίδιου βάρους ενός τυπικού χαλύβδινου κόμβου, έγινε η παραδοχή του όγκου αυτού ως $V_{con}=175\text{cm}^3$ [21] έτσι ώστε να προκύψει το ίδιο βάρος του από τη Σχέση (3-1) ως:

$$G_{con} = \gamma_{st} \cdot V_{con} = 78.5\text{kN/m}^3 \cdot 175 \cdot 10^{-6}\text{m}^3 = 13.74 \cdot 10^{-3}\text{kN} \quad (3-1)$$

Για τους κοχλίες σύνδεσης, τις ροδέλες και τα περικόχλια, το βάρος υπολογίστηκε σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα DIN [7], [8], [9], με την υπόθεση ότι σε κάθε κόμβο θα τοποθετηθούν τέσσερις κοχλίες M12, μήκους 65mm κατά μέσο όρο. Το συνολικό βάρος που προέκυψε ανά κόμβο, ισούται με $4.6 \cdot 10^{-3}\text{kN}$.

Το ίδιο βάρος των συνδέσεων, προσομοιώθηκε ως συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο βάρους κάθε κόμβου, με φορά προς τα κάτω.

3.2.3 Ίδιο βάρος επικάλυψης

Για την επικάλυψη, έγινε η θεώρηση εφελκυόμενης μεμβράνης με επίστρωση PVC. Σύμφωνα με τα υλικά που κυκλοφορούν στο εμπόριο[19], η πυκνότητα μίας τέτοιας μεμβράνης μπορεί να θεωρηθεί ίση με $\rho_{memb}=1.45\text{kg/m}^2$, που αντιστοιχεί σε ίδιο βάρος περίπου ίσο με $\gamma_{memb}=14.5 \cdot 10^{-3}\text{kN/m}^2$. Η προσομοίωση του ίδιου βάρους των επικαλύψεων προσομοιώθηκε με συγκεντρωμένα φορτία στο κέντρο βάρους κάθε σύνδεσης, με φορά προς τα κάτω, έπειτα από την κατάλληλη κατανομή.

3.2.4 Ίδιο βάρος συρματόσχοινων

Λόγω της μικρής του επιρροής, το βάρος των συρματόσχοινων του συστήματος δυσκαμψίας αμελήθηκε. Παρόλα αυτά, υπολογίστηκε μετά τον τελικό καθορισμό τόσο της διατομής, όσο και της διάταξης των συρματόσχοινων, κατά την προμέτρηση των υλικών του στεγάστρου (Παράγραφος 5.9).

3.3 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

3.3.1 Φορτίο χιονιού

Το φορτίο λόγω χιονόπτωσης, υπολογίστηκαν σύμφωνα με το Μέρος 1-3 του EN1991 και αναφέρονται σε κτίρια ή έργα πολιτικού μηχανικού, για υψόμετρα κάτω των 1500m. Για τον υπολογισμό και την προσομοίωση έπρεπε να γίνουν κάποιες παραδοχές ως προς τη μορφή, τα θερμικά χαρακτηριστικά, την τραχύτητα της επιφάνειας, το ποσό θερμότητας που εκλύεται κάτω από τη στέγη, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Τελικά, το φορτίο χιονιού προσδιορίστηκε από τη Σχέση (3-2), που αφορά τοποθεσίες όπου επικρατούν κανονικές συνθήκες:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (3-2)$$

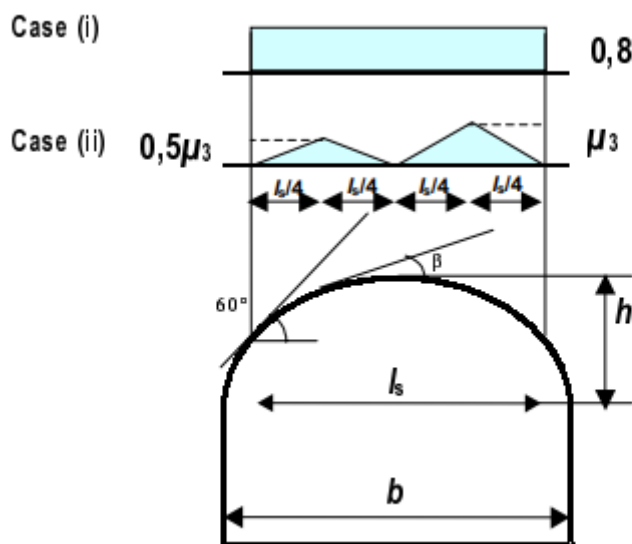
Όπου:

- μ_i είναι ο συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού.
- C_e είναι ο συντελεστής έκθεσης.
- C_t είναι ο θερμικός συντελεστής.
- s_k είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους.

3.3.1.1 Συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού μ_i

Για κυλινδρικές στέγες διαφόρων λόγων ύψους προς άνοιγμα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο περιπτώσεις κατανομής (Σχήμα 3-1):

- Περίπτωση (i): Φορτίο μη παρασυρμένου χιονιού, Σχέση (3-3) και (3-5).
- Περίπτωση (ii): Φορτίο παρασυρμένου χιονιού, Σχέση (3-4) και (3-5).



Σχήμα 3-1: Συντελεστής σχήματος φορτίου χιονιού για κυλινδρικές στέγες [EN1991-1-3]

Οι συντελεστές μορφής υπολογίζονται ως ακολούθως:

Για $\beta \leq 60^\circ$:

$$\mu_{(i)} = \mu = 0.8 \quad (3-3)$$

$$\mu_{(ii)} = \mu_3 = 0.2 + 10 \cdot \frac{h}{b}, \text{ αλλά } \mu_3 \leq 2.0 \quad (3-4)$$

Για $\beta > 60^\circ$:

$$\mu = \mu_3 = 0 \quad (3-5)$$

Όπου:

- β είναι η κλίση της εφαπτομένης της στέγης.
- b είναι το εξωτερικό ύψος της στέγης.
- h είναι το μέγιστο πλάτος της στέγης.

Με βάση τα παραπάνω, και για $b=6.90\text{m}$, $h=3.45\text{m}$ αντίστοιχα, προκύπτει για $\beta \leq 60^\circ$:

$$\mu_{(i)} = \mu = 0.8 \quad (3-6)$$

$$\mu_{(ii)} = \mu_3 = 0.2 + 10 \cdot \frac{3.45}{6.90} = 5.20 \rightarrow \mu_3 = 2.0, \text{ αλλά } \mu_3 \leq 2.0 \quad (3-7)$$

3.3.1.2 Συντελεστής έκθεσης C_e και θερμικός συντελεστής C_t .

Ο συντελεστής έκθεσης, λαμβάνεται ως εξής:

- $C_e=0.8$ για έκθεση σε ισχυρούς ανέμους.
- $C_e=1.0$ για κανονικές συνθήκες.
- $C_e=1.2$ για κατασκευές προστατευμένες από κτίρια ή δένδρα.

Στην προκειμένη περίπτωση έχει γίνει η θεώρηση κανονικών συνθηκών, επομένως λαμβάνεται $C_e=1.0$. Για το θερμικό συντελεστή επιτρέπονται τιμές μικρότερες της μονάδας, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή της απώλειας της θερμότητας μέσω της στέγης. Παρόλα αυτά, υπέρ της ασφαλείας, λαμβάνεται η τιμή $C_t=1.0$.

3.3.1.3 Χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους s_k

Η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους, υπολογίζεται συναρτήσει της χαρακτηριστικής τιμής του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας και του υψόμετρου της τοποθεσίας όπου βρίσκεται η κατασκευή, σύμφωνα με τη Σχέση (3-8):

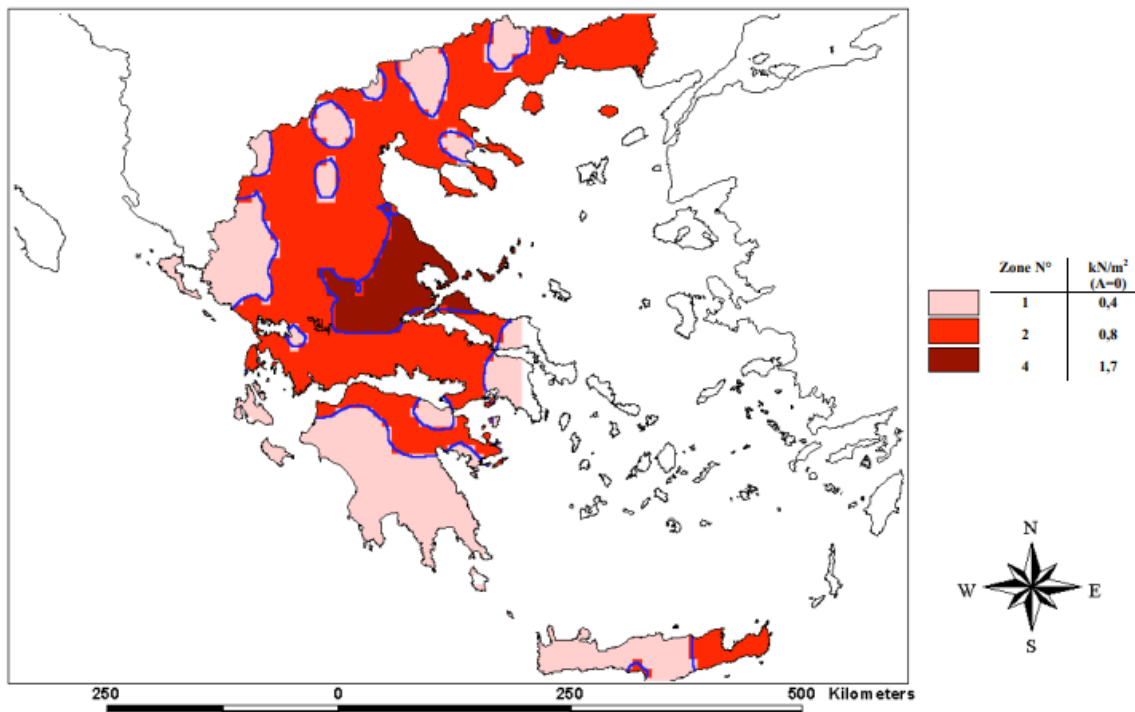
$$s_k = s_{k,0} \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right] \quad (3-8)$$

Όπου:

$s_{k,0}$ είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας, σε kN/m^2 .

A είναι το υψόμετρο της συγκεκριμένης τοποθεσίας από τη στάθμη της θάλασσας, σε m .

Σύμφωνα με το Μέρος 1-3 του EN1993, και το Εθνικό Προσάρτημα, η ελληνική επικράτεια χωρίζεται σε τρεις ζώνες, ως προς τη χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας (Σχήμα 3-2):



Σχήμα 3-2: Ζώνες χαρακτηριστικής τιμής του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας, για την ελληνική επικράτεια [EN1991-1-3]

- Ζώνη I ($s_{k,0}=0.4\text{kN/m}^2$): Νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας.

- Ζώνη III ($s_{k,0}=1.7\text{kN/m}^2$): Νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, Σποράδες και Εύβοια.
- Ζώνη II ($s_{k,0}=0.8\text{kN/m}^2$): Υπόλοιπη χώρα.

Με βάση τη θεώρηση ότι η κατασκευή θα τοποθετηθεί στο χωριό Δαμάσι του νομού Λάρισας, προκύπτουν:

- Χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας για περιοχές του νομού Λάρισας: $s_{k,0}=1.7\text{kN/m}^2$.
- Υψόμετρο της συγκεκριμένης τοποθεσίας από τη στάθμη της θάλασσας, όπου σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα πρέπει να στρογγυλοποιείται στη μεγαλύτερη εκατοντάδα: $A=200\text{m}$.

Έτσι, η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους, προκύπτει από τη Σχέση (3-8) ως εξής:

$$s_k = s_{k,0} \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right] = 1.7 \cdot \left[1 + \left(\frac{200}{917} \right)^2 \right] \rightarrow s_k = 1.781\text{kN/m}^2 \quad (3-9)$$

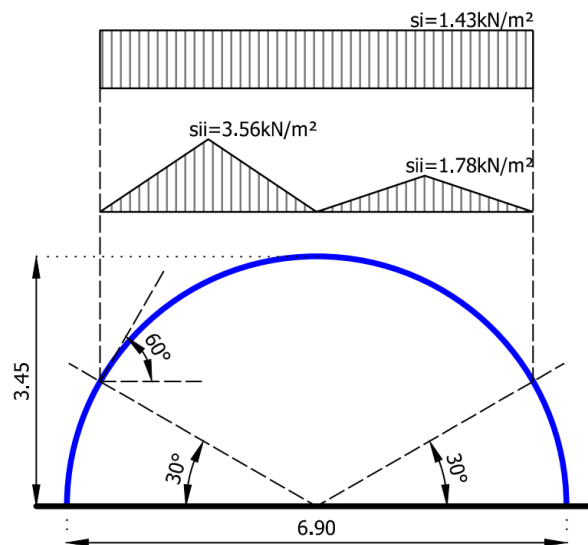
3.3.1.4 Φορτίο χιονιού και προσομοίωση

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές και υπολογισμούς, και με εφαρμογή στη Σχέση (3-2), προκύπτει για τις δύο κατανομές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 3-2:

$$s_i = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0.8 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.781 \rightarrow s_i = 1.425\text{kN/m}^2 \quad (3-10)$$

$$s_{ii} = \mu_{ii} \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.781 \rightarrow s_{ii} = 3.562\text{kN/m}^2 \quad (3-11)$$

Κατά την προσομοίωση των παραπάνω φορτίων, έγινε η παραδοχή ότι το κέλυφος του στεγάστρου περιγράφεται από ένα τέλειο ημικύκλιο, αγνοώντας τις θλάσεις της εφελκυσμένης μεμβράνης από κόμβο σε κόμβο. Έτσι προκύπτει η επιφάνεια επιρροής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3: Κατανομή φορτίου χιονιού στο στέγαστρο

Η προσομοίωση του φορτίου χιονιού υλοποιήθηκε με την επιβολή συγκεντρωμένων φορτίων στο κέντρο βάρους κάθε σύνδεσης, με φορά προς τα κάτω, έπειτα από την κατάλληλη κατανομή στους αντίστοιχους πλησιέστερους κόμβους.

3.3.2 Δράσεις ανέμου

Οι δράσεις ανέμου για κτίρια και έργα πολιτικού μηχανικού, με ύψος μέχρι 200m, υπολογίζονται κατά το Μέρος 1-4 του EN1991. Για τον υπολογισμό των δράσεων ανέμου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι εξωτερικές, όσο και οι εσωτερικές πιέσεις ανέμου, ταυτόχρονα.[3]

3.3.2.1 Εξωτερική πίεση w_e

Η πίεση του ανέμου που δρα κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής, προκύπτει από τη Σχέση (3-12):

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (3-12)$$

Όπου

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

3.3.2.2 Εσωτερική πίεση w_i

Η πίεση του ανέμου που δρα κάθετα στις εσωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής, προκύπτει από τη Σχέση (3-13):

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (3-13)$$

Όπου

$q_p(z_i)$	είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής.
z_i	είναι το ύψος αναφοράς για την εσωτερική πίεση.
c_{pi}	είναι ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης.

3.3.2.3 Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$

Η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος z , η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας, προσδιορίζεται από τη Σχέση (3-14):

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (3-14)$$

Όπου:

$I_v(z)$	είναι η ένταση στροβιλισμού σε ύψος z .
ρ	είναι η πυκνότητα του αέρα, κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας ($\rho=1.25\text{kg/m}^3$).
$v_m(z)$	είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου, σε ύψος z πάνω από το έδαφος.
$c_e(z)$	είναι ο συντελεστής έκθεσης.
q_b	είναι η βασική πίεση.

– Ένταση στροβιλισμού σε ύψος z , $I_v(z)$

Η ένταση στροβιλισμού $I_v(z)$, σε ύψος z , υπολογίζεται από τις Σχέσεις (3-15) και (3-16):

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \text{ για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3-15)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}), \text{ για } z \leq z_{\min} \quad (3-16)$$

Όπου:

- k_I είναι ο συντελεστής στροβιλισμού (ίσος με 1.0).
 $c_o(z)$ είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης (προτεινόμενη τιμή: 1.0).
 z_0 είναι το μήκος τραχύτητας σε m (Πίνακας 3-1).
 z_{\min} είναι το ελάχιστο ύψος σε m (Πίνακας 3-1).
 z_{\max} λαμβάνεται ίσο με 200m.

Πίνακας 3-1: Κατηγορίες εδάφους και αντίστοιχες παράμετροι

Κατηγορία εδάφους		z_0 (m)	z_{\min} (m)
0	Θαλάσσια ή παράκτια περιοχή ανοικτής θάλασσας	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) σε απόσταση μεταξύ τους 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 και το μέσο ύψος τους ξεπερνά τα 15m	1	10

– Μέση ταχύτητα του ανέμου, σε ύψος z πάνω από το έδαφος $v_m(z)$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου $v_m(z)$, σε ύψος z πάνω από το έδαφος. Εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφική διαμόρφωση, και προσδιορίζεται από τη Σχέση (3-17):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (3-17)$$

Όπου:

- $c_r(z)$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας.
 v_b είναι η βασική ταχύτητα ανέμου.

– Συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$

Ο συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$, υπολογίζεται από τις Σχέσεις (3-18) και (3-19), ως εξής:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3-18)$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right), \text{ για } z \leq z_{\min} \quad (3-19)$$

Όπου k_r ο συντελεστής εδάφους, που υπολογίζεται από τη Σχέση (3-20):

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}, \quad z_{0,II} = 0.05\text{m} \quad (3-20)$$

– Βασική ταχύτητα ανέμου v_b

Η βασική ταχύτητα ανέμου, ορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του έτους, στα 10m πάνω από έδαφος κατηγορίας II, σύμφωνα με τη Σχέση (3-21):

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad (3-21)$$

Όπου:

C_{dir} είναι ο συντελεστής διεύθυνσης (ίσος με 1.0).

C_{season} είναι ο συντελεστής εποχής (ίσος με 1.0).

$v_{b,0}$ είναι η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου.

– Θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου $v_{b,0}$

Η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου $v_{b,0}$, ορίζεται ως η χαρακτηριστική μέση ταχύτητα 10 λεπτών, ανεξάρτητα από τη διεύθυνσή του και την εποχή του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος, σε ανοικτή περιοχή με έδαφος κατηγορίας II (Πίνακας 3-1). Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου $v_{b,0}$, για τη χώρα μας ισούται με 33m/s για τα νησιά και τα παράλια μέχρι 10km από την ακτή, και με 27m/s για την υπόλοιπη χώρα.



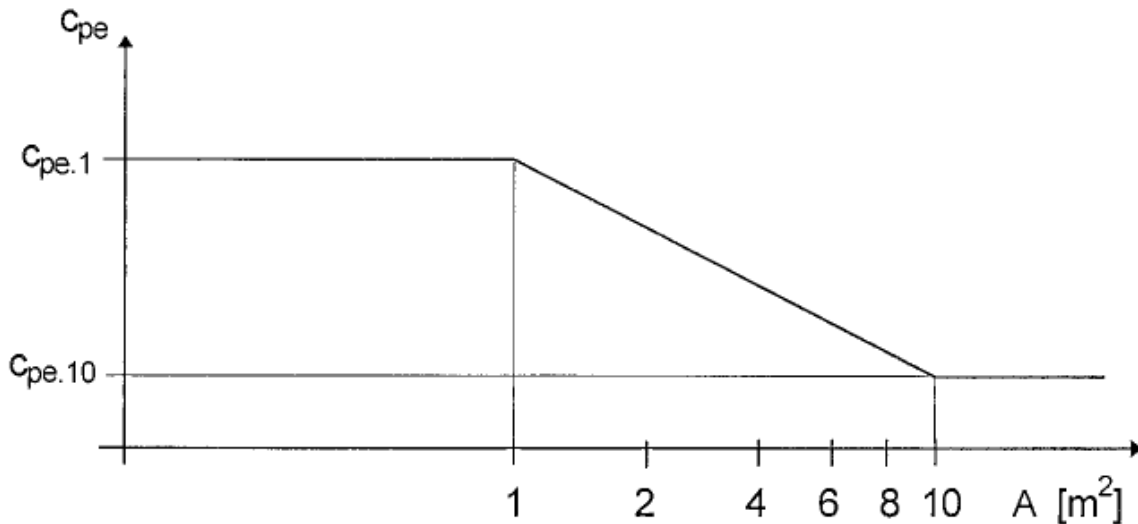
Σχήμα 3-4: Χάρτης θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου

3.3.2.4 Συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe}

Σύμφωνα με το Μέρος 1-4 του EN1991, οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} για κτίρια και τμήματα κτιρίων, εξαρτώνται από την επιφάνεια της κατασκευής στην οποία προσπίπτει ο άνεμος, προκαλώντας πίεση στο υπολογιζόμενο τμήμα. Ανάλογα με τη διαμόρφωση του κτιρίου, εάν η επιφάνεια πρόσπτωσης του ανέμου A είναι μικρότερη από 1m^2 , τότε θεωρείται ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης ως $c_{pe,1}$, ενώ αν είναι μεγαλύτερη από 10m^2 , τότε ως συντελεστής εξωτερικής πίεσης θεωρείται ο $c_{pe,10}$.

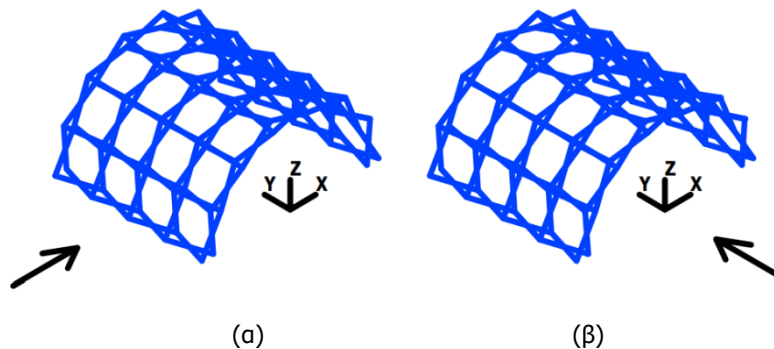
(Σχήμα 3-5). Για ενδιάμεσες τιμές της επιφάνειας πρόσπτωσης, ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση (3-22).

$$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot \log_{10} A \quad (3-22)$$



Σχήμα 3-5: Μεταβολή του συντελεστή εξωτερικής πίεσης σε κτίρια, συναρτήσει της φορτιζόμενης επιφάνειας A [3]

Ο υπολογισμός του συντελεστή εξωτερικής πίεσης διαφέρει ανάλογα με τη μορφή του κτιρίου κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση του ανέμου. Για το στέγαστρο το οποίο μελετάται, θεωρούνται δύο διευθύνσεις ανέμου, μία κάθετα (+X, εγκάρσια) και μία παράλληλα (+Y, διαμήκης) στο μήκος αυτού (Σχήμα 3-6).



Σχήμα 3-6: Εγκάρσια (α) και διαμήκης (β) διεύθυνση ανέμου

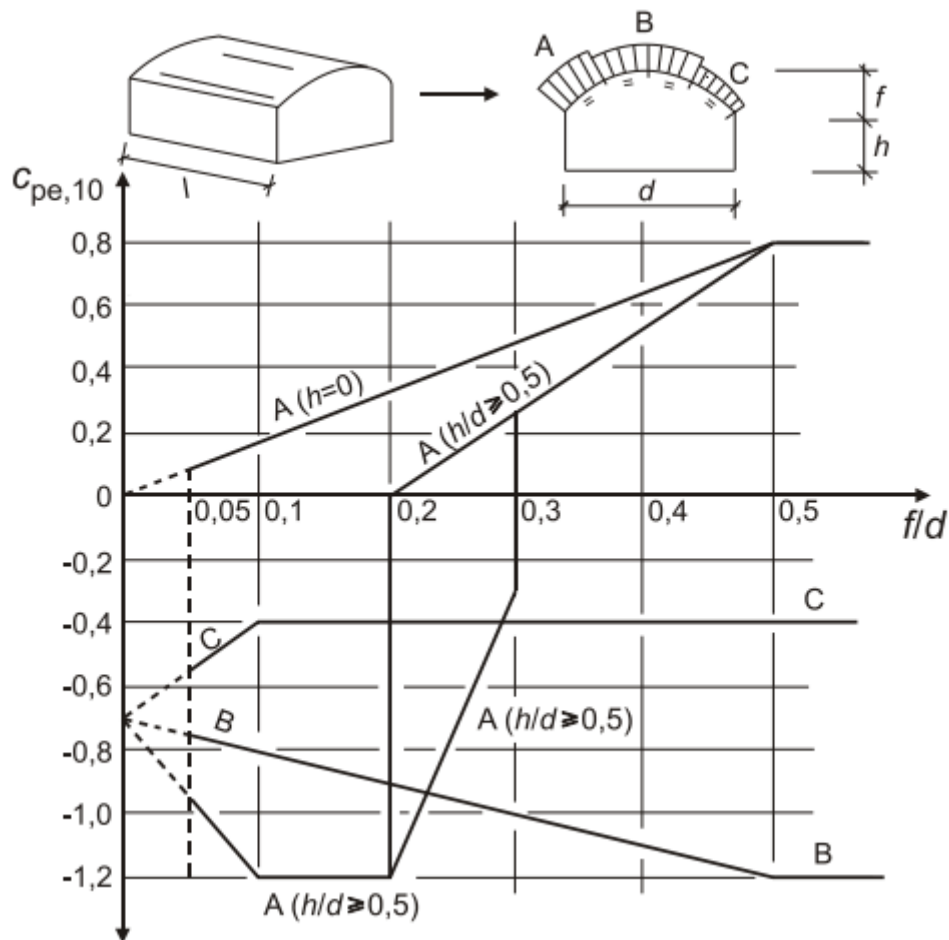
– Άνεμος κατά X

Για την εγκάρσια διεύθυνση ανέμου, ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με την παράγραφο 7.2.8. του EN1991-1-4, η οποία αφορά κυλινδρικές στέγες και θόλους. Στην περίπτωση αυτή, το ύψος αναφοράς υπολογίζεται από τη Σχέση (3-23):

$$z_e = h + f \quad (3-23)$$

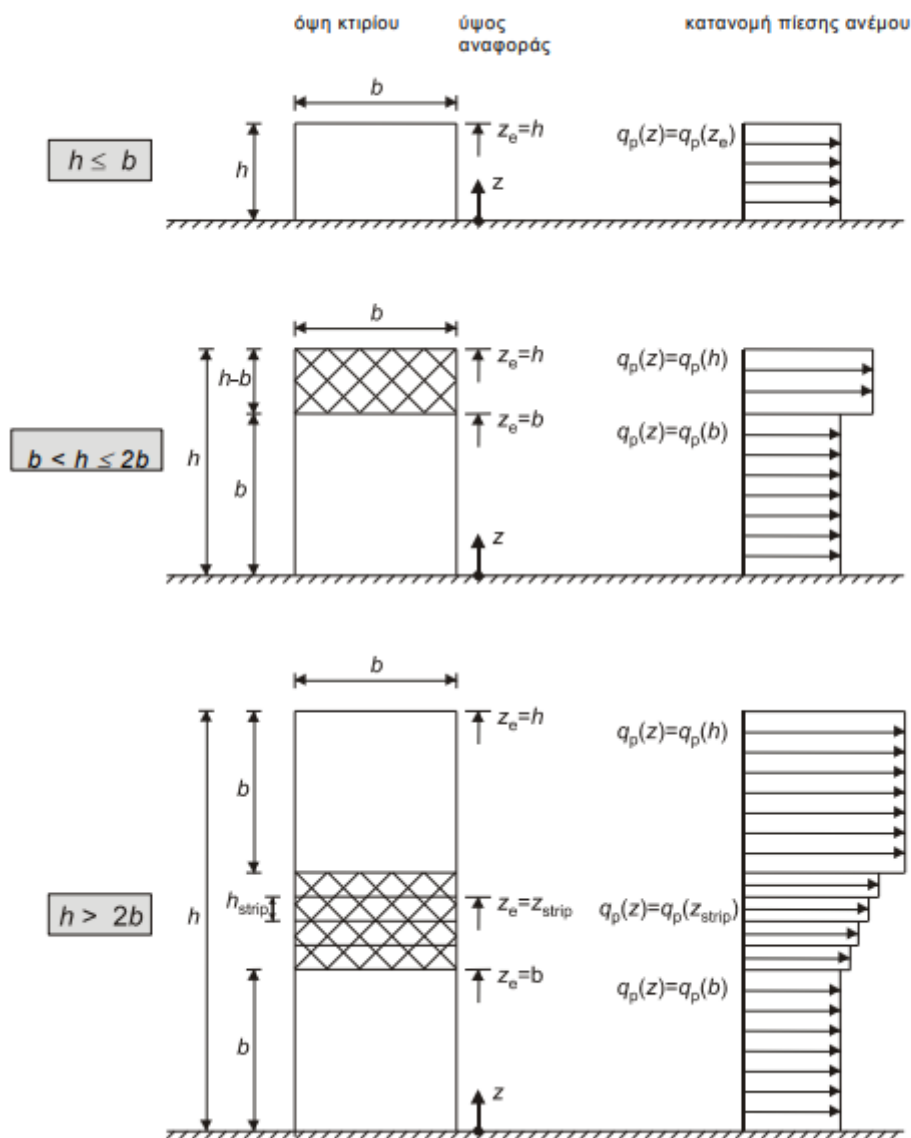
Στο Σχήμα 3-7, δίνεται ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης $c_{pe,10}$ σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζεται η κατανομή του ανέμου που δρα στο καμπύλο κέλυφος του στεγαστρου, και εξαρτάται από τους λόγους

h/d και f/d που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στεγάστρου. Σημειώνεται ότι $0.2 \leq f/d \leq 0.3$, και $h/d \geq 0.5$, πρέπει να λαμβάνονται δύο τιμές του $c_{pe,10}$.



Σχήμα 3-7: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης $c_{pe,10}$ για κυλινδρικές στέγες με ορθογωνική βάση

Για τους κατακόρυφους τοίχους (μπροστά και πίσω άκρο κατασκευής), οι συντελεστές πίεσης υπολογίζονται σύμφωνα με την παράγραφο 7.2.2. του EN1991-1-4, η οποία αφορά κατακόρυφους τοίχους κτιρίων ορθογωνικής κάτοψης. Το ύψος αναφοράς, υπολογίζεται σύμφωνα με το Σχήμα 3-8, συναρτήσει του πλάτους και του ύψους της πλευράς, παράλληλα στη διεύθυνση του ανέμου.



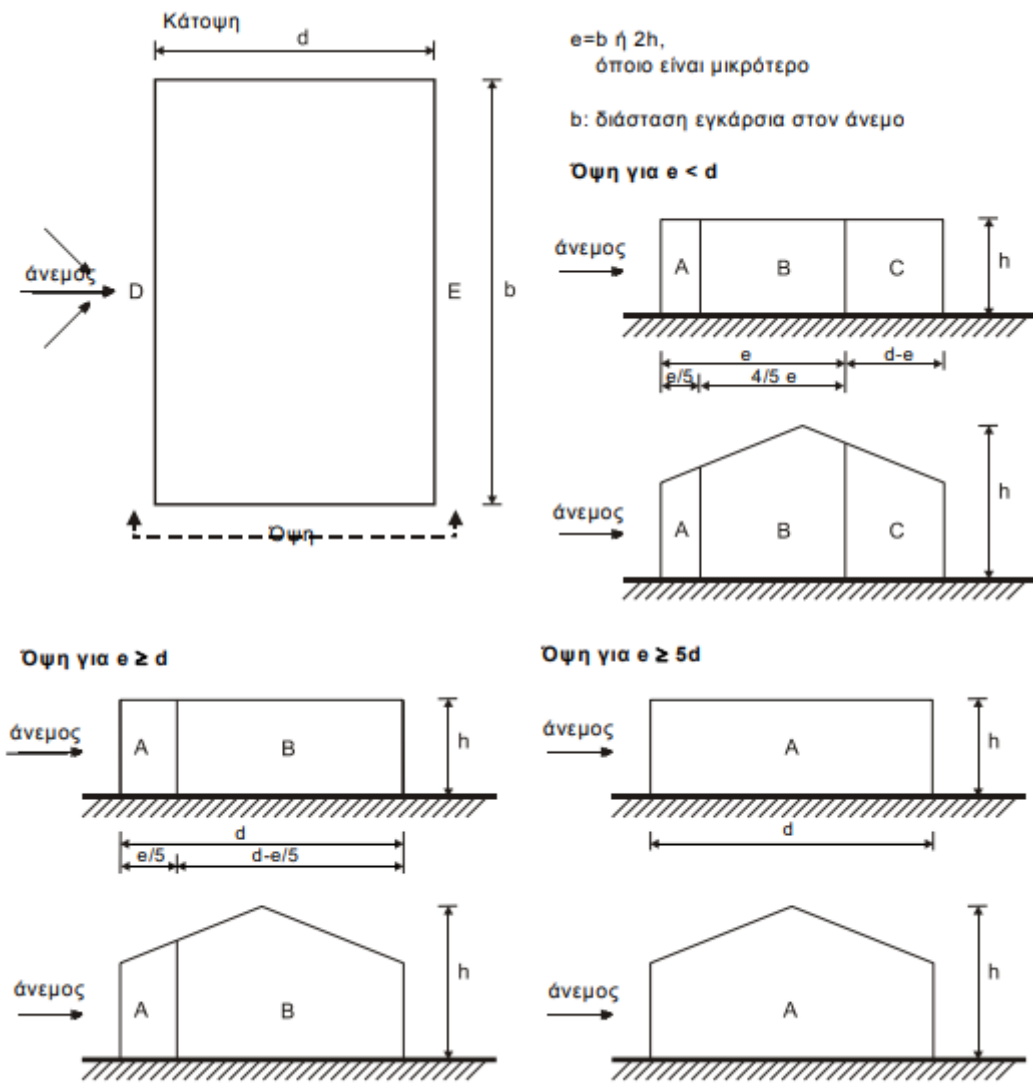
Σχήμα 3-8: Ύψος αναφοράς και αντιστοιχούσα κατανομή πιέσεων

Ο αριθμός και η κατανομή των ζωνών εξωτερικής ανεμοπίεσης, προσδιορίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 3-9, και εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στεγάστρου. Η τιμή του συντελεστή εξωτερικής πίεσης για κάθε ζώνη, δίνεται παρακάτω (Πίνακας 3-2):

Πίνακας 3-2: Προτεινόμενες 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	+1.1	-0.7	
1	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-0.5		+0.8	+1.1	-0.5	
≤0.25	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-0.5		+0.8	+1.1	-0.3	

Για ενδιάμεσες τιμές του λόγου h/d , εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή.



Σχήμα 3-9: Ζώνες ανεμοπίεσης για κατακόρυφους τοίχους

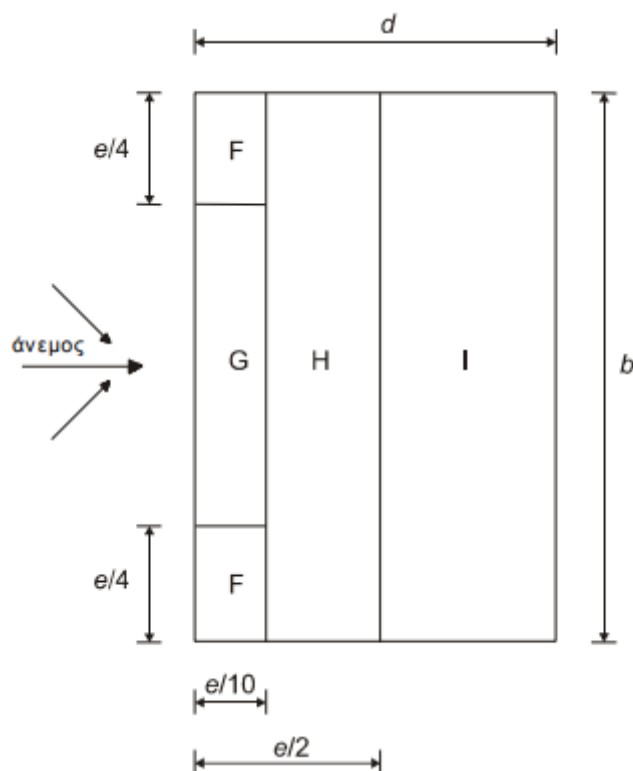
– Άνεμος κατά Y

Για άνεμο κατά τη διαμήκη διεύθυνση μιας κυλινδρικής στέγης, το Μέρος 1-4 του EN1991 δεν αναφέρει τη μέθοδο υπολογισμού του συντελεστή εξωτερικής πίεσης σε αυτήν. Έτσι, γίνεται συντηρητικά η θεώρηση οριζόντιας στέγης με αιχμηρά άκρα, για την οποία το ύψος αναφοράς θεωρείται ίσο με h , και οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης λαμβάνονται ως: (Πίνακας 3-3)

Πίνακας 3-3: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για οριζόντιες στέγες με αιχμηρά άκρα

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	-2.0	-0.7	-0.7	-1.2	+0.2	-0.2

Η κατανομή των ζωνών πίεσης, περιγράφεται στο Σχήμα 3-10, όπου $e = \min(b; 2h)$ και b είναι η διάσταση εγκάρσια στον άνεμο.



Σχήμα 3-10: Ζώνες εξωτερικής πίεσης για οριζόντιες στέγες

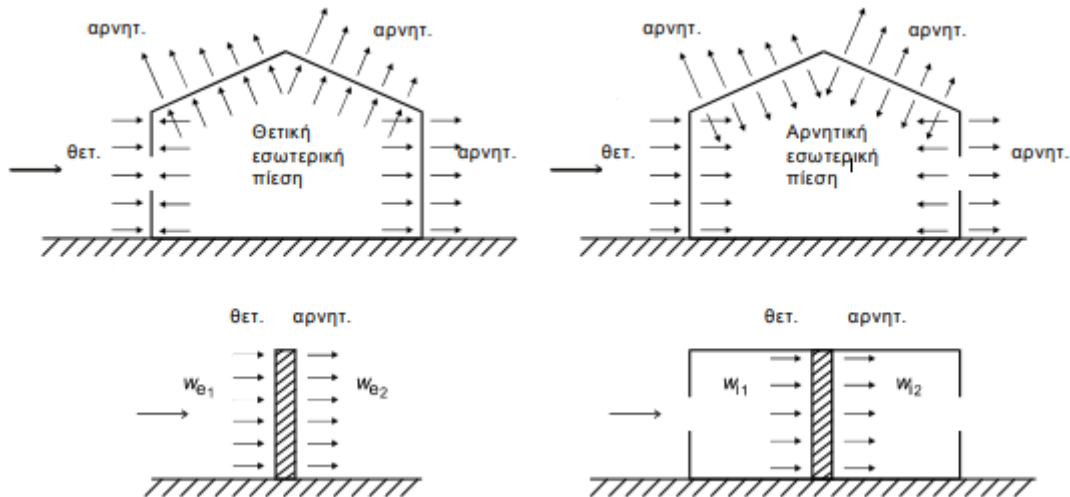
Για τον υπολογισμό των συντελεστών εξωτερικής πίεσης για τους κατακόρυφους τοίχους, εφαρμόζεται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι για άνεμο κατά Υ, οι τοίχοι βρίσκονται κάθετα σε αυτόν.

3.3.2.5 Συντελεστής εσωτερικής πίεσης c_{pi}

Η εσωτερική πίεση δρα ταυτόχρονα με την εξωτερική, και πρέπει να λαμβάνεται ταυτόχρονα με αυτή στους υπολογισμούς. Ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης, εξαρτάται από την κατανομή των ανοιγμάτων του κελύφους και πρέπει να λαμβάνεται ξεχωριστά για κάθε συνδυασμό αυτών και για κάθε διεύθυνση ανέμου. Δεδομένου ότι αυτό οδηγεί σε πολλούς συνδυασμούς και παραδοχές, το EN1991-1-4 επιτρέπει υπέρ της ασφαλείας τη θεώρηση του συντελεστή c_{pi} ως το πλέον δυσμενές από τα +0.2 και -0.3.

3.3.2.6 Επαλληλία πιέσεων

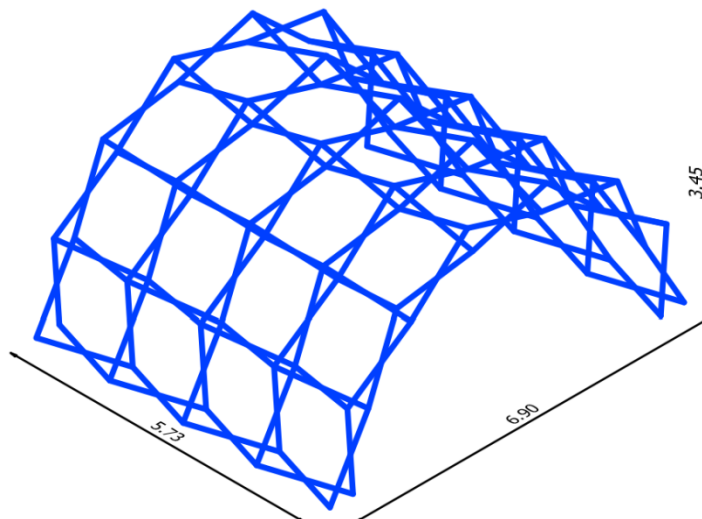
Όπως αναφέρθηκε, οι εσωτερικές και οι εξωτερικές πιέσεις δρουν ταυτόχρονα σε μία κατασκευή. Έτσι, ως τελική πίεση για την κατασκευή, και κατ' επέκταση και για το προσομοίωμα, θεωρείται η διαφορά των εξωτερικών πιέσεων που υπολογίζονται από τη Σχέση (3-12), και των εσωτερικών, που υπολογίζονται από τη Σχέση (3-13). Το πρόσημο των πιέσεων για κάθε περίπτωση, εξηγείται επαρκώς στο Σχήμα 3-11.



Σχήμα 3-11: Πρόσημο εξωτερικών και εσωτερικών πιέσεων

3.3.2.7 Υπολογισμός δράσης ανέμου για το στέγαστρο που μελετάται

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θέση στην οποία μελετάται το στέγαστρο, βρίσκεται στο χωριό Δαμάσι του Νομού Λάρισας. Παρόλο που η περιοχή απέχει περισσότερο από 10km από τη θάλασσα, θεωρούμε τη μέγιστη θεμελιώδη τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή 33m/s, έτσι ώστε το στέγαστρο να θεωρείται ότι μπορεί να τοποθετηθεί και σε περιοχές του νομού, κοντά στα παράλια (Σχήμα 3-4). Επίσης, θεωρείται ότι η περιοχή έχει χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) σε απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων κατηγορία, που αντιστοιχεί σε Κατηγορία Εδάφους II (Πίνακας 3-1). Η παραδοχή αυτή υιοθετήθηκε διότι σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών, οι πληγέντες εγκαθίστανται σε ανοικτές περιοχές όπως γήπεδα. Στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζεται γεωμετρία του στεγαστρού, σύμφωνα με την οποία έγινε ο υπολογισμός των πιέσεων του ανέμου. Σε όλες τις περιπτώσεις ανέμου που θεωρήθηκαν, το ύψος αναφοράς προκύπτει ίσο με 3.45m, ίσο δηλαδή με το μέγιστο ύψος του στεγαστρού.



Σχήμα 3-12: Γεωμετρία στεγαστρού

– Πίεση ταχύτητας αιχμής

Ο υπολογισμός της πίεσης ταχύτητας αιχμής υπολογίστηκε σύμφωνα με την Παράγραφο 3.3.2.3.

Η βασική ταχύτητα ανέμου v_b , υπολογίστηκε από τη Σχέση (3-21) ως εξής:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 33.0 \text{ m/s} \rightarrow v_b = 33.0 \text{ m/s} \quad (3-24)$$

Όπου:

$$c_{dir} = 1.0$$

$$c_{season} = 1.0$$

$$v_{b,0} = 33.0 \text{ m/s}$$

Ο συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$, υπολογίζεται από τη Σχέση (3-18), ως εξής:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.19 \cdot \ln\left(\frac{3.45\text{m}}{0.05\text{m}}\right) \rightarrow c_r(z) = 0.804 \quad (3-25)$$

Όπου:

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} = 0.19 \cdot \left(\frac{0.05}{0.05}\right)^{0.07} \rightarrow k_r = 0.19$$

$$z_{min} = 2.00\text{m} \leq z = 3.45\text{m} \leq z_{max} = 200\text{m}$$

$$z_0 = 0.05\text{m}$$

$$z_{0,II} = 0.05\text{m}$$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου $v_m(z)$, προσδιορίζεται από τη Σχέση (3-17):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0.804 \cdot 1.0 \cdot 33.0 \text{ m/s} \rightarrow v_m(z) = 26.548 \text{ m/s} \quad (3-26)$$

Όπου:

$$c_r(z) = 0.804$$

$$c_0(z) = 1.0$$

$$v_b = 33.0 \text{ m/s}$$

Η ένταση στροβιλισμού $I_v(z)$, σε ύψος z , υπολογίζεται από τη Σχέση (3-15):

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1.0}{1.0 \cdot \ln\left(\frac{3.45}{0.05}\right)} \rightarrow I_v(z) = 0.236 \quad (3-27)$$

Όπου:

$$z_{min} = 2.00\text{m} \leq z = 3.45\text{m} \leq z_{max} = 200\text{m}$$

$$k_I = 1.0$$

$$c_0(z) = 1.0$$

$$z_0 = 0.05\text{m}$$

Τέλος, η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος z , η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας, προσδιορίζεται από τη Σχέση (3-14):

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0.236] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 26.548^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\rightarrow q_p(z) = 1169 \text{ N/m}^2 \quad (3-28)$$

Όπου:

$$I_v(z) = 0.236$$

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$v_m(z) = 26.548 \text{ m/s}$$

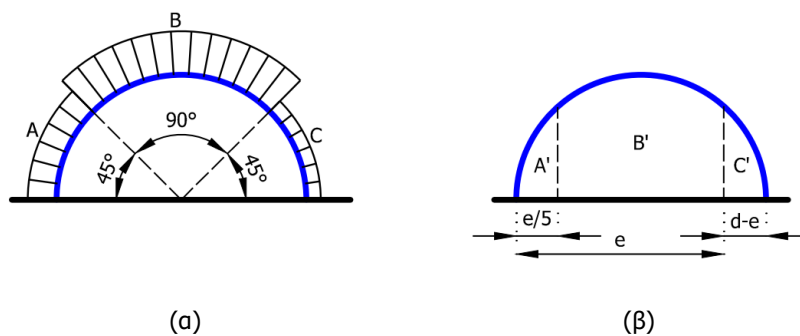
– Συντελεστές εξωτερικής πίεσης

Σε όλες τις περιπτώσεις ανέμου, η επιφάνεια του στεγάστρου στην οποία προσπίπτει άνεμος είναι μεγαλύτερη από 10m^2 , επομένως ως συντελεστής εξωτερικής πίεσης θεωρείται ο $c_{pe,10}$ (Σχήμα 3-5), ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις που αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.3.2.4. Για κάθε διεύθυνση ανέμου, υπολογίζονται οι ζώνες ανεμοπίεσης και οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης που αντιστοιχούν σε αυτές, για το καμπύλο τμήμα του στεγάστρου αλλά και τους κατακόρυφους τοίχους αυτού.

Για άνεμο κατά X, στο καμπύλο τμήμα του στεγάστρου προέκυψαν οι τρεις ζώνες ανεμοπίεσης που φαίνονται στο Σχήμα 3-13α, και υπολογίστηκαν για $h=0$ και $f/d=3.45/6.90=0.5$. Για τους κατακόρυφους τοίχους, όπου θεωρήθηκαν $h=3.45\text{m}$, $b=5.73\text{m}$, $d=6.90\text{m}$, και $e=5.73\text{m}<d$, προέκυψαν οι τρεις ζώνες ανεμοπίεσης. Για κάθε κατακόρυφο τοίχο, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-13β. Οι τιμές των συντελεστών εξωτερικής πίεσης που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις ζώνες ανεμοπίεσης, παρουσιάζονται παρακάτω. (Πίνακας 3-4)

Πίνακας 3-4: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για άνεμο κατά X

Ζώνη	A	B	C	A'	B'	C'
$c_{pe,10}$	0.8	-1.2	-0.4	-1.2	-0.8	-0.5

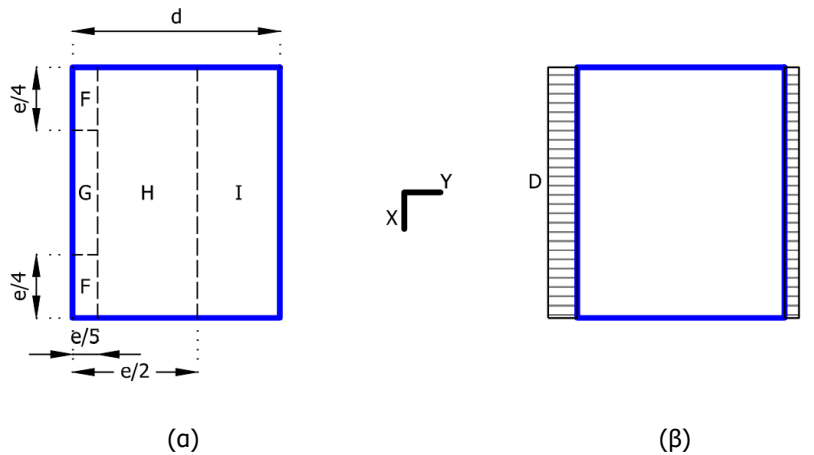


Σχήμα 3-13: Ζώνες ανεμοπίεσης (α) στο καμπύλο τμήμα του στεγάστρου και (β) στους κατακόρυφους τοίχους

Για άνεμο κατά Y, στο καμπύλο τμήμα του στεγάστρου προέκυψαν οι τέσσερις ζώνες ανεμοπίεσης που φαίνονται στο Σχήμα 3-14α, και υπολογίστηκαν για $h=3.45\text{m}$, $d=5.73\text{m}$, $b=6.90\text{m}$, και $e=6.90\text{m}$. Για τους κατακόρυφους τοίχους, όπου θεωρήθηκαν $h=3.45\text{m}$, $d=5.73\text{m}$, $b=6.90\text{m}$, $e=6.90\text{m}>d$ και $h/d=0.60$, προέκυψαν οι δύο ζώνες ανεμοπίεσης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-14β. Οι τιμές των συντελεστών εξωτερικής πίεσης που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις ζώνες ανεμοπίεσης, παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3-5).

Πίνακας 3-5: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για άνεμο κατά Y

Ζώνη	D	E	F	G	H	I
$c_{pe,10}$	0.8	-0.4	-1.8	-2.0	-0.7	-0.2



Σχήμα 3-14: Ζώνες ανεμοπίεσης (α) στο καμπύλο τμήμα του στεγάστρου και (β) στους κατακόρυφους τοίχους

– Συντελεστές εσωτερικής πίεσης

Λόγω της αβεβαιότητας ως προς την κατανομή των ανοιγμάτων και του μεγάλου αριθμού των πιθανών συνδυασμών φορτίσεων, οι συντελεστές c_{pi} θεωρήθηκαν υπέρ της ασφαλείας ως εξής:

$$c_{pi} = -0.3, \text{ για άνεμο κατά } X$$

$$c_{pi} = 0.2, \text{ για άνεμο κατά } Y$$

(3-29)

– Εξωτερική και εσωτερική πίεση

Από τη Σχέση (3-12), και για $q_{pe}=1169\text{N/m}^2$ το μέγεθος της εξωτερικής πίεσης για κάθε ζώνη, προέκυψε όπως παρακάτω (Πίνακας 3-6):

Πίνακας 3-6: Εξωτερική πίεση ανέμου w_e (Pa)

Ζώνη	c_{pe}	w_e
A	0.8	935
B	-1.2	-1402
C	-0.4	-467
A'	-1.2	-1402
B'	-0.8	-935
C'	-0.5	-584
D	0.8	935
E	-0.4	-467
F	-1.8	-2104
G	-2.0	-2337
H	-0.7	-818
I	-0.2	-234

Αντίστοιχα, από τη Σχέση (3-12) που αφορά τον υπολογισμό των εσωτερικών πιέσεων, προέκυψε (Πίνακας 3-7):

Πίνακας 3-7: Εσωτερική πίεση ανέμου w_i (Pa)

Ζώνη	C_{pi}	w_i
A	-0.3	-351
B	-0.3	-351
C	-0.3	-351
A'	-0.3	-351
B'	-0.3	-351
C'	-0.3	-351
D	0.2	234
E	0.2	234
F	0.2	234
G	0.2	234
H	0.2	234
I	0.2	234

– Επαλληλία πιέσεων

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.2.6, οι τελικές πιέσεις ανά ζώνη προκύπτουν από τη διαφορά των εξωτερικών και εσωτερικών πιέσεων και τη Σχέση (3-30):

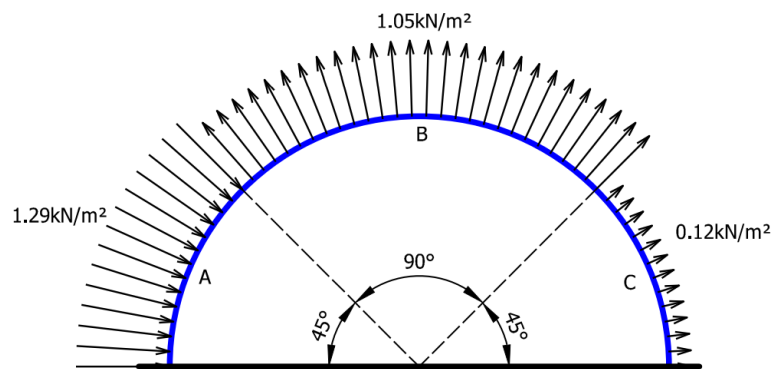
$$w = w_e - w_i \quad (3-30)$$

Στον Πίνακα 3-8, παρουσιάζονται οι τιμές των τελικών πιέσεων ανέμου ανά ζώνη ανεμοπίεσης:

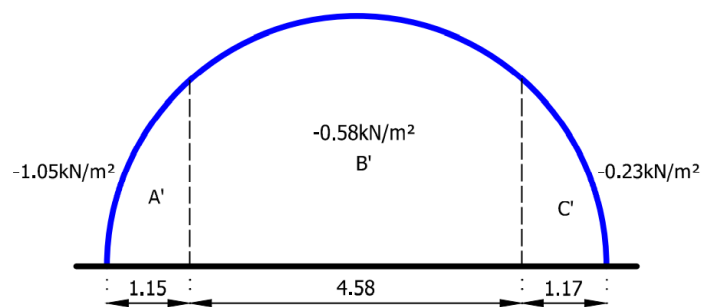
Πίνακας 3-8: Τελική πίεση ανέμου w (Pa)

Ζώνη	w_e	w_i	w
A	935	-351	1286
B	-1402	-351	-1052
C	-467	-351	-117
A'	-1402	-351	-1052
B'	-935	-351	-584
C'	-584	-351	-234
D	935	234	701
E	-467	234	-701
F	-2104	234	-2337
G	-2337	234	-2571
H	-818	234	-1052
I	-234	234	-467

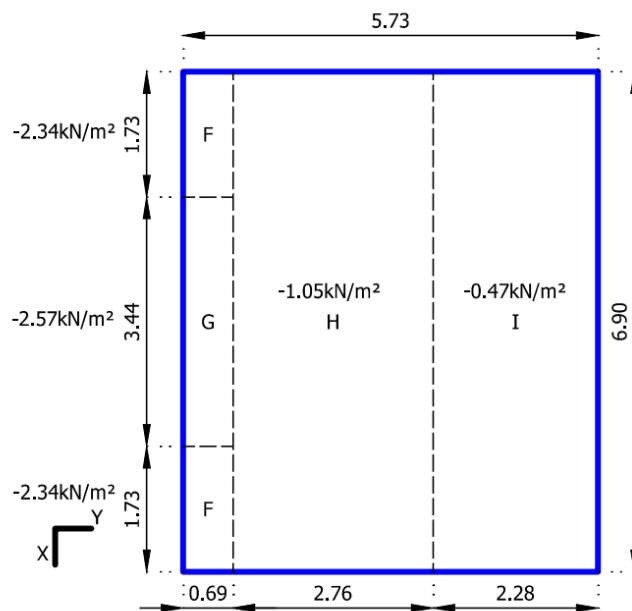
Οι τιμές των τελικών πιέσεων παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3-15 έως Σχήμα 3-18):



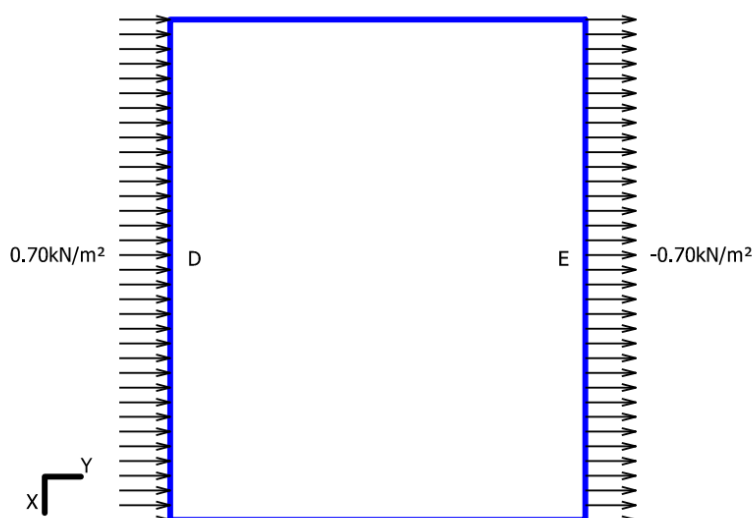
Σχήμα 3-15: Πιέσεις ανέμου στο καμπύλο τμήμα του στεγαστρου για άνεμο κατά X



Σχήμα 3-16: Πιέσεις ανέμου στα κατακόρυφα τμήματα του στεγαστρου για άνεμο κατά X



Σχήμα 3-17: Πιέσεις ανέμου στο καμπύλο τμήμα του στεγαστρου για άνεμο κατά Y



Σχήμα 3-18: Πιέσεις ανέμου στα κατακόρυφα τμήματα του στεγάστρου για άνεμο κατά Y

Η προσομοίωση της ανεμοπίεσης υλοποιήθηκε με την επιβολή συγκεντρωμένων φορτίων στο κέντρο βάρους κάθε σύνδεσης, με φορά κάθετη στην επιφάνεια του τόξου, έπειτα από την κατάλληλη κατανομή στους αντίστοιχους πλησιέστερους κόμβους. Σημειώνεται ότι η ζώνη F-G-F θεωρήθηκε ως ενιαία, με πίεση ίση με τη μεγαλύτερη εκ των δύο ζωνών (F,G) χάριν απλοποίησης και λόγω της μικρής διαφοράς τους.

3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ

Ο έλεγχος της επάρκειας, γίνεται για τις οριακές καταστάσεις, πέρα των οποίων η κατασκευή δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Οι οριακές καταστάσεις διακρίνονται σε:

- Οριακές καταστάσεις αστοχίας (ultimate limit states, συντ.: OKA/ULS).
- Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (serviceability limit states, συντ.: OKΛ/SLS).

Οι οριακές καταστάσεις αστοχίας είναι εκείνες πέρα των οποίων τίθεται σε κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή (απώλεια ισορροπίας και κατάρρευση μέρους ή ολόκληρης της κατασκευής), ενώ οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας είναι εκείνες πέρα των οποίων δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια λειτουργικότητας (αίσθηση ασφάλειας στους χρήστες, βλάβες μη φερόντων στοιχείων, ανεπιθύμητες ρηγματώσεις, ταλαντώσεις). Οι χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων που υπολογίστηκαν παραπάνω, πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές (επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ), συνδυάζονται μεταξύ τους καταλλήλως (συντελεστές συνδυασμού ψ) για την οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας αντίστοιχα, και εφαρμόζονται στην κατασκευή με τη θεώρηση ότι επενεργούν και εκδηλώνονται ταυτόχρονα. Οι συνδυασμοί που προκύπτουν, αποτελούν τους συνδυασμούς φορτίσεων σε OKA και OKΛ.

3.4.1 Οριακή κατάσταση αστοχίας (OKA)

Για τον έλεγχο στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ορίζονται οι ακόλουθοι συνδυασμοί δράσεων:

- Για καταστάσεις διαρκείας ή παροδικές, Σχέση (3-31):

$$\sum_{j \geq 1} Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + Y_P \cdot P + Y_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} Y_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3-31)$$

- Για τυχηματικές καταστάσεις, Σχέση (3-32):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} (\text{ή } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3-32)$$

– Για καταστάσεις σεισμού, Σχέση (3-33):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3-33)$$

Όπου:

“+” σημαίνει «επαλληλία με».

$G_{k,j}$ είναι η χαρακτηριστική τιμή των μόνιμων δράσεων.

P είναι η χαρακτηριστική τιμή της προέντασης.

$Q_{k,1}$ είναι η χαρακτηριστική τιμή της επικρατέστερης μεταβλητής δράσης.

$Q_{k,i}$ είναι η χαρακτηριστική τιμή των λοιπών ταυτόχρονων μεταβλητών δράσεων i .

A_d είναι η τιμή σχεδιασμού της τυχηματικής δράσης.

A_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της σεισμικής δράσης.

$\gamma_{G,j}$ είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη μόνιμη δράση j .

γ_P είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για την προένταση.

$\gamma_{Q,i}$ είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη μεταβλητή δράση i .

$\psi_{0,i}, \psi_{1,i}, \psi_{2,i}$ είναι οι συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων.

3.4.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Οι συνδυασμοί σχεδιασμού που ορίζονται για τον έλεγχο στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, είναι οι ακόλουθοι:

– Χαρακτηριστικός συνδυασμός, Σχέση (3-34):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3-34)$$

– Συχνός συνδυασμός, Σχέση (3-35):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3-35)$$

– Ημιμόνιμος συνδυασμός, Σχέση (3-36):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3-36)$$

Όπου $\psi_{0,i}, \psi_{1,i}, \psi_{2,i}$ είναι οι συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.1.

3.4.3 Επιμέρους συντελεστές και συντελεστές συνδυασμού

– Οι επιμέρους συντελεστές γ , δίνονται στον Πίνακα 3-9:

Πίνακας 3-9: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας, γ

	Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας		Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας	
	Δυσμενής επιρροή	Ευμενής επιρροή	Δυσμενής επιρροή	Ευμενής επιρροή
γ_G	1.35	1.00	1.00	1.00
γ_Q	1.50	0.00	1.00	0.00
γ_A	1.00	0.00	-	-

– Οι συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων ψ , δίνονται στον Πίνακα 3-10:

Πίνακας 3-10: Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών ψ , για κτίρια

Δράσεις	ψ_0	ψ_1	ψ_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 $30\text{kN} \leq \text{βάρος οχημάτων} \leq 160\text{kN}$	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 $H > 1000$	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

3.4.4 Συνδυασμοί δράσεων

Στο στέγαστρο που μελετάται, ως μεταβλητή δράση έχουν θεωρηθεί μόνο ο άνεμος και το χιόνι. Οι αντίστοιχοι συντελεστές συνδυασμού, και για περιοχή με υψόμετρο μικρότερο από 1000m στην ελλαδική χώρα, έχουμε:

Για το χιόνι: $\psi_0=0.5, \psi_1=0.2, \psi_2=0.$

Για τον άνεμο: $\psi_0=0.6, \psi_1=0.5, \psi_2=0.$

Οι επιμέρους συντελεστές, και οι συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων για κάθε συνδυασμό στην οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας, δίνονται στον Πίνακα 3-11 και τον Πίνακα 3-12 αντίστοιχα:

Πίνακας 3-11: Επιμέρους συντελεστές και συντελεστές συνδυασμού μεταβλητών δράσεων (OKA)

	SW	SSL	DSL	TWL	LWL
ULS_LC1	1.35 x 1.0	1.50 x 1.0	-	-	-
ULS_LC2	1.35 x 1.0	-	1.50 x 1.0	-	-
ULS_LC3	1.35 x 1.0	-	-	1.50 x 1.0	-
ULS_LC4	1.35 x 1.0	-	-	-	1.50 x 1.0
ULS_LC5	1.35 x 1.0	-	1.50 x 0.5	1.50 x 1.0	-
ULS_LC6	1.35 x 1.0	-	1.50 x 0.5	-	1.50 x 1.0
ULS_LC7	1.35 x 1.0	-	1.50 x 1.0	1.50 x 0.6	-
ULS_LC8	1.35 x 1.0	-	1.50 x 1.0	-	1.50 x 0.6
ULS_LC9	1.35 x 1.0	1.50 x 1.0	-	1.50 x 0.6	-
ULS_LC10	1.35 x 1.0	1.50 x 1.0	-	-	1.50 x 0.6
ULS_LC11	1.35 x 1.0	1.50 x 0.5	-	1.50 x 1.0	-
ULS_LC12	1.35 x 1.0	1.50 x 0.5	-	-	1.50 x 1.0

Πίνακας 3-12: Επιμέρους συντελεστές και συντελεστές συνδυασμού μεταβλητών δράσεων (ΟΚΑ)

	SW	SSL	DSL	TWL	LWL
SLS_LC1	1.00 x 1.0	1.00 x 1.0	-	-	-
SLS_LC2	1.00 x 1.0	-	1.00 x 1.0	-	-
SLS_LC3	1.00 x 1.0	-	-	1.00 x 1.0	-
SLS_LC4	1.00 x 1.0	-	-	-	1.00 x 1.0
SLS_LC5	1.00 x 1.0	-	1.00 x 0.5	1.00 x 1.0	-
SLS_LC6	1.00 x 1.0	-	1.00 x 0.5	-	1.00 x 1.0
SLS_LC7	1.00 x 1.0	-	1.00 x 1.0	1.00 x 0.6	-
SLS_LC8	1.00 x 1.0	-	1.00 x 1.0	-	1.00 x 0.6
SLS_LC9	1.00 x 1.0	1.00 x 1.0	-	1.00 x 0.6	-
SLS_LC10	1.00 x 1.0	1.00 x 1.0	-	-	1.00 x 0.6
SLS_LC11	1.00 x 1.0	1.00 x 0.5	-	1.00 x 1.0	-
SLS_LC12	1.00 x 1.0	1.00 x 0.5	-	-	1.00 x 1.0

Όπου:

SW(Self Weight) είναι το φορτίο των ιδίων βαρών.

SSL(Symmetrical Snow Load) είναι το φορτίο του μη παρασυρμένου χιονιού.

DSL(Drifted Snow Load) είναι το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού.

TWL(Transverse Wind Load) είναι το φορτίο του ανέμου στην εγκάρσια διεύθυνση (κατά Χ).

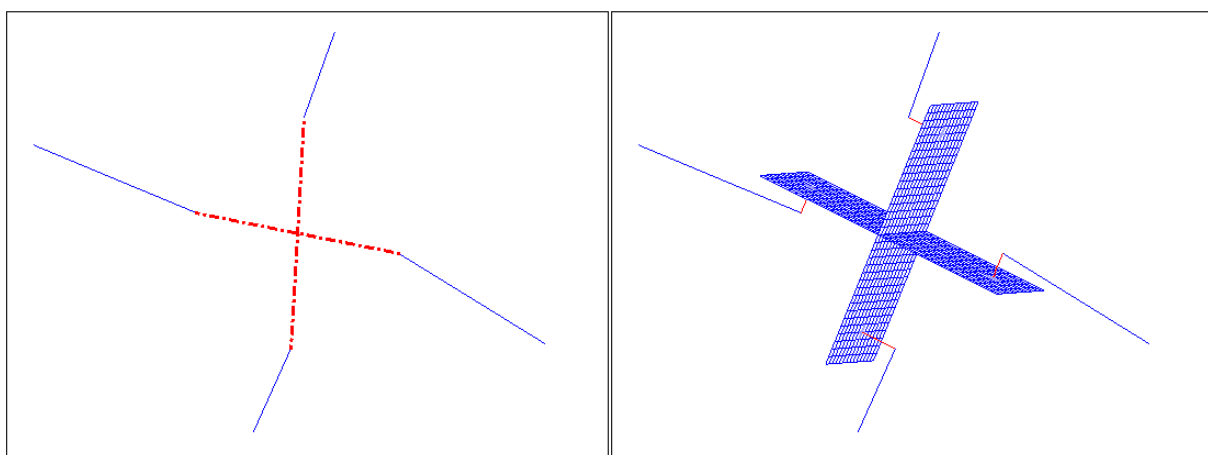
LWL(Longitudinal Wind Load) είναι το φορτίο του ανέμου στη διαμήκη διεύθυνση (κατά Υ).

Οι παραπάνω συνδυασμοί προέκυψαν με τη θεώρηση δυσμενούς επιρροής, τόσο για τα μόνιμα, όσο και για τα κινητά φορτία. Όλες οι δυνατές περιπτώσεις και συνδυασμοί δυσμενούς – ευμενούς επιρροής αντιστοιχούν σε 96 συνδυασμούς δράσεων, τόσο για την ΟΚΑ, όσο και για την ΟΚΛ. Λόγω της πολυπλοκότητας στην εισαγωγή των φορτίων στο προσομοίωμα, λήφθηκαν υπόψη μόνο οι συνδυασμοί που περιγράφονται στους παραπάνω πίνακες.

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ ΨΑΛΙΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με στόχο τη διαστασιολόγηση του φορέα, πραγματοποιήθηκε μία σειρά από αναλύσεις στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA [5]. Δεδομένου ότι η γεωμετρία των κόμβων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών των ραβδωτών στοιχείων, η συμπερίληψή τους στο αριθμητικό προσομοίωμα έπρεπε να έπεται της διαστασιολόγησης των ραβδών. Έτσι, οι αναλύσεις για τη διαστασιολόγηση του φορέα έγιναν σε δύο φάσεις. Στο πρώτο αριθμητικό προσομοίωμα, έγινε η παραδοχή των άκαμπτων κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων, η οποία οδήγησε σε απλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου, και στη μείωση του χρόνου επίλυσης κατά τον έλεγχο των ραβδωτών στοιχείων. Μετά τον καθορισμό των διατομών των ραβδών έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας των κόμβων, και η εισαγωγή της με επιφανειακά στοιχεία στο ίδιο αριθμητικό προσομοίωμα, με στόχο την διαστασιολόγησή τους αλλά και τη διερεύνηση της επιρροής τους στη συμπεριφορά του συνολικού φορέα. Στο ίδιο αριθμητικό προσομοίωμα, εισήχθησαν και οι αντίστοιχοι κοχλίες, ως πεπερασμένα στοιχεία δοκού.



(α)

(β)

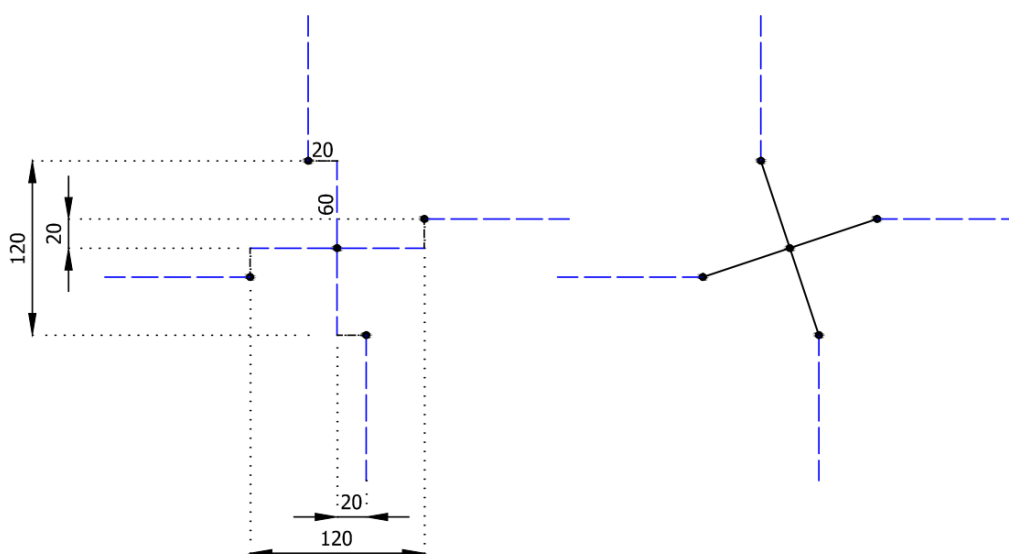
Σχήμα 4-1. Προσομοίωση κόμβου ως άκαμπτο στοιχείο (α), και με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (β)

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται λεπτομερής αναφορά στο αριθμητικό προσομοίωμα της πρώτης φάσης, για τη διαστασιολόγηση των ραβδωτών στοιχείων, και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις αυτού κατά την προσομοίωση των κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων.

4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΑΚΑΜΠΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

4.2.1 Σχεδιασμός γεωμετρίας προσομοιώματος

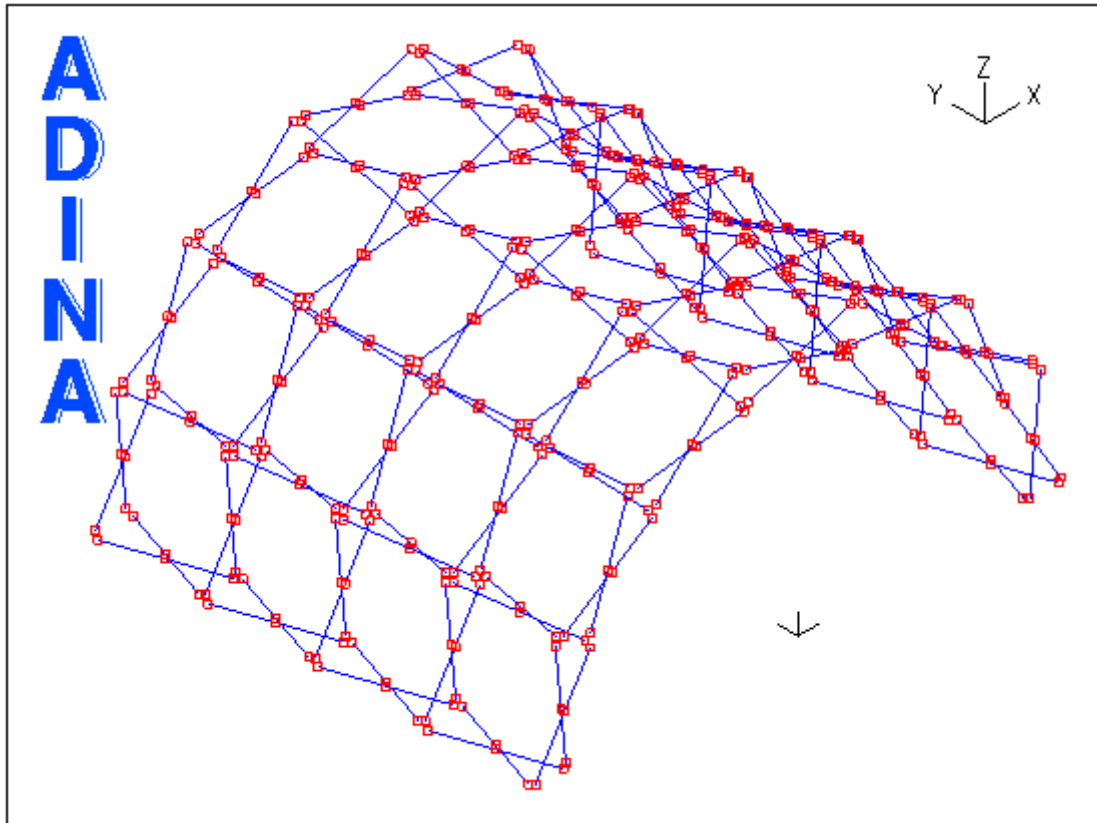
Αρχικά, έγινε σχεδιασμός της γεωμετρίας του προσομοιώματος σε τρισδιάστατο περιβάλλον CAD. Η πρώτη παραδοχή που υιοθετήθηκε κατά το σχεδιασμό αφορούσε την απόσταση των οπών των κόμβων, και το πλάτος των διατομών των ράβδων, για τον προσδιορισμό της θέσης των άκρων των ψαλιδωτών στοιχείων.



Σχήμα 4-2: Διάταξη άκρων ράβδων γύρω από τον τυπικό κόμβο.

Έπειτα από αναζήτηση στη βιβλιογραφία [21], η διάταξη των άκρων των ράβδων που συντρέχουν σε ένα κόμβο πήρε τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-2 (απόσταση οπών: 120mm, πλάτος διατομής ράβδου: 40mm, πάχος ελασμάτων: αμελητέο). Έτσι, προέκυψε σχεδιασμός στο χώρο, μόνο των αξόνων των ράβδων, με στοιχεία γραμμής (lines). Για λόγους ευκολίας στην υλοποίηση του σημείου περιστροφής των ράβδων κάθε ψαλιδωτού στοιχείου, ο άξονας κάθε ράβδου σχεδιάστηκε με δύο συνεχόμενες γραμμές που συνδέονται στο σημείο αυτό.

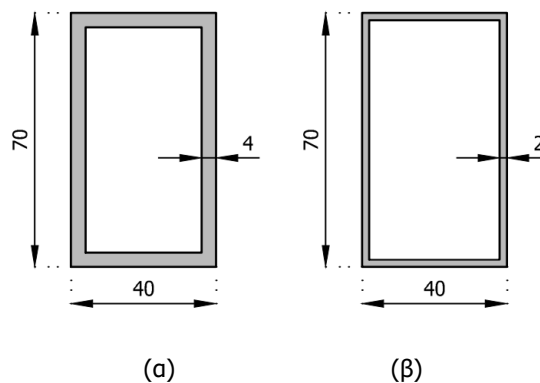
Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου σε μορφή .iges και εισαγωγή του στο λογισμικό ADINA. Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται η γεωμετρία των ψαλιδωτών στοιχείων, ως στοιχεία γραμμής, και επισημαίνονται τα σημεία των άκρων τους και το σημείο περιστροφής.



Σχήμα 4-3: Γεωμετρία προσομοιώματος στο λογισμικό ADINA

4.2.2 Ραβδωτά στοιχεία

Το πρώτο αριθμητικό προσομοίωμα, περιλάμβανε μόνο τα ραβδωτά μέλη των ψαλιδωτών στοιχείων. Η προσομοίωσή τους έγινε μέσω γραμμικών στοιχείων δοκού (Beam Elements), τα οποία ορίστηκαν μέσω των γραμμών. Κάθε γραμμή διαιρέθηκε σε πεπερασμένα μήκη της τάξης των 2mm, και στη συνέχεια ορίστηκαν τα στοιχεία δοκού και οι διατομές τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αρχική παραδοχή για το σχεδιασμό ήταν η χρήση στοιχείων δοκού ίδιου μήκους για όλη την κατασκευή, και δύο διατομών, μία για όλα τα πολικά, και μία για όλα τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία.



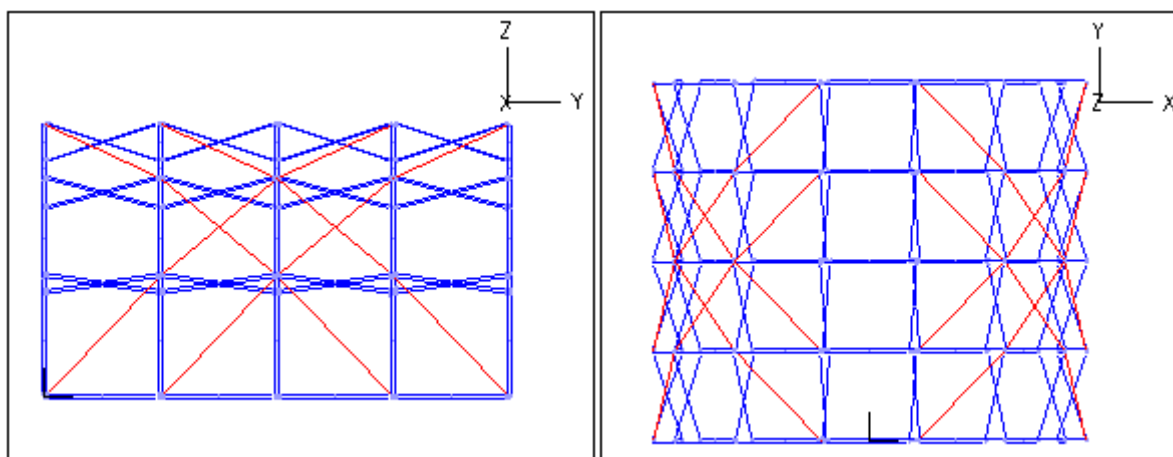
Σχήμα 4-4: Διατομές στοιχείων δοκού κατά την πρώτη ανάλυση, πολικών ψαλιδωτών στοιχείων (α) και μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων (β)

Όλα τα στοιχεία δοκού, προσομοιώθηκαν με κοίλες ορθογωνικές διατομές κατηγορίας «το πολύ» 3, έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αστοχίας λόγω τοπικού λυγισμού. Κατά την πρώτη επίλυση του προσομοιώματος, έτσι ώστε να γίνει μία αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς του φορέα, χρησιμοποιήθηκαν οι διατομές που απεικονίζονται στο Σχήμα 4-4.

4.2.3 Προσομοίωση συστήματος δυσκαμψίας από καλωδιωτά στοιχεία

Από τις πρώτες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο στέγαστρο, παρατηρήθηκαν αρκετά μεγάλες μετακινήσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση του φορέα, πράγμα που σημαίνει ότι ο φορέας θα μπορούσε να θεωρηθεί και ως μηχανισμός. Για το λόγο αυτό, έγινε προσομοίωση και διαστασιολόγηση ενός συστήματος δυσκαμψίας με συρματόσχοινα από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην πραγματικότητα, ενδέχεται η λειτουργία αυτού του συστήματος να μπορεί να αντικατασταθεί από την μεμβράνη επικάλυψης του στεγάστρου, παρόλα αυτά το ενδεχόμενο αυτό δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Τα συρματόσχοινα του φορέα τοποθετήθηκαν κατά τη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-5, έτσι ώστε τα άκρα τους να συμπίπτουν με το κέντρο βάρους των κόμβων που συνδέουν, και προσομοιώθηκαν ως ραβδωτά στοιχεία με μηδενική θλιπτική αντοχή, και εφελκυστική αντοχή ίση με το όριο διαρροής που ορίζεται από τον κατασκευαστή τους.



Σχήμα 4-5: Σύστημα δυσκαμψίας μέσω καλωδιωτών στοιχείων (κόκκινο χρώμα) – όψη και κάτοψη προσομοιώματος

Τα χαρακτηριστικά των συρματόσχοινων που προσομοιώθηκαν, επιλέχθηκαν από τον κατάλογο προϊόντων της εταιρείας Pfeifer [22], και είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ($E=130\text{GPa}$), η οριακή εφελκυστική αντοχή κατά DIN18800 ($f=16\text{kN}$), και το εμβαδό της πλήρους διατομής ($A=22\text{mm}^2$). Τα χαρακτηριστικά αυτά αντιστοιχούν σε ένα συρματόσχοινο που αποτελείται από 19 κλώνους ίδιας διαμέτρου (Σχήμα 4-6).

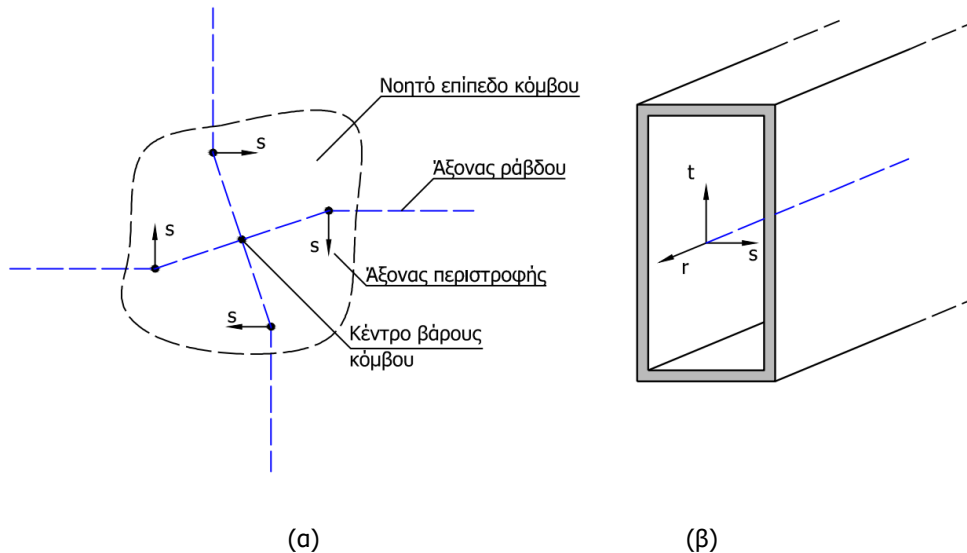


Σχήμα 4-6: Διατομή συρματόσχοινου 1x19

4.2.4 Προσομοίωση κόμβων και συνδεσμολογίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, κατά το σχεδιασμό του πρώτου προσομοιώματος, έγινε η θεώρηση των άκαμπτων κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων. Για την υλοποίησή τους ορίστηκαν δεσμεύσεις όλων των βαθμών ελευθερίας των άκρων των ράβδων που συντρέχουν σε κάθε κόμβο, ως προς το

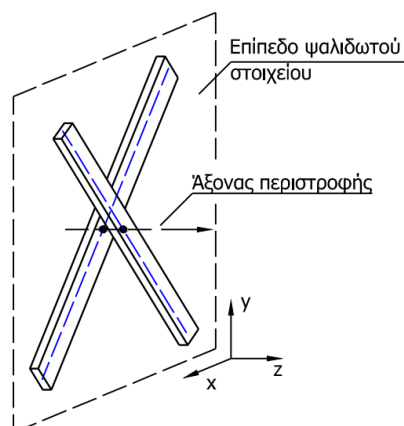
σημείο που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του καθενός από αυτούς. Απλούστερα, κάθε κόμβος υλοποιήθηκε από πέντε σημεία σε σχήμα σταυρού (τα τέσσερα άκρα και το κέντρο βάρους του), τα οποία ανήκουν σε ένα κοινό अपαραμόρφωτο επίπεδο, με τα σημεία των άκρων του να ταυτίζονται με τα άκρα των ράβδων που συνδέονται με αυτόν.



Σχήμα 4-7: Διάταξη άκαμπτου κόμβου (α), τοπικοί άξονες ράβδου (β)

Η προσομοίωση της κοχλιωτής σύνδεσης των ράβδων με τους κόμβους, έγινε με την παραδοχή ότι η συνδεσμολογία θα δεσμεύει όλες τις σχετικές μετακινήσεις ράβδου – κόμβου, εκτός από τη σχετική στροφή περί τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο του κάθε ψαλιδωτού στοιχείου. Έτσι, μετά την προσομοίωση του άκαμπτου κόμβου, αποδόθηκε στο άκρο κάθε ράβδου ελευθερία στροφής περί τον τοπικό άξονα s (Σχήμα 4-7).

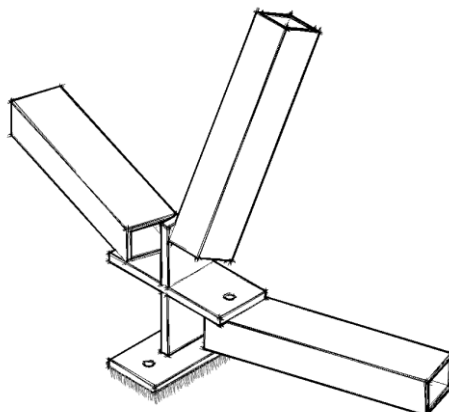
Για την υλοποίηση του σημείου περιστροφής των ράβδων κάθε ψαλιδωτού στοιχείου, έγινε δέσμευση όλων των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ των δύο «απέναντι» ενδιάμεσων σημείων των ράβδων, πλην της σχετικής στροφής περί τον άξονα z , που είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από κάθε ζεύγος ράβδων (Σχήμα 4-8).



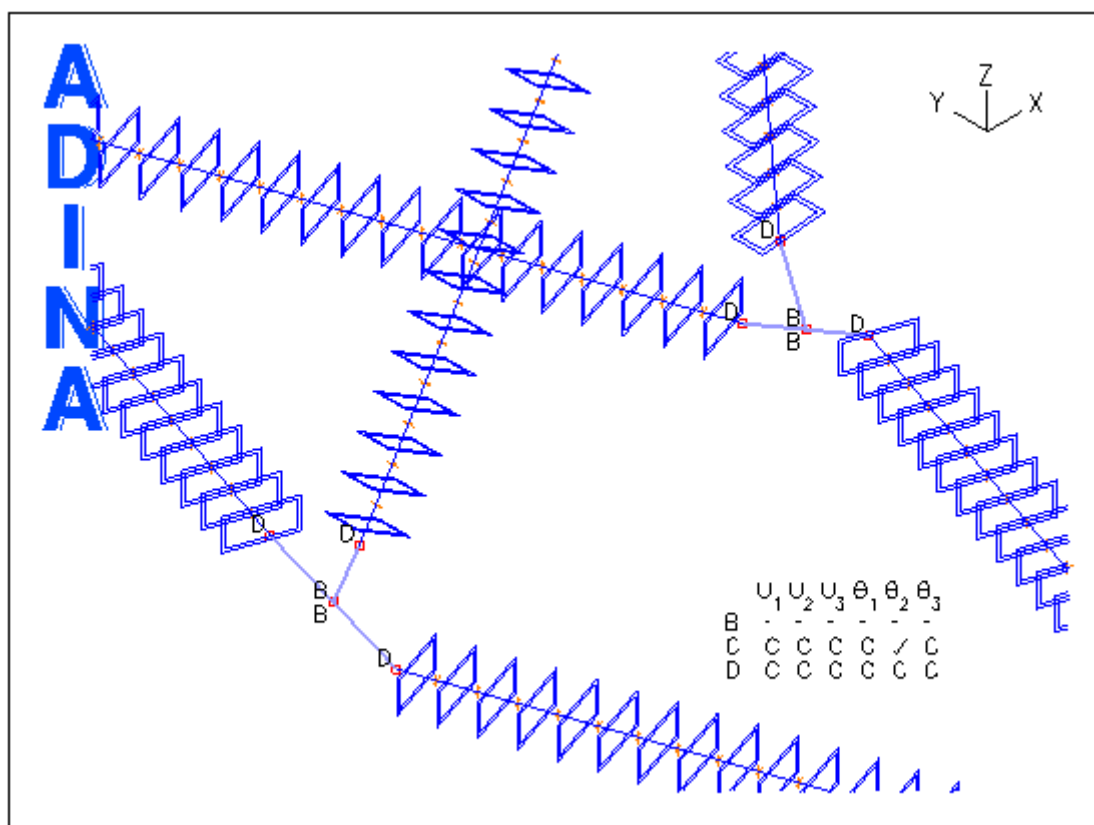
Σχήμα 4-8: Προσομοίωση σημείου περιστροφής ψαλιδωτών στοιχείων

Τέλος, για τη θεμελίωση του στεγάστρου, έγινε η θεώρηση ότι οι σύνδεσμοι που αντιστοιχούν στους κόμβους που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, θα έχουν το ένα άκρο τους διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να είναι εφικτή η αγκύρωσή του με δύο κοχλίες σε ένα σταθερό υπόβαθρο (Σχήμα

4-9). Κατά την προσομοίωση, έγινε δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας με πάκτωση στο κέντρο βάρους κάθε ακραίου κόμβου (Σχήμα 4-10).



Σχήμα 4-9: Σκαριφηματική αποτύπωση διαμορφωμένου κόμβου θεμελίωσης

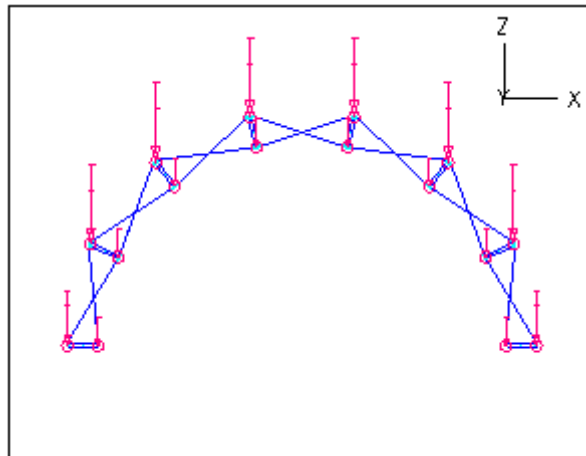


Σχήμα 4-10: Συνοριακές συνθήκες κόμβων σε επαφή με το έδαφος

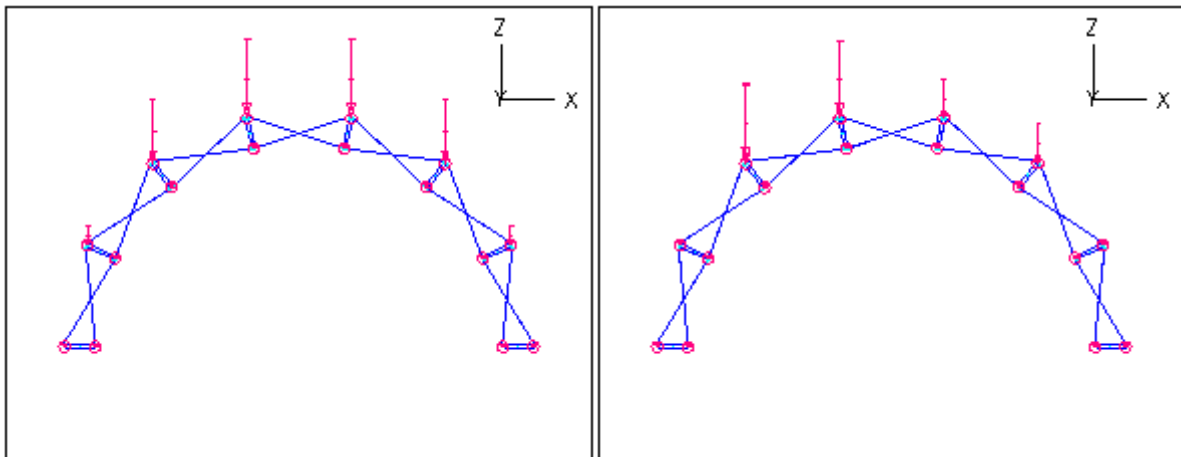
4.2.5 Δράσεις επί της κατασκευής

Η φόρτιση της κατασκευής, έγινε σύμφωνα με τα μόνιμα και κινητά φορτία που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Τα επιφανειακά φορτία χιονιού και ανέμου, και το ίδιο βάρος της μεμβράνης επικάλυψης, προσομοιώθηκαν σαν συγκεντρωμένες δυνάμεις, και εφαρμόστηκαν στο κέντρο βάρους των εξωτερικών κόμβων του στεγάστρου. Το μέτρο των συγκεντρωμένων αυτών δυνάμεων, υπολογίστηκε με τη θεώρηση ότι το φορτίο που ασκείται σε κάθε επιφάνεια κατανέμεται ισόποσα σε κάθε έναν από τους κόμβους των κορυφών της. Η διεύθυνση της κάθε δύναμης αντιστοιχεί στη διεύθυνση της εκάστοτε φόρτισης, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 (φορτίο χιονιού κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας, φορτία ανέμου κάθετα στην επιφάνεια του στεγάστρου). Το ίδιο βάρος των κόμβων και των κοχλιών

προσομοιώθηκαν επίσης σαν συγκεντρωμένη δύναμη στο κέντρο βάρους όλων των κόμβων, κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας, ενώ το ίδιο βάρος των ράβδων υπολογίστηκε αυτόματα από το λογισμικό, ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών.



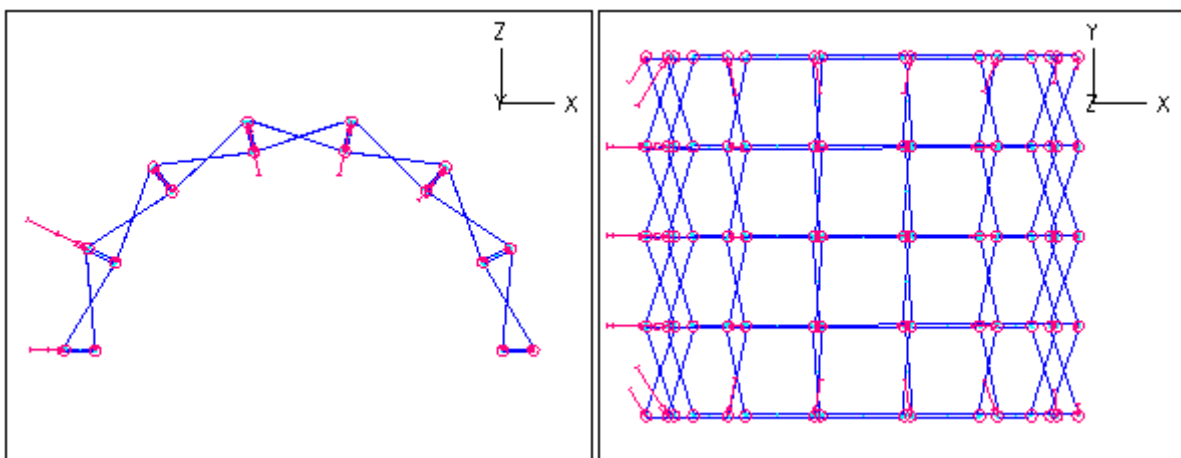
Σχήμα 4-11: Φορτία ίδιου βάρους κόμβων, κοχλιών και μεμβράνης επικάλυψης



(α)

(β)

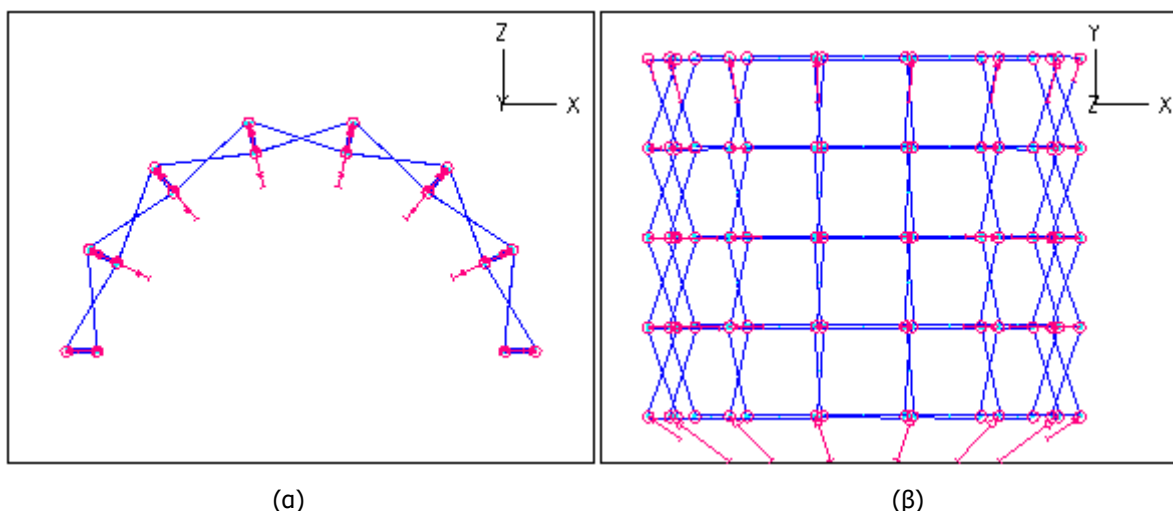
Σχήμα 4-12: Φορτία μη παρασυρμένου χιονιού (α), και παρασυρμένου χιονιού (β)



(α)

(β)

Σχήμα 4-13: Φορτία ανέμου στο καμπύλο τμήμα (α), και στα κατακόρυφα τμήματα του στεγάστρου (β), για άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση (X)



Σχήμα 4-14: Φορτία ανέμου στο καμπύλο τμήμα (α), και στα κατακόρυφα τμήματα του στεγάστρου (β), για άνεμο κατά τη διαμήκη διεύθυνση (Y)

4.2.6 Υλικό ραβδωτών στοιχείων

Ως βασικό υλικό στο προσομοίωμα του στεγάστρου, για όλες τις ράβδους των ψαλιδωτών στοιχείων, θεωρήθηκε το αλουμίνιο. Η κυριότερη παράμετρος που οδήγησε στην επιλογή του αλουμινίου για το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής, είναι το μικρό του βάρος (σε σχέση με υπόλοιπα δομικά υλικά που συναντώνται σε φέρουσες κατασκευές), που θα οδηγήσει στο σχεδιασμό ενός ελαφρύτερου στεγάστρου, με ευκολία στη μεταφορά και την ανέγερσή του.

Το αλουμίνιο συναντάται σε κράματα, που σε συνδυασμό με τη μορφή της κατεργασίας στην οποία υπόκεινται, έχουν μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που ποικίλουν. Ένα από τα ελατά κράματα αλουμινίου που συνηθίζεται να συναντάται σε φέρουσες κατασκευές, είναι το EN AW-6063 (κράμα αλουμινίου – πυριτίου – μαγνησίου), το οποίο υπόκειται σε σκλήρυνση μέσω θερμικής επεξεργασίας, με στερεά διαλυτοποίηση και τεχνητή γήρανση (επεξεργασία T6). Σύμφωνα με το Μέρος 1-1 του EN1999, οι βασικές ιδιότητες του υλικού αυτού για σωλήνες διέλασης, δίνονται στον Πίνακα 4-1:

Πίνακας 4-1: Ιδιότητες κράματος αλουμινίου EN AW-6063 T6

Κράμα EN-AW	Μορφή προϊόντος	Επεξεργασία	Πάχος t mm	f_o N/mm ²	f_u N/mm ²	BC	n_p
6063	ET	T6	t≤25	160	195	A	24

Όπου:

ET είναι ο συμβολισμός για σωλήνες διέλασης (Extruded Tube).

T6 είναι ο συμβολισμός που αντιστοιχεί σε θερμική επεξεργασία του κράματος αλουμινίου με στερεά διαλυτοποίηση και τεχνητή γήρανση.

t είναι το πάχος των τοιχωμάτων του σωληνωτού στοιχείου.

f_o είναι η χαρακτηριστική τιμή του συμβατικού ορίου διαρροής (0.2% f_o).

f_u είναι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής θραύσης.

BC είναι η κατηγορία λυγισμού (Buckling Curve).

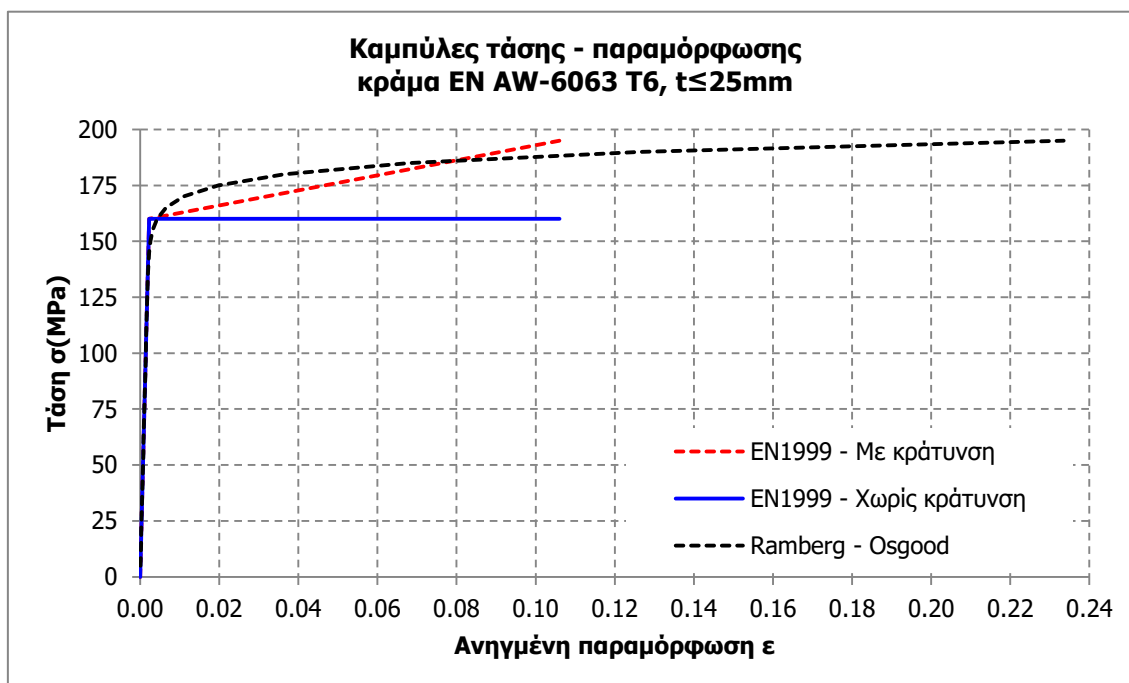
n_p είναι παράμετρος για την κατασκευή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης κατά Ramberg – Osgood.

Το μέτρο ελαστικότητας του καθαρού αλουμινίου σε θερμοκρασία δωματίου ισούται με $E=69\text{N/mm}^2$, ενώ στα κράματα κατεργασμένου αλουμινίου κυμαίνεται από $E=69\text{GPa}$ έως $E=72\text{GPa}$. Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε η θεώρηση του μέτρου ελαστικότητας

$E=70\text{GPa}$, όπως συνηθίζεται σε φέρουσες κατασκευές από αλουμίνιο. Ο λόγος Poisson λαμβάνεται ίσος με $\nu=0.33$ και το μέτρο διάτμησης προκύπτει ίσο με περίπου $G=26\text{GPa}$, σύμφωνα με τη Σχέση (4-1).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (\nu + 1)} \quad (4-1)$$

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, προκύπτουν οι διγραμμικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης με κράτυνση και χωρίς κράτυνση, σύμφωνα με το EN1999, και το συνεχές διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης κατά Ramberg Osgood (Σχήμα 4-15). Για λόγους απλότητας και λόγω ελαστικού σχεδιασμού της κατασκευής, κατά την προσομοίωση έγινε η θεώρηση γραμμικά ελαστικού – απολύτως πλαστικού υλικού. Σημειώνεται ότι λόγω ελαστικού σχεδιασμού, θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση του υλικού ως γραμμικά ελαστικό, πράγμα που θα μείωνε και το υπολογιστικό κόστος. Παρόλα αυτά, επειδή με τη θεώρηση ενός γραμμικά ελαστικού υλικού το λογισμικό δεν κάνει υπολογισμό τάσεων στα ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία, ήταν αναπόφευκτη η προσομοίωση του αλουμινίου ως γραμμικά ελαστικό – απολύτως πλαστικό υλικό.

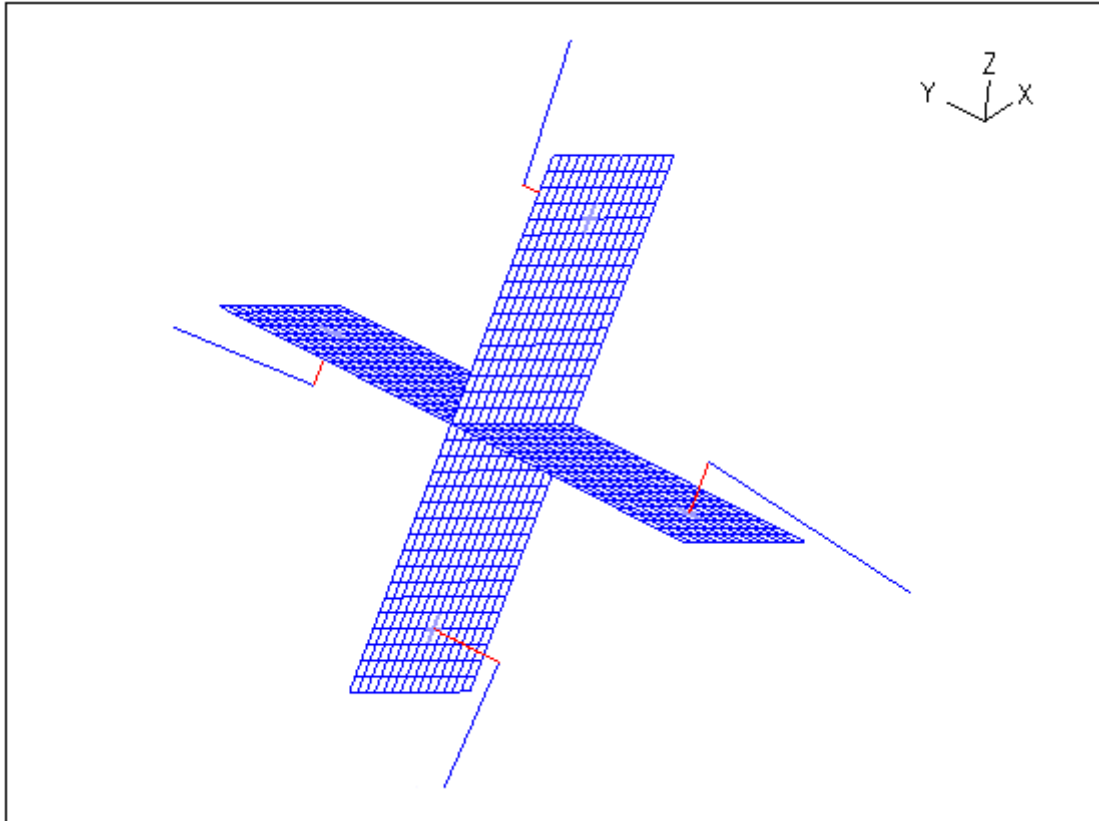


Σχήμα 4-15: Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για κράμα αλουμινίου EN AW-6063 T6, $t < 25\text{mm}$

4.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

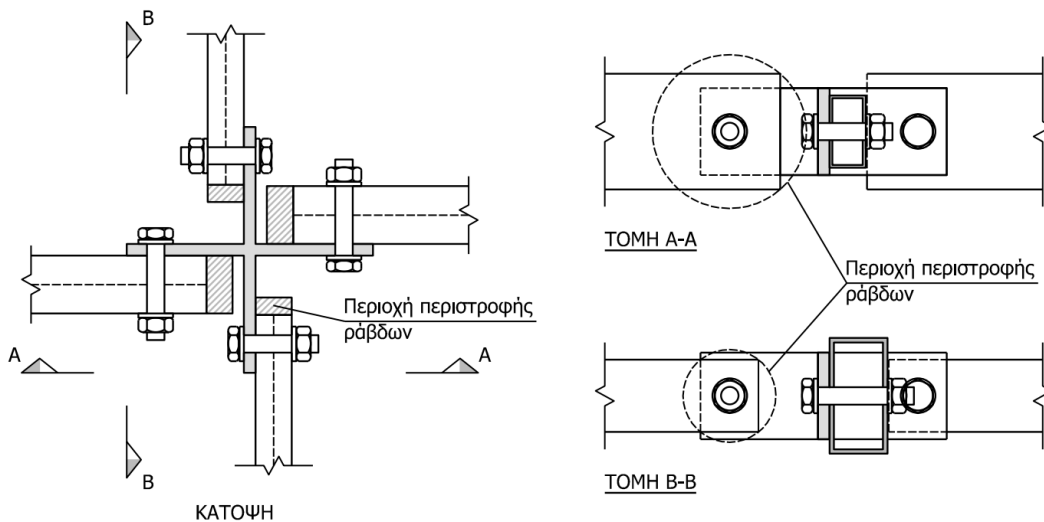
4.3.1 Προσομοίωση και γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόμβων

Μετά τη διαστασιολόγηση των ραβδωτών στοιχείων του στεγάστρου, και τον καθορισμό των διατομών τους, έγινε η προσομοίωση των κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων, στο ίδιο αριθμητικό μοντέλο, σε τρεις θέσεις, στην περιοχή όπου εντοπίστηκαν αυξημένες εντάσεις και παραμορφώσεις. Τα ελάσματα των κόμβων προσομοιώθηκαν με τετραγωνικά επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (Shell Elements) πλάτους 5mm, ενώ οι κοχλίες που τα συνδέουν με τα άκρα των ψαλιδωτών στοιχείων, προσομοιώθηκαν ως γραμμικά στοιχεία δοκού (Beam Elements) συμπαγούς διατομής. Οι κοχλίες θεωρήθηκαν πακτωμένοι στα ελάσματα, στη θέση της οπής, ενώ η σύνδεση με τα ψαλιδωτά στοιχεία έγινε με ελευθερία τις στροφής περί τον άξονα του κοχλία (Σχήμα 4-16).



Σχήμα 4-16: Προσομοίωμα κόμβου
Ελάσματα (μπλε επιφανειακά στοιχεία), κοχλίες (κόκκινα γραμμικά στοιχεία) και άκρα ψαλιδωτών στοιχείων (μπλε γραμμικά στοιχεία)

Η γεωμετρία των κόμβων σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η περιστροφή κάθε ράβδου κατά την αναδίπλωση του φορέα, χωρίς να παρεμποδίζεται από τα στοιχεία σύνδεσης (κάθετα ελάσματα και κοχλίες), και τις παρακείμενες ράβδους.



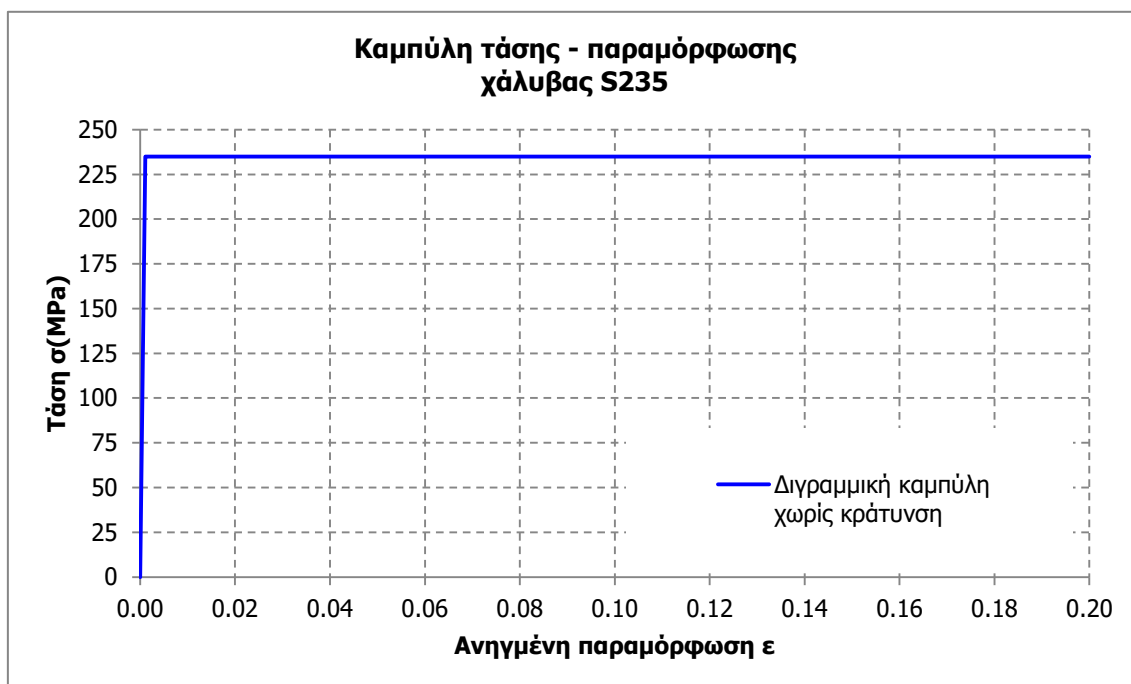
Σχήμα 4-17: Διάταξη κόμβου και συνδεσμολογία – έλεγχος λειτουργίας κατά την αναδίπλωση του φορέα

Για το λόγο αυτό, έγινε ακριβής σχεδιασμός της διάταξης του κάθε κόμβου, με τις διαστάσεις των κοχλιών, των περικοχλιών και των ροδελών σύμφωνα με τα DIN6914, DIN6915 και DIN6916 αντίστοιχα, αλλά και τις αποστάσεις των οπών από τα άκρα τόσο των χαλύβδινων ελασμάτων όσο και

των ράβδων αλουμινίου, σύμφωνα με τα EN1993 και EN1999 αντίστοιχα. Με εφαρμογή των παραπάνω, προέκυψε η διάταξη του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-17. Οι ακριβείς διαστάσεις των στοιχείων που απεικονίζονται στη διάταξη αυτή, προέκυψαν μετά τη διαστασιολόγηση των συνδέσεων που περιγράφεται στην παράγραφο 5.8.

4.3.2 Υλικό κόμβων και κοχλιών

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα ελάσματα των κόμβων, ήταν ο δομικός χάλυβας κατηγορίας S235. Κατά την προσομοίωση, το υλικό αυτό θεωρήθηκε ως γραμμικά ελαστικό – απολύτως πλαστικό (Σχήμα 4-18), με τάση διαρροής $f_y=235\text{MPa}$, μέτρο ελαστικότητας $E_s=210\text{GPa}$, και λόγο Poisson $\nu=0.30$ ($G\approx 81\text{GPa}$)[13].



Σχήμα 4-18: Διγραμμική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης δομικού χάλυβα S235

Η σύνδεση των άκρων των ψαλιδωτών στοιχείων έγινε με κοινούς κοχλίες ποιότητας 5.6. Κατά την προσομοίωση, το υλικό αυτό θεωρήθηκε ως γραμμικά ελαστικό – απολύτως πλαστικό (αντίστοιχα με το χάλυβα των ελασμάτων), με τάση διαρροής $f_y=300\text{MPa}$, μέτρο ελαστικότητας $E_s=210\text{GPa}$, και λόγο Poisson $\nu=0.30$ ($G\approx 81\text{GPa}$)[13].

4.4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η διαστασιολόγηση του στεγάστρου πραγματοποιήθηκε μέσω αναλύσεων, στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA[5]. Αρχικά, έγινε η εισαγωγή του πρώτου προσομοιώματος στο λογισμικό, και η επιβολή των φορτίων σύμφωνα με τους 12 συνδυασμούς φόρτισης για την οριακή κατάσταση αστοχίας (Πίνακας 3-11) και την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (Πίνακας 3-12) αντίστοιχα. Επειδή στο συγκεκριμένο λογισμικό δεν υπάρχει η δυνατότητα της ανάλυσης με ταυτόχρονη επιβολή των φορτίων υπό διάφορους συνδυασμούς, έπρεπε να γίνουν ξεχωριστές αναλύσεις για κάθε συνδυασμό. Έτσι, για την αποφυγή χρονοβόρων επαναλήψεων, για τη διαστασιολόγηση των ραβδωτών στοιχείων του στεγάστρου, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Βήμα 1^ο: Επιλογή πιθανών διατομών [21] για τις ράβδους των πολικών και των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων, και ανάλυση του προσομοιώματος μέσω μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας (GMNA), για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

- Βήμα 2^ο: Διαστασιολόγηση των ραβδωτών στοιχείων και προσδιορισμός των βέλτιστων διατομών, με έλεγχο των τάσεων σύμφωνα με το κριτήριο της στρωφικής ενέργειας (von Mises), την εξασφάλιση της ευστάθειας του φορέα (αποφυγή φαινομένων καθολικού λυγισμού των μελών) και την εξασφάλιση μη φαινομένων τοπικού λυγισμού (χρήση διατομών κατηγορίας 1, 2, ή 3). Έλεγχος του φορέα για τους συνδυασμούς στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.
- Βήμα 3^ο: Εντοπισμός των δυσμενέστερων για την κατασκευή συνδυασμών φορτίσεων, και διερεύνηση της επιρροής των αρχικών ατελειών στην ευστάθεια του φορέα μέσω μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA), για τους συνδυασμούς αυτούς.
- Βήμα 4^ο: Διερεύνηση της επιρροής της προσομοίωσης των χαλύβδινων κόμβων (δεύτερο αριθμητικό προσομοίωμα).

4.4.1 Τύποι αναλύσεων

4.4.1.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA), πραγματοποιήθηκε αρχικά, για μία πρώτη εκτίμηση του οριακού φορτίου κάθε φορέα. Σε επόμενο στάδιο, οι ιδιομορφές λυγισμού που προέκυψαν από την LBA ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν σαν σχήματα αρχικών ατελειών σε μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας (GMNIA).

4.4.1.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

Η μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας, πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση της αντοχής του φορέα, με διατύπωση των εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του, στην παραμορφωμένη κατάσταση. Το υλικό σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης θεωρήθηκε ως γραμμικά ελαστικό – απολύτως πλαστικό. Ο τύπος ανάλυσης που επιλέχθηκε στο λογισμικό, ήταν η Statics Analysis, με θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων. Η φόρτιση του φορέα έγινε αρχικά υπό τα μόνιμα φορτία σε 5 βήματα, και στη συνέχεια ακολούθησε η φόρτιση υπό τις μεταβλητές δράσεις σε 20 βήματα.

4.4.1.3 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Η μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες, είναι αντίστοιχη με τη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας, με τη θεώρηση αρχικών ατελειών στα μέλη του φορέα. Και στη GMNIA ανάλυση ο τύπος ανάλυσης που επιλέχθηκε στο λογισμικό, ήταν η Statics Analysis.

Όπως αναφέρθηκε, σαν σχήμα αρχικών ατελειών χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιομορφές λυγισμού που προέκυψαν από την γραμμική ανάλυση λυγισμού, για κάθε περίπτωση. Το μέγεθος των γεωμετρικών ατελειών, ορίστηκε σύμφωνα με τις επιτρεπόμενες ανοχές για την ευθυγραμμία των κοίλων ορθογωνικών δοκών αλουμινίου, που σύμφωνα με το Μέρος 7 του EN755 [14] ορίζονται ως 1.5mm/m (περίπου L/650). Παρόλα αυτά, για λόγους περαιτέρω διερεύνησης, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και με μεγαλύτερο μέγεθος αρχικών ατελειών. Ο αριθμός των ιδιομορφών λυγισμού που λήφθηκαν υπόψη, προκύπτει από το σύνολο των ιδιομορφών λυγισμού, των οποίων το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι μικρότερο από το διπλάσιο της πρώτης ιδιομορφής.

5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΟΡΕΑ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, λόγω της πολυπλοκότητας του φορέα αλλά και της σημαντικής επιρροής της γεωμετρίας των μελών του στη συμπεριφορά της κατασκευής, η διαστασιολόγηση αποτέλεσε στην ουσία μία επαναληπτική διαδικασία σύνθετων αναλύσεων, με στόχο την εύρεση των βέλτιστων διατομών για την κατασκευή. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στον τελικό φορέα, για τον έλεγχο της αντοχής του στην οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας, διερευνάται η επιρροή των στελεείων και της προσομοίωσης των κόμβων, και τέλος πραγματοποιείται διαστασιολόγηση των συνδέσεων.

5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

5.2.1 Οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)

Για τον έλεγχο της αντοχής των μελών, και με δεδομένο ότι ο φορέας πρέπει να αποκρίνεται ελαστικά κατά τη φόρτιση με τα φορτία αστοχίας, θεωρήθηκε ως κριτήριο αστοχίας το κριτήριο διαρροής von Mises, σύμφωνα με το οποίο «η διαρροή ενός όλκιμου υλικού που βρίσκεται υπό την επίδραση σύνθετης εντατικής κατάστασης, αρχίζει όταν η στροφική ενέργεια, η οποία αναπτύσσεται από την εντατική αυτή κατάσταση, γίνει ίση με την αντίστοιχη στροφική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά τη διαρροή του υλικού υπό καθαρό εφελκυσμό»[2]. Η μαθηματική έκφραση του κριτηρίου von Mises σε όρους ορθών και διατμητικών τάσεων, εκφρασμένων στο καθολικό σύστημα αξόνων xyz, είναι:

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2f_y^2 \quad (5-1)$$

Η Σχέση (5-1) μπορεί να γραφτεί στη μορφή της Σχέσης (5-2), σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η μέγιστη τάση von Mises σε κάθε διατομή των μελών του φορέα, στο λογισμικό ADINA.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (5-2)$$

Με την προϋπόθεση ότι για κάθε στοιχείο του φορέα ισχύει $\sigma_{VM} < f_y$ ($f_y = f_o$ για το αλουμίνιο), θεωρούμε ότι όλες οι διατομές των μελών έχουν επαρκή αντοχή στην ΟΚΑ, αρκεί να μην εμφανιστεί τοπικός λυγισμός σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής, πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής. Λόγω του ότι η προσομοίωση των ράβδων αλουμινίου πραγματοποιήθηκε με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία,

δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός φαινομένων τοπικού λυγισμού μέσω των αναλύσεων. Έτσι, επιλέχτηκαν διατομές κατηγορίας «το πολύ» 3, οι οποίες μπορούν να αναπτύξουν την τάση διαρροής του υλικού, πριν εμφανιστούν φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη στις αναλύσεις τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας του φορέα αλλά και τις αρχικές ατέλειες, εξασφαλίζεται και η αντοχή των μελών έναντι λυγισμού.

5.2.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Ο έλεγχος της κατασκευής στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, έγινε με τον υπολογισμό των μέγιστων μετατοπίσεων του φορέα υπό τα φορτία λειτουργίας, και τη σύγκρισή τους με τα όρια που αναφέρονται στον Πίνακα 5-1. Τα όρια αυτά δεν αναφέρονται σε κάποιο πρότυπο, παρόλα αυτά κρίθηκαν ικανοποιητικά για μία κατασκευή σαν αυτή που μελετάται, καθώς δεν έχει ιδιαίτερες λειτουργικές απαιτήσεις.

Πίνακας 5-1: Όρια κατακόρυφων και οριζόντιων παραμορφώσεων

Βύθιση στεγάστρου	Οριζόντια μετατόπιση
w	u
L/200	H/200

Όπου:

L είναι το πλάτος του στεγάστρου.

H είναι το ύψος του στεγάστρου.

Στις Σχέσεις, (5-3) και (5-4), γίνεται υπολογισμός των παραπάνω τιμών για το στέγαστρο.

$$w = L / 200 = 5.72\text{m} / 200 \rightarrow w = 29\text{mm} \quad (5-3)$$

$$u = H / 200 = 3.45\text{m} / 200 \rightarrow u = 17\text{mm} \quad (5-4)$$

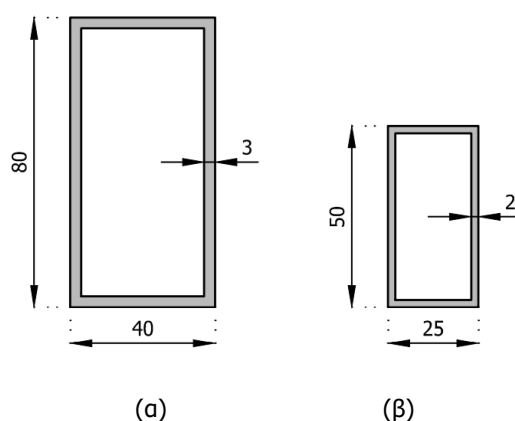
Όπου:

$$L = \min\{L_x; L_y\} = \min\{6.90; 5.72\} = 5.72\text{m}$$

$$H = 3.45\text{m}$$

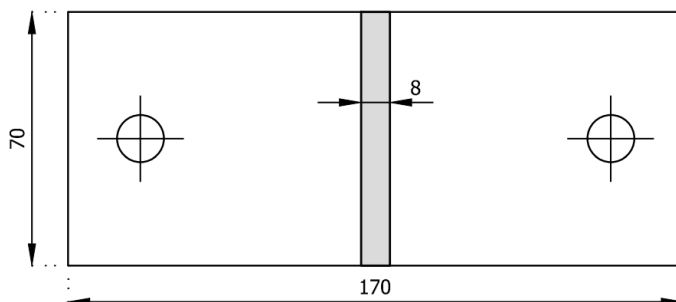
5.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΛΩΝ

Τα κύρια μέλη του φορέα, τα οποία διαστασιολογήθηκαν μέσω των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, είναι οι ράβδοι των πολικών και των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων, τα συρματόσχοινα του συστήματος δυσκαμψίας, τα ελάσματα των κόμβων, και οι κοχλίες σύνδεσης.



Σχήμα 5-1: Διατομή στοιχείων δοκού, πολικών (α) και μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων (β)

Για τα πολικά ψαλιδωτά στοιχεία, επιλέχθηκε κοίλη ορθογωνική διατομή διαστάσεων 80x40x3mm, ενώ για τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία, επιλέχθηκε κοίλη ορθογωνική διατομή διαστάσεων 50x25x2mm (Σχήμα 5-1). Για την κατασκευή των κόμβων, επιλέχθηκαν ελάσματα διαστάσεων 170x60mm, πάχους 8mm (Σχήμα 5-2), και για τη σύνδεση των ψαλιδωτών στοιχείων στους κόμβους επιλέχτηκαν κοχλίες ονομαστικής διαμέτρου 12mm (κοχλίες M12 κατά DIN6914[7]).



Σχήμα 5-2: Όψη ελάσματος χαλύβδινου κόμβου

5.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Οι διατομές κραμάτων αλουμινίου, αντίστοιχα με τις διατομές από χάλυβα, κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με την έκταση στην οποία η αντοχή και η στροφική ικανότητά τους περιορίζονται από φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Σύμφωνα με το Μέρος 1-1 του EN1999 [13], οι τέσσερις αυτές κατηγορίες είναι οι εξής:

- Κατηγορία 1: Διατομές οι οποίες μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, σχηματίζοντας πλαστική άρθρωση με τη στροφική ικανότητα που απαιτείται από την πλαστική ανάλυση.
- Κατηγορία 2: Διατομές οι οποίες μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη στροφική ικανότητα λόγω τοπικού λυγισμού.
- Κατηγορία 3: Διατομές στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα μπορεί να φτάσει μέχρι το όριο διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός εμποδίζει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- Κατηγορία 4: Διατομές στις οποίες ο τοπικός λυγισμός θα εμφανιστεί πριν την ανάπτυξη της θλιπτικής τάσης διαρροής, σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής.

5.4.1 Παράμετρος λυγηρότητας

Για την κατάταξη μιας διατομής από αλουμίνιο σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της παραμέτρου λυγηρότητας β , για το κάθε επιμέρους στοιχείο της διατομής, αφού πρώτα χαρακτηριστούν σύμφωνα με το Σχήμα 5-3, όπου:

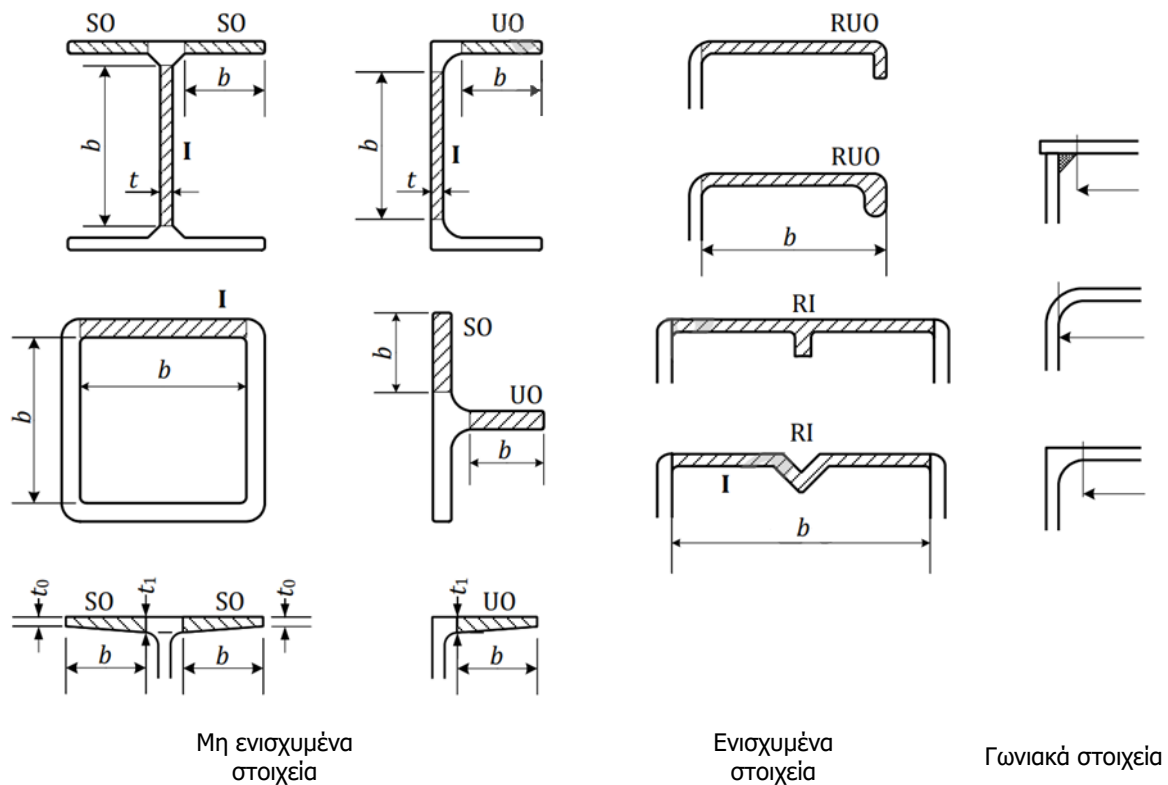
SO: συμμετρικώς προεξέχοντα στοιχεία.

UO: ασύμμετρα προεξέχοντα στοιχεία.

I: εσωτερικό στοιχείο.

RI: ενισχυμένο εσωτερικό στοιχείο.

RUO: ενισχυμένο, ασύμμετρα προεξέχον στοιχείο.



Σχήμα 5-3: Κρίσιμα στοιχεία για την ταξινόμηση των διατομών [EN1999]

Για την περίπτωση των κοίλων ορθογωνικών διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για το φορέα, αυτές αποτελούνται από τέσσερα μη ενισχυμένα επίπεδα στοιχεία, θεωρούμενα ως εσωτερικά (I). Στην περίπτωση αυτή, η παράμετρος λυγηρότητας υπολογίζεται από τη Σχέση (5-5).

$$\beta = \eta \cdot b / t \quad (5-5)$$

Όπου:

- b είναι το πλάτος του στοιχείου.
- t είναι το πάχος του στοιχείου.
- η είναι ο συντελεστής μεταβολής τάσεων.

Ο λόγος μεταβολής των τάσεων υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση (5-6), και εξαρτάται από το λόγο των τάσεων στα άκρα του ελάσματος (ψ), λόγω μη ομοιόμορφης κατανομής.

$$\begin{aligned} \eta &= 0.70 + 0.30 \cdot \psi & (1 \geq \psi \geq -1) \\ \eta &= 0.80 / (1 - \psi) & (\psi < -1) \end{aligned} \quad (5-6)$$

Επειδή στα μέλη του φορέα, η κατανομή των τάσεων στα ελάσματα των διατομών δεν είναι η ίδια σε όλες τις θέσεις, ο συντελεστής μεταβολής των τάσεων θεωρήθηκε ίσος με τη μονάδα (ομοιόμορφη θλίψη), ως η δυσμενέστερη περίπτωση που καλύπτει όλες τις υπόλοιπες πιθανές (Σχήμα 5-4). Έτσι, οι παράμετροι λυγηρότητας για τις διατομές των ράβδων των ψαλιδωτών στοιχείων του φορέα, είναι ίσες με:

– Πολικά ψαλιδωτά στοιχεία – ελάσματα κάθετα στον ισχυρό άξονα:

$$\beta = \eta \cdot b / t = 1.74 / 3 \rightarrow \beta = 24.67 \quad (5-7)$$

Όπου:

$$b = H - 2 \cdot t = 80 - 2 \cdot 3 \rightarrow b = 74\text{mm}$$

$$t = 3\text{mm}$$

$$\eta = 1$$

- Πολικά ψαλιδωτά στοιχεία – ελάσματα παράλληλα στον ισχυρό άξονα:

$$\beta = \eta \cdot b / t = 1 \cdot 34 / 3 \rightarrow \beta = 11.33 \quad (5-8)$$

Όπου:

$$b = B - 2 \cdot t = 40 - 2 \cdot 3 \rightarrow b = 34\text{mm}$$

$$t = 3\text{mm}$$

$$\eta = 1$$

- Μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία – ελάσματα κάθετα στον ισχυρό άξονα:

$$\beta = \eta \cdot b / t = 1 \cdot 46 / 2 \rightarrow \beta = 23.00 \quad (5-9)$$

Όπου:

$$b = H - 2 \cdot t = 50 - 2 \cdot 2 \rightarrow b = 46\text{mm}$$

$$t = 2\text{mm}$$

$$\eta = 1$$

- Μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία – ελάσματα παράλληλα στον ισχυρό άξονα:

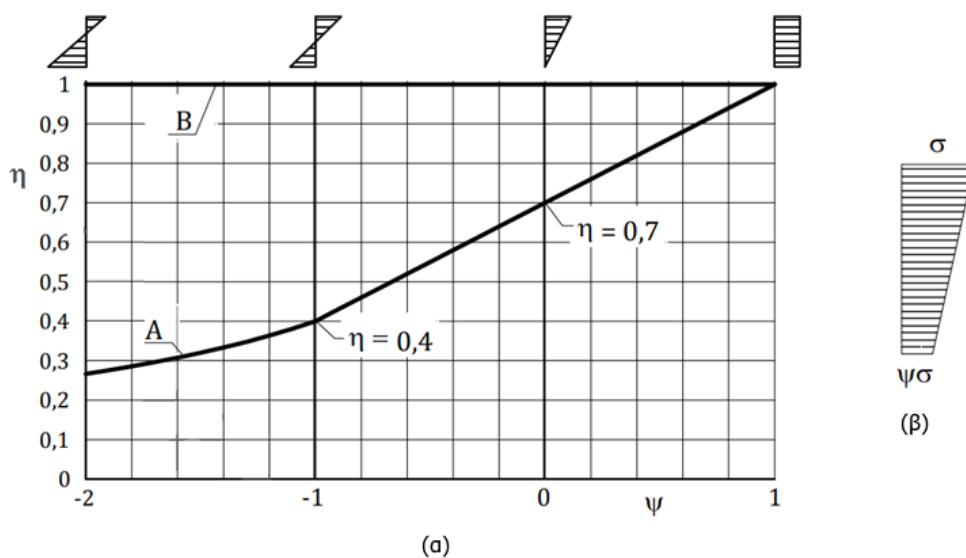
$$\beta = \eta \cdot b / t = 1 \cdot 21 / 2 \rightarrow \beta = 10.50 \quad (5-10)$$

Όπου:

$$b = B - 2 \cdot t = 25 - 2 \cdot 2 \rightarrow b = 21\text{mm}$$

$$t = 2\text{mm}$$

$$\eta = 1$$



Σχήμα 5-4: Συντελεστής μεταβολής τάσεων η (α) και λόγος των τάσεων ψ (β)

5.4.2 Κατάταξη διατομών κατά EN1999

Για την κατάταξη των διατομών σε μία από τις τέσσερις κατηγορίες, αρκεί η σύγκριση της παραμέτρου λυγηρότητας κάθε ελάσματος, με τις τιμές του Πίνακα 8.1 του EN1999-1-1. Για $\beta_2 > \beta_3$, το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 4, ενώ για $\beta_2 \leq \beta_3$, το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 3 (Πίνακας 5-2). Στην περίπτωση όπου $\beta < \beta_2$, το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 2 ή 1 (Πίνακας 5-3). Αν τα ελάσματα μίας διατομής ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες, τότε η διατομή κατατάσσεται στη δυσμενέστερη κατηγορία εξ αυτών.

Πίνακας 5-2: Παράμετρος λυγηρότητας β_2/ε και β_3/ε

Παράμετρος λυγηρότητας β_2/ε και β_3/ε					
Συγκολλήσεις	Κατηγορία λυγισμού (BC)	Εσωτερικό στοιχείο		Εξωτερικό στοιχείο	
		β_2/ε	β_3/ε	β_2/ε	β_3/ε
Χωρίς συγκολλήσεις	A	16.0	22.0	4.5	6.0
	B	16.0	20.0	4.5	5.5
	C	16.0	18.0	4.5	5.0
Με συγκολλήσεις	A	13.0	18.0	4.0	5.0
	B	13.0	16.5	3.8	4.5
	C	13.0	15.0	3.5	4.0

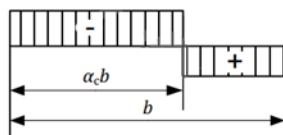
Πίνακας 5-3: Επιτρεπόμενες τιμές του λόγου b/t , για διατομές χωρίς συγκολλήσεις

Επιτρεπόμενες τιμές του λόγου b/t , για διατομές χωρίς συγκολλήσεις				
Κατηγορία διατομής	Εσωτερικό στοιχείο		Εξωτερικό στοιχείο	
	$a_c \leq 0.5$	$a_c > 0.5$	Μέγιστη θλίψη στο δεσμευμένο άκρο	Μέγιστη θλίψη στο ελεύθερο άκρο
Κατηγορία 1	$\leq \frac{16 \cdot \varepsilon}{a_c}$	$\leq \frac{56 \cdot \varepsilon}{5.5 \cdot a_c - 1}$	$\leq \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_c}$	$\leq \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_c^{3/2}}$
Κατηγορία 2	$\leq \frac{19 \cdot \varepsilon}{a_c}$	$\leq \frac{88 \cdot \varepsilon}{6.53 \cdot a_c - 1}$	$\leq \frac{4.5 \cdot \varepsilon}{a_c}$	$\leq \frac{4.5 \cdot \varepsilon}{a_c^{3/2}}$

Όπου:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_o}}, f_o \text{ σε MPa} \quad (5-11)$$

και a_c , είναι παράμετρος που εξαρτάται από το μήκος του ελάσματος που βρίσκεται σε θλίψη, ως προς το συνολικό μήκος αυτού (Σχήμα 5-5).



Σχήμα 5-5: Υπολογισμός παραμέτρου a_c

Τα όρια των παραμέτρων λυγηρότητας για τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στο φορέα του στεγάστρου, για την κατάταξη σε κατηγορία 4, 3 ή κατηγορία 2 ή 1, υπολογίστηκαν για κατηγορία λυγισμού A (κράμα EN AW-6063 T6) και εσωτερικά στοιχεία χωρίς συγκολλήσεις, σύμφωνα με τη Σχέση (5-12):

$$\begin{aligned} \beta_2 / \varepsilon = 16 &\rightarrow \beta_2 = 1.25 \cdot 16 \rightarrow \beta_2 = 20.0 \\ \beta_3 / \varepsilon = 22 &\rightarrow \beta_3 = 1.25 \cdot 22 \rightarrow \beta_3 = 27.5 \end{aligned} \quad (5-12)$$

Όπου:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{160}} = 1.25$$

Για τη διατομή των ράβδων των πολικών ψαλιδωτών στοιχείων ισχύει:

Ελάσματα κάθετα στον ισχυρό άξονα: $\beta_2 \leq \beta = 24.67 \leq \beta_3$ → Κατηγορία 3.
 Ελάσματα παράλληλα στον ισχυρό άξονα: $\beta = 11.33 < \beta_2$ → Κατηγορία 2 ή 1.

Επομένως η διατομή κατατάσσεται στην κατηγορία 3.

Για τη διατομή των ράβδων των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων ισχύει:

Ελάσματα κάθετα στον ισχυρό άξονα: $\beta_2 \leq \beta = 23.00 \leq \beta_3$ → Κατηγορία 3.
 Ελάσματα παράλληλα στον ισχυρό άξονα: $\beta = 10.50 < \beta_2$ → Κατηγορία 2 ή 1.

Επομένως η διατομή κατατάσσεται στην κατηγορία 3.

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Στην παρούσα παράγραφο, γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας, στην οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας. Αρχικά παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη μορφή, για κάθε συνδυασμό φόρτισης, τα αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη μετατόπιση του στεγάστρου κατά x, y και z (ΟΚΛ), και τη μέγιστη τάση von Mises που παρατηρήθηκε στα πολικά και τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία, καθώς και τους συνδέσμους δυσκαμψίας (ΟΚΑ). Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες παραμόρφωσης και τα εντατικά μεγέθη του φορέα για τους κρίσιμότερους συνδυασμούς.

5.5.1 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

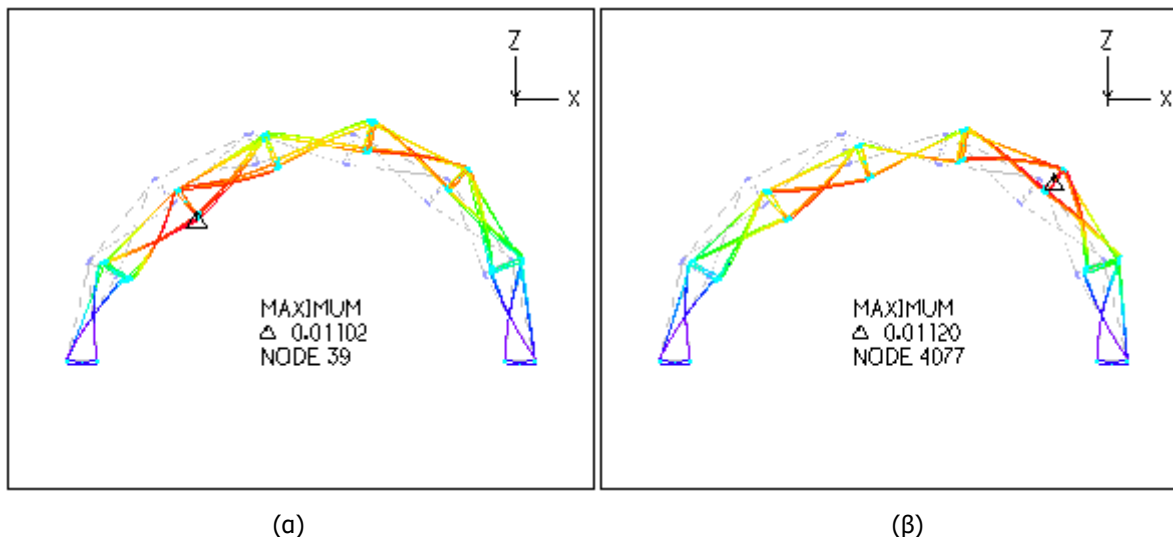
Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις του στεγάστρου, στις τρεις διευθύνσεις, για κάθε συνδυασμό φόρτισης. Ταυτόχρονα, υπολογίζεται ο λόγος μετατόπισης προς το ύψος ή το μήκος της κατασκευής, για τη σύγκριση με τα όρια που έχουν τεθεί για τις οριζόντιες μετακινήσεις και τη βύθιση του στεγάστρου, αντίστοιχα.

Πίνακας 5-4: Μέγιστες μετατοπίσεις στεγάστρου

Συνδυασμός φόρτισης	Μέγιστη μετατόπιση κατά X		Μέγιστη μετατόπιση κατά Y		Μέγιστη μετατόπιση κατά Z	
	mm	u_x/H	mm	u_y/H	mm	w/L
SLS_LC1	+5	1/690	+2	1/1725	-8	1/715
SLS_LC2	+8	1/431	-3	1/1150	-8	1/715
SLS_LC3	+10	1/345	-3	1/1150	+9	1/636
SLS_LC4	-3	1/1150	+14	1/246	+2	1/2860
SLS_LC5	+11	1/314	+2	1/1725	+7	1/817
SLS_LC6	+6	1/575	+16	1/216	-5	1/1144
SLS_LC7	+11	1/314	-3	1/1150	-8	1/715
SLS_LC8	+9	1/383	+12	1/288	-9	1/636
SLS_LC9	+7	1/493	-2	1/1725	-4	1/1430
SLS_LC10	-6	1/575	+11	1/314	-9	1/636
SLS_LC11	+9	1/383	-2	1/1725	+6	1/953
SLS_LC12	-5	1/690	+16	1/216	+5	1/1144

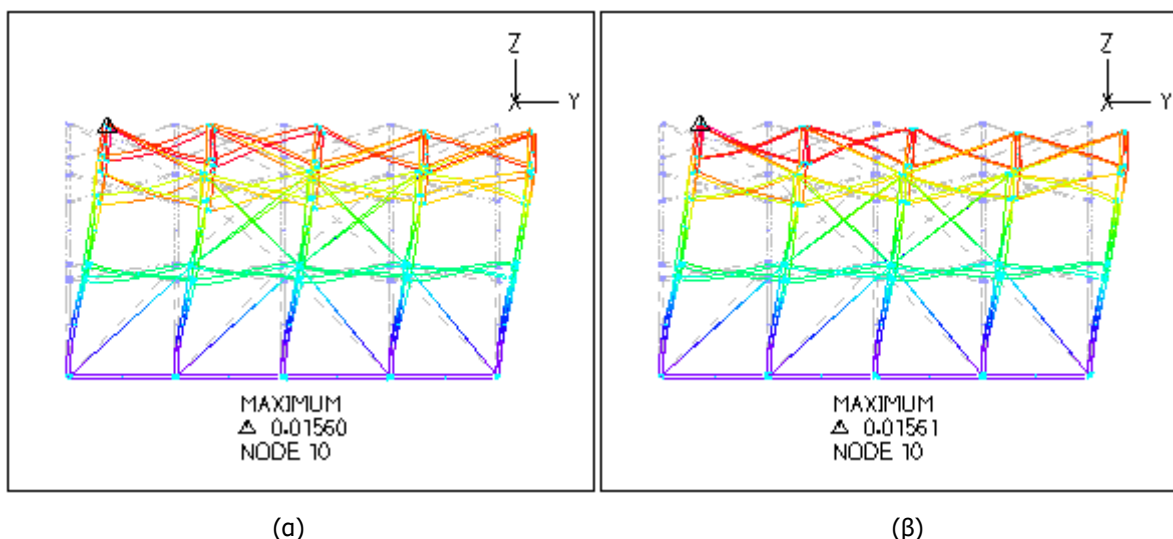
Από την καταγραφή των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα εξής σχόλια:

- Για τις μετατοπίσεις κατά X, δυσμενέστεροι είναι οι συνδυασμοί φόρτισης SLS_{LC5} και SLS_{LC7}, οι οποίοι έδωσαν οριζόντια μετατόπιση της τάξης των 11mm (λόγος $H/314 < H/200$). Και για τους δύο αυτούς συνδυασμούς, τα μοναδικά κινητά φορτία που λήφθηκαν υπόψη είναι το φορτίο ανέμου κατά X, και το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού. Η διαφορά των δύο συνδυασμών είναι ότι στον πρώτο, κύριο κινητό είναι το φορτίο του ανέμου, ενώ στον δεύτερο είναι το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού.



Σχήμα 5-6: Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά X, για τους συνδυασμούς φόρτισης SLS_{LC5} (α) και SLS_{LC7} (β)

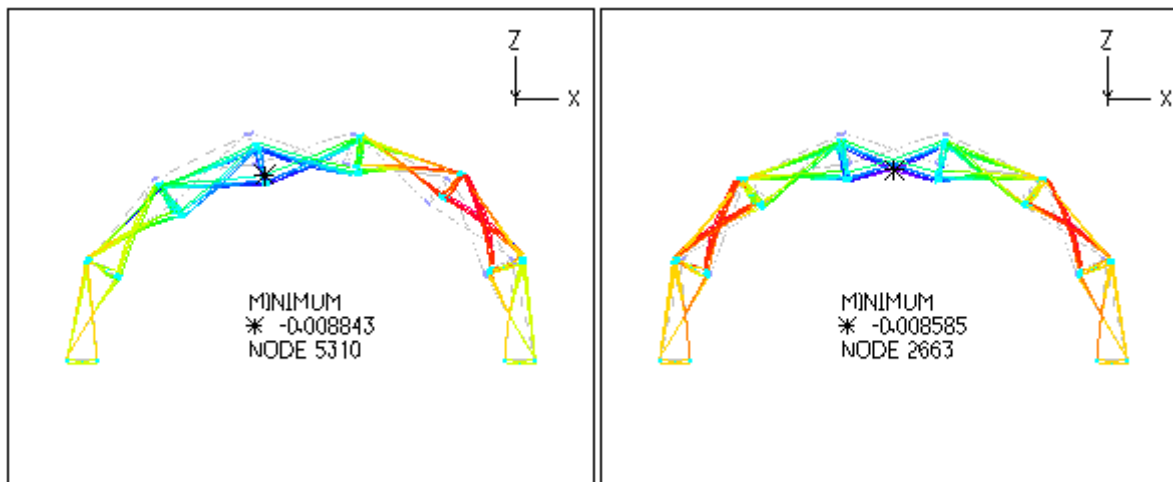
- Για τις μετατοπίσεις κατά Y, δυσμενέστεροι είναι οι συνδυασμοί φόρτισης SLS_{LC6} και SLS_{LC12}, οι οποίοι έδωσαν οριζόντια μετατόπιση της τάξης των 16mm (λόγος $H/216 < H/200$). Και για τους δύο αυτούς συνδυασμούς, σαν κύριο κινητό φορτίο θεωρήθηκε το φορτίο του ανέμου κατά τη διαμήκη διεύθυνση (άνεμος κατά Y), ενώ ως δευτερεύον κινητό το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού για τον SLS_{LC6}, και το φορτίο του μη παρασυρμένου χιονιού για τον SLS_{LC12}. Σημειώνεται ότι οι συγκεκριμένοι συνδυασμοί φόρτισης, είναι οι δυσμενέστεροι όλων, για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.



Σχήμα 5-7: Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά Y, για τους συνδυασμούς φόρτισης SLS_{LC6} (α) και SLS_{LC12} (β)

- Για τη βύθιση του στεγάστρου (μετατοπίσεις κατά Z), δυσμενέστεροι είναι οι συνδυασμοί φόρτισης SLS_{LC8} και SLS_{LC10}, οι οποίοι έδωσαν κατακόρυφη μετατόπιση της τάξης των 9mm (λόγος $L/636 < L/200$). Για τους συνδυασμούς αυτούς, σαν κύριο κινητό φορτίο θεωρήθηκε το χιόνι, το

παρασυρμένο και το μη παρασυρμένο αντίστοιχα, ενώ ως δευτερεύον κινητό το φορτίο ανέμου κατά τη διαμήκη έννοια του στεγάστρου.

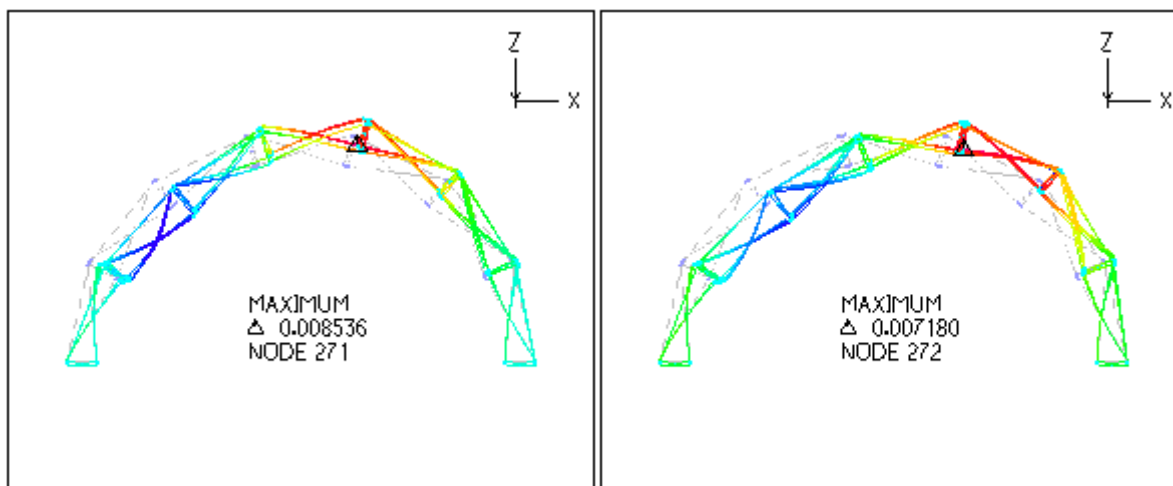


(a)

(β)

Σχήμα 5-8: Βύθιση στεγάστρου, για τους συνδυασμούς φόρτισης SLS_LC8 (α) και SLS_LC10 (β)

Αντίστοιχου μεγέθους είναι και η ανύψωση του στεγάστρου, η οποία οφείλεται στην υποπίεση που προκαλεί ο άνεμος κατά Χ. Για το συνδυασμό ULS_LC3, όπου το μοναδικό κινητό φορτίο είναι ο άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση, η ανύψωση του στεγάστρου αντιστοιχεί σε 9mm (λόγος $L/636 < L/200$), ενώ με την προσθήκη του παρασυρμένου χιονιού, ως δευτερεύον κινητό φορτίο, ο συνδυασμός SLS_LC5 έδωσε ανύψωση ίση με 7mm (λόγος $L/817 < L/200$), μειωμένη λόγω της ευμενούς επιρροής του χιονιού στη συγκεκριμένη περίπτωση.



(a)

(β)

Σχήμα 5-9: Ανύψωση στεγάστρου, για τους συνδυασμούς φόρτισης SLS_LC3 (α) και SLS_LC5 (β)

5.5.2 Οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)

Στον Πίνακα 5-5 παρουσιάζονται οι μέγιστες τάσεις von Mises που εντοπίστηκαν σε κάθε έναν από τους τρεις τύπους μελών του στεγάστρου, για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων. Όπως φαίνεται από τους αντίστοιχους λόγους επάρκειας, οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φορτίσεων έχουν ως εξής:

- Για τα πολικά φαλιδωτά στοιχεία, κρίσιμος είναι ο συνδυασμός φόρτισης ULS_LC3 με λόγο επάρκειας 0.99. Για το συνδυασμό αυτό, έχει θεωρηθεί ως κινητό φορτίο μόνο το φορτίο του ανέμου στην εγκάρσια διεύθυνση (κατά Χ).

- Για τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία, δυσμενέστεροι είναι οι συνδυασμοί ULS_LC5 και ULS_LC3, με λόγο επάρκειας 0.59 και 0.58 αντίστοιχα. Για το συνδυασμό ULS_LC5, θεωρήθηκε ως κύριο κινητό το φορτίο του ανέμου στην εγκάρσια διεύθυνση και ως δευτερεύον το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού.
- Για τους συνδέσμους δυσκαμψίας, κρίσιμος είναι ο συνδυασμός φόρτισης ULS_LC6, με λόγο επάρκειας 0.68, για τον οποίο θεωρήθηκε ως κύριο κινητό το φορτίο του ανέμου στη διαμήκη διεύθυνση (κατά Υ) και ως δευτερεύον το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού. Αντίστοιχου μεγέθους λόγος επάρκειας (0.67) προέκυψε από το συνδυασμό ULS_LC12, για τον οποίο κύριο κινητό είναι πάλι το φορτίο του ανέμου στη διαμήκη διεύθυνση, με δευτερεύον κινητό το φορτίο του μη παρασυρμένου χιονιού, ενώ με μοναδικό κινητό φορτίο τον άνεμο κατά τη διαμήκη διεύθυνση (ULS_LC4), ο λόγος επάρκειας προέκυψε ίσος με 0.66.

Πίνακας 5-5: Τάσεις von Mises (kPa) και λόγοι επάρκειας μελών στην OKA

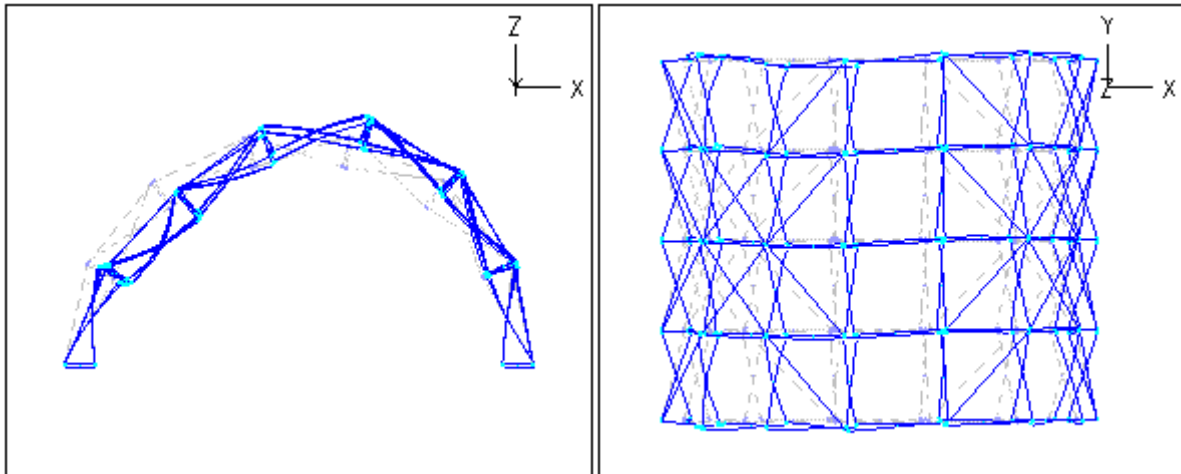
Συνδυασμός φόρτισης	Πολικά ψαλιδωτά στοιχεία		Μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία		Σύνδεσμοι δυσκαμψίας	
	kPa	ratio	kPa	ratio	kPa	ratio
ULS_LC1	99541	0.62	53453	0.33	39824	0.07
ULS_LC2	105197	0.66	72874	0.46	54768	0.10
ULS_LC3	158525	0.99	92898	0.58	77301	0.14
ULS_LC4	46039	0.29	58857	0.37	361454	0.66
ULS_LC5	122408	0.77	93979	0.59	83916	0.15
ULS_LC6	59817	0.37	83344	0.52	372799	0.68
ULS_LC7	70758	0.44	76069	0.48	66959	0.12
ULS_LC8	95637	0.60	90712	0.57	249308	0.46
ULS_LC9	64494	0.40	52514	0.33	43006	0.08
ULS_LC10	90113	0.56	76365	0.48	239566	0.44
ULS_LC11	116537	0.73	85160	0.53	70541	0.13
ULS_LC12	56972	0.36	77351	0.48	366763	0.67

Έπειτα από τα παραπάνω σχόλια, και δεδομένου ότι οι λόγοι επάρκειας των μελών για τους υπόλοιπους συνδυασμούς φορτίσεων βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα, κρίθηκε ότι προκειμένου να μειωθεί σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της κατασκευής, η περαιτέρω διερεύνηση της αντοχής μπορεί να γίνει για τους συνδυασμούς φορτίσεων ULS_LC3 και ULS_LC6, στους οποίους σαν μεταβλητή δράση κυριαρχεί ο άνεμος στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις αντίστοιχα.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται εικόνες που αφορούν την εντατική και την παραμορφωσιακή κατάσταση του φορέα, για τους συνδυασμούς ULS_LC3 και ULS_LC6. Για τους συνδυασμούς αυτούς, γίνεται αρχικά εντοπισμός της μέγιστης τάσης von Mises που αναπτύσσεται σε κάποιο από τα μέλη της κατασκευής, και στη συνέχεια αναλύονται τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών ανάλογα με την περιοχή όπου εμφανίστηκε.

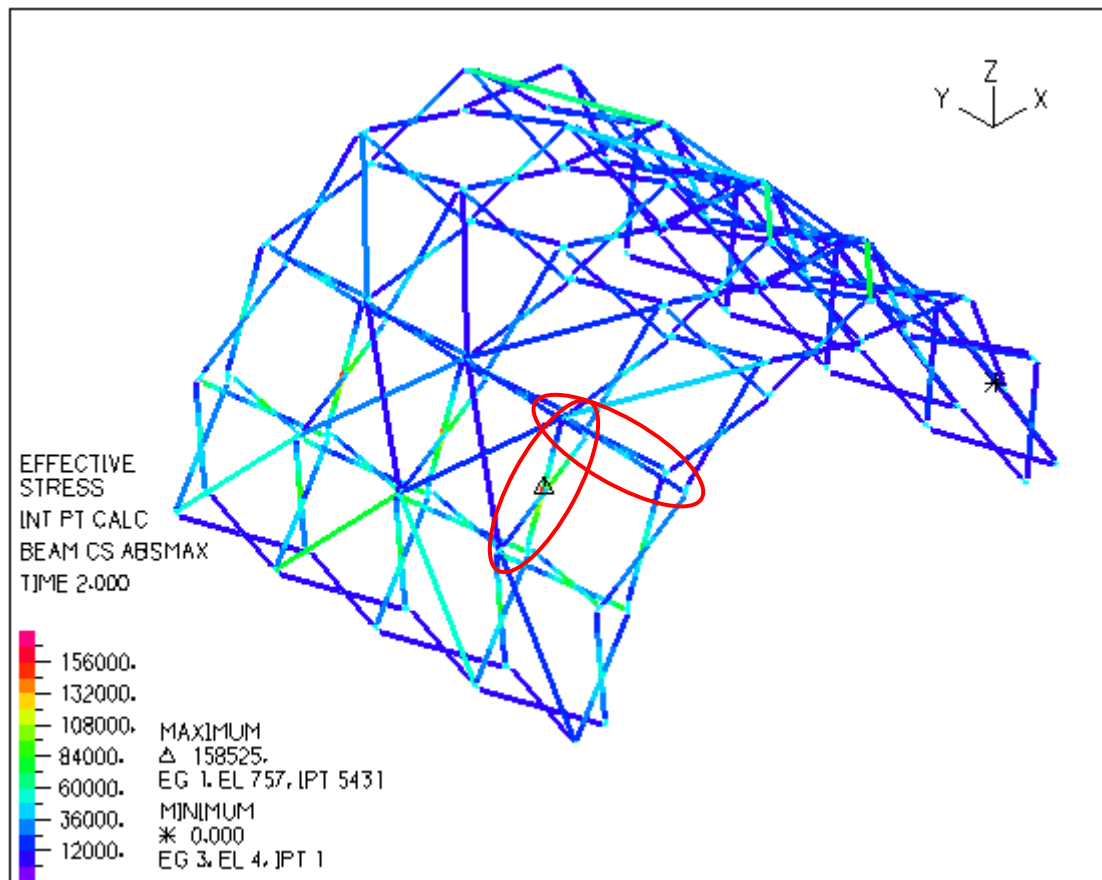
5.5.2.1 Συνδυασμός φόρτισης ULS_LC3: Άνεμος κατά Χ

Ο συνδυασμός φόρτισης με μοναδικό κινητό φορτίο το φορτίο του ανέμου κατά την εγκάρσια διεύθυνση, ήταν ο πλέον κρίσιμος για τη διαστασιολόγηση των πολικών ψαλιδωτών στοιχείων, και ταυτόχρονα ο δυσμενέστερος για τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία. Στο Σχήμα 5-10 παρουσιάζεται η παραμορφωσιακή κατάσταση του φορέα, κατά το συνδυασμό αυτό, η οποία είναι αναμενόμενη λόγω της πίεσης του ανέμου στην προσήνεμη πλευρά, και της υποπίεσης στην υπήνεμη.



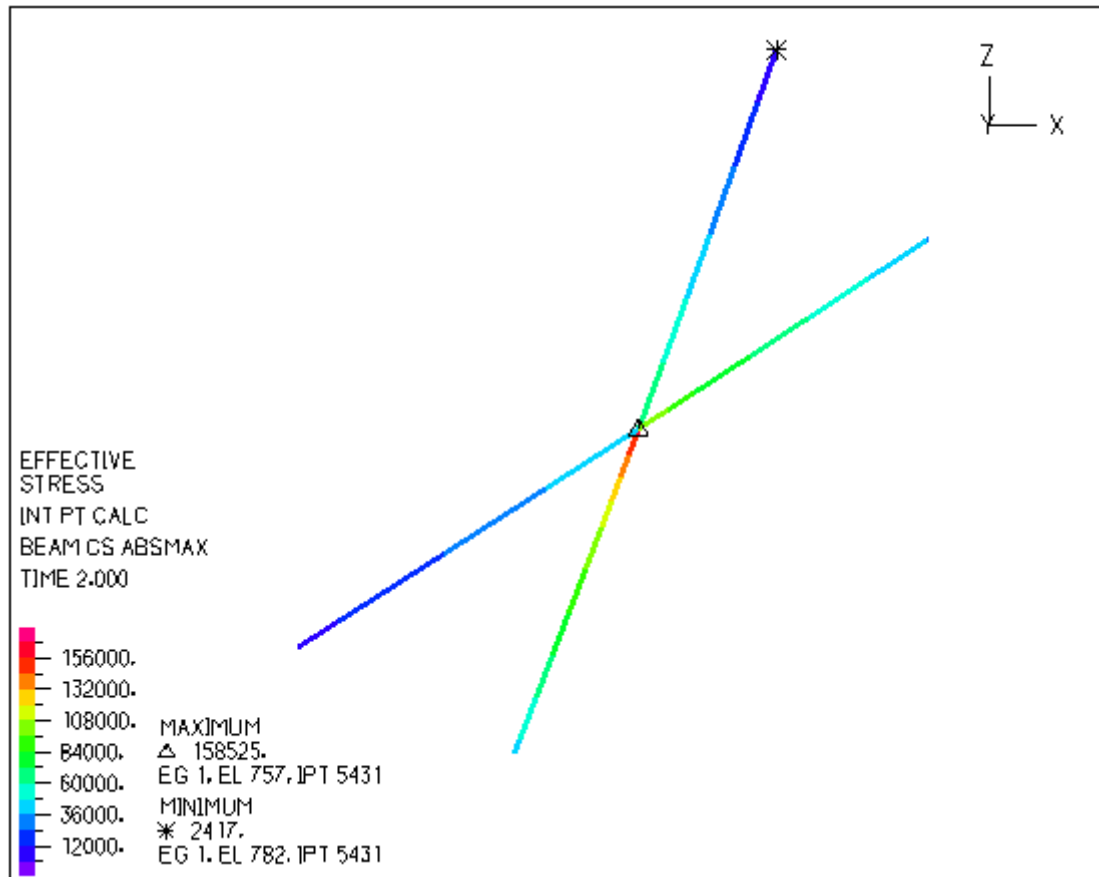
Σχήμα 5-10: Παραμόρφωση του φορέα για άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-11, η μέγιστη τάση von Mises, εντοπίζεται σε πολικό ψαλιδωτό στοιχείο του δεύτερου τόξου, στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου. Το μέγεθος της κρίσιμης τάσης που αναπτύσσεται, αντιστοιχεί σε 158.53MPa, και αντιστοιχεί στο 99% της χαρακτηριστικής τιμής του συμβατικού ορίου διαρροής του υλικού ($f_o=160\text{MPa}$). Ταυτόχρονα, στην ίδια περιοχή εντοπίζεται η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία, και αντιστοιχεί στην τιμή των 92.90MPa, δηλαδή στο 59% του ορίου διαρροής του υλικού. Σε ό,τι αφορά τους συνδέσμους δυσκαμψίας, η μέγιστη τάση αντιστοιχεί σε δύναμη ίση με το 14% της αντοχής τους.



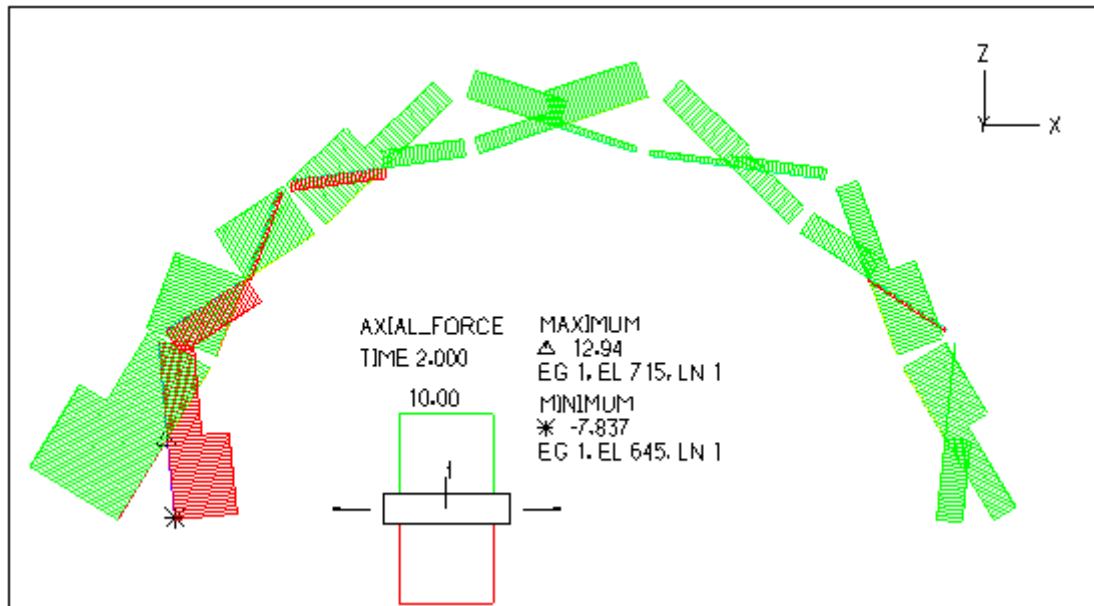
Σχήμα 5-11: Τάσεις von Mises για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3

Εστιάζοντας στο κρίσιμο στοιχείο της κατασκευής, που είναι το δεύτερο πολικό ψαλιδωτό SLE του δεύτερου τόξου, παρατηρούμε ότι η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος των ράβδων του στοιχείου, κυμαίνεται από αρκετά χαμηλές τιμές, της τάξης των 2.5MPa στα δύο άκρα που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά του στεγάστρου, και των 40MPa στα δύο άκρα που βρίσκονται εσωτερικά του στεγάστρου, έως την υψηλότερη τιμή που παρατηρείται τοπικά στο σημείο σύνδεσης των δύο ράβδων (Σχήμα 5-12).



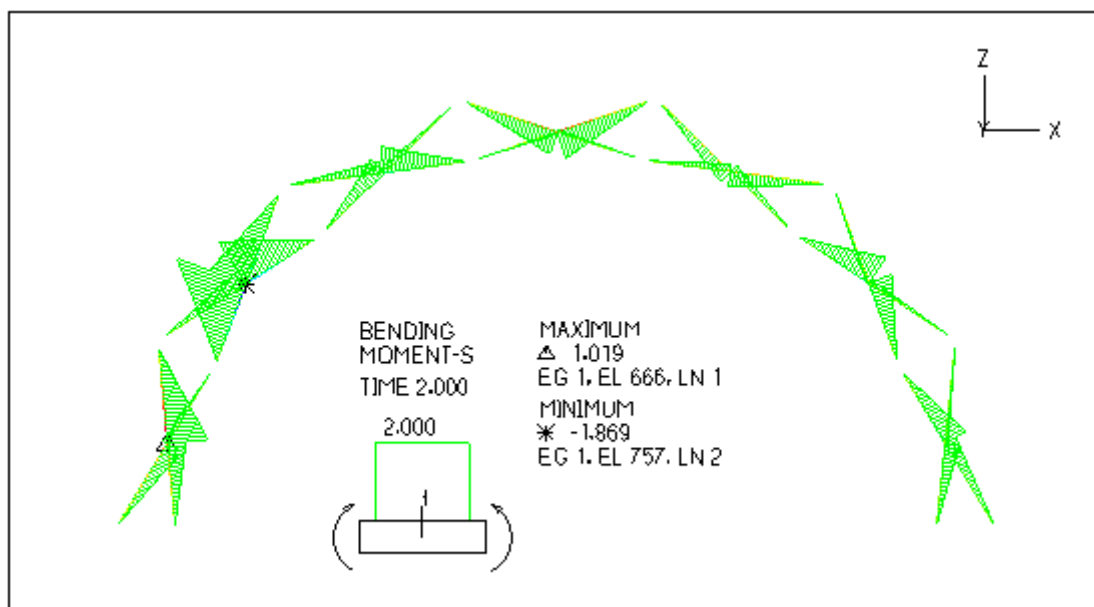
Σχήμα 5-12: Πολικό ψαλιδωτό στοιχείο με τη μέγιστη τάση von Mises

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-13 έως Σχήμα 5-16), παρουσιάζεται συνολικά η εντατική κατάσταση του δεύτερου τόξου πολικών SLE.



Σχήμα 5-13: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων πολικών SLE

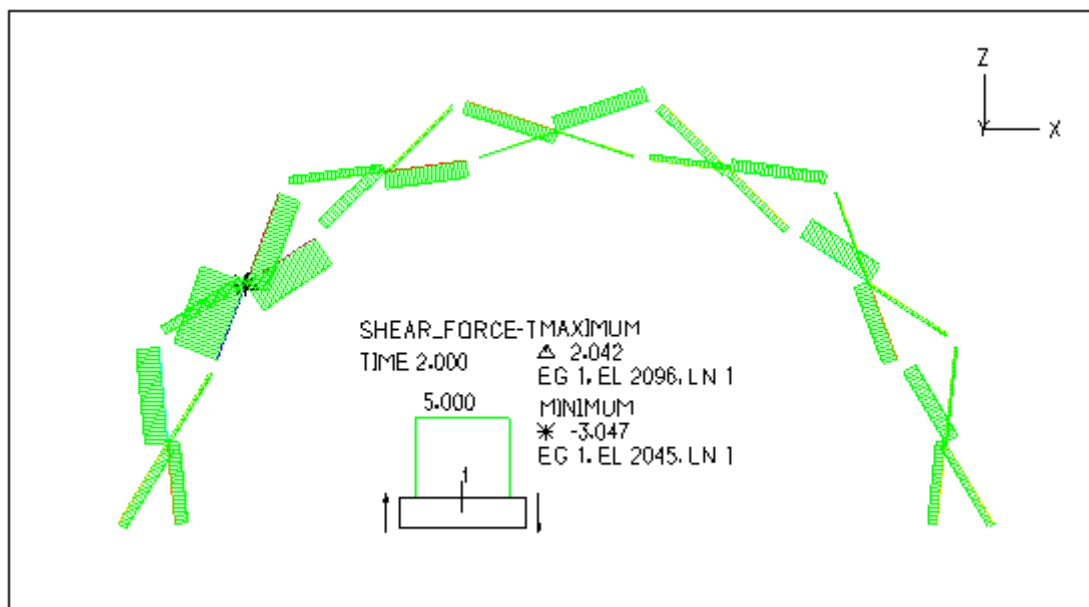
Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα των αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 5-13), το μεγαλύτερο μέρος του τόξου βρίσκεται υπό εφελκυσμό, με τη μέγιστη τιμή αυτού ίση με 12.94kN, να εντοπίζεται στην εξωτερική στήριξη του πρώτου ψαλιδωτού στοιχείου, στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου. Αντίστοιχα, στην ίδια περιοχή αναπτύσσονται θλιπτικές αξονικές δυνάμεις, στις ράβδους που συνδέονται με τους κόμβους που φορτίζονται άμεσα από τα φορτία της ανεμοπίεσης. Η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη εμφανίζεται στην εσωτερική στήριξη του ίδιου ψαλιδωτού στοιχείου, και ισούται με 7.84kN.



Σχήμα 5-14: Διάγραμμα εντός επιπέδου καμπτικών ροπών πολικών SLE

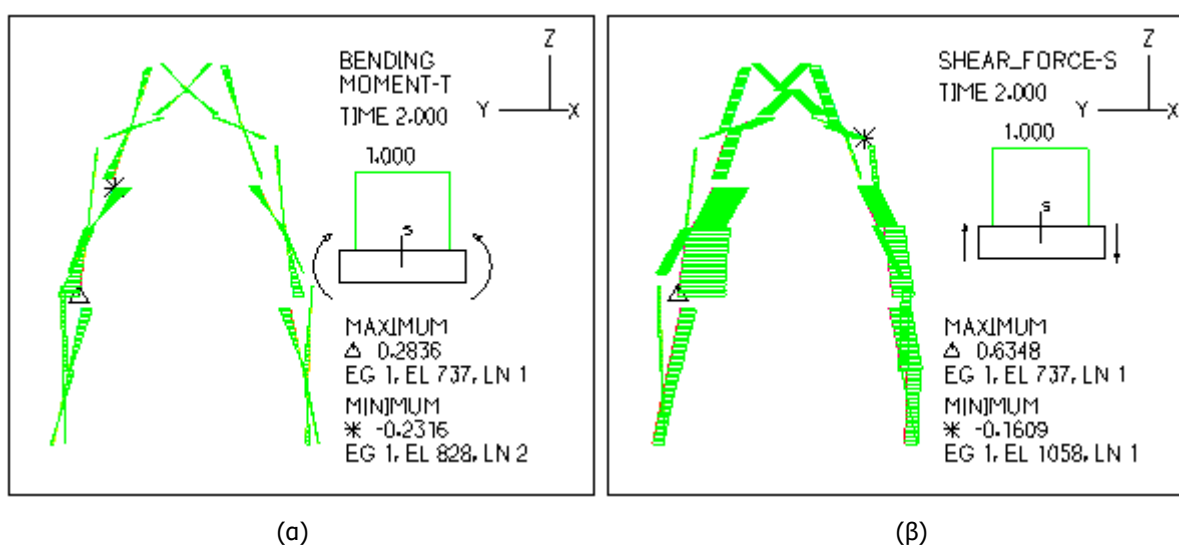
Στο Σχήμα 5-14 παρουσιάζονται οι εντός επιπέδου καμπτικές ροπές των ψαλιδωτών SLE του δεύτερου τόξου. Από τη μορφή των διαγραμμάτων είναι εμφανής η αρθρωτή λειτουργία των άκρων των ψαλιδωτών στοιχείων για στροφή εντός του επιπέδου τους, με μηδενισμό των ροπών κάμψης στα

σημεία της άρθρωσης. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μεγιστοποίηση της ροπής κάμψης στο σημείο που αντιστοιχεί στον πόλο περιστροφής του κάθε ψαλιδωτού στοιχείου. Η μέγιστη κατά μέτρο ροπή κάμψης (1.90kN), εντοπίζεται στο δεύτερο ψαλιδωτό στοιχείο στο σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises, και μάλιστα αποτελεί το δυσμενέστερο εντατικό μέγεθος, αφού η ορθή τάση που αντιστοιχεί σε αυτή ισούται με το 82% της συνολικής τάσης von Mises (134MPa). Στη γενικότερη εικόνα του τόξου, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές των ροπών συγκεντρώνονται στην προσηνέμη πλευρά του στεγάστρου, σε αντίθεση με τα ψαλιδωτά στοιχεία της υπήνεμης πλευράς.



Σχήμα 5-15: Διάγραμμα εντός επιπέδου τέμνουσών δυνάμεων πολικών SLE

Σε ό,τι αφορά τις τέμνουσες δυνάμεις εντός του επιπέδου των ψαλιδωτών στοιχείων, και κατ' επέκταση του τόξου (Σχήμα 5-15), η εικόνα των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των ροπών κάμψης, με τις μέγιστες κατά μέτρο τέμνουσες, 2.04kN και 3.05kN, να αναπτύσσονται στα μέλη του κρίσιμου ψαλιδωτού στοιχείου, και τη μεγαλύτερη ένταση να συγκεντρώνεται στα στοιχεία της προσηνέμης πλευράς.

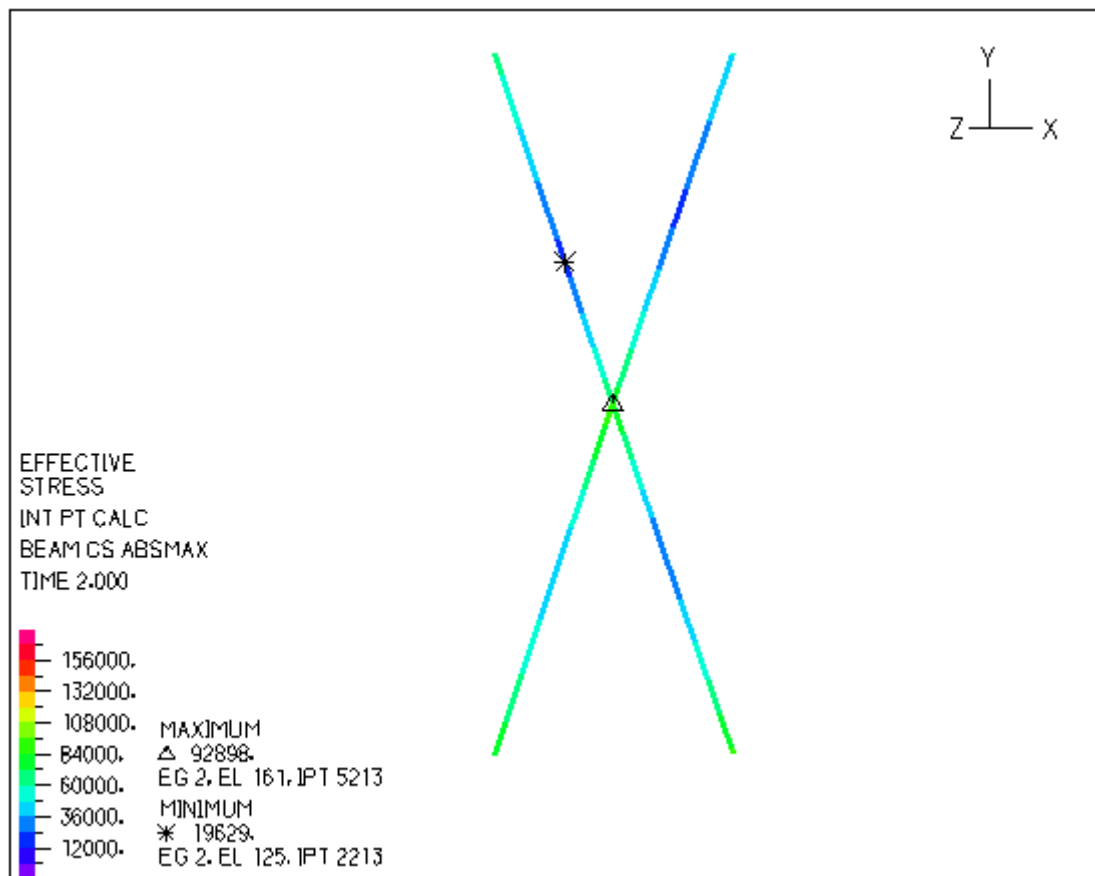


Σχήμα 5-16: Διαγράμματα εκτός επιπέδου καμπτικών ροπών (α) και τέμνουσών δυνάμεων (β), πολικών SLE

Τα εκτός επιπέδου εντατικά μεγέθη (ροπές κάμψης και τέμνουσες δυνάμεις), είναι εμφανώς μικρότερα από τα αντίστοιχα εντός επιπέδου, παρόλα αυτά οι μέγιστες τιμές τους εμφανίζονται επίσης στην

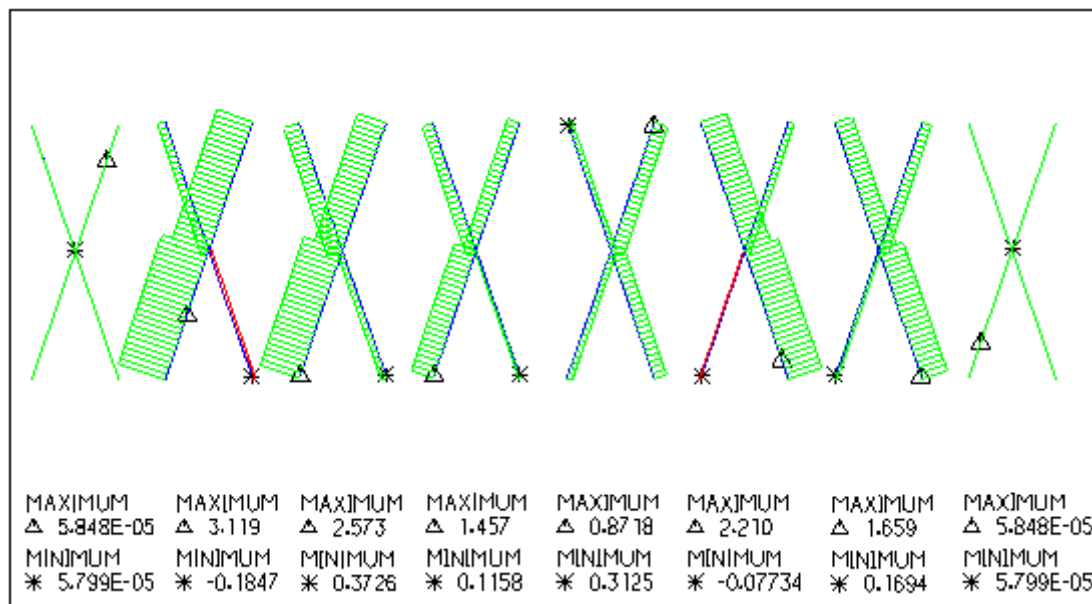
προσήμερη πλευρά του στεγάστρου. Σε ό,τι αφορά μεμονωμένα τα ψαλιδωτά στοιχεία, παρατηρούμε ότι η ροπή εκτός επιπέδου είναι μεγαλύτερη στα άκρα, παρά στο ενδιάμεσο σημείο.

Εστιάζοντας στο δυσμενέστερο μεταφορικό ψαλιδωτό στοιχείο, το οποίο βρίσκεται μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου τόξου, παρατηρούμε ότι η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος των ράβδων του στοιχείου, κυμαίνεται μεταξύ των 2.0MPa και των 9.3MPa. Η μέγιστη τιμή αναπτύσσεται στο σημείο σύνδεσης των δύο ράβδων, παρόλα αυτά οι τάσεις στα άκρα είναι εξίσου αυξημένες. Μεταξύ του μέσου και του άκρου των ραβδωτών στοιχείων, παρατηρείται μείωση των τάσεων (Σχήμα 5-17).



Σχήμα 5-17: Μεταφορικό ψαλιδωτό στοιχείο με τη μέγιστη τάση von Mises

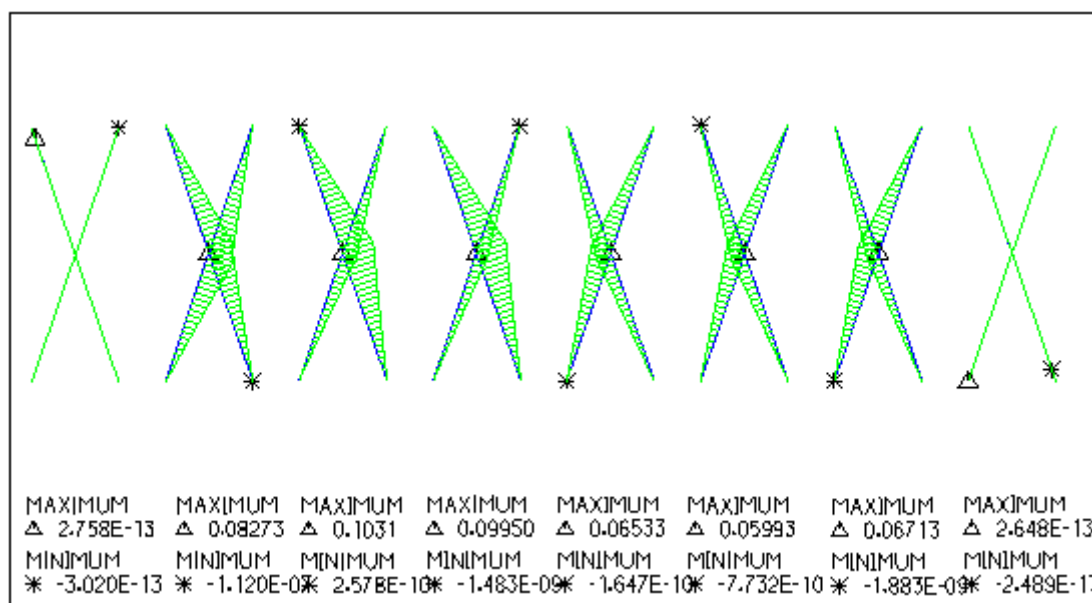
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5-18 έως Σχήμα 5-21), παρουσιάζεται συνολικά η εντατική κατάσταση όλων των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων, μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου τόξου. Για να είναι πιο ευανάγνωστα τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται εντός επιπέδου των ψαλιδωτών SLE, αυτά παρουσιάζονται σε ανάπτυγμα, ως προς το επίπεδο του κάθε ψαλιδωτού στοιχείου.



Σχήμα 5-18: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων μεταφορικών SLE

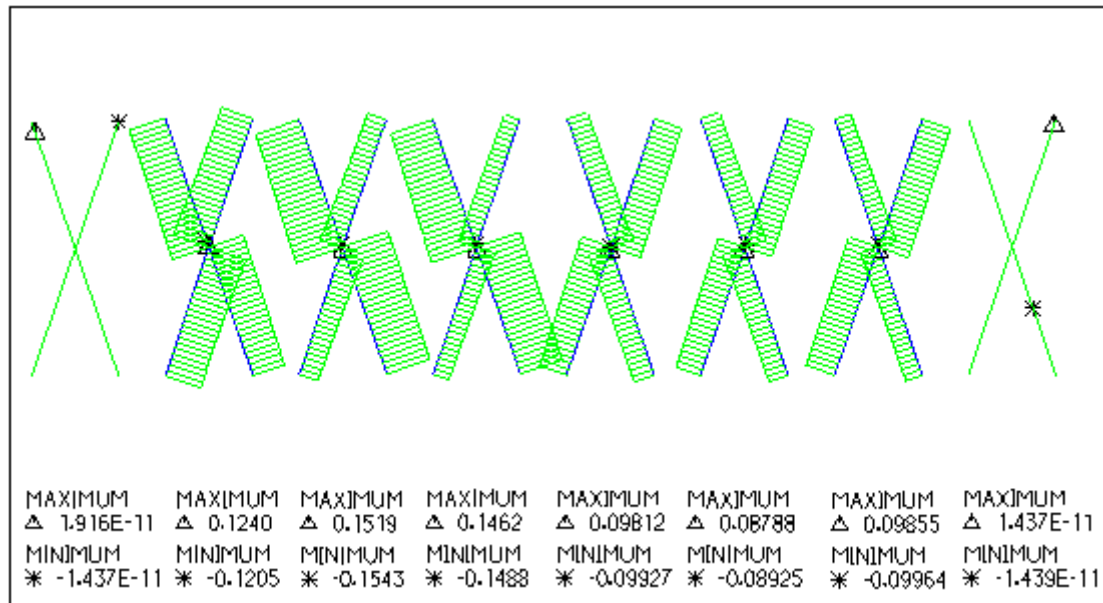
Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα των αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 5-13), όλα τα μεταφορικά SLE βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε εφελκυσμό, με τη μέγιστη τιμή αυτού, ίση με 3.19kN, να εντοπίζεται στο δεύτερο κατά σειρά στοιχείο. Θλιπτικές εσωτερικές δυνάμεις αναπτύσσονται στο ίδιο στοιχείο, μεγέθους 0.19kN.

Στο Σχήμα 5-19, παρουσιάζονται οι εντός επιπέδου καμπτικές ροπές των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων του πρώτου τόξου. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των πολικών SLE, με μεγιστοποίηση των ροπών κάμψης στο σημείο σύνδεσης των ράβδων κάθε ψαλιδωτού στοιχείου, και πρακτικά μηδενισμό στα άκρα. Η μέγιστη κατά μέτρο ροπή κάμψης (0.10kN), εντοπίζεται στο τρίτο στοιχείο, στο σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises, και συμβάλλει σημαντικά στην αύξησή της. Αντίστοιχα με την περίπτωση των πολικών SLE, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές των ροπών συγκεντρώνονται στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου.



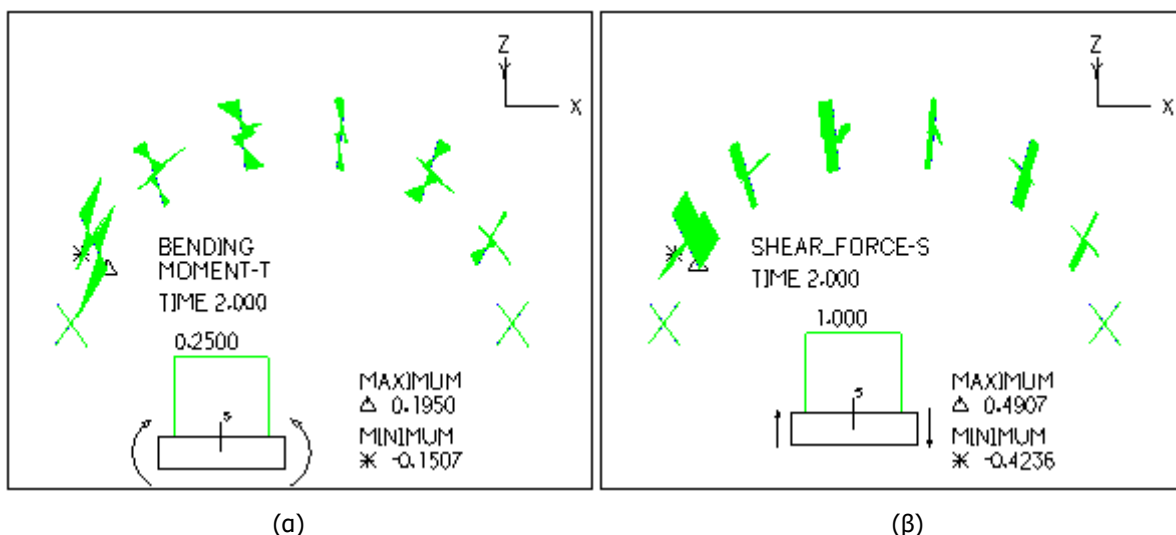
Σχήμα 5-19: Διάγραμμα εντός επιπέδου καμπτικών ροπών μεταφορικών SLE

Σε ό,τι αφορά τις τέμνουσες δυνάμεις εντός του επιπέδου των ψαλιδωτών στοιχείων (Σχήμα 5-20), η εικόνα των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των ροπών κάμψης, με τις μέγιστες κατά μέτρο τέμνουσες (0.15kN), να αναπτύσσονται στα μέλη του δυσμενέστερου ψαλιδωτού στοιχείου, και τη μεγαλύτερη ένταση να συγκεντρώνεται στα στοιχεία της προσήνεμης πλευράς.



Σχήμα 5-20: Διάγραμμα εντός επιπέδου τέμνουσών δυνάμεων μεταφορικών SLE

Τα εκτός επιπέδου εντατικά μεγέθη (ροπές κάμψης και τέμνουσες δυνάμεις), σε αντίθεση με τα πολικά SLE, είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα εντός επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα, η εσωτερική ροπή εκτός επιπέδου είναι σχεδόν διπλάσια από τη ροπή εντός επιπέδου (0.20kN), ενώ η μέγιστη τέμνουσα ισούται με 0.49kN. Παρόλα αυτά οι μέγιστες τιμές τους εμφανίζονται επίσης στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου.

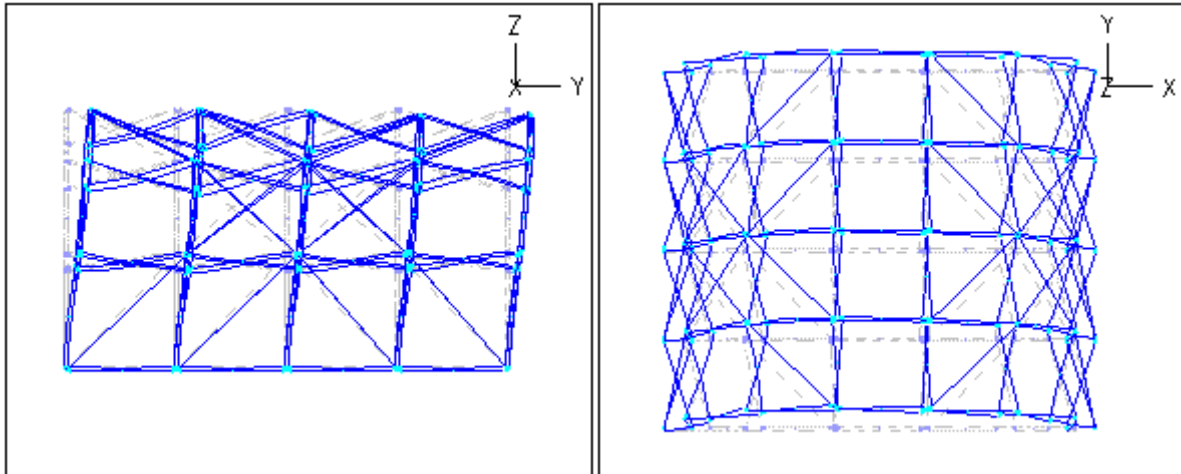


Σχήμα 5-21: Διαγράμματα εκτός επιπέδου καμπτικών ροπών (α) και τέμνουσών δυνάμεων (β), μεταφορικών SLE

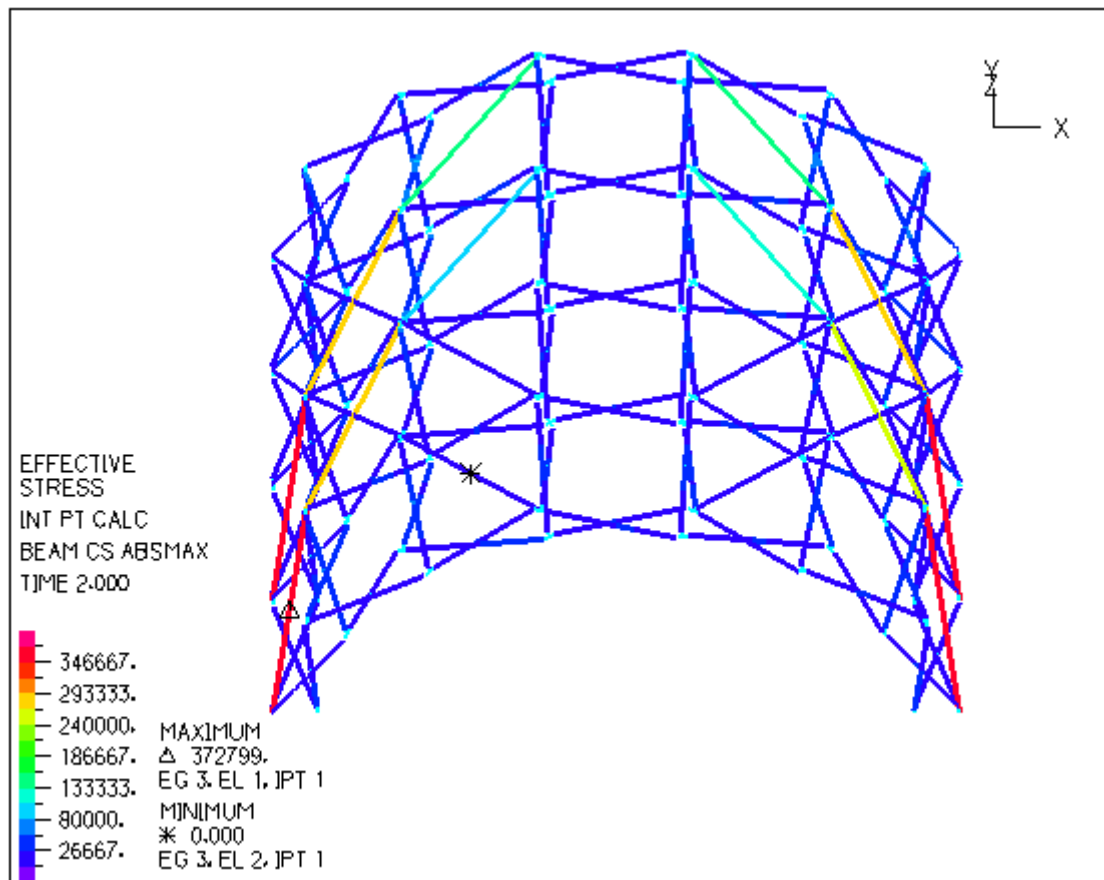
5.5.2.2 Συνδυασμός φόρτισης ULS_LC6: Άνεμος κατά Y

Ο συνδυασμός φόρτισης με κύριο κινητό το φορτίο του ανέμου στη διαμήκη διεύθυνση (κατά Y) και δευτερεύον κινητό το φορτίο του παρασυρμένου χιονιού, ήταν ο πλέον κρίσιμος για τη διαστασιολόγηση των καλωδιωτών συνδέσμων δυσκαμψίας. Οι σύνδεσμοι αυτοί, προσομοιώθηκαν λόγω της αδυναμίας του φορέα των ψαλιδωτών στοιχείων, να παραλάβει φορτία κατά τη διεύθυνση

του μήκους. Στην πραγματικότητα, ενδέχεται μέρος ή ολόκληρο το φορτίο που παραλαμβάνουν τα καλώδια που προστέθηκαν, να μπορεί να παραληφθεί από τη μεμβράνη επικάλυψης. Παρόλα αυτά, λόγω της μη προσομοίωσης της μεμβράνης επικάλυψης, η συμμετοχή της στη δυσκαμψία του φορέα αγνοείται, και γίνεται διαστασιολόγηση των καλωδίων με το πλήρες φορτίο που παραλαμβάνεται από αυτά. Στο Σχήμα 5-22 παρουσιάζεται η παραμορφωσιακή κατάσταση του φορέα, κατά το συνδυασμό αυτό, η οποία είναι αναμενόμενη λόγω της πίεσης του ανέμου στην προσηνέμη πλευρά, και της υποπίεσης στην υπήνεμη.



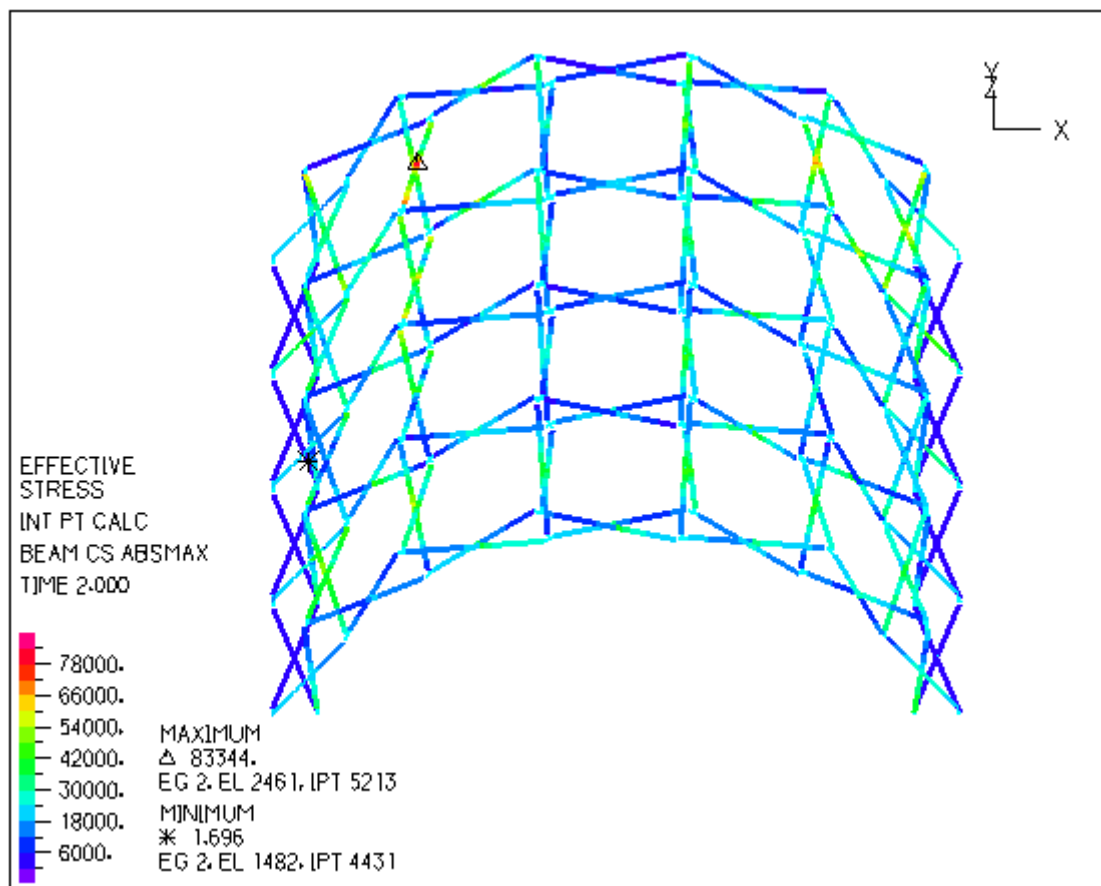
Σχήμα 5-22: Παραμόρφωση του φορέα για άνεμο κατά τη διαμήκη διεύθυνση ως κύρια κινητή δράση



Σχήμα 5-23: Τάσεις von Mises για το συνδυασμό φόρτισης ULS_{LC6}

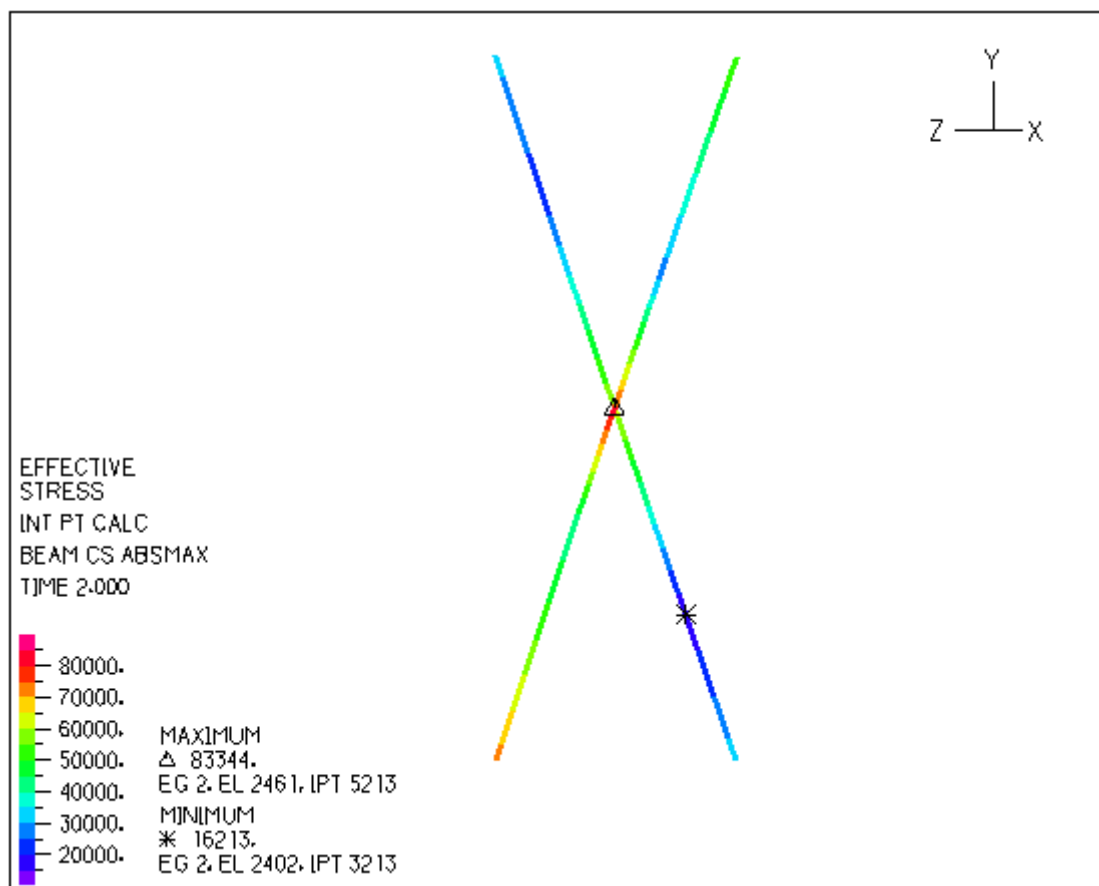
Η μέγιστη τάση von Mises που αναπτύσσεται στους καλωδιωτούς συνδέσμους δυσκαμψίας ισούται με 372.80MPa, και αντιστοιχεί σε εφελκυστική δύναμη ίση με 10.89kN. Η θέση όπου εντοπίζεται ο μέγιστος εφελκυσμός, αντιστοιχεί στα φατνώματα της βάσης του στεγάστρου, ενώ στα ανώτερα είναι κατά το ήμισυ μικρότερος, της τάξης των 5.00kN (Σχήμα 5-23).

Λόγω μεγάλης διαφοράς στο μέγεθος των τάσεων των καλωδίων, σε σχέση με τα ψαλιδωτά στοιχεία, στο Σχήμα 5-23 δεν είναι ευδιάκριτη η εντατική κατάσταση των ψαλιδωτών στοιχείων. Για το λόγο αυτό, οι τάσεις των ψαλιδωτών στοιχείων απομονώνονται στο Σχήμα 5-24, σε διαφορετική κλίμακα. Η μέγιστη τάση που αφορά τα ψαλιδωτά στοιχεία, εντοπίζεται στο κόμβο περιστροφής ενός μεταφορικού SLE, μεταξύ των δύο τελευταίων τόξων (υπήνεμη πλευρά). Παρόλα αυτά, η τάση αυτή είναι μικρότερη από εκείνη που ελέγχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, επομένως δεν είναι κρίσιμη για το φορέα.



Σχήμα 5-24: Τάσεις von Mises ψαλιδωτών στοιχείων για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC6

Για λόγους σύγκρισης, εξετάζεται μεμονωμένα το δυσμενέστερο στοιχείο αυτού του συνδυασμού, ως προς την κατανομή των τάσεων κατά μήκος των μελών του (Σχήμα 5-25). Παρατηρούμε ότι η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος των ράβδων του στοιχείου, είναι αντίστοιχη αυτής που προέκυψε από το συνδυασμό ULS_LC3, με τη μέγιστη να εμφανίζεται στο σημείο περιστροφής των ράβδων, υψηλές τάσεις στα άκρα, και μειωμένες μεταξύ του μέσου και του άκρου των ραβδωτών στοιχείων. Η μέγιστη τάση ισούται με 83.3MPa, ενώ η ελάχιστη με 16.21MPa.



Σχήμα 5-25: Μεταφορικό ψαλιδωτό στοιχείο με τη μέγιστη τάση von Mises

5.6 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

Για τη διερεύνηση της επιρροής των αρχικών ατελειών στη συμπεριφορά του φορέα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, με αρχικές ατέλειες, για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φόρτισης. Σαν σχήμα αρχικών ατελειών χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιομορφές λυγισμού που προέκυψαν από τις αντίστοιχες γραμμικές αναλύσεις που προηγήθηκαν (Σχήμα Β-1 και Σχήμα Β-2). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο αριθμός των ιδιομορφών λυγισμού που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, προκύπτει από το σύνολο των ιδιομορφών λυγισμού των οποίων το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι μικρότερο από το διπλάσιο της πρώτης ιδιομορφής.

5.6.1 Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων λυγισμού (LBA)

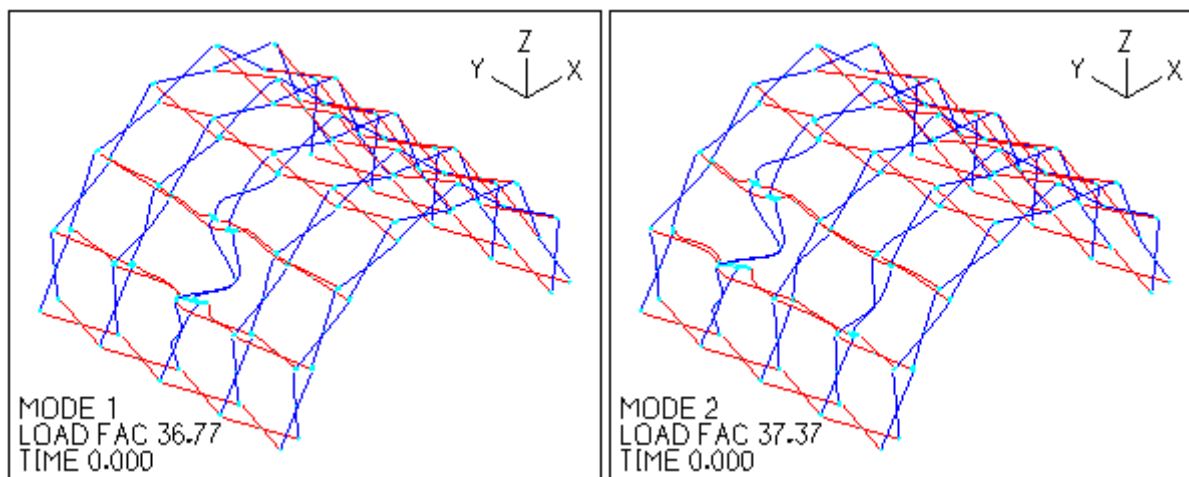
Για τη δημιουργία των σχημάτων αρχικών ατελειών, πραγματοποιήθηκαν γραμμικές αναλύσεις λυγισμού, με στόχο τον υπολογισμό των δώδεκα πρώτων ιδιομορφών για κάθε συνδυασμό φόρτισης. Το πρώτο συμπέρασμα που πηγάζει από τις αναλύσεις αυτές, έχει να κάνει με το συντελεστή φορτίου λυγισμού κάθε ιδιομορφής, δηλαδή το συντελεστή με τον οποίο αν πολλαπλασιαστούν όλες οι δράσεις που έχουν επιβληθεί στην κατασκευή, θα προκύψει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Τα κρίσιμα φορτία λυγισμού, συνήθως δεν είναι ασφαλείς προβλέψεις της αντοχής, παρόλα αυτά αποτελούν μία πρώτη ένδειξη, και συνήθως ένα άνω όριο της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα[2].

Στην προκειμένη περίπτωση, παρατηρούμε ότι για να φτάσει ο φορέας το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, πρέπει να ασκηθούν σε αυτόν περίπου 35 και 20 φορές μεγαλύτερα φορτία από αυτά που ασκήθηκαν για τους δύο κρίσιμους συνδυασμούς φορτίσεων, ULS_{LC3} και ULS_{LC6} αντίστοιχα. Επίσης, από τις μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού χωρίς ατέλειες, υπολογίστηκε ότι οι συνδυασμοί αυτοί είναι κρίσιμοι σε ποσοστό 99% και 83% αντίστοιχα, λόγω αστοχίας του υλικού. Επομένως, ένα πρώτο

συμπέρασμα που πηγάζει από τα παραπάνω, είναι ότι ενδεχομένως οι αρχικές ατέλειες δε θα έχουν σημαντική επιρροή στη συμπεριφορά του φορέα, και η αστοχία θα οφείλεται στην αστοχία του υλικού. Για τον καθορισμό του απαιτούμενου αριθμού ιδιομορφών που λήφθηκαν υπόψη, έγινε σύγκριση των πολλαπλασιαστικών συντελεστών που ισοδυναμεί κατά αναλογία με τη σύγκριση των αντίστοιχων φορτίων λυγισμού. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-6, για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3, αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι δέκα πρώτες ιδιομορφές ως σχήματα αρχικών ατελειών.

Πίνακας 5-6. Συντελεστές φορτίου λυγισμού για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3: Άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Ιδιομορφή λυγισμού M_i	Συντελεστής φορτίου λυγισμού LF_i	LF_i/LF_1
1	36.77	1.0
2	37.37	1.0
3	38.33	1.0
4	47.32	1.3
5	53.71	1.5
6	54.53	1.5
7	57.98	1.6
8	61.05	1.7
9	71.46	1.9
10	75.15	2.0
11	78.51	2.1
12	79.66	2.2

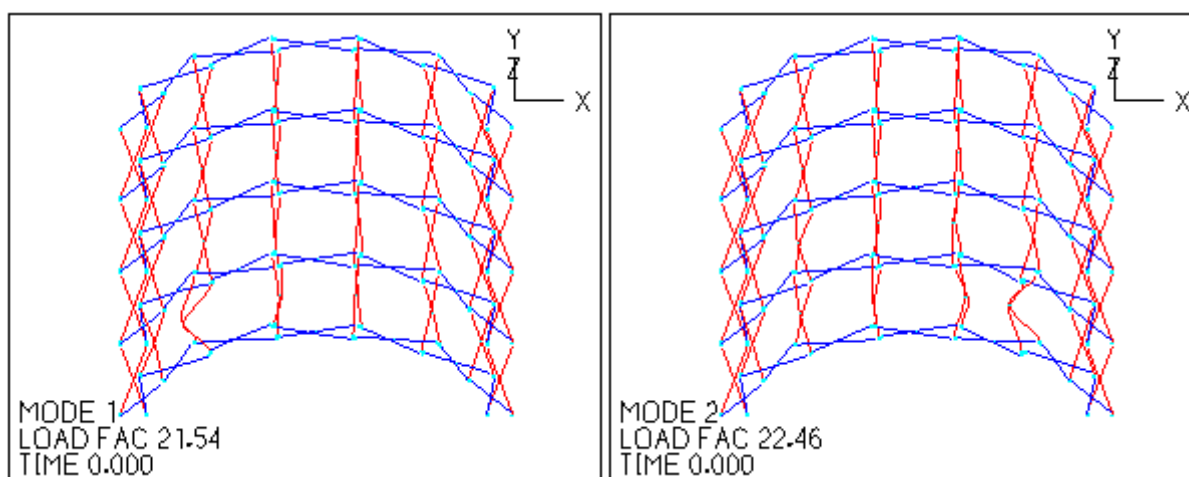


Σχήμα 5-26: Ιδιομορφές λυγισμού για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3: Άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Όσον αφορά το συνδυασμό ULS_LC6, ο λόγος του συντελεστή φορτίου λυγισμού προς το συντελεστή της πρώτης ιδιομορφής, αυξάνεται με αργό ρυθμό όσο αυξάνεται ο αριθμός των ιδιομορφών (Πίνακας 5-7). Λόγω του ότι δεν αναμένεται σημαντική επιρροή των αρχικών ατελειών στη συμπεριφορά του φορέα, κρίθηκε άσκοπη διερεύνηση περισσότερων ιδιομορφών, και στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι δώδεκα πρώτες ιδιομορφές, που έχουν ήδη υπολογιστεί.

Πίνακας 5-7. Συντελεστές φορτίου λυγισμού για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC6: Άνεμος κατά τη διαμήκη διεύθυνση

Ιδιομορφή λυγισμού M_i	Συντελεστής φορτίου λυγισμού LF_i	LF_i/LF_1
1	21.54	1.0
2	22.46	1.0
3	22.83	1.1
4	23.12	1.1
5	23.44	1.1
6	23.75	1.1
7	23.88	1.1
8	24.88	1.2
9	25.01	1.2
10	27.54	1.3
11	27.70	1.3
12	29.96	1.4



Σχήμα 5-27: Ιδιομορφές λυγισμού για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC6: Άνεμος κατά τη διαμήκη διεύθυνση

Στα Σχήμα 5-26 και Σχήμα 5-27, παρουσιάζονται οι δύο πρώτες ιδιομορφές λυγισμού για τους δύο συνδυασμούς φόρτισης που εξετάζονται. Όπως και στις υπόλοιπες ιδιομορφές λυγισμού (βλ. Παράρτημα Β), ο λυγισμός που εμφανίζεται αφορά μεμονωμένα κάποιο από τα ψαλιδωτά στοιχεία του φορέα, και όχι κάποιο τόξο ή κάποια σειρά μεταφορικών SLE. Στην περίπτωση όπου το κύριο κινητό φορτίο είναι ο άνεμος κατά Χ, ο λυγισμός εμφανίζεται σε κάποιο από τα πολικά SLE της προσήνεμης πλευράς, ενώ για κύριο κινητό τον άνεμο κατά Υ, ο λυγισμός εκδηλώνεται σε μεταφορικά SLE, κυρίως στην προσήνεμη πλευρά. Για το λόγο αυτό οι αρχικές ατέλειες που δόθηκαν στην κατασκευή, υπολογίστηκαν με βάση την απόκλιση των ράβδων από την ευθυγραμμία.

5.6.2 Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Το μέγεθος των γεωμετρικών ατελειών του φορέα, ορίστηκε σύμφωνα με τις επιτρεπόμενες ανοχές για την ευθυγραμμία των κοίλων ορθογωνικών δοκών αλουμινίου, που σύμφωνα με το Μέρος 7 του EN755[14] ορίζονται ως 1.5mm/m (περίπου L/650). Παρόλα αυτά, για λόγους περαιτέρω διερεύνησης, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και με μεγαλύτερο μέγεθος ατελειών, της τάξης του L/500, L/250 και

L/100. Έτσι, με τη θεώρηση ότι το μήκος των ραβδωτών στοιχείων ισούται με 1.50m, το μέγεθος των αρχικών ατελειών υπολογίζεται στον Πίνακα 5-8.

Πίνακας 5-8: Μέγεθος αρχικών ατελειών (mm)

L/650	L/500	L/250	L/100
2.31	3.00	6.00	15.00

Σημειώνεται ότι τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις όπου το σημείο με τη μεγαλύτερη εκτροπή από την αρχική του θέση, σύμφωνα με την κάθε ιδιομορφή λυγισμού, ήταν το μέσο κάποιου ραβδωτού στοιχείου. Σε περιπτώσεις όπου το σημείο αυτό ήταν στο ένα τέταρτο του μήκους της ράβδου, χρησιμοποιήθηκε το 1/2 του μεγέθους των ατελειών. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ιδιομορφές που λήφθηκαν υπόψη σε κάθε ανάλυση, συνδυάστηκαν ισοβαρώς, έτσι ώστε το αποτέλεσμα του συνδυασμού τους να δίνει ένα φορέα με ατέλειες, που δεν ξεπερνούν σε κανένα σημείο το μέγεθος αρχικών ατελειών που υπολογίστηκε κατά περίπτωση.

Σαν μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με και χωρίς αρχικές ατέλειες, χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες τάσεις von Mises για τα πολιικά και τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία, και τους συνδέσμους δυσκαμψίας. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, τα οποία συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5-9 και Πίνακας 5-10) παρατηρούμε ότι οι αρχικές ατέλειες μεγέθους L/650, δεν επηρεάζουν σε καμία περίπτωση τη συμπεριφορά του φορέα, σε ό,τι αφορά τις μέγιστες τάσεις των μελών.

Από την περαιτέρω διερεύνηση προκύπτει ότι για το συνδυασμό ULS_{LC3}, για μεγάλου μεγέθους ατέλειες (L/100) παρατηρείται οριακή αστοχία σε ένα πολικό ψαλιδωτό στοιχείο. Παρόλα αυτά, όπως ήδη αναφέρθηκε, η ατέλεια η ατέλεια αυτή αντιστοιχεί σε απόκλιση από την ευθυγραμμία των ράβδων ίση με 1.5cm, και είναι αρκετά μεγάλη, δεδομένου ότι θα να γίνει ορατή διά γυμνού οφθαλμού κατά την κατασκευή του στεγάστρου. Παρόλα αυτά, θα μπορούσε να εμφανιστεί σε κάποιο μέλος από παράγοντες που δεν μελετώνται στην παρούσα εργασία, όπως πτώση της κατασκευής κατά τη μεταφορά, μη ελεγχόμενη καταπόνηση κάποιου στοιχείου κατά την αναδίπλωση κ.ά..

Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων με ατέλειες – ULS_{LC3}

Ανάλυση	Πολικά ψαλιδωτά στοιχεία		Μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία		Σύνδεσμοι δυσκαμψίας	
	kPa	ratio	kPa	ratio	kPa	ratio
GMNA	158469	0.99	92898	0.58	77301	0.14
GMNIA - L/650	159018	0.99	93473	0.58	75435	0.14
GMNIA - L/500	159043	0.99	93501	0.58	75383	0.14
GMNIA - L/250	159618	1.00	94157	0.59	74164	0.14
GMNIA - L/100	161337	1.01	96059	0.60	72346	0.13

Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων με ατέλειες – ULS_{LC6}

Ανάλυση	Πολικά ψαλιδωτά στοιχεία		Μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία		Σύνδεσμοι δυσκαμψίας	
	kPa	ratio	kPa	ratio	kPa	ratio
GMNA	59817	0.37	83344	0.52	372799	0.68
GMNIA - L/650	59820	0.37	83344	0.52	372567	0.68
GMNIA - L/500	59822	0.37	83346	0.52	372260	0.68
GMNIA - L/250	59830	0.37	83358	0.52	372725	0.68
GMNIA - L/100	59846	0.37	83392	0.52	372633	0.68

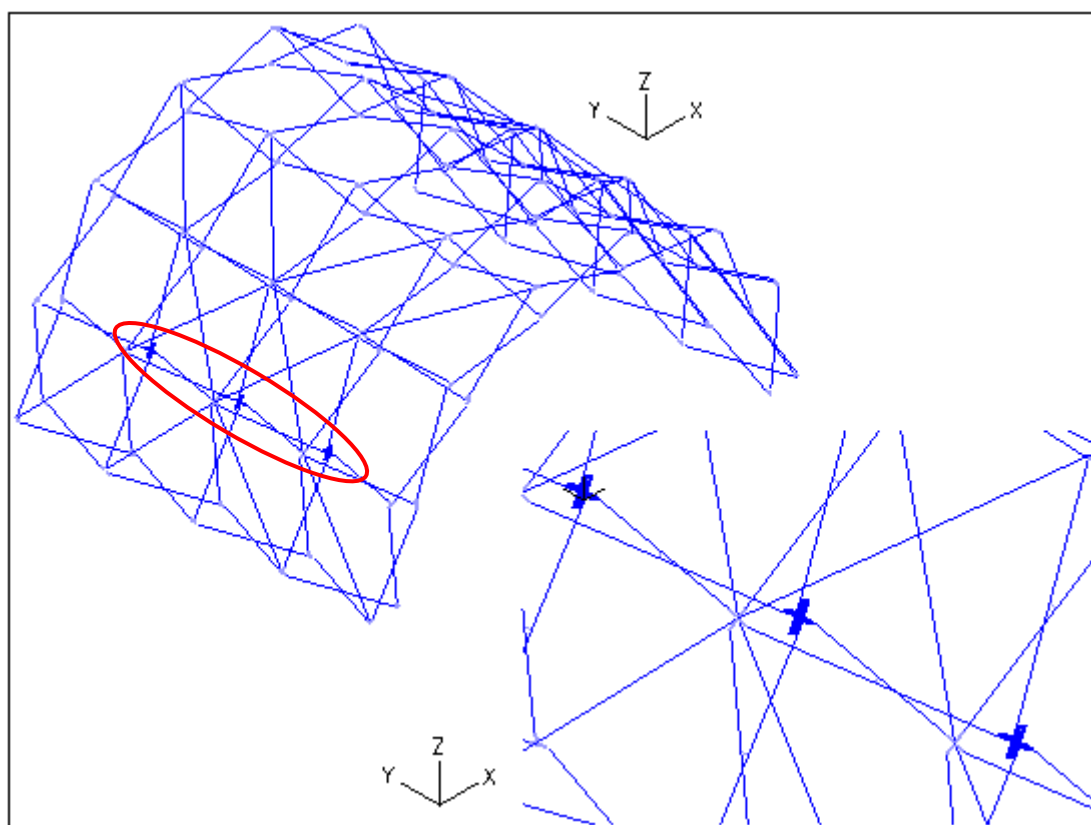
Συνοψίζοντας, σχετικά με την επιρροή των αρχικών ατελειών, παρατηρήθηκε η επιρροή των ατελειών στη συμπεριφορά του φορέα είναι ασήμαντη, πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι οι ιδιομορφές που προκύπτουν από την LBA ανάλυση δεν έχουν τη μορφή αστοχίας που προκύπτει στη GMNA ανάλυση, το οριακό φορτίο των μη γραμμικών αναλύσεων είναι πολύ μικρότερο από το κρίσιμο φορτίο της LBA (περίπου 20 φορές), και στο ότι η αστοχία φαίνεται να κυριαρχείται από τη μη γραμμικότητα υλικού, ενώ οι ατέλειες επηρεάζουν κατά βάση τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας.

5.7 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

5.7.1 Προσομοίωση κόμβου και συνδεσμολογίας

Η προσομοίωση των χαλύβδινων κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων, πραγματοποιήθηκε στο ήδη υπάρχον αριθμητικό προσομοίωμα, έπειτα από τροποποιήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις. Πιο συγκεκριμένα, για λόγους απλοποίησης του αριθμητικού προσομοιώματος και την εξαγωγή κάποιων πρώτων αποτελεσμάτων σχετικά με την απόκριση του φορέα, η προσομοίωση των κόμβων δεν έγινε στο σύνολο του φορέα, αλλά σε τρεις συγκεκριμένες θέσεις.

Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε να βρίσκονται σε μία περιοχή όπου συγκεντρώνονται μεγάλες τάσεις στα ψαλιδωτά στοιχεία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, η περιοχή αυτή επιλέχθηκε να είναι η υπήνεμη πλευρά του στεγάστρου για άνεμο κατά X, επομένως οι κόμβοι που ήταν εύλογο να προσομοιωθούν, είναι αυτοί που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-28, και ο συνδυασμός φόρτισης με τον οποίο έγινε ο έλεγχος του φορέα είναι εκείνος με κύριο κινητό φορτίο τον άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση (ULS_LC3).

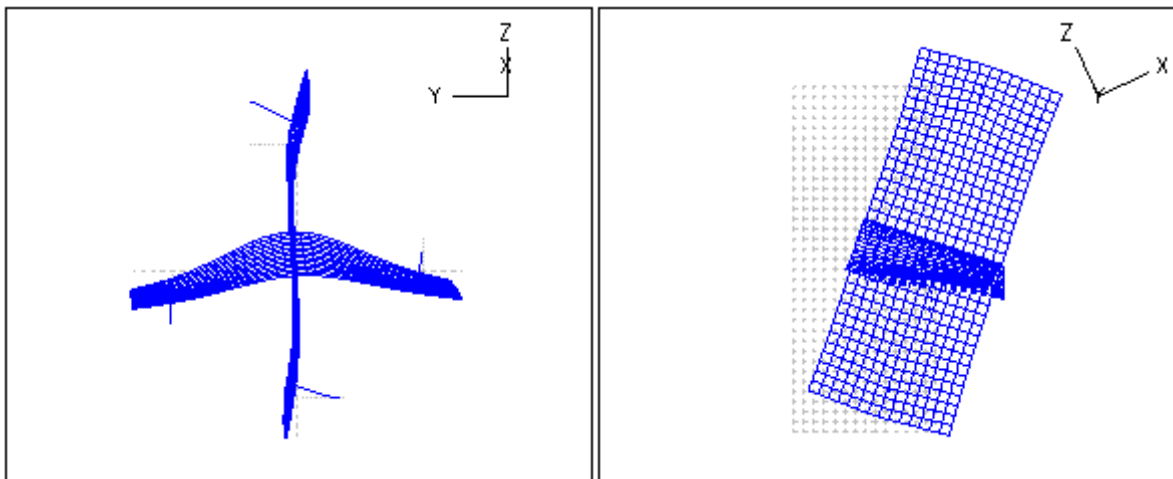


Σχήμα 5-28: Θέσεις προσομοίωσης χαλύβδινων κόμβων

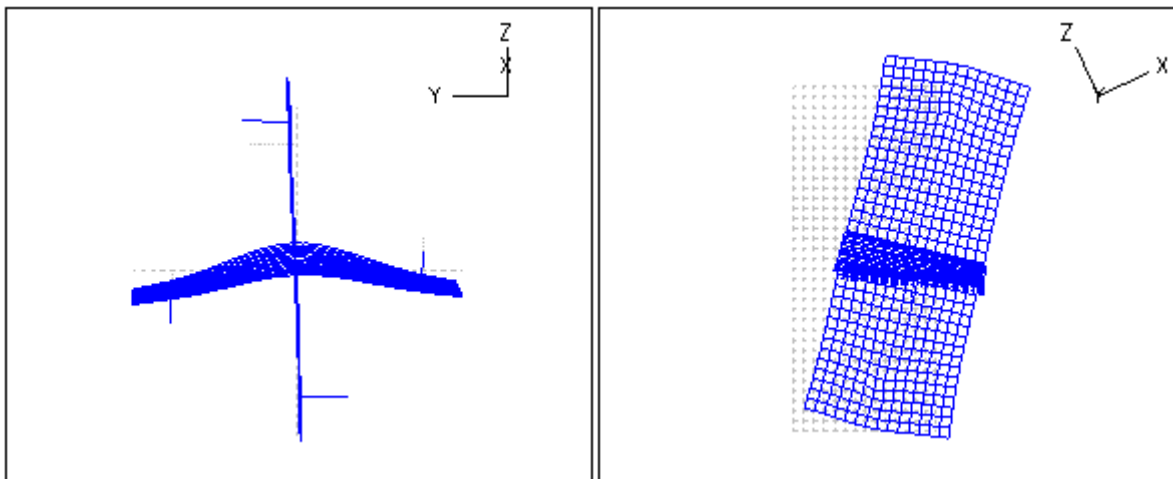
Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 4.3, η προσομοίωση των χαλύβδινων κόμβων έγινε μέσω επιφανειακών στοιχείων, στο ρόλο των χαλύβδινων ελασμάτων, τα οποία συνδέονται με τα άκρα των

ψαλιδωτών στοιχείων μέσω ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, με τις ιδιότητες των χαλύβδινων κοχλιών (γεωμετρία και υλικό).

Μετά από τις πρώτες αναλύσεις, παρατηρήθηκε έντονη παραμόρφωση των κοχλιών η οποία δεν ανταποκρίνεται στην αναμενόμενη συμπεριφορά τους. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-29, οι κοχλίες που συνδέουν τα ψαλιδωτά στοιχεία με τον κόμβο, παρουσιάζουν καμπτικές παραμορφώσεις, γεγονός που επηρεάζει άμεσα και τη συμπεριφορά των ελασμάτων, τα οποία παραμορφώνονται εξίσου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην εκκεντρότητα του κεντροβαρικού άξονα των ράβδων των ψαλιδωτών στοιχείων, σε σχέση με τα ελάσματα του κόμβου, η οποία αποτελεί μοχλοβραχίονα για την κάμψη των κοχλιών.



Σχήμα 5-29: Παραμόρφωση κόμβου - επίλυση με εύκαμπτους κοχλίες

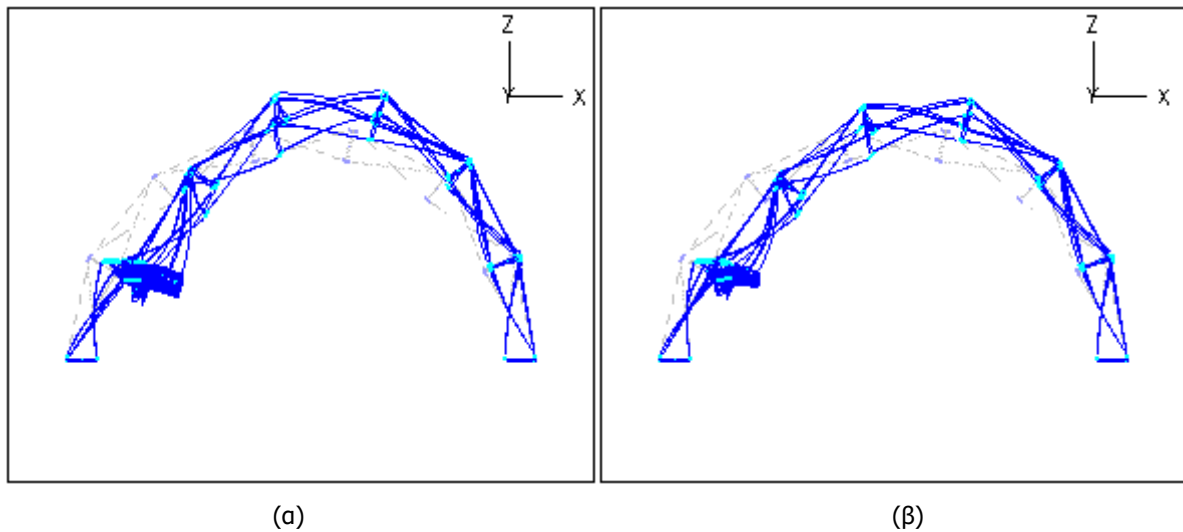


Σχήμα 5-30: Παραμόρφωση κόμβου - επίλυση με δύσκαμπτους κοχλίες

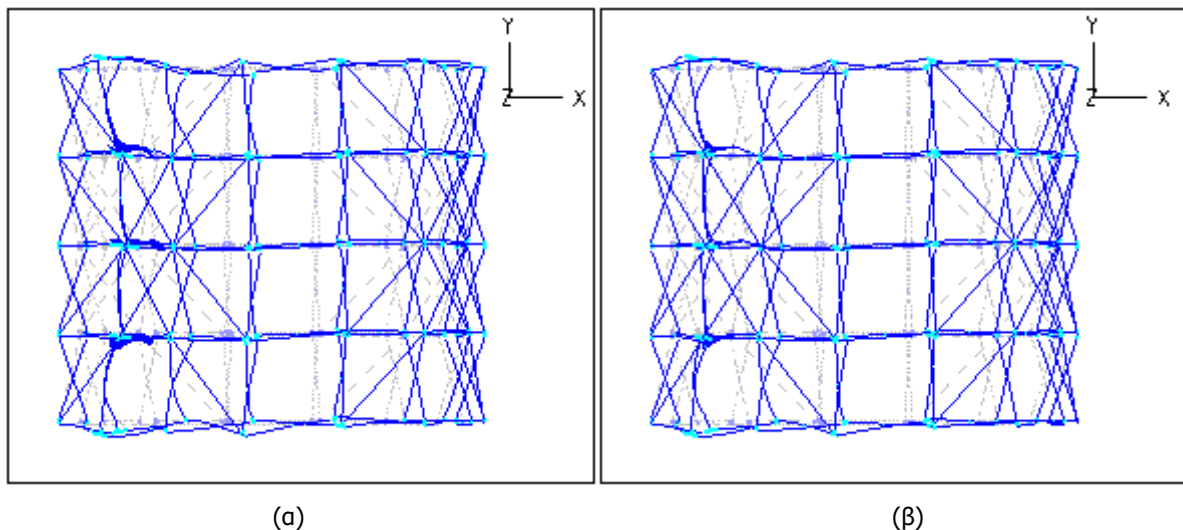
Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε δεύτερη σειρά αναλύσεων, όπου οι κοχλίες των συνδέσεων προσομοιώθηκαν ως δύσκαμπτοι – πρακτικά άκαμπτοι, μέσω αύξησης του εμβαδού της διατομής τους. Η υιοθέτηση αυτής της παραδοχής στο προσομοίωμα, είχε ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των καμπτικών παραμορφώσεων των κοχλιών, και την πιο ομαλή παραμορφωσιακή κατάσταση των χαλύβδινων ελασμάτων (Σχήμα 5-30).

Στο σύνολο του φορέα, η επιρροή των δύο αυτών τρόπων προσομοίωσης των κοχλιών, ήταν εξίσου σημαντική. Στο Σχήμα 5-31 και το Σχήμα 5-32, όπου παρουσιάζεται η όψη και η κάτοψη του παραμορφωμένου φορέα για προσομοίωση των συνδέσεων με εύκαμπτους και πρακτικά άκαμπτους κοχλίες. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται έντονη παραμόρφωση του φορέα στην περιοχή όπου είναι τοποθετημένοι οι τρεις κόμβοι. Στις περιπτώσεις όπου οι κοχλίες προσομοιώθηκαν ως άκαμπτα

στοιχεία, η παραμόρφωση αυτή είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με το προσομοίωμα όπου οι κοχλίες κάμπτονται. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός η σύνδεση του πρώτου προσομοιώματος είναι συνολικά πιο εύκαμπτη από τη σύνδεση του δεύτερου.



Σχήμα 5-31: Όψη παραμορφωμένου φορέα με χαλύβδινους κόμβους - επίλυση με εύκαμπτους κοχλίες (α) και με δύσκαμπτους κοχλίες (β)



Σχήμα 5-32: Κάτοψη παραμορφωμένου φορέα με χαλύβδινους κόμβους επίλυση με εύκαμπτους κοχλίες (α) και με δύσκαμπτους κοχλίες (β)

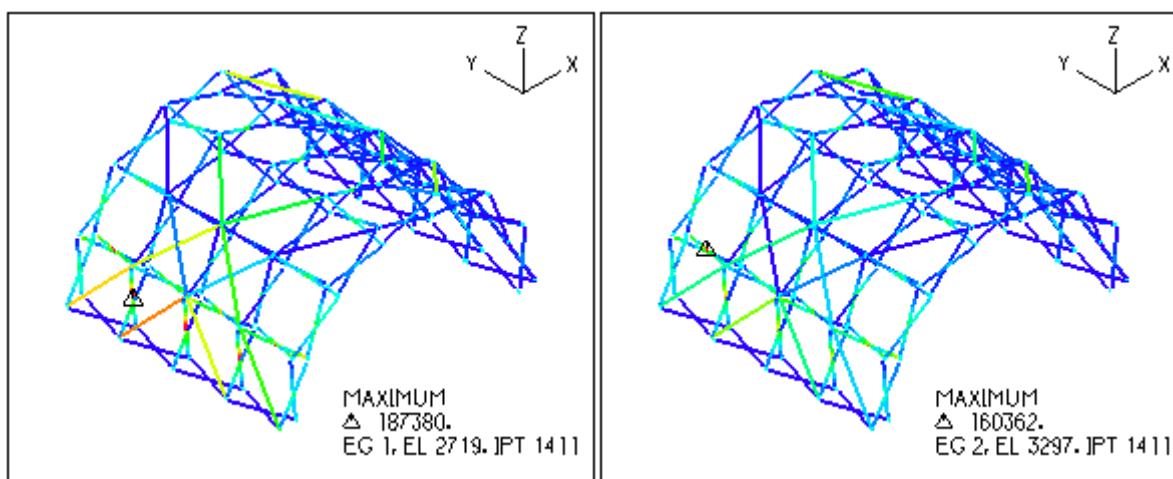
Για την ποσοτικοποίηση της παραπάνω παρατήρησης, έγινε υπολογισμός των σχετικών μετατοπίσεων των στα άκρα δύο κοχλιών που συνδέουν πολικά SLE, και στα σημεία σύνδεσής τους με το έλασμα (παραμόρφωση ελάσματος), για έναν από τους τρεις κόμβους. Τα αποτελέσματα, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 5-11, δείχνουν ότι στην περίπτωση των εύκαμπτων κοχλιών, η σχετική μετατόπιση των άκρων τους, και κατ' επέκταση των άκρων δύο συνδεδεμένων πολικών SLE, ισούται με 12.3mm και οφείλεται κατά 63% στην παραμόρφωση των κοχλιών, και κατά 37% στην παραμόρφωση του ελάσματος, η οποία ισούται με 4.6mm. Αντίθετα, με την προσομοίωση των κοχλιών ως πρακτικά άκαμπτα στοιχεία, η σχετική μετατόπιση των άκρων τους ισούται με 8.0mm και οφείλεται κατά ποσοστό 90% στην παραμόρφωση του ελάσματος (7.2mm).

Πίνακας 5-11: Σχετικές μετατοπίσεις χαρακτηριστικών σημείων του κόμβου (mm)

Σύνδεσμος με καμπτόμενους κοχλίες		Σύνδεσμος με άκαμπτους κοχλίες	
Άκρα κοχλιών	Βάση κοχλιών	Άκρα κοχλιών	Βάση κοχλιών
12.3	4.6	8.0	7.2

Σύμφωνα με τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η προσομοίωση του κόμβου με τους κοχλίες ως δύσκαμπτα – πρακτικά άκαμπτα στοιχεία, ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής, όπου οι κοχλίες λειτουργούν διατμητικά, και η σχετική μετατόπιση των άκρων των συνδεόμενων μελών εξαρτάται κυρίως από την παραμόρφωση των ελασμάτων.

Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα των τάσεων von Mises για τα δύο προσομοιώματα (Σχήμα 5-33), καθώς η προσομοίωση των εύκαμπτων συνδέσεων οδήγησε σε υπέρβαση της χαρακτηριστικής τιμής του συμβατικού ορίου διαρροής του υλικού κατά 17%, ενώ στο προσομοίωμα με τους άκαμπτους κοχλίες, ναι μεν υπήρξε υπέρβαση του ορίου αστοχίας, αλλά αυτή ήταν αμελητέα (0.23%).



(α)

(β)

Σχήμα 5-33: Κατανομή τάσεων von Mises - επίλυση με καμπτόμενους (α) και με άκαμπτους κοχλίες (β)

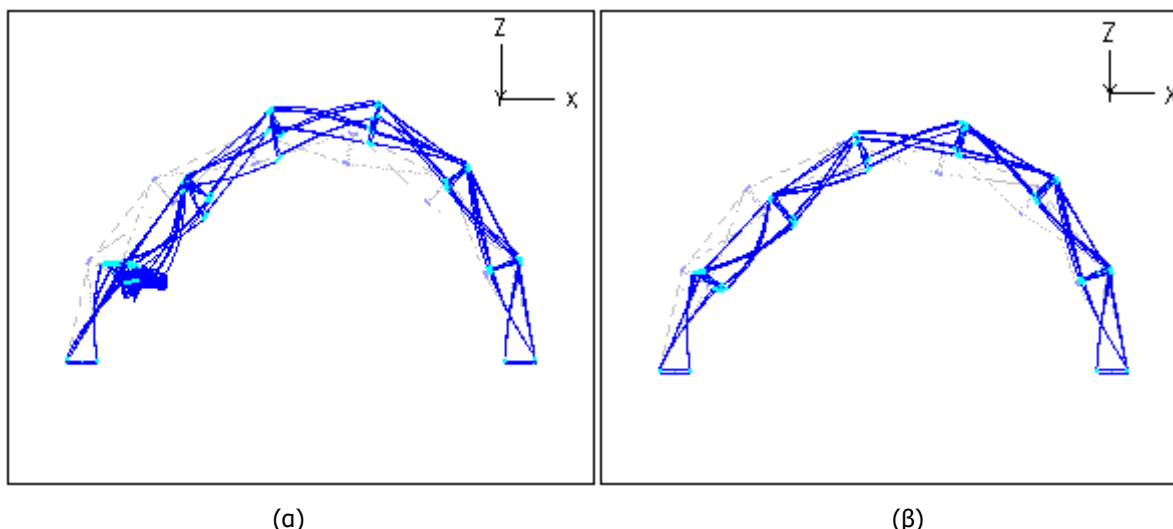
Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το προσομοίωμα με τους άκαμπτους κοχλίες, ως μέσο σύνδεσης των ψαλιδωτών στοιχείων με τους κόμβους, αφού θεωρείται ως το πλέον αντιπροσωπευτικό της πραγματικής συμπεριφοράς του στεγάστρου.

5.7.2 Επιρροή της προσομοίωσης των χαλύβδινων κόμβων στη συμπεριφορά του φορέα

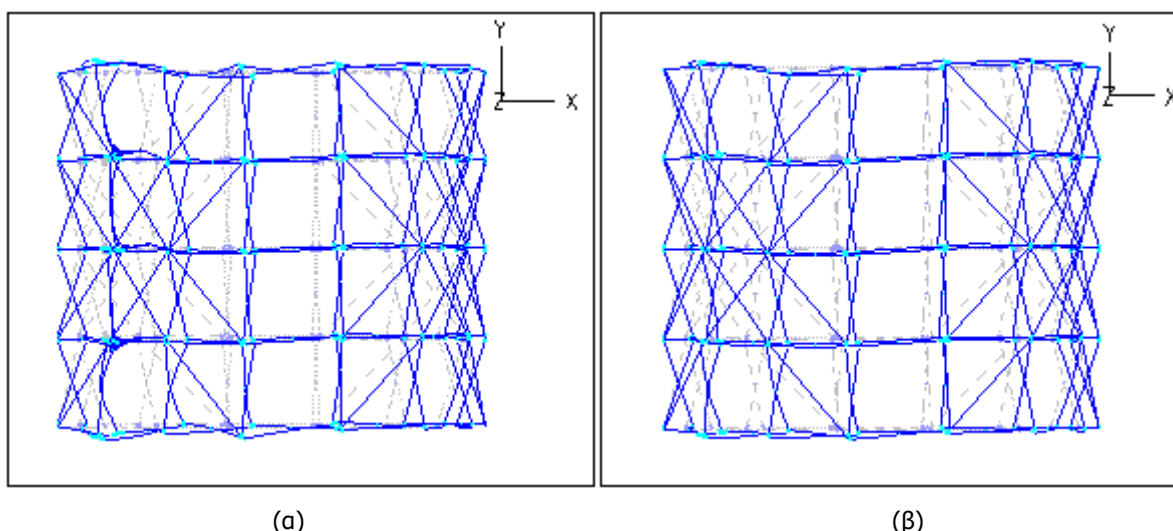
Κατά αντιστοιχία με το κεφάλαιο της διαστασιολόγησης, στην παρούσα παράγραφο γίνεται αναφορά στην παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση του φορέα, έπειτα από την προσομοίωση των χαλύβδινων κόμβων σε τρεις θέσεις, στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου. Ταυτόχρονα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προσομοιωμάτων, του προσομοιώματος με τους χαλύβδινους κόμβους, και του αρχικού προσομοιώματος, με τους άκαμπτους κόμβους, που αναλύθηκε στην Παράγραφο 5.5.2.

Το πρώτο δείγμα της επιρροής των κόμβων έχει να κάνει με την παραμόρφωση του φορέα, υπό τα φορτία του συνδυασμού ULS_LC3, όπου κύριο κινητό φορτίο είναι ο άνεμος στην εγκάρσια διεύθυνση του στεγάστρου. Η εικόνα της παραμόρφωσης είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις, με τη διαφορά ότι η οριζόντια παραμόρφωση στην περιοχή του στεγάστρου με τους χαλύβδινους κόμβους είναι εμφανώς πιο έντονη στην περίπτωση όπου προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα επιφανειακά στοιχεία,

και όχι ως άκαμπτοι (Σχήμα 5-34 και Σχήμα 5-35). Στις υπόλοιπες περιοχές του στεγάστρου, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά των δύο προσομοιώματων.

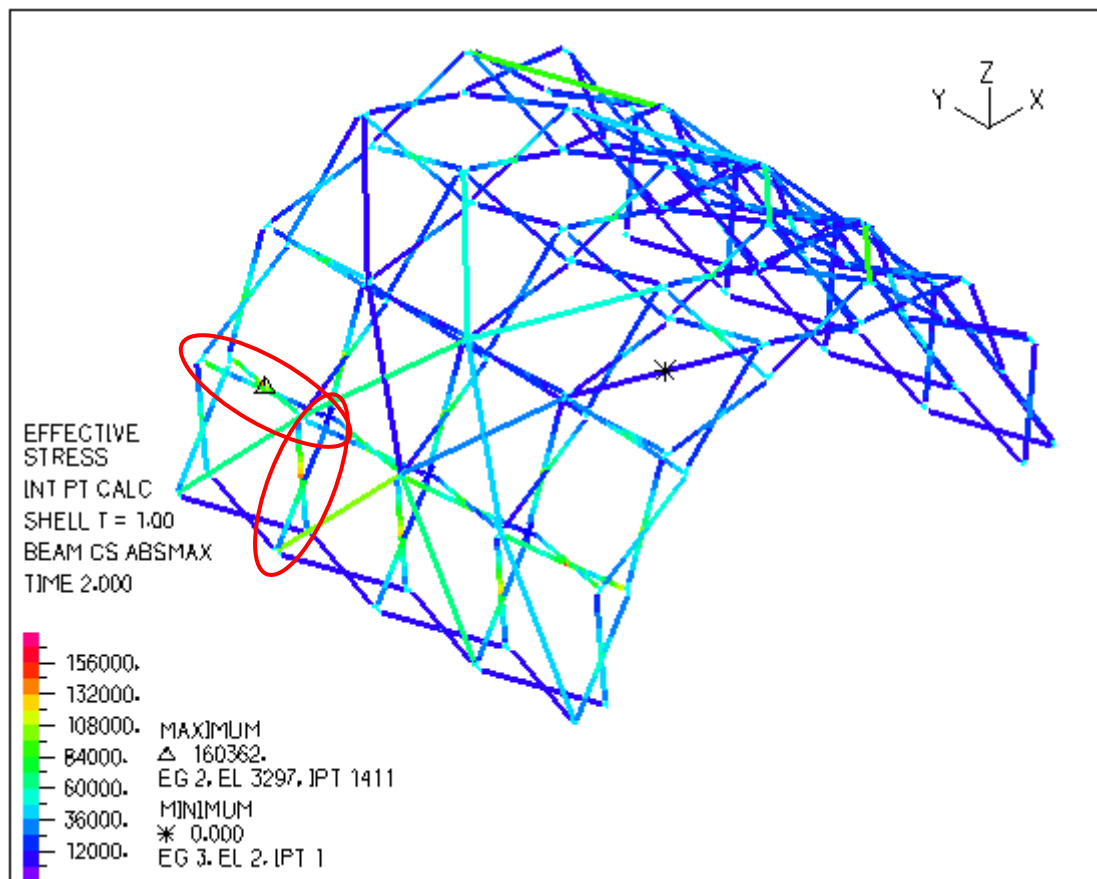


Σχήμα 5-34: Όψη παραμορφωμένου φορέα για άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους (α), προσομοίωμα με άκαμπτους κόμβους (β)



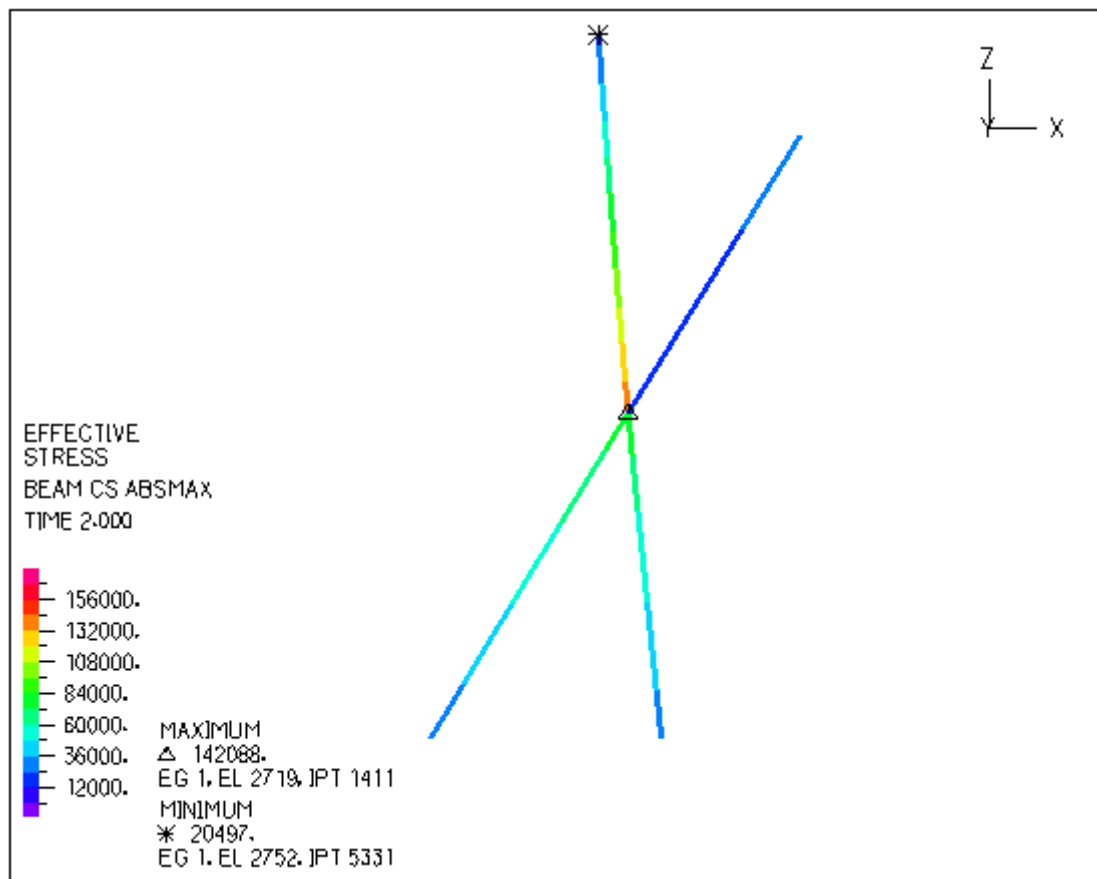
Σχήμα 5-35: Κάτοψη παραμορφωμένου φορέα για άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους (α), προσομοίωμα με άκαμπτους κόμβους (β)

Σε ό,τι αφορά τις τάσεις von Mises, με την εισαγωγή των χαλύβδινων κόμβων στο προσομοίωμα, παρατηρείται μεταβολή της θέσης εντοπισμού του μέγιστου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-36, η μέγιστη τάση von Mises, εντοπίζεται αυτή τη φορά σε μεταφορικό ψαλιδωτό στοιχείο, μεταξύ του τέταρτου και του πέμπτου τόξου, στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου. Το μέγεθος της κρίσιμης τάσης που αναπτύσσεται, αντιστοιχεί σε 160.36MPa, και αντιστοιχεί σε υπέρβαση της χαρακτηριστικής τιμής του συμβατικού ορίου διαρροής του υλικού κατά μόλις 0.2% ($f_o=160\text{MPa}$). Ταυτόχρονα, στην ίδια περιοχή εντοπίζεται η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται πολικά ψαλιδωτά στοιχεία, και αντιστοιχεί στην τιμή των 142.09MPa, δηλαδή στο 89% του ορίου διαρροής του υλικού. Σε ό,τι αφορά τους συνδέσμους δυσκαμψίας, η μέγιστη τάση αντιστοιχεί σε δύναμη ίση με το 18% της αντοχής τους.



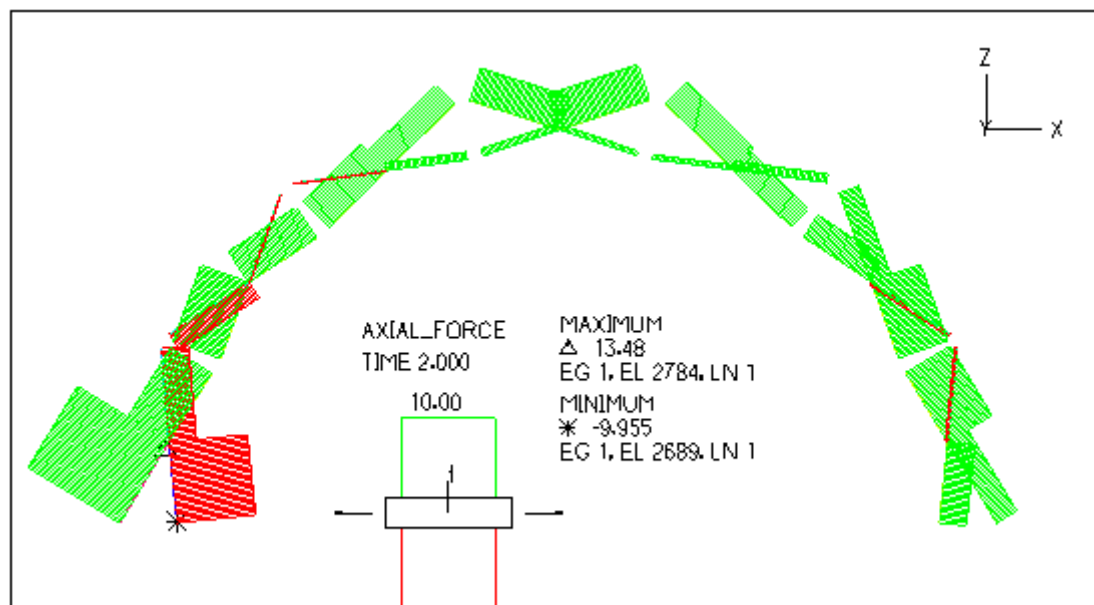
Σχήμα 5-36: Τάσεις von Mises για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3 – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

Εστιάζοντας στο δυσμενέστερο πολικό φαλιδωτό στοιχείο, που είναι το πρώτο φαλιδωτό στοιχείο τέταρτου τόξου παρατηρούμε ότι η κατανομή των τάσεων von Mises κατά μήκος των ράβδων του, κυμαίνεται από τιμές της τάξης των 20MPa στα τέσσερα άκρα, έως την υψηλότερη τιμή, που παρατηρείται τοπικά σε μία από τις δύο ράβδους, στο σημείο όπου συνδέονται (Σχήμα 5-37). Συγκριτικά με το δυσμενέστερο πολικό SLE του αρχικού προσομοιώματος, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του προσομοιώματος με τους χαλύβδινους κόμβους, παρατηρείται μείωση της μέγιστης τάσης κατά 10%. Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 5-38 έως Σχήμα 5-41) παρουσιάζεται συνολικά η εντατική κατάσταση του δεύτερου τόξου πολικών SLE.



Σχήμα 5-37: Πολικό ψαλιδωτό στοιχείο με τη μέγιστη τάση von Mises – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

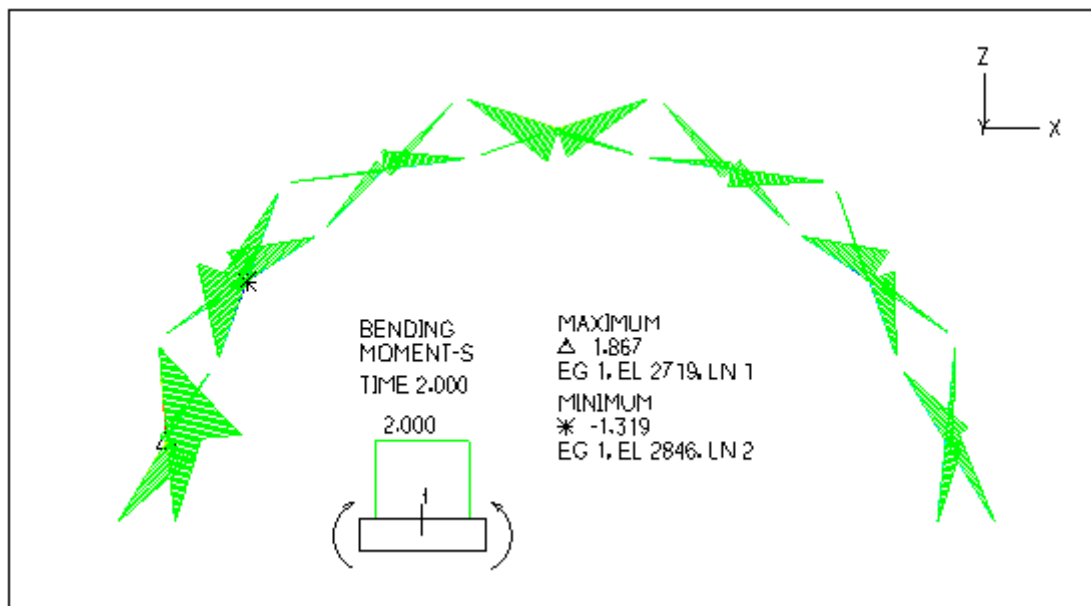
Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα των αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 5-38), το μεγαλύτερο μέρος του τόξου βρίσκεται υπό εφελκυσμό, με τη μέγιστη τιμή αυτού ίση με 13.48kN, να εντοπίζεται στην εξωτερική στήριξη του πρώτου ψαλιδωτού στοιχείου, στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου, όπως και στο αρχικό προσομοίωμα.



Σχήμα 5-38: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων πολικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

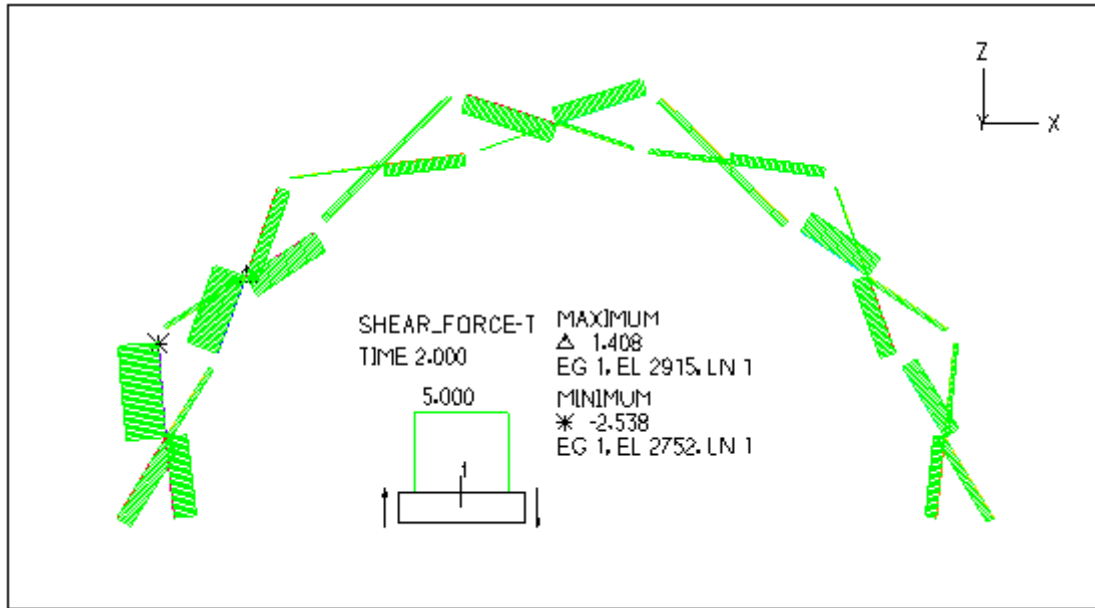
Αντίστοιχα, στην ίδια περιοχή αναπτύσσονται θλιπτικές αξονικές δυνάμεις, στις ράβδους που συνδέονται με τους κόμβους που φορτίζονται άμεσα από τα φορτία της ανεμοπίεσης. Η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη εμφανίζεται στην εσωτερική στήριξη του ίδιου ψαλιδωτού στοιχείου, και ισούται με 9.96kN.

Στο Σχήμα 5-39 παρουσιάζονται οι εντός επιπέδου καμπτικές ροπές των ψαλιδωτών στοιχείων του τέταρτου τόξου. Η εικόνα των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής του προσομοιώματος με τους άκαμπτους κόμβους, με μεγιστοποίηση της ροπής κάμψης στο σημείο που αντιστοιχεί στον πόλο περιστροφής του κάθε ψαλιδωτού στοιχείου και μηδενισμό στα άκρα των ράβδων. Η μέγιστη κατά μέτρο ροπή κάμψης (1.87kN), εντοπίζεται στο πρώτο ψαλιδωτό στοιχείο στο σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises, και μάλιστα αποτελεί το δυσμενέστερο εντατικό μέγεθος, αφού η ορθή τάση που αντιστοιχεί σε αυτή ισούται με το 82% της συνολικής τάσης von Mises (134MPa), όπως και στο αρχικό προσομοίωμα. Στη γενικότερη εικόνα του τόξου, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές των ροπών συγκεντρώνονται στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου, σε αντίθεση με τα ψαλιδωτά στοιχεία της υπήνεμης πλευράς.



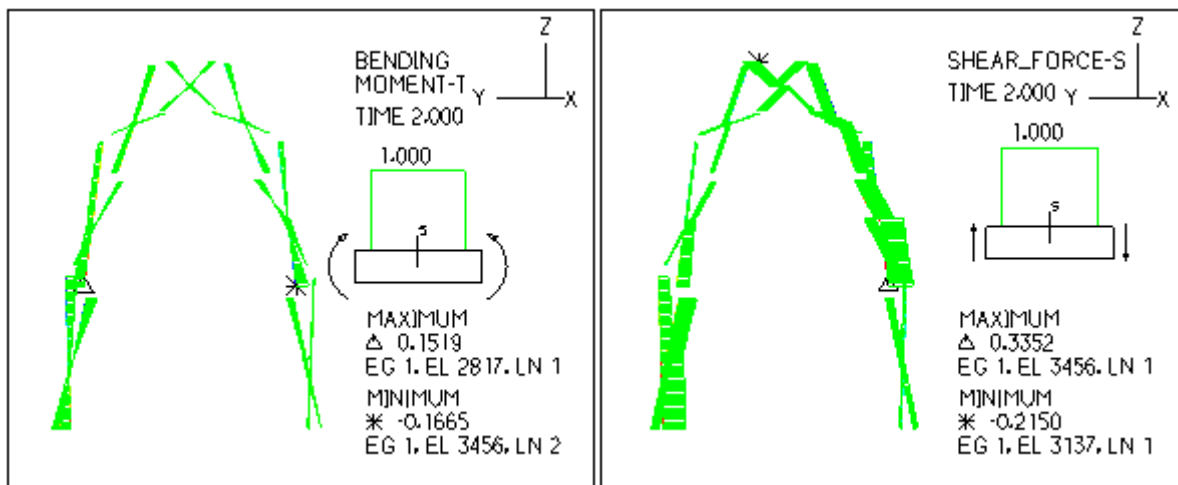
Σχήμα 5-39: Διάγραμμα εντός επιπέδου καμπτικών δυνάμεων πολικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

Σε ό,τι αφορά τις τέμνουσες δυνάμεις εντός του επιπέδου των ψαλιδωτών στοιχείων (Σχήμα 5-40), η εικόνα των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των ροπών κάμψης, με τη μέγιστη κατά μέτρο τέμνουσα (2.54kN) να αναπτύσσεται στο άκρο του δυσμενέστερου ψαλιδωτού στοιχείου, και τη μεγαλύτερη ένταση στο σύνολο του τόξου να κατανέμεται στα στοιχεία της προσήνεμης πλευράς.



Σχήμα 5-40: Διάγραμμα εντός επιπέδου τενουσών δυνάμεων πολικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

Τα εκτός επιπέδου εντατικά μεγέθη (ροπές κάμψης και τέμνουσες δυνάμεις), είναι εμφανώς μικρότερα από τα αντίστοιχα εντός επιπέδου, και οι μέγιστες τιμές τους εμφανίζονται τόσο στην προσήνεμη όσο και στην υπήνεμη πλευρά του στεγαστρού (Σχήμα 5-41).



(α)

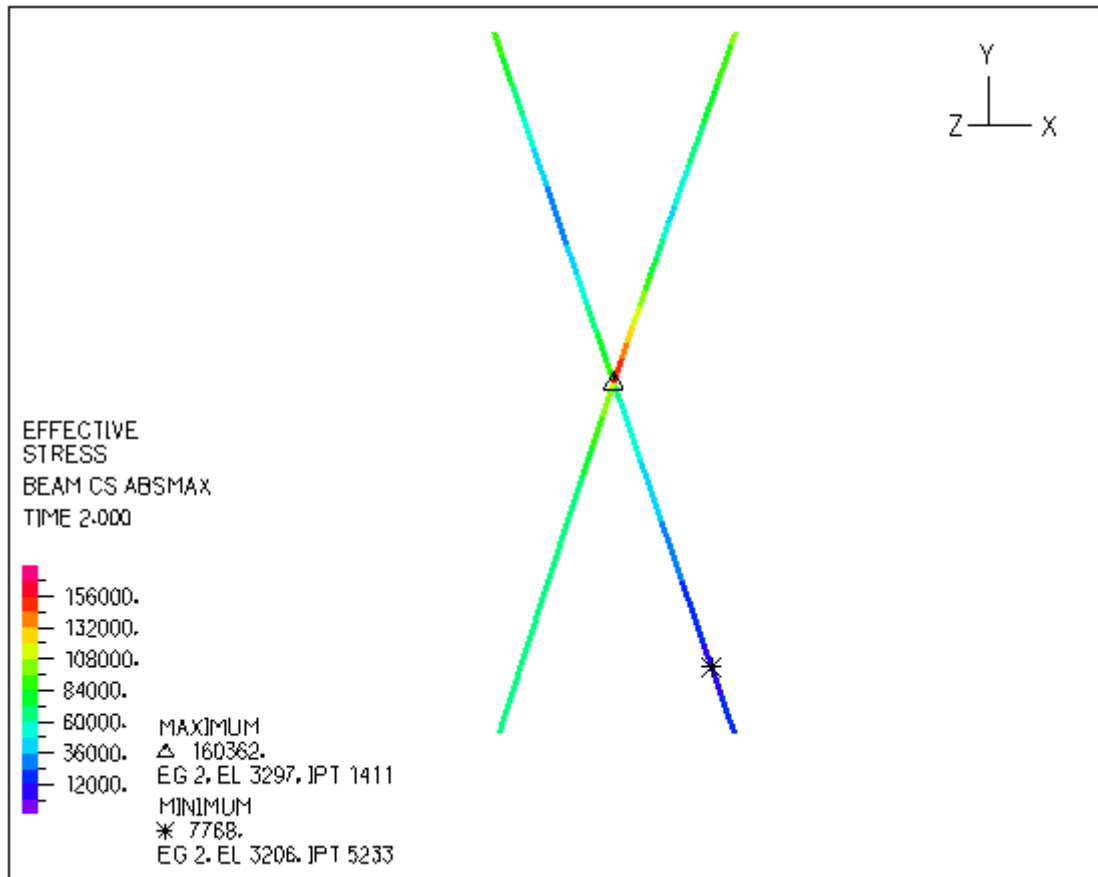
(β)

Σχήμα 5-41: Διαγράμματα εκτός επιπέδου καμπτικών ροπών (α) και τενουσών δυνάμεων (β), πολικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

Σαν γενικό συμπέρασμα για τη συμπεριφορά του τόξου με το δυσμενέστερο ψαλιδωτό στοιχείο, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στα εντατικά μεγέθη και την κατανομή τους, σε σχέση με το αρχικό προσομοίωμα. Σαν κρίσιμο εντατικό μέγεθος εμφανίζεται η ροπή εντός επιπέδου και στις δύο περιπτώσεις, αφού συμμετέχει κατά 82% στον υπολογισμό της συνολικής τάσης von Mises, στο σημείο όπου αυτή μεγιστοποιείται.

Σημαντικότερη φαίνεται να είναι η επιρροή της προσομοίωσης των χαλύβδινων κόμβων στη συμπεριφορά των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων (Σχήμα 5-42), ιδιαίτερα κοντά στις θέσεις όπου αυτοί τοποθετήθηκαν. Εστιάζοντας στο δυσμενέστερο μεταφορικό SLE, το οποίο βρίσκεται μεταξύ των δύο τελευταίων τόξων, και είναι το κρίσιμότερο στοιχείο της κατασκευής, παρατηρούμε υπέρβαση της

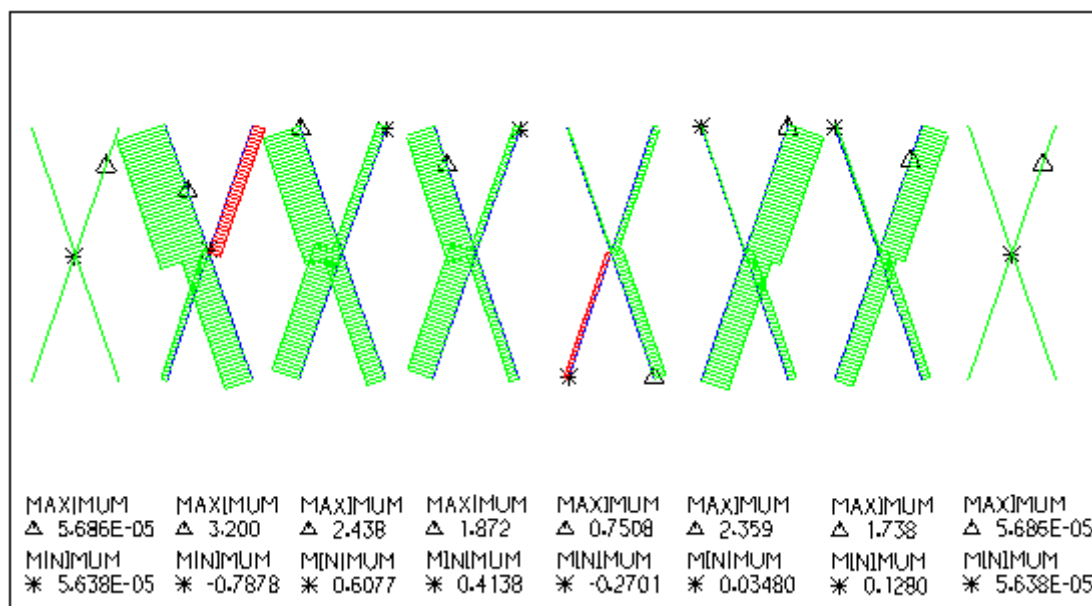
χαρακτηριστικής τιμής του συμβατικού ορίου διαρροής του υλικού κατά μόλις 0.2% ($f_0=160\text{MPa}$), με τη μέγιστη τάση von Mises, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από την αντίστοιχη του προσομοιώματος με τους άκαμπτους κόμβους, να ισούται με 160.36MPa . Παρόλα αυτά, η μέγιστη τάση αναπτύσσεται τοπικά, στο σημείο σύνδεσης των δύο ράβδων, ενώ στο υπόλοιπο μήκος τους οι τάσεις είναι ίσες με περίπου 100MPa στα άκρα πλην του άκρου που συνδέεται με το χαλύβδινο κόμβο, όπου ισούται με 7.7MPa .



Σχήμα 5-42: Μεταφορικό ψαλιδωτό στοιχείο με τη μέγιστη τάση von Mises – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

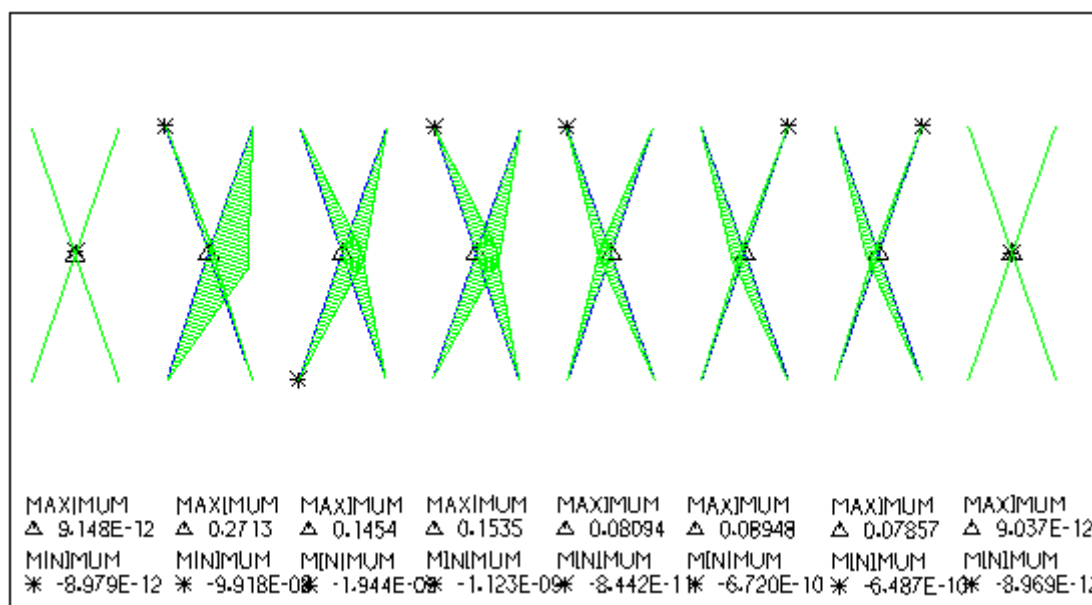
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται συνολικά η εντατική κατάσταση των μεταφορικών SLE κατά αντιστοιχία με το προσομοίωμα με τους άκαμπτους κόμβους. Στις περιπτώσεις όπου οι διαφορές των μεγεθών που σχολιάζονται, είναι μεγάλες σε σχέση με το αρχικό προσομοίωμα, επαναλαμβάνονται οι εικόνες των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών αυτών, στην ίδια κλίμακα για λόγους σύγκρισης.

Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα των αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 5-43), όλα τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε εφελκυσμό, με τη μέγιστη τιμή αυτού, ίση με 3.20kN , να εντοπίζεται στο δεύτερο στοιχείο του τόξου. Στην περίπτωση των δύο προσομοιωμάτων που συγκρίνονται, οι διαφορές στις εσωτερικές αξονικές δυνάμεις είναι αμελητέες.



Σχήμα 5-43: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων μεταφορικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

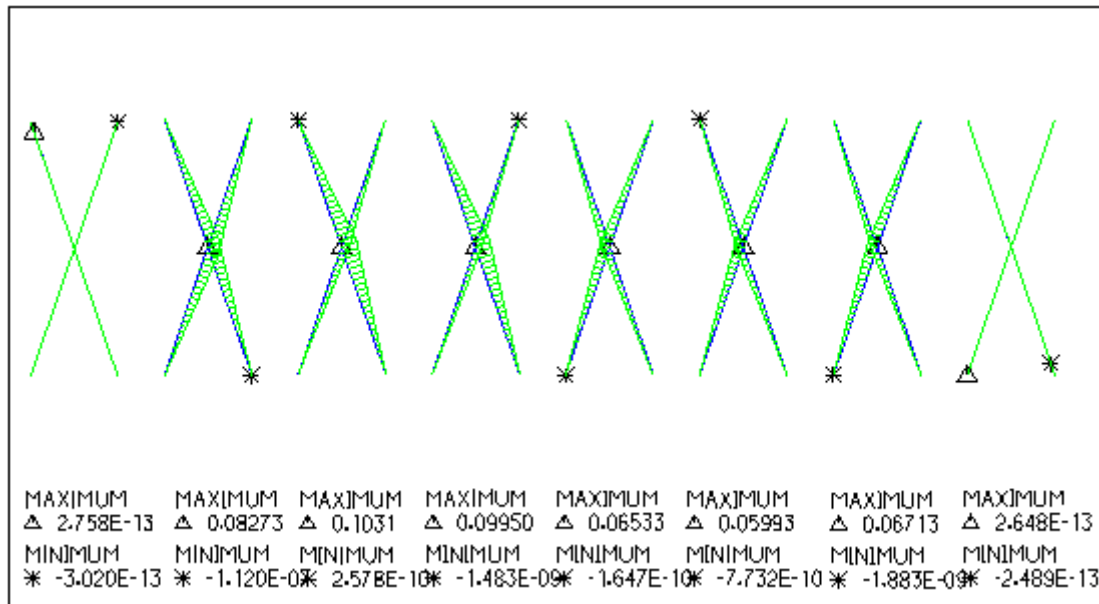
Στο Σχήμα 5-44, παρουσιάζονται οι εντός επιπέδου καμπτικές ροπές των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των πολικών SLE, με μεγιστοποίηση των ροπών κάμψης στο σημείο σύνδεσης των ράβδων κάθε ψαλιδωτού στοιχείου, και πρακτικά μηδενισμό στα άκρα. Η μέγιστη κατά μέτρο ροπή κάμψης (0.27kN), εντοπίζεται στο δεύτερο στοιχείο, στο σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises, και συμβάλλει σημαντικά στην αύξησή της. Αντίστοιχα με την περίπτωση των πολικών SLE, οι μεγαλύτερες τιμές των ροπών συγκεντρώνονται στην προσηνέμη πλευρά του στεγάστρου.



Σχήμα 5-44: Διάγραμμα εντός επιπέδου καμπτικών ροπών μεταφορικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

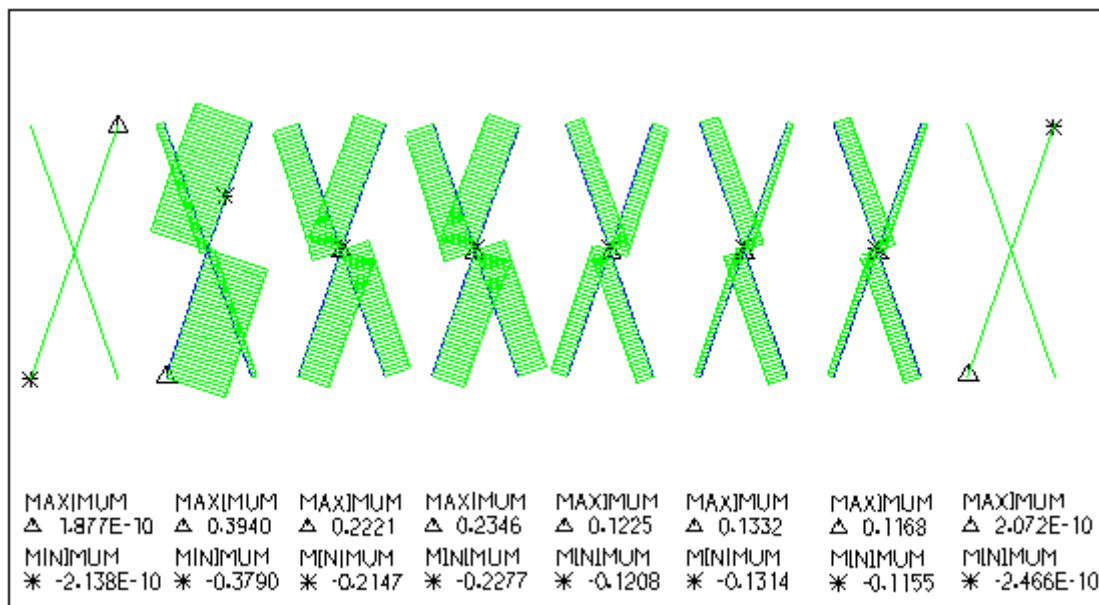
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα αυτά, με τα διαγράμματα του Σχήμα 5-45, που αντιστοιχούν στο προσομοίωμα με τους άκαμπτους κόμβους, παρατηρούμε ότι οι εσωτερικές ροπές κάμψης εντός επιπέδου διπλασιάζονται με την προσομοίωσή τους. Ο διπλασιασμός ισχύει μόνο για τα στοιχεία που

βρίσκονται κοντά στην περιοχή όπου τοποθετήθηκαν οι κόμβοι, αφού τα ψαλιδωτά στοιχεία στην υπήνεμη πλευρά φαίνεται να είναι σχεδόν ανεπηρέαστα.



Σχήμα 5-45: Διάγραμμα εντός επιπέδου καμπτικών ροπών μεταφορικών SLE – προσομοίωμα με άκαμπτους κόμβους

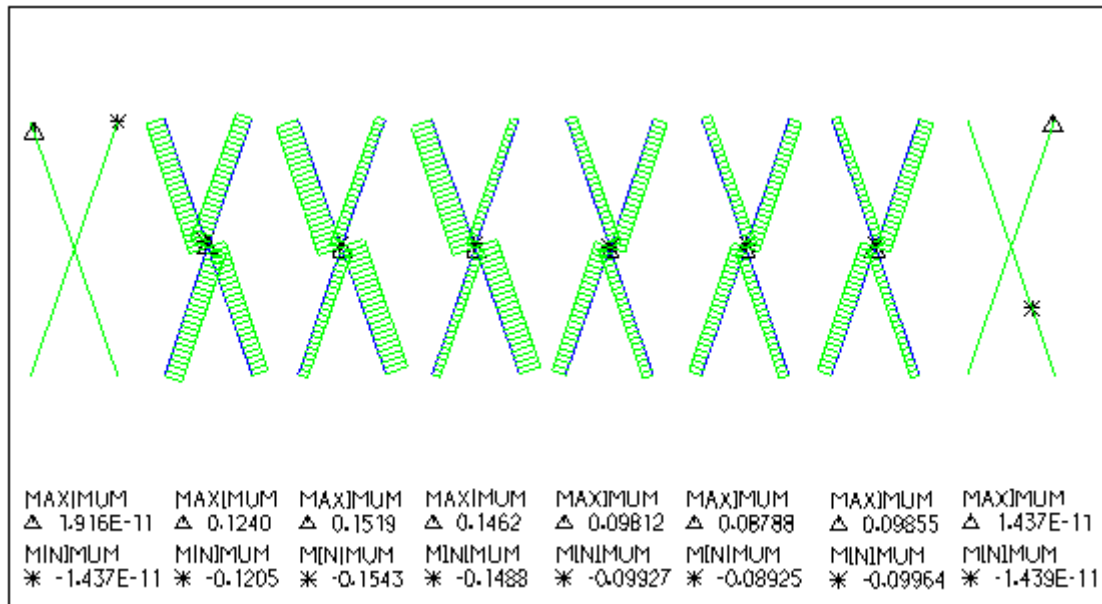
Σε ό,τι αφορά τις τέμνουσες δυνάμεις εντός του επιπέδου των ψαλιδωτών στοιχείων (Σχήμα 5-46), η εικόνα των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη αυτής των ροπών κάμψης, με τις μέγιστες κατά μέτρο τέμνουσες (0.39kN), να αναπτύσσονται στα μέλη του δυσμενέστερου ψαλιδωτού στοιχείου, και τη μεγαλύτερη ένταση να συγκεντρώνεται στα στοιχεία της προσήνεμης πλευράς.



Σχήμα 5-46: Διάγραμμα εντός επιπέδου τέμνουσών δυνάμεων μεταφορικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

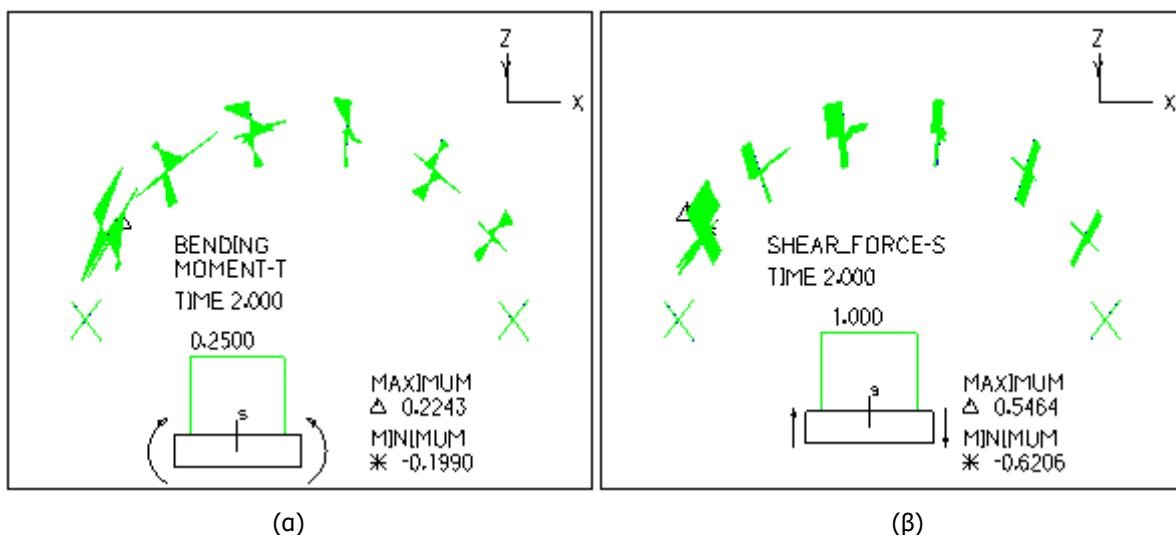
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα αυτά, με τα διαγράμματα του Σχήμα 5-47, που αντιστοιχούν στο προσομοίωμα με τους άκαμπτους κόμβους, παρατηρούμε ότι και οι τέμνουσες δυνάμεις εντός επιπέδου διπλασιάζονται με την προσομοίωση των χαλύβδινων κόμβων, για τα στοιχεία κοντά στις

θέσεις όπου αυτοί τοποθετήθηκαν, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις προς την υπήνεμη πλευρά του στεγάστρου, να μην αυξήθηκαν, αλλά όχι σημαντικά.



Σχήμα 5-47: Διάγραμμα εντός επιπέδου τεμνουσών δυνάμεων μεταφορικών SLE – προσομοίωμα με άκαμπτους κόμβους

Σε ό,τι αφορά τα εκτός επιπέδου εντατικά μεγέθη (ροπές κάμψης και τέμνουσες δυνάμεις), η εικόνα των διαγραμμάτων φαίνεται να είναι παρόμοια με εκείνη του αρχικού προσομοιώματος, με τη μέγιστη εσωτερική ροπή εκτός επιπέδου να ισούται με 0.22kN, και τη μέγιστη τέμνουσα με 0.55kN. Και σε αυτή την περίπτωση, οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στην προσήνεμη πλευρά του στεγάστρου.

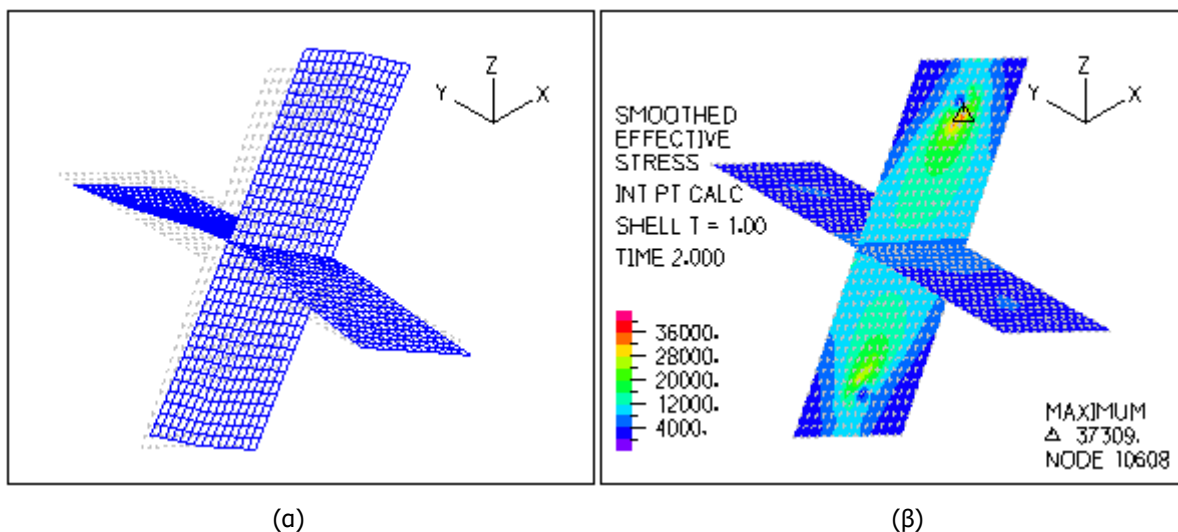


Σχήμα 5-48: Διαγράμματα εκτός επιπέδου καμπτικών ροπών (α) και τεμνουσών δυνάμεων (β), μεταφορικών SLE – προσομοίωμα με χαλύβδινους κόμβους

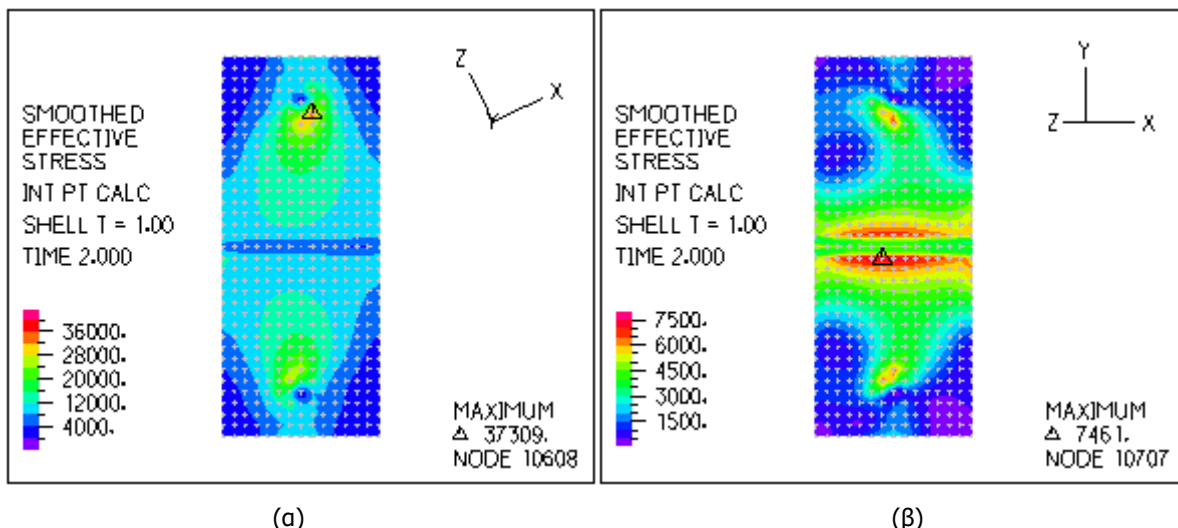
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, σχετικά με τη συμπεριφορά του τόξου μεταφορικών SLE με το κρίσιμο στοιχείο, συμπεραίνουμε ότι η προσομοίωση των χαλύβδινων κόμβων επηρέασε σε σημαντικό βαθμό τα στοιχεία που βρίσκονται κοντά στις θέσεις όπου τοποθετήθηκαν οι σύνδεσμοι, και οδήγησε σε διπλασιασμό των εντός επιπέδου εντατικών μεγεθών (ροπή κάμψης και τέμνουσα).

5.7.3 Συμπεριφορά χαλύβδινου κόμβου

Στην παρούσα παράγραφο, γίνεται αναφορά στη συμπεριφορά των ελασμάτων του χαλύβδινου κόμβου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-49(α), για τη συγκεκριμένη φόρτιση (άνεμος κατά x), ο σύνδεσμος εφελκύεται κατά τη διεύθυνση των πολικών SLE, ενώ κατά τη διεύθυνση των μεταφορικών SLE υπόκειται σε κάμψη εκτός επιπέδου. Παρόλα αυτά, η μέγιστη τάση κατά την αστοχία, η οποία αναπτύσσεται στην άντυγα της οπής του εφελκόμενου μέρους, δεν ξεπερνάει την τάση διαρροής του υλικού. Για την ακρίβεια, η μέγιστη τάση von Mises ισούται με το 16% της τάσης διαρροής του χάλυβα που επιλέχτηκε ($f_y=235\text{MPa}$). Στο Σχήμα 5-50, παρουσιάζονται οι τάσεις von Mises σε κάθε διεύθυνση του κόμβου ξεχωριστά, σε διαφορετική κλίμακα, έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτη η κατανομή των τάσεων στο έλασμα κατά τη διεύθυνση των μεταφορικών SLE, όπου η μέγιστη τιμή βρίσκεται σε ακόμα χαμηλότερο επίπεδο (7.46MPa).



Σχήμα 5-49: Παραμόρφωση (α) και τάσεις von Mises (β) ελασμάτων χαλύβδινου κόμβου



Σχήμα 5-50: Τάσεις von Mises στη διεύθυνση των πολικών SLE (α) και των μεταφορικών SLE (β)

Σαν συμπέρασμα από τα παραπάνω, θα μπορούσαμε να πούμε ότι από άποψη καταπόνησης, υπάρχει πλεόνασμα υλικού στο σύνδεσμο, δεδομένου ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται σε αυτόν είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με το όριο διαρροής του υλικού. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τα σχόλια που αναπτύχθηκαν στην Παράγραφο 5.7.1, η δυσκαμψία του κόμβου και των κοχλιών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά του φορέα συνολικά. Η μείωση των διαστάσεων του ελάσματος, θα οδηγούσε σε πιο εύκαμπτες συνδέσεις, με αρνητική επιρροή στη συμπεριφορά της κατασκευής.

5.8 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

Για τη διαστασιολόγηση των συνδέσεων πραγματοποιήθηκε μία σειρά ελέγχων σύμφωνα με τα πρότυπα EN1993[12] και EN1999[13], λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναπτύχθηκαν μέχρι τώρα στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης. Ως δρώσα δύναμη για τους ελέγχους που αφορούν τα ελάσματα του κόμβου, και την αντοχή των κοχλιών σε διάτμηση θεωρήθηκε η μέγιστη αξονική δύναμη που εμφανίστηκε στα ψαλιδωτά στοιχεία μετά την επίλυση του αρχικού προσομοιώματος για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης στην ΟΚΑ, και ισούται με 13.50kN. Για τους ελέγχους των ψαλιδωτών στοιχείων, ως δράσεις θεωρήθηκαν οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις που εμφανίστηκαν σε καθένα από αυτά, δηλαδή 13.50kN για τα πολικά και 3.12kN για τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία.

Στον Πίνακα 5-12 παρουσιάζονται όλοι οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν για την αντοχή της σύνδεσης και οι λόγοι επάρκειας για καθέναν από αυτούς.

Πίνακας 5-12: Έλεγχοι αντοχής σύνδεσης και λόγοι επάρκειας

Έλεγχος	Αντοχή	Δράση	Λόγος επάρκειας
	kN	kN	-
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας έλασμα χαλύβδινου κόμβου	42.58	13.50	0.32
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας έλασμα πολικού SLE	15.11	13.50	0.89
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας έλασμα μεταφορικού SLE	5.77	3.12	0.54
Αντοχή σε διάτμηση του κοχλία	27.12	13.50	0.50
Αντοχή μελών σε εφελκυσμό έλασμα χαλύβδινου κόμβου	118.20	13.50	0.11
Αντοχή διατομών σε εφελκυσμό – πολικά SLE	85.08	13.50	0.16
Αντοχή διατομών σε εφελκυσμό – μεταφορικά SLE	32.57	3.12	0.10

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι υπολογισμοί των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν.

Οι παράμετροι των υλικών των μελών που ελέγχθηκαν συνοψίζονται ως εξής:

Όριο διαρροής χάλυβα:	$f_y=235\text{MPa}$
Όριο θραύσης χάλυβα:	$f_u=360\text{MPa}$
Όριο διαρροής αλουμινίου:	$f_o=160\text{MPa}$
Όριο θραύσης αλουμινίου:	$f_u=195\text{MPa}$
Όριο διαρροής κοχλία:	$f_{yb}=300\text{MPa}$
Όριο θραύσης κοχλία:	$f_{ub}=500\text{MPa}$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μελών που ελέγχθηκαν συνοψίζονται ως εξής:

Πάχος χαλύβδινων ελασμάτων:	$t=8\text{mm}$
Εμβαδό διατομής χαλύβδινων ελασμάτων:	$A=560\text{mm}^2$
Πάχος διατομών αλουμινίου:	$t_{PO}=3\text{mm}, t_{TR}=2\text{mm}$
Εμβαδό διατομών αλουμινίου:	$A_{PO}=684\text{mm}^2, A_{TR}=284\text{mm}^2$
Διάμετρος κοχλία:	$d=12\text{mm}$
Διάμετρος οπής:	$d_0=13\text{mm}$
Επιφάνεια διάτμησης κορμού:	$A=113\text{mm}^2$
Επιφάνεια διάτμησης σπειρώματος:	$A_s=84.3\text{mm}^2$

Οι συντελεστές ασφαλείας για οικοδομικά έργα είναι οι εξής:

$$\gamma_{M0}=1.00$$

$$\gamma_{M1}=1.00$$

$$\gamma_{M2}=1.25$$

5.8.1 Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις κοχλιών

Οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις σε mm των κοχλιών από το ελεύθερο άκρο του αντίστοιχου μέλους υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις, όπου: e_1 και e_2 είναι η απόσταση από το άκρο κατά τη διεύθυνση της φόρτισης και κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης αντίστοιχα, και e_{reg} είναι η συνιστώμενη τιμή της απόστασης για μέλη από αλουμίνιο.

– Για μέλη από χάλυβα (EN1993-1-8):

$$1.2 \cdot d_0 \leq e_1 \leq 4 \cdot t + 40$$

$$1.2 \cdot 13 \leq e_1 \leq 4 \cdot 8 + 40$$

$$15.6 \leq e_1 \leq 72$$

(5-13)

Επιλέχτηκε $e_1=20\text{mm}$

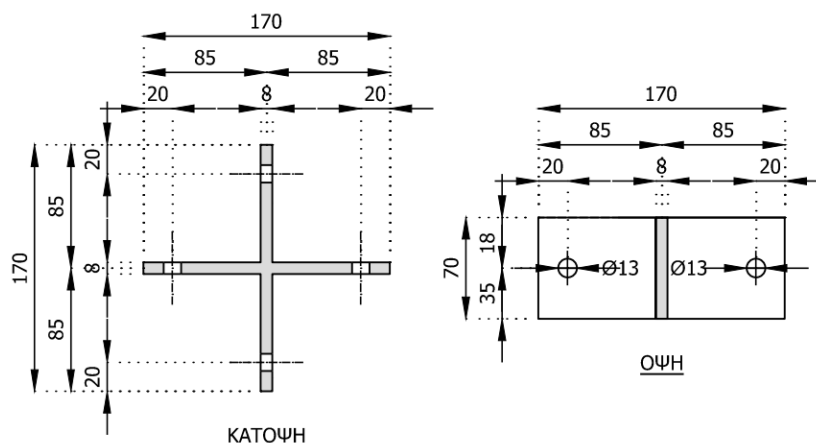
$$1.2 \cdot d_0 \leq e_2 \leq 4 \cdot t + 40$$

$$1.2 \cdot 13 \leq e_2 \leq 4 \cdot 8 + 40$$

$$15.6 \leq e_2 \leq 72$$

(5-14)

Επιλέχτηκε $e_2=35\text{mm}$



Σχήμα 5-51: Διαστάσεις χαλύβδινου κόμβου και θέσεις οπών

– Για μέλη από αλουμίνιο (EN1999-1-1), πολικά ψαλιδωτά στοιχεία:

$$1.2 \cdot d_0 \leq e_1 \leq 4 \cdot t + 40$$

$$1.2 \cdot 13 \leq e_1 \leq 4 \cdot 3 + 40$$

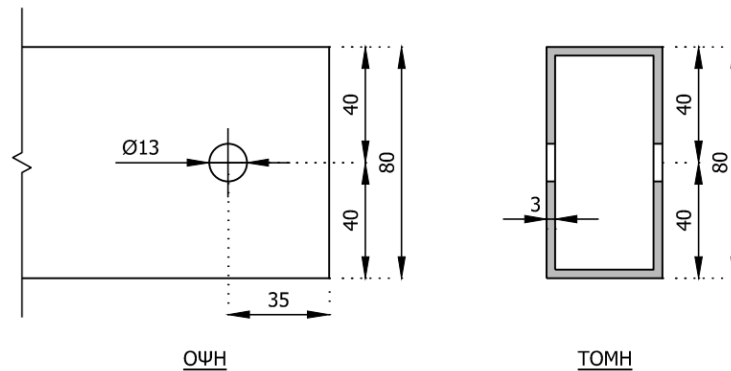
$$15.6 \leq e_1 \leq 52$$

$$e_{1,reg} = 3.0 \cdot d_0 = 39\text{mm}$$

(5-15)

Επιλέχτηκε $e_1=35\text{mm}$

$$\begin{aligned}
 1.2 \cdot d_0 &\leq e_2 \leq 4 \cdot t + 40 \\
 1.2 \cdot 13 &\leq e_2 \leq 4 \cdot 3 + 40 \\
 15.6 &\leq e_2 \leq 52 \\
 e_{2,reg} &= 1.5 \cdot d_0 = 19.5\text{mm} \\
 \text{Επιλέχτηκε } e_2 &= 40\text{mm}
 \end{aligned}
 \tag{5-16}$$

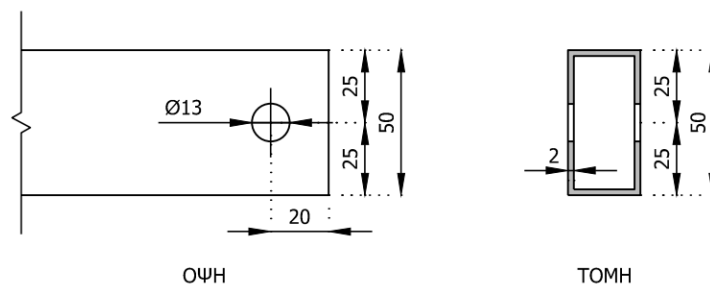


Σχήμα 5-52: Άκρο πολικού ψαλιδωτού στοιχείου – θέση οπής και διατομή

– Για μέλη από αλουμίνιο (EN1999-1-1), μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία:

$$\begin{aligned}
 1.2 \cdot d_0 &\leq e_1 \leq 4 \cdot t + 40 \\
 1.2 \cdot 13 &\leq e_1 \leq 4 \cdot 2 + 40 \\
 15.6 &\leq e_1 \leq 48 \\
 e_{1,reg} &= 3.0 \cdot d_0 = 39\text{mm} \\
 \text{Επιλέχτηκε } e_1 &= 20\text{mm}
 \end{aligned}
 \tag{5-17}$$

$$\begin{aligned}
 1.2 \cdot d_0 &\leq e_2 \leq 4 \cdot t + 40 \\
 1.2 \cdot 13 &\leq e_2 \leq 4 \cdot 2 + 40 \\
 15.6 &\leq e_2 \leq 48 \\
 e_{2,reg} &= 1.5 \cdot d_0 = 19.5\text{mm} \\
 \text{Επιλέχτηκε } e_2 &= 25\text{mm}
 \end{aligned}
 \tag{5-18}$$



Σχήμα 5-53: Άκρο μεταφορικού ψαλιδωτού στοιχείου – θέση οπής και διατομή

5.8.2 Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας

– Για μέλη από χάλυβα (EN1993-1-8):

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{1 \cdot 1.54 \cdot 36 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1.2 \text{ cm} \cdot 0.8 \text{ cm}}{1.25} \rightarrow F_{b,Rd} = 42.58 \text{ kN} \quad (5-19)$$

Όπου:

$k_m = 1$, για κατηγορίες χάλυβα μικρότερες από S460

$$a_b = \min \left[\frac{e_1}{d_0}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right] = \min \left[\frac{20}{13}; 3 \cdot \frac{500}{360}; 3 \right] = \min [1.54; 4.17; 3] \rightarrow a_b = 1.54$$

– Για μέλη από αλουμίνιο (EN1999-1-1), πολικά ψαλιδωτά στοιχεία¹:

$$F_{b,Rd} = \frac{a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.69 \cdot 19.5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1.2 \text{ cm} \cdot 0.3 \text{ cm}}{1.25} \rightarrow F_{b,Rd} = 15.11 \text{ kN} \quad (5-20)$$

Όπου:

$$a_b = \min \left[\frac{e_1}{d_0}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right] = \min \left[\frac{35}{13}; 3 \cdot \frac{500}{195}; 3 \right] = \min [2.69; 7.69; 3] \rightarrow a_b = 2.69$$

– Για μέλη από αλουμίνιο (EN1999-1-1), μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία:

$$F_{b,Rd} = \frac{a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{1.54 \cdot 19.5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1.2 \text{ cm} \cdot 0.2 \text{ cm}}{1.25} \rightarrow F_{b,Rd} = 5.77 \text{ kN} \quad (5-21)$$

Όπου:

$$a_b = \min \left[\frac{e_1}{d_0}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right] = \min \left[\frac{20}{13}; 3 \cdot \frac{500}{195}; 3 \right] = \min [1.54; 7.69; 3] \rightarrow a_b = 1.54$$

5.8.3 Αντοχή σε διάτμηση του κοχλία

Το επίπεδο διάτμησης του κοχλία διέρχεται από την πλήρη διατομή αυτού, επομένως η αντοχή του κοχλία σε διάτμηση υπολογίζεται ως εξής (EN1993-1-8):

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot 50 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1.13 \text{ cm}^2}{1.25} \rightarrow F_{v,Rd} = 27.12 \text{ kN} \quad (5-22)$$

5.8.4 Αντοχή διατομών των μελών σε εφελκυσμό

Παρόλο που η αντοχή των διατομών των μελών σε εφελκυσμό έχει ήδη ελεγχθεί μέσω των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος λόγω της απομείωσης των διατομών που οφείλεται στις οπές.

– Για μέλη από χάλυβα (EN1993-1-1):

$$N_{t,Rd} = \min [N_{pl,Rd}; N_{pl,Rd}] = \min [301.60; 118.20] \rightarrow N_{t,Rd} = 118.20 \text{ kN} \quad (5-23)$$

¹ Για τον υπολογισμό της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας των ράβδων από αλουμίνιο, υιοθετήθηκε η παραδοχή ότι όλη η δρώσα δύναμη παραλαμβάνεται από το ένα έλασμα της διατομής, αυτό που είναι σε επαφή με το χαλύβδινο κόμβο.

Όπου:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5.60 \text{ cm}^2 \cdot 36 \text{ kN/cm}^2}{1.00} \rightarrow N_{pl,Rd} = 301.60 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{k \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 4.56 \text{ cm}^2 \cdot 36 \text{ kN/cm}^2}{1.25} \rightarrow N_{u,Rd} = 118.20 \text{ kN}$$

$$k = 0.9$$

$$A_{net} = A - d_0 \cdot t = 5.60 - 1.3 \cdot 0.8 = 4.56 \text{ cm}^2$$

– Για μέλη από αλουμίνιο (EN1999-1-1), πολικά ψαλιδωτά στοιχεία:

$$N_{t,Rd} = \min[N_{o,Rd}; N_{net,Rd}] = \min[109.44; 85.08] \rightarrow N_{t,Rd} = 85.08 \text{ kN} \quad (5-24)$$

Όπου:

$$N_{o,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{6.84 \text{ cm}^2 \cdot 16 \text{ kN/cm}^2}{1.00} \rightarrow N_{o,Rd} = 109.44 \text{ kN}$$

$$N_{net,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 6.06 \text{ cm}^2 \cdot 19.5 \text{ kN/cm}^2}{1.25} \rightarrow N_{net,Rd} = 85.08 \text{ kN}$$

$$A_{net} = A - 2 \cdot d_0 \cdot t = 6.84 - 2 \cdot 1.3 \cdot 0.3 = 6.06 \text{ cm}^2$$

– Για μέλη από αλουμίνιο (EN1999-1-1), πολικά ψαλιδωτά στοιχεία:

$$N_{t,Rd} = \min[N_{o,Rd}; N_{net,Rd}] = \min[45.44; 32.57] \rightarrow N_{t,Rd} = 32.57 \text{ kN} \quad (5-25)$$

Όπου:

$$N_{o,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{2.84 \text{ cm}^2 \cdot 16 \text{ kN/cm}^2}{1.00} \rightarrow N_{o,Rd} = 45.44 \text{ kN}$$

$$N_{net,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 2.32 \text{ cm}^2 \cdot 19.5 \text{ kN/cm}^2}{1.25} \rightarrow N_{net,Rd} = 32.57 \text{ kN}$$

$$A_{net} = A - 2 \cdot d_0 \cdot t = 2.84 - 2 \cdot 1.3 \cdot 0.2 = 2.32 \text{ cm}^2$$

5.9 ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται υπολογισμός των υλικών για την κατασκευή του στεγάστρου, και εκτίμηση του βάρους τους. Ομαδοποιώντας τα υλικά, έτσι ώστε να γίνει υπολογισμός της συμμετοχής τους στο συνολικό βάρος του φορέα, προκύπτουν οι εξής κατηγορίες:

- Ράβδοι αλουμινίου ψαλιδωτών στοιχείων.
- Χαλύβδινοι κόμβοι
- Κοχλίες, ροδέλες και περικόχλια
- Συρματόσχοινα και εξαρτήματα συστήματος δυσκαμψίας

– Μembrάνη επικάλυψης

Πίνακας 5-13: Προμέτρηση υλικών και εκτίμηση του βάρους της κατασκευής

Περιγραφή	Τεμάχια	Βάρος ανά τεμάχιο [kg]	Σύνολο [kg]
Ράβδος αλουμινίου 40x80x3	70	2.6900	188.300
Ράβδος αλουμινίου 25x50x2	64	1.0900	69.760
Χαλύβδινος κόμβος	80	1.4600	116.800
Κοχλίας M12, L70	140	0.0843	11.802
Κοχλίας M12, L55	128	0.0710	9.088
Κοχλίας M16, L120	35	0.2310	8.085
Κοχλίας M12, L80	32	0.0932	2.982
Ροδέλα M12	1200	0.0070	8.436
Ροδέλα M16	140	0.0146	2.044
Περικόχλιο M12	300	0.0233	6.990
Περικόχλιο M16	35	0.0448	1.568
Συρματόσχοινο 6.1mm	24	0.3700	8.880
Άκρο συρματόσχοινο 6.1mm	48	0.1000	4.800
Μembrάνη επικάλυψης	1	100.9300	100.930

Αθροίζοντας τα βάρη του Πίνακα 5-13, προκύπτει το συνολικό βάρος της κατασκευής, ίσο με 540.47kg. Υπολογίζοντας το βάρος των υλικών κάθε κατηγορίας, και διαιρώντας με το συνολικό βάρος της κατασκευής, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (Πίνακας 5-14):

Το 48% του βάρους της κατασκευής, οφείλεται στα ψαλιδωτά στοιχεία, ενώ το βάρος των χαλύβδινων κόμβων ισούται με το 22% του συνόλου (σχεδόν το μισό από αυτό των SLE). Εξίσου σημαντικό είναι το βάρος της μεμβράνης επικάλυψης (19%) ενώ τα βάρη των κοχλιώσεων και των συρματόσχοινων είναι πολύ μικρά (9% και 33%) αντίστοιχα. Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η αναζήτηση βέλτιστων λύσεων για τη σύνδεση των ψαλιδωτών στοιχείων, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση των διατομών αλουμινίου, θα είχαν σημαντική επιρροή στη μείωση του συνολικού βάρους της κατασκευής.

Πίνακας 5-14: Ποσοστά βαρών ανά κατηγορία, επί του συνολικού βάρους

Κατηγορία υλικού	Βάρος ανά κατηγορία [kg]	Ποσοστό επί του συνολικού βάρους [%]
Ράβδοι αλουμινίου ψαλιδωτών στοιχείων	258.06	48
Χαλύβδινι κόμβοι	116.80	22
Κοχλίες, ροδέλες και περικόχλια	51.00	9
Συρματόσχοινα και εξαρτήματα	13.68	3
Μembrάνη επικάλυψης	100.93	19

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται υπολογισμός του βάρους και των ποσοτήτων των παραπάνω υλικών.

5.9.1 Ράβδοι αλουμινίου ψαλιδωτών στοιχείων

Το μήκος των ράβδων των ψαλιδωτών στοιχείων, όπως αυτό προέκυψε μετά τον υπολογισμό των εκκεντροτήτων των συνδέσεων, ισούται με $L=1.38m$. Το μήκος αυτό αντιστοιχεί στην απόσταση των

οπών των άκρων των ράβδων, επομένως θα πρέπει να προστεθούν σε αυτό τα τμήματα από τις οπές μέχρι το τελείωμα κάθε άκρου (e_1). Έτσι, το ολικό μήκος κάθε ράβδου πολικών και μεταφορικών SLE, υπολογίζεται από τη Σχέση (5-26) ως εξής:

$$\begin{aligned} L_{PO} &= L + 2 \cdot e_{1,PO} = 1.38 + 2 \cdot 0.035 \rightarrow L_{PO} = 1.45\text{m} \\ L_{TR} &= L + 2 \cdot e_{1,TR} = 1.38 + 2 \cdot 0.020 \rightarrow L_{TR} = 1.42\text{m} \end{aligned} \quad (5-26)$$

Ο όγκος κάθε ράβδου υπολογίζεται από τη Σχέση (5-27):

$$\begin{aligned} V_{PO} &= A_{PO} \cdot L_{PO} = 6.84\text{cm}^2 \cdot 145\text{cm} \rightarrow V_{PO} = 991.8\text{cm}^3 \\ V_{TR} &= A_{TR} \cdot L_{TR} = 2.84\text{cm}^2 \cdot 142\text{cm} \rightarrow V_{TR} = 403.28\text{cm}^3 \end{aligned} \quad (5-27)$$

Πολλαπλασιάζοντας τον όγκο του κάθε στοιχείου με την πυκνότητα του αλουμινίου, προκύπτει:

$$\begin{aligned} M_{PO} &= V_{PO} \cdot \frac{\gamma_{al}}{g} = 991.8 \cdot 10^{-6}\text{m}^3 \cdot \frac{27\text{kN/m}^3}{10\text{m/s}^2} \cdot 1000 \rightarrow M_{PO} = 2.69\text{kg} \\ M_{TR} &= V_{TR} \cdot \frac{\gamma_{al}}{g} = 403.28 \cdot 10^{-6}\text{m}^3 \cdot \frac{27\text{kN/m}^3}{10\text{m/s}^2} \cdot 1000 \rightarrow M_{TR} = 1.09\text{kg} \end{aligned} \quad (5-28)$$

Ο αριθμός των πολικών SLE αντιστοιχεί σε $2 \times 7 \times 5 = 70$ τμχ., ενώ των μεταφορικών SLE σε $2 \times 8 \times 4 = 64$ τμχ..

5.9.2 Χαλύβδινοι κόμβοι

Για τους κόμβους, ο όγκος και το βάρος ανά τεμάχιο υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{JOINT} &= A \cdot h = (2 \cdot 17 - 0.8) \cdot 0.8 \cdot 7 \rightarrow V_{JOINT} = 185.92\text{cm}^3 \\ M_{JOINT} &= V_{JOINT} \cdot \frac{\gamma_{ST}}{g} = 185.92 \cdot 10^{-6}\text{m}^3 \cdot \frac{78.5\text{kN/m}^3}{10\text{m/s}^2} \cdot 1000 \rightarrow M_{JOINT} = 1.46\text{kg} \end{aligned} \quad (5-29)$$

Όπου:

- A είναι η επιφάνεια του κόμβου σε κάτοψη.
- h είναι το ύψος του κόμβου.

Με την παραδοχή ότι οι διαμορφωμένοι κόμβοι της θεμελίωσης θα έχουν παρόμοιο βάρος με τους υπόλοιπους, ο συνολικός αριθμός των κόμβων υπολογίζεται σε $2 \times 8 \times 5 = 80$ τμχ.

5.9.3 Κοχλίες, ροδέλες και περικόχλια

Για την εκτίμηση του βάρους των κοχλιών έπρεπε πρώτα να υπολογιστεί το μήκος τους [7], ανάλογα με το πάχος της σύνδεσης. Όπως υπολογίστηκε, θα χρησιμοποιηθούν κοχλίες M12, εφόσον τα πάχη σύνδεσης μπορούν να καλυφθούν από αυτούς.

Το πάχος σύνδεσης πολικού SLE – κόμβου ισούται με 48mm, επομένως επιλέγεται κοχλίας M12, ονομαστικού μήκους $L = 70$ mm. Αντίστοιχα, ο πάχος σύνδεσης μεταφορικού SLE – κόμβου, ισούται με 33mm, και επιλέγεται κοχλίας M12 ονομαστικού μήκους $L = 55$ mm.

Για την υλοποίηση του σημείου περιστροφής ενός πολικού SLE, το πάχος της σύνδεσης ισούται με 88mm, επομένως επιλέγεται κοχλίας M16 ονομαστικού μήκους $L = 120$ mm, αφού οι κοχλίες M12, δε διαθέτουν το απαιτούμενο μήκος. Τέλος, για την υλοποίηση του σημείου περιστροφής ενός μεταφορικού SLE, το πάχος της σύνδεσης ισούται με 58mm, επομένως επιλέγεται κοχλίας M12, ονομαστικού μήκους $L = 80$ mm.

Ο αριθμός των κοχλιών υπολογίζεται ως ένας σε κάθε άκρο ράβδου, και ένας επιπλέον για κάθε ψαλιδωτό στοιχείο. Έτσι, υπολογίζεται ότι απαιτούνται: $2 \times 70 = 140$ κοχλίες M12/L=70, $2 \times 64 = 128$ κοχλίες M12/L=55, $70/2 = 35$ κοχλίες M16/L=120, $64/2 = 32$ κοχλίες M12/L=80. Ο αριθμός των ροδελών αντιστοιχεί σε δύο ανά κοχλία, ενώ των περικοχλιών σε ένα ανά κοχλία. Τα βάρη των παραπάνω αναφέρονται στα αντίστοιχα πρότυπα ([7], [8], [9]), σε κιλά/1000τμχ.

5.9.4 Συρματόσχοινα και εξαρτήματα συστήματος δυσκαμψίας

Ο υπολογισμός του βάρους των συρματόσχοινων, γίνεται ανά τεμάχιο μήκους 2.10m ως εξής:

$$V_{\text{CABLE}} = A_m \cdot L = 222 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot 210 \text{cm} \rightarrow V_{\text{CABLE}} = 46.64 \text{cm}^3$$

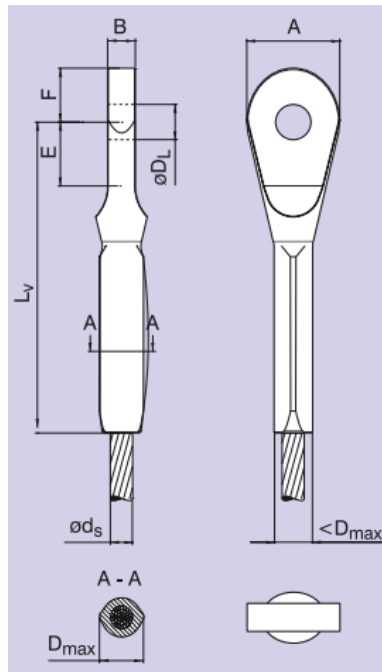
$$M_{\text{CABLE}} = V_{\text{CABLE}} \cdot \frac{\gamma_{\text{ST}}}{g} = 46.64 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \cdot \frac{78.5 \text{kN/m}^3}{10 \text{m/s}^2} \cdot 1000 \rightarrow M_{\text{JOINT}} = 0.37 \text{kg} \quad (5-30)$$

Όπου:

$$A_m = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot f = \pi \cdot \frac{0.61^2}{4} \cdot 0.77 \rightarrow A_m = 222 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2$$

$f = 0.76$, για συρματόσχοινα με δύο στρώσεις καλωδίων γύρω από τον πυρήνα.

Ο αριθμός των συρματόσχοινων που έχουν υπολογιστεί, είναι 24. Τα εξαρτήματα αγκύρωσης των συρματόσχοινων, αντιστοιχούν σε δύο ανά συρματόσχοινο, βάρους 0.10kg/τμχ, σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή.



Σχήμα 5-54: Άκρο συρματόσχοινο [PFEIFER, 2005]

5.9.5 Μεμβράνη επικάλυψης

Τέλος, για τη μεμβράνη επικάλυψης, υπολογίζεται επιφάνεια ίση με την εξωτερική επιφάνεια του στεγάστρου, δηλαδή για το κυλινδρικό τμήμα ίση με:

$$A_{\text{MEMB}} = \pi \cdot R_{\text{ext}} \cdot L_y = \pi \cdot 3.45 \text{m} \cdot 5.74 \text{m} \rightarrow A_{\text{MEMB}} = 32.21 \text{m}^2 \quad (5-31)$$

ενώ για το κάθε κατακόρυφο τμήμα ίση με:

$$A_{\text{MEMB}} = 0.5 \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{ext}}^2}{4} = 0.5 \cdot \pi \cdot \frac{6.90^2}{4} \rightarrow A_{\text{MEMB}} = 18.70\text{m}^2 \quad (5-32)$$

Έτσι, η συνολική επιφάνεια της μεμβράνης επικάλυψης ισούται με 69.61m^2 , και αντιστοιχεί σε βάρος ίσο με $69.61\text{m}^2 \times 1.45\text{kg/m}^2 = 100.93\text{kg}$.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο φορέας που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελείται πέντε τόξα πολικών ψαλιδωτών στοιχείων κατά την εγκάρσια έννοια, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων κατά τη διαμήκη, συνθέτοντας ένα κυλινδρικού σχήματος στέγαστρο.

Ένα από τα πρώτα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσω των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, είναι η μεγάλη διαφορά στη δυσκαμψία της κατασκευής ανά διεύθυνση. Για την ακρίβεια, για φόρτιση κατά τη διαμήκη διεύθυνση, η μετακινήσεις που παρουσιάστηκαν τείνουν προς τη συμπεριφορά του μηχανισμού. Για το λόγο αυτό ο φορέας ενισχύθηκε κατά τη διεύθυνση αυτή μέσω καλωδιωτών στοιχείων.

Κατά τη διαστασιολόγηση των ψαλιδωτών στοιχείων και των συνδέσμων δυσκαμψίας, διαπιστώθηκε ότι η κινητή δράση που επηρέασε σε μεγαλύτερο βαθμό την αντοχή του στεγάστρου, ήταν οι ανεμοπιέσεις στις δύο διευθύνσεις, έναντι του χιονιού, που ως κύριο κινητό φορτίο δεν οδήγησε στην ανάπτυξη μεγάλης έντασης στο φορέα. Για άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση, τα κρίσιμα για τη διαστασιολόγηση στοιχεία, ήταν τα πολικά ψαλιδωτά στοιχεία που βρίσκονται στην προσήνεμη πλευρά, και πιο συγκεκριμένα η περιοχή γύρω από τον πόλο περιστροφής τους, όπου αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο ορθές τάσεις, λόγω κάμψης εντός επιπέδου. Για άνεμο κατά τη διαμήκη διεύθυνση, το μεγαλύτερο μέρος των δράσεων παραλαμβάνεται από τους συνδέσμους δυσκαμψίας, οι οποίοι λειτουργούν αξονικά σε εφελκυσμό, επομένως τα ψαλιδωτά στοιχεία δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη καταπόνηση.

Μέσω των γραμμικών αναλύσεων λυγισμού, και των μη γραμμικών αναλύσεων με ατέλειες που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι οι αρχικές ατέλειες δεν επηρέασαν τη συμπεριφορά του φορέα, καθώς οι λόγοι επάρκειας των μελών παρέμειναν στα ίδια επίπεδα με τους αντίστοιχους που προέκυψαν από τις αναλύσεις χωρίς ατέλειες.

Σε ό,τι αφορά την προσομοίωση των κόμβων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων, παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων που αναλύθηκαν: της προσομοίωσής τους μέσω απολύτως άκαμπτων στοιχείων και της προσομοίωσης μέσω επιφανειακών για τα ελάσματα, και ραβδωτών για τους κοχλίες, πεπερασμένων στοιχείων. Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα, για άνεμο κατά την εγκάρσια διεύθυνση ως κύριο κινητό φορτίο, παρατηρήθηκε ότι με την προσομοίωση των κόμβων μέσω πεπερασμένων στοιχείων, έγινε ανακατανομή στην ένταση του φορέα και αύξηση της καταπόνησης των μεταφορικών ψαλιδωτών στοιχείων στην περιοχή γύρω από τους κόμβους που προσομοιώθηκαν.

6.2 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Για να είναι πιο αξιόπιστα τα συμπεράσματα ως προς την επιρροή των χαλύβδινων κόμβων στη συμπεριφορά του στεγάστρου, προτείνεται η προσομοίωση περισσότερων ή όλων των κόμβων αυτού, και ο έλεγχός τους για διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτισης.

Επίσης, θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η αναζήτηση νέων μορφών (σχημάτων ή υλικών) κόμβου οι οποίες θα οδηγούσαν στη μείωση του βάρους τους, αλλά και των εκκεντροτήτων, με στόχο τη βελτίωση του στατικού συστήματος, και τη χρήση ακόμα πιο ελαφριών διατομών για τις ράβδους, δεδομένου ότι τα ψαλιδωτά στοιχεία και οι κόμβοι συμμετέχουν αθροιστικά κατά 70% στο συνολικό βάρος της κατασκευής (ψαλιδωτά στοιχεία 48%, χαλύβδινοι κόμβοι 22%).

Επιπλέον, προτείνεται η προσομοίωση της μεμβράνης επικάλυψης του φορέα, και η διερεύνηση του κατά πόσο θα μπορούσε να αντικαταστήσει το σύστημα δυσκαμψίας που προσομοιώθηκε στην παρούσα εργασία.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2013). «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [2] Γαντές Χ.Ι. (2015). «Μη Γραμμική Συμπεριφορά των Κατασκευών». Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα.
- [3] Ερμόπουλος Ι.Χ., (2005). «Ευρωκώδικας 1: Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών. Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [4] Μπανιωτόπουλος Χ.Κ., Νικολαΐδης Θ.Ν. (2016). «Φέρουσες Κατασκευές Αλουμινίου. Αρχές Σχεδιασμού και Παραδείγματα στο Πλαίσιο του Ευρωκώδικα 9». Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα.
- [5] ADINA System 9.0, Release Notes (2015). ADINA R&D, Watertown, USA.
- [6] De Temmerman N. (2007). "Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications". PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussel.
- [7] DIN 6914 (1989). "High – strength hexagon head bolts with large widths across flats for structural steel bolting".
- [8] DIN 6915 (1989). "High – strength hexagon nuts with large widths across flats for structural steel bolting".
- [9] DIN 6916 (1989). "Round washers for high – strength structural steel bolting".
- [10] EN 1990 (2002). "Eurocode - Basis of structural design". European Committee for Standardization.
- [11] EN 1991 (2002). "Eurocode 1 - Actions on structures". European Committee for Standardization.
- [12] prEN 1993 (2022). "Eurocode 3 – Design of steel structures". European Committee for Standardization.
- [13] prEN 1999 (2021). "Eurocode 9 – Design of aluminium structures". European Committee for Standardization.
- [14] EN 755 (1998). Aluminium and aluminium alloys – Extruded rod/bar, tube and profiles. Part 7: Seamless tubes, tolerances on dimensions and form". European Committee for

Standardization.

- [15] Escrig F. (2012). "Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil". Universidad De Sevilla, Sevilla.
- [16] European Aluminium (2020). "Design of aluminium structures: Introduction to Eurocode 9 with worked examples", Brussels.
- [17] Gantes C.J. (2001). "Deployable Structures: Analysis and Design". WIT Press, Southampton, Boston.
- [18] <http://www.alpinter.com>
- [19] <https://www.fabritecstructures.com>
- [20] Jungjohanna H., Woodingtona W. (2016). "Ontario Celebration Zone pavilion: a large pneumatic structure". International Symposium on Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs, 507-515.
- [21] Koumar A. (2016). "Deployable Scissor Structures for Disaster Relief: Multi – Criteria Optimization and Design Adaptability". PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussel.
- [22] PFEIFER (2005). "Welcome at the Cable Structure Division at PFEIFER Seil – und Hebetechnik". <http://www.pfeifer.de>
- [23] Roekens J., Virgo V., Laet L.D., Craenenbroeck M.V., Puystiens S., Mollaert M. (2013). "A new type of sheltering for disaster affected sites: the Clever roof". Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, 1–7.
- [24] Roovers K. (2017). "Deployable Scissor Grids. Geometry and Kinematics". PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussel.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ — ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΩ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ MATLAB

Ο παρακάτω αλγόριθμος σχεδιάστηκε με στόχο τον υπολογισμό των συντεταγμένων όλων των σημείων του προσομοιώματος, σε πινακοποιημένη μορφή, προς διευκόλυνση της προσομοίωσης κατά τη μεταβολή παραμέτρων που αφορούν τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όσο και τις εκκεντρότητες που οφείλονται στις διαστάσεις των μελών της. Στο τέλος του υπολογισμού των συντεταγμένων, παράγεται σχετικό τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας σε μορφή διαγράμματος, για εποπτικούς λόγους.

Εξέλιξη αυτού του αλγορίθμου, αποτελεί μία σειρά εντολών, που αναπτύχθηκαν σε δεύτερη φάση, για τον υπολογισμό και την απόδοση παραμέτρων σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό ADINA. Οι εντολές αυτές δε συμπεριλαμβάνονται στα παρακάτω, για λόγους σύμπτυξης του περιεχομένου.

```
%-----ΑΡΧΗ
%-----ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ
ARCH=5; %Αριθμός τόξων
SLE=7; %Αριθμός SLE / τόξο
R=3; %Εσωτερική διάσταση ανοίγματος (m)
T=0.45; %Πάχος στεγάστρου (m)
t=0.13; %Απόσταση οπών στο έλασμα του κόμβου (m)
ep=0.048; %Εκκεντρότητα πολικών SLE (m)
et=0.032; %Εκκεντρότητα μεταφορικών SLE (m)
%-----ΚΑΤΑΜΕΤΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ
POLARSLE=SLE*ARCH;
TRANSLATIONALSLE=(SLE+1)*(ARCH-1);
POLARLINES=POLARSLE*4
TRANSLATIONALLINES=TRANSLATIONALSLE*4
```

```

LINES=POLARLINES+TRANSLATIONALLINES;
%-----ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΙΝΑΚΑ ΣΗΜΕΙΩΝ
PPO=POLARSLE*6           %Αριθμός σημείων πολικών SLE (άκρα και ενδιάμεσο σημείο)
PTR=TRANSLATIONALSLE*6   %Αριθμός σημείων μεταφορικών SLE (άκρα και ενδιάμεσο σημείο)
PJO=(SLE+1)*ARCH*2       %Αριθμός σημείων κόμβων (κ.β.)
POINTS=zeros((PPO+PTR+PJO),4); %Πίνακας σημείων (συντεταγμένες xyz)
POINTSRFI=zeros((PPO+PTR+PJO),3); %Πίνακας σημείων (συντεταγμένες R,φ)
for i=1:(PPO+PTR+PJO);   %Αριθμηση σημείων (συμπλήρωση 1ης στήλης πινάκων)
    POINTS(i,1)=i;
    POINTSRFI(i,1)=i;
endfor
%-----ΠΟΛΙΚΑ SLE: Συμπλήρωση στηλών R και φ
dfiint=atand(t/2/R);
dfiext=atand(t/2/(R+T));
for i=1:SLE;
    for j=1:ARCH;
        fi0=-90+(i-1)*180/SLE;
        fi1=-90+i*180/SLE;
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE,3)=fi1-dfiint;
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-5,3)=fi0+dfiint;
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-3,3)=fi1-dfiext;
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-2,3)=fi0+dfiext;
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-1,3)=0.5*(fi0+fi1);
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-4,3)=0.5*(fi0+fi1);
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE,2)=R/cosd(dfiint);
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-5,2)=R/cosd(dfiint);
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-3,2)=(R+T)/cosd(dfiext);
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-2,2)=(R+T)/cosd(dfiext);
        R3=(R+T)/cosd(dfiext);
        R6=R/cosd(dfiint);
        F6=fi1-dfiint;
        F1=fi0+dfiint;
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-1,2)=2*cosd(0.5*(F6-F1))*R3*R6/(R3+R6);
        POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*SLE-4,2)=2*cosd(0.5*(F6-F1))*R3*R6/(R3+R6);
    endfor
endfor
%-----ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΑ SLE: Συμπλήρωση στηλών R και φ
dfiint=atand(et/2/R);
dfiext=atand(et/2/(R+T));
dfimid=atand(et/2/(R+T/2));

```

```

for i=1:SLE+1;
  for j=1:ARCH-1;
    fi=-90+(i-1)*180/SLE;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO,3)=fi+dfiint;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-5,3)=fi-dfiint;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-3,3)=fi-dfiext;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-2,3)=fi+dfiext;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-1,3)=fi+dfimid;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-4,3)=fi-dfimid;
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO,2)=R/cosd(dfiint);
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-5,2)=R/cosd(dfiint);
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-3,2)=(R+T)/cosd(dfiext);
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-2,2)=(R+T)/cosd(dfiext);
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-1,2)=(R+T/2)/cosd(dfimid);
    POINTSRFI(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-4,2)=(R+T/2)/cosd(dfimid);
  endfor
endfor
%-----K.B. KOMBΩN: Συμπλήρωση στηλών R, φ
for i=1:SLE+1;
  for j=1:ARCH;
    fi=-90+(i-1)*180/SLE;
    POINTSRFI(i+(j-1)*2*(SLE+1)+PPO+PTR,3)=fi;
    POINTSRFI(i+(j-1)*2*(SLE+1)+PPO+PTR+SLE+1,3)=fi;
    POINTSRFI(i+(j-1)*2*(SLE+1)+PPO+PTR,2)=R+T;
    POINTSRFI(i+(j-1)*2*(SLE+1)+PPO+PTR+SLE+1,2)=R;
  endfor
endfor
%-----ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ xyz: Συμπλήρωση στηλών x,z
for i=1:PPO+PTR+PJO;
  POINTS(i,2)=POINTSRFI(i,2)*sind(POINTSRFI(i,3));
  POINTS(i,4)=POINTSRFI(i,2)*cosd(POINTSRFI(i,3));
endfor
%-----ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ xyz: Συμπλήρωση στήλης y
DX=POINTS(3,2)-POINTS(1,2);
DZ=POINTS(3,4)-POINTS(1,4);
L=sqrt(DX^2+DZ^2)
dy=t+sqrt(L^2-T^2)
for i=1:SLE;      %Πολικά SLE
  for j=1:ARCH;
    POINTS(6*i+6*(j-1)*SLE,3)=(j-1)*dy-ep/2;
  endfor
endfor

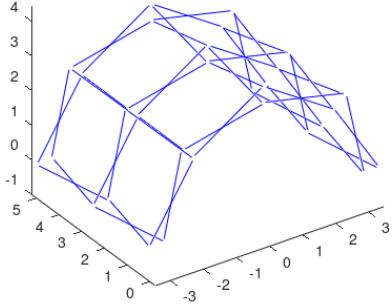
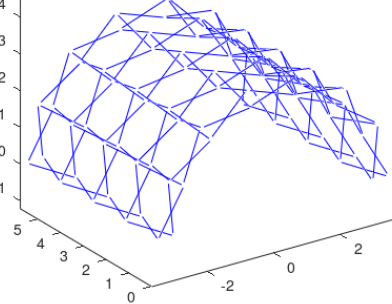
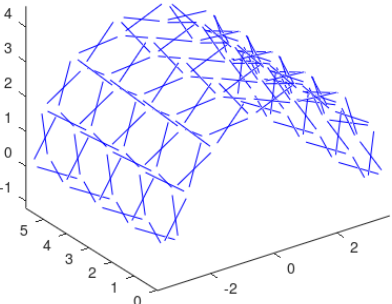
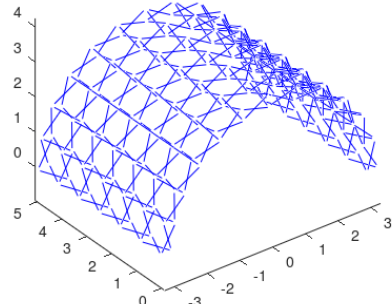
```

```

POINTS(6*i+6*(j-1)*SLE-5,3)=(j-1)*dy+ep/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*SLE-3,3)=(j-1)*dy+ep/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*SLE-2,3)=(j-1)*dy-ep/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*SLE-1,3)=(j-1)*dy-ep/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*SLE-4,3)=(j-1)*dy+ep/2;
endfor
endfor
for i=1:SLE+1;   %Μεταφορικά SLE
for j=1:ARCH-1;
POINTS(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO,3)=(j-1)*dy+dy-t/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-5,3)=(j-1)*dy+t/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-3,3)=(j-1)*dy+dy-t/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-2,3)=(j-1)*dy+t/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-1,3)=(j-1)*dy+dy/2;
POINTS(6*i+6*(j-1)*(SLE+1)+PPO-4,3)=(j-1)*dy+dy/2;
endfor
endfor
for i=1:SLE+1;   %Κόμβοι
for j=1:ARCH;
POINTS(i+(j-1)*2*(SLE+1)+PPO+PTR,3)=(j-1)*dy;
POINTS(i+(j-1)*2*(SLE+1)+PPO+PTR+SLE+1,3)=(j-1)*dy;
endfor
endfor
%-----ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
for i=1:3:PPO+PTR;
A=[POINTS(i,2) POINTS(i+2,2)];
B=[POINTS(i,3) POINTS(i+2,3)];
C=[POINTS(i,4) POINTS(i+2,4)];
hold on
plot3(A,B,C,'b')
axis equal
endfor
%-----ΤΕΛΟΣ

```

Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζονται ενδεικτικές μορφές του στεγάστρου, για διάφορες αρχικές παραμέτρους:

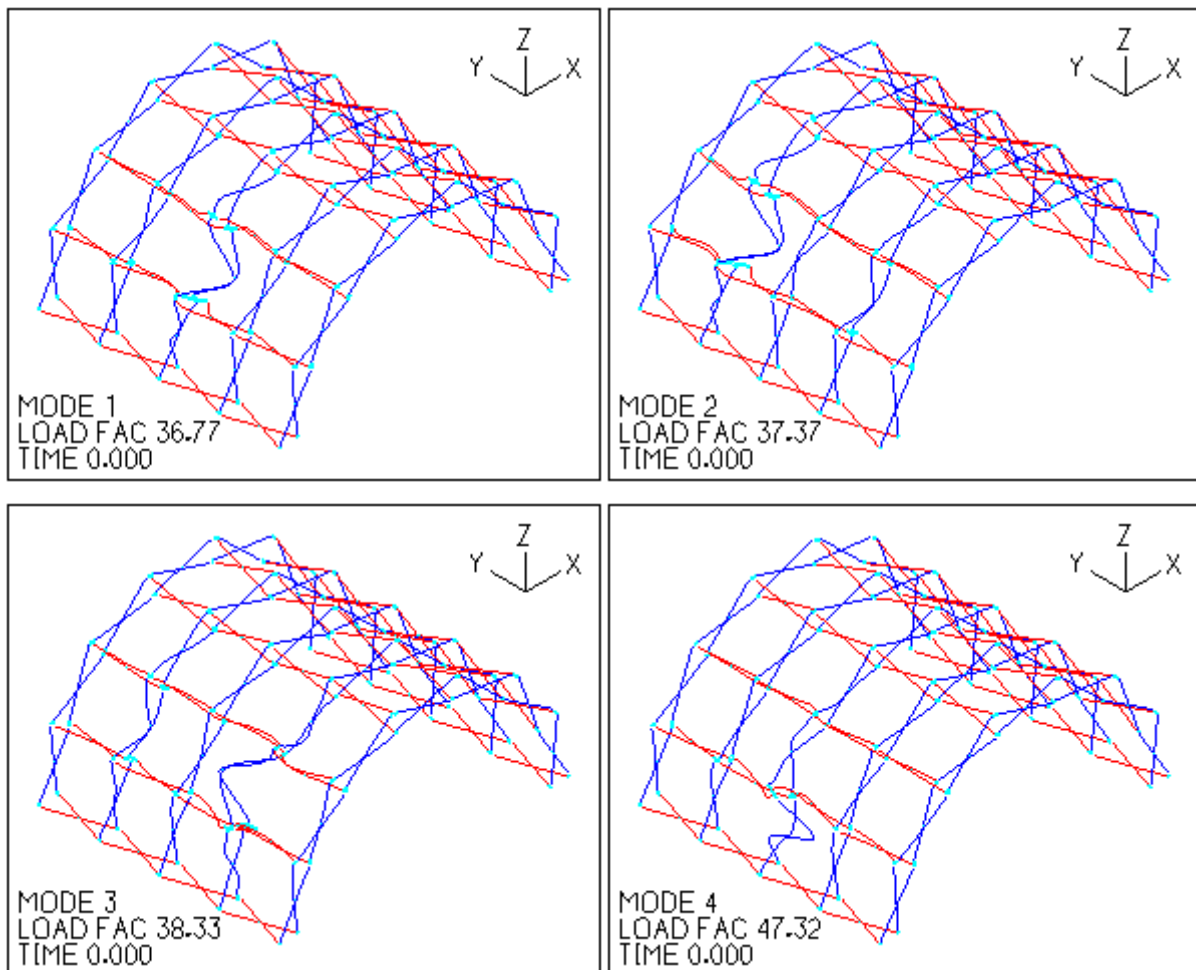
	<p>ARCH=3; SLE=5; R=3; T=0.45; t=0.13; ep=0.048; et=0.032; L=1.92</p>
	<p>ARCH=5; SLE=7; R=3; T=0.45; t=0.13; ep=0.048; et=0.032; L=1.38</p>
	<p>ARCH=5; SLE=7; R=3; T=0.45; t=0.30; ep=0.048; et=0.032; L=1.22</p>
	<p>ARCH=7; SLE=12; R=3; T=0.30; t=0.13; ep=0.048; et=0.032; L=0.75</p>

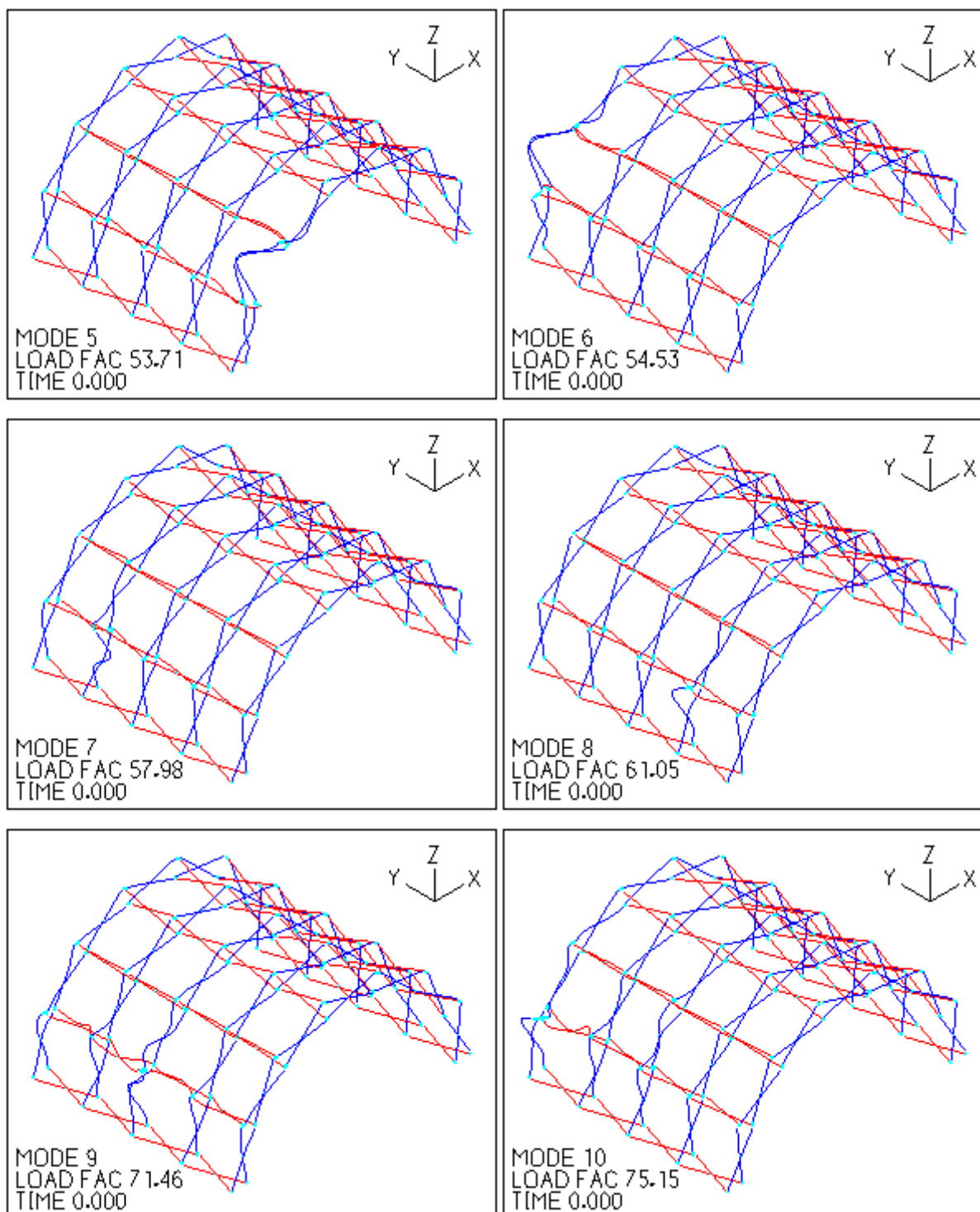
Σχήμα Α-1: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, για διάφορες αρχικές παραμέτρους

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ULS_LC3: Άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι ιδιομορφές λυγισμού που υπολογίστηκαν κατά τις γραμμικές αναλύσεις λυγισμού (LBA), για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3: Άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση.

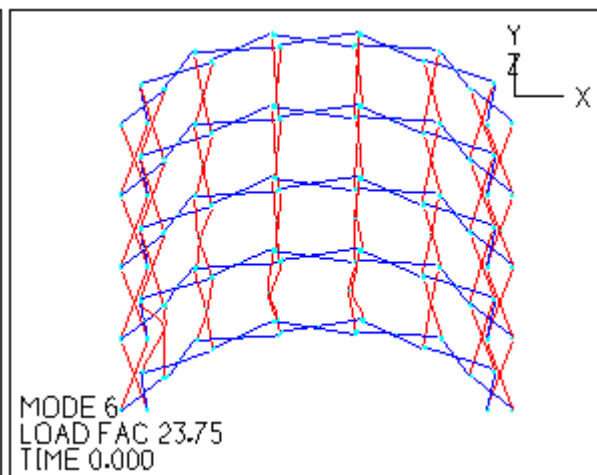
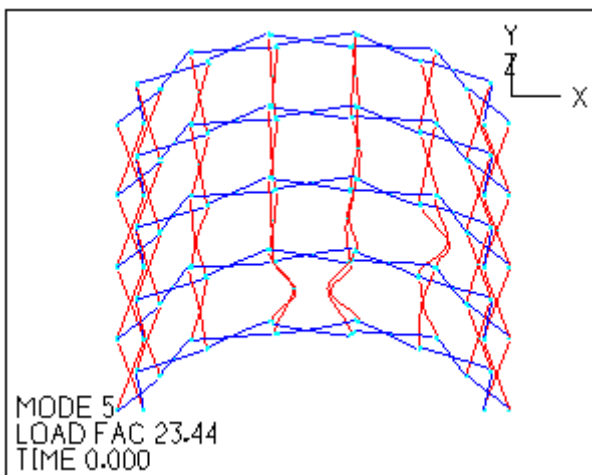
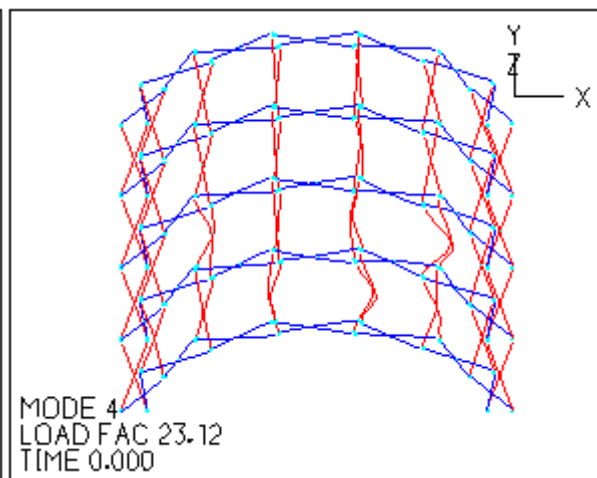
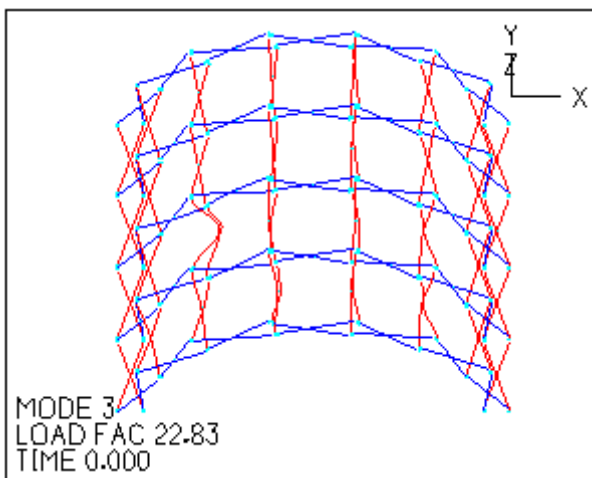
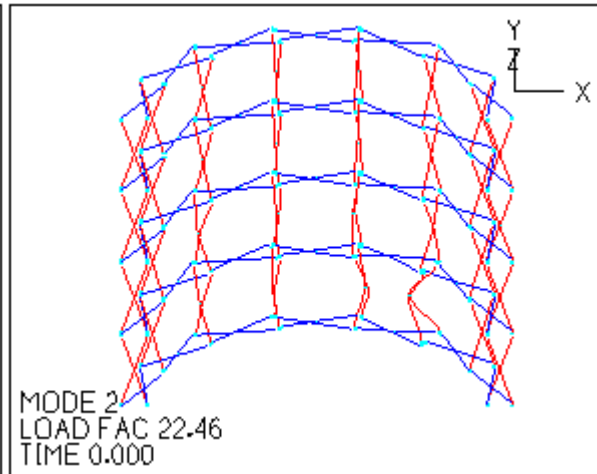
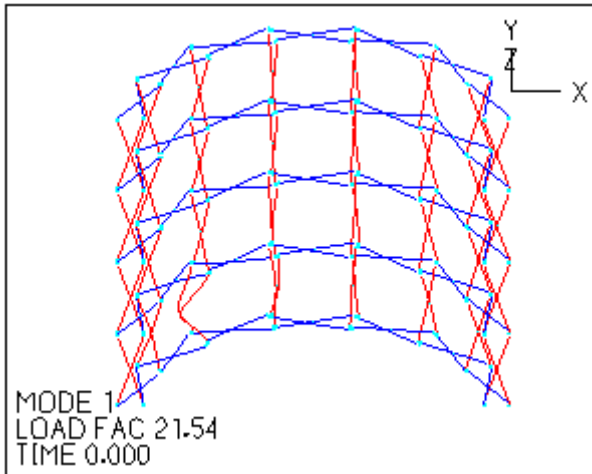


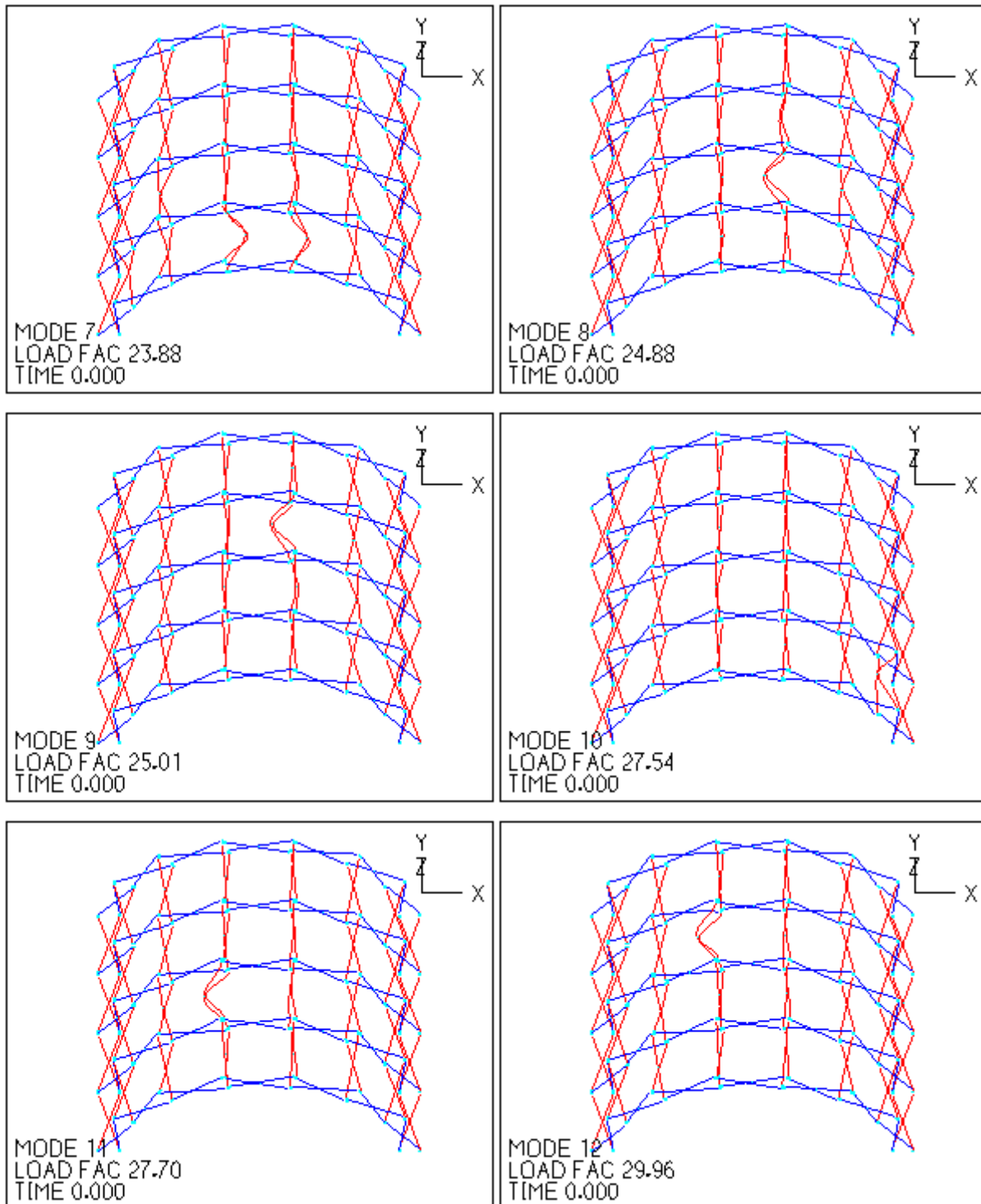


Σχήμα Β-1: Ιδιομορφές λυγισμού για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC3: Άνεμος κατά την εγκάρσια διεύθυνση

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ULS_LC6: Άνεμος κατά τη διαμήκη διεύθυνση

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι ιδιομορφές λυγισμού που υπολογίστηκαν κατά τις γραμμικές αναλύσεις λυγισμού (LBA), για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC6: Άνεμος κατά τη διαμήκη διεύθυνση.





Σχήμα Β-2: Ιδιομορφές λυγισμού για το συνδυασμό φόρτισης ULS_LC6: Άνεμος κατά τη διαμήκη διεύθυνση

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ

Παράλληλα με το αριθμητικό μοντέλο του στεγαστρου, δημιουργήθηκε ένα φυσικό μοντέλο, σε κλίμακα 1:5. Η υλοποίηση του φυσικού μοντέλου ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του, λύθηκαν σημαντικά ζητήματα σε ό,τι αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, αλλά και στη διαμόρφωση των συνδέσεων, τόσο των κόμβων, όσο και των σημείων περιστροφής των ψαλιδωτών στοιχείων. Επιπλέον, έγινε έλεγχος της λειτουργίας του φορέα κατά την αναδίπλωση, και σύγκριση της γεωμετρίας του στις δύο φάσεις - μορφές: την ανοικτή και την κλειστή (Εικόνα Γ-1).

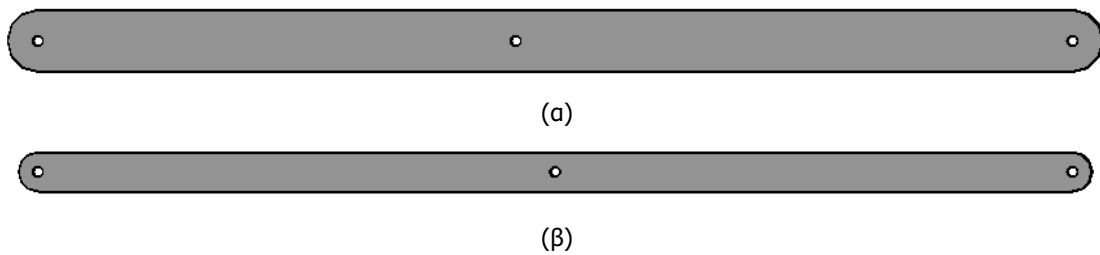


Εικόνα Γ-1: Ανοικτή και κλειστή μορφή φυσικού μοντέλου

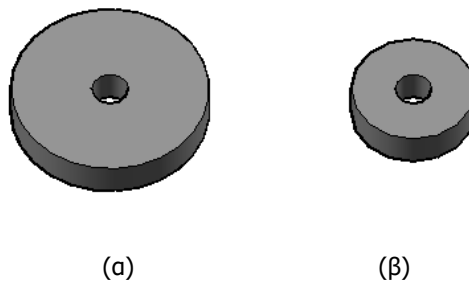
Για την κατασκευή των ψαλιδωτών στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από ξύλο, οι οποίες σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον CAD, για κοπή σε CNC Router. Η κοπή των ράβδων έγινε σε φύλλα κόντρα πλακέ, πάχους 9mm για τα πολικά, και 6mm για τα μεταφορικά ψαλιδωτά στοιχεία. Στο Σχήμα Γ-1, παρουσιάζεται σκαριφηματικά το σχέδιο κοπής για τις ξύλινες ράβδους.

Η υλοποίηση όλων των συνδέσεων, έγινε με χρήση κοχλιών M3. Στη σύνδεση για την υλοποίηση του σημείου περιστροφής των ψαλιδωτών στοιχείων, έγινε παρεμβολή μίας ροδέλας μεταξύ των ράβδων, πάχους 3mm, αντίστοιχου με αυτό των κόμβων. Η γεωμετρία των ροδελών σχεδιάστηκε σε τρισδιάστατο περιβάλλον CAD (Σχήμα Γ-2), και η κατασκευή τους έγινε μέσω εκτύπωσης σε 3D

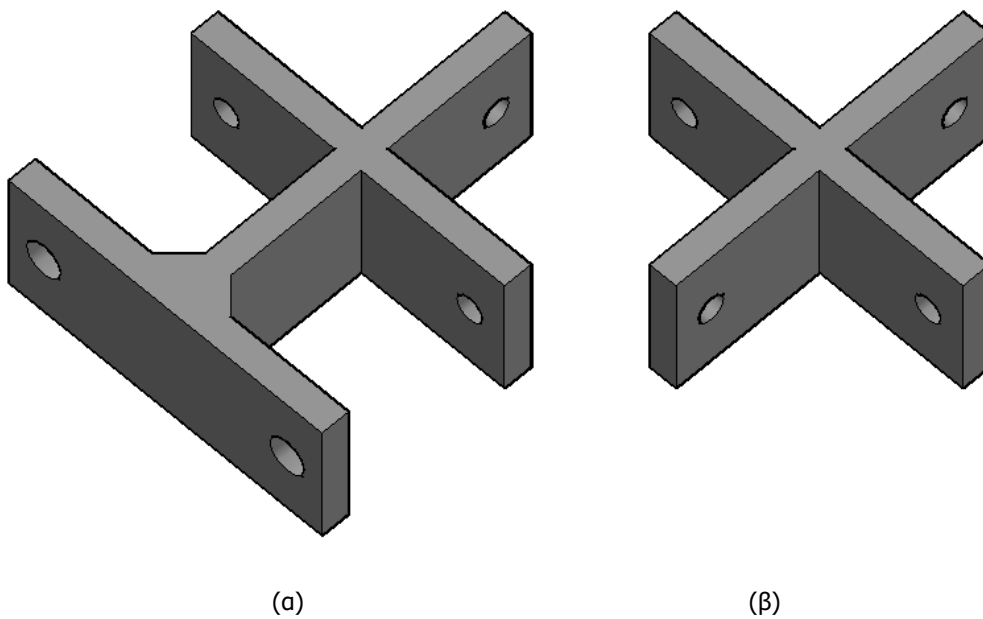
Printer, από βιοπλαστικό PLA. Με την αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε και η κατασκευή των κόμβων σύνδεσης των ψαλιδωτών στοιχείων (Σχήμα Γ-3).



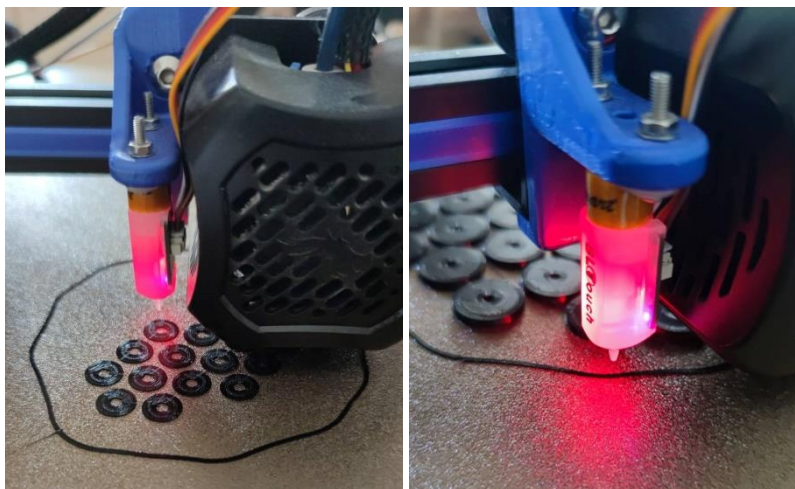
Σχήμα Γ-1: Σχέδια κοπής ράβδων πολικών (α) και μεταφορικών (β) ψαλιδωτών στοιχείων



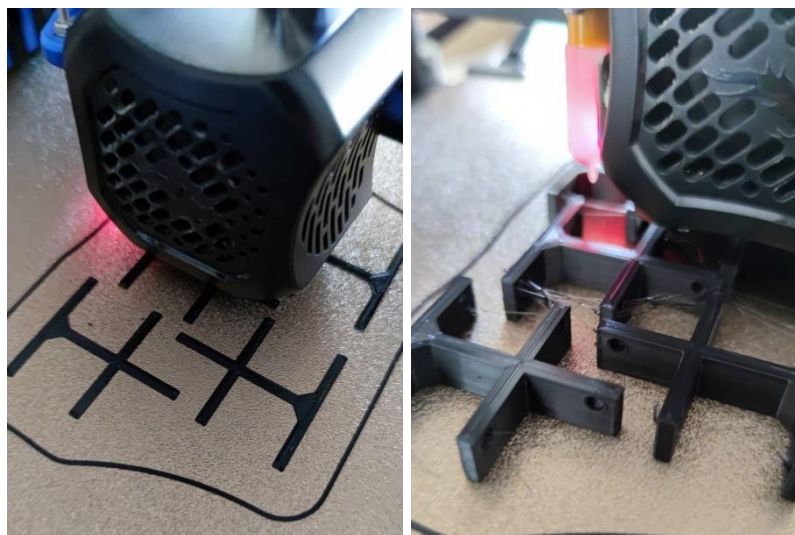
Σχήμα Γ-2: Τρισδιάστατα μοντέλα για την εκτύπωση των ροδελών ροδέλες μεταφορικών SLE (α) και πολικών SLE (β)



Σχήμα Γ-3: Τρισδιάστατα μοντέλα για την εκτύπωση των κόμβων κόμβοι θεμελίωσης (α), εσωτερικοί κόμβοι (β)



Εικόνα Γ-2: Εκτύπωση ροδελών



Εικόνα Γ-3: Εκτύπωση διαμορφωμένων κόμβων θεμελίωσης



Εικόνα Γ-4: Άποψη των συνδέσεων μεταξύ των ψαλιδωτών στοιχείων