



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών»

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΚΑΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ



Μεταπτυχιακή Εργασία
Σοφία Κορλού

ΕΜΚ ΔΕ 2017/11

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών»

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΚΑΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ



Μεταπτυχιακή Εργασία
Σοφία Κορλού

ΕΜΚ ΔΕ 2017/11

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Copyright © Σοφία Κορλού, 2017
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. 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 τη συγγραφέα.

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

Copyright © Sofia Korlou, 2017
All Rights Reserved

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

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

Σοφία Κορλού (2017)

Βασικές αρχές μηχανικής συμπεριφοράς και παραδείγματα εφαρμογής
δομικών στοιχείων από γυαλί και αλουμίνιο
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2017/11
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Sofia Korlou (2017)

Master Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2017/11
Principles of mechanical behavior and applications
of glass and aluminium structural elements
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

*Στους γονείς μου,
Άσπα και Κώστα*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας κ. Χάρη Γαντέ, η άρτια επιστημονική κατάρτιση και η μεθοδικότητα του οποίου υπήρξαν καθοριστικές για τη διεξαγωγή έρευνας, την αντιμετώπιση δυσκολιών και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε κάθε στάδιο εκπόνησης της μελέτης. Η ουσιαστική καθοδήγηση σε συνδυασμό με τα περιθώρια ανάληψης πρωτοβουλιών που αφήνει στον φοιτητή, το ειλικρινές ενδιαφέρον του, η αμεσότητα και η διακριτικότητα του στον τρόπο επισήμανσης λαθών και παραλείψεων, διαμόρφωσαν τις πιο ευνοϊκές συνθήκες για μια εποικοδομητική συνεργασία. Του είμαι ευγνώμων για την ενθάρρυνση, την επιμονή και τον συνολικό χρόνο που διέθεσε στο συγκεκριμένο εγχείρημα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στον υποψήφιο διδάκτορα Ηλία Θανάσουλα για την πολύτιμη βοήθειά του σχετικά με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA και τον χρόνο που διέθεσε για την επίλυση αποριών και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων. Οι εύστοχες υποδείξεις και οι αποτελεσματικές συμβουλές του διευκόλυναν σημαντικά την περάτωση αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.

Ευχαριστώ ακόμη τον Κοσμά Μουπαγιτσόγλου για τη βοήθειά του, την προθυμία του και τις χρήσιμες παρεμβάσεις του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας μελέτης. Η άμεση ανταπόκριση σε οτιδήποτε χρειάστηκα και το πολύτιμο υλικό που μου παρείχε επέτρεψαν την καλύτερη κατανόηση και εμβάθυνση στο αντικείμενο της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να απευθύνω στους φίλους μου για την ακούραστη συμπαράσταση και φιλία τους όλα αυτά τα χρόνια. Για την παρότρυνση, την ενθάρρυνση και την πίστη τους σε εμένα, τις στιγμές, τις αγωνίες και τα όνειρα που έχουμε μοιραστεί. Για την ανοχή και την κατανόηση που επέδειξαν στο δύσκολο διάστημα εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, με την ελπίδα πως στο μέλλον θα επανορθώσω για όλες εκείνες τις φορές που δεν τους αφιέρωσα τον χρόνο που θα ήθελα.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου και τον αδερφό μου, καθώς με την αγάπη τους, την υπομονή τους και τη διαχρονική συμπαράστασή τους έκαναν τις δύσκολες στιγμές να μοιάζουν ευκολότερες. Ιδιαίτερα θα ήθελα να αναφερθώ στους γονείς μου, γιατί είναι οι άνθρωποι που πρώτοι με έφεραν σε επαφή με τον κόσμο της μάθησης, με δίδαξαν να αγαπώ τη γνώση και μου προέβαλαν την αξία της προσπάθειας. Και έκτοτε, με τη σταθερή πίστη τους στις δυνατότητές μου, την ηθική στήριξη των επιλογών μου και την ουσιαστική παρουσία τους στις σημαντικές για μένα στιγμές, μου παρέχουν όλα τα ψυχικά εφόδια για να συνεχίσω να προσπαθώ.

Σοφία Κορλού,
Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2017/11

Βασικές αρχές μηχανικής συμπεριφοράς και παραδείγματα εφαρμογής δομικών στοιχείων από γυαλί και αλουμίνιο

Σοφία Κορλού

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Οκτώβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αυξανόμενη χρήση του γυαλιού ως δομικού υλικού, με τα προϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία του να βρίσκουν εφαρμογή ως φέροντα στοιχεία σε πατώματα, οροφές, στέγαστρα και προσόψεις. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην πολυστρωματική διάταξη φύλλων γυαλιού και διερευνά την επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της ενδιάμεσης στρώσης στην απόκριση του φορέα. Έχοντας ως αναφορά δύο συνήθη συστήματα γυάλινης πρόσοψης, της Δομικής Σιλικόνης 4 πλευρών και της Μετωπικής Σύνδεσης Υαλοπινάκων, περιλαμβάνει αρχικά τον σχεδιασμό και έλεγχο σε ΟΚΑ και ΟΚΛ ενός πολυστρωματικού υαλοπίνακα για την περίπτωση εγκάρσιας φόρτισης. Το πρώτο σύστημα, της Δομικής Σιλικόνης, αποτελείται από κατακόρυφους ορθοστάτες και οριζόντιες τραβέρσες αλουμινίου που παρέχουν περιμετρική στήριξη στο γυαλί. Η συγκράτηση των πάνελ στον μεταλλικό σκελετό επιτυγχάνεται μέσω πιστοποιημένης φέρουσας σιλικόνης δύο συστατικών. Το δεύτερο σύστημα, της Μετωπικής Σύνδεσης, αφορά τον συμβατικό τρόπο στερέωσης των υαλοπινάκων με εγκιβωτισμό της βάσης και κεφαλής τους σε προφίλ ανοξείδωτου χάλυβα διατομής U. Οι αρμοί μεταξύ διαδοχικών υαλοπινάκων σφραγίζονται με σιλικονούχα κόλλα, η οποία επισημαίνεται πως σε αυτήν την περίπτωση εξυπηρετεί αποκλειστικά σκοπούς στεγανοποίησης και δεν μπορεί να θεωρηθεί πως συμβάλλει στη στήριξη της διάταξης.

Ο αριθμός και το πάχος των φύλλων γυαλιού καθορίζονται για τη διατομή του φορέα κάθε συστήματος από μια διαδικασία προδιαστασιολόγησης, ενώ η επάρκειά τους ελέγχεται στη συνέχεια μέσα από κατάλληλες αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Μελετάται η επίδραση της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων μεγεθών και την κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια του υαλοπίνακα και αξιολογείται η προσέγγιση του ισοδύναμου πάχους ως εργαλείο σχεδιασμού για την πρόβλεψη μέγιστων τάσεων και μετατοπίσεων. Στην περίπτωση του πλαισιωτού συστήματος ο σχεδιασμός επεκτείνεται και στον προσδιορισμό των απαιτούμενων διατομών για τα μέλη αλουμινίου κατά τις διατάξεις του EN 1999-1-1, ενώ για το αμφιέριστο σύστημα προσομοιώνονται οι λεπτομέρειες στήριξης στα δύο άκρα του πάνελ και στη συνέχεια επιδιώκεται η απλοποίηση του μοντέλου μέσω της χρήσης ελατηρίων και δέσμευσης των κατάλληλων βαθμών ελευθερίας.

Οι σύγχρονες εφαρμογές φέρουσας υάλωσης εμπεριέχουν συχνά την αξιοποίηση του γυαλιού και ως φέροντος τοιχώματος, το οποίο συνεισφέρει στην οριζόντια παγίωση του φορέα και αντικαθιστά τους συμβατικούς συνδέσμους δυσκαμψίας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη λυγηρότητα των στοιχείων γυαλιού και την επακόλουθη ευαισθησία τους σε φαινόμενα αστάθειας, η εργασία μελετά επιπλέον τη συμπεριφορά του ίδιου υαλοπίνακα σε διατμητικό λυγισμό στα πλαίσια των δύο συστημάτων πρόσοψης. Η επιρροή στην απόκριση του φορέα της διατμητικής σύνδεσης που εξασφαλίζει η ενδιάμεση στρώση, του πάχους της διατομής, καθώς και του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνει κάθε σύστημα τη στερέωση του υαλοπίνακα στον μεταλλικό σκελετό, αποτελεί βασικό πυρήνα της μελέτης και διερευνάται με τη διεξαγωγή γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Κρίσιμα φορτία λυγισμού δίνουν μια πρώτη εκτίμηση της αντοχής, ενώ στη συνέχεια δρόμοι ισορροπίας περιγράφουν με ακρίβεια τη μεταλυγισμική συμπεριφορά και αναδεικνύουν φαινόμενα γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Τέλος, οι υπολογιζόμενες οριακές αντοχές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε όρους μειωτικού συντελεστή χ και συγκρίνονται με προτεινόμενες καμπύλες λυγισμού, ώστε να ελεγχθεί η καταλληλότητα των κανονιστικών διατάξεων που βασίζονται στον Ευρωκώδικα 3 για τον σχεδιασμό των υαλοπινάκων.



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

MASTER THESIS
EMK ΔΕ 2017/11

Principles of mechanical behavior and applications of glass and aluminium structural elements

Sofia Korlou

Supervisor: Professor Charis Gantes
October 2017

ABSTRACT

In modern architecture and civil engineering structural glass becomes more and more popular. Various products based on float glass are nowadays used as load-bearing elements in applications ranging from floors and roofs to canopies and facades. The present thesis focuses on laminated glass and investigates the role that viscoelastic mechanical parameters of the interlayer play in determining the response of the whole structure. With regard to two common glass façade systems, four-sided structural silicone glazing and butt-joint glazing, it firstly includes the design of a laminated glass pane subjected to transverse loads in compliance with the requirements associated with ultimate and serviceability limit states. In structural silicone glazing, the glass is supported on all four edges by metal transoms and mullions. Retention to the metal members is accomplished with an appropriate structural silicone bond-joint. Butt-joint concerns a generally conventional approach to the head and sill glazing, using metal U profiles and wet or dry sealants. The vertical edges of adjacent glass lites are sealed with a silicone sealant. A key distinction is that in this case the sealant acts as a weather seal only and, absent the interior supporting mullion, cannot be considered to be structural.

The number and thickness of glass sheets forming the cross-section of the pane of each system are defined through a preliminary design procedure, while their adequacy is then checked by numerical analyses realized with the finite element program ADINA. Values derived from the finite element method are compared with those predicted using the effective thickness approach, so as to verify if the methodology can be used as a design tool. Further analyses also examine the effect of geometric non linearity on the magnitude of the stresses and displacements. In the case of the framed system, the design is extended to the determination of the optimal cross-sections of mullions and transoms according to EN 1999-1-1. In the case of the butt-joint system, two numerical models are created. The first one elaborately simulates the rebates at each end of the pane, while the second is a more simplified one that mimics the whole structure behavior with the aid of springs and appropriate boundary conditions.

Glass panes are also increasingly being used in modern buildings as shear walls, able to ensure stabilization and stiffening contribution to entire structural systems and thus replace conventional bracings. Considering the high slenderness of glass elements and their subsequent susceptibility to

stability failure, the thesis examines next the shear buckling behavior of the same laminated glass pane based on the support conditions of the two glass façade systems. Linear and non-linear analyses investigate the influence of the composite action achieved by the adopted interlayer, the thickness of the pane cross-section, as well as the type of joint used for the retention of glass to the substructure on the response of the system. Critical buckling loads represent a first approach to upper strength limits, while following load paths take into account geometric non-linearity and demonstrate a post-buckling reserve caused by the membrane effect. Finally, the numerically derived ultimate strengths are presented in terms of shear reduction factor χ and compared with recommended buckling curves, so that the applicability of this Eurocode 3-based design method to glass panes can be assessed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2	ΤΟ ΓΥΑΛΙ	5
2.1	ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	5
2.2	ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	7
2.3	ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	8
2.4	ΘΡΑΥΣΗ	13
2.4.1	Στατική κόπωση	13
2.4.2	Μηχανική της θραύσης	13
2.4.3	Διάδοση ρωγμής	15
3	ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	17
3.1	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	17
3.2	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ	18
3.3	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΣΤΡΩΣΗ	19
3.3.1	Υλικά και ιδιότητες	19
3.3.2	Επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της μεμβράνης στην απόκριση του πολυστρωματικού γυαλιού	20
3.4	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΠΑΧΟΣ	26
3.4.1	Υπολογισμός ισοδύναμου πάχους κατά prEN-16612	26
3.4.2	Εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους	28
4	ΧΡΗΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΕ ΠΡΟΣΩΠΕΙΣ	35
4.1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΑΛΩΣΗΣ	35
4.1.1	Συστήματα με πλαίσιο ή υαλοπετάσματα (Curtain walls)	35
4.1.2	Συστήματα χωρίς πλαίσιο ή σημειακής ανάρτησης (Point-fixed systems)	39
4.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ (STRUCTURAL SILICONE GLAZING-SSG)	40
4.3	ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ (BUTT-JOINT GLAZING-BJG)	44
5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΩΠΗΣ	47
5.1	ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	47
5.1.1	Τύπος γυαλιού πολυστρωματικής διάταξης	47
5.1.2	Κράμα αλουμινίου φέροντος οργανισμού	48

5.2	ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΨΗΣ.....	50
5.2.1	Μόνιμα φορτία.....	50
5.2.2	Μεταβλητά φορτία	50
5.2.3	Συνδυασμοί δράσεων	53
5.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	56
5.3.1	Προδιαστασιολόγηση συστήματος δομικής σιλικόνης.....	56
5.3.2	Προδιαστασιολόγηση συστήματος μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων.....	60
6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΨΗΣ.....	63
6.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ.....	63
6.1.1	Έλεγχος επάρκειας υαλοπίνακα	63
6.1.2	Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς υαλοπίνακα	68
6.1.3	Έλεγχος επάρκειας φέροντος οργανισμού	70
6.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	89
6.2.1	Αναλυτικό προσομοίωμα.....	89
6.2.2	Απλοποιημένο προσομοίωμα	92
7	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ	97
7.1	ΦΕΡΟΝΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ	97
7.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ.....	98
7.2.1	Διατμητικός λυγισμός	98
7.2.2	Υπολογισμός κρίσιμου φορτίου λυγισμού σύμφωνα με τη θεωρία πλακών	99
7.2.3	Υπολογισμός κρίσιμου φορτίου λυγισμού για πλάκα τύπου σάντουιτς	100
7.3	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ	102
7.4	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	106
7.5	ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ.....	111
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	119
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	125
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	129

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γυαλί αποτελούσε ανέκαθεν αγαπημένο υλικό των αρχιτεκτόνων χάρη κυρίως στο υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα που εξασφαλίζει η διαφάνειά του, αλλά και σε πλεονεκτήματα όπως το μικρό βάρος και το χαμηλό κόστος συντήρησης των γυάλινων κατασκευών. Η χρήση του ωστόσο ήταν μέχρι πρόσφατα περιορισμένη σε μη δομικά στοιχεία όπως βιτρίνες και παράθυρα. Η σύγχρονη τεχνική παρασκευής του επίπεδου γυαλιού (float glass), όπως την εισήγαγε το 1953 ο Alastair Pilkington, άνοιξε νέους ορίζοντες στην αξιοποίηση του υλικού και εκτόξευσε τη δημοτικότητά του στη βιομηχανία και την αρχιτεκτονική. Πλέον φύλλα επίπεδου γυαλιού διατίθενται στα ονομαστικά πάχη των 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 και 25 mm καθώς και σε πλήθος μορφών, χρωμάτων και διαστάσεων προσδίδοντας έτσι ευχέρεια στην αρχιτεκτονική σύνθεση. Αναφέρεται πως οι μέγιστες διαστάσεις ενός τυποποιημένου φύλλου ανέρχονται σε 3.21 m x 6.0 m, ενώ επιδέχονται αύξηση κατόπιν παραγγελίας. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την περαιτέρω επεξεργασία του βρίσκουν εφαρμογή ως φέροντα στοιχεία σε πατώματα, οροφές, στέγαστρα, προσόψεις.

Το γυαλί παρουσιάζει γραμμική ελαστική, ισότροπη συμπεριφορά και χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής. Οι τιμές αυτές ωστόσο στερούνται πρακτικής σημασίας, καθώς η αστοχία των στοιχείων γυαλιού σηματοδοτείται σε κάθε περίπτωση από την υπέρβαση της αντοχής τους σε εφελκυσμό. Ως ψαθυρό υλικό που δεν παρέχει τη δυνατότητα ανακατανομής της έντασης μέσω πλαστικοποίησης, το γυαλί είναι ιδιαίτερο ευαίσθητο στις υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων. Η εφελκυστική αντοχή επομένως δεν αποτελεί σταθερή ιδιότητα του υλικού, αλλά εξαρτάται από την κατάσταση των επιφανειακών στελειών και στην πράξη είναι πολύ μικρότερη από τη θεωρητική της τιμή. Παρουσιάζεται λοιπόν έντονη η ανάγκη προσέγγισης των κατασκευών από γυαλί με διαφορετικό τρόπο από αυτόν που έχει καθιερωθεί μέχρι στιγμής για τα "παραδοσιακά" δομικά υλικά και καθορισμού μιας διαδικασίας σχεδιασμού κατάλληλα προσαρμοσμένης στις ιδιαιτερότητες αυτού του ψαθυρού υλικού.

Τα στοιχεία γυαλιού χρησιμοποιούνται συχνά σε πολυστρωματική διάταξη, ενωμένα ανά δύο με μια μεμβράνη κάποιου θερμοπλαστικού υλικού, με στόχο τη μείωση του κινδύνου τραυματισμού μετά την υπέρβαση των ορίων θραύσης. Αναφέρεται πως τα θερμοπλαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά, δηλαδή μεταβολή των ιδιοτήτων τους με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά αυξημένης ασφάλειας και η γεωμετρική προσαρμοστικότητα των πολυστρωματικών υαλοπινάκων έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη ποικίλων συστημάτων γυάλινων προσόψεων, τα οποία προσφέρουν διάφορες επιλογές ως προς τον τρόπο στερέωσης των πάνελ. Ενταγμένο σε μια τέτοια διάταξη το γυαλί καλείται να μεταφέρει το ίδιο βάρος του και τις υπόλοιπες φορτίσεις που προβλέπει ο EN 1999-1 (άνεμος, επιβαλλόμενο φορτίο) στον φέροντα οργανισμό της πρόσοψης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις που οι υαλοπίνακες αξιοποιούνται ως φέροντα τοιχώματα, τα οποία συνεισφέρουν στην οριζόντια παγίωση του φορέα και αντικαθιστούν τους συμβατικούς συνδέσμους δυσκαμψίας. Πρόκειται για στοιχεία μεγάλης λυγηρότητας που υπόκεινται σε εντός επιπέδου διατμητικά φορτία, επομένως ο σχεδιασμός τους απαιτεί προσοχή, αφού παρουσιάζεται αυξημένος ο κίνδυνος εκδήλωσης φαινομένων αστάθειας.

Η παρούσα εργασία έχοντας ως αναφορά δύο συστήματα φέρουσας υάλωσης, της Δομικής Σιλικόνης 4 πλευρών και της Μετωπικής Σύνδεσης Υαλοπινάκων, μελετά μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων την απόκριση ενός πολυστρωματικού πάνελ, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως στοιχείο πρόσοψης και εν συνεχεία ως σύνδεσμος δυσκαμψίας. Στην πρώτη περίπτωση, η οποία αφορά την επιβολή εγκάρσιας φόρτισης, οι αναλύσεις εστιάζουν στην αποτίμηση της επίδρασης της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της μεμβράνης που συγκρατεί τα φύλλα γυαλιού, τον προσδιορισμό της κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων στα στρώματα της διάταξης, τον έλεγχο της αξιοπιστίας της προσέγγισης του ισοδύναμου πάχους και τη διερεύνηση της επιρροής φαινομένων γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Στη δεύτερη περίπτωση μελετάται η συμπεριφορά του υαλοπίνακα σε διατμητικό λυγισμό με κύρια παράμετρο τον βαθμό διατμητικής συνεργασίας των φύλλων γυαλιού, που εξασφαλίζει το πολυμερές και το πάχος της διατομής. Εξετάζεται επίσης η προοπτική προσδιορισμού της αντοχής σε λυγισμό μέσα από καμπύλες λυγισμού, με κατάλληλες προσαρμογές της διαδικασίας η οποία μέχρι στιγμής απευθύνεται σε χαλύβδινα μέλη.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται πως δεν υπάρχει κάποιο ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό φερόντων στοιχείων από γυαλί, παρά μόνο κάποια αποσπασματικά πρότυπα χωρών. Αρκετές από τις μεθοδολογίες αυτών των προτύπων ενσωματώνονται στην αναφορά του Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με τίτλο "Guidance for European Structural Design of Glass Components", η οποία χαράσσει τις κατευθυντήριες γραμμές για τον επερχόμενο Ευρωκώδικα που θα αφορά κατασκευές από γυαλί. Έχοντας ως βάση τις συγκεκριμένες μεθοδολογίες, η παρούσα μελέτη επιδιώκει, εν αναμονή του Ευρωκώδικα 10, μια πρώτη προσέγγιση της διαστασιολόγησης πολυστρωματικών υαλοπινάκων και της διασφάλισής τους έναντι εντός και εκτός επιπέδου φορτίσεων, μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων.

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Κεφάλαιο 2. Γίνεται μια αναφορά στις βασικές ιδιότητες του γυαλιού. Αναπτύσσεται η ιδέα της θερμικής κατεργασίας και παρουσιάζονται τα προϊόντα που προέρχονται από τις αντίστοιχες τεχνικές. Ακόμη, περιγράφονται οι τρόποι φόρτισης και διάδοσης μιας ρωγμής, οι οποίοι θα οδηγήσουν τελικά στην αστοχία του στοιχείου γυαλιού.

Κεφάλαιο 3. Μελετάται η συμπεριφορά της πολυστρωματικής διάταξης φύλλων γυαλιού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης που παρεμβάλλεται μεταξύ των φύλλων και τα συγκρατεί στη θέση τους ακόμα και μετά τη θραύση. Αναλύεται το περιεχόμενο της προσέγγισης του ισοδύναμου πάχους και παρατίθενται τρεις μέθοδοι για τον υπολογισμό του.

Κεφάλαιο 4. Περιγράφονται συνήθη συστήματα γυάλινων προσόψεων. Επισημαίνονται οι μεταξύ τους διαφορές και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καθενός. Η έμφαση δίνεται κυρίως στον τρόπο στερέωσης των υαλοπινάκων στην υποκείμενη κατασκευή με σχεδιαστικές λεπτομέρειες και αναφορά στις ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν στη στήριξη.

Κεφάλαιο 5. Περιλαμβάνει την προδιαστασιολόγηση των δύο συστημάτων πρόσοψης που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Προσδιορίζονται οι συνδυασμοί δράσεων σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας και εκτιμάται ο απαιτούμενος αριθμός και πάχος φύλλων γυαλιού για κάθε σύστημα σύμφωνα με τον περιορισμό τάσεων και βυθίσεων. Επιλέγονται επίσης οι κατάλληλες διατομές για τα μέλη αλουμινίου που συναντώνται στο σύστημα της δομικής σιλικόνης. Η επιλογή γίνεται ανάμεσα από τα προφίλ της σειράς E85 των συστημάτων αλουμινίου ETEM.

Κεφάλαιο 6. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν για τα επιμέρους τμήματα των υπό εξέταση συστημάτων πρόσοψης και ελέγχεται

η επάρκεια των διατομών που ανέδειξε η διαδικασία της προδιαστασιολόγησης. Διεξάγονται γραμμικές και μη γραμμικές παραμετρικές αναλύσεις ως προς το μέτρο διάτμησης της μεμβράνης με στόχο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της πολυστρωματικής διάταξη. Οι έλεγχοι αντοχής των διατομών και μελών αλουμινίου πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 9.

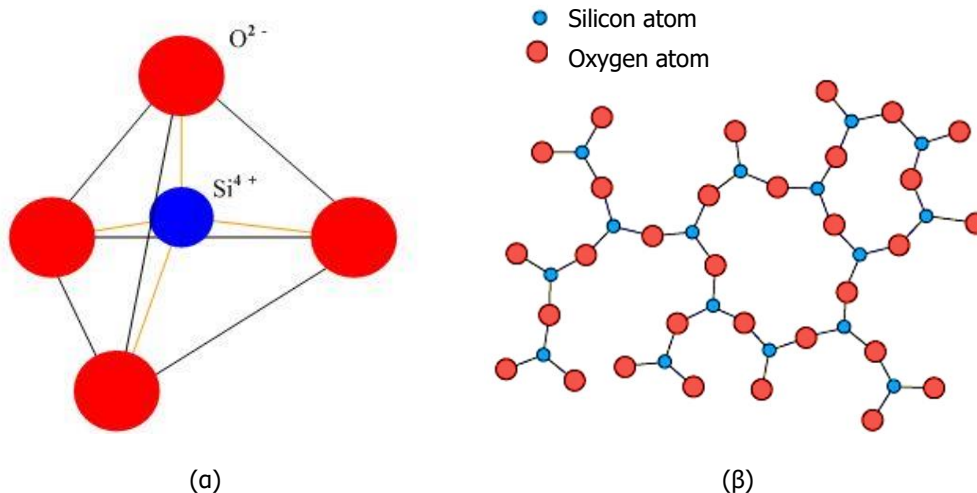
Κεφάλαιο 7. Τα δύο συστήματα πρόσοψης αξιοποιούνται ως φέροντα τοιχώματα και μελετάται η συμπεριφορά σε διατμητικό λυγισμό των πάνελ που διαμορφώθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Προσδιορίζονται και για τις δύο περιπτώσεις οι ιδιομορφές λυγισμού και οι δρόμοι ισορροπίας που προκύπτουν από μη γραμμικές αναλύσεις. Ακόμη, ελέγχεται η καταλληλότητα προτεινόμενης καμπύλης λυγισμού για τον σχεδιασμό του πολυστρωματικού γυαλιού.

Κεφάλαιο 8. Παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας.

2 ΤΟ ΓΥΑΛΙ

2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το γυαλί είναι ένα άμορφο, μη-κρυσταλλικό ελαστικό στερεό που έχει ως βασικό συστατικό την πυριτία SiO_2 . Τα μόρια που το αποτελούν δε διατάσσονται σε οργανωμένες δομές περιοδικά επαναλαμβανόμενες στον χώρο αλλά σε ακανόνιστους σχηματισμούς, οι οποίοι επιβάλλονται από τη δυνατότητα ελεύθερων περιστροφών που διέπει τους δεσμούς O-Si-O. Η διαπίστωση αυτή μπορεί να καταστεί σαφής με τη βοήθεια της Εικόνας 2.1. Η δομή της ένωσης SiO_2 χαρακτηρίζεται από τετραεδρική συμμετρία. Τα άτομα του οξυγόνου καταλαμβάνουν τις κορυφές κανονικού τετραέδρου, στο κέντρο του οποίου είναι τοποθετημένο το άτομο του πυριτίου. Επομένως κάθε άτομο οξυγόνου συμμετέχει σε δύο τέτοια τετράεδρα (SiO_4). Οι γωνίες που σχηματίζουν ανά δύο τα άτομα οξυγόνου με το άτομο πυριτίου σε ένα κανονικό δίκτυο είναι όλες ίσες προς 190.5° . Ωστόσο, παρατηρείται το φαινόμενο οι γωνίες αυτές να παραμορφώνονται και η σύνδεση δύο τετραέδρων να διακόπτεται με τυχαίο τρόπο. Υπάρχουν επομένως πρακτικά άπειρες εναλλακτικές διατάξεις των διάφορων ομάδων SiO_4 που συνθέτουν μία ποσότητα SiO_2 .



Εικόνα 2.1. (α) Πυριτικό τετράεδρο, (β) Σύνδεση των τετραέδρων SiO_4 σε ακανόνιστο πλέγμα

Η υαλώδης δομή λαμβάνεται με την ταχύτατη ψύξη τήγματος οξειδίων, κατά τη διάρκεια της οποίας το ιξώδες του υλικού αυξάνεται συνεχώς μέχρι τη στερεοποίηση, οπότε και αποκτά την τιμή των 10^{14} Pas περίπου. Ο γρήγορος ρυθμός της διαδικασίας ψύξης, οι υψηλές τιμές ιξώδους και οι ισχυροί δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ των τετραέδρων της πυριτίας δεν επιτρέπουν την έναρξη της κρυστάλλωσης. Οι συνεχείς τυχαίες μεταβολές που πραγματοποιούνται στη μάζα του ρευστού διακόπτονται απότομα και η

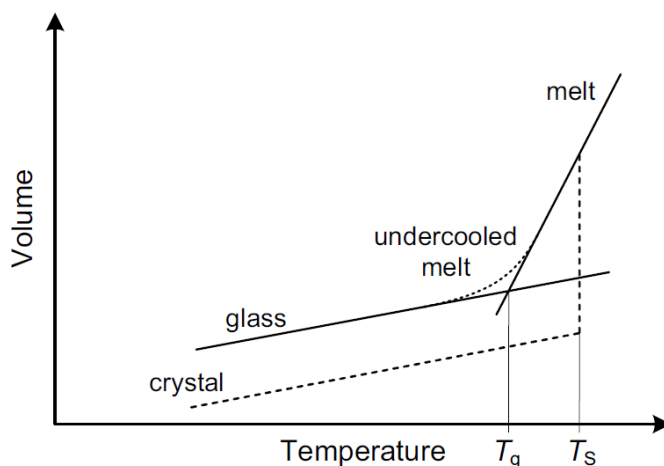
δομή του υλικού σταθεροποιείται στην άτακτη μορφή της τελευταίας χρονικής στιγμής που υφίστατο ως υγρό. Αυτή η ακανόνιστη διάταξη των ατόμων συνιστά τον λόγο που στο γυαλί συναντάται ψαθυρή μορφή αστοχίας. Υπό την επίδραση μιας εφελκυστικής τάσης παρατηρείται δυσκολία στην αναδιάρθρωση της δομής και δεν προσφέρεται η δυνατότητα πλαστικοποίησης, ώστε να επιτευχθεί ανακατανομή των τάσεων.

Ο πιο διαδεδομένος τύπος γυαλιού, που χρησιμοποιείται ευρύτατα τόσο στη βιομηχανία γυάλινων δοχείων (container glass) όσο και στην παραγωγή επίπεδου γυαλιού (flat glass) με στόχο την εφαρμογή του υλικού στην αρχιτεκτονική, είναι το κοινό γυαλί (Soda Lime Silica Glass-SLSG). Αποτελείται κυρίως από χαλαζιακή άμμο (SiO_2), οξειδίο του ασβεστίου (CaO) και οξειδίο του νατρίου-σόδα (Na_2O) στις αναλογίες που καταγράφονται στον Πίνακα 2.1 σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές. Η χαλαζιακή άμμος, που βρίσκεται στη μεγαλύτερη ποσότητα, αναλαμβάνει τον ρόλο της διαμόρφωσης της δομής του γυαλιού (former), όπως περιγράφηκε παραπάνω. Το συστατικό αυτό παρουσιάζει ένα εξαιρετικά υψηλό σημείο τήξης (γύρω στους 1710°C), το οποίο συνδυάζεται με μια υψηλή τιμή ιξώδους, γεγονός που καθιστά την επεξεργασία του δύσκολη. Με την προσθήκη συλλιπάσματος (flux), ενός δηλαδή εύτηκτου υλικού όπως είναι η σόδα, επιτυγχάνεται πτώση της θερμοκρασίας τήξης στους $1300\text{-}1600^\circ\text{C}$. Ταυτόχρονα ωστόσο προκαλείται αύξηση της υδατοδιαλυτότητας του γυαλιού. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση οξειδίου του ασβεστίου, το οποίο δικαιολογημένα παίρνει τον τίτλο του σταθεροποιητή (stabilizer). Σε μικρότερες ποσότητες προβλέπεται η προσθήκη διάφορων άλλων οξειδίων μετάλλων για λόγους απόδοσης χρωματισμών ή ιδιοτήτων όπως η αυξημένη διαύγεια και η ανθεκτικότητα.

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Περιεκτικότητα (%)
Χαλαζιακή άμμος	SiO_2	69-74
Οξειδίο του ασβεστίου	CaO	5-14
Οξειδίο του νατρίου	Na_2O	10-16
Μαγνησία	MgO	0-6
Οξειδίο του αργιλίου	Al_2O_3	0-3
Άλλα		0-5

Πίνακας 2.1. Χημική σύνθεση κοινού γυαλιού

Η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η στερεοποίηση ονομάζεται θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature, T_g) και δεν αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή, αλλά κυμαίνεται εντός ενός εύρους τιμών, το οποίο καθορίζεται από τη χημική σύνθεση (για το κοινό γυαλί τοποθετείται γύρω στους 530°C). Ο όρος υαλώδης μετάπτωση περιγράφει μια χαρακτηριστική θερμοδυναμική συμπεριφορά των άμορφων πολυμερών, τα οποία υπό αυξανόμενη θερμοκρασία μεταβαίνουν από μια άκαμπτη και ψαθυρή σε μια πιο εύκαμπτη και μηχανικά εύπλαστη κατάσταση. Η διαδικασία αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με την τήξη, η οποία αφορά υλικά με κρυσταλλική δομή. Η τήξη αναφέρεται ως θερμοδυναμική μετάβαση πρώτης τάξης, αφού προκαλεί ασυνέχεια της πρώτης παραγώγου της ελεύθερης ενέργειας Gibbs και επομένως συνοδεύεται από αιφνίδια μεταβολή του όγκου και της εντροπίας. Αντιθέτως, στην υαλώδη μετάπτωση, ιδιότητες όπως ο όγκος, η ενθαλπία και η εντροπία αλλάζουν βαθμιαία και πιο ομαλά, ενώ απότομη αλλαγή υφίστανται τα μεγέθη που προκύπτουν από τη δεύτερη παράγωγο της ελεύθερης ενέργειας Gibbs, όπως η θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής. Έτσι, η υαλώδης μετάπτωση χαρακτηρίζεται ως μια φαινομενική μετάβαση δεύτερης τάξης.



Εικόνα 2.2. Σύγκριση της μετάβασης από την υγρή στη στερεή κατάσταση μεταξύ γυαλιού και ενός κρυσταλλικού υλικού

Το γυαλί παρουσιάζει μεγάλη χημική αδράνεια, γεγονός που έρχεται να ενισχύσει τη δημοτικότητα του στη βιομηχανία και την αρχιτεκτονική. Δεν αντιδρά με υδατικά διαλύματα ή έλαια και λίπη και είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στα περισσότερα οξέα. Προσβάλλεται μόνο από το υδροφθόριο και σε υψηλές θερμοκρασίες και από το φωσφορικό οξύ. Έχει επίσης κάποια ευπάθεια σε βάσεις ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη σύνθεση του.

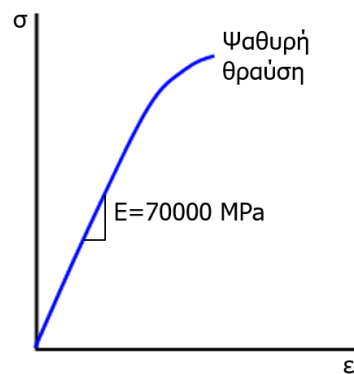
2.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες του κοινού γυαλιού συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2. Εκτός από αυτές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι οπτικές ιδιότητες, οι οποίες εξαρτώνται από το πάχος και τη χημική σύσταση του γυαλιού. Το γυαλί είναι διαπερατό από την υπέρυθη ακτινοβολία ($\lambda \approx 290\text{-}380\text{nm}$), το ορατό φως ($\lambda \approx 380\text{-}780\text{nm}$) και την υπέρυθη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ($\lambda \approx 780\text{-}2500\text{nm}$), αλλά αδιαπέραστο από την υπέρυθη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ($\lambda > 2500\text{nm}$) λόγω της απορρόφησής της από τους δεσμούς Si-O. Έτσι η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το γυαλί, εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου και μέρος της απορροφάται από τοίχους, πατώματα και αντικείμενα. Αυτά με τη σειρά τους εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η οποία εγκλωβίζεται στον χώρο προκαλώντας σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή περιγράφει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ανάγκη ελέγχου της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας ικανοποιείται με την εφαρμογή πολύ λεπτής, αόρατης επίστρωσης μεταλλικών οξειδίων, η οποία ανακλά μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Πυκνότητα	ρ	kg/m^3	2500
Μέτρο ελαστικότητας	E	MPa	70000
Λόγος Poisson	ν	-	0.22
Συντελεστής γραμμικής διαστολής	α_T	10^{-6}K^{-1}	9
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	λ	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	1

Πίνακας 2.2. Φυσικές ιδιότητες κοινού γυαλιού

Το γυαλί έχει ελαστική, ισότροπη συμπεριφορά και παρουσιάζει ψαθυρή θραύση (Εικόνα 2.3). Δεν πλαστικοποιείται, επομένως οι υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων δεν απομειώνονται μέσω ανακατανομής της έντασης, όπως συμβαίνει με άλλα δομικά υλικά (π.χ. χάλυβας). Η εφελκυστική του αντοχή επηρεάζεται από αυτές τις συγκεντρώσεις τάσεων και για αυτόν τον λόγο απομειώνεται σημαντικά με την ύπαρξη επιφανειακών ατελειών. Οι ατέλειες αυτές μπορεί να έχουν δημιουργηθεί κατά το στάδιο παραγωγής, επεξεργασίας ή μεταφοράς του γυαλιού και συνήθως δεν είναι ορατές διά γυμνού οφθαλμού. Έτσι, ενώ θεωρητικά η εφελκυστική αντοχή του γυαλιού μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 8000 MPa, στην πράξη διαπιστώνονται πολύ μικρότερες τιμές που κυμαίνονται μεταξύ των 30 MPa και 80 MPa.

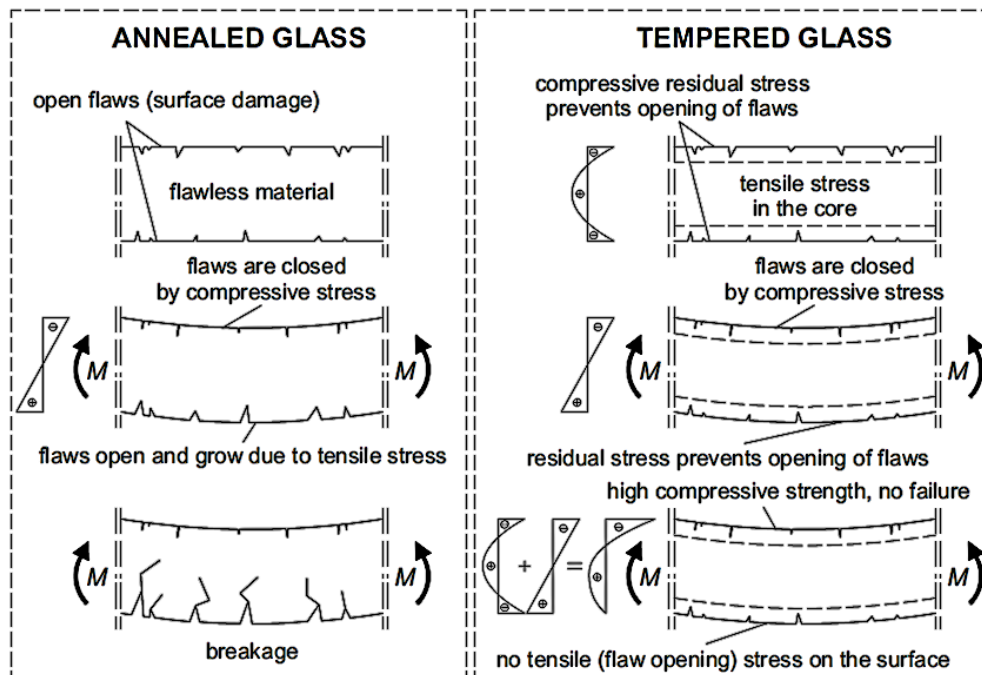


Εικόνα 2.3. Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων γυαλιού

Το γυαλί θα αστοχήσει όταν η ένταση στην αιχμή της ατέλειας φτάσει την κρίσιμη τιμή της. Επισημαίνεται λοιπόν πως η εφελκυστική αντοχή δεν αποτελεί σταθερή ιδιότητα του υλικού, αλλά εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων και ιδιαίτερα την κατάσταση της επιφάνειας (πλήθος και βάθος ατελειών), το μέγεθος του στοιχείου γυαλιού, την ιστορία φόρτισης (ένταση και διάρκεια), τις παραμένουσες τάσεις και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αύξηση της τιμής του φορτίου, της διάρκειας φόρτισης και του βάθους της αρχικής ατέλειας θα προκαλέσει μείωση της αντοχής. Όπως είναι λογικό, η αντοχή σε θλίψη είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της αντίστοιχης σε εφελκυσμό, αφού οι ρωγμές επεκτείνονται και διαδίδονται υπό καθεστώς εφελκυσμού και όχι θλίψης. Ωστόσο, οι υψηλές αυτές τιμές δεν είναι πρακτικά αξιοποιήσιμες, αφού σε όλες τις περιπτώσεις η εφελκυστική αντοχή ενός στοιχείου γυαλιού θα εξαντλείται πολύ πριν προλάβει να φορτιστεί μέχρι τη θλιπτική του αντοχή.

2.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, περαιτέρω ανάπτυξη των υπάρχουσών ατελειών προκαλείται με την επίδραση ικανής εφελκυστικής δύναμης. Η ιδέα της θερμικής κατεργασίας του γυαλιού έγκειται στη δημιουργία ενός ευνοϊκού πεδίου παραμενουσών τάσεων με την εισαγωγή εφελκυσμού στον πυρήνα, όπου δε συναντώνται ατέλειες και θλίψης στις περιοχές κοντά στις επιφάνειες. Αυτή η μόνιμη θλιπτική τάση στα άκρα, η οποία προϋπάρχει πριν από κάθε καμπτική επιπόνηση κινητών φορτίων, επιδιώκει να εξασφαλίσει πως δεν θα εμφανιστεί εφελκυσμός υπό την επίδραση εξωτερικής φόρτισης, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2.4. Πράγματι, όσο οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες από τις παραμένουσες θλιπτικές, επικρατεί καθεστώς θλίψης και εμποδίζεται η επέκταση των ρωγμών. Επιτυγχάνεται ουσιαστικά αύξηση της αντοχής του γυαλιού μέσω της προέντασης της εξωτερικής του επιφάνειας.



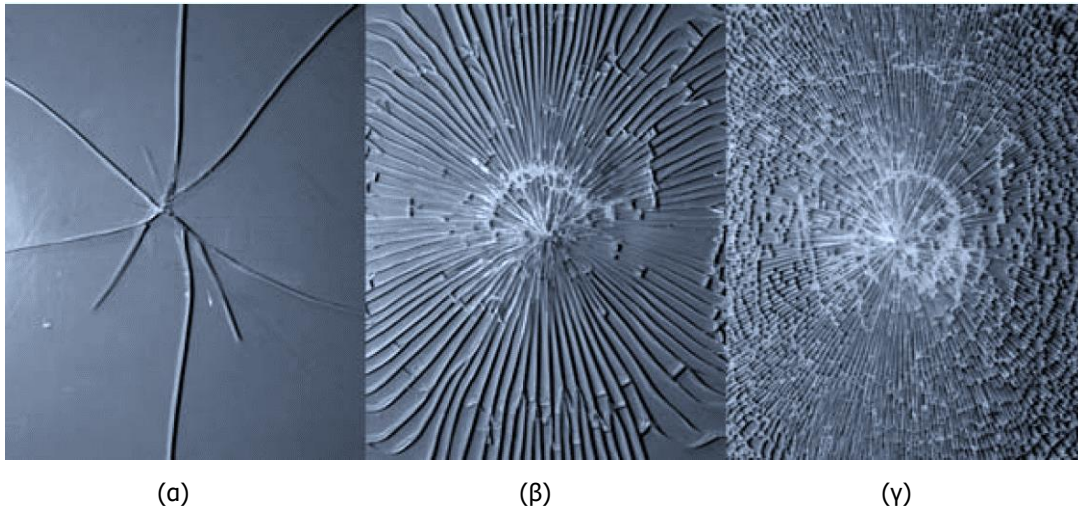
Εικόνα 2.4. Η βασική ιδέα της θερμικής κατεργασίας

Ανάλογα με τη διαδικασία που ακολουθείται, διακρίνονται δύο προϊόντα θερμικής κατεργασίας: το πλήρως σκληρυμένο και το θερμικά ενισχυμένο γυαλί. Και τα δύο έχουν ως βάση το ανοπτημένο γυαλί.

Ανοπτημένο γυαλί (Annealed glass)

Το ανοπτημένο γυαλί δεν έχει υποστεί θερμική κατεργασία. Προέρχεται από τη θέρμανση του υλικού στο σημείο ανόπτησης (περίπου 540°C για το κοινό γυαλί) και την εν συνεχεία ελεγχόμενη ψύξη του. Πρόκειται για μία διαδικασία αποβολής των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται στη δομή του γυαλιού κατά τον σχηματισμό του και η παρουσία τους μπορεί να υποβαθμίσει σημαντικά την αντοχή του. Η ανόπτηση είναι ενσωματωμένη στη μέθοδο παραγωγής του επίπεδου γυαλιού και προηγείται της κοπής και της λοιπής επεξεργασίας του (λείανση, τρόχισμα, διάνοιξη οπών). Φύλλα ανοπτημένου γυαλιού παράγονται στα τυποποιημένα πάχη των 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 και 25 mm, αν και η παραγωγή του τελευταίου είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους και των πρακτικών δυσκολιών της διαδικασίας.

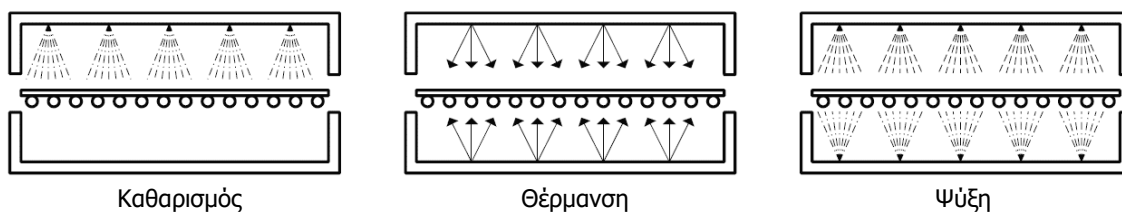
Το συγκεκριμένο προϊόν είναι ευαίσθητο στο θερμικό σοκ. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ παρακείμενων τμημάτων του ίδιου φύλλου γυαλιού και την ανομοιόμορφη διαστολή τους. Κύρια αιτία αυτής της διαφοράς είναι η επίδραση της ηλιακής ενέργειας σε περιπτώσεις που ο υαλοπίνακας σκιάζεται μερικώς ή περιβάλλεται περιμετρικά από κάποιο πλαίσιο. Τότε το εκτιθέμενο στην ακτινοβολία του ήλιου τμήμα του γυαλιού απορροφά μέρος της ενέργειας, θερμαίνεται και κατά συνέπεια διαστέλλεται επιβάλλοντας τάσεις στις ψυχρότερες περιοχές του υαλοπίνακα. Όταν οι θερμικές τάσεις υπερβαίνουν την αντοχή του γυαλιού, επέρχεται η θραύση του στοιχείου. Εκτιμάται πως για κάθε έναν βαθμό Κελσίου διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κεντρικής και της περιμετρικής ζώνης του υαλοπίνακα εισάγεται τάση ίση με 0.62 MPa. Ενδεχόμενη αστοχία εκδηλώνεται με τη μορφή μεγάλων, αιχμηρών θραυσμάτων, τα οποία μπορούν να επιφέρουν σοβαρούς τραυματισμούς (Εικόνα 2.5(a)).



Εικόνα 2.5. Μορφή θραύσης ανάλογα με τη μέθοδο επεξεργασίας
(α) Ανοπτημένο, (β) θερμικά ενισχυμένο και (γ) πλήρως σκληρυμένο γυαλί

Πλήρως σκληρυμένο γυαλί (Fully tempered glass)

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας θερμικής σκλήρυνσης το επίπεδο γυαλί θερμαίνεται στους 620-675°C (περίπου 100°C πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης) εντός της υαλοργικής καμίνου και ακολούθως ψύχεται ταχύτατα με ελεγχόμενο φύσημα κρύου αέρα (Εικόνα 2.6). Η επιτάχυνση της διαδικασίας ψύξης επιτρέπει στο εσωτερικό τμήμα του γυαλιού να διατηρήσει για ένα μικρό διάστημα τη ρευστότητά του παρά τη στερεοποίηση της εξωτερικής επιφάνειας. Σε αυτό το στάδιο η κατανομή της θερμοκρασίας καθύψος της διατομής έχει προσεγγιστικά παραβολική μορφή, με το εσωτερικό να παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές. Όταν τελικά αρχίζει να ψύχεται και ο πυρήνας του γυαλιού, η συστολή του όγκου του, που συνεπάγεται η μετάβαση από τη ρευστή στη στερεή κατάσταση, εμποδίζεται από την ήδη σκληρυμένη επιφάνεια. Διαμορφώνεται έτσι το επιθυμητό πεδίο παραμενουσών τάσεων με την παρουσία θλίψης στα άκρα και εφελκυσμού στο εσωτερικό.



Εικόνα 2.6. Διαδικασία θερμικής επεξεργασίας

Η διαδικασία αυτή αποδίδει στο υλικό αυξημένη καμπτική αντοχή, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 80 και 170 MPa για τον κοινό τύπο γυαλιού. Στον Πίνακα 2.3 δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές που προτείνονται από τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς για το ανοπτημένο γυαλί και τα δύο προϊόντα θερμικής επεξεργασίας. Το σκληρυμένο γυαλί κατέχει και την ονομασία του γυαλιού ασφαλείας, καθώς θραύεται σε πολυάριθμα μικρά και σχετικά ακίνδυνα τεμάχια. Όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2.5, η μέθοδος επεξεργασίας καθορίζει τη μορφή θραύσης, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η προένταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας που θα απελευθερωθεί κατά μήκος των ρωγμών τη στιγμή της αστοχίας. Η υψηλή επιφανειακή τάση του γυαλιού ασφαλείας επιβάλλει ένα πυκνό, μεγάλο μήκους δίκτυο ρωγμών, το οποίο μεταφράζεται σε μικρά θραύσματα που μειώνουν σημαντικά τον

κίνδυνο τραυματισμού. Παράλληλα το σκληρωμένο γυαλί παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε αιφνίδιες μεταβολές θερμοκρασίας εντός της μάζας του, ελαχιστοποιώντας έτσι τον κίνδυνο θερμικού σοκ. Σημειώνεται πως αντιστέκεται σε διαφορά θερμοκρασίας ίση με 200°C, τη στιγμή που το ίδιο μέγεθος για το ανοπτημένο γυαλί ανέρχεται μόλις στους 40°C.

Τύπος γυαλιού	Χαρακτηριστική αντοχή f_k (MPa)	Προένταση επιφάνειας (MPa)
Ανοπτημένο	45	~0
Θερμικά ενισχυμένο	70	~30-50
Πλήρως σκληρωμένο	120	>90

Πίνακας 2.3. Τιμές αντοχής των τριών τύπων γυαλιού

Ακαριαία θραύση σε τυχαίο χρόνο μπορεί να προκληθεί στον σκληρωμένο υαλοπίνακα εξαιτίας της περιεκτικότητάς του σε κρυστάλλους θειούχου νικελίου (NiS), οι οποίοι εισάγονται αναπόφευκτα στη μάζα του μέσω των πρώτων υλών του (Εικόνα 2.7). Όταν το γυαλί θερμαίνεται κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης, τα ίχνη θειούχου νικελίου αυξάνουν τον όγκο τους. Η ταχύτατη ωστόσο ψύξη που ακολουθεί δεν εξασφαλίζει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, με αποτέλεσμα να προκαλείται μια πρόσθετη συγκέντρωση τάσης. Η αστοχία εκδηλώνεται συνήθως μέσα στα πρώτα 10 χρόνια μετά την εγκατάσταση του υαλοπίνακα, αν και περιστατικά έχουν σημειωθεί ακόμα και 20 χρόνια μετά την παραγωγή. Προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος ακαριαίας θραύσης, το σκληρωμένο γυαλί υποβάλλεται στην πρόσθετη διαδικασία εκούσιας καταστροφής (heat soak test). Η διαδικασία αυτή είναι σύμφωνη με το πρότυπο EN 14179 και επιτρέπει τον εντοπισμό πάνω από το 95% των προβληματικών υαλοπινάκων. Κατά τη διάρκεια ενός heat soak test το σκληρωμένο γυαλί τοποθετείται σε κλίβανο και θερμαίνεται στους 290°C για μερικές ώρες. Το τεστ αναγκάζει τα ενδεχόμενα υπολείμματα θειούχου νικελίου να διασταλούν και να παράγουν με αυτόν τον τρόπο ακόμα πιο έντονες εσωτερικές πιέσεις οδηγώντας τελικά στη θραύση του υαλοπίνακα. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ρυθμό και τη διάρκεια θέρμανσης.

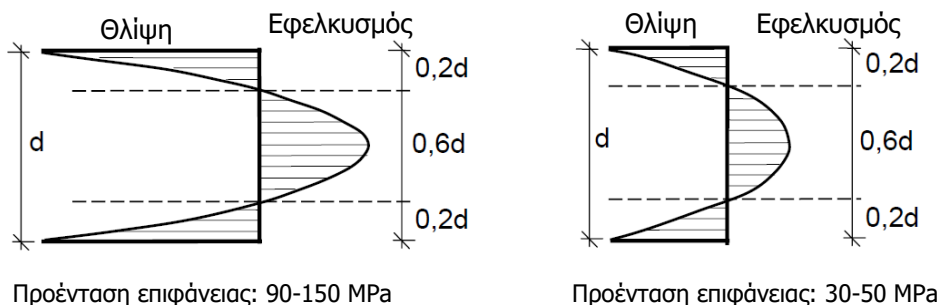


Εικόνα 2.7. Ακαριαία θραύση σκληρωμένου γυαλιού εξαιτίας της παρουσίας κρυστάλλων θειούχου νικελίου (NiS)

Το πλήρως σκληρυμένο γυαλί διατίθεται στα πάχη των 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 και 25 mm. Χρησιμοποιείται όταν η ασφάλεια, η αντοχή και η θερμική αντίσταση είναι καθοριστικοί παράγοντες και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών από στηθαία και πόρτες μέχρι παραπετάσματα και προσόψεις, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Επισημαίνεται πως όλες οι απαιτούμενες εργασίες για την κοπή και τη λοιπή επεξεργασία του θα πρέπει να έχουν προβλεφθεί και ολοκληρωθεί πριν την σκλήρυνση ή την ενίσχυσή του. Οποιαδήποτε πάρωρη απόπειρα διάτρησης, αμμοβολής ή λείανσης του κατεργασμένου γυαλιού, θα οδηγήσει πιθανότατα στη θραύση του.

Θερμικά ενισχυμένο γυαλί (Heat strengthened glass)

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία παραγωγής με το σκληρυμένο γυαλί, με τη διαφορά ότι τώρα η ψύξη συντελείται με πιο αργό ρυθμό. Οι επιφανειακές τάσεις που εισάγονται είναι μικρότερες (Εικόνα 2.8), επομένως η αντοχή του προϊόντος τοποθετείται ανάμεσα σε αυτές του ανοιπημένου και του σκληρυμένου γυαλιού ($f_k=70$ MPa σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3). Η μικρή προένταση της εξωτερικής επιφάνειας και η επακόλουθη μικρή ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας οδηγούν σε σχετικά μεγάλα και αιχμηρά θραύσματα κατά την αστοχία, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2.5(β). Αυτή η μορφή θραύσης μπορεί να εξασφαλίσει κάποια φέρουσα ικανότητα και μετά την υπέρβαση της αντοχής του στοιχείου, στην περίπτωση που αποτρέπεται η πτώση των θραυσμάτων, καθώς μέσα από την επαφή τους είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένας δρόμος μεταφοράς του φορτίου. Αυτός είναι και ο λόγος που η χρήση του ενισχυμένου γυαλιού σε πολυστρωματική διάταξη, όπου μια ενδιάμεση στρώση άλλου υλικού συγκρατεί προσκολλημένα στη θέση τους τα γυάλινα τεμάχια, συνιστά έναν αποτελεσματικό τρόπο αξιοποίησης των χαρακτηριστικών του (βλ. Κεφάλαιο 3).



Εικόνα 2.8. Κατανομή παραμενουσών τάσεων στο πλήρως σκληρυμένο (αριστερά) και στο θερμικά ενισχυμένο γυαλί (δεξιά)

Στο εμπόριο διατίθενται φύλλα θερμικά ενισχυμένου γυαλιού ονομαστικού πάχους 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 και 12 mm. Η συνήθης μέθοδος επεξεργασίας είναι περιοριστική για μεγαλύτερα πάχη, καθώς η κατανομή των τάσεων εξαρτάται από τη διάσταση του πάχους και η διαδικασία της ψύξης πρέπει να ολοκληρωθεί με αργό ρυθμό. Λόγω των ιδιοτήτων του προϊόντος τα φύλλα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε υαλοπετάσματα, φέροντα τοιχώματα και γενικότερα δομικά συστήματα υαλοπινάκων. Όταν το ενισχυμένο γυαλί χρησιμοποιείται σε σύνθετα πάνελ, πετυχαίνει έναν επιθυμητό συνδυασμό αντοχής πριν τη θραύση και ασφάλειας μετά τη θραύση που το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε πατώματα και οροφές. Η μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά θερμοκρασίας, ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη κρίσιμων θερμικών τάσεων, ορίζεται γύρω στους 100°C.

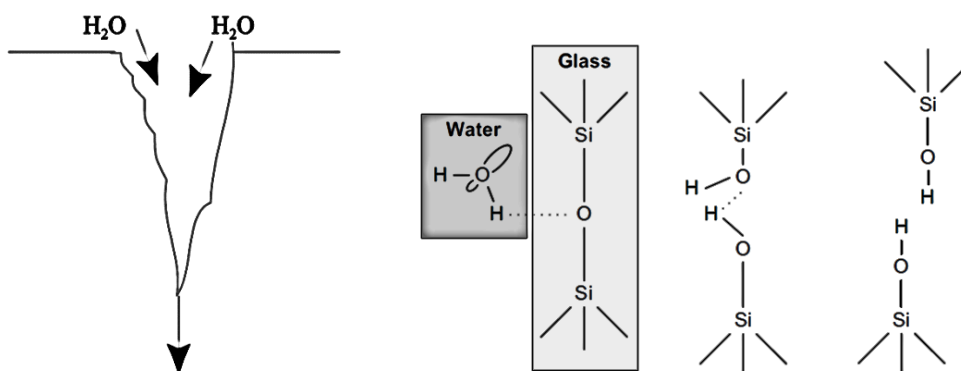
2.4 ΘΡΑΥΣΗ

2.4.1 Στατική κόπωση

Η χαμηλή αντοχή του γυαλιού είναι άμεσο αποτέλεσμα της ψαθυρής συμπεριφοράς του. Οι ατέλειες - ρωγμές που συναντώνται στην επιφάνειά του συνιστούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, καθώς η τάση στην αιχμή της ρωγμής είναι σημαντικά υψηλότερη από τη μέση κατανομή. Όταν η τάση αυτή φτάσει την κρίσιμη τιμή της και εφόσον δεν υπάρχει δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής. Η τιμή της κρίσιμης τάσης καθορίζεται εν μέρει από τη σύνθεση του γυαλιού και εν μέρει από τις περιβαλλοντικές συνθήκες στην περιοχή της ατέλειας. Αυτή η επίδραση του περιβάλλοντος στην εξάπλωση των ρωγμών επιβάλλει μία εξάρτηση της αντοχής από τον χρόνο, γνωστή ως στατική κόπωση. Το φαινόμενο αυτό επισημάνθηκε για πρώτη φορά το 1899 από τον Grenet, ο οποίος παρατήρησε μια μείωση της αντοχής του γυαλιού με τον χρόνο υπό την επίδραση τόσο στατικών όσο και δυναμικών φορτίων. Η στατική κόπωση συντελείται παρουσία υγρασίας και περιλαμβάνει τη χημική αντίδραση του νερού με το πλέγμα της πυριτίας. Συγκεκριμένα το μόριο H_2O απορροφάται από τον δεσμό Si-O-Si στην αιχμή της ρωγμής και παράγει δύο ποσότητες Si-OH σύμφωνα με την εξίσωση:



Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.9, τα παραγόμενα υδροξύλια δε συνδέονται μεταξύ τους προκαλώντας έτσι διάρρηξη των δεσμών εντός της δομής του γυαλιού. Κάθε φορά που η αντίδραση (2.1) λαμβάνει χώρα στην κεφαλή μιας επιφανειακής ατέλειας, η ατέλεια επιμηκύνεται κατά μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό της μικροδομής των σωμάτων. Ο ρυθμός της αντίδρασης αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και της τάσης του γυαλιού. Αυτού του τύπου η διάδοση ονομάζεται υποκρίσιμη, καθώς συμβαίνει σε εντατική κατάσταση όπου η διατιθέμενη ενέργεια παραμόρφωσης είναι αρκετά χαμηλότερη της κρίσιμης τιμής. Αυτό σημαίνει πως ακόμα και όταν το γυαλί υπόκειται σε τάσεις μικρότερες της αντοχής του, η αστοχία θα επέλθει τελικά κάποια στιγμή, όταν η κρίσιμη ατέλεια φτάσει στο κρίσιμο μέγεθός της.

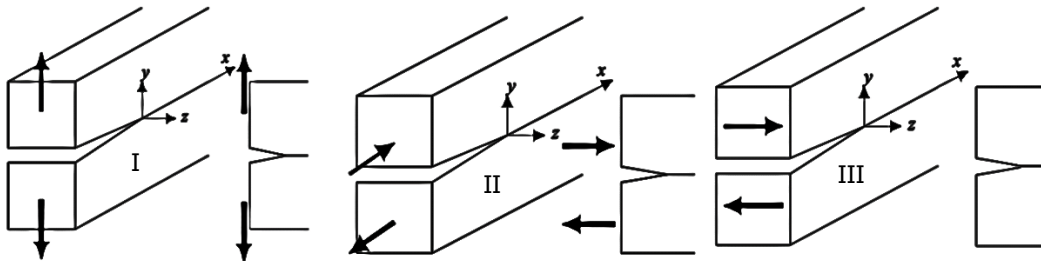


Εικόνα 2.9. Επέκταση μιας επιφανειακής ατέλειας παρουσία υγρασίας

2.4.2 Μηχανική της θραύσης

Η Εικόνα 2.10 παρουσιάζει τις τρεις ανεξάρτητες μορφές επέκτασης μιας ρωγμής ανάλογα με τον τρόπο που επιβάλλεται το φορτίο. Η μορφή I ή ανοίγουσα μορφή παρατηρείται όταν τα χείλη της ρωγμής μετατοπίζονται κάθετα στο επίπεδό της. Η μορφή II χαρακτηρίζεται ως ολισθαίνουσα μορφή, αφού οι

επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη παράλληλα με την ακμή της και κάθετα στο μέτωπό της. Η μορφή III ή μορφή απόσχισης προϋποθέτει τη στρέψη της ρωγμής και περιλαμβάνει τη σχετική κίνηση των δύο επιφανειών σε διεύθυνση παράλληλη τόσο προς την ακμή και όσο και το μέτωπό της. Οποιαδήποτε άλλη μορφή παραμόρφωσης μπορεί να θεωρηθεί πως προκύπτει από τον συνδυασμό των τριών αυτών τύπων.



Εικόνα 2.10. Τρόποι φόρτισης ρωγμής - I (Άνοιγμα), II (Ολίσθηση), III (Απόσχιση)

Ο A.A. Griffith διατύπωσε το 1920 τη θεωρία του ενεργειακού ισοζυγίου, σύμφωνα με την οποία η ρωγμή διαδίδεται μόνο όταν η ελευθερούμενη ενέργεια από την αύξηση του μεγέθους της είναι ίση ή μεγαλύτερη της ενέργειας που απαιτείται για τον σχηματισμό της νέας θραυσιγενούς επιφάνειας. Η προϋπάρχουσα δηλαδή ατέλεια τείνει να διαδοθεί, αν πρόκειται έτσι να μειωθεί η συνολική ενέργεια του συστήματος. Η ενέργεια αυτή μετά τη δημιουργία ρωγμής ισούται με

$$U = U_a + U_y, \quad (2.2)$$

όπου U_a είναι η μείωση της δυναμικής ενέργειας λόγω της εμφάνισης της ρωγμής και U_y είναι η ενέργεια που απαιτείται για την καταπολέμηση των δυνάμεων συνοχής και τη δημιουργία των νέων επιφανειών της ρωγμής. Επομένως η U_a ευνοεί την επέκταση της ρωγμής, ενώ η U_y αντιτίθεται σε αυτή. Η συνθήκη ισορροπίας προκύπτει από την απαίτηση η πρώτη παράγωγος της ενέργειας ως προς το μήκος a της ρωγμής να ισούται με μηδέν. Η εξίσωση $dU/da=0$, η οποία βρίσκεται στη βάση της θεωρίας του ενεργειακού ισοζυγίου, καταφέρνει να συνδέσει την τάση αστοχίας σ_f με το κρίσιμο μήκος της ρωγμής a_c μέσω της σχέσης:

$$\sigma_f = \sqrt{2E\gamma / (\pi a_c)} \quad (2.3)$$

Το 1957 ο G.R.Irwin πρότεινε την επέκταση της θεωρίας του Griffith σε μια προσπάθεια εμβάθυνσης στις έννοιες της ψαθυρότητας και της δυσθραυστότητας. Εισήγαγε την έννοια των συντελεστών έντασης τάσης K , οι οποίοι εκφράζουν το μέγεθος του πεδίου ελαστικής τάσης στην περιοχή γύρω από το χείλος της ρωγμής και χρησιμεύουν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της. Ορίζονται τρεις τιμές του συντελεστή K , μία για κάθε έναν από τους τρεις τύπους φόρτισης και παραμόρφωσης της ατέλειας που περιγράφηκαν παραπάνω.

$$K_I = \sigma_y \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{xy} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{yz} \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

Οι σχέσεις (2.4) διατυπώνονται για μία άπειρη πλάκα με μία κεντρική ρωγμή μήκους $2a$. Απαιτείται λοιπόν η διόρθωσή τους με έναν συντελεστή γεωμετρίας Y , ώστε να προσαρμόζονται στις διαστάσεις του εκάστοτε στοιχείου. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία της ρωγμής και τη θέση της σε σχέση με τα όρια του στοιχείου. Στη συνήθη περίπτωση που το βάθος της ρωγμής είναι μικρό σε σχέση με το μήκος της και το πάχος του υλικού και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο σε σχέση με τις

συνολικές διαστάσεις του φορέα (ημι-άπειρη πλάκα), η τιμή του Y λαμβάνεται ίση με 1.12. Η προσέγγιση αυτή αφορά επιμήκεις ατέλειες. Όταν πρόκειται για ατέλειες ημικυκλικής μορφής, η τιμή του Y κυμαίνεται από 0.637 μέχρι 0.713.

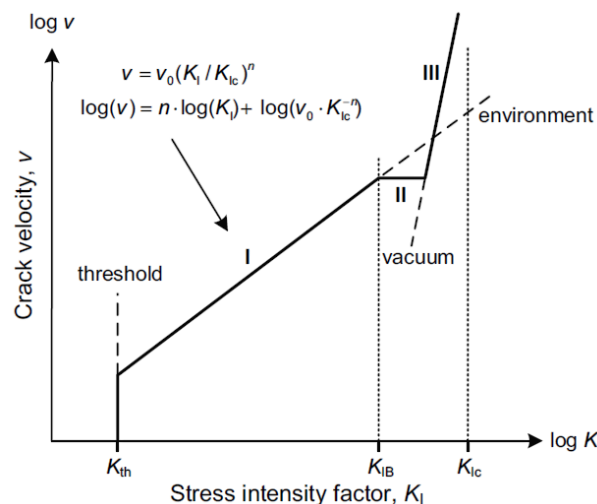
Η μορφή I, η οποία εμφανίζεται υπό την επίδραση καμπτικών ροπών, συναντάται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και αποτελεί τον πλέον επικίνδυνο τρόπο παραμόρφωσης της ρωγμής. Αυτός είναι και ο λόγος που έχει συγκεντρώσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Ο Irwin έδειξε πως η αστοχία εξαρτάται από την επίτευξη μιας κρίσιμης τιμής για τον συντελεστή έντασης τάσης K_I , την αντοχή ή αλλιώς σκληρότητα θραύσης K_{IC} . Το κριτήριο αστοχίας διατυπώνεται ως εξής:

$$K_I \geq K_{IC} \quad (2.5)$$

Η αντοχή θραύσης K_{IC} θεωρείται σταθερά του υλικού και η τιμή της προσδιορίζεται πειραματικά. Συνήθως λαμβάνεται ίση με $0.75 \text{ MPa m}^{0.5}$. Αυτό σημαίνει πως η σχέση (2.5) λειτουργεί ως μια σταθερή βάση για τον σχεδιασμό, σε αντίθεση με τη χρήση μιας επιτρεπόμενης τάσης, οποία θα πρέπει να μεταβάλλεται με τον χρόνο.

2.4.3 Διάδοση ρωγμής

Η διαδικασία της θραύσης του γυαλιού περιγράφεται στην Εικόνα 2.11 μέσα από τη συσχέτιση της ταχύτητας ανάπτυξης της ρωγμής v με τον συντελεστή έντασης τάσης K_I . Οι τρεις διακριτές περιοχές του διαγράμματος υποδεικνύουν τους διαφορετικούς μηχανισμούς που οδηγούν στην αστοχία.



Εικόνα 2.11. Σχέση ταχύτητας ρωγμής v – συντελεστή έντασης K_I

Για μικρές τιμές του K_I (περιοχή I), η συμπεριφορά της ατέλειας εξαρτάται έντονα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στο στάδιο αυτό παρατηρείται η κατάλυση των δεσμών SiO_2 λόγω της διαβρωτικής επίδρασης του νερού. Η ατέλεια επεκτείνεται με ταχύτητα που αυξάνεται εκθετικά με τον συντελεστή K_I σύμφωνα με τη σχέση:

$$v = v_0 (K_I / K_{IC})^n, \quad (2.6)$$

όπου η ο παράγοντας στατικής κόπωσης. Η τιμή του εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και από πειράματα προκύπτει ότι κυμαίνεται μεταξύ 12 και 20. Μόλις ξεπεραστεί το όριο διάχυσης (περιοχή II), η ταχύτητα διάδοσης παύει να εξαρτάται από το επιβαλλόμενο φορτίο και καθορίζεται από τον ρυθμό παροχής νερού. Τα μόρια νερού χρειάζονται κάποιο χρόνο μέχρι να μεταφερθούν στην αιχμή της ρωγμής, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μία μείωση της διατιθέμενης ποσότητας υγρασίας καθώς αυξάνεται η ταχύτητα. Σε μία μικρή περιοχή κάτω από την αντοχή θραύσης (περιοχή III) τα αποθέματα των OH^- ιόντων τείνουν πια στο μηδέν και η συμπεριφορά της ατέλειας παραπέμπει σε αυτή που θα εμφάνιζε σε συνθήκες κενού. Η ταχύτητα δεν εξαρτάται πλέον από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και αυξάνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό από 0.001 m/s σε 1 m/s, όπως φανερώνει η απότομη κλίση του διαγράμματος στην περιοχή III. Για τιμές του συντελεστή K_I μικρότερες από μια κρίσιμη τιμή K_{th} δεν προκαλείται επέκταση της ατέλειας. Η τιμή αυτού του κάτω ορίου, το οποίο αναφέρεται ως κατώφλι διάδοσης της ρωγμής, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την υγρασία κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Η σχέση μεταξύ της έντασης τάσης και της ταχύτητας ρωγμής είναι ευαίσθητη στους εξής παράγοντες:

- **Υγρασία.** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το ποσοστό υγρασίας επηρεάζει έντονα την υποκρίσιμη διάδοση της ρωγμής. Συγκεκριμένα αύξηση της ποσότητας νερού στην αιχμή θα προκαλούσε παράλληλη μετατόπιση των περιοχών I και II προς υψηλότερες ταχύτητες.
- **Θερμοκρασία.** Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται επίσης παράλληλη μετατόπιση των περιοχών I και II προς υψηλότερες ταχύτητες, ενώ παράλληλα συνοδεύεται από ελαφριά μείωση της κλίσης.
- **Διαβρωτικό περιβάλλον και τιμή pH.** Η παρουσία διαβρωτικών παραγόντων στο περιβάλλον λειτουργίας του αντικειμένου επιταχύνει την αστοχία λόγω στατικής κόπωσης, αφού σημεία τοπικής επιφανειακής διάβρωσης αποτελούν σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων και συνεπώς σημεία ενδεχόμενης έναρξης ρωγμών. Επίσης η τιμή pH επηρεάζει την κλίση του διαγράμματος $v-K_I$ και την τιμή του κατώφλιου K_{th} .
- **Χημική σύνθεση του γυαλιού.** Όλες οι παράμετροι της υποκρίσιμης διάδοσης επηρεάζονται από τη χημική σύνθεση του γυαλιού.
- **Ρυθμός φόρτισης.** Η σχέση $v-K_I$ δεν εξαρτάται μόνο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και από τον ρυθμό φόρτισης. Η διαδικασία της διάβρωσης υπό την επίδραση εξωτερικής τάσης απαιτεί υγρασία. Όταν το στοιχείο φορτίζεται γρήγορα, η διάχυση συντελείται σχετικά αργά και ενδεχόμενη απουσία νερού από την περιοχή της ατέλειας επιβραδύνει τη διάβρωση και επομένως την υποκρίσιμη διάδοση των ρωγμών. Αυτό σημαίνει πως το διάγραμμα κινείται προς μικρότερες ταχύτητες, όταν η φόρτιση του στοιχείου πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό.

3 ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Το πολυστρωματικό γυαλί (laminated glass) αποτελείται από δύο ή περισσότερα φύλλα γυαλιού ενωμένα μεταξύ τους με μια διάφανη στρώση κάποιου πολυμερούς (interlayer). Τα φύλλα μπορούν να είναι διαφορετικού πάχους και να προέρχονται από διαφορετική θερμική κατεργασία το καθένα. Η κατάλληλη επιλογή των χαρακτηριστικών και του αριθμού των στρώσεων αποδίδει διατάξεις ικανές να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις ασφάλειας της κάθε τύπου εφαρμογής. Η πιο κοινή διαδικασία παρασκευής περιλαμβάνει την ένωση γυαλιού και πολυμερούς υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (περίπου 140°C) μέσα σε αυτόκλειστο κλίβανο. Με τον τρόπο αυτό απομακρύνεται ο εγκλωβισμένος ανάμεσα στις στρώσεις αέρας και επιτυγχάνεται ένας ισχυρός χημικός δεσμός μεταξύ των δύο υλικών, ο οποίος επιτρέπει τη στέρεα προσκόλλησή τους. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης πολυστρωματικής διάταξης εντοπίζονται στο στάδιο μετά την υπέρβαση των ορίων αντοχής του γυαλιού.

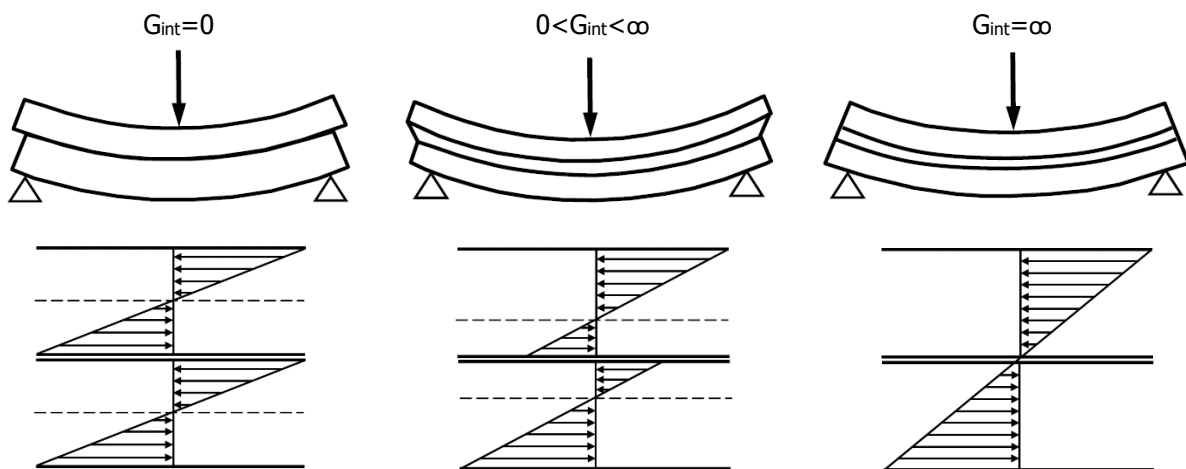


Εικόνα 3.1. Συμπεριφορά των τριών προϊόντων γυαλιού σε πολυστρωματική διάταξη

Συγκεκριμένα μετά τη θραύση τα κομμάτια του γυαλιού παραμένουν προσκολλημένα στην ενδιάμεση στρώση, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος τραυματισμού που θα προκαλούσε η ανεξέλεγκτη πτώση τους. Παράλληλα διατηρείται ένα μέρος της φέρουσας ικανότητας και μετά την αστοχία, καθώς μέσα από την επαφή των θραυσμάτων είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένας δρόμος μεταφοράς του θλιπτικού φορτίου. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από τη μορφή της θραύσης και αυξάνεται με την αύξηση

του μεγέθους των γυάλινων τεμαχίων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1. Επομένως, οι συγκεκριμένες εφαρμογές εξασφαλίζουν υψηλά επίπεδα παραμένουσας αντοχής όταν ενσωματώνουν ανοιπημένο ή θερμικά ενισχυμένο γυαλί, τα οποία σπάνε σε μεγάλα κομμάτια.

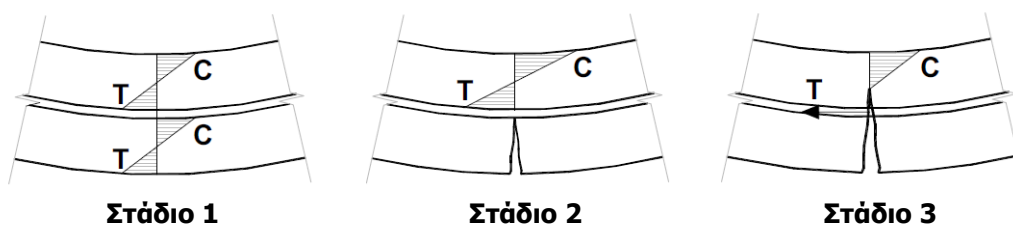
Το πολυμερές δρα ως διατμητική σύνδεση μεταξύ των φύλλων γυαλιού και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του συστήματος, καθώς η στιβαρότητά του είναι συνήθως κατά τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή του γυαλιού. Σύμφωνα με την Εικόνα 3.2, η απόκριση αυτή τοποθετείται μεταξύ δύο οριακών καταστάσεων. Για μεγάλες τιμές του μέτρου διάτμησης G_{int} του πολυμερούς, η συμπεριφορά του πολυστρωματικού υαλοπίνακα πλησιάζει αυτή του αντίστοιχου μονολιθικού ίσου πάχους (monolithic limit). Στο άλλο άκρο, όταν η μεταφορά διάτμησης μεταξύ των φύλλων γυαλιού είναι αμελητέα, θεωρείται ότι τα φύλλα δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, αφού απλά εφάπτονται χωρίς να συνδέονται (layered limit). Ο βαθμός στον οποίο θα ενεργοποιηθεί η σύνθετη δράση καθορίζεται από το υλικό που επιλέγεται και τις περιπτώσεις φόρτισης στις οποίες υπόκειται η διάταξη (Παράγραφος 3.2).



Εικόνα 3.2. Κατανομή τάσεων στο πολυστρωματικό γυαλί ανάλογα με το μέτρο διάτμησης του πολυμερούς

3.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ

Ο σχεδιασμός του δομικού γυαλιού θα πρέπει να προβλέπει την περίπτωση τοπικής ή ολικής θραύσης ενός στοιχείου γυαλιού εξαιτίας μιας τυχαίας δράσης (βανδαλισμός, τοπική πρόσκρουση σκληρού αντικειμένου, έκρηξη, θερμικό σοκ κ.ά) και να εξασφαλίζει πως στην οριακή αυτή κατάσταση το στοιχείο συγκρατείται στη θέση του και διατηρεί ένα μέρος της φέρουσας ικανότητάς του. Η Εικόνα 3.3 παρουσιάζει τη συμπεριφορά της πολυστρωματικής διάταξης μετά τη θραύση εστιάζοντας σε τρία βασικά στάδια: Στο Στάδιο 1 τα φύλλα γυαλιού είναι ακόμα άθικτα. Σε καθένα από αυτά ισχύουν οι παραδοχές της θεωρίας Bernoulli-Euler, ενώ η συνολική απόκριση του φορέα περιγράφεται ικανοποιητικά από τη θεωρία σύνθετων πλακών. Η κατανομή των τάσεων καθύψως της διατομής εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες της ενδιάμεσης στρώσης. Το Στάδιο 2 σηματοδοτείται από τη θραύση του κάτω γυαλιού και συνεπάγεται την ανάληψη του συνόλου των φορτίων από το πάνω, ακέραιο ακόμα, φύλλο. Η ρήξη και του πάνω φύλλου επέρχεται στο Στάδιο 3, όπου το γυαλί παύει πια να είναι ικανό να μεταφέρει τις εφελκυστικές τάσεις, ωστόσο τα πάνω θραύσματα εξακολουθούν να μπορούν να μεταφέρουν θλιπτικό φορτίο μέσω της επαφής τους. Η μεμβράνη του πολυμερούς θα πρέπει να διαθέτει την απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή ώστε να αντισταθεί στις αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές, ενώ παράλληλα καλείται να υποστηρίξει τις μεγάλες παραμορφώσεις που συνδέονται με αυτό το στάδιο χωρίς να σκιστεί.

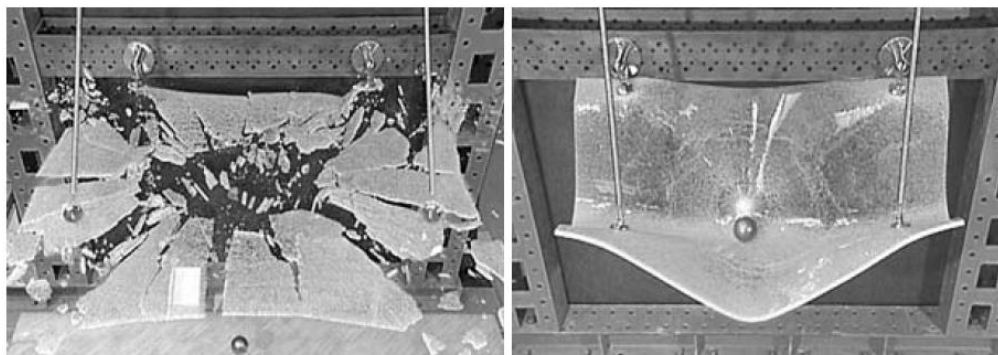


Εικόνα 3.3. Μηχανισμοί ανάληψης του φορτίου μετά τη θραύση του γυαλιού

Σε συνέχεια του Σταδίου 3 η αστοχία θα επέλθει όταν σημειωθεί ένα ή συνδυασμός των παρακάτω φαινομένων:

- Εφελκυσμός της ενδιάμεσης στρώσης μέχρι να σκιστεί
- Αποκόλληση του γυαλιού από το πολυμερές υπό την επίδραση διάτμησης
- Ρήξη του γυαλιού στις περιοχές εκείνες όπου τα κομμάτια απλά εφάπτονται μεταξύ τους

Ο ρόλος που διαδραματίζει ο καθένας από αυτούς τους μηχανισμούς στη συμπεριφορά μετά τη θραύση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία του στοιχείου, τις συνοριακές συνθήκες και το είδος φόρτισης. Η Εικόνα 3.4 συγκρίνει την απόκριση ενός μονολιθικού και ενός σύνθετου πλήρως ενισχυμένου γυαλιού μετά τη θραύση που προκάλεσε η πρόσκρουση ενός σκληρού αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή η ευστάθεια της σύνθετης πλάκας επαφίεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στην εφελκυστική αντοχή της μεμβράνης, καθώς τα πολυάριθμα μικρά τεμάχια του σκληρυμένου γυαλιού αδυνατούν να “κλειδώσουν” μεταξύ τους και να παραλάβουν έστω και μέρος του θλιπτικού φορτίου.



Εικόνα 3.4. Μονολιθικό (αριστερά) και πολυστρωματικό (δεξιά) πλήρως σκληρυμένο γυαλί μετά τη θραύση

3.3 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΣΤΡΩΣΗ

3.3.1 Υλικά και ιδιότητες

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεση στρώση είναι θερμοπλαστικά ή πλαστομερή. Ο όρος αυτός αποδίδει την ιδιότητα τους να μαλακώνουν και να μετατρέπονται σε ρευστά όταν θερμαίνονται, καθώς και να στερεοποιούνται με ακολουθούσα ψύξη. Η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη τοποθετείται σε μια συγκεκριμένη για κάθε υλικό θερμοκρασία, τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g . Στη θερμοκρασία αυτή παρατηρείται αλλαγή της διάταξης των μοριακών αλυσίδων, η οποία

συνδυάζεται με την απότομη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του πολυμερούς. Συγκεκριμένα σε $T < T_g$ το υλικό είναι σκληρό, εύθραυστο και πολλές φορές διαφανές (υαλώδης κατάσταση). Σε $T > T_g$ γίνεται μαλακό και εύκαμπτο και χαρακτηρίζεται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά, υπόκειται δηλαδή σε φαινόμενα ερπυσμού υπό την επίδραση μακροχρόνιας φόρτισης και χαλάρωσης υπό αυξανόμενη θερμοκρασία.

Η Πολυβινυλική Βουτυράλη (Polyvinyl Butyral - PVB) αποτελεί μέχρι σήμερα την πιο κοινή επιλογή για τη μεμβράνη των πολυστρωματικών υαλοπινάκων. Πρόκειται για ένα υλικό ιδιαίτερα ευαίσθητο στα ιξωδοελαστικά φαινόμενα με T_g που κυμαίνεται μεταξύ 20°C και 25°C. Σε αυτές τις συνθήκες δωματίου είναι αρκετό μαλακό με επιμήκυνση κατά τη θραύση μεγαλύτερη από 200%. Σε θερμοκρασίες κοντά στο 0°C και μικρής διάρκειας φορτίσεις θεωρείται ότι εξασφαλίζει την πλήρη διατμητική συνεργασία των φύλλων γυαλιού. Σε μεγαλύτερες όμως θερμοκρασίες ή όταν πρόκειται για μακροχρόνιες φορτίσεις, η μεταφορά διάτμησης από το ένα φύλλο στο άλλο θεωρείται αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί. Βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά παρουσιάζει το Ιονισμένο Πολυμερές (SentryGlass Plus – SGP), το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για εφαρμογές υάλωσης ανθεκτικές σε τυφώνα. Η υαλώδης μετάπτωση σημειώνεται κοντά στη θερμοκρασία των 55°C, ενώ διαθέτει έως και 5 φορές μεγαλύτερη αντοχή και 100 φορές μεγαλύτερη στιβαρότητα από τα συμβατικά υλικά (π.χ. PVB). Και τα δύο υλικά διατίθενται σε φύλλα πάχους 0.38 mm, ενώ συνήθως μία στρώση συντίθεται από δύο (0.76 mm) ή τέσσερα (1.52 mm) φύλλα. Τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Ιδιότητα	PVB	SGP
Πυκνότητα (kg/m ³)	1070	950
Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	18	300
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	>20	>34.5
Επιμήκυνση κατά τη θραύση (%)	>250	>400
Σημείο υαλώδους μετάπτωσης T_g (°C)	~20-25	~55-60

Πίνακας 3.1. Ιδιότητες των υλικών PVB και SGP

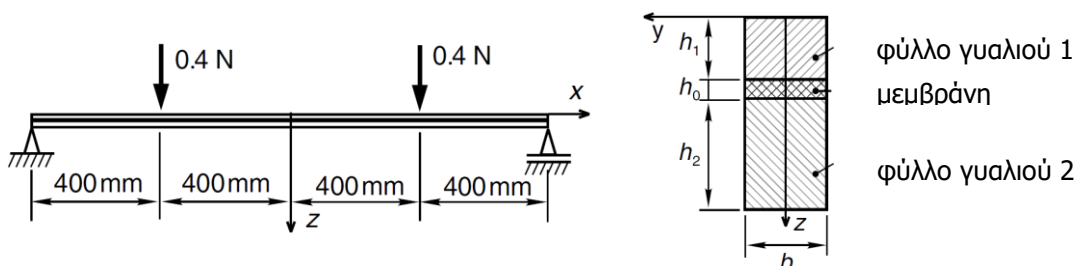
3.3.2 Επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της μεμβράνης στην απόκριση του πολυστρωματικού γυαλιού

Η αριθμητική προσομοίωση των πολυστρωματικών γυαλιών καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη εξαιτίας της μη γραμμικής συμπεριφοράς της μεμβράνης (εξάρτηση από θερμοκρασία και χρόνο). Η ακριβής περιγραφή των ιξωδοελαστικών χαρακτηριστικών προϋποθέτει τη χρήση ρεολογικών μοντέλων (όπως το γενικευμένο μοντέλο Maxwell) των οποίων οι συντελεστές έχουν προκύψει από δοκιμές ερπυσμού και χαλάρωσης. Τις περισσότερες φορές ωστόσο, η εκτέλεση μιας τέτοιας ιξωδοελαστικής ανάλυσης είναι απαγορευτική σε όρους υπολογιστικού κόστους και απαιτήσεων λογισμικού. Αποτελεί λοιπόν κοινή πρακτική να συνδυάζεται η διαδικασία του σχεδιασμού με συγκεκριμένα προφίλ θερμοκρασίας και διάρκειας φόρτισης, εκ των προτέρων γνωστά, τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές του μέτρου διάτμησης G_{int} , όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή. Η προσέγγιση αυτή ανταποκρίνεται στην πλειονότητα των πρακτικών εφαρμογών και επιτρέπει μια θεαματική απλοποίηση των υπολογισμών, καθώς πέρα από το γυαλί, το μοντέλο του γραμμικού ελαστικού υλικού χρησιμοποιείται και για το πολυμερές. Στον Πίνακα 3.2 καταγράφονται τα μέτρα διάτμησης των υλικών PVB και SGP για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και διάρκειας φόρτισης. Στους συνδυασμούς αυτούς αντιστοιχεί εύρος τιμών του λόγου Poisson από 0.44 έως 0.50. Επιβεβαιώνεται πως το ιονισμένο πολυμερές παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με την πολυβινυλική βουτυράλη.

G (MPa)		Διάρκεια φόρτισης									
		1s		1min		1h		1day		10years	
		PVB	SGP	PVB	SGP	PVB	SGP	PVB	SGP	PVB	SGP
Θερμοκρασία	10°C	107.70	240	31.56	225	4.46	206	1.20	190	0.36	153
	20°C	14	217	1.51	195	0.83	169	0.54	146	0.05	88.60
	30°C	1.20	151	0.75	110	0.44	59.9	0.28	49.70	0.05	5.31
	40°C	0.79	77	0.45	30.70	0.20	9.28	0.06	4.54	0.05	2.95
	50°C	0.49	36.20	0.29	11.30	0.054	4.20	0.05	2.82	0.05	2

Πίνακας 3.2. Μέτρο διάτμησης των υλικών PVB και SGP ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης

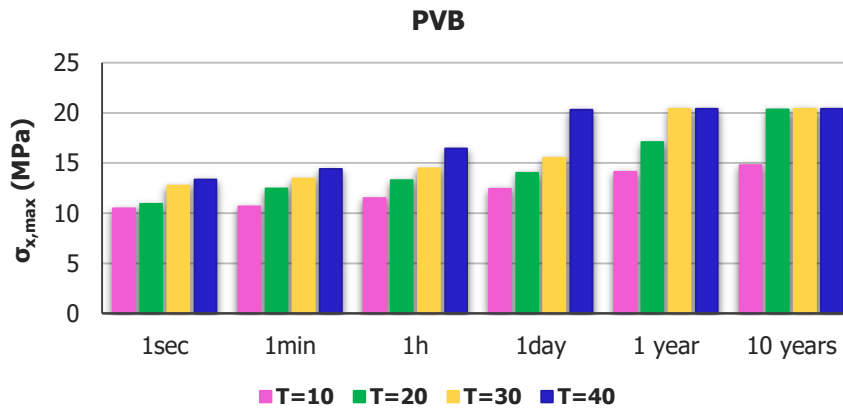
Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή αυτής της μεταβολής του μέτρου διάτμησης ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και φόρτισης στην απόκριση του φορέα, πραγματοποιείται στη συνέχεια μια παραμετρική διερεύνηση στα πλαίσια της εφαρμογής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5. Πρόκειται για μία αμφιέριστη δοκό σύνθετου γυαλιού, στην οποία ασκούνται δύο κατακόρυφα συγκεντρωμένα φορτία στα τέταρτα του ανοίγματός της. Έχει μήκος 1600 mm, πλάτος 1 mm και αποτελείται από δύο φύλλα γυαλιού, πάχους 3 και 5 mm. Το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης ανέρχεται στο 1 mm. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα ADINA με πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3d-solid. Για το γυαλί ορίστηκε μέτρο ελαστικότητας $E=70000$ MPa και λόγος Poisson $\nu=0.22$, ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη του πολυμερούς αποτέλεσαν τη βάση των παραμετρικών αναλύσεων αρχικά για το υλικό PVB και στη συνέχεια για το υλικό SGP.



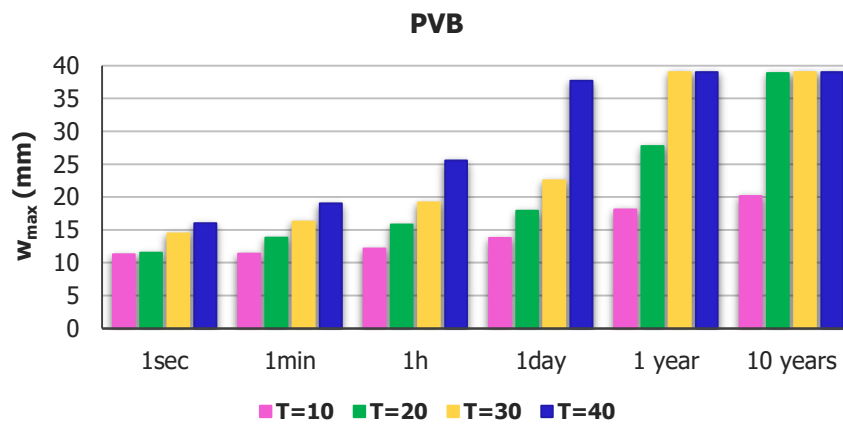
Εικόνα 3.5. Γεωμετρία πολυστρωματικής δοκού

Η Εικόνα 3.6 αφορά την πολυβινυλική βουτυράλη και αποτυπώνει με τη μορφή ραβδογράμματος (α) τη μέγιστη τάση $\sigma_{x,max}$ και (β) τη μέγιστη βύθιση w_{max} που σημειώνεται κατά μήκος του φορέα για τις περιπτώσεις του Πίνακα 3.2. Γίνεται εμφανές πως όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο πιο έντονη είναι η αύξηση των μεγεθών με τον χρόνο. Ενδεικτικά αναφέρεται πως ακόμα και για την πιο ευνοϊκή θερμοκρασία των 10°C παρατηρείται σχεδόν διπλασιασμός της βύθισης υπό μόνιμα φορτία (από 11.3 mm για φόρτιση ενός δευτερολέπτου στα 20.2 mm για φόρτιση δέκα ετών). Από τα διαγράμματα της Εικόνας 3.7, τα οποία παρουσιάζουν την κατανομή των παραμορφώσεων ϵ_x καθύψος της διατομής στο σημείο επιβολής του φορτίου, διαπιστώνεται πως πράγματι η απόκριση του πολυστρωματικού γυαλιού οριοθετείται από την απόκριση του μονολιθικού γυαλιού ίσου πάχους ($t=9$ mm στο υπό εξέταση παράδειγμα) και την απόκριση δύο ανεξάρτητων φύλλων ($t_1=3$ mm, $t_2=5$ mm στο υπό εξέταση παράδειγμα) χωρίς καμία σύνδεση μεταξύ τους. Όσο αυξάνεται η τιμή του μέτρου διάτμησης, επιτυγχάνεται καλύτερη συνεργασία μεταξύ των στρώσεων, ο ουδέτερος άξονας κάθε φύλλου γυαλιού μετακινείται προς το μέσο της διατομής και η κατανομή τείνει να αποκτήσει ενιαία κλίση. Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο αισθητό στις μικρές θερμοκρασίες. Οι παραμορφώσεις είναι της ίδιας τάξης

μεγέθους και στα 3 στρώματα, ωστόσο λόγω του πολύ μικρού μέτρου ελαστικότητας του πολυμερούς σε σύγκριση με αυτό του γυαλιού οι αντίστοιχες τάσεις θα ληφθούν ως μηδενικές,

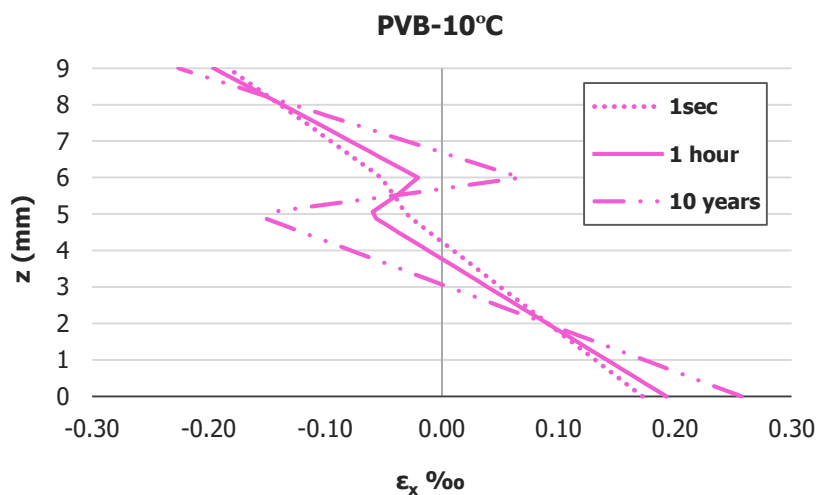


(α)

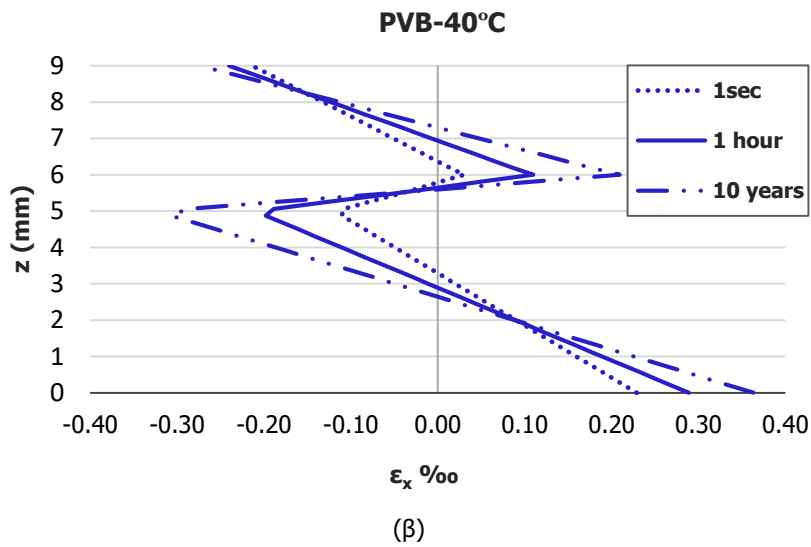


(β)

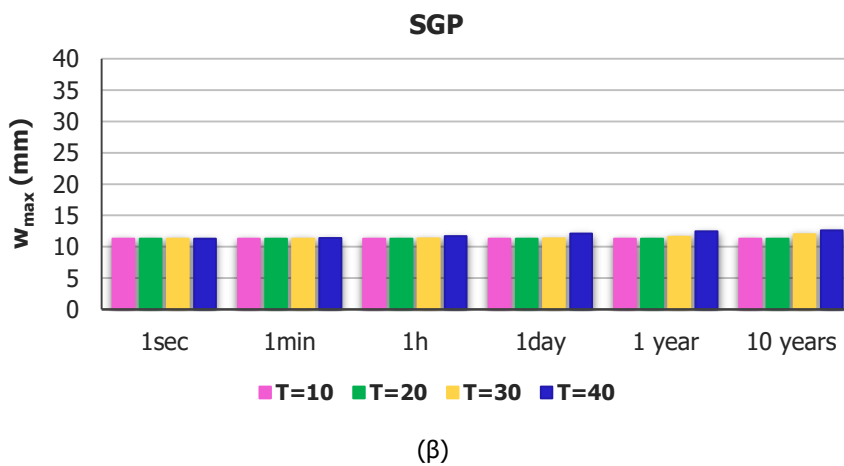
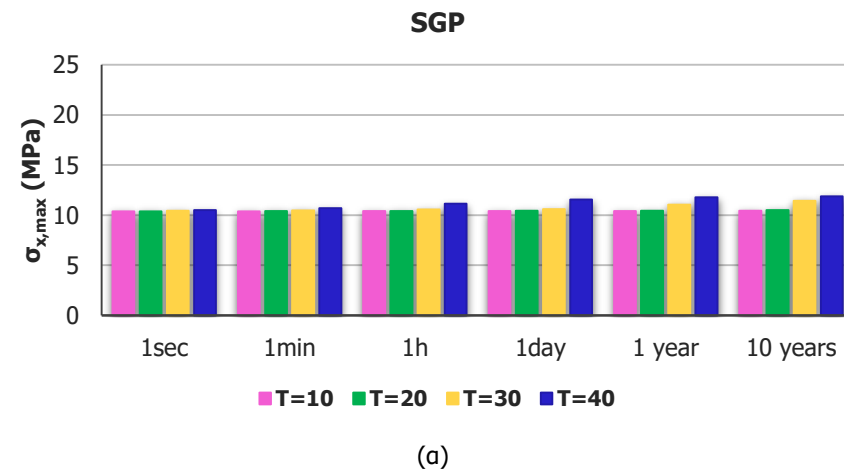
Εικόνα 3.6. (α) Μέγιστη τάση $\sigma_{x,max}$ και (β) μέγιστη βύθιση w_{max} για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και διάρκειας φόρτισης (PVB)



(α)

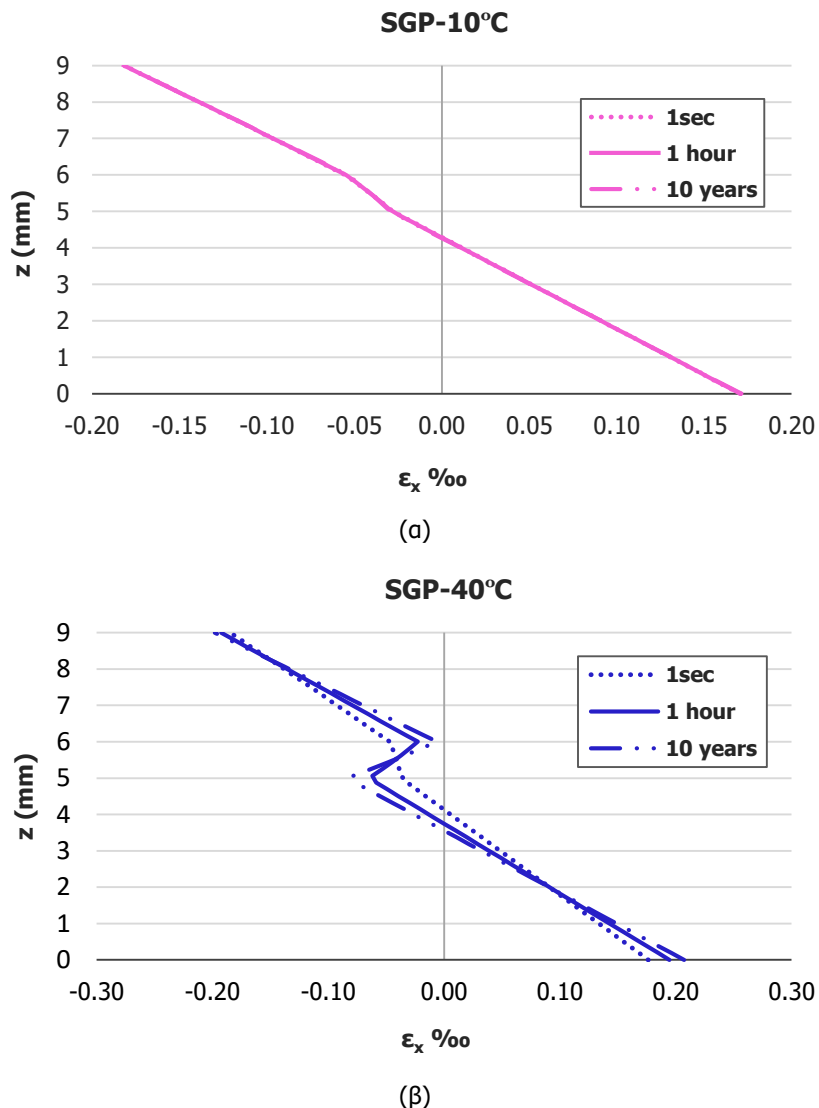


Εικόνα 3.7. Κατανομή των παραμορφώσεων ϵ_x καθ΄ ύψος της διατομής (α) για 10°C και (β) για 40°C (PVB)



Εικόνα 3.8. (α) Μέγιστη τάση $\sigma_{x,max}$ και (β) μέγιστη βύθιση w_{max} για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και διάρκειας φόρτισης (SGP)

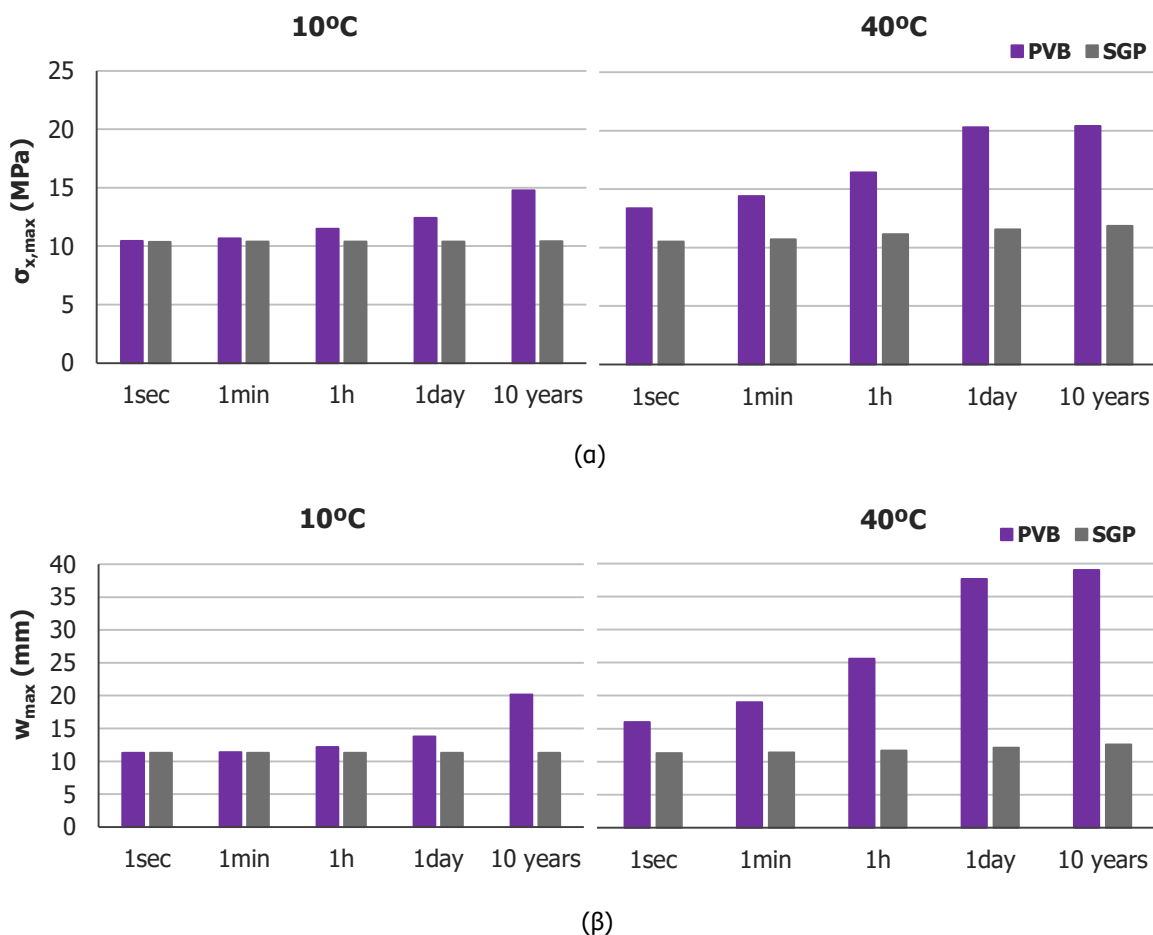
Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέγιστης τάσης $\sigma_{x,max}$ και μέγιστης βύθισης w_{max} για την περίπτωση του ιονισμένου πολυμερούς. Αποδεικνύεται πως οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα για όλες τις διάρκειες φόρτισης και χρειάζονται υψηλότερες θερμοκρασίες, που δεν απαντώνται στην Ελλάδα, προκειμένου να γίνει αντιληπτή κάποια αύξηση. Ακόμα και για τη θερμοκρασία των 40°C η κατανομή των παραμορφώσεων ϵ_x της Εικόνας 3.9(β) προσεγγίζει αυτή του μονολιθικού ορίου, καταδεικνύοντας τις έντονες διαφορές με την περίπτωση της βουτυράλης.



Εικόνα 3.9. Κατανομή των παραμορφώσεων ϵ_x καθύψος της διατομής (α) για 10°C και (β) για 40°C (SGP)

Με στόχο τη διευκόλυνση της άμεσης σύγκρισης των υλικών PVB και SGP παρατίθενται σε κοινά διαγράμματα στην Εικόνα 3.10 τα αποτελέσματα βυθίσεων και τάσεων ενδεικτικά για τις θερμοκρασίες των 10°C και 40°C. Είναι σαφές πως το SGP παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση σε ερπυσμό και χαλάρωση και εγγυάται τη σε μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίηση των δυνατοτήτων της πολυστρωματικής διάταξης. Βέβαια ο σχεδιασμός καλείται να αναδείξει τον βέλτιστο κάθε φορά συνδυασμό ασφάλειας και οικονομίας, όσον αφορά τόσο το πάχος του γυαλιού όσο και το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεση στρώση. Αυτό προϋποθέτει την εκτίμηση ενός μέτρου διάτμησης G_{int} που θα ανταποκρίνεται

στον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίων στον οποίο πρόκειται να υποβληθεί η κατασκευή κατά την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της, λαμβάνοντας όμως υπόψη τη μειωμένη πιθανότητα για ταυτόχρονη συνύπαρξη των πλέον δυσμενών τιμών των διαφόρων ανεξάρτητων δράσεων (η υπόθεση για παράδειγμα πως η μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου συμπίπτει με την υψηλότερη θερμοκρασία είναι μη ρεαλιστική).



Εικόνα 3.10. Σύγκριση των υλικών PVB και SGP
(α) ως προς τη μέγιστη τάση και (β) ως προς τη μέγιστη βύθιση

Οι κανονισμοί ορισμένων χωρών αγνοούν τη συνεισφορά της μεμβράνης, ακόμα και για φορτίσεις μικρής διάρκειας. Όταν όμως πρόκειται για προσόψεις κτιρίων, όπου κύρια φόρτιση είναι ο άνεμος, η λύση αυτή είναι μάλλον συντηρητική. Για τον λόγο αυτό οι ευρωπαϊκές οδηγίες περιγράφουν ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό του G_{PVB} , το οποίο συσχετίζει την ταχύτητα του ανέμου και τη διάρκεια της ανεμοπύσης με τη θερμοκρασία του γυαλιού και εξάγει ρεαλιστικές περιπτώσεις φόρτισης (load cases). Σε επέκταση αυτής της διαδικασίας προτείνεται απλουστευτικά η τιμή $G_{PVB}=0.4$ MPa για την περιγραφή της συμπεριφοράς του πολυμερούς κατά το μέγιστο φορτίο ανέμου. Βέβαια, το μοντέλο αυτό είναι περιορισμένης εφαρμογής, καθώς βασίζεται σε μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στη Γερμανία και θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για την κεντρική μόνο Ευρώπη. Ο επερχόμενος Ευρωκώδικας αναμένεται να περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού που θα προσαρμόζεται στις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες των χωρών.

3.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΠΑΧΟΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην κατανόηση της συμπεριφοράς του πολυστρωματικού γυαλιού, η οποία οφείλεται κυρίως στην εξέλιξη των υπολογιστικών εργαλείων αλλά και στη σταδιακή κατάκτηση των πληροφοριών που αποδίδουν με ακρίβεια την επίδραση της θερμοκρασίας και της διάρκειας φόρτισης στις ιδιότητες του πολυμερούς. Τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων υποστηρίζουν τη διεξαγωγή αναλύσεων με τρισδιάστατα μοντέλα, ικανών να προβλέψουν τη σχετική ολίσθηση των φύλλων γυαλιού σύμφωνα με το μέτρο διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης. Επειδή ωστόσο η στρώση αυτή έχει κατά μέσο όρο 10 φορές μικρότερο πάχος από το αυτό του γυαλιού, απαιτούνται δίκτυα μεγάλης πυκνότητας ώστε να αποτραπεί ο κίνδυνος “ill-conditioned” συστημάτων. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας αυξάνεται δραματικά, τα προσομοιώματα γίνονται πολύπλοκα και οι αναλύσεις καθίστανται χρονοβόρες και ασύμφορες, ιδιαίτερα σε επίπεδο προμελέτης.

Στα πλαίσια της αναζήτησης απλοποιημένων μεθόδων για τον σχεδιασμό, αναπτύχθηκε η ιδέα του ισοδύναμου πάχους, η οποία έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας και έχει ήδη ενσωματωθεί σε κανονισμούς σε Ευρώπη, Αμερική, Κίνα και Αυστραλία. Πρόκειται ουσιαστικά για την εύρεση του πάχους ενός μονολιθικού γυαλιού με ισοδύναμες καμπτικές ιδιότητες σε όρους τάσης ή βύθισης με το αρχικό πολυστρωματικό στοιχείο. Αυτό σημαίνει πως το μονολιθικό στοιχείο που προκύπτει θα παρουσιάσει την ίδια μέγιστη τάση ή βύθιση με το σύνθετο, όταν υποβληθεί στις ίδιες συνθήκες φόρτισης και στήριξης. Παρά το σαφές περιεχόμενο αυτής της ιδέας, στη βιβλιογραφία και τις τεχνικές προδιαγραφές επικρατεί σύγχυση σχετικά με την εφαρμογή της, καθώς συναντώνται διάφορες θεωρητικές προσεγγίσεις που προτείνουν διαφορετικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου πάχους.

3.4.1 Υπολογισμός ισοδύναμου πάχους κατά prEN-16612

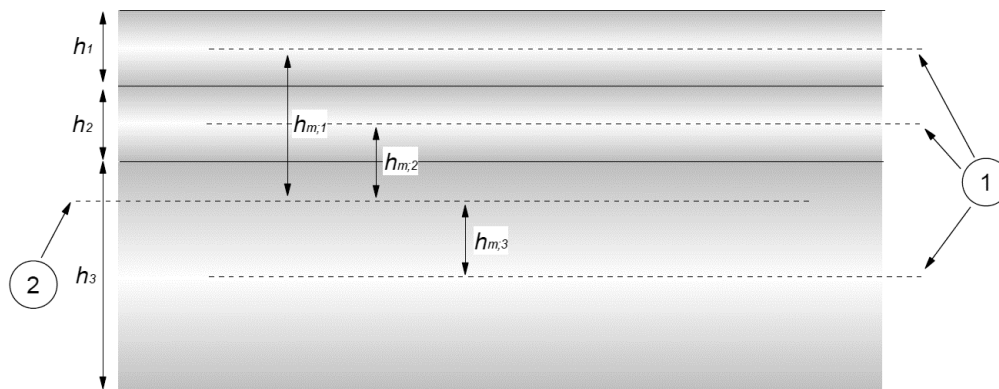
Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο prEN 16612 (που διαδέχεται το Πρότυπο prEN 13474), παραθέτει μια απλή μεθοδολογία για το ισοδύναμο πάχος, η οποία συνιστά πρακτικά μια γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ορίων monolithic και layered. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις ιδιότητες του πολυμερούς εκφράζονται μέσω ενός κοινού συντελεστή ω , όπως φαίνεται στις σχέσεις που ακολουθούν. Συγκεκριμένα, το ισοδύναμο πάχος για τον υπολογισμό της μέγιστης βύθισης δίνεται από τη σχέση:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega(\sum_i h_k h_{m,k}^2)}, \quad (3.1)$$

$$h_{ef,s,j} = \sqrt{\frac{(h_{ef,w})^3}{(h_j + 2\omega h_{m,j})}}, \quad (3.2)$$

όπου,

- ω συντελεστής που αντιπροσωπεύει τον βαθμό μεταφοράς των διατμητικών τάσεων μέσω της ενδιάμεσης στρώσης και κυμαίνεται μεταξύ 0 (όριο layered) και 1 (όριο monolithic),
- h_k, h_j τα πάχη των φύλλων γυαλιού (Εικόνα 3.11), και
- $h_{m,k}, h_{m,j}$ οι αποστάσεις του μέσου επιπέδου των στρώσεων k, j αντίστοιχα από το μέσο επίπεδο της σύνθετης διατομής (Εικόνα 3.11).



- 1 Μέσο επίπεδο φύλλων γυαλιού
- 2 Μέσο επίπεδο σύνθετης διατομής

Εικόνα 3.11. Παράδειγμα διατομής πολυστρωματικού γυαλιού

Τα πολυμερή ανάλογα με τη στιβαρότητά τους κατηγοριοποιούνται σε 4 οικογένειες, καθεμία από τις οποίες ορίζει ένα διαφορετικό εύρος τιμών για το ω , όπως φανερώνει ο Πίνακας 3.3 (family 0: $\omega=0$, family 1: $\omega=0-0.1$, family 2: $\omega=0-0.3$, family 4: $\omega=0-0.7$). Η τιμή που θα λάβει τελικά ο συντελεστής στα πλαίσια της κάθε κατηγορίας θα εξαρτηθεί από την περίπτωση φόρτισης. Ο Πίνακας 3.4 καταγράφει ορισμένες περιπτώσεις φορτίσεων, όπως αυτές καθορίστηκαν για τις ανάγκες του προτύπου prEN 16613.

Load case	Family 0	Family 1	Family 2	Family 3
Wind load (Mediterranean areas)	0	0	0.1	0.6
Wind load (other areas)	0	0.1	0.3	0.7
Personnel load - normal duty	0	0	0.1	0.5
Personnel load - crowds	0	0	0	0.3
Glass for walking on for maintenance	0	0	0	0.1
Snow loads - external canopies	0	0	0.1	0.3
Snow load - roofs	0	0	0	0.1
Permanent load	0	0	0	0

Πίνακας 3.3. Τιμή του ω ως συνάρτηση της οικογένειας στιβαρότητας και του είδους φόρτισης

Load case	Load duration	Temperature range
Wind load (Mediterranean areas)	3 seconds	0°C < θ < 30°C
Wind load (other areas)	3 seconds	0°C < θ < 20°C
Personnel balustrade loads - normal duty	30 seconds	0°C < θ < 30°C
Personnel balustrade loads - crowds	5 minutes	0°C < θ < 30°C
Glass for walking on for maintenance	30 minutes	0°C < θ < 40°C
Snow load - external canopies and roofs of unheated buildings	3 weeks	-20°C < θ < 0°C
Snow load - roofs of heated buildings	5 days	-20°C < θ < 20°C
Permanent load	50 years	-20°C < θ < 60°C

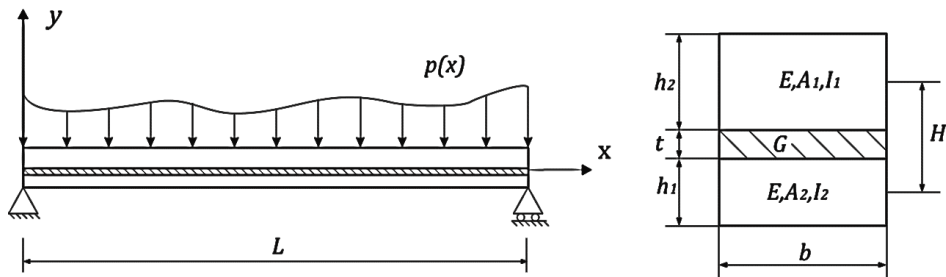
Πίνακας 3.4. Περιπτώσεις φόρτισης

3.4.2 Εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους

Αναμφισβήτητα, η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω απλοποιεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τους υπολογισμούς που απαιτεί η μελέτη του πολυστρωματικού γυαλιού, αγνοεί ωστόσο την επίδραση σημαντικών παραμέτρων, όπως οι διαστάσεις του φορέα, ο τύπος του φορτίου και οι συνοριακές συνθήκες. Στη συνέχεια παρατίθενται δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους, εκ των οποίων η πρώτη περιλαμβάνεται στο Αμερικάνικο Πρότυπο ASTM E1300 και η δεύτερη στις Ιταλικές Οδηγίες CNR-DT 210 για το δομικό γυαλί.

Μέθοδος Wölfel-Bennison – ASTM E1300

Η προσέγγιση αυτή προέρχεται από τη θεωρία σύνθετων δομών τύπου σάντουιτς, που εισήγαγε το 1987 ο Wölfel, δεδομένου ότι το σύνθετο γυαλί μπορεί να θεωρηθεί μια ιδιαίτερη μορφή κατασκευής σάντουιτς (η δυσκαμψία παρέχεται από τα φύλλα γυαλιού, ενώ η μεμβράνη λειτουργεί μόνο σε διάτμηση). Έστω η σύνθετη δοκός της Εικόνας 3.12, μήκους l και πλάτους b , η οποία αποτελείται από δύο στρώσεις γυαλιού πάχους h_1 , h_2 , ενωμένες με μια στρώση πολυμερούς πάχους t .



Εικόνα 3.12. Αμφιέρειστη δοκός με σύνθετη διατομή 3 στρώσεων

Ο βαθμός της διατμητικής σύνδεσης των φύλλων γυαλιού λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός συντελεστή Γ (τιμές από 0 έως 1), ο οποίος εξαρτάται από το μέτρο διάτμησης G της ενδιάμεσης στρώσης, τις ιδιότητες του γυαλιού, τη γεωμετρία της διατομής και τις διαστάσεις του φορέα. Για τον προσδιορισμό του ο Wölfel πρότεινε την έκφραση:

$$\Gamma = \frac{1}{1 + \beta \frac{EI_s t}{GH^2 a^2}}, \quad (3.3)$$

στην οποία υπεισέρχονται τα μεγέθη:

$$I_s = h_1 d_2^2 + h_2 d_1^2, \quad d_1 = \frac{H h_1}{h_1 + h_2}, \quad d_2 = \frac{H h_2}{h_1 + h_2}, \quad H = 0.5(h_1 + h_2) + t \quad (3.4)$$

όπου,

E το μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού ($E=70000$ MPa)

G το μέτρο διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης

a το μήκος της μικρότερης διάστασης.

Η παράμετρος β εκφράζει την εξάρτηση από τις συννοριακές συνθήκες και τον τύπο του φορτίου. Ο Bennison υιοθέτησε για όλες τις περιπτώσεις την τιμή $\beta=9.6$, αν και στη θεωρία του Wölfel η τιμή αυτή συνδέεται αποκλειστικά με την περίπτωση της αμφιέριστης δοκού υπό ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο. Αυτός είναι και ο λόγος που η αξιοπιστία της μεθόδου αμφισβητείται όταν η μελέτη αφορά γενικότερης φύσης εφαρμογές.

Τελικά, η μέγιστη βύθιση υπολογίζεται σύμφωνα με το ισοδύναμο πάχος της σχέσης:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + 12\Gamma_s}, \quad (3.5)$$

ενώ η μέγιστη τάση των φύλλων 1 και 2 σύμφωνα με τα ισοδύναμα πάχη των σχέσεων:

$$h_{ef,\sigma,1} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_1 + 2\Gamma_{s,2}}}, \quad h_{ef,\sigma,2} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_2 + 2\Gamma_{s,1}}} \quad (3.6)$$

αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός αρκεί να γίνει για το φύλλο μεγαλύτερου πάχους, εκτός και αν η διατομή συντίθεται από διαφορετικούς τύπους γυαλιού με διαφορετικά όρια επιτρεπόμενων τάσεων. Όσον αφορά την επέκταση της μεθόδου σε παραπάνω από δύο στρώσεις γυαλιού, αυτό που προτείνεται είναι η εκτέλεση μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Για την περίπτωση της βύθισης υπολογίζεται αρχικά το ισοδύναμο πάχος για τις δύο πρώτες στρώσεις ($h_{ef,w,12}$), στη συνέχεια το ισοδύναμο πάχος της διατομής που συνθέτουν η μονολιθική που μόλις καθορίστηκε και η τρίτη στρώση και ούτω καθεξής. Στην περίπτωση της τάσης η ακολουθία των πράξεων ενέχει κάποιες ασάφειες. Συγκεκριμένα, μετά τον προσδιορισμό των $h_{ef,\sigma,1}$ και $h_{ef,\sigma,2}$, στο δεύτερο βήμα, δεν είναι ξεκάθαρο ποιο από τα δύο πάχη θα χρησιμοποιηθεί για τον συνδυασμό με το επόμενο φύλλο γυαλιού. Γενικά, συστήνεται ως ασφαλέστερη η επιλογή της μικρότερης εκ των δύο τιμών και η διατήρηση αυτής της λογικής σε όλα τα διαδοχικά βήματα. Μια άλλη εναλλακτική, η οποία φέρεται να καταλήγει και στα πιο ακριβή αποτελέσματα, είναι να θεωρείται το ισοδύναμο πάχος $h_{ef,w,12}$, το οποίο αφορά στη βύθιση, καθώς είναι αντιπροσωπευτικό της δυσκαμψίας του στοιχείου που μορφώνουν τα φύλλα 1, 2.

Μέθοδος Enhanced Effective Thickness (EET) – CNR-DT 210

Η μέθοδος Enhanced Effective Thickness (EET) επιδιώκει να βρει, μέσω της ελαχιστοποίησης της ενέργειας παραμόρφωσης, την καλύτερη προσέγγιση της απόκρισης του πολυστρωματικού γυαλιού ανάμεσα σε συγκεκριμένες συναρτήσεις σχήματος που περιγράφουν την παραμορφωμένη επιφάνεια. Οι βασικές παραδοχές του θεωρητικού υπόβαθρου είναι οι εξής: (i) η ενδιάμεση στρώση λειτουργεί μόνο σε διάτμηση, (ii) η διατμητική παραμόρφωση του γυαλιού είναι αμελητέα, (iii) όλα τα υλικά συμπεριφέρονται γραμμικά και ελαστικά και (iv) η επιρροή φαινομένων γεωμετρικής μη-γραμμικότητας είναι μηδαμινή. Μέχρι στιγμής έχει διατυπωθεί για την περίπτωση δύο και τριών φύλλων γυαλιού τυχαίου πάχους, ενώ γενικεύεται και για διατάξεις περισσότερων φύλλων, ίσου όμως πάχους. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα για τις δύο πρώτες περιπτώσεις.

▪ Δύο φύλλα γυαλιού τυχαίου πάχους

Χρησιμοποιώντας ως δοκό αναφοράς αυτή της Εικόνας 3.12 υπολογίζεται το εμβαδό και η ροπή αδράνειας του κάθε φύλλου:

$$A_1 = bh_1, \quad A_2 = bh_2, \quad I_1 = \frac{bh_1^3}{12}, \quad I_2 = \frac{bh_2^3}{12} \quad (3.7)$$

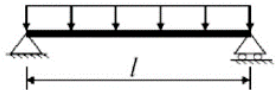

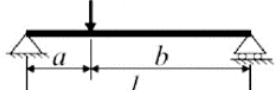

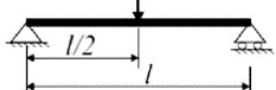
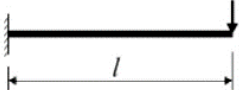


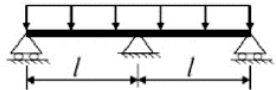
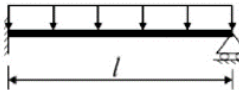
Όταν η συμπεριφορά της διάταξης πλησιάζει το όριο layered, η ροπή αδράνειας της δοκού ισούται με το άθροισμα I_1+I_2 . Στο άλλο άκρο, του ορίου monolithic, η ροπή αδράνειας εκφράζεται από τη σχέση:

$$I_{\text{tot}} = I_1 + I_2 + \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} H^2 \quad (3.8)$$

Η παράμετρος η έχει ήδη οριστεί από την εξίσωση (3.4). Αντίστοιχο ρόλο με τον αδιάστατο συντελεστή Γ της μεθόδου Wölfel-Bennison, διαδραματίζει εδώ ο συντελεστής η , ο οποίος προσαρμόζει κατάλληλα την απόκριση μεταξύ των δύο ορίων (όριο layered: $\eta=0$, όριο monolithic: $\eta=1$) και υπολογίζεται ως:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{Et}{Gb} \frac{I_1 + I_2}{I_{\text{tot}}} \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \Psi} \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής Ψ καθορίζεται ανάλογα με το φορτίο και τις συνοριακές συνθήκες, οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις των οποίων δίνονται στον Πίνακα 3.5.

LOADING AND BOUNDARY CONDITIONS	Ψ	LOADING AND BOUNDARY CONDITIONS	Ψ
	$\frac{168}{17l^2}$		$\frac{42}{l^2}$
	$\frac{15}{l^2 + 2ab}$		$\frac{14}{5l^2}$
	$\frac{10}{l^2}$		$\frac{5}{2l^2}$
	$\frac{10}{l^2}$		$\frac{45}{14l^2}$
	$\frac{21}{l^2}$		$\frac{21}{l^2}$

Πίνακας 3.5. Τιμές του συντελεστή Ψ ανάλογα με το φορτίο και τις συνοριακές συνθήκες

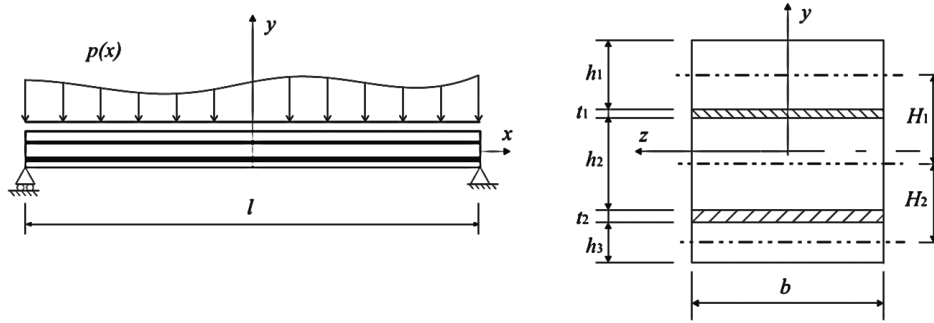
Τελικά, ανακαλώνοντας τις σχέσεις (3.4), οι σχέσεις για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους παίρνουν τη μορφή:

$$h_{\text{ef,w}} = \frac{1}{\left(\frac{\eta}{h_1^3 + h_2^3 + 12I_s} + \frac{1-\eta}{h_1^3 + h_2^3} \right)^{1/3}} \quad (3.10)$$

$$h_{\text{ef},\sigma,1} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\eta d_2}{h_1^3 + h_2^3 + 12I_s} + \frac{h_1}{h_{\text{ef,w}}^3}}}, \quad h_{\text{ef},\sigma,2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\eta d_1}{h_1^3 + h_2^3 + 12I_s} + \frac{h_2}{h_{\text{ef,w}}^3}}} \quad (3.11)$$

▪ Τρία φύλλα γυαλιού τυχαίου πάχους

Έστω η δοκός της Εικόνας 3.13, μήκους l και πλάτους b , η οποία συντίθεται από 3 φύλλα γυαλιού, πάχους h_1 , h_2 και h_3 και μέτρου ελαστικότητας E , ενωμένα με στρώσεις πολυμερούς (πάχους t_1 και t_2 αντίστοιχα) και μέτρου διάτμησης G . Η δοκός φορτίζεται με ένα κατανομημένο, όχι απαραίτητα ομοιόμορφο, φορτίο.



Εικόνα 3.13. Αμφιέρειστη δοκός με σύνθετη διατομή 5 στρώσεων

Κατ' αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση, ορίζονται αρχικά τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των στρώσεων:

$$A_i = h_i b, I_i = \frac{b h_i^3}{12} \quad (i=1, \dots, 3), H_1 = t_1 + \frac{h_1 + h_2}{2}, H_2 = t_2 + \frac{h_2 + h_3}{2} \quad (3.12)$$

Συμβολίζοντας με d_i ($i=1, \dots, 3$) την προσημασμένη απόσταση (θετική λαμβάνεται η φορά κατά τον θετικό ημιάξονα των y) του μέσου επιπέδου κάθε στρώσης γυαλιού από το μέσο επίπεδο της σύνθετης διατομής, προκύπτουν:

$$d_1 = \frac{h_2 H_1 + h_3 (H_1 + H_2)}{h_1 + h_2 + h_3}, d_2 = -\frac{h_1 H_1 - h_3 H_2}{h_1 + h_2 + h_3}, d_3 = -\frac{h_2 H_2 + h_1 (H_1 + H_2)}{h_1 + h_2 + h_3} \quad (3.13)$$

Τότε, η συνολική ροπή αδράνειας της διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + A_1 d_1^2 + A_2 d_2^2 + A_3 d_3^2, \quad (3.14)$$

και ο συντελεστής η από τη σχέση:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{E}{Gb I_{tot} \left(\frac{H_1^2}{t_1} + \frac{H_2^2}{t_2} \right)} (I_1 + I_2 + I_3) (A_1 d_1^2 + A_2 d_2^2 + A_3 d_3^2) \Psi} \quad (3.15)$$

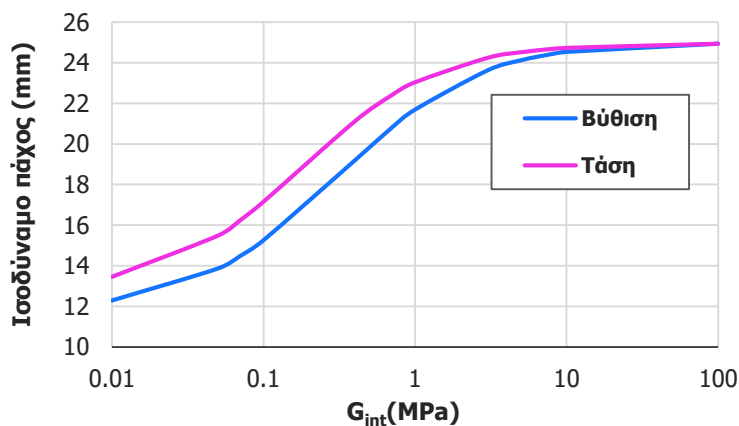
Η κατάλληλη τιμή για τον συντελεστή Ψ εξάγεται, όπως και προηγουμένως, από τον Πίνακα 3.5. Μπορεί πλέον να υπολογιστεί το ισοδύναμο πάχος, όπως υπαγορεύουν οι ακόλουθες σχέσεις, όταν ζητούμενο είναι η μέγιστη βύθιση ή η μέγιστη τάση αντίστοιχα.

$$\frac{1}{(h_{ef,w})^3} = \frac{\eta}{h_1^3 + h_2^3 + h_3^3 + 12(h_1 d_1^2 + h_2 d_2^2 + h_3 d_3^2)} + \frac{(1-\eta)}{(h_1^3 + h_2^3 + h_3^3)}, \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{(h_{ef,\sigma,i})^2} = \frac{2\eta|d_i|}{h_1^3 + h_2^3 + h_3^3 + 12(h_1d_1^2 + h_2d_2^2 + h_3d_3^2)} + \frac{h_i}{h_{ef,w}^3} \quad (3.17)$$

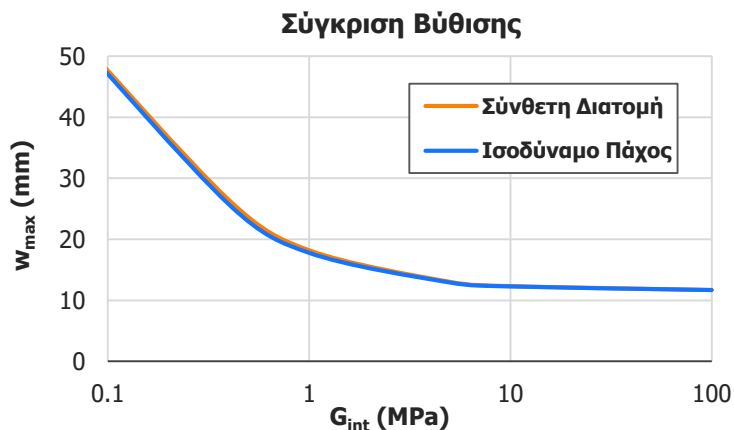
3.4.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου ΕΕΤ

Ακολουθεί η εφαρμογή της μεθόδου ΕΕΤ στην αμφιέριστη δοκό της Εικόνας 3.13, για την οποία έχουν επιλεγεί οι διαστάσεις: $l=3000$ mm, $b=500$ mm, $h_1=10$ mm, $h_2=8$ mm, $h_3=5$ mm, $t_1=1.52$ mm, $t_2=0.76$ mm. Το διάγραμμα της Εικόνας 3.14 καταγράφει τη μεταβολή της τιμής του ισοδύναμου πάχους, όπως αυτό προκύπτει από τις εξισώσεις (3.16), (3.17), με την αύξηση του μέτρου διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης G_{int} .

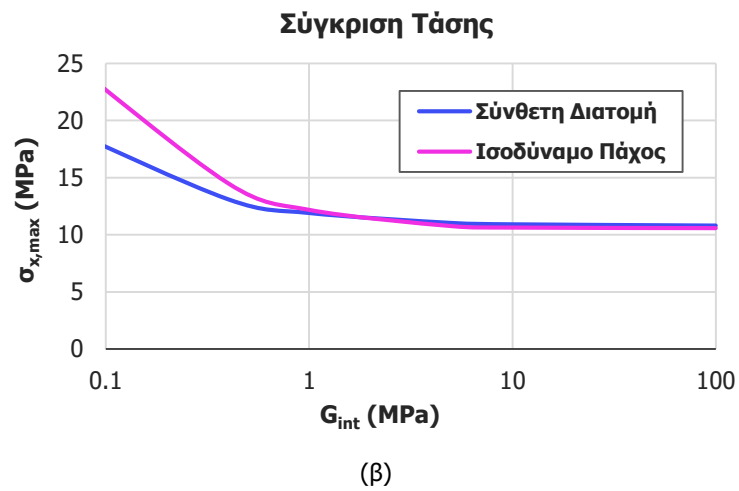


Εικόνα 3.14. Ισοδύναμο πάχος για τον υπολογισμό της μέγιστης βύθισης και της μέγιστης τάσης συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int}

Στη δοκό ασκείται ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $p=1$ kPa. Οι επιλύσεις, οι οποίες αφορούν ένα εύρος τιμών του G_{int} από 0.1 MPa έως 100 MPa, υλοποιούνται στο πρόγραμμα ADINA, τόσο για τη σύνθετη διατομή όσο και για τις ισοδύναμες μονολιθικές. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Παρατηρείται πως οι μέγιστες βυθίσεις w_{max} σχεδόν ταυτίζονται, ενώ μικρές αποκλίσεις εντοπίζονται μεταξύ των μέγιστων τάσεων $\sigma_{x,max}$ μόνο κοντά στο layered όριο.



(α)



Εικόνα 3.15. Σύγκριση αποτελεσμάτων για σύνθετη και ισοδύναμη μονολιθική διατομής (α) ως προς τις μέγιστες βυθίσεις, (β) ως προς τις μέγιστες τάσεις

4 ΧΡΗΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΕ ΠΡΟΣΟΨΕΙΣ

4.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΑΛΩΣΗΣ

Οι σύγχρονες τεχνολογίες κατεργασίας και μορφοποίησης των γυάλινων στοιχείων εξασφαλίζουν την παραγωγή υαλοπινάκων σε πλήθος μορφών, σχεδίων, διαστάσεων και υφών. Η αξιοποίηση αυτών των υαλοπινάκων σε προσόψεις αποτελεί μια δημοφιλή επιλογή που ανταποκρίνεται στις σύγχρονες απαιτήσεις αισθητικής και λειτουργίας των κτιρίων, καθώς το κέλυφος που διαμορφώνεται συμβάλλει τόσο στην ενίσχυση της προστασίας του κτιρίου, όσο και στην έκφραση της αρχιτεκτονικής του ταυτότητας. Η επιθυμία για μεγιστοποίηση της διαφάνειας της πρόσοψης και η ανάπτυξη με τα χρόνια της απαιτούμενης τεχνογνωσίας οδήγησαν σε συστήματα στήριξης και τεχνικές παγίωσης υψηλής αντοχής που επιτρέπουν τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων, χωρίς να απαιτούνται φέροντα στοιχεία μεγάλου βάρους, ενώ παράλληλα εγγυώνται ένα αισθητικό αποτέλεσμα πλήρως ενοποιημένο με το εξωτερικό περιβάλλον. Στα λειτουργικά τους πλεονεκτήματα προσμετρώνται επίσης η ευκολία τοποθέτησης, οι περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης και η ενίσχυση της μονωτικής ικανότητας.

Η πρόσοψη ενός κτιρίου υπόκειται στη φόρτιση του ανέμου, σε αιφνίδιες μεταβολές της θερμοκρασίας, σε τυχηματικές δράσεις (π.χ. έκρηξη, βανδαλισμός), ενώ ταυτόχρονα καλείται να φέρει το ίδιο βάρος της, να παραλάβει τις παραμορφώσεις λόγω της σχετικής μετακίνησης ορόφου και να εξασφαλίσει στεγανότητα και ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης. Ο σωστός λοιπόν σχεδιασμός της προϋποθέτει τη σε βάθος κατανόηση της λειτουργίας κάθε στοιχείου που την αποτελεί, καθώς και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος. Ανάλογα με το κριτήριο που θα χρησιμοποιηθεί (σύστημα στήριξης, μέθοδος ανέγερσης, σύστημα υάλωσης, επιλογή υλικών) διακρίνονται πολυάριθμοι τύποι γυάλινων προσόψεων, καθένας από τους οποίους παρουσιάζει τα δικά του χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες. Η παρούσα εργασία εστιάζει στα συστήματα υάλωσης, δηλαδή στον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η στερέωση των υαλοπινάκων στην υποκείμενη κατασκευή, κατηγοριοποιώντας τα υαλοπετάσματα σε ενιαίας και αναρτημένης όψης. Η διαφορά των δύο συστημάτων έγκειται στην ύπαρξη ή όχι πλαισίου που περιβάλλει το γυαλί.

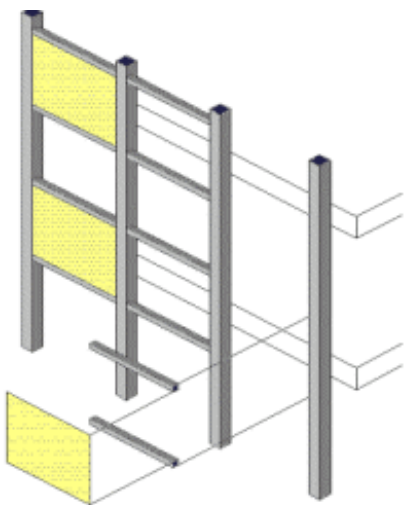
4.1.1 Συστήματα με πλαίσιο ή υαλοπετάσματα (Curtain walls)

Τα πλαισιωτά συστήματα αναφέρονται συχνά ως τοίχοι όψεως που στερεώνονται στον σκελετό του κτιρίου, διαχωρίζονται όμως από αυτόν και εκπληρώνουν αυτόνομα ή σε συνεργασία με άλλα στοιχεία της κατασκευής όλες τις λειτουργίες ενός εξωτερικού τοίχου, χωρίς να συμβάλλουν στα φέροντα χαρακτηριστικά της δομής. Αποτελούνται από κατακόρυφους ορθοστάτες (mullions) και οριζόντιες

τραβέρσες (transoms) αλουμινίου (Εικόνες 4.1, 4.2), που παρέχουν περιμετρική στήριξη στους υαλοπίνακες και αγκυρώνονται στον φέροντα οργανισμό με τη βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού ανοξείδωτου χάλυβα. Πρόκειται για αυτοφερόμενες κατασκευές που μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα σε κάθε τύπο κτιρίου. Ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής και τη σειρά με την οποία εκτελούνται οι εργασίες διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες, τα κλασικά και τα δομικά συστήματα.

Κλασικά Υαλοπετάσματα (Stick Wall System)

Αποτελεί την πρωταρχική μορφή της τεχνολογίας των υαλοπετασμάτων, στην οποία τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος προετοιμάζονται (επεξεργάζονται και κόβονται στις κατάλληλες διαστάσεις) στο εργοστάσιο και στη συνέχεια μεταφέρονται στο εργοτάξιο, όπου πραγματοποιείται η ανέγερσή τους τμηματικά. Συνήθως, όπως δείχνει και η Εικόνα 4.1, αρχικά τοποθετούνται οι ορθοστάτες, οι οποίοι στερεώνονται στις πλάκες διαδοχικών ορόφων και ακολουθούν οι τραβέρσες, οι οποίες στερεώνονται στους ορθοστάτες με τη βοήθεια οπών και εγκοπών που έχουν ήδη προβλεφθεί για την υποδοχή των εξαρτημάτων σύνδεσης. Σχηματίζεται με αυτόν τον τρόπο ένας κάναβος, επί του οποίου τοποθετούνται τελικά οι υαλοπίνακες με τη λογική των κουφωμάτων. Η συγκράτηση των στοιχείων πλήρωσης επιτυγχάνεται με χρήση σφινγκτήρα-πλάκας πίεσης ή άλλης ειδικής διάταξης. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία και προσαρμόζεται εύκολα σε προσόψεις πολύπλοκης γεωμετρίας καθώς και μεγάλων ή μεταβαλλόμενου μεγέθους ανοιγμάτων. Το κόστος μεταφοράς διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα λόγω του περιορισμένου όγκου που καταλαμβάνουν τα μεμονωμένα στοιχεία. Παρόλα αυτά η συναρμολόγηση του πλαισίου στις συνθήκες εργοταξίου δυσχεραίνει την αυστηρή επίβλεψη της διαδικασίας και εγκυμονεί κινδύνους κυρίως όσον αφορά τη στεγανότητα της κατασκευής.

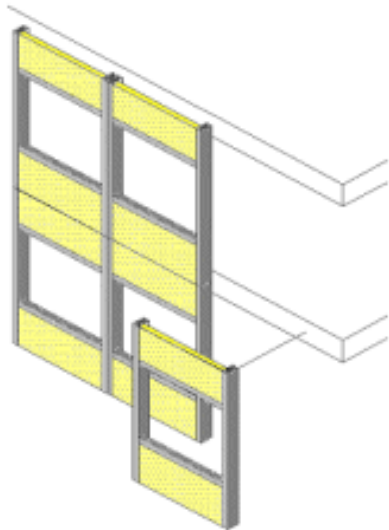


Εικόνα 4.1. Σύστημα κλασικού υαλοπετάσματος

Δομικά υαλοπετάσματα (Unitized Wall System)

Πρόκειται για την εξελιγμένη έκφανση των πλαισιωτών συστημάτων, όπου το πλαίσιο προ-συναρμολογείται στο εργοστάσιο και φέρει προ-ενσωματωμένα τα στοιχεία πλήρωσης, ώστε να φτάνει ως ένα ενιαίο σύνολο στο εργοτάξιο (Εικόνα 4.2). Εκεί, οι εργασίες που εκτελούνται περιλαμβάνουν απλά την ανέγερση, τοποθέτηση, ευθυγράμμιση και στερέωση των ολοκληρωμένων πετασμάτων στις προκαθορισμένες θέσεις αγκύρωσής τους. Το ύψος του κάθε πετάσματος αντιστοιχεί στο ύψος ενός

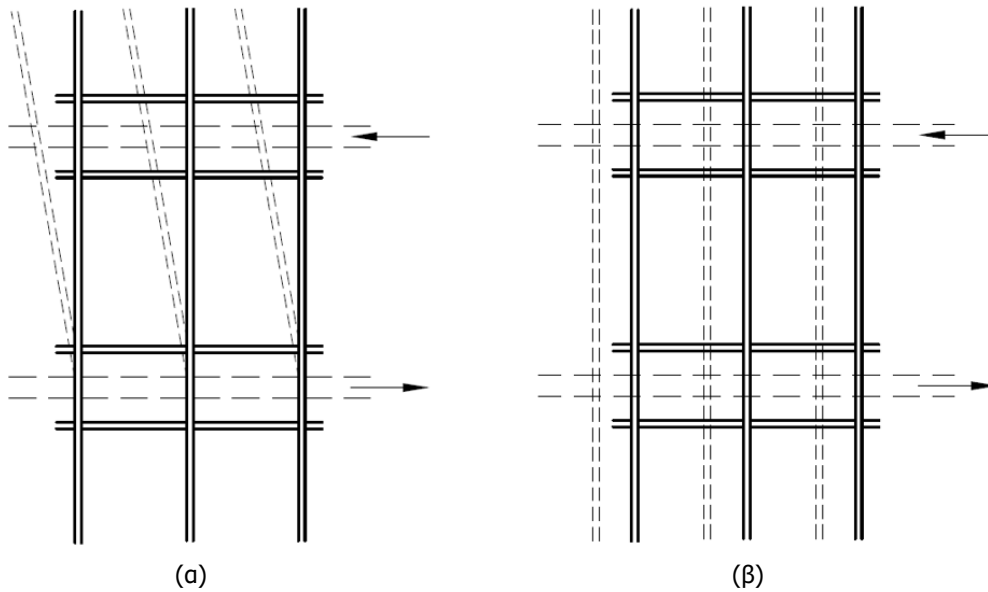
ορόφου κατ'ελάχιστο. Το δομικό λοιπόν σύστημα, έχοντας μεταφέρει την πλειονότητα των απαιτούμενων εργασιών στο περιβάλλον του εργοστασίου, επιτρέπει τον καλύτερο ποιοτικό έλεγχο της διαδικασίας, αλλά και την ταχύτερη εγκατάσταση των πετασμάτων σε σχέση με το κλασικό σύστημα. Μάλιστα ο περιορισμένος αριθμός αρμών που χρειάζεται να διαμορφωθούν σε αυτήν την περίπτωση επιτόπου του έργου μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης προβλημάτων στεγανότητας. Θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί πως το σύστημα αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος μεταφοράς και μεγαλύτερη αναμονή για την έναρξη των εργασιών εγκατάστασης.



Εικόνα 4.2. Σύστημα δομικού υαλοπετάσματος

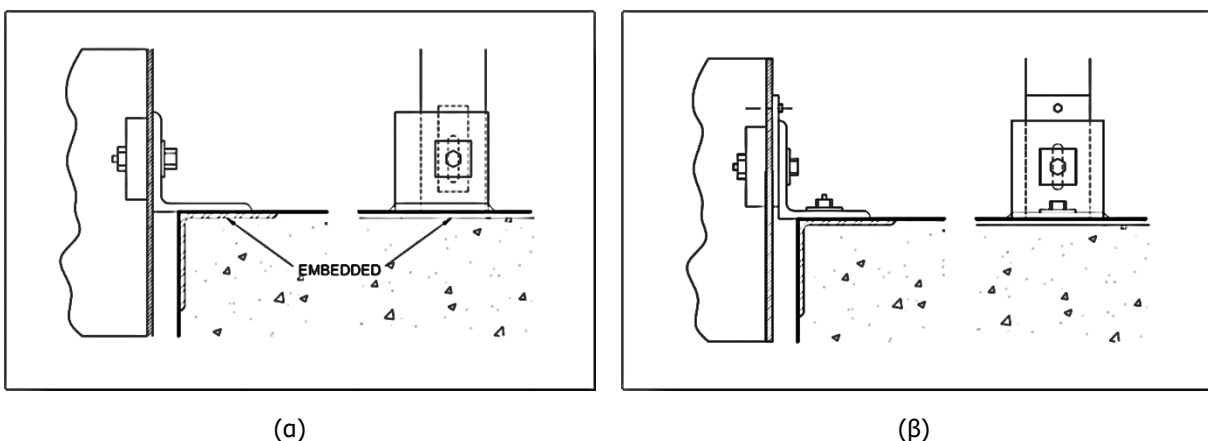
Οι περισσότερες προσόψεις που περιγράφουν τα αρχιτεκτονικά σχέδια μπορούν να υλοποιηθούν με οποιοδήποτε από τα δύο συστήματα και δεν υπάρχουν κριτήρια που να επιβάλλουν ρητά την επιλογή του ενός έναντι του άλλου. Αποτελεί ωστόσο κοινή πρακτική, όταν πρόκειται για μικρής έκτασης ή μικρού ύψους κατασκευές να προτιμάται η λύση των κλασικών υαλοπετασμάτων, ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθος του έργου και η επαναληψιμότητα των απαιτούμενων εργασιών, τα δομικά υαλοπετάσματα τείνουν να επικρατήσουν ως η οικονομικότερη επιλογή. Φυσικά πρέπει να προσμετρηθούν παράγοντες όπως η τοποθεσία του εργοταξίου και η απόσταση από το εργοστάσιο καθώς και η ύπαρξη των απαραίτητων εγκαταστάσεων για την κατασκευή των δομικών πετασμάτων. Επίσης, όταν η μελέτη προβλέπει σημαντικές επιβαλλόμενες μετακινήσεις λόγω σεισμού, τα δομικά πετάσματα αποτελούν το καταλληλότερο σύστημα χάρη στον ειδικό σύνδεσμο που εντοπίζεται στο ύψος κάθε πλάκας και επιτρέπει στα πλαίσια διαδοχικών ορόφου να κινούνται ανεξάρτητα εξασφαλίζοντας ένα είδος σεισμικής μόνωσης (stack joint). Περιορίζεται με αυτόν τον τρόπο σημαντικά ο κίνδυνος θραύσης των υαλοπινάκων, που παρουσιάζεται πολύ πιο έντονος στα κλασικά συστήματα. Η Εικόνα 4.3 αντιπαραθέτει τη συμπεριφορά των δύο συστημάτων κατά τη σχετική μετακίνηση των ορόφων.

Επισημαίνεται βέβαια πως και στις δύο περιπτώσεις επιδιώκεται η ανάληψη του συνόλου των μετακινήσεων από το σύστημα στερέωσης και τους αρμούς διαστολής, ώστε να αποτρέπεται η εισαγωγή τάσεων στο επίπεδο του γυαλιού και η ενδεχόμενη αστοχία του. Οι μετακινήσεις αυτές μπορεί να προέρχονται τόσο από σεισμικές δράσεις, όσο και από θερμικές διαστολές και συστολές, οριζόντιες δυνάμεις πίεσης και αναρρόφησης λόγω ανέμου, παραμορφώσεις της κατασκευής λόγω ερπυσμού. Οι συστολοδιαστολές συγκεκριμένα απαιτούν ειδική μέριμνα, καθώς υλικά με διαφορετικές ιδιότητες καλούνται να συνεργαστούν όχι μόνο στις συνδέσεις υαλοπετάσματος και φέροντος οργανισμού, αλλά



Εικόνα 4.3. Παραμόρφωση υαλοπετάσματος λόγω σχετικής μετακίνησης ορόφου
(α) στο κλασικό και (β) στο δομικό σύστημα

και στη σύνθεση του καθεαυτού πετάσματος. Στην πρώτη περίπτωση παραλαμβάνονται κυρίως από τα στοιχεία στερέωσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση απορροφούνται από τους αρμούς διαστολής στους ορθοστάτες. Τα στοιχεία στερέωσης θα πρέπει να υπολογίζονται, κατά τη λογική των διατομών αλουμινίου, ώστε να αντέχουν στα ίδια φορτία, τις ανεμοπιέσεις, το χιόνι, τις έντονες βροχοπτώσεις και τον σεισμό. Η Εικόνα 4.4 παραθέτει ενδεικτικά δύο μορφές αγκύρωσης του ορθοστάτη στην πλάκα του ορόφου που συναντώνται συχνά (α) στα κλασικά και (β) στα δομικά συστήματα. Όσον αφορά τους αρμούς, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή σφράγισή τους, δεδομένου ότι μικρές αστοχίες σφράγισης είναι συχνά η κύρια αιτία των ζημιών που εμφανίζονται στην πρόσοψη. Το βάρος πέφτει στην επιλογή των κατάλληλων υλικών πλήρωσης, που θα έχουν την απαραίτητη αντοχή στη θερμοκρασία της περιοχής και θα παρέχουν την ιδιότητα της στεγάνωσης.



Εικόνα 4.4. Αγκύρωση ορθοστάτη στην πλάκα ορόφου
(α) στο κλασικό και (β) στο δομικό σύστημα

4.1.2 Συστήματα χωρίς πλαίσιο ή σημειακής ανάρτησης (Point-fixed systems)

Η σημειακή ανάρτηση αποτελεί μια σύγχρονη τεχνική διαμόρφωσης γυάλινων προσόψεων, απαλλαγμένη από τη χρήση των συμβατικών πλαισίων. Ανοξείδωτα εξαρτήματα υψηλής ποιότητας, αναλαμβάνουν τη στήριξη του υαλοπινάκα μέσω κοχλίωσης ή σημειακής πάκτωσης (συνήθως κοντά στις τέσσερις γωνίες) και δημιουργούν μια καθαρή γυάλινη επιφάνεια που δε διακόπτεται από ορθοστάτες και τραβέρσες. Τα εξαρτήματα αυτά έχουν την ιδιότητα να απορροφούν τα στατικά και τα δυναμικά φορτία και να τα μεταφέρουν στο σύστημα στήριξης, που έχει τις περισσότερες φορές τη μορφή δικτύου καλωδίων ή δικτυώματος. Οι αρμοί μεταξύ διαδοχικών υαλοπινάκων στεγανοποιούνται με ελαστικό στόκο ή κόλλα.

4.1.2.1 Κοχλιωτά συστήματα (Point-fixed bolted systems)

Το κοχλιωτό σύστημα περιλαμβάνει τη διάτρηση των υαλοπινάκων και την επικοινωνία με το σύστημα στήριξης μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων κοχλιών. Μεμβράνη θερμοπλαστικού υλικού παρεμβάλλεται συνήθως μεταξύ γυαλιού και κοχλία, ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια μέσω της οποίας μεταφέρονται τα φορτία και να αποφεύγονται οι υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα των οπών λόγω σημειακής επαφής. Στην περίπτωση των πολυστρωματικών υαλοπινάκων απαιτείται επιπλέον η τοποθέτηση ενός δαχτυλιδιού στεγάνωσης στην περίμετρο της οπής που θα εμποδίζει την παροίση αέρα μεταξύ των στρώσεων. Κοχλίες με φρεζαρισμένες κεφαλές αντικαθιστούν τους συμβατικούς κοχλίες για την επίτευξη του βέλτιστου αισθητικού αποτελέσματος, ενώ όταν κρίνεται σκόπιμο χρησιμοποιούνται αρθρωτοί κοχλίες, οι οποίοι επιτρέπουν την εκτός επιπέδου παραμόρφωση του υαλοπινάκα χωρίς την ανάπτυξη καμπτικών ροπών στις στηρίξεις. Κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος, που δανείζει συχνά το όνομά του σε ολόκληρη την κατηγορία, αποτελούν τα εξαρτήματα ανοξείδωτου χάλυβα τύπου "spider", τα οποία συνιστούν τον συνδετικό κρίκο κοχλιών και φέρουσας κατασκευής (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5. Σύστημα σημειακής στήριξης με εξαρτήματα τύπου "spider"

4.1.2.2 Συστήματα σημειακής πάκτωσης (Point-fixed clamped systems)

Το σύστημα σημειακής πάκτωσης προτείνει μια εναλλακτική μέθοδο για την ανάρτηση των υαλοπινάκων χωρίς τον κίνδυνο θραύσης και το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η διάνοιξη οπών σε ένα ψαθυρό υλικό. Στην πιο διαδεδομένη μορφή του χρησιμοποιεί και αυτό ένα εξάρτημα "spider", το οποίο όμως τώρα περιστρέφεται κατά 45°, ώστε οι βραχίονές του να ευθυγραμμίζονται με τις ραφές μεταξύ των πάνελ. Λεπτά ελάσματα προσαρμοσμένα στα άκρα του εξαρτήματος διαπερνούν τους αρμούς και στη συνέχεια πλάκες μικρών διαστάσεων στερεώνονται στην ελεύθερη επιφάνειά τους πακτώνοντας κάθε

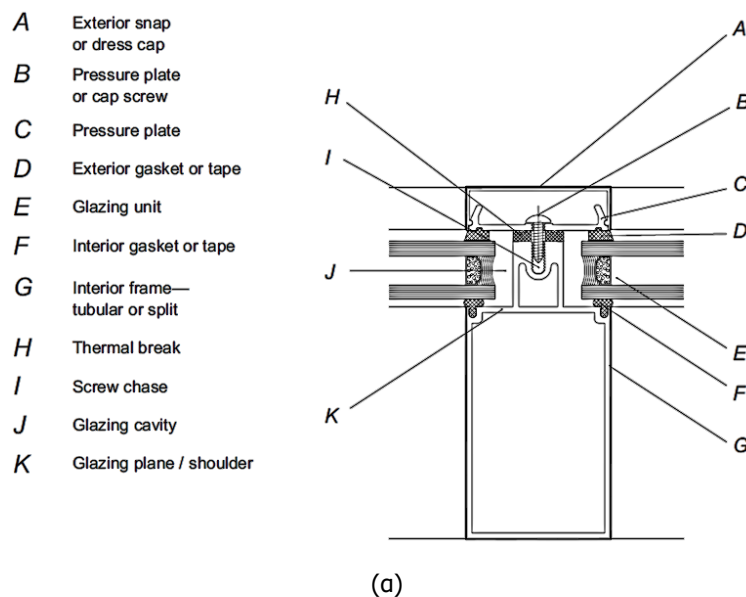
φορά δύο παρακείμενα πάνελ (Εικόνα 4.6, αριστερά). Μια άλλη τεχνική, η οποία συνδυάζεται συχνά με τη δημιουργία δικτύου καλωδίων, περιλαμβάνει την προσαρμογή ειδικών εξαρτημάτων πάκτωσης στις γωνίες του υαλοπίνακα και τη μεταφορά των φορτίων μέσω αυτών στο σύστημα στήριξης (Εικόνα 4.6, δεξιά). Παρεμβύσματα νεοπρενίου τοποθετούνται σε αυτή την περίπτωση εκατέρωθεν των πάνελ στα σημεία στήριξης, ώστε να αποτραπεί η επαφή γυαλιού χάλυβα.

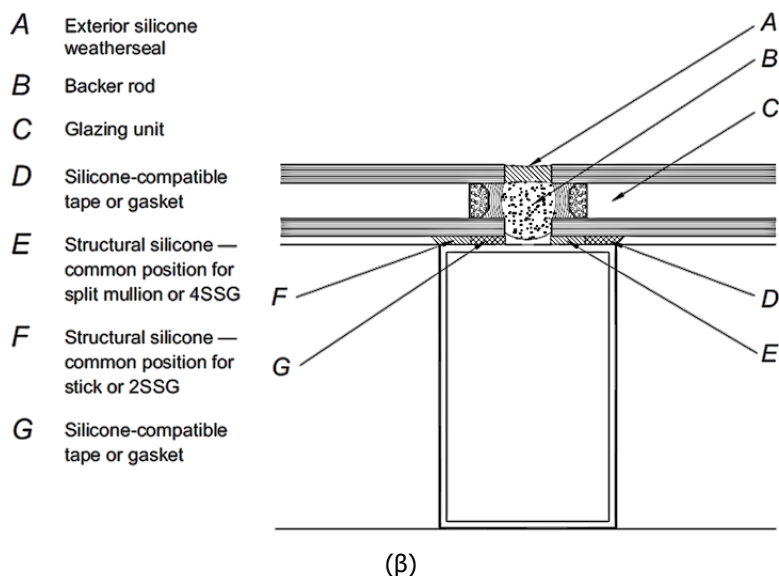


Εικόνα 4.6. Συστήματα σημειακής πάκτωσης

4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ (STRUCTURAL SILICONE GLAZING-SSG)

Η εφαρμογή των υαλοπινάκων στις μεταλλικές διατομές των πλαισιωτών συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε με μηχανική στερέωση (πλάκες πίεσης, καπάκια στήριξης), είτε με συγκόλληση μέσω της χρήσης πιστοποιημένης φέρουσας σιλικόνης δύο συστατικών. Στην πρώτη περίπτωση ο σκελετός είναι εμφανής και αποτελεί το κύριο μορφολογικό στοιχείο της πρόσοψης, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ικανοποιούνται οι απαιτήσεις περί μέγιστης διαφάνειας και ανεμπόδιστης θέας που επιβάλλουν η σύγχρονη αρχιτεκτονική και ο μινιμαλιστικός σχεδιασμός. Η Εικόνα 4.7 παρουσιάζει τις λεπτομέρειες σύνδεσης υαλοπίνακα-ορθοστάτη για τις δύο τεχνικές και παραθέτει τα βασικά εξαρτήματα με τα οποία υλοποιείται η καθεμία. Είναι εμφανές πως το σύστημα δομικής σιλικόνης πετυχαίνει την ελαχιστοποίηση της ορατής επιφάνειας των στοιχείων του σκελετού.





Εικόνα 4.7. Λεπτομέρεια σύνδεσης υαλοπίνακα-ορθοστάτη (α) με καπάκι στήριξης, (β) με χρήση σιλικόνης

Η τεχνική της συγκόλλησης μπορεί να συνδυαστεί τόσο με τα κλασικά όσο και με τα δομικά υαλοπετάσματα, αν και ο πρώτος συνδυασμός τείνει να εγκαταλειφθεί λόγω των δυσκολιών εφαρμογής της κόλλας σε συνθήκες εργοταξίου. Άλλωστε η προεργασία των μελών για την υποδοχή της κόλλας, η οποία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τον καθαρισμό, την πλήρη απομάκρυνση σκόνης και άλλων υπολειμμάτων καθώς και τη διατήρηση της στεγνότητας των επιφανειών, είναι καταλυτική για την απόδοση της συγκόλλησης και συνιστάται να πραγματοποιείται στο ασφαλές και ελεγχόμενο περιβάλλον του εργοστασίου. Τα συστήματα δομικής σιλικόνης διακρίνονται σε τεσσάρων και δύο πλευρών.

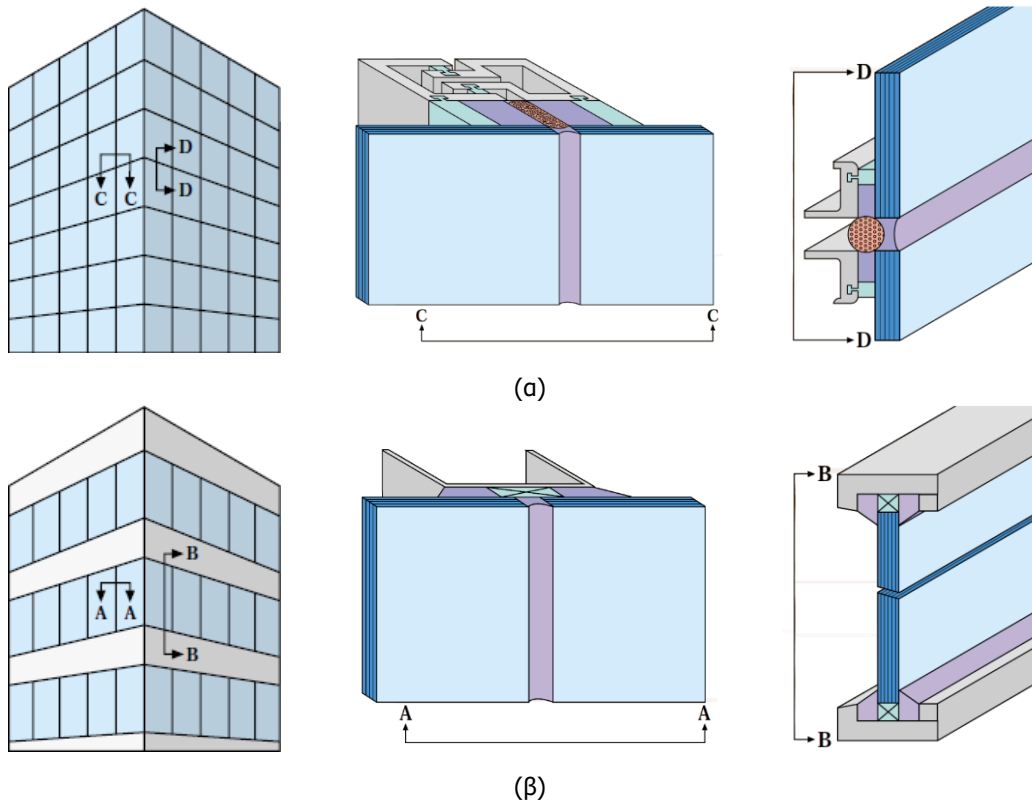
Σύστημα 4 πλευρών (4-sided structural silicone)

Δομική κόλλα στηρίζει το γυαλί κατά μήκος και των τεσσάρων πλευρών του, με αποτέλεσμα ο σκελετός να μην είναι εμφανής και μόνο να υποδηλώνεται διακριτικά από τους αρμούς μεταξύ των υαλοπινάκων. Με τη μορφή ενιαίας επιφάνειας, η οποία επενδύει την όψη, το σύστημα αυτό αποτελεί τη σύγχρονη εκδοχή των υαλοπετασμάτων. Χάρη στην υψηλή ελαστικότητα της κόλλας, τα φορτία που ασκούνται στην πρόσοψη κατανέμονται ομοιόμορφα στα περιμετρικά στοιχεία στήριξης. Το ίδιο βάρος του γυαλιού παραλαμβάνεται από κατάλληλους τάκους έδρασης που τοποθετούνται στις εγκοπές των πλαισίων. Καθώς εξαλείφονται οι περιοχές όπου το γυαλί καλύπτεται από το μεταλλικό πλαίσιο, μειώνεται σημαντικά ο κίνδυνος θραύσης του γυαλιού λόγω θερμικών τάσεων, αφού δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές θερμοκρασίας στην επιφάνεια του. Επιπλέον η πρόσοψη πετυχαίνει υψηλά επίπεδα ενεργειακής απόδοσης, λόγω της μηδενικής έκθεσης του μεταλλικού τμήματος, τα οποία μάλιστα μπορούν να αυξηθούν αν το σύστημα συνδυαστεί με διπλά πάνελ (double glazing/insulating glass) ή πάνελ χαμηλής εκπομπής (low-emissivity glass).

Σύστημα 2 πλευρών (2-sided structural silicone)

Στο σύστημα αυτό μόνο οι δύο από τις τέσσερις πλευρές του υαλοπίνακα στηρίζονται με δομική σιλικόνη, ενώ για τις άλλες δύο προβλέπεται ο συμβατικός τρόπος υποστήριξης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8(β) και περιγράφεται με λεπτομέρειες στην Παράγραφο 4.3, ο τρόπος αυτός αφορά τον εγκιβωτισμό της βάσης και κεφαλής των πάνελ σε μεταλλικές διατομές μορφής U, όπου ελαστικά παρεμβύσματα ή κόλλες

και αρμοπληρωτικά λάστιχα εξυπηρετούν σκοπούς στεγανοποίησης. Το ίδιο βάρος του γυαλιού αναλαμβάνεται απευθείας από αυτή τη μηχανική στήριξη, ενώ τα κινητά φορτία κατανέμονται και στις τέσσερις πλευρές του συστήματος. Σε αντίθεση με το σύστημα 4 πλευρών, σε αυτή την περίπτωση η μόρφωση του υαλοπετάσματος επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί και στον χώρο του εργοταξίου.



Εικόνα 4.8. Σύστημα δομικής σιλικόνης
(α) 4 πλευρών, (β) 2 πλευρών

Εκτεταμένες μελέτες και δοκιμές έχουν αναδείξει τη σιλικόνη ως το πλέον κατάλληλο υλικό για εφαρμογές υαλοπετασμάτων, ενώ η ποικιλία των προϊόντων στα οποία διατίθεται προσδίδει ευχέρεια στην αρχιτεκτονική σύνθεση. Η χαμηλή στιβαρότητα του υλικού επιτρέπει στους ελαστικούς συνδέσμους σιλικόνης να προσαρμόζονται σε πιθανές παραμορφώσεις και να εξισορροπούν τις δεδομένες συστολοδιαστολές γυαλιού και αλουμινίου χωρίς να καταπονείται το σύστημα. Οι κόλλες σιλικόνης είναι ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες και τη γήρανση και επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από την υπεριώδη ακτινοβολία. Παράλληλα, παρουσιάζουν πολύ καλή ικανότητα πρόσφυσης σε μεγάλη ποικιλία επιφανειών και κυρίως στο γυαλί, λόγω της κοινής πυριτικής τους βάσης. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα, δεδομένου ότι είναι επιθυμητό για λόγους ασφάλειας η αστοχία συνοχής να προηγείται της αστοχίας πρόσφυσης, να εκδηλώνεται δηλαδή η αστοχία με σκίσιμο της σιλικόνης και όχι με αποκόλλησή της από τις επιφάνειες που συνδέει.

Το προϊόν Dow Corning 993 (DC 993) είναι μια σιλικονούχα κόλλα δύο συστατικών, ουδέτερης ωρίμανσης και ταχείας πήξης που χρησιμοποιείται ευρέως σε συγκολλήσεις γυαλιού και μετάλλου, αλλά και άλλων υλικών. Παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή απόδοση σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, από -50°C μέχρι 150°C . Αναφέρεται πως στο προϊόν έχει χορηγηθεί Ευρωπαϊκή Τεχνική Έγκριση σύμφωνα με την κατευθυντήρια γραμμή για τη φέρουσα υάλωση ETAG-002. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

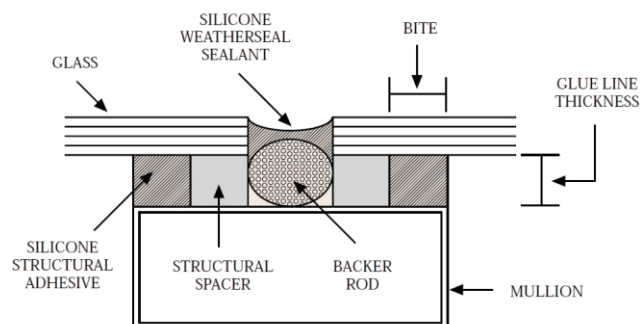
Αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό	$\sigma_{des}=0.14$ MPa
Αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση	$\tau_{des}=0.11$ MPa
Αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας	$E_0=1.40$ MPa
Αρχικό εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης	$G_0=0.47$ MPa
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	130%
Σκληρότητα Shore A	40
Τάση θραύσης	≥ 0.70 MPa

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά σιλικονούχας κόλλας DC 993

Ο καθορισμός της τάσης σχεδιασμού στα 0.14 MPa, ενώ η αντοχή του υλικού ξεπερνάει τα 0.70 MPa, μεταφράζεται σε τιμή του συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 5:1. Λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με την τεχνική της φέρουσας κόλλας καθώς και το μέγεθος της επίδρασης αυτών των αβεβαιοτήτων σε όλα τα μέλη του έργου, έχει αποδειχτεί πως απαιτείται η υιοθέτηση αρκετά συντηρητικών τιμών σχεδιασμού, ώστε να εξασφαλιστεί η ανοχή του συστήματος σε πιθανά λάθη. Ακολούθως αναφέρονται κάποιοι παράγοντες που δύνανται να επηρεάσουν την αντοχή της σιλικόνης μετά την εφαρμογή της και κατ'επέκταση την αντοχή ολόκληρης της διάταξης:

- Η διάρκεια ζωής του προϊόντος
- Η συμβατότητα του προϊόντος με τις προς συγκόλληση επιφάνειες
- Η σωστή προεργασία των προς συγκόλληση επιφανειών
- Η σωστή εφαρμογή της κόλλας, με μέριμνα για την αποφυγή συγκράτησης φυσαλίδων αέρα
- Ο απαραίτητος χρόνος πήξης πριν τη μεταφορά των υαλοπετασμάτων στο εργοτάξιο
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την εφαρμογή και πήξη της κόλλας
- Δευτερεύουσες δράσεις που δεν έχουν συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό του ελαστικού συνδέσμου, όπως μετακινήσεις του κτιρίου

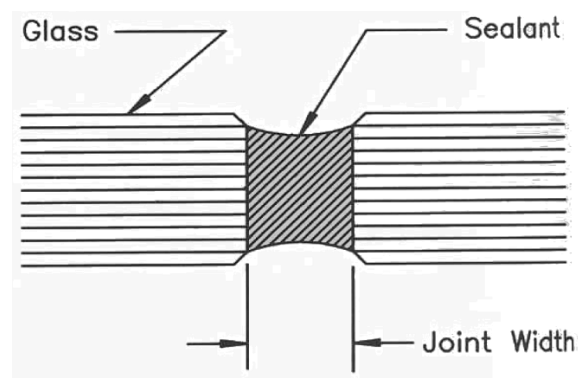
Γενικά ο ελαστικός σύνδεσμος θα πρέπει να μπορεί να παραλαμβάνει όλες τις μετακινήσεις των παρακείμενων μερών, οι οποίες οφείλονται είτε στην επίδραση της θερμοκρασίας είτε σε παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού. Στους υπολογισμούς μάλιστα του σχεδιασμού θα πρέπει να υπεισέρχονται οι διαφορετικοί συντελεστές γραμμικής διαστολής των προς ένωση υλικών. Προσοχή απαιτούν επίσης οι ανοχές, τόσο της κοπής γυαλιού και μετάλλου, όσο και της ανέγερσης των υαλοπετασμάτων. Σύμφωνα με κάποιους γενικούς κανόνες για τη μόρφωση του συνδέσμου, οι οποίοι επικρατούν των υπολογισθισών διαστάσεων, το πάχος θα πρέπει να είναι ίσο με 6 mm τουλάχιστον, ενώ ο λόγος πλάτος (bite) προς πάχος (thickness) θα πρέπει να κυμαίνεται από 1:1 έως 3:1. Για την καλύτερη κατανόηση των διαστάσεων, η Εικόνα 4.9 δίνει απλοποιητικά τη γεωμετρία ενός συνδέσμου.



Εικόνα 4.9. Γεωμετρία συνδέσμου σιλικονούχας κόλλας

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ (BUTT-JOINT GLAZING-BTG)

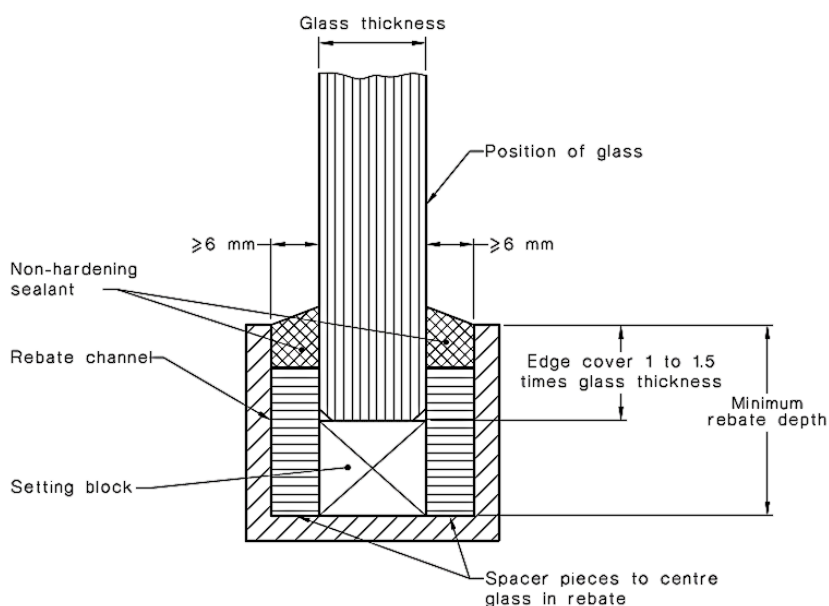
Το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων (Εικόνα 4.10) παραπέμπει εμφανισιακά στο σύστημα δομικής σιλικόνης 2 πλευρών, διαφέρει όμως από αυτό ως προς τη στατική λειτουργία. Και στις δύο περιπτώσεις οι υαλοπίνακες συγκρατούνται στη βάση και την κεφαλή εντός μεταλλικών πλαισίων, η μετωπική όμως σύνδεση αναφέρεται στη σύνδεση διαδοχικών υαλοπινάκων με σιλικονούχα κόλλα, η οποία αναλαμβάνει αποκλειστικά τον ρόλο της στεγάνωσης και απουσία των κατακόρυφων ορθοστατών δεν μπορεί να θεωρηθεί πως συμβάλλει στη στήριξη της διάταξης. Το κάθε πάνελ συμπεριφέρεται ως απλά εδραζόμενη δοκός, με αποτέλεσμα υπό το φορτίο σχεδιασμού να καταγράφονται πολύ μεγαλύτερες βυθίσεις και τάσεις σε σύγκριση με το τετραέριστο πάνελ 2 πλευρών και να αυξάνονται σημαντικά οι απαιτήσεις σε πάχος του γυαλιού. Οι ενδεχόμενες υπερβολικά μεγάλες βυθίσεις καθιστούν το σύστημα ακατάλληλο για τη χρήση διπλού γυαλιού, καθώς κατά την παραμόρφωση του υαλοπίνακα η κόλλα μεταξύ γυαλιού και αποστάτη κατά μήκος των αστήρικτων κατακόρυφων ακμών υπόκειται σε ακραίες διατμητικές τάσεις δημιουργώντας τον κίνδυνο αστοχίας της στεγάνωσης (ως αποστάτης αναφέρεται η σωληνωτή διατομή που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο απλών τζαμιών και δημιουργεί ανάμεσά τους το επιθυμητό διάκενο). Γενικά η χρήση του συστήματος απευθύνεται κυρίως σε βιτρίνες καταστημάτων, χωρίσματα μεταξύ γραφείων και άλλες εφαρμογές όπου η ανεμπόδιστη θέα είναι επιθυμητή, ενώ οι απαιτήσεις του σχεδιασμού είναι περιορισμένες.



Εικόνα 4.10. Μετωπική σύνδεση υαλοπινάκων

Ο αυστραλιανός κανονισμός AS 1288-2006, που αφορά θέματα εγκατάστασης της φέρουσας υάλωσης, προτείνει τη διάταξη της Εικόνας 4.11 για τη διαμόρφωση των στηρίξεων βάσης και κεφαλής. Η διάταξη αυτή απευθύνεται στις ανάγκες τόσο του συστήματος 2 πλευρών όσο και της μετωπικής σύνδεσης. Για τις μεταλλικές διατομές U, που περιβάλλουν την κάτω και πάνω ακμή του πάνελ, επιλέγεται συνήθως ανοξείδωτος χάλυβας ($E=210000$ MPa, $\nu=0.3$) λόγω της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση. Το γυαλί θα πρέπει να εισέρχεται εντός αυτών των πλαισίων σε βάθος όχι μικρότερο από 1 με 1.5 φορές το πάχος του, ενώ το πάχος της κόλλας θα πρέπει να ξεπερνάει τα 6 mm. Το πάνελ τοποθετείται πάνω σε δύο ορθογωνικά τακάκια (setting blocks) υλικού σκληρότητας 85 ± 5 Shore A, τα οποία διατάσσονται σε απόσταση $b/4$ από το κάθε άκρο, όπου b το πλάτος του πάνελ. Το μήκος τους ορίζεται στα 27 mm ανά m^2 γυαλιού, αλλά δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 100 mm. Ανεπαρκές ύψος των τάκων έδρασης (edge clearance) μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του γυαλιού εξαιτίας της επαφής του με τον χάλυβα. Υλικά όπως το νεοπρένιο και το EPDM έχουν καθιερωθεί για τη συγκεκριμένη λειτουργία, της μεταφοράς του βάρους του υαλοπίνακα στον μεταλλικό σκελετό, χάρη στη μικρή παραμορφωσιμότητά τους, η οποία τους επιτρέπει να διατηρούν το σχήμα τους για μεγάλες περιόδους, και την καλή συμπεριφορά

τους σε ακραίες θερμοκρασίες. Ως αποστάτες (spacers) χρησιμοποιούνται συνήθως αφρώδεις ταινίες υλικού σκληρότητας 65 ± 5 Shore A, οι οποίες διατηρούν το γυαλί στοιχισμένο στο κέντρο της διατομής, ενώ αποτελούν και την κατάλληλου πάχους βάση για την υποδοχή της κόλλας. Παράλληλα, καθώς τα περισσότερα υλικά που λειτουργούν ως παρεμβύσματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, συμβάλλουν στη θερμική μόνωση του υαλοπινάκα από το μεταλλικό πλαίσιο, μειώνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας από το κέντρο στα άκρα. Οι ταινίες που χρησιμοποιούνται πετυχαίνουν από τη μία όψη την ισχυρή προσκόλληση σε μεταλλικές επιφάνειες, ενώ θα πρέπει να ελέγχεται η συμβατότητά τους με την κόλλα που έχει επιλεγθεί ως υλικό στεγανοποίησης. Γενικά, όλα τα υλικά στερέωσης θα πρέπει να πληρούν ειδικές προδιαγραφές, έτσι ώστε να μπορούν να παραλάβουν τις συστολοδιαστολές των στοιχείων της πρόσοψης, να παρέχουν τη δυνατότητα μετατόπισης κατά τις τρεις διευθύνσεις, να χαρακτηρίζονται από ευκολία εφαρμογής, να διατηρούν την ελαστικότητά τους και να έχουν καλές μηχανικές αντοχές.



Εικόνα 4.11. Διαμόρφωση στήριξης στη βάση του υαλοπινάκα

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΨΗΣ

Από τα συστήματα που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4, η παρούσα εργασία εστιάζει σε αυτό της δομικής σιλικόνης 4 πλευρών (4-SSG) και της μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων (BJG) και επιδιώκει τον σχεδιασμό και την ανάλυση μιας πρόσοψης στα πλαίσια των δύο αυτών διατάξεων. Συγκεκριμένα μελετά την απόκριση ενός υαλοπίνακα υπό την επίδραση των φορτίων που προβλέπουν οι Ευρωκώδικες, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες στήριξης κάθε συστήματος. Τον υαλοπίνακα διαμορφώνει μια πολυστρωματική σύνθεση θερμικά ενισχυμένου γυαλιού (HSG), ύψους $a=3800$ mm και πλάτους $b=1500$ mm. Ο αριθμός και το πάχος των στρώσεων καθορίζονται σε κάθε περίπτωση από μια διαδικασία προδιαστασιολόγησης, ενώ η επάρκειά τους ελέγχεται στο επόμενο κεφάλαιο μέσα από κατάλληλες αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για την περίπτωση του πλαισιωτού συστήματος ο σχεδιασμός επεκτείνεται και στον προσδιορισμό των κατάλληλων διατομών για τους ορθοστάτες και τις τραβέρσες που συγκρατούν περιφερειακά το πάνελ.

5.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

5.1.1 Τύπος γυαλιού πολυστρωματικής διάταξης

Όπως προκύπτει από τα Κεφάλαια 2 και 3, σε εφαρμογές υάλωσης όπου ο κίνδυνος τραυματισμού από την πτώση θραυσμάτων είναι αυξημένος, όπως οι πρόσοψεις, συνιστάται η χρήση θερμικά ενισχυμένου γυαλιού, το οποίο δε θρυμματίζεται, αλλά σπάει σε μεγάλα τεμάχια που συγκρατούνται εύκολα στη μεμβράνη του πολυμερούς. Η αντοχή σχεδιασμού για το γυαλί που έχει υποστεί θερμική κατεργασία (HSG ή FTG) υπολογίζεται κατά τον prEN 16612 από τη σχέση:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{Y_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{Y_{M,v}} \quad (5.1)$$

όπου,

- $f_{g,k}$ χαρακτηριστική αντοχή ανοπτημένου γυαλιού ($f_{g,k}=45$ MPa)
- $f_{b,k}$ χαρακτηριστική αντοχή θερμικά κατεργασμένου γυαλιού ($f_{b,k}=70$ MPa για HSG)
- k_{mod} συντελεστής για τη διάρκεια φόρτισης (λαμβάνεται από τον Πίνακα 5.2)
- k_{sp} συντελεστής για το προφίλ της επιφάνειας του γυαλιού (λαμβάνεται ίσος με 1)
- k_v συντελεστής για τη μέθοδο επεξεργασίας (λαμβάνεται ίσος με 1)

γ_M συντελεστής υλικού ($\gamma_{M,A}=1.8$ για το ανοπτημένο γυαλί
 $\gamma_{M,V}=1.2$ για το κατεργασμένο γυαλί)

Ο συντελεστής για τη διάρκεια φόρτισης του ανοπτημένου γυαλιού δίνεται από τη σχέση:

$$k_{mod} = 0.663t^{-\frac{1}{16}}, \quad (5.2)$$

όπου t η διάρκεια της φόρτισης σε ώρες. Ο Πίνακας 5.1 καταγράφει τυπικές τιμές του k_{mod} για συνήθεις περιπτώσεις φορτίων σε κτίρια. Εδώ επιλέγεται η τιμή $k_{mod}=0.74$. Με αντικατάσταση των μεγεθών στην εξίσωση (5.1) προκύπτει:

$$f_{g,d} = \frac{0.74 \cdot 1 \cdot 45}{1.8} + \frac{1 \cdot (70 - 45)}{1.2} = 39.33 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Action	Load duration	k_{mod}
personnel loads	short, single ^a	0.89
wind	single gust ^b	1.00
wind	short, multiple ^b	0.74
snow	intermediate ^c	0.44
daily temperature variation 11 hours extreme peak duration	intermediate	0.57
barometric pressure variation	intermediate	0.50
yearly temperature variation 6 month extreme mean value duration	intermediate	0.39
dead load, self weight	permanent	0.29

^a The value of $k_{mod}=0.89$ is based on a personnel load of 30 seconds duration. Other values may be considered depending on the type of personnel load being evaluated and also the building use.

^b The value of $k_{mod}=0.74$ is based on a cumulative equivalent duration of 10 minutes, considered representative of the effect of a storm which may last several hours. Higher values of k_{mod} may be considered for wind.

^c $k_{mod}=0.44$ can be considered representative for snow loads lasting between 1 week ($k_{mod}=0.48$) and 3 months ($k_{mod}=0.41$). Other values of k_{mod} may be appropriate depending on local climate.

Πίνακας 5.1. Τιμές του συντελεστή k_{mod} για τη διάρκεια φόρτισης

5.1.2 Κράμα αλουμινίου φέροντος οργανισμού

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων για τον σκελετό των υαλοπετασμάτων χρησιμοποιείται κράμα αλουμινίου EN AW 6063 T5 ή T6. Ο τετραψήφιος αριθμός περιλαμβάνει τις πληροφορίες για τη σύσταση του κράματος, ενώ ο χαρακτηρισμός T δηλώνει την κατάσταση σκλήρυνσης, η οποία συνδέεται με τη διαβάθμιση της θερμικής κατεργασίας που έχει υποστεί το κράμα. Το πρόθεμα EN AW χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει το σύστημα ονοματολογίας κατά τα ευρωπαϊκά πρότυπα από τα υπόλοιπα που έχουν καθιερωθεί ανά τον κόσμο κυρίως σε επιχειρήσεις αλουμινίου. Το κράμα 6063 κρίνεται κατάλληλο για εφαρμογή σε πλαισιωτά συστήματα γυάλινων προσόψεων, καθώς χαρακτηρίζεται από άριστη συγκολλησιμότητα και ικανοποιητική αντίσταση σε διάβρωση, ενώ διαμορφώνεται εύκολα με την τεχνική της διέλασης (extrusion) αποδίδοντας λεπτές και πολύπλοκης γεωμετρίας διατομές αυξημένης δυσκαμψίας. Κατά τη διέλαση ένα προθερμασμένο τεμάχιο αλουμινίου συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου σε μεταλλικό θάλαμο και υποχρεώνεται να «ρεύσει» μέσα από μία μήτρα που καθορίζει την τελική μορφή

του προφίλ. Ο Πίνακας 5.2 παραθέτει ένα απόσπασμα από τον Πίνακα 3.2b του EN 1999-1-1 που αφορά στο κράμα 6063 και δίνει τα βασικά του χαρακτηριστικά.

Χαρακτηριστικές τιμές του συμβατικού ορίου διαρροής 0.2% f_0 , της αντοχής θραύσης f_u (χωρίς συγκολλήσεις και για ΘΕΖ), της ελάχιστης επιμήκυνσης A , των συντελεστών απομείωσης $\rho_{0,haz}$ και $\rho_{u,haz}$ στις ΘΕΖ, της κατηγορίας λυγισμού και του του εκθέτη n_p για ελατά κράματα αλουμινίου - Διελασμένα προφίλ (EP), διελασμένοι σωλήνες (ET), ράβδοι διέλασης (ER/B), εξηλασμένοι σωλήνες (DT)

Alloy EN-AW	Product form	Temper	Thickness t mm	f_0	f_u	A	$f_{0,haz}$	$f_{u,haz}$	HAZ-factor		BC	n_p
				N/mm ²	%	%	N/mm ²	$\rho_{0,haz}$	$\rho_{u,haz}$			
6063	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	8	60	100	0.46	0.57	B	16
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160	7			0.55	0.63	B	13
	EP,ET,ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	8	65	110	0.41	0.56	A	24
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0.34	0.50	A	31
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	8	75	130	0.38	0.53	A	22
	EP		$10 < t \leq 25$	180	225	8			0.42	0.58	A	21
DT	$t \leq 20$		195	230	10	0.38			0.57	A	28	

Πίνακας 5.2. Απόσπασμα του Πίνακα 3.2b του EN 1999-1-1

Οι έλεγχοι επάρκειας των μελών στην οριακή κατάσταση αστοχίας πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής ως εξής:

f_0 είναι η χαρακτηριστική αντοχή σε κάμψη και συνολική διαρροή σε εφελκυσμό ή θλίψη. Πρόκειται για την τάση $f_{0,2}$, η οποία αντιστοιχεί σε μόνιμη παραμόρφωση 0.2%. Θεωρείται το ελαστικό όριο, πέρα από το οποίο η συμπεριφορά του υλικού είναι ανελαστική. Χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς κατά τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιείται και η τάση διαρροής του χάλυβα.

f_u είναι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής για τη φέρουσα ικανότητα της καθαρής διατομής σε εφελκυσμό ή θλίψη (αντοχή θραύσης).

Οι συντελεστές απομείωσης $\rho_{0,haz}$ και $\rho_{u,haz}$ αφορούν τον σχεδιασμό συγκολλητών κατασκευών με χρήση κραμάτων είτε από εργοσκήληρυνση είτε από τεχνητή ωρίμανση και σκλήρυνση από καθίζηση. Η απομείωση επηρεάζει το συμβατικό όριο διαρροής 0.2% του υλικού σε μεγαλύτερο βαθμό από την εφελκυστική αντοχή θραύσης. Η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη-ΘΕΖ (Heat Affected Zone-HAZ), σε όλη την έκταση της οποίας γίνεται η απλοποιητική παραδοχή πως οι ιδιότητες της αντοχής μειώνονται κατά έναν σταθερό βαθμό, εκτείνεται ακριβώς γύρω από τη συγκόλληση, ενώ πέρα από αυτήν οι αντοχές ανακτώνται πλήρως. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται το κράμα EN AW 6063 T6, τα χαρακτηριστικά του οποίου συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3.

Κράμα αλουμινίου EN AW 6063 T6			
Όριο διαρροής	f_0	MPa	160
Αντοχή θραύσης	f_u	MPa	195
Μέτρο ελαστικότητας	E	MPa	70000
Λόγος Poisson	ν	-	0.3
Πυκνότητα	ρ	kg/m ³	2700
Συντελεστής γραμμικής διαστολής	α_T	10 ⁻⁶ K ⁻¹	23

Πίνακας 5.3. Ιδιότητες κράματος EN AW 6063 T6

5.2 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΨΗΣ

Προσδιορίζονται στη συνέχεια οι διάφορες χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων που επενεργούν στον υαλοπίνακα των δύο συστημάτων καθώς και στους ορθοστάτες και τις τραβέρσες του συστήματος δομικής σιλικόνης.

5.2.1 Μόνιμα φορτία

Υαλοπίνακας

Σε αυτή την περίπτωση τα μόνιμα φορτία περιορίζονται στο ίδιο βάρος του υαλοπίνακα, το οποίο υπολογίζεται αυτομάτως από το πρόγραμμα εισάγοντας ως δεδομένα την πυκνότητα των δύο υλικών, γυαλιού και πολυμερούς. Συγκεκριμένα για το γυαλί ορίζεται η τιμή $\rho_g=2500 \text{ kg/m}^3$ (Κεφάλαιο 1) και για το πολυμερές η τιμή $\rho_{\text{int}}=1000 \text{ kg/m}^3$ (προσεγγιστικά ώστε να αντιπροσωπεύει και τα δύο υποψήφια υλικά, PVB και SGP).

Φέρων οργανισμός υαλοπετάσματος

Οι διατομές αλουμινίου εκτός από το ίδιο βάρος τους ($\rho_{\text{al}}=2700 \text{ kg/m}^3$) αναλαμβάνουν και το βάρος του υαλοπίνακα, το οποίο τώρα προσαυξάνεται κατά 20%, ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς το βάρος των εξαρτημάτων στερέωσης και στεγάνωσης. Τα πρόσθετα μόνιμα αυτά φορτία ασκούνται αρχικά στην τραβέρσα της βάσης του υαλοπετάσματος, μέσα από δύο ελαστικά τακάκια, τα οποία τοποθετούνται στις ειδικά διαμορφωμένες εσοχές του προφίλ. Στη συνέχεια μεταφέρονται μέσω των συνδέσμων ορθοστάτη-τραβέρσας στους ορθοστάτες του πλαισίου ως αξονικά φορτία επαυξημένα με το ίδιο βάρος της τραβέρσας.

5.2.2 Μεταβλητά φορτία

5.2.2.1 Επιβαλλόμενα φορτία

Σύμφωνα με τον EN 1991-1-1, ως επιβαλλόμενα χαρακτηρίζονται τα φορτία που προκύπτουν από τη χρήση των χώρων και οι τιμές τους περιλαμβάνουν:

- την κανονική χρήση από πρόσωπα
- την επίπλωση και τα κινητά αντικείμενα
- οχήματα
- σπάνια γεγονότα, όπως οι συγκεντρώσεις προσώπων και επίπλων, ή η μετακίνηση και η συσσώρευση αντικειμένων κατά τη διάρκεια αναδιοργάνωσης ή ανακαίνισης

Για τον προσδιορισμό των επιβαλλόμενων φορτίων οι χώροι διαμονής, κοινωνικών εκδηλώσεων, εμπορικών καταστημάτων και γραφείων υποδιαιρούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τη χρήση τους σύμφωνα με τον Πίνακα 5.4. Στα στηθαία και τους διαχωριστικούς τοίχους αυτών των χώρων που λειτουργούν ως κιγκλιδώματα, ορίζεται η επιβολή ενός γραμμικού κατανεμημένου φορτίου, σε ύψος όχι πάνω από 1200 mm από τη στάθμη του δαπέδου, με τιμή που δίνεται στον Πίνακα 5.5 ανάλογα με την κατηγορία χρήσης.

Κατηγορία	Συγκεκριμένη Χρήση	Παράδειγμα
A	Χώροι διαμονής	Δωμάτια σε κτήρια κατοικιών και σπίτια. Θάλαμοι και πτέρυγες σε νοσοκομεία. Υπνοδωμάτια σε ξενοδοχεία και ξενώνες, κουζίνες και τουαλέτες,
B	Χώροι γραφείων	
C	Χώροι στους οποίους οι άνθρωποι μπορεί να συναθροισθούν (με εξαίρεση τους χώρους που κατατάσσονται στις κατηγορίες A,B, και D)	C1: Χώροι με τραπέζια κλπ. Π.χ. σχολικοί χώροι, νηπιαγωγεία, καφενεία, εστιατόρια, αίθουσες φαγητού, αναγνωστήρια, χώροι υποδοχής. C2: Χώροι με σταθερά καθίσματα, Π.χ. χώροι σε εκκλησίες, θέατρα ή κινηματογράφους, αίθουσες συνεδριάσεων, αίθουσες ομιλίας, αίθουσες συγκεντρώσεων, χώροι αναμονής, χώροι αναμονής σε σιδηροδρομικούς σταθμούς. C3: Χώροι χωρίς εμπόδια στη διακίνηση του κοινού, π.χ. χώροι σε μουσεία, εκθεσιακοί χώροι, κλπ. και χώροι πρόσβασης σε δημόσια και διοικητικά κτήρια, ξενοδοχεία και νοσοκομεία. Προαύλια σιδηροδρομικών σταθμών. C4: Χώροι για πιθανές σωματικές δραστηριότητες, π.χ. αίθουσες χορού, αίθουσες γυμναστικής και θεατρικές σκηνές C5: Χώροι επιρρεπείς σε μεγάλα πλήθη, π.χ. για δημόσιες εκδηλώσεις όπως αίθουσες συναυλιών, κλειστά γήπεδα, εξέδρες γηπέδων, εξώστες και χώροι πρόσβασης, πλατφόρμες σιδηροδρόμων.
D	Χώροι με εμπορικά καταστήματα	D1: Χώροι σε καταστήματα λιανικής πώλησης, γενικά. D2: Χώροι σε πολυκαταστήματα

Πίνακας 5.4. Κατηγορίες χρήσης κατά τον EN 1991-1-1

Φορτιζόμενη επιφάνεια	q_k [kN/m]
Κατηγορία A	0.5
Κατηγορία B και C1	0.5
Κατηγορίες C2 έως C4 και D	1.0
Κατηγορία C5	3.0

Πίνακας 5.5. Οριζόντια φορτία σε διαχωριστικούς τοίχους και στηθαία κατά τον EN 1991-1-1

Υαλοπίνακας

Θεωρώντας πως αυτή η περίπτωση φόρτισης αφορά και τις προσόψεις, οι οποίες ουσιαστικά συνιστούν προστατευτικά περιβλήματα του κτιρίου, και με την παραδοχή πως το υπό εξέταση παράδειγμα κατατάσσεται σε κάποια από κατηγορίες C₂ έως C₄ ή D, ασκείται τελικά στον υαλοπίνακα επιβαλλόμενο φορτίο $q=1$ kN/m σε ύψος 1100 mm από τη στάθμη του δαπέδου.

Φέρων οργανισμός υαλοπετάσματος

Το φορτίο αυτό μεταφέρεται ως συγκεντρωμένο στους ορθοστάτες, αφού πρώτα πολλαπλασιαστεί με το πλάτος b της ζώνης επιρροής τους.

$$Q = q \times b = 1 \text{ kN/m} \times 1.5 \text{ m} = 1.5 \text{ kN} \quad (5.4)$$

5.2.2.2 Φορτίο ανέμου

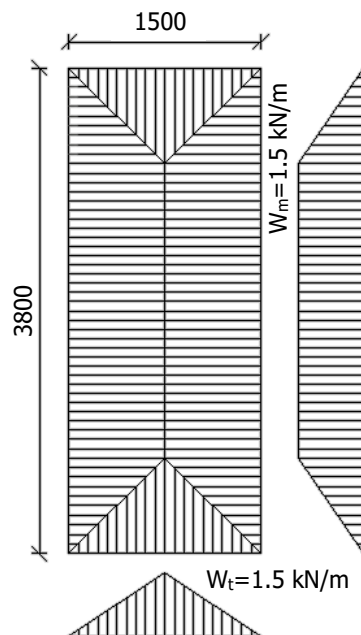
Εφόσον η μελέτη δεν περιορίζει την εφαρμογή των δύο συστημάτων σε συγκεκριμένες διαστάσεις πρόσοψης και κάτοψης, κρίνεται προτιμότερο να δοθεί απευθείας μια ρεαλιστική τιμή στη δράση του ανέμου, παρά να ακολουθηθεί η μεθοδολογία του EN 1991-1-4 στην οποία θα υπεισέλθει πλήθος παραδοχών σχετικά με την τοποθεσία και τη γεωμετρία της κατασκευής για τον προσδιορισμό των διαφόρων συντελεστών. Επιλέγεται ως δυσμενέστερη η περίπτωση της υποπίεσης, ώστε το φορτίο να έχει την ίδια φορά με το επιβαλλόμενο λόγω χρήσης στις εσωτερικές επιφάνειες, ενώ η τιμή του ορίζεται στα 2 kPa.

Υαλοπίνακας

Ο άνεμος ασκείται με τη μορφή πίεσης $w=2$ kPa σε όλη την επιφάνεια του υαλοπίνακα.

Φέρων οργανισμός υαλοπετάσματος

Το φορτίο ανέμου που ασκείται στους υαλοπίνακες μεταβιβάζεται ως γραμμικό φορτίο W στα κατακόρυφα και οριζόντια προφίλ του φέροντος σκελετού βάσει των επιφανειών επιρροής που σχεδιάζονται στην Εικόνα 5.1. Όλες οι επιφάνειες ορίζονται από ευθείες κλίσης 45° , καθώς θεωρείται πως οι συνθήκες στήριξης στα συμβάλλοντα όρια του πάνελ είναι ίδιες. Καθώς οι διαστάσεις των ανοιγμάτων δεν είναι ίσες, προκύπτει τραπεζοειδής κατανομή φορτίου για τους ορθοστάτες και τριγωνική για τις τραβέρσες.



Εικόνα 5.1. Κατανομή φόρτισης ανέμου στους ορθοστάτες και τις τραβέρσες

5.2.2.3 Θερμικές δράσεις

Οι θερμικές δράσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των μεταβλητών και έμμεσων δράσεων και συνδέονται με τις μεταβολές των πεδίων θερμοκρασίας εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Ημερήσιες και εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπό σκιά, της ηλιακής ακτινοβολίας ή της ανάκλασης, προκαλούν διαφοροποιήσεις στην κατανομή θερμοκρασίας των επιμέρους δομικών στοιχείων μιας κατασκευής. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ένταση που εισάγεται στην κατασκευή από συστολοδιαστολές, θεωρείται μια ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας στα μέλη του φορέα.

Υαλοπίνακας

Στην περίπτωση του γυαλιού θα πρέπει να ελέγχεται ο κίνδυνος θερμικού σοκ, ο οποίος οδηγεί σε αυτόθραυση και εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμότερης και της ψυχρότερης περιοχής του υαλοπίνακα (Κεφάλαιο 2). Η αντοχή του γυαλιού έναντι θερμικού σοκ ορίζεται συχνά ως μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ΔT_{adm} αυτής της διαφοράς. Όσο οι αποκλίσεις που σημειώνονται στην επιφάνειά του παραμένουν μικρότερες από αυτή την τιμή, το γυαλί θεωρείται ασφαλές. Όπως αποδεικνύεται και από τον Πίνακα 5.6, που καταγράφει τις ΔT_{adm} για διάφορους τύπους γυαλιού ανάλογα με τη διαμόρφωση των ακμών τους, η θερμική επεξεργασία μειώνει σημαντικά την πιθανότητα αυτόθραυσης. Συγκεκριμένα η περίπτωση του HSG, που ενδιαφέρει την παρούσα μελέτη, αντιστέκεται σε διαφορά θερμοκρασίας που ανέρχεται στους 100°C και εφόσον δεν αναμένονται τόσο μεγάλες διακυμάνσεις στην επιφάνεια του υαλοπίνακα, η θεώρηση θερμικών δράσεων κρίνεται μη αναγκαία.

	Γυαλί χωρίς επεξεργασμένες ακμές	Γυαλί με λειασμένες ακμές
Επίπεδο γυαλί, $h < 12$ mm	35	40
Επίπεδο γυαλί, $h = 15$ mm ή 19 mm	30	35
Επίπεδο γυαλί, $h = 25$ mm	26	30
Θερμικά ενισχυμένο γυαλί (όλα τα πάχη)	100	100
Πλήρως σκληρυμένο γυαλί (όλα τα πάχη)	200	200
Πολυστρωματικό γυαλί	Η μικρότερη τιμή από τα επιμέρους φύλλα	

Πίνακας 5.6. Μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά θερμοκρασίας ΔT_{adm}

Φέρων οργανισμός υαλοπετάσματος

Η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών θα αγνοηθεί και στην περίπτωση του μεταλλικού πλαισίου, καθώς οι προβλεπόμενοι αρμοί διασφαλίζουν πως οι ενδεχόμενες μετατοπίσεις λόγω συστολοδιαστολών δεν θα προκαλέσουν υπερένταση της κατασκευής. Οι οριζόντιες διαστολές παραλαμβάνονται από τους ειδικά σχεδιασμένους συνδέσμους και φλάντζες. Οι κατακόρυφες διαστολές παραλαμβάνονται από τον οριζόντιο αρμό που θα πρέπει να δημιουργείται σε κάθε ένωση ορθοστάτη με ορθοστάτη.

5.2.3 Συνδυασμοί δράσεων

Στις διατάξεις του EN 1990 περιγράφονται οι αρχές και οι απαιτήσεις για την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την ανθεκτικότητα της κατασκευής με βάση τις οριακές καταστάσεις και τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας. Έχει επικρατήσει η θεώρηση δύο κατηγοριών οριακών καταστάσεων ως εξής:

- **Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας (ΟΚΑ) - Ultimate Limit State (ULS)**
Σχετίζονται με απώλεια ισορροπίας του φορέα, αστοχία λόγω υπερβολικών παραμορφώσεων, μετατροπή του φορέα ή μέρους του σε μηχανισμό, θραύση και απώλεια της ευστάθειάς του λόγω κόπωσης. Οι αστοχίες αυτού του τύπου θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.
- **Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) - Serviceability Limit State (SLS)**
Σχετίζονται με τη λειτουργία ενός φορέα ή μέλους του υπό συνθήκες φυσιολογικής χρήσης, την άνεση των ανθρώπων και την εξωτερική εμφάνιση των κατασκευών. Η εμφάνιση αφορά κυρίως εκδηλώσεις μεγάλων παραμορφώσεων ή ρηγματώσεων που προκαλούν βλάβες στα στοιχεία πλήρωσης.

Οι καταστάσεις αυτές προσεγγίζονται με προσαύξηση των φορτίων λειτουργίας του φορέα μέσω των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας. Τα προκύπτοντα φορτία ονομάζονται φορτία ή δράσεις σχεδιασμού και χρησιμοποιούνται υπό μορφή συνδυασμών για τον σχεδιασμό του φορέα. Οι συνδυασμοί του EN 1990 που ανταποκρίνονται στις συνθήκες φόρτισης των υπό μελέτη συστημάτων παίρνουν τη μορφή:

Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.5)$$

Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.6)$$

όπου,

- $G_{k,j}$ η χαρακτηριστική τιμή της μόνιμης δράσης j
 $Q_{k,1}$ η χαρακτηριστική τιμή της επικρατέστερης μεταβλητής δράσης
 $Q_{k,i}$ η χαρακτηριστική τιμή των λοιπών ταυτόχρονων μεταβλητών δράσεων i
 $\gamma_{G,j}$ ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη μόνιμη δράση j
 $\gamma_{Q,i}$ ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη μεταβλητή δράση i
 $\psi_{0,i}$ συντελεστής συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων

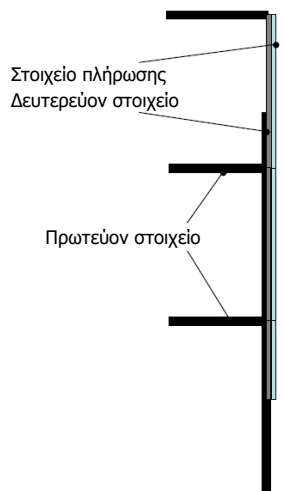
Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας χρησιμοποιούνται προκειμένου να ληφθούν υπόψη πιθανές δυσμενείς αποκλίσεις ή πιθανή μη ακριβής προσομοίωση των δράσεων, καθώς και αβεβαιότητες στον προσδιορισμό των αποτελεσμάτων των δράσεων (εντατικά μεγέθη, μετακινήσεις κλπ). Στον Πίνακα 5.7 συνοψίζονται οι προβλεπόμενες από τον EN 1990 τιμές τους.

Οριακές καταστάσεις	συντελεστής γ_G		συντελεστής γ_Q	
	δυσμενής επιρροή	ευμενής επιρροή	δυσμενής επιρροή	ευμενής επιρροή
Αστοχίας	1.35	1.00	1.50	0
Λειτουργικότητας	1.00	1.00	1.00	0

Πίνακας 5.7. Τιμές των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας για μόνιμες και μεταβλητές δράσεις

Οι κανονισμοί prEN 13474-3 και prEN 16612 διαχωρίζουν τα στοιχεία της γυάλινης πρόσοψης από τα πρωτεύοντα στοιχεία του κτιρίου και αποδίδουν μειωμένες τιμές στους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_G και γ_Q (Πίνακας 5.8). Ως πρωτεύοντα αναφέρονται τα υποστυλώματα, τα δοκάρια, οι

πλάκες και γενικά όλα εκείνα τα στοιχεία που εκτός από το βάρος τους φέρουν και το βάρος των δευτερευόντων στοιχείων και ενδεχόμενη αστοχία τους θέτει σε κίνδυνο την ευστάθεια ολόκληρης της κατασκευής. Στα δευτερεύοντα στοιχεία συγκαταλέγονται οι μεταλλικές διατομές που περιβάλλουν το γυαλί και θεωρούνται υπεύθυνες μόνο για την καλή λειτουργία των πάνελ ή άλλων μη δομικών στοιχείων που προσαρτώνται σε αυτές. Η αντικατάστασή τους γίνεται ανεξάρτητα από τον κύριο φέροντα οργανισμό. Ο ρόλος των υαλοπινάκων περιορίζεται σε αυτόν του στοιχείου πλήρωσης που δε συνεισφέρει με κανέναν τρόπο στην οριζόντια παγίωση του φορέα. Βέβαια οι συντελεστές που προτείνονται στον Πίνακα 5.8 σχετίζονται με μια ενδεικτική διάρκεια ζωής του έργου και επιδέχονται τροποποιήσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η παρούσα μελέτη μεταχειρίζεται όλα τα στοιχεία της πρόσοψης ως πρωτεύοντα και υιοθετεί τις τιμές του Πίνακα 5.7 τόσο για τους υαλοπίνακες όσο και για τα προφίλ αλουμινίου.



Τύπος στοιχείου	γ_Q	$\gamma_G^{(3)}$	
		ευμενής επιρροή	δυσμενής επιρροή
Πρωτεύον στοιχείο ⁽¹⁾	βλ. Ευρωκώδικες	βλ. Ευρωκώδικες	βλ. Ευρωκώδικες
Δευτερεύον στοιχείο ⁽¹⁾	1.3	1.0	1.2
Στοιχείο πλήρωσης ⁽²⁾	1.1	1.0	1.1

(1) Δομικό στοιχείο που καλύπτεται από τους Ευρωκώδικες
 (2) Μη δομικό στοιχείο που δεν καλύπτεται από τους Ευρωκώδικες
 (3) Η μικρότερη τιμή χρησιμοποιείται όταν το προκύπτον αποτέλεσμα της δράσης σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες δράσεις είναι ευνοϊκό. Η υψηλότερη τιμή χρησιμοποιείται όταν θεωρείται πως η μόνιμη δράση ενεργεί μόνη της, ή όταν το προκύπτον αποτέλεσμα της μόνιμης δράσης σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες δράσεις είναι δυσμενές.

Πίνακας 5.8. Τιμές των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας ανάλογα με τον τύπο του στοιχείου

Οι συντελεστές συνδυασμού ψ_i εκφράζουν τη μειωμένη πιθανότητα για ταυτόχρονη συνύπαρξη των πλέον δυσμενών τιμών των διάφορων ανεξάρτητων δράσεων. Οι τιμές τους για τα φορτία χρήσης και ανέμου που δρουν σε μια κατασκευή δίνονται στον Πίνακα 5.9.

Δράσεις	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια (EN 1991-1-1)			
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0.7	0.5	0.3
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0.7	0.7	0.6
Φορτία ανέμου σε κτίρια (EN 1991-1-4)	0.6	0.2	0

Πίνακας 5.9. Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών ψ_i για κτίρια

Με βάση τα παραπάνω οι συνδυασμοί στην οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας διαμορφώνονται ως εξής:

Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

ULS1. $1.35G+1.50W+1.50\cdot 0.70Q$

ULS2. $1.35G+1.50Q+1.50\cdot 0.60W$

Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

SLS1. $1.00G+1.00W+0.70Q$

SLS2. $1.00G+1.00Q+0.60W$

Επισημαίνεται πως οι συνδυασμοί αυτοί απευθύνονται τόσο στον υαλοπίνακα και των δύο συστημάτων όσο και στον μεταλλικό σκελετό του υαλοπετάσματος. Αυτό που διαφοροποιείται στην κάθε περίπτωση είναι το είδος των φορτίων. Όταν πρόκειται για το πάνελ, ο άνεμος W έχει τη μορφή επιφανειακού φορτίου και το επιβαλλόμενο Q τη μορφή γραμμικού φορτίου. Όταν πρόκειται για τα μεταλλικά μέλη, τα φορτία αυτά εκπίπτουν σε γραμμικό και συγκεντρωμένο αντίστοιχα. Προς αποφυγή οποιασδήποτε σύγχυσης, όταν οι υπολογισμοί αφορούν τον υαλοπίνακα θα χρησιμοποιούνται τα σύμβολα w και q , ενώ όταν αφορούν τον μεταλλικό σκελετό τα αντίστοιχα φορτία θα αναφέρονται ως W και Q .

5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Με στόχο την απλοποίηση των υπολογισμών στο στάδιο της προδιαστασιολόγησης, οι απαιτούμενες διατομές θα καθοριστούν σε κάθε περίπτωση με βάση τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας αποκλειστικά για τη δράση του ανέμου. Το σύνολο των φορτίων θα επιβληθεί απευθείας στα αριθμητικά μοντέλα του Κεφαλαίου 6, προκειμένου να διαπιστωθεί η επάρκεια των διατομών. Ο έλεγχος των τάσεων για τον υαλοπίνακα καθορίζεται από την αντοχή σχεδιασμού $f_{g,d}$ που υπολογίστηκε στην Παράγραφο 5.1.1. Όσον αφορά τις βυθίσεις, το πρότυπο prEN 16612, ελλείψει κάποιας άλλης πιο συγκεκριμένης απαίτησης ανάλογα με την εφαρμογή, θέτει ως ανώτατο όριο το ελάχιστο από τα μεγέθη $S_{pan}/65$ ή 50 mm.

5.3.1 Προδιαστασιολόγηση συστήματος δομικής σιλικόνης

Το πάχος h της πολυστρωματικής σύνθεσης καθορίζεται σύμφωνα με τους ελέγχους σε ΟΚΑ και ΟΚΛ, υπό τη θεώρηση πως η περιφερειακή συγκράτηση του πάνελ μέσω συγκόλλησης δημιουργεί συνθήκες απλής έδρασης κατά μήκος και των τεσσάρων πλευρών. Όσον αφορά τις μεταλλικές διατομές, η επιλογή γίνεται με βάση την απαιτούμενη ροπή αδράνειας από τα προφίλ της σειράς E85 των συστημάτων αλουμινίου ETEM. Η σειρά αυτή περιλαμβάνει όλα τα προϊόντα που σχετίζονται με τον σκελετό των υαλοπετασμάτων και μπορεί να συνδυαστεί τόσο με τον μηχανικό τρόπο στερέωσης των υαλοπινάκων όσο και με την τεχνική της συγκόλλησης. Ο κατάλογος με τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των προϊόντων που αφορούν την παρούσα μελέτη (ορθοστατών και τραβερσών) δίνεται στο Παράρτημα Α. Επισημαίνεται πως οι άξονες του καταλόγου τροποποιούνται, ώστε να συμφωνούν με το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα οι άξονες x και y του καταλόγου αντιστοιχίζονται στην περίπτωση των ορθοστατών στους άξονες x και z , ενώ στην περίπτωση των τραβερσών στους άξονες y και z .

5.3.1.1 Προδιαστασιολόγηση υαλοπίνακα

Το πρότυπο prEN 13474-2 δίνει σχέσεις για τον προσδιορισμό της μέγιστης τάσης σ_{max} και βύθισης w_{max} αμφίεριστου, τριέριστου και τετραέριστου ορθογωνικού υαλοπίνακα υπό καταναμεμημένο φορτίο σχεδιασμού με βάση τόσο την ελαστική θεωρία πλακών όσο και τη θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων. Για την περίπτωση του τετραέριστου υαλοπίνακα οι σχέσεις παίρνουν την εξής μορφή:

$$\sigma_{\max} = k_1 \frac{b^2}{h^2} F_d, \quad (5.7)$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{b^4}{h^3} \frac{F_k}{E}, \quad (5.8)$$

όπου δεδομένων των διαστάσεων a και b του πάνελ, ως b λαμβάνεται η μικρότερη από τις δύο, ενώ με h συμβολίζεται το πάχος της διατομής. E είναι το μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού. Οι αδιάστατοι συντελεστές k_1 και k_4 δίνονται από τους Πίνακες Β.1 και Β.2 του Παραρτήματος Β αντίστοιχα ως συνάρτηση του λόγου b/a και του κανονικοποιημένου φορτίου p^* της εξίσωσης (5.9). Για τη γραμμική θεωρία λαμβάνεται $p^*=0$.

$$p^* = \frac{b^4}{h^4} \frac{F}{E} \quad (5.9)$$

Ο υπό μελέτη υαλοπίνακας χαρακτηρίζεται από λόγο πλευρών $\lambda=1500/3800=0.395$, ενώ συντηρητικά αγνοείται η επίδραση των φαινομένων γεωμετρικής μη γραμμικότητας ($p^*=0$). Επομένως, από τους Πίνακες του Παραρτήματος Β εξάγονται οι συντελεστές $k_1=0.676$ και $k_4=0.132$. Για τον έλεγχο της βύθισης το φορτίο είναι ίσο με $F_k=2$ kPa, ενώ για τον έλεγχο της τάσης προσαυξάνεται με τον επιμέρους συντελεστή μεταβλητών δράσεων γ_Q και παίρνει την τιμή $F_d=1.5 \times 2=3$ kPa. Η επιτρεπόμενη βύθιση ορίζεται ως $w_{\text{all,pane}}=\min(b/65; 50\text{mm})=\min(1500/65; 50)\text{mm}=\min(23; 50)\text{mm}=23$ mm. Η συμμόρφωση με τους ελέγχους αστοχίας και λειτουργικότητας εισάγει τις σχέσεις:

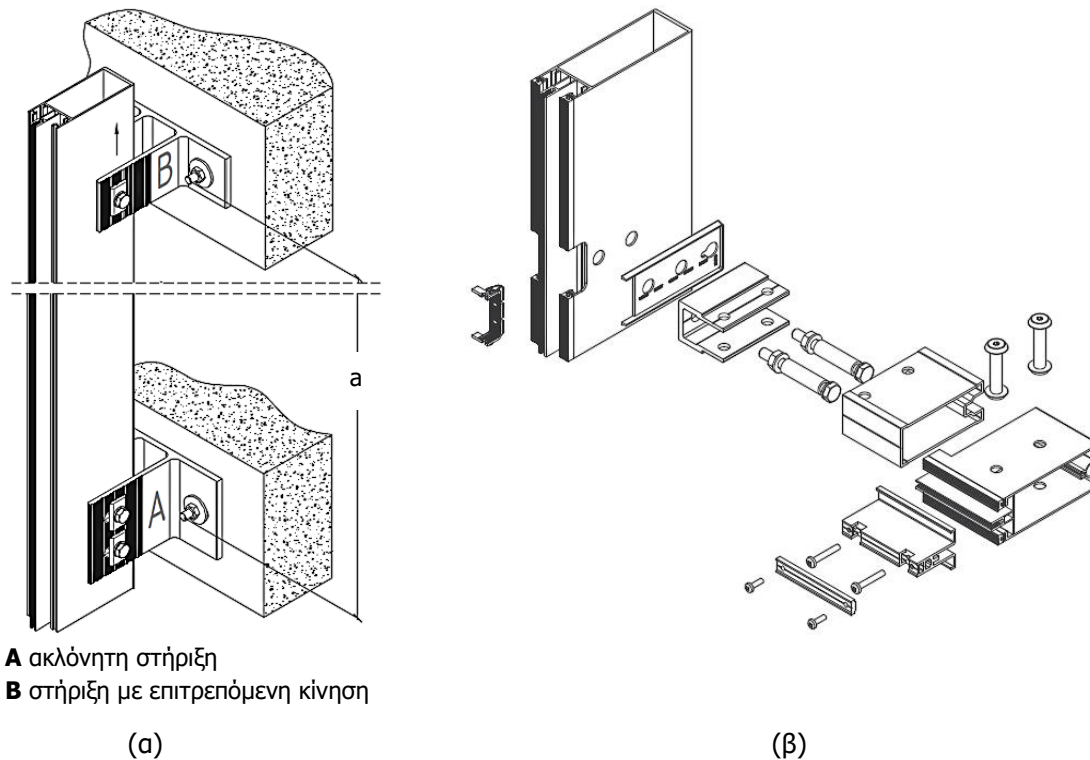
$$\sigma_{\max} \leq f_{g,d} \Rightarrow 0.676 \times \frac{1500^2}{h^2} \times 3 \times 10^{-3} \leq 39.33 \Rightarrow h \geq 10.77 \text{ mm} \quad (5.10)$$

$$w_{\max} \leq w_{\text{all,pane}} \Rightarrow 0.132 \times \frac{1500^4}{h^3} \times \frac{2}{70000} \times 10^{-3} \leq 23 \Rightarrow h \geq 9.40 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Επιλέγονται δύο φύλλα γυαλιού πάχους $h_1=h_2=6$ mm και πάχος ενδιάμεσης στρώσης $t=1.52$ mm. Η επάρκεια της διατομής για τις πιθανές τιμές του μέτρου διάτμησης G_{int} του πολυμερούς ελέγχεται στο Κεφάλαιο 6.

5.3.1.2 Προδιαστασιολόγηση φέροντος οργανισμού

Το σύστημα της πρόσοψης αποτελείται από ορθοστάτες μήκους 3800 mm και τραβέρσες μήκους 1500 mm. Κάθε ορθοστάτης στερεώνεται ακλόνητα στη βάση του, ενώ στο πάνω σημείο στήριξης υπάρχει πρόβλεψη για κίνηση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ώστε να αποσβένονται οι συστολοδιαστολές λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών (Εικόνα 5.2(α)). Η ακλόνητη στήριξη αναλαμβάνει το ίδιο βάρος του ορθοστάτη, το βάρος των τραβερσών και των υαλοπινάκων που συντρέχουν σε αυτή καθώς και το φορτίο ανέμου που της αντιστοιχεί, ενώ η στήριξη με επιτρεπόμενη κίνηση αντιστέκεται μόνο στη δράση του ανέμου. Στο στατικό σύστημα η πρώτη περιγράφεται με άρθρωση και η δεύτερη με κύλιση που αποκλείει την εκτός επιπέδου μετατόπιση. Τα προφίλ τραβέρσας συναρμολογούνται μεταξύ των προφίλ ορθοστατών και οι σύνδεσμοι ένωσης λειτουργούν ως αρθρώσεις (Εικόνα 5.2(β)).

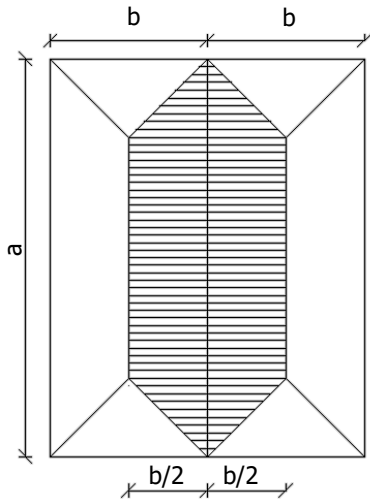


Εικόνα 5.2. (α) Στερέωση ορθοστάτη στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου
(β) Συναρμολόγηση ορθοστάτη-τραβέρσας

Η αρχική επιλογή διατομών για τους ορθοστάτες και τις τραβέρσες θα γίνει με βάση την επιτρεπόμενη βύθιση που ορίζει ο EN 1999-1-1 για τα στοιχεία του δομικού πλέγματος των υαλοπετασμάτων, $W_{\text{wall, substrate}} = \min(L/250; 15\text{mm})$. Ως L αναφέρεται το μήκος μεταξύ δύο στηρίξεων. Τα όρια είναι αρκετά αυστηρά, ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι στηριζόμενοι υαλοπίνακες δεν θα αναπτύξουν μεγάλες παραμορφώσεις εις βάρος της ακεραιότητάς και της ανθεκτικότητάς τους. Ο σχεδιασμός δε λαμβάνει υπόψη αύξηση της εντός επιπέδου σιβαρότητας των μελών αλουμινίου λόγω της παρουσίας του γυαλιού.

ΟΡΘΟΣΤΑΤΗΣ

Το εύρος της ζώνης επιρροής κάθε ορθοστάτη ισούται με το πλάτος b του υαλοπίνακα. Η εξίσωση (5.12) δίνει την απαιτούμενη ροπή αδράνειας της διατομής. Το βέλος κάμψης f που υπεισέρχεται στον υπολογισμό προέρχεται από τον περιορισμό του EN 1999-1-1 που αναφέρθηκε παραπάνω και ισούται με: $f = \min(3800/250; 15)\text{mm} = \min(15.2; 15)\text{mm} = 15\text{ mm}$. Παρόλο που το προφίλ E85106 ($I_x = 752.98\text{ cm}^4$) του Παραρτήματος Α ικανοποιεί την παρακάτω απαίτηση, επιλέγεται τελικά το αμέσως επόμενο προφίλ του καταλόγου, δηλαδή το E85107 ($I_x = 1003.76\text{ cm}^4$), καθώς στη σχέση (5.12) έχει αγνοηθεί η επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου. Φυσικά η σχέση αυτή συνιστά μια πρώτη ένδειξη των απαιτήσεων της διάταξης και θα πρέπει να ακολουθήσουν έλεγχοι αντοχής σε κάμψη, τέμνουσα καθώς και σε φαινόμενα λυγισμού κατά τον EN 1999-1-1 προκειμένου να διαπιστωθεί η επάρκειά της (Κεφάλαιο 6).



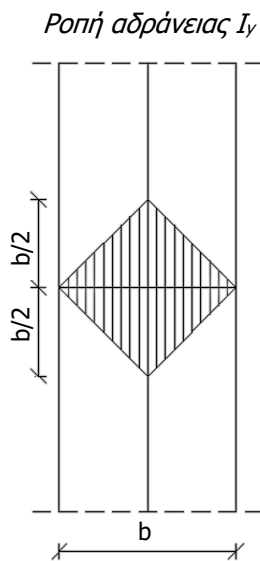
$$I_x = 2 \frac{w \cdot (b/2) \cdot a^4}{1920 \cdot E_{al} \cdot f} \cdot 10^8 \cdot \left[25 - 40 \cdot \frac{(b/2)^2}{a^2} + 16 \cdot \frac{(b/2)^2}{a^2} \right]$$

$$\Rightarrow I_x = 2 \times \frac{2 \times 0.75 \times 3.8^4}{1920 \times 70 \times 10^6 \times 0.015} \times 10^8 \times \left[25 - 40 \times \frac{0.75^2}{3.8^2} + 16 \times \frac{0.75^2}{3.8^2} \right]$$

$$\Rightarrow I_x = 746.71 \text{ cm}^4 \quad (5.12)$$

ΤΡΑΒΕΡΣΑ

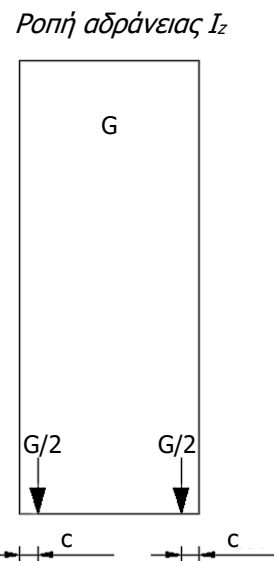
Οι τραβέρσες φέρουν ειδικά διαμορφωμένες εσοχές στις οποίες τοποθετούνται τα τακάκια, συνήθως σε απόσταση $c=150 \text{ mm}$ από τις στηρίξεις, για την ανάληψη των φορτίων του υαλοπίνακα. Σημειώνεται επομένως κάμψη τόσο περί τον ισχυρό (y) όσο και περί τον ασθενή (z) άξονα εξαιτίας της ανεμοπίεσης και του βάρους του υπερκείμενου υαλοπίνακα αντίστοιχα. Η επιλογή του κατάλληλου προφίλ σε αυτήν



$$I_y = 2 \frac{w \cdot b^5 \cdot 10^8}{240 \cdot E_{al} \cdot f_z}$$

$$\Rightarrow I_y = 2 \times \frac{2 \times 1.5^5 \times 10^8}{240 \times 70 \times 10^6 \times 0.006}$$

$$\Rightarrow I_y = 30.14 \text{ cm}^4 \quad (5.13)$$



$$G = 1.2 \times 25 \times 3.8 \times 1.5 \times 2 \times 0.006 = 2.052 \text{ kN}$$

$$I_z = \frac{G \cdot a \cdot 10^8}{48 \cdot E_{al} \cdot f_y} \cdot (3 \cdot b^2 - 4 \cdot a^2)$$

$$\Rightarrow I_z = \frac{2.052 \times 0.15 \times 10^8}{48 \times 70 \times 10^6 \times 0.003} (3 \times 1.5^2 - 4 \times 0.15^2)$$

$$\Rightarrow I_z = 20.35 \text{ cm}^4 \quad (5.14)$$

την περίπτωση προκύπτει από τις συνθήκες για περιορισμό του μέγιστου βέλους κατά τις δύο διευθύνσεις. Για το φορτίο του ανέμου η επιτρεπόμενη βύθιση ορίζεται όπως και στην περίπτωση του ορθοστάτη ως $f_z = \min(1500/250; 15) \text{ mm} = \min(6; 15) \text{ mm} = 6 \text{ mm}$. Όταν όμως πρόκειται για μόνιμα φορτία, η μέγιστη βύθιση δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή $L/500$ ή 3 mm , όποιο από τα δύο είναι μικρότερο. Επομένως $f_y = \min(1500/500; 3) \text{ mm} = \min(3; 3) \text{ mm} = 3 \text{ mm}$. Το βάρος του υαλοπινάκα G στην εξίσωση (5.14) έχει προσαυξηθεί κατά 20%, ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς το βάρος των εξαρτημάτων στερέωσης και στεγάνωσης. Επιλέγεται από το Παράρτημα Α η διατομή E85303 ($I_y = 45.83 \text{ cm}^4$ και $I_z = 21.60 \text{ cm}^4$). Η επάρκειά της ελέγχεται στη συνέχεια, όπως και στην περίπτωση του προφίλ του ορθοστάτη, σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1999-1-1.

5.3.2 Προδιαστασιολόγηση συστήματος μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων

Το πρότυπο prEN 13474-2 αναφέρει πως ο συμβατικός τρόπος στήριξης των υαλοπινάκων, ο οποίος υλοποιείται με ελαστικά παρεμβύσματα και στεγανωτική σιλικόνη εντός μεταλλικού πλαισίου, αντιστοιχεί σε συνθήκες απλής έδρασης. Ο τρόπος σύνδεσης δύο παρακείμενων πάνελ δε στηρίζει επαρκώς κανένα από τα δύο, επομένως οι αντίστοιχες πλευρές πρέπει να θεωρούνται ελεύθερες. Με αυτή τη λογική, κατά τη διαδικασία της προδιαστασιολόγησης, το κάθε πάνελ θεωρείται ως αμφιέριστη δοκός με μήκος $a = 3800 \text{ mm}$ και εύρος ζώνης επιρροής $b = 1500 \text{ mm}$. Το απαιτούμενο πάχος h θα προκύψει με βάση τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση και τη μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση. Λόγω του μεγάλου ανοίγματος της δοκού κρίνεται αναγκαίο να υιοθετηθούν αυστηρότερα κριτήρια για τον προσδιορισμό της επιτρεπόμενης βύθισης σε σχέση με το τετραέριστο σύστημα. Ο περιορισμός $a/120$ συναντάται συχνά στον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα λειτουργικότητας και αντοχής του γυαλιού. Το φορτίο ελέγχου σε ΟΚΛ και ΟΚΑ δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$q_{Ek} = w \cdot b = 2 \text{ kN/m}^2 \times 1.5 \text{ m} = 3 \text{ kN/m} \quad (5.15)$$

$$q_{Ed} = \gamma_Q \cdot w \cdot b = 1.5 \times 2 \text{ kN/m}^2 \times 1.5 \text{ m} = 4.5 \text{ kN/m} \quad (5.16)$$

Η μέγιστη τάση και η μέγιστη βύθιση της αμφιέριστης δοκού υπολογίζονται ως εξής:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{Ed, \max}}{W} = \frac{q_{Ed} \cdot a^2 / 8}{I / (h/2)} = \frac{q_{Ed} \cdot a^2 / 8}{b \cdot h^2 / 6} \quad (5.17)$$

$$W_{\max} = \frac{5 \cdot q_{Ek} \cdot a^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (5.18)$$

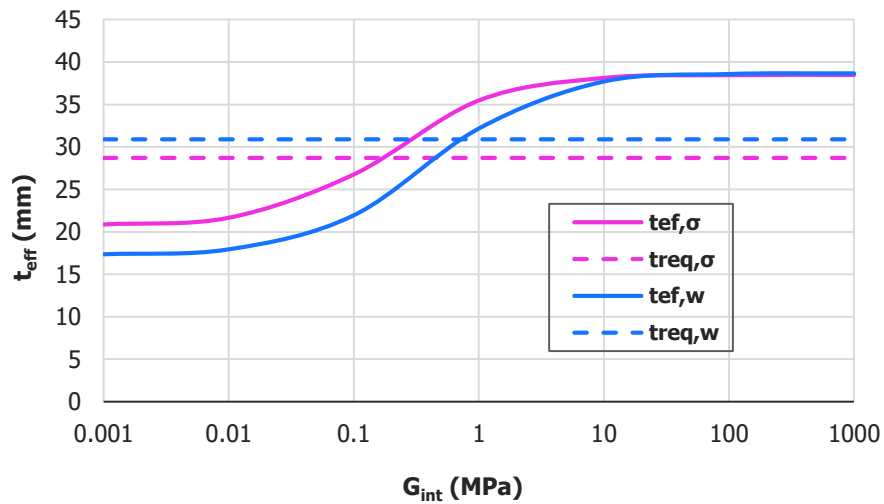
Επομένως οι απαιτούμενοι έλεγχοι διατυπώνονται ως ακολούθως:

$$\sigma_{\max} \leq f_{g,d} \Rightarrow \frac{4.5 \times 3.8^2 / 8}{1.5 \times h^2 / 6} \times 10^3 \leq 39.33 \Rightarrow h \geq 28.7 \text{ mm} \quad (5.19)$$

$$W_{\max} \leq W_{\text{all}} \Rightarrow \frac{5 \times 3 \times 3.8^4}{384 \times 70 \times 1.5 \times h^3 / 12} \times 10^3 \leq \frac{3.8}{120} \Rightarrow h \geq 30.9 \text{ mm} \quad (5.20)$$

Επιλέγονται 3 φύλλα γυαλιού πάχους $h_1 = h_2 = h_3 = 12 \text{ mm}$ και πάχη ενδιάμεσων στρώσεων $t_1 = t_2 = 1.52 \text{ mm}$. Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.3 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα πάχη για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης και βύθισης κατά τη μέθοδο EET (Κεφάλαιο 3) συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int} και συγκρίνονται με τις απαιτήσεις των εξισώσεων (5.19) και (5.20). Το γεγονός πως οι απαιτήσεις αυτές

δεν ικανοποιούνται σε ολόκληρο το εύρος τιμών του G_{int} δεν προκαλεί κάποια ανησυχία, δεδομένου ότι η χρήση του υλικού SGP στις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας, όπου απευθύνεται ο σχεδιασμός, εγγυάται τιμές που διατρέχουν αποκλειστικά το αποδεκτό τμήμα της καμπύλης, τουλάχιστον για τη φόρτιση του ανέμου. Παρόλα αυτά για λόγους πληρότητας και προκειμένου να διερευνηθεί η ευαισθησία της απόκρισης της πολυστρωματικής διάταξης στη μεταβολή των ιδιοτήτων της ενδιάμεσης στρώσης, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όλο το πεδίο των ρεαλιστικών τιμών του G_{int} .



Εικόνα 5.3. Ισοδύναμα πάχη για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης και μέγιστης βύθισης συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int}

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΨΗΣ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν για τα επιμέρους τμήματα των υπό εξέταση συστημάτων πρόσοψης και ελέγχεται η επάρκεια των διατομών που ανέδειξε η διαδικασία της προδιαστασιολόγησης. Για την περίπτωση του υαλοπετάσματος, υαλοπίνακας και μεταλλικός σκελετός εξετάζονται ξεχωριστά, ενώ ο τρόπος συγκράτησης του πάνελ με τη βοήθεια της δομικής σιλικόνης αποδίδεται στο προσομοίωμα μέσω των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Η μελέτη της συμπεριφοράς του πάνελ, πέρα από τις γραμμικές αναλύσεις για το φορτίο σχεδιασμού, περιλαμβάνει και τη διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στα αναπτυσσόμενα μεγέθη και την κατανομή των τάσεων. Όσον αφορά τις διατομές ορθοστάτη και τραβέρσας, η αντοχή τους ελέγχεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1999-1-1 έναντι των εντατικών μεγεθών που σχετίζονται με τον τρόπο φόρτισης του κάθε μέλους. Για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης, μορφώνονται οι λεπτομέρειες στήριξης στη βάση και κεφαλή του πάνελ, εξετάζεται η επίδρασή τους στην παραμόρφωση της διάταξης υπό το φορτίο σχεδιασμού και στη συνέχεια επιδιώκεται η απλοποίηση της προσομοίωσης μέσω της χρήσης ελατηρίων και δέσμευσης των κατάλληλων βαθμών ελευθερίας.

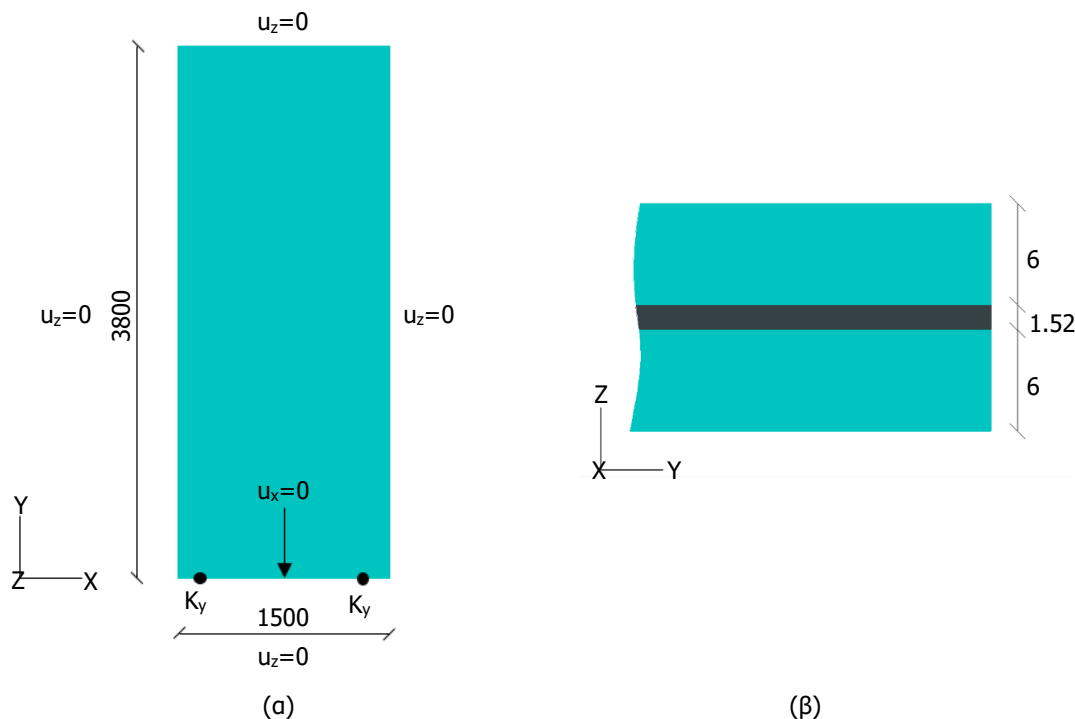
Όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA, με χρήση τρισδιάστατων στοιχείων (3d-solid elements) για τους υαλοπίνακες και στοιχείων δοκού (beam elements) για τους ορθοστάτες και τις τραβέρσες. Η συμπεριφορά των υλικών περιγράφηκε με ισότροπο γραμμικώς ελαστικό μοντέλο, εισάγοντας ως δεδομένα στο λογισμικό το μέτρο ελαστικότητας E , τον λόγο Poisson ν και την πυκνότητα ρ . Οι ιδιότητες αυτές έχουν οριστεί και για τα τρία υλικά που αφορούν τη μελέτη (γυαλί, πολυμερές, αλουμίνιο) σε προηγούμενα Κεφάλαια. Υπενθυμίζεται πως στην περίπτωση του πολυμερούς τα μεγέθη E και ν δεν είναι σταθερά, αλλά μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Κρίθηκε επομένως απαραίτητη η διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων, ώστε να αποτυπωθεί στα διαγράμματα η επίδραση των ιξωδοελαστικών φαινομένων και να επισημανθούν τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνεται η απόκριση της πολυστρωματικής διάταξης.

6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ

6.1.1 Έλεγχος επάρκειας υαλοπίνακα

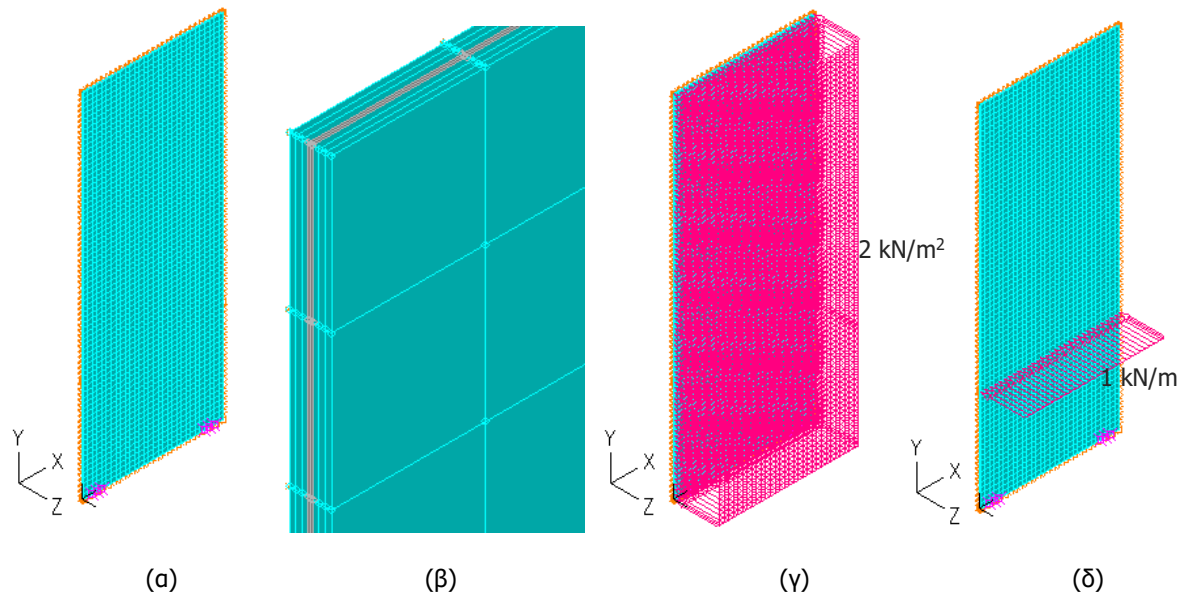
Όπως προέκυψε από την προδιαστασιολόγηση, ο υαλοπίνακας συντίθεται από δύο φύλλα γυαλιού πάχους $t_1=t_2=6$ mm και μία ενδιάμεση στρώση πολυμερούς πάχους $t_{int}=1.52$ mm ($t=6/1.52/6$ mm). Τα

ελαστικά παρεμβύσματα που τοποθετούνται μεταξύ της περιμέτρου των υαλοπινάκων και των στοιχείων αλουμινίου εξασφαλίζουν στους υαλοπινάκες τη δυνατότητα να στρέφονται και να κινούνται σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα από το μεταλλικό δομικό πλέγμα, ενώ παράλληλα η σιλικόνη επιτρέπει ως ένα σημείο τη σχετική ολίσθηση του γυαλιού ως προς το πλαίσιο (Κεφάλαιο 4). Θεωρείται πως οι συνοριακές συνθήκες της Εικόνας 6.1 περιγράφουν με επαρκή ακρίβεια τη στατική λειτουργία της διάταξης και αποδίδουν ένα αξιόπιστο μοντέλο που υλοποιείται εύκολα και παρουσιάζει μειωμένες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους. Στη θέση των τάκων που παραλαμβάνουν το βάρος του υαλοπίνακα και το μεταφέρουν στην τραβέρσα τοποθετούνται μετακινησιακά ελατήρια σταθεράς k_y , προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ενδοσιμότητα του τρόπου έδρασης του γυαλιού και να αποφευχθούν οι υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων που θα επέφερε η δέσμευση του αντίστοιχου βαθμού ελευθερίας τοπικά ($u_y=0$). Τα ελατήρια αυτά συνδέονται στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων τα οποία εκτείνονται σε μήκος $l=100$ mm στην επιφάνεια της βάσης του πάνελ, σε απόσταση $c=150$ mm από κάθε άκρο. Λεπτομέρειες για τον τρόπο υπολογισμού της σταθεράς k_y περιλαμβάνονται στην Παράγραφο 6.2.2.1.



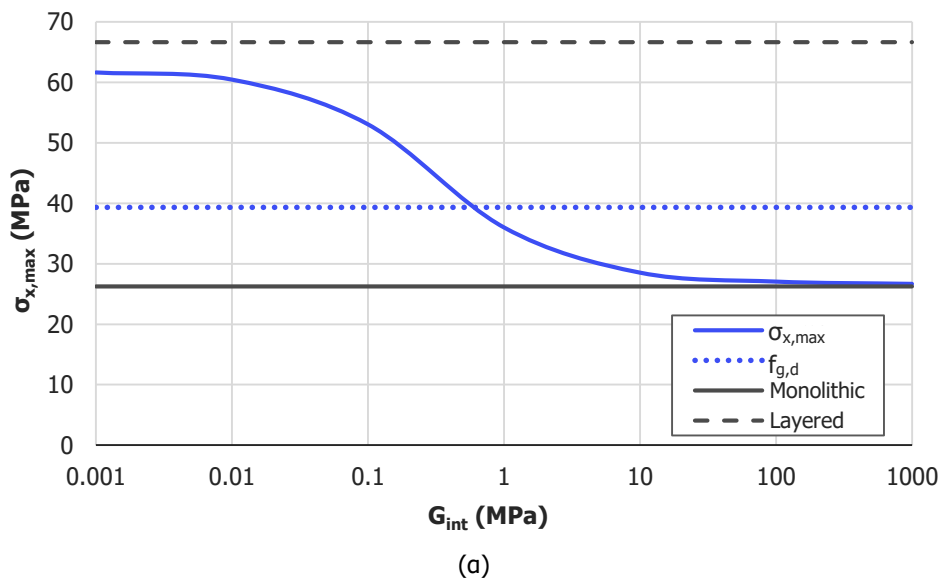
Εικόνα 6.1. (α) Γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες και (β) διατομή υαλοπίνακα

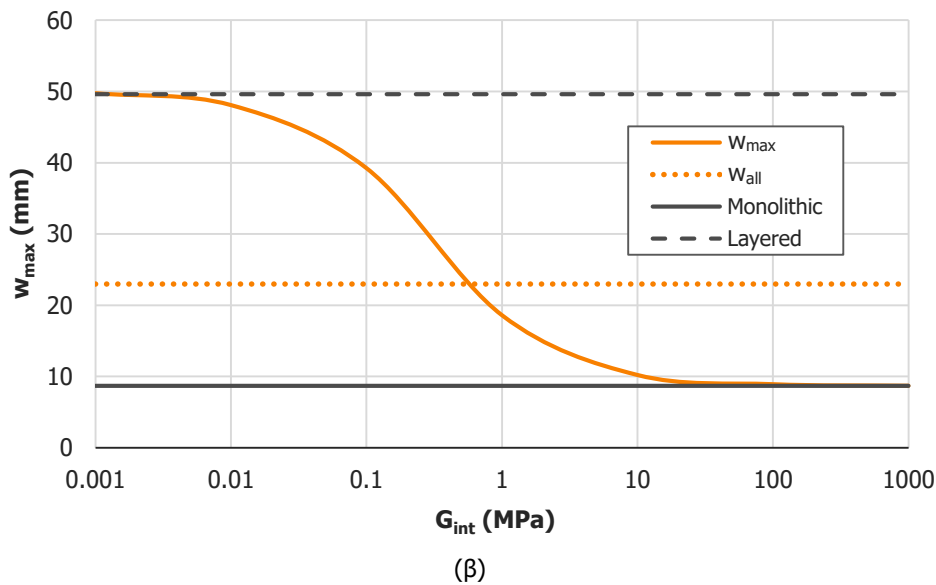
Στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε στο γραφικό περιβάλλον του ADINA για την προσομοίωση του υαλοπίνακα, καθώς και ο τρόπος επιβολής των φορτίων για την περίπτωση της ανεμοπίεσης και του επιβαλλόμενου λόγω χρήσης. Το επιβαλλόμενο φορτίο ασκείται, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5, σε ύψος 1100 mm από τη στάθμη του δαπέδου. Κατά τη διάσταση του πάχους ορίζονται τρία στοιχεία για το φύλλο του γυαλιού και δύο για την ενδιάμεση στρώση. Προκειμένου επομένως να διατηρηθεί ο λόγος των πλευρών σε επιθυμητά επίπεδα, απαιτείται η διαμόρφωση ενός πυκνού δικτύου, το οποίο επιβαρύνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος ακόμα και για την περίπτωση των γραμμικών αναλύσεων. Διαπιστώνεται έτσι και στην πράξη η ανάγκη διατύπωσης και εφαρμογής προσεγγιστικών μεθόδων για τον σχεδιασμό του πολυστρωματικού γυαλιού, όπως αυτή του ισοδύναμου πάχους.



Εικόνα 6.2. (α) Προσομοίωμα υαλοπίνακα, (β) λεπτομέρεια προσομοιώματος, (γ) φόρτιο ανέμου, (δ) επιβαλλόμενο φορτίο

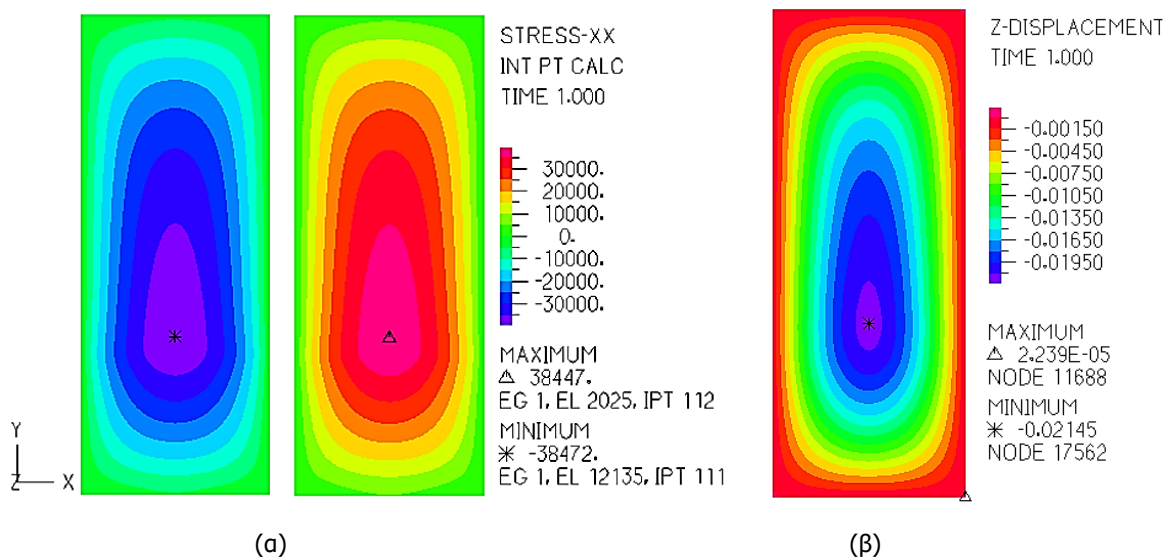
Τα διαγράμματα της Εικόνας 6.3 συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από γραμμικές αναλύσεις για τους συνδυασμούς φόρτισης ULS1 και SLS1, οι οποίοι αναδεικνύονται ως οι δυσμενέστεροι σε ΟΚΑ και ΟΚΛ αντίστοιχα. Η μέγιστη ορθή τάση $\sigma_{x,max}$ για τον πρώτο συνδυασμό και η μέγιστη βύθιση w_{max} για τον δεύτερο υπολογίζονται συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int} και εντοπίζονται σε κάθε περίπτωση εντός του εύρους τιμών που ορίζουν οι θεωρήσεις πλήρους και μηδενικής διατμητικής σύνδεσης των φύλλων γυαλιού (όρια monolithic και layered). Για τη μονολιθική απόκριση θεωρήθηκε φύλλο γυαλιού ενιαίου πάχους $t_{monolithic}=t_1+t_2+t_{int}=13.52$ mm, ενώ η απόκριση των ανεξάρτητων φύλλων εκφράστηκε με ένα φύλλο πάχους $t_{layered}=6$ mm, στο οποίο επιβλήθηκε το $\frac{1}{2}$ της τιμής των φορτίων.





Εικόνα 6.3. (α) Μέγιστη ορθή τάση $\sigma_{x,max}$ (ULS1) και (β) μέγιστη βύθιση w_{max} (SLS1) συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int}

Αποδεικνύεται πως η επιλεγείσα διατομή ανταποκρίνεται στις ανάγκες του σχεδιασμού μόνο όταν το μέγεθος G_{int} λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 0.7 MPa περίπου. Πράγματι, με βάση την Εικόνα 6.4, η οποία παρουσιάζει τη χρωματική απεικόνιση της ορθής τάσης σ_x (ULS1) και της βύθισης w (SLS1) για μέτρο διάτμησης του πολυμερούς $G_{int}=0.7$ MPa, αποδεικνύεται πως οι έλεγχοι σε ΟΚΑ και ΟΚΛ ικανοποιούνται οριακά. Ανατρέχοντας στα δεδομένα του Πίνακα 3.1 προκύπτει πως για τα φορτία που εξετάζονται, το υλικό SGP εγγυάται την επάρκεια της διατομής σε όλες τις πιθανές θερμοκρασίες, ενώ με τη χρήση του πολυμερούς PVB ενδέχεται να χρειαστούν φύλλα μεγαλύτερου πάχους, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

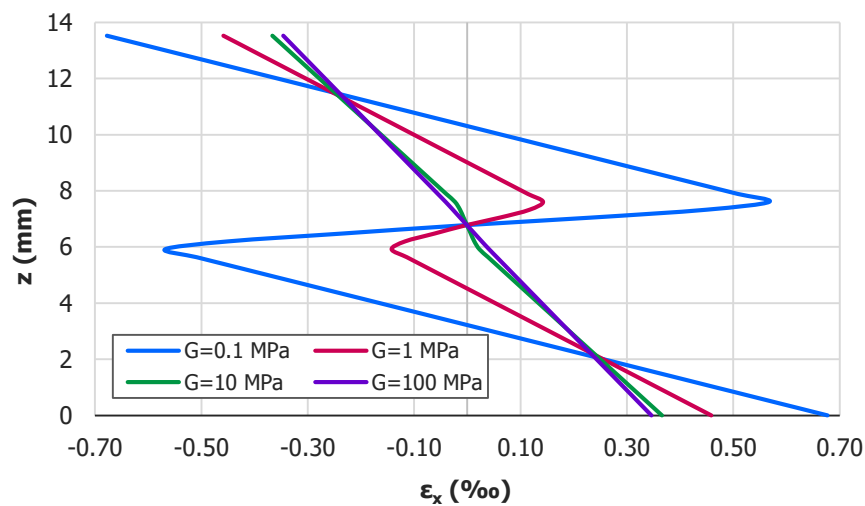


Εικόνα 6.4. Κατανόμη (α) των τάσεων σ_x -ULS1 (kPa) στην μπροστά και πίσω όψη του υαλοπίνακα και (β) της βύθισης w -SLS1 (m) για μέτρο διάτμησης του πολυμερούς $G_{int}=0.7$ MPa

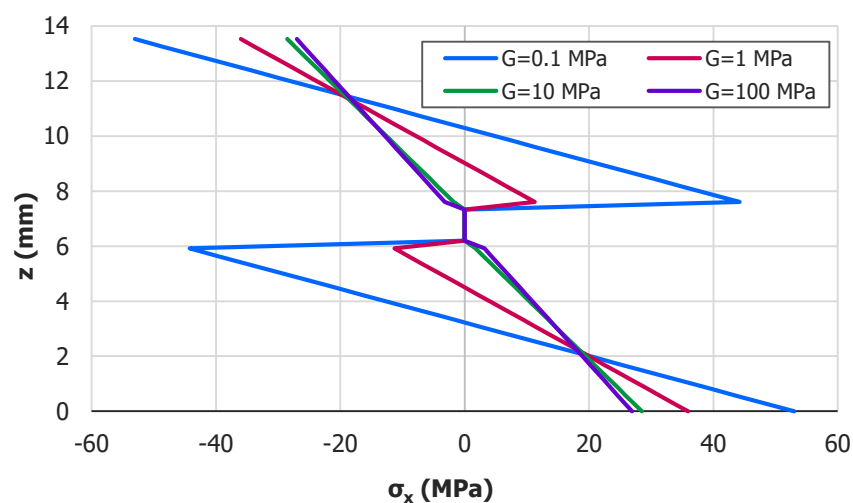
$$\text{Έλεγχος σε ΟΚΑ: } \sigma_{x,\max} = 38.45 \text{ MPa} < f_{g,d} = 39.33 \text{ MPa} \quad (6.1)$$

$$\text{Έλεγχος σε ΟΚΑ: } w_{\max} = 21.45 \text{ mm} < w_{\text{all,pane}} = 23 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Στα διαγράμματα της Εικόνας 6.5 αποτυπώνεται ο βαθμός στον οποίο επιτυγχάνεται η διατμητική συνεργασία των επιμέρους στοιχείων της σύνθετης διάταξης για συνήθεις τιμές του G_{int} . Πρόκειται για την κατανομή της παραμόρφωσης ε_x και της ορθής τάσης σ_x , για τη φόρτιση ULS1, καθώςως της διατομής στο σημείο όπου σημειώνεται η μέγιστη τιμή τους. Είναι εμφανές πως για τιμές του μέτρου διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης μεγαλύτερες από 10 MPa εξασφαλίζεται σχεδόν πλήρης σύνδεση των ανεξάρτητων φύλλων και επομένως το πολυστρωματικό στοιχείο μπορεί να μεταχειριστεί ως μονολιθικό. Για μικρότερες όμως τιμές του G_{int} , μια τέτοια απλοποιητική παραδοχή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση των αναπτυσσόμενων μεγεθών και να επέλθει τελικά αστοχία. Οι τάσεις του πολυμερούς θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με αυτές του γυαλιού, λόγω της μεγάλης διαφοράς στα μέτρα ελαστικότητας των δύο υλικών. Το επιβαλλόμενο φορτίο ισομοιράζεται στα δύο φύλλα γυαλιού, όπως αποκαλύπτει η κοινή κλίση των κατανομών τους.



(α)

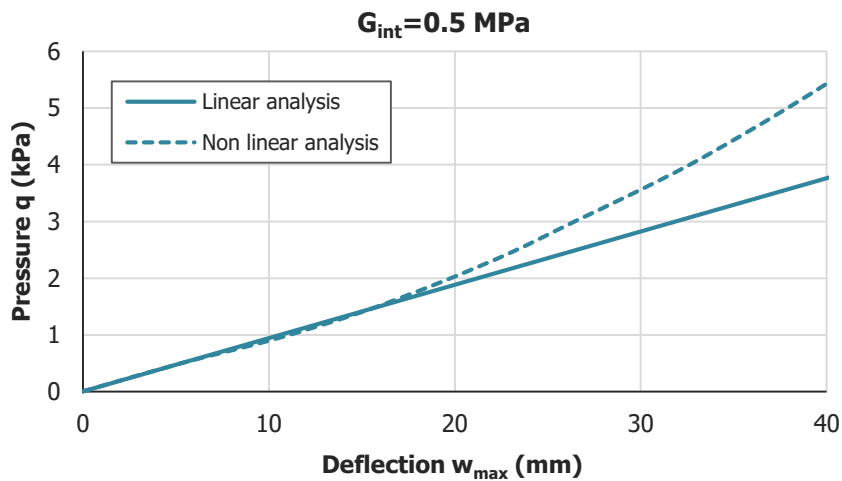


(β)

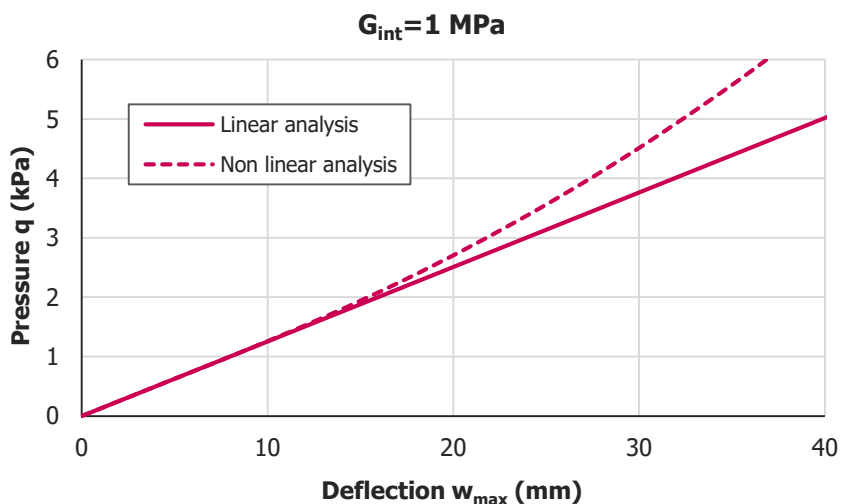
Εικόνα 6.5. Κατανομή (α) της παραμόρφωσης ε_x και (β) της τάσης σ_x καθώςως της διατομής για πιθανές τιμές του G_{int}

6.1.2 Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς υαλοπίνακα

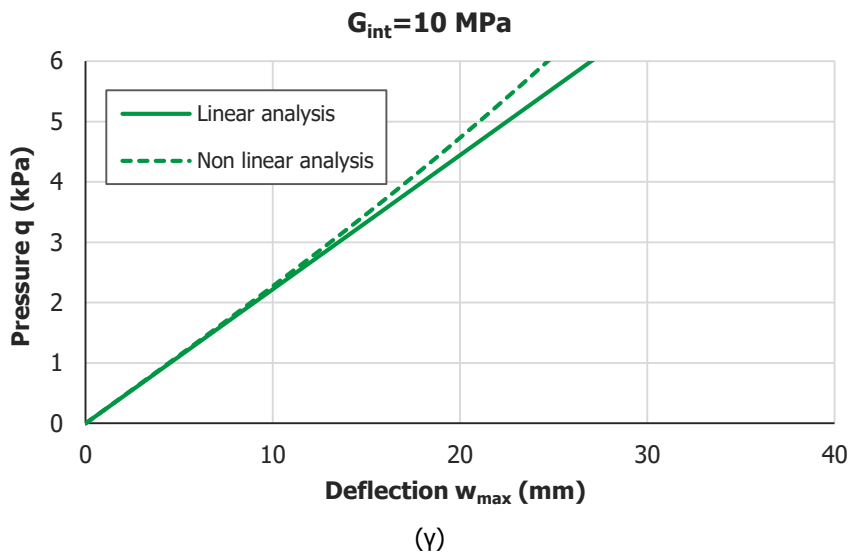
Οι αναλύσεις που προηγήθηκαν, βασίστηκαν στη θεώρηση γραμμικής συμπεριφοράς του υαλοπίνακα. Παρόλα αυτά, κατά τη μελέτη στοιχείων γυαλιού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και φαινόμενα γεωμετρικής μη γραμμικότητας, καθώς πρόκειται για φορείς μικρού πάχους και μεγάλων ανοιγμάτων που υπόκεινται συχνά σε υψηλές τιμές φορτίων. Αυτό σημαίνει πως εμφανίζουν μεγάλες βυθίσεις σε σχέση με το πάχος τους, οι οποίες συνδέονται με μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ παραμορφωμένης και απαραμόρφωτης γεωμετρίας. Υπό την επίδραση εγκάρσιου φορτίου οι περιοχές κατά τις διαγωνίους της πλάκας εφελκύνονται, ενώ οι ίνες κατά μήκος των τεσσάρων πλευρών βρίσκονται υπό θλίψη, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία του συστήματος. Εισάγεται με αυτό τον τρόπο ένας πρόσθετος μηχανισμός αντίστασης στο επιβαλλόμενο φορτίο, πέραν της καμπτικής λειτουργίας, ο οποίος συνιστά τη λειτουργία μεμβράνης και είναι περισσότερο αποτελεσματικός, καθώς οδηγεί στην ανάπτυξη μικρότερων τάσεων. Όσο μεγαλύτερες είναι οι μετακινήσεις του υαλοπίνακα κάθετα στο επίπεδο του, τόσο μεγαλύτερο είναι το μερίδιο της λειτουργίας καμπτόμενης πλάκας που αντικαθίσταται από τη λειτουργία μεμβράνης υπό εφελκυσμό.



(a)

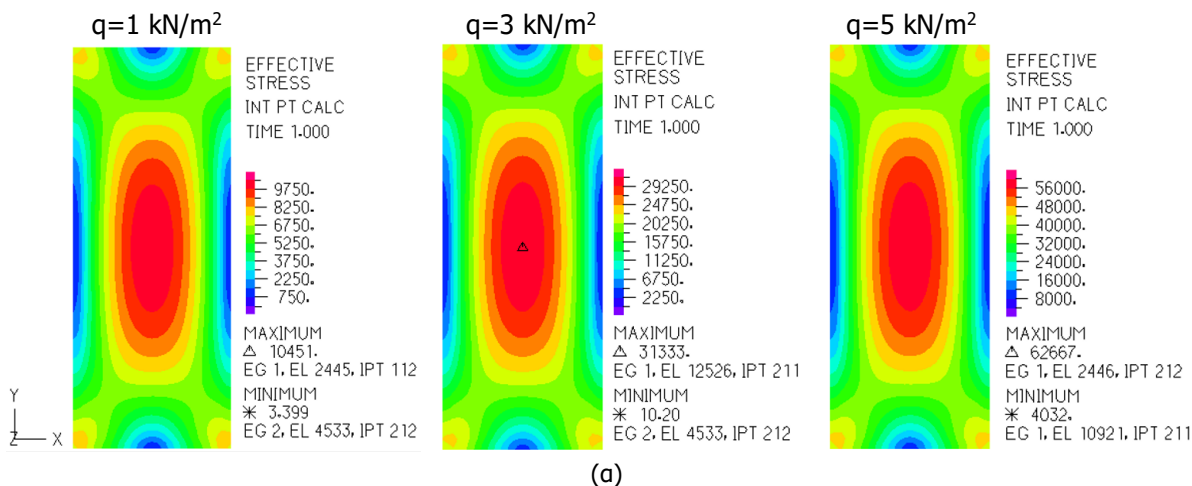


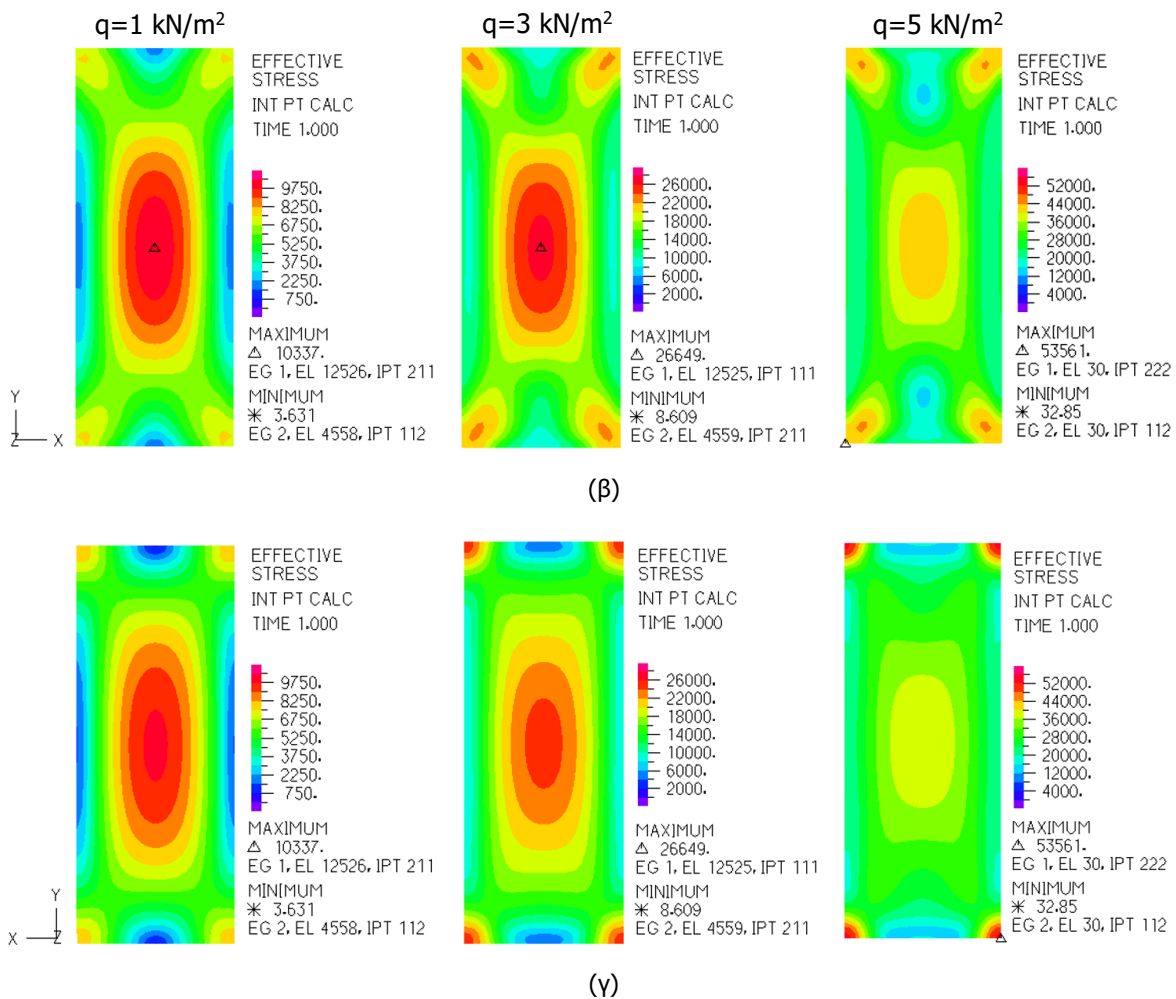
(β)



Εικόνα 6.6. Δρόμος ισορροπίας υαλοπίνακα υπό ομοιόμορφη πίεση
(α) $G_{int}=0.5 \text{ MPa}$, (β) $G_{int}=1 \text{ MPa}$ και (γ) $G_{int}=10 \text{ MPa}$

Στην Εικόνα 6.6 παρουσιάζονται οι σχέσεις πίεσης - μέγιστης βύθισης που προέκυψαν από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις του υαλοπίνακα ενδεικτικά για κάποιες τιμές του G_{int} . Σε κάθε περίπτωση οι μη γραμμικές αναλύσεις πετυχαίνουν μια πιο αξιόπιστη περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος, καθώς λαμβάνουν υπόψη τις μεμβρανικές τάσεις που εισάγονται στο επίπεδο της πλάκας κατά την αλλαγή της γεωμετρίας της και οδηγούν σε αύξηση της δυσκαμψίας της. Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο η μεταφορά διάτμησης μεταξύ των φύλλων γυαλιού μειώνεται και επομένως το μέγεθος της βύθισης αυξάνεται, τόσο πιο έντονη γίνεται η επίδραση της μη γραμμικότητας. Άλλωστε όταν η ενδιάμεση στρώση επιτρέπει τη σε μεγάλο βαθμό σχετική ολίσθηση των φύλλων γυαλιού, παραβιάζεται η παραδοχή της θεωρίας Kirchhoff που θέλει τις επίπεδες επιφάνειες κάθετες στη μέση επιφάνεια της πλάκας πριν την παραμόρφωση να παραμένουν επίπεδες μετά την παραμόρφωση και κάθετες στην παραμορφωμένη επιφάνεια, επομένως η γραμμική προσέγγιση οδηγεί σε υπερεκτίμηση των εκδηλούμενων παραμορφώσεων. Θα πρέπει βέβαια να τονιστεί πως η απόκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης παρατηρείται για βυθίσεις μεγαλύτερες των 23 mm, που αποτελεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Είναι λοιπόν πολύ πιθανό τα φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας να εμφανίζονται για φορτίσεις που υπερβαίνουν τις συνήθεις τιμές σχεδιασμού και επομένως η επίδρασή τους να μπορεί να αγνοηθεί.





Εικόνα 6.7. Κατανομή τάσεων von Mises: (α) γραμμική ανάλυση, (β) μη γραμμική ανάλυση, μπροστά επιφάνεια, (γ) μη γραμμική ανάλυση, πίσω επιφάνεια

Μια επιπλέον διαφορά ανάμεσα στη γραμμική και τη μη γραμμική ανάλυση εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται οι τάσεις στην επιφάνεια του υαλοπινάκα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.7(α) για $G_{int}=0.5$ MPa, με τη γραμμική θεώρηση, η οποία αγνοεί την αλλαγή της γεωμετρίας του φορέα, η μέγιστη τάση σημειώνεται πάντα στο κέντρο της πλάκας, δηλαδή στο σημείο όπου αναπτύσσεται η μέγιστη καμπτική ροπή. Αντιθέτως, η μη γραμμική προσέγγιση στις Εικόνες 6.7(β) και 6.7(γ) προκαλεί υπό αυξανόμενο φορτίο μετατόπιση του μεγίστου προς τις γωνίες, ενώ η τάση στο κέντρο παρουσιάζεται μειωμένη, καθώς σε αυτή την περίπτωση εισάγεται κυρίως από μεμβρανικές δυνάμεις.

6.1.3 Έλεγχος επάρκειας φέροντος οργανισμού

6.1.3.1 Αντοχή διατομών και μελών αλουμινίου κατά Ευρωκώδικα 9

Η Παράγραφος αυτή παραθέτει βασικές διατάξεις του EN 1999-1-1, οι οποίες θα χρησιμεύσουν στη συνέχεια για τον έλεγχο αντοχής σε οριακή κατάσταση αστοχίας των διατομών του ορθοστάτη και της τραβέρσας. Συγκεκριμένα, εξετάζει την κατάταξη των διατομών αλουμινίου, τους απαιτούμενους

ελέγχους των διατομών σε απλή κάμψη και τέμνουσα καθώς και τον έλεγχο σε πλευρικό λυγισμό μελών μη προστατευμένων πλευρικά που υπόκεινται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα.

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας

Οι αντοχές σχεδιασμού R_d προσδιορίζονται από διαίρεση των χαρακτηριστικών τιμών R_k με τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας του υλικού γ_M , οι οποίοι διαφοροποιούνται ως προς την εξεταζόμενη μορφή αστοχίας ως εξής:

αντοχή διατομών έναντι διαρροής, ανεξαρτήτως της κατηγορίας της διατομής	γ_{M1}
αντοχή μελών έναντι απώλειας της ευστάθειας	
αντοχή διατομών έναντι εφελκυστικής θραύσης	γ_{M2}

Στο Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα 9 προτείνονται οι παρακάτω αριθμητικές τιμές για τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας:

$$\gamma_{M1}=1.10$$

$$\gamma_{M2}=1.25$$

Κατάταξη διατομών

Στον Ευρωκώδικα 9 διακρίνονται τέσσερις κατηγορίες διατομών ανάλογα με την έκταση στην οποία η αντοχή και η στροφική ικανότητα περιορίζεται από τον τοπικό λυγισμό:

- Διατομές κατηγορίας 1: Είναι εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση στροφική ικανότητα χωρίς μείωση της αντοχής τους.
- Διατομές κατηγορίας 2: Είναι εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη στροφική ικανότητα λόγω τοπικού λυγισμού.
- Διατομές κατηγορίας 3: Είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του μέλους αλουμινίου μπορεί να φθάσει το όριο διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός είναι πιθανό να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- Διατομές κατηγορίας 4: Είναι εκείνες στις οποίες ο τοπικός λυγισμός θα επέλθει πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής.

Η κατάταξη μιας συγκεκριμένης διατομής εξαρτάται από τον λόγο πλάτους προς πάχος καθενός από τα (εν μέρει ή πλήρως) λόγω αξονικής δύναμης ή/και καμπτικής ροπής θλιβόμενα πλακοειδή στοιχεία της. Τα επιμέρους αυτά στοιχεία (όπως ο κορμός ή το πέλμα) μπορούν γενικά να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες, η δε διατομή κατατάσσεται σύμφωνα με την υψηλότερη (λιγότερο ευμενή) κατηγορία των θλιβόμενων στοιχείων της.

Η ευπάθεια ενός μη ενισχυμένου επίπεδου στοιχείου σε τοπικό λυγισμό καθορίζεται από την παράμετρο λυγηρότητας β , η οποία ορίζεται ως εξής:

Επίπεδα εσωτερικά στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων, ή
 επίπεδα προεξέχοντα στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων, ή $\beta=b/t$
 μέγιστη θλίψη στο άκρο

Εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων που έχει ως αποτέλεσμα τον ουδέτερο άξονα στο κέντρο	$\beta=0.40b/t$	
Εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων και εξωτερικά με μέγιστη θλίψη στη ρίζα	$\beta=\eta b/t$	(6.3)

όπου,

b το πλάτος του τμήματος της διατομής

t το πάχος του τμήματος της διατομής

Ο συντελεστής μεταβολής τάσεων η δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \eta &= 0.70 + 0.30\psi & (1 \geq \psi \geq -1) \\ \eta &= 0.80 / (1 - \psi) & (\psi < -1), \end{aligned} \quad (6.4)$$

όπου ψ είναι ο λόγος των τάσεων στα άκρα του υπό εξέταση τμήματος σε σχέση με τη μέγιστη θλιπτική τάση. Γενικά ως ουδέτερος άξονας θα πρέπει να λαμβάνεται ο ελαστικός ουδέτερος άξονας, αλλά στον έλεγχο αν η διατομή είναι κατηγορίας 1 ή 2 είναι επιτρεπτή η χρήση του πλαστικού ουδέτερου άξονα.

Η κατάταξη της διατομής γίνεται τελικά σύμφωνα με τα κριτήρια που ακολουθούν:

$\beta \leq \beta_1$ Κατηγορία 1

$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$ Κατηγορία 2

$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$ Κατηγορία 3

$\beta_3 < \beta$ Κατηγορία 4

Οι τιμές των β_1 , β_2 και β_3 δίνονται στον Πίνακα 6.1.

Ταξινόμηση υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2	Εσωτερικό στοιχείο			Προεξέχον στοιχείο		
	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
Κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις	11	16	22	3	4.5	6
Κατηγορία A, με συγκολλήσεις	9	13	18	2.5	4	5
Κατηγορία B, χωρίς συγκολλήσεις	13	16.5	18	3.5	4.5	5
Κατηγορία B, με συγκολλήσεις	10	13.5	15	3	3.5	4
$\epsilon = \sqrt{250 / f_o}$, f_o σε N/mm ²						

Πίνακας 6.1. Παράμετροι λυγηρότητας β_1/ϵ , β_2/ϵ και β_3/ϵ

Μονοαξονική Κάμψη

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

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad (6.5)$$

Η αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη περί έναν κύριο άξονα της διατομής M_{Rd} λαμβάνεται ίση με τη μικρότερη τιμή από τις $M_{u,Rd}$ και $M_{c,Rd}$:

$$M_{u,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2} \quad \text{σε καθαρή διατομή} \quad (6.6)$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_o / \gamma_{M1} \quad \text{σε κάθε διατομή} \quad (6.7)$$

όπου,

α ο συντελεστής μορφής (Πίνακας 6.2)

W_{el} η ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής

W_{net} η ελαστική ροπή αντίστασης της καθαρής διατομής λαμβάνοντας υπόψη τις οπές και την εξασθένηση στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες, σε περίπτωση που είναι συγκολλητή. Η τελευταία μείωση βασίζεται στο μειωμένο πάχος $\rho_{u,hazt}$.

Κατηγορία διατομής	Χωρίς συγκολλήσεις	Με συγκολλήσεις
1	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$

Πίνακας 6.2. Τιμές συντελεστή μορφής α

Οι διάφορες σταθερές W της διατομής και οι συντελεστές $\alpha_{3,u}$, $\alpha_{3,w}$ ορίζονται ως:

W_{pl} πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής

W_{eff} ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος t_{eff} για τα στοιχεία κατηγορίας 4

$W_{el,haz}$ ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,hazt}$ για το υλικό ΘΕΖ

$W_{pl,haz}$ ενεργός πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,hazt}$ για το υλικό ΘΕΖ

$W_{eff,haz}$ ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος ρ_{ct} για τα στοιχεία κατηγορίας 4 ή μειωμένο πάχος $\rho_{o,hazt}$ για το υλικό ΘΕΖ, όποιο είναι μικρότερο

$\alpha_{3,u} = 1$, εναλλακτικά λαμβάνεται ως:

$$\alpha_{3,u} = \left[1 + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1 \right) \right] \quad (6.8)$$

$\alpha_{3,w} = W_{el,haz} / W_{el}$, εναλλακτικά λαμβάνεται ως:

$$\alpha_{3,w} = \left[\frac{W_{el,haz}}{W_{el}} + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl,haz} - W_{el,haz}}{W_{el}} \right) \right] \quad (6.9)$$

όπου,

β η παράμετρος λυγηρότητας του πιο κρίσιμου στοιχείου της διατομής

β_2, β_3 τα όρια λυγηρότητας για το ίδιο στοιχείο σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1

Τέμνουσα

Για τον έλεγχο επάρκειας έναντι τέμνουσας η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας δύναμης V_{Ed} πρέπει σε κάθε διατομή να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1.0 \quad (6.10)$$

V_{Rd} είναι η αντοχή σε τέμνουσα και για μη λυγηρές διατομές δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \quad (6.11)$$

A_v είναι η επιφάνεια διάτμησης και υπολογίζεται ως:

α) για διατομές που περιέχουν κορμούς διάτμησης

$$A_v = \sum_{i=1}^n [(h_w - \sum d)(t_w)_i - (1 - \rho_{o,haz}) b_{haz} (t_w)_i] \quad (6.12)$$

όπου,

h_w το ύψος του κορμού μεταξύ των πελμάτων

b_{haz} το συνολικό ύψος του υλικού ΘΕΖ μεταξύ του καθαρού ύψους του κορμού μεταξύ των πελμάτων.
Για διατομές χωρίς συγκολλήσεις, $\rho_{o,haz}=1$.

t_w το πάχος του κορμού

d η διάμετρος των οπών κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης

n ο αριθμός των κορμών

β) για συμπαγή ράβδο και στρογγυλό σωλήνα

$$A_v = \eta_v A_e \quad (6.13)$$

όπου,

$\eta_v=0.8$ για συμπαγή ράβδο

$\eta_v=0.6$ για στρογγυλό σωλήνα

A_e το εμβαδό της πλήρους διατομής μιας μη συγκολλητής διατομής και το εμβαδό της ενεργού διατομής που προκύπτει λαμβάνοντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ

Το όριο ώστε να μη θεωρείται ο κορμός λεπτότοιχος και επομένως να μην υπόκειται σε τοπικό λυγισμό εκφράζεται ως:

$$h_w/t_w < 39\epsilon \quad (6.14)$$

Στην περίπτωση που το παραπάνω κριτήριο δεν ικανοποιείται, η αντοχή σε τέμνουσα πρέπει να μειώνεται λόγω κύρτωσης. Η μείωση αυτή λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό με εφαρμογή ενός μειωτικού συντελεστή ρ_v στη διατμητική οριακή τάση. Η τιμή του συντελεστή εξαρτάται από την ανηγμένη λυγηρότητα λ_w του κορμού και δίνεται μέσω της λεγόμενης καμπύλης κύρτωσης. Η αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα δίνεται επομένως από τη σχέση:

$$V_{Rd} = \rho_v A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.15)$$

Εύρη τιμών του λ_w	Άκαμπτες ακραίες διαδοκίδες	Χωρίς ή μη άκαμπτες ακραίες διαδοκίδες
$\lambda_w \leq 0.83/\eta$	η	η
$0.83/\eta < \lambda_w < 0.937$	$0.83/\lambda_w$	$0.83/\lambda_w$
$0.937 \leq \lambda_w$	$2.3/(1.66+\lambda_w)$	$0.83/\lambda_w$
$\eta = 0.7 + 0.35 f_{uw}/f_{ow}$ αλλά όχι μεγαλύτερο από 1.2		

Πίνακας 6.3. Τιμή μειωτικού συντελεστή ρ_v διατμητικής κύρτωσης

Στην περίπτωση εγκάρσιων ενισχύσεων μόνο στα άκρα της δοκού η ανηγμένη λυγηρότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_w = 0.35 \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \quad (6.16)$$

Πλευρικός λυγισμός

Ο κίνδυνος αστοχίας μέσω πλευρικού λυγισμού μπορεί να αγνοηθεί στις παρακάτω περιπτώσεις:

- όταν το μέλος υποβάλλεται σε κάμψη περί τον ασθενή άξονα και ταυτόχρονα το φορτίο δεν εφαρμόζεται στο κέντρο διάτμησης,
- όταν το μέλος είναι πλήρως δεσμευμένο έναντι πλευρικής μετατόπισης σε όλο το μήκος του,
- όταν η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{LT}$ μεταξύ σημειακών πλευρικών στηρίξεων είναι μικρότερη από 0.4.

Μία δοκός σταθερής διατομής μη προστατευμένη πλευρικά, που υπόκειται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα, πρέπει να ελέγχεται έναντι πλευρικού λυγισμού με βάση τη σχέση:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (6.17)$$

όπου,

M_{Ed} η ροπή κάμψης σχεδιασμού

$M_{b,Rd}$ η ροπή αντοχής έναντι πλευρικού λυγισμού

Η ροπή αντοχής σε πλευρικό λυγισμό μιας δοκού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \alpha W_{el,y} f_o / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

όπου,

$W_{el,y}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, χωρίς μείωση για την εξασθένηση λόγω ΘΕΖ, τοπικό λυγισμό ή οπές

α λαμβάνεται από τον Πίνακα 6.2 και υπόκειται στον περιορισμό $\alpha \leq W_{pl,y}/W_{el,y}$

χ_{LT} ο μειωτικός συντελεστής για στρεπτοκαμπτικό-πλευρικό λυγισμό

Η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} για καμπτόμενα μέλη σταθερής διατομής καθορίζεται από τη σχέση:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{αλλά} \quad \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (6.20)$$

όπου,

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + a_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (6.21)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_o}{M_{cr}}} \quad \text{η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού} \quad (6.22)$$

a_{LT} συντελεστής ατελειών

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ το όριο του οριζόντιου κλάδου

M_{cr} η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού, υπολογιζόμενη με βάση τις ιδιότητες της πλήρους διατομής και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες φόρτισης, την πραγματική κατανομή της ροπής και τις πλευρικές δεσμεύσεις

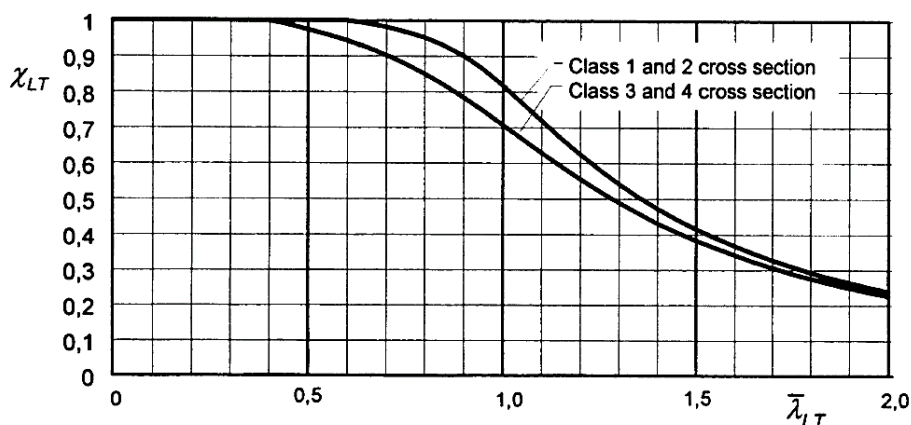
Οι τιμές των παραμέτρων a_{LT} και $\bar{\lambda}_{0,LT}$ λαμβάνονται ως εξής:

$a_{LT} = 0.10$ και $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0.6$ για διατομές κατηγορίας 1 και 2

$a_{LT} = 0.20$ και $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0.4$ για διατομές κατηγορίας 3 και 4

Οι τιμές του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} μπορούν να προσδιορίζονται και από την Εικόνα 6.8 συναρτήσει της αντίστοιχης ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_{LT}$.

Για λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$ ή για $M_{Ed} \leq \lambda_{0,LT}^2 M_{cr}$ τα φαινόμενα λυγισμού μπορούν να αγνοηθούν και να εφαρμοστούν μόνο έλεγχοι διατομής.



Εικόνα 6.8. Τιμές μειωτικού συντελεστή χ_{LT} για πλευρικό λυγισμό

Στην περίπτωση δοκού σταθερής διατομής, με συνήθεις στρεπτικές συνθήκες στήριξης στα άκρα της, συμμετρικής ως προς τον ασθενή άξονα αδράνειας και υποκείμενης σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα

αδράνειας, η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού, όπως προβλέπεται στο Παράρτημα I.1 του EN 1999-1-1, δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI_z GI_t}}{L} \quad (6.23)$$

Η αδιάστατη κρίσιμη ροπή μ_{cr} ορίζεται ως:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + k_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] \quad (6.24)$$

όπου,

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} \quad \text{ο συντελεστής στρέψης}$$

$$\zeta_g = \frac{\pi z_g}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad \text{η αδιάστατη συντεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς το κέντρο διάτμησης}$$

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad \text{η αδιάστατη παράμετρος της διατομής μονής συμμετρίας}$$

$C_1, C_2,$ και C_3 συντελεστές εξαρτώμενοι από τις συνθήκες φόρτισης και στρεπτικής στήριξης

I_t η σταθερά στρέψης

I_w η σταθερά στρέβλωσης

I_z η ροπή αδράνειας ως προς τον ασθενή άξονα

L το μήκος της δοκού μεταξύ σημείων πλευρικά εξασφαλισμένων

k_z και k_w συντελεστές εξαρτώμενοι από το είδος των στηρίξεων όσον αφορά την ελευθερία στροφής και στρέβλωσης των άκρων του εξεταζόμενου πλευρικά μη προστατευμένου τμήματος

$$z_g = z_a - z_s$$

$$z_j = z_s - \frac{0.5}{I_y} \int_A (y^2 + z^2) z dA$$

z_a η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y$

z_s η τεταγμένη του κέντρου διάτμησης ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y$

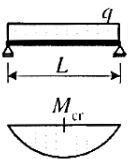
z_g η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς το κέντρο διάτμησης

Οι συντελεστές k_z και k_w λαμβάνονται ίσοι προς τη μονάδα, όταν και τα δύο άκρα του πλευρικά μη προστατευμένου τμήματος μπορούν να προσομοιωθούν με απλές στρεπτικές στηρίξεις. Εάν και τα δύο άκρα είναι πακτωμένα θεωρείται η τιμή 0.5, ενώ για περίπτωση ενός άκρου πακτωμένου και ενός με απλή στρεπτική στήριξη θεωρείται η τιμή 0.7.

Ο συντελεστής k_z αφορά τη στροφή του άκρου στο οριζόντιο επίπεδο, είναι δε ανάλογος του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού L_{cr}/L ενός θλιβόμενου στοιχείου, για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα, σε συνδυασμό με την ελευθερία στροφών λόγω κάμψης στα άκρα.

Ο συντελεστής k_w αφορά τη στρέβλωση του άκρου και λαμβάνεται ίσος προς 1.0 για άκρα με ελεύθερη στρέβλωση. Συνιστάται, γενικά, και σε άλλες περιπτώσεις να χρησιμοποιείται η συντηρητική τιμή $k_w=1.0$.

Οι τιμές των C_1 , C_2 και C_3 δίνονται στον Πίνακα 6.4 για διάφορες τιμές των συντελεστών k_z και k_w και για την περίπτωση αμφιέριστης δοκού υπό εγκάρσιο ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο, η οποία αντιστοιχεί στις συνωριακές συνθήκες και το είδος φόρτισης του ορθοστάτη.

Loading and support conditions	Buckling length factors			Values of factors							
	k_y	k_z	k_w	C_1		C_2			C_3		
				$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	\perp $\psi_f = -1$	I I I $-0.9 \leq \psi_f \leq 0.9$	T $\psi_f = 1$	\perp $\psi_f = -1$	I I I $-0.9 \leq \psi_f \leq 0.9$	T $\psi_f = 1$
	1	1	1	1,127	1,132	0,33	0,459	0,50	0,93	0,525	0,38
	1	1	0,5	1,128	1,231	0,33	0,391	0,50	0,93	0,806	0,38
	1	0,5	1	0,947	0,997	0,25	0,407	0,40	0,84	0,478	0,44
	1	0,5	0,5	0,947	0,970	0,25	0,310	0,40	0,84	0,674	0,44

Πίνακας 6.4. Συντελεστές C_1 , C_2 και C_3 για διάφορες τιμές των συντελεστών k , σε περίπτωση εγκάρσιου ομοιόμορφου καταναμημένου φορτίου

Καμπτικός λυγισμός μελών σταθερής διατομής υπό θλίψη και κάμψη

Για μέλη σταθερής διατομής καταπονούμενα ταυτόχρονα από αξονική θλιπτική δύναμη και ροπές κάμψης περί τον ισχυρό και τον ασθενή άξονα θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση (6.25). Για λόγους συντομίας παρατίθεται μόνο το κριτήριο αλληλεπίδρασης που αφορά στις κοίλες διατομές και τους σωλήνες.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \omega_{\chi} N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right]^{0.6} \leq 1.00 \quad (6.25)$$

όπου,

- N_{Ed} η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αξονικής δύναμης
- $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ οι τιμές σχεδιασμού των ροπών ως προς τους άξονες $y-y$ και $z-z$ αντίστοιχα. Οι ροπές υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία πρώτης τάξης.
- N_{Rd} η αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε ομοιόμορφα επιβεβλημένη θλίψη
- $M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$ οι αντοχές σχεδιασμού σε κάμψη περί τον άξονα $y-y$ και $z-z$ αντίστοιχα
- $\chi_{\min} = \min(\chi_y, \chi_z)$ χ_y , χ_z οι μειωτικοί συντελεστές λόγω καμπτικού λυγισμού
- $\psi_c = 0.8$ ή εναλλακτικά μπορεί να λαμβάνεται ίσος με $1.3\chi_y$ ή $1.3\chi_z$ ανάλογα με τη διεύθυνση λυγισμού, αλλά μεγαλύτερος από 0.8
- $\omega_{\chi} = \omega_0 = 1$ για δοκούς-υποστυλώματα χωρίς τοπικές συγκολλήσεις και με ίσες ροπές στα άκρα

Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μελών σταθερής διατομής υπό θλίψη και κάμψη

Σε αυτήν την περίπτωση το κριτήριο αλληλεπίδρασης διατυπώνεται ως εξής:

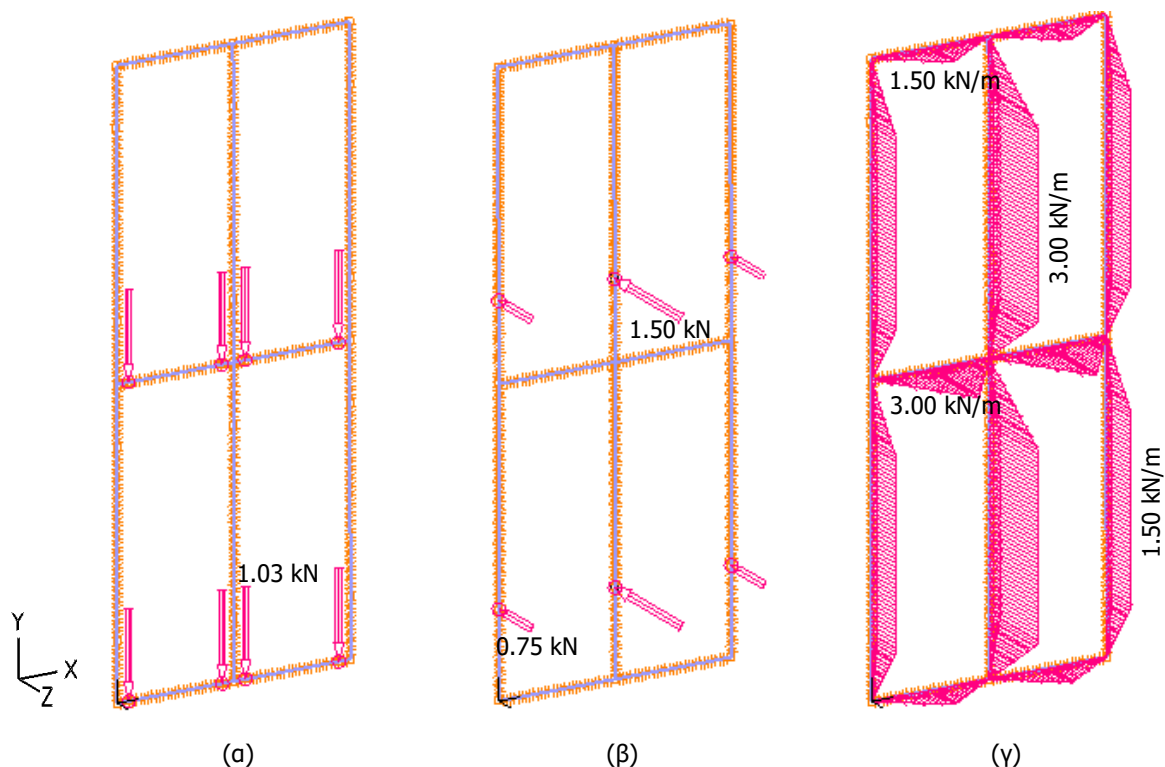
$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \omega_{xLT} M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1.00 \quad (6.26)$$

όπου,

$\eta_c=0.8$, $\gamma_c=1$, $\xi_{zc}=0.8$, $\omega_{xLT}=1$ (για δοκούς-υποστυλώματα χωρίς τοπικές συγκολλήσεις)

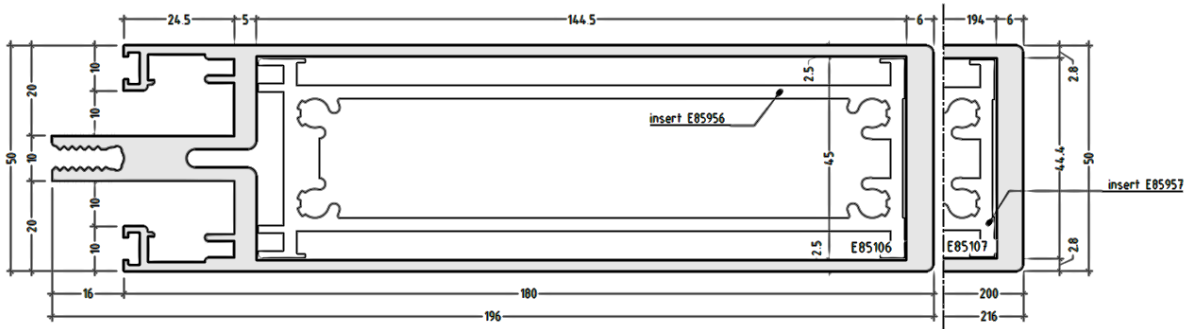
6.1.3.2 Έλεγχος επάρκειας ορθοστάτη

Για την προσομοίωση του ορθοστάτη και της τραβέρσας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού (beam elements) και επιβλήθηκαν συνοριακές συνθήκες αμφιέριστης δοκού. Η Εικόνα 6.9 υποδεικνύει την κατανομή των φορτίων σε μια διάταξη τεσσάρων υαλοπινάκων, όπως αυτή προκύπτει από τις αναφορές του Κεφαλαίου 5. Για τον ορθοστάτη δεν προβλέπεται κάποια αξονική καταπόνηση, καθώς το βάρος του υαλοπινάκα μεταφέρεται απευθείας στη στήριξη της βάσης του, ενώ το βάρος της τραβέρσας αμελείται ως μικρό. Οι έλεγχοι που ακολουθούν απευθύνονται στα μεσαία κατακόρυφα και οριζόντια μέλη, στα οποία αντιστοιχεί διπλάσια επιφάνεια επιρροής από τα υπόλοιπα, καθώς συμμετέχουν στη στήριξη δύο διαδοχικών πάνελ. Οι έλεγχοι επαρκούς αντοχής των διατομών και ευστάθειας των μελών διεξάγονται με βάση τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν για τον συνδυασμό ULS1, ενώ οι έλεγχοι παραμορφώσεων αφορούν τα βέλη που αναπτύσσονται υπό τον συνδυασμό SLS1.

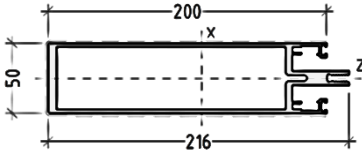


Εικόνα 6.9. Κατανομή φορτίσεων στον φέροντα οργανισμό του υαλοπετάσματος
(α) Βάρος υαλοπινάκα, (β) επιβαλλόμενο φορτίο, (γ) φορτίο ανέμου

Στην παράγραφο αυτή ελέγχεται η επάρκεια της διατομής E85107 που επιλέχθηκε κατά την προδιαστασιολόγηση του ορθοστάτη του πετάσματος (Εικόνα 6.10). Στον Πίνακα 6.5 καταγράφονται τα βασικά γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά του προφίλ, όπως αυτά δίνονται στον κατάλογο της εταιρείας ETEM (Παράρτημα Α). Ακολουθεί η κατάταξη της διατομής για κάμψη περί τον άξονα x όταν εφελκύεται το πέλμα που αναλαμβάνει τη συγκράτηση του υαλοπίνακα.



Εικόνα 6.10. Διατομή ορθοστάτη E85107

code description	profile	length weight ext. perimeter vis. perimeter	static values	
E85107 mullion		6.6 m 5165 g/m 748 mm 449 mm	$I_x = 1003.76 \text{ cm}^4$ $W_x = 71.01 \text{ cm}^3$ $e_x = 2.50 \text{ cm}$ $i_x = 7.24 \text{ cm}$	$I_z = 71.32 \text{ cm}^4$ $W_z = 28.53 \text{ cm}^3$ $e_z = 11.03 \text{ cm}$ $i_z = 1.93 \text{ cm}$

Πίνακας 6.5. Χαρακτηριστικά διατομής E85107

Κατάταξη διατομής

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 το κράμα αλουμινίου 6063 T6 υπάγεται στην κατηγορία A, επομένως ο υπολογισμός των παραμέτρων β_1 , β_2 , β_3 για τις διατομές του ορθοστάτη και της τραβέρσας αφορά την περίπτωση: Κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις για εσωτερικά στοιχεία.

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

$$\beta_1 = 13.75, \beta_2 = 20, \beta_3 = 27.5 \quad (6.27)$$

Πέλμα

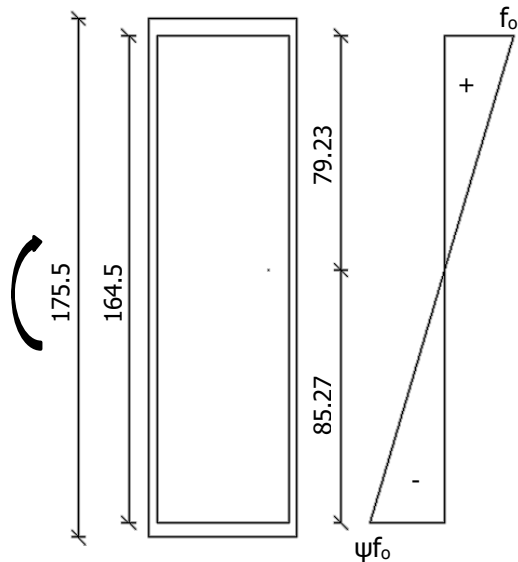
Επίπεδο εσωτερικό στοιχείο χωρίς μεταβολή τάσεων:

$$\beta = \frac{b}{t} = \frac{44.4}{5} = 8.88 < \beta_1 = 13.75 \quad (6.28)$$

Επομένως το πέλμα ανήκει στην κατηγορία 1.

Κορμός

Λαμβάνεται υπόψη μόνο το τμήμα του κορμού μεταξύ των πελμάτων. Πρόκειται για εσωτερικό στοιχείο με μεταβολή τάσεων:



$$\psi = -\frac{85.27}{79.23} = -1.08 < -1$$

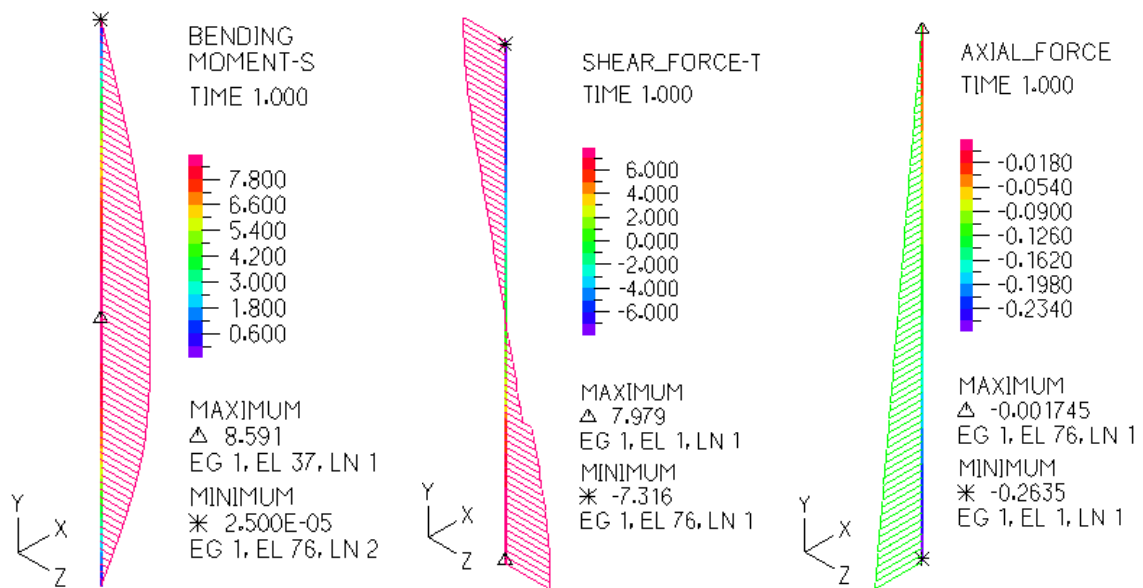
$$\eta = \frac{0.80}{1+1.08} = 0.385$$

$$\beta = \eta \frac{b}{t} = 0.385 \frac{164.5}{2.8} = 22.62 < \beta_3 = 27.5 \quad (6.29)$$

Επομένως ο κορμός ανήκει στην κατηγορία 3.

Τελικώς η διατομή είναι κατηγορίας 3.

Στην Εικόνα 6.11 παρατίθενται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών M, Q, N για τη φόρτιση ULS1, από τα οποία εξάγονται οι τιμές σχεδιασμού σε ροπή και τέμνουσα. Συγκεκριμένα, προκύπτουν οι τιμές $M_{Ed}=8.60$ kNm και $V_{Ed}=8.0$ kN. Η αξονική δύναμη αφορά αποκλειστικά το ίδιο βάρος του μέλους και δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Στη διατομή όπου εντοπίζεται η μέγιστη καμπτική ροπή, η τέμνουσα δύναμη είναι μηδενική, επομένως δε θα χρειαστεί απομείωση της αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω παρουσίας διάτμησης.



Εικόνα 6.11. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών ορθοστάτη για τον συνδυασμό φόρτισης ULS1 (ροπή σε kNm, δύναμης kN)

Έλεγχος σε κάμψη

Η ροπή αντοχής για τιμή του συντελεστή μορφής α ίση με τη μονάδα (Πίνακας 6.2) υπολογίζεται ως:

$$M_{Rd} = \alpha W_{el,x} f_o / \gamma_{M1} = 1 \times 91.01 \times 160 \times 10^{-3} / 1.1 = 13.24 \text{ kN/m} \quad (6.30)$$

Έλεγχος:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{8.60}{13.24} = 0.65 < 1 \quad (6.31)$$

Έλεγχος σε διάτμηση

$$h_w/t_w = 164.5/2.8 = 58.75 > 39\epsilon = 39 \times 1.25 = 48.75$$

Συνεπώς ο κορμός είναι λεπτότοιχος.

Δεν προβλέπονται εγκάρσιες ενισχύσεις, επομένως η ανηγμένη λυγηρότητα λ_w υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (6.16) ως εξής:

$$\lambda_w = 0.35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} = 0.35 \frac{164.5}{2.8} \sqrt{\frac{160}{70 \times 10^3}} = 0.983 > 0.937 \quad (6.32)$$

Ο μειωτικός συντελεστής ρ_v δίνεται από τον Πίνακα 6.3:

$$\rho_v = 0.83/\lambda_w = 0.83/0.983 = 0.844 \quad (6.33)$$

Η επιφάνεια διάτμησης A_v ισούται με:

$$A_v = 2h_w t_w = 2 \times 164.5 \times 2.8 = 921.1 \text{ mm}^2 \quad (6.34)$$

Η διατμητική αντοχή προκύπτει τελικά ίση με:

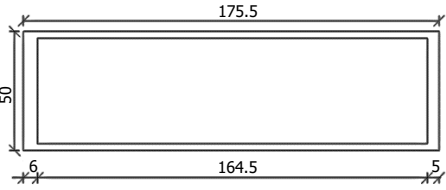
$$V_{Rd} = \rho_v A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 0.844 \times 921.1 \times \frac{160}{\sqrt{3} \times 1.1} \times 10^{-3} = 65.30 \text{ kN} \quad (6.35)$$

Έλεγχος:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{8}{65.30} = 0.123 < 1 \quad (6.36)$$

Έλεγχος σε πλευρικό λυγισμό

Θεωρείται απλοποιητικά μόνο το κλειστό τμήμα της διατομής. Προσδιορίζονται ακολούθως εκ νέου τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της καινούριας κιβωτιοειδούς διατομής καθώς και τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής ροπής M_{cr} . Πρόκειται για μία αρκετά συντηρητική προσέγγιση, όπως αντικατοπτρίζουν και οι καινούριες τιμές ροπών αδράνειας και ελαστικών ροπών αντίστασης του Πίνακα 6.6. Στην περίπτωση ωστόσο που το κριτήριο έναντι πλευρικού λυγισμού ικανοποιείται, δε θα χρειαστεί η περαιτέρω διερεύνησή της.

Κιβωτιοειδής διατομή		$I_x = 604.16 \text{ cm}^4$	$I_z = 62.83 \text{ cm}^4$
		$W_x = 70.85 \text{ cm}^3$	$W_z = 25.13 \text{ cm}^3$
		$e_x = 2.50 \text{ cm}$	$e_z = 9.05 \text{ cm}$
		$i_x = 6.41 \text{ cm}$	$i_z = 2.07 \text{ cm}$

Πίνακας 6.6. Χαρακτηριστικά του κλειστού τμήματος της διατομής E85107

Σταθερά στρέψης:

$$I_t = 189.54 \text{ cm}^4$$

Σταθερά στρέβλωσης:

$$I_w = 1172.10 \text{ cm}^6$$

Συντελεστής στρέψης:

$$K_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1 \cdot 380} \sqrt{\frac{70 \cdot 1172.1}{26.923 \cdot 189.54}} = 0.0332 \quad (6.37)$$

Αδιάστατη συντεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς το κέντρο διάτμησης:

$$\zeta_g = \frac{\pi z_g}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 8.5}{1 \cdot 380} \sqrt{\frac{70 \cdot 62.83}{26.923 \cdot 189.54}} = 0.065 \quad (6.38)$$

Η διατομή θεωρείται προσεγγιστικά διπλής συμμετρίας, επομένως η αδιάστατη παράμετρος ζ_j λαμβάνεται ίση με το μηδέν. Οι τιμές των συντελεστών C_1 , C_2 και C_3 εξάγονται από τον Πίνακα 6.4:

$$C_1 = 1.127, C_2 = 0.459, C_3 = 0.525$$

Αδιάστατη κρίσιμη ροπή:

$$\begin{aligned} \mu_{cr} &= \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + K_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] \\ &= \frac{1.127}{1} \left[\sqrt{1 + 0.0331^2 + (0.459 \cdot 0.065)^2} - (0.459 \cdot 0.065) \right] = 1.094 \end{aligned}$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού προκύπτει τελικά ίση με:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI_z GI_t}}{L} = 1.094 \cdot \frac{\pi \sqrt{7000 \cdot 62.83 \cdot 2692.3 \cdot 189.54}}{380} = 4284 \text{ kNcm} = 42.84 \text{ kNm} \quad (6.39)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού θα είναι:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,x} f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 70.85 \cdot 10^{-3} \cdot 160}{42.84}} = 0.514 > 0.4 \quad (6.40)$$

Η διατομή είναι κατηγορίας 3, επομένως $\alpha_{LT}=0.20$ και $\bar{\lambda}_{0,LT}=0.4$. Ο μειωτικός συντελεστής χ υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0.5 \left[1 + 0.20(0.514 - 0.4) + 0.514^2 \right] = 0.643 \quad (6.41)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0.643 + \sqrt{0.643^2 - 0.513^2}} = 0.97 \quad (6.42)$$

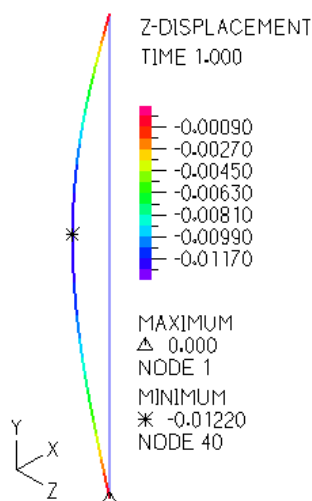
Υπολογίζεται τελικά η ροπή αντοχής έναντι πλευρικού λυγισμού:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \alpha W_{el,x} f_o / \gamma_{M1} = 0.97 \cdot 1 \cdot 70.85 \cdot 10^{-3} \cdot 160 / 1.1 = 10 \text{ kNm} \quad (6.43)$$

Έλεγχος:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{8.60}{10} = 0.86 < 1 \quad (6.44)$$

Έλεγχος βέλους κάμψης



Η Εικόνα 6.12 παρουσιάζει τη μετατόπιση του ορθοστάτη κατά τη διεύθυνση z για τον συνδυασμό φόρτισης SLS1. Το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος w_{all} για το συγκεκριμένο μέλος ορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 ίσο με 15 mm. Σύμφωνα με τη σχέση 6.45 η μέγιστη βύθιση που σημειώνεται είναι μικρότερη από αυτήν την τιμή, επομένως ικανοποιείται ο έλεγχος σε ΟΚΛ.

$$w_{max} = 12.2 \text{ mm} < w_{all} = 15 \text{ mm} \quad (6.45)$$

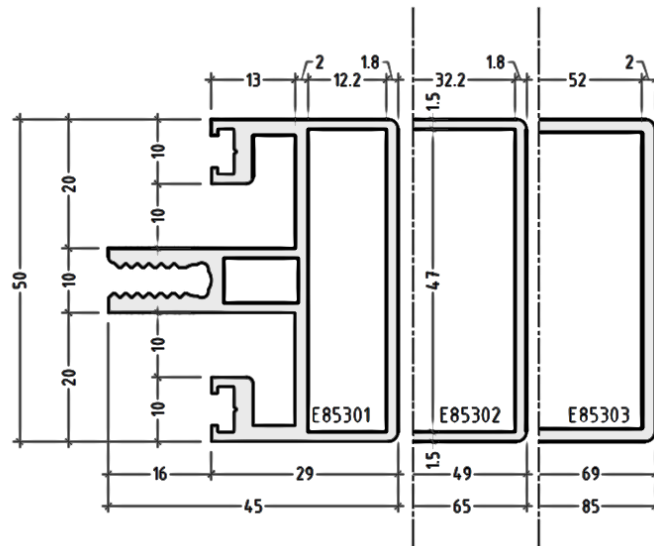
Εικόνα 6.12. Βύθιση (m) ορθοστάτη (SLS1)

Προκύπτει επομένως πως το προφίλ E85107 επαρκεί έναντι όλων των ελέγχων που αφορούν τον ορθοστάτη του συγκεκριμένου συστήματος. Το περιθώριο μάλιστα με το οποίο ικανοποιούνται τα κριτήρια σε ΟΚΑ θα μπορούσε να αποτελεί ένδειξη πως ίσως δεν έχει επιτευχθεί ο οικονομικότερος σχεδιασμός. Ο έλεγχος ωστόσο του μέγιστου βέλους που σημειώνεται για την αμέσως προηγούμενη διατομή του καταλόγου, E85106, είναι αποτρεπτικός για μια διαδικασία επαναδιαστασιολόγησης ($w_{max} = 16.26 \text{ mm} > w_{all} = 15 \text{ mm}$).

6.1.3.3 Έλεγχος επάρκειας τραβέρσας

Ακολουθεί ο έλεγχος της διατομής της τραβέρσας E85303 (Εικόνα 6.13). Τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκεντρώνονται στον Πίνακα 6.7, ο οποίος αποτελεί τμήμα του Παραρτήματος Α. Όπως φαίνεται και

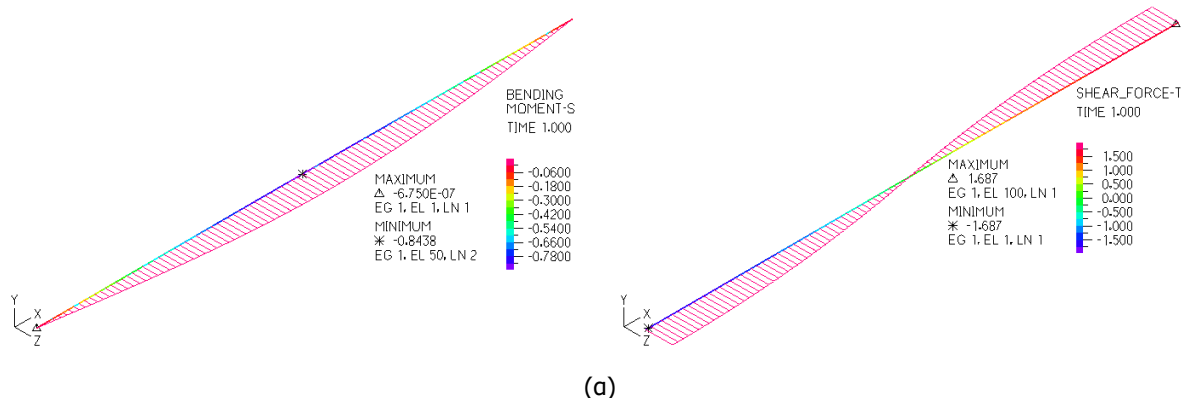
στην Εικόνα 6.9, η τραβέρσα καταπονείται σε διαξονική κάμψη, στο επίπεδο x-z λόγω του φορτίου του ανέμου και στο επίπεδο x-y λόγω του βάρους του υαλοπίνακα. Τα διαγράμματα ροπών κάμψης και τεμνουσών δυνάμεων που αντιστοιχούν σε αυτές τις δύο περιπτώσεις φόρτισης δίνονται στην Εικόνα 6.14 για τις τιμές των φορτίων που υπαγορεύει ο συνδυασμός ULS1. Προκύπτουν οι τιμές σχεδιασμού: $M_{Ed,y}=0.84 \text{ kNm}$, $V_{Ed,z}=1.69 \text{ kN}$, $M_{Ed,z}=0.21 \text{ kNm}$, $V_{Ed,y}=1.40 \text{ kN}$.



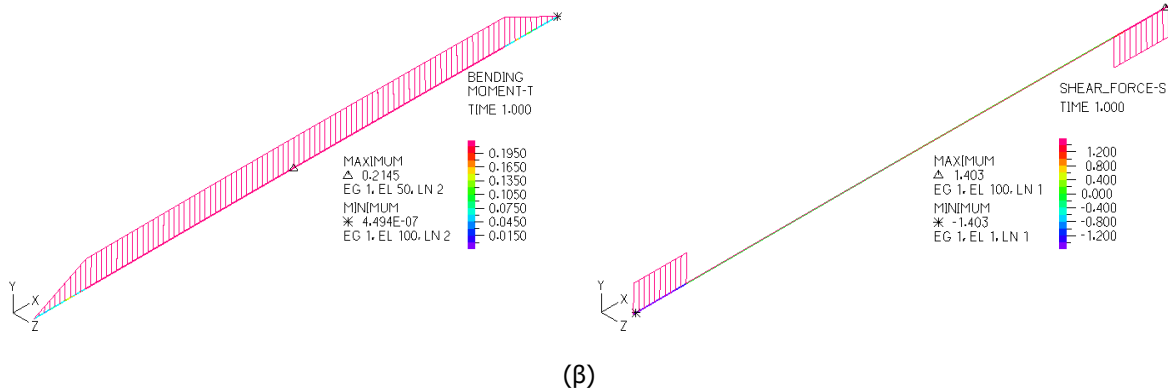
Εικόνα 6.13. Διατομή τραβέρσας E85303

code description	profile	length	weight	ext. perimeter	vis. perimeter	static values
E85303 transom		6.01 m	1785 g/m	410 mm	187 mm	$I_y = 45.83 \text{ cm}^4$ $I_z = 21.60 \text{ cm}^4$ $W_y = 10.54 \text{ cm}^3$ $W_z = 8.64 \text{ cm}^3$ $e_y = 2.50 \text{ cm}$ $e_z = 4.35 \text{ cm}$ $i_y = 2.64 \text{ cm}$ $i_z = 1.81 \text{ cm}$

Πίνακας 6.7. Χαρακτηριστικά διατομής E85303



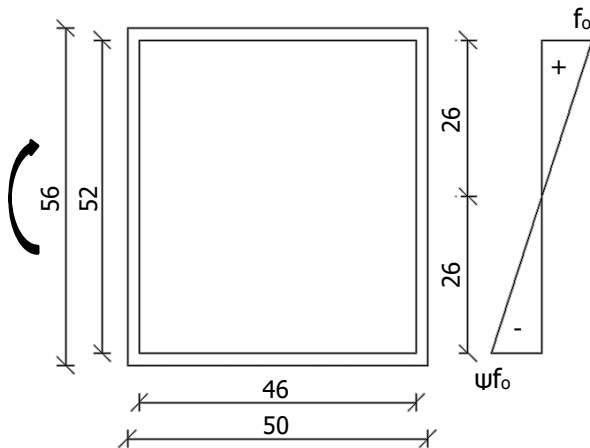
(a)



Εικόνα 6.14. Διαγράμματα ροπών κάμψης (kNm) και τεμνουσών δυνάμεων (kN) τραβέρσας (α) για το φορτίο του ανέμου, (β) για το βάρος του υπερκείμενου υαλοπίνακα

Κατάταξη διατομής για κάμψη περί τον άξονα y

Λαμβάνεται υπόψη μόνο το τμήμα του κορμού μεταξύ των πελμάτων όπως δείχνει η Εικόνα. Τα πέλματα συνιστούν εσωτερικά στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων, ενώ οι κορμοί εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων. Ο ουδέτερος άξονας εντοπίζεται πλέον στο κέντρο της διατομής.



Πέλημα

$$\beta = \frac{b}{t} = \frac{46}{2} = 23 < \beta_3 = 27.5 \quad (6.47)$$

Επομένως το πέλημα ανήκει στην κατηγορία 3.

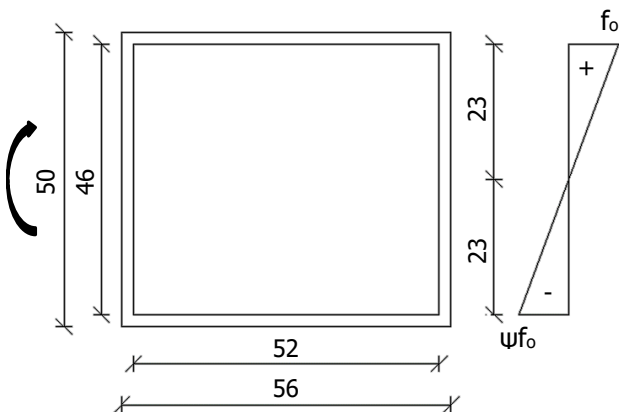
Κορμός

$$\beta = 0.40 \frac{b}{t} = 0.40 \frac{52}{2} = 10.4 < \beta_1 = 13.75 \quad (6.48)$$

Επομένως ο κορμός ανήκει στην κατηγορία 1.

Τελικώς για ροπή M_y η διατομή είναι κατηγορίας 3.

Κατάταξη διατομής για κάμψη περί τον άξονα z



Πέλημα

$$\beta = \frac{b}{t} = \frac{52}{2} = 26 < \beta_3 = 27.5 \quad (6.49)$$

Επομένως το πέλημα ανήκει στην κατηγορία 3.

Κορμός

$$\beta = 0.40 \frac{b}{t} = 0.40 \frac{46}{2} = 9.2 < \beta_1 = 13.75 \quad (6.50)$$

Επομένως ο κορμός ανήκει στην κατηγορία 1.

Τελικώς για ροπή M_z η διατομή είναι κατηγορίας 3.

Σε αντιστοιχία με προηγουμένως θεωρήθηκε μόνο το εσωτερικό τμήμα των πελμάτων.

Έλεγχος σε διάτμηση κατά τον άξονα z

Θεωρείται συντηρητικά πως η τέμνουσα δύναμη αναλαμβάνεται αποκλειστικά από το τμήμα του κορμού μεταξύ των πελμάτων.

$$h_w/t_w = 52/2 = 26 < 39\varepsilon = 48.75$$

Επομένως ο κορμός δεν είναι λεπτότοιχος.

Η επιφάνεια διάτμησης A_v υπολογίζεται ως:

$$A_v = 2h_w t_w = 2 \cdot 52 \cdot 2 = 208 \text{ mm}^2 \quad (6.51)$$

Η αντοχή σε τέμνουσα δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Rd,z} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 208 \cdot \frac{160}{\sqrt{3} \times 1.1} \cdot 10^{-3} = 17.47 \text{ kN} \quad (6.52)$$

Έλεγχος:

$$\frac{V_{Ed,z}}{V_{Rd,z}} = \frac{1.69}{17.47} = 0.10 < 1 \quad (6.53)$$

Έλεγχος σε διάτμηση κατά τον άξονα y

$$h_w/t_w = 46/2 = 23 < 39\varepsilon = 48.75$$

Επομένως ο κορμός δεν είναι λεπτότοιχος.

Η επιφάνεια διάτμησης A_v σε αυτήν την περίπτωση ισούται με:

$$A_v = 2h_w t_w = 2 \cdot 46 \cdot 2 = 184 \text{ mm}^2 \quad (6.54)$$

Για την αντοχή σε τέμνουσα ισχύει:

$$V_{Rd,y} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 184 \cdot \frac{160}{\sqrt{3} \times 1.1} \cdot 10^{-3} = 15.45 \text{ kN} \quad (6.55)$$

Έλεγχος:

$$\frac{V_{Ed,y}}{V_{Rd,y}} = \frac{1.40}{15.45} = 0.09 < 1 \quad (6.56)$$

$$V_{Ed,y} = 1.40 \text{ kN} < 0.50V_{Rd,y} = 7.73 \text{ kN} \quad (6.57)$$

Επομένως δε χρειάζεται απομείωση της αντοχής σε ροπή κάμψης M_z λόγω παρουσίας διάτμησης.

Έλεγχος σε διαξονική κάμψη

Υπολογίζονται οι ροπές αντοχής $M_{Rd,y}$ και $M_{Rd,z}$ για κάμψη περί τον ισχυρό και ασθενή άξονα αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις η διατομή είναι κατηγορίας 3, επομένως ο συντελεστής μορφής α λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα (Πίνακας 6.2).

$$M_{Rd,y} = \alpha W_{el,y} f_o / \gamma_{M1} = 1 \cdot 10.54 \cdot 160 \cdot 10^{-3} / 1.1 = 1.53 \text{ kNm} \quad (6.58)$$

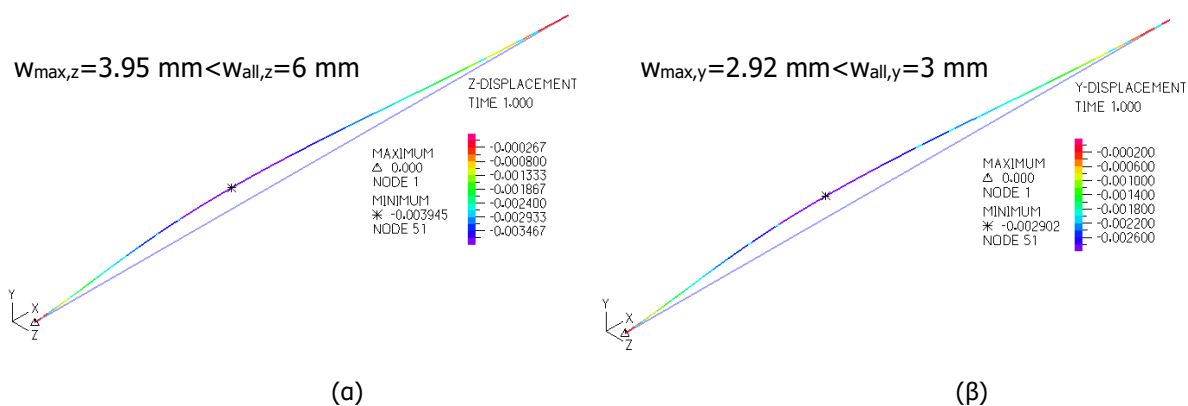
$$M_{Rd,z} = \alpha W_{el,z} f_o / \gamma_{M1} = 1 \cdot 8.64 \cdot 160 \cdot 10^{-3} / 1.1 = 1.26 \text{ kNm} \quad (6.59)$$

Ανατρέχοντας στη σχέση 6.25 και αγνοώντας τον όρο που αφορά στην αξονική δύναμη, διατυπώνεται το κριτήριο αλληλεπίδρασης για τη διατομή στο μέσον της δοκού, όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες καμπτικές ροπές $M_{Ed,y}$ και $M_{Ed,z}$, ώστε να εκτιμηθεί το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης δράσης τους.

$$\left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right]^{0.6} = \left[\left(\frac{0.84}{1.53} \right)^{1.7} + \left(\frac{0.21}{1.26} \right)^{1.7} \right]^{0.6} = [0.36 + 0.05]^{0.6} = 0.58 < 1 \quad (6.60)$$

Έλεγχος βελών κάμψης

Ακολουθούν οι έλεγχοι βελών της τραβέρσας κατά τις διευθύνσεις y και z για τη φόρτιση SLS1. Υπενθυμίζεται πως οι επιτρεπόμενες τιμές έχουν ήδη υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5 λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση του περιορισμού για την περίπτωση κινητών και μόνιμων φορτίων.



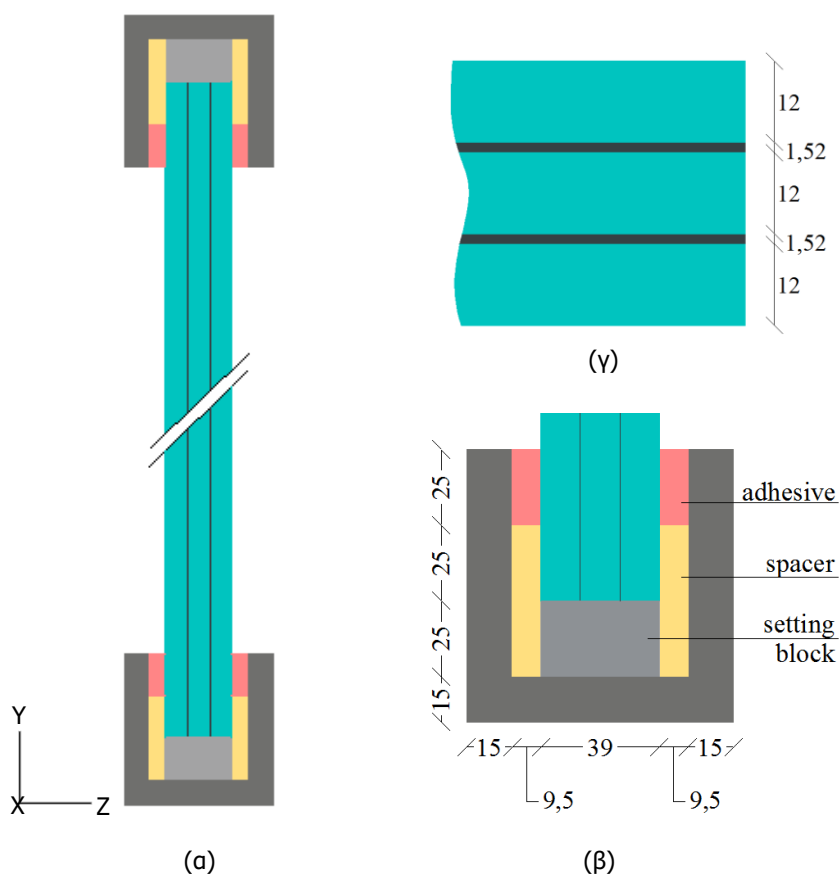
Εικόνα 6.15. Βύθιση τραβέρσας για τη φόρτιση SLS1: (α) κατά τη διεύθυνση z , (β) κατά τη διεύθυνση y

Διαπιστώνεται επομένως συνολικά η επάρκεια της διατομής E85303 για το μέλος της τραβέρσας στο υπό εξέταση υαλοπέτασμα. Και εδώ, όπως και στην περίπτωση του ορθοστάτη, οι έλεγχοι σε ΟΚΑ ικανοποιούνται με μεγάλο περιθώριο, ενώ κρίσιμος για την επιλογή διατομής είναι ο περιορισμός του βέλους κάμψης.

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

6.2.1 Αναλυτικό προσομοίωμα

Για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων έχουν επιλεγθεί 3 φύλλα γυαλιού πάχους $t_1=t_2=t_3=12$ mm ενωμένα ανά δύο με στρώση πολυμερούς πάχους $t_{int}=1.52$ mm. Η στήριξη της βάσης και της κεφαλής διαμορφώνεται στην Εικόνα 6.16 για συνολικό πάχος υαλοπίνακα $t=39$ mm. Τα τακάκια έδρασης τοποθετούνται στα τέταρτα του πλάτους b και το μήκος τους ορίζεται ίσο με το ελάχιστο απαιτούμενο, δηλαδή 100 mm (Κεφάλαιο 4). Κατασκευάζονται από νεοπρένιο, το οποίο παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές αντοχές και διατηρεί για μεγάλο χρονικό διάστημα την ελαστικότητά του. Ως αποστάτης επιλέχθηκε μια ταινία πολυουρεθάνης υψηλής αντοχής, με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και πολύ καλή συμπεριφορά σε θερμοκρασιακές μεταβολές, η οποία είναι συμβατή με την κόλλα DC 993. Η ταινία διατίθεται στα πάχη των 3.2, 4.8, 6.4, 7.9, 9.5 και 12.7 mm. Ύστερα από δοκιμές το πάχος των 9.5 mm κρίθηκε επαρκές για το υπό μελέτη παράδειγμα. Το μεταλλικό πλαίσιο είναι από ανοξείδωτο χάλυβα. Προκειμένου να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος των αναλύσεων, όλα τα υλικά θεωρήθηκαν ελαστικά, συμπεριλαμβανομένου και του χάλυβα, καθώς άλλωστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις του είναι κατά πολύ μικρότερες από το όριο διαρροής του. Στον Πίνακα 6.8 συνοψίζονται οι ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν στη στήριξη, όπως αυτές εισάγονται στο πρόγραμμα.

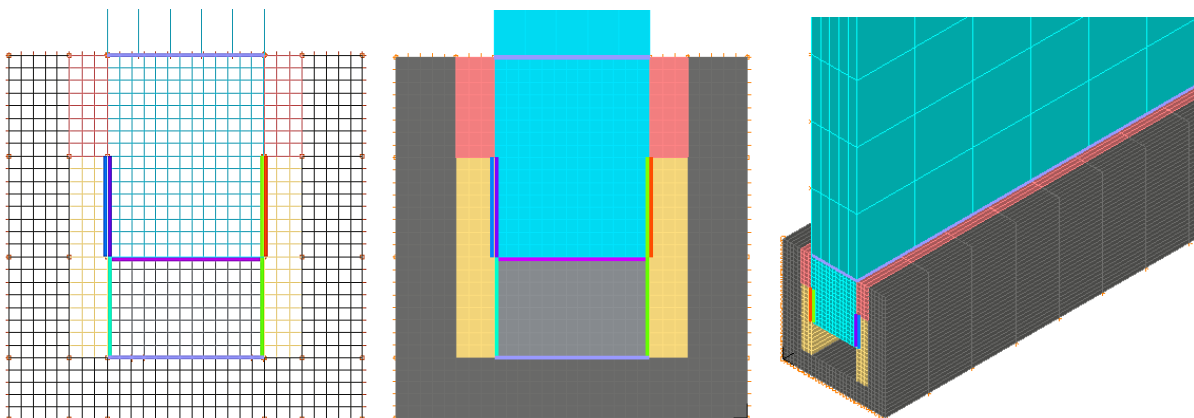


Εικόνα 6.16. (α) Στήριξη σε βάση και κεφαλή, (β) λεπτομέρεια στήριξης στη βάση, (γ) γεωμετρία διατομής

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Λόγος Poisson ν
Γυαλί	70000	0.22
Ανοξειδωτος χάλυβας	210000	0.30
Νεοπρένιο	15	0.40
Πολυουρεθάνη	7	0.40
Σιλικόνη DC 993	2.4	0.49

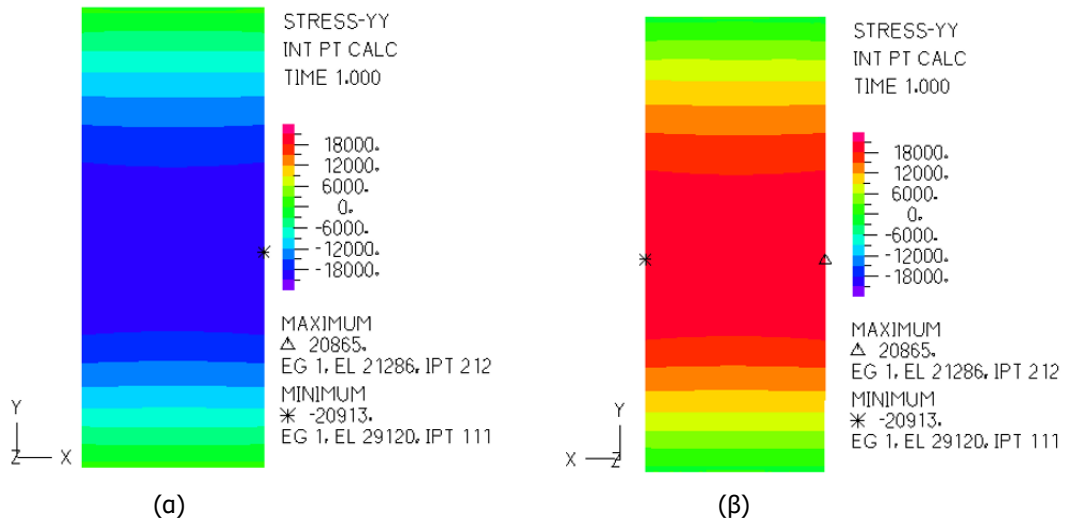
Πίνακας 6.8. Ιδιότητες των υλικών του συστήματος μετωπικής σύνδεσης

Οι συνοριακές συνθήκες περιλαμβάνουν την επιβολή άρθρωσης στην κάτω επιφάνεια του πλαισίου της βάσης και στην πάνω επιφάνεια του πλαισίου της κεφαλής. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.17 το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων είναι πυκνότερο στην περιοχή των στηρίξεων σε σύγκριση με το εσωτερικό τμήμα του υαλοπίνακα. Η ένωση πλεγμάτων διαφορετικής πυκνότητας επιτυγχάνεται στο ADINA με την εντολή glue, η οποία απευθύνεται τόσο σε δισδιάστατα όσο και σε τρισδιάστατα στοιχεία, χωρίς να καθιστά την ανάλυση μη γραμμική λόγω συνοριακών συνθηκών. Η επαφή γυαλιού-τάκων έδρασης και γυαλιού-αποστατών προσομοιώνεται με στοιχεία επαφής (contact surfaces), αφού τα αντίστοιχα σώματα απλά εφάπτονται, χωρίς να παρεμβάλλεται μεταξύ τους κάποιο συνδετικό υλικό.

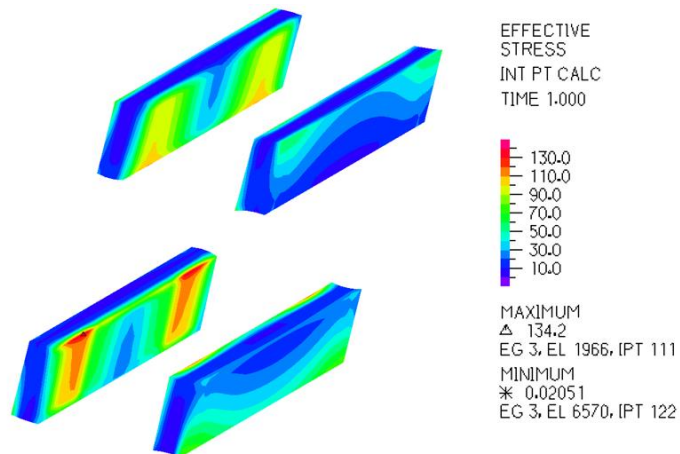


Εικόνα 6.17. Λεπτομέρεια προσομοιώματος στη βάση του υαλοπίνακα

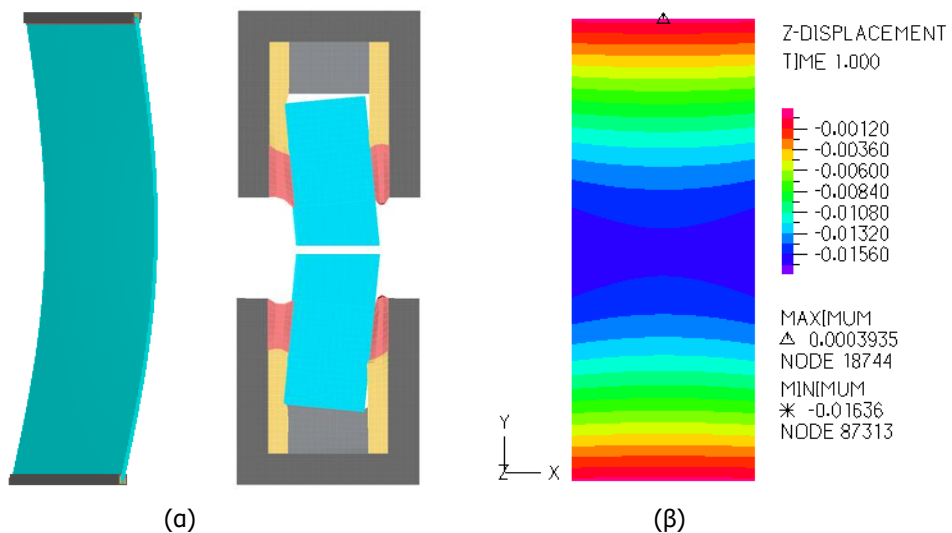
Ο τρόπος επιβολής των φορτίων αντιστοιχεί σε αυτόν που περιγράφηκε για το σύστημα της δομικής σιλικόνης, όπως παρουσιάζεται στις Εικόνες 6.2(γ) και 6.2(δ). Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στη συνέχεια προέρχονται από γραμμικές αναλύσεις του προσομοιώματος μονολιθικής διατομής ($t=39$ mm) για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φόρτισης σε ΟΚΑ και ΟΚΛ, ULS1 και SLS1 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα η Εικόνα 6.18 παρουσιάζει την κατανομή των ορθών τάσεων σ_y στην μπροστά και πίσω επιφάνεια του υαλοπίνακα για τον συνδυασμό ULS1. Ακολουθεί στην Εικόνα 6.19 η κατανομή των τάσεων von Mises του συνδετικού υλικού DC 993. Αναφέρεται πως η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ισούται με 0.134 MPa, τιμή μικρότερη από την αντοχή σχεδιασμού, η οποία ανέρχεται στα 0.140 MPa σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1. Η Εικόνα 6.20 δείχνει την παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα και το μέγεθος των βυθίσεων του υαλοπίνακα για τη φόρτιση SLS1.



Εικόνα 6.18. Κατανομή ορθών τάσεων σ_y (kPa) για τον συνδυασμό φόρτισης ULS1 (α) στην μπροστά και (β) στην πίσω επιφάνεια του υαλοπινάκα



Εικόνα 6.19. Κατανομή τάσεων von Mises (kPa) της κόλλας για τον συνδυασμό φόρτισης ULS1



Εικόνα 6.20. (α) Παραμόρφωση φορέα, (β) βύθιση υαλοπινάκα για τον συνδυασμό φόρτισης SLS1

6.2.2 Απλοποιημένο προσομοίωμα

6.2.2.1 Σύγκριση με αναλυτικό προσομοίωμα

Με στόχο τη δραστική μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων των αναλύσεων τόσο σε χρόνο όσο και σε μνήμη, δημιουργείται ένα απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα του υαλοπίνακα, στο οποίο απουσιάζουν τα υλικά που διαμορφώνουν τη στήριξη. Η συμπεριφορά τους προσεγγίζεται μέσω χρήσης ελατηρίων και επιβολής κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, με τον τρόπο που υποδεικνύει η Εικόνα 6.21. Συγκεκριμένα, η λειτουργία των τάκων αποδίδεται με την τοποθέτηση ελατηρίων σταθεράς k_y στους αντίστοιχους κόμβους της βάσης του πάνελ, αφού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.20 (α), κατά την παραμόρφωσή του ο υαλοπίνακας δεν έρχεται σε επαφή με τα τακάκια της κεφαλής. Η σταθερά k_y υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των τάκων και τις ιδιότητες του νεοπρενίου όπως ορίζει η σχέση:

$$k_y = \frac{1}{n} \frac{E_{\text{neoprene}} \text{ (kN/m}^2\text{)}}{t_{\text{setting block}} \text{ (m)}} A_{\text{setting block}} \text{ (m}^2\text{)} = \frac{1}{85} \cdot \frac{15000}{0.025} \cdot 0.0039 \approx 28 \text{ kN/m} \quad (6.61)$$

όπου,

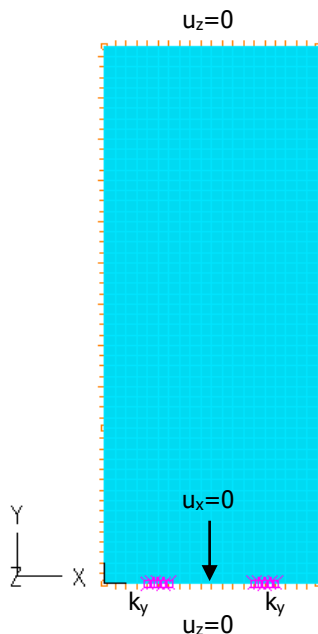
n ο αριθμός των κόμβων στις επιφάνειες έδρασης του υαλοπίνακα

E_{neoprene} το μέτρο ελαστικότητας του νεοπρενίου

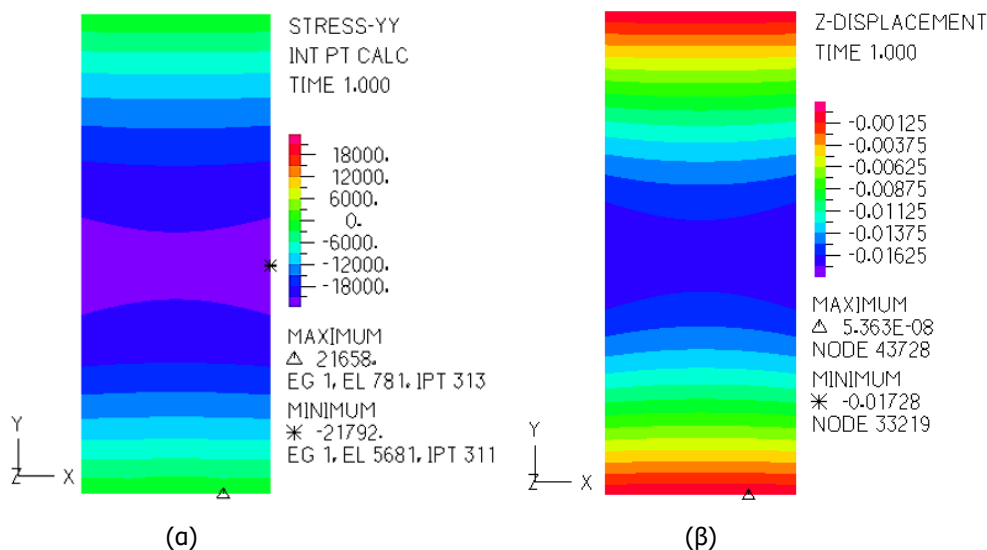
$A_{\text{setting block}}$ το εμβαδό της επιφάνειας του τάκου έδρασης που είναι σε επαφή με τον υαλοπίνακα

$t_{\text{setting block}}$ το ύψος του τάκου έδρασης

Κατά μήκος των ακμών της βάσης και της κεφαλής του υαλοπίνακα επιβάλλονται κυλίσεις που εμποδίζουν τη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση z , ώστε να ληφθεί υπόψη η πλευρική στήριξη που παρέχουν οι αφρώδεις ταινίες. Η δέσμευση του βαθμού ελευθερίας u_x των μεσαίων κατά την έννοια του πλάτους κόμβων εξασφαλίζει την ισορροπία του φορέα. Η Εικόνα 6.22 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων του καινούριου απλοποιημένου μοντέλου για τους ελέγχους σε ΟΚΑ και ΟΚΛ.



Εικόνα 6.21. Συνοριακές συνθήκες απλοποιημένου προσομοιώματος



Εικόνα 6.22. (α) Κατανομή ορθών τάσεων σ_{yy} (kPa)-ULS1, (β) βύθιση u_z (m)-SLS1 για το απλοποιημένο σύστημα

Ο Πίνακας 6.9 παραθέτει τις μέγιστες τιμές τάσης και βύθισης και για τα δύο μοντέλα. Η εγγύτητα των αποτελεσμάτων δηλώνει πως το απλοποιημένο μοντέλο προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση της πλήρους διάταξης, επομένως οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος της μετωπικής σύνδεσης.

	Αναλυτικό προσομοίωμα	Απλοποιημένο Προσομοίωμα	Διαφορά (%)
$\sigma_{y,max}$ - ULS1 (MPa)	20.87	21.66	3.79
w_{max} - SLS1 (mm)	16.36	17.28	5.62

Πίνακας 6.9. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ αναλυτικού και απλοποιημένου προσομοιώματος

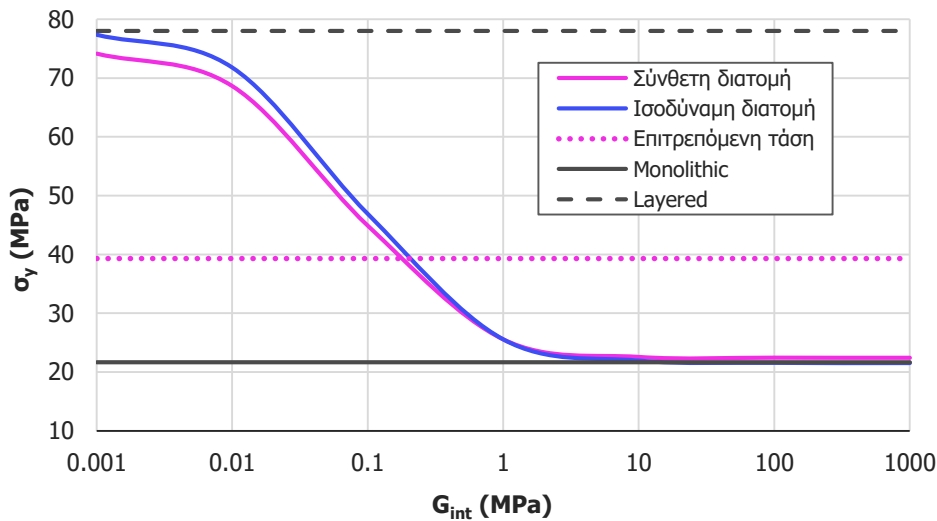
6.2.2.2 Έλεγχος επάρκειας υαλοπίνακα

Η διερεύνηση αυτή έγκειται κυρίως στην αποτίμηση της επιρροής του μέτρου διάτμησης G_{int} στα αναπτυσσόμενα μεγέθη. Προς αυτήν την κατεύθυνση αναπτύσσεται εκ νέου ένα προσομοίωμα του πάνελ, αυτή τη φορά με την πολυστρωματική διατομή της Εικόνας 6.16 και τις συνοριακές συνθήκες της Εικόνας 6.21. Οι γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 6.23 καταγράφουν τη μεταβολή των τάσεων-ULS1 και βυθίσεων-SLS1 που προκύπτουν από γραμμικές αναλύσεις συναρτήσεως του μεγέθους G_{int} . Για το κατώτατο όριο της μονολιθικής διατομής, τα διαγράμματα δανείστηκαν τα αποτελέσματα από τον Πίνακα 6.8, ενώ το προσομοίωμα ενός φύλλου γυαλιού πάχους $t=12$ mm, στο οποίο ασκήθηκε το 1/3 της τιμής των φορτίων, απέδωσε την απόκριση του ανώτατου ορίου, όπου τα φύλλα απλά εφάπτονται χωρίς να συνεργάζονται. Για τιμές του G_{int} μικρότερες του 1 MPa, οι προκύπτουσες βυθίσεις απομακρύνονται πολύ από το επιτρεπτό όριο των 31.67 mm (Κεφάλαιο 5). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται, λιγότερο έντονο, και στα αποτελέσματα των τάσεων. Αναμφισβήτητα, το αυστηρό κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για τον περιορισμό του βέλους ($a/120$) αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις σε πάχος της διατομής και ίσως θα μπορούσε να αναθεωρηθεί, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται η εφαρμογή του αμφιέριστου συστήματος. Αναμένεται ο επερχόμενος Ευρωκώδικας να καθορίζει με

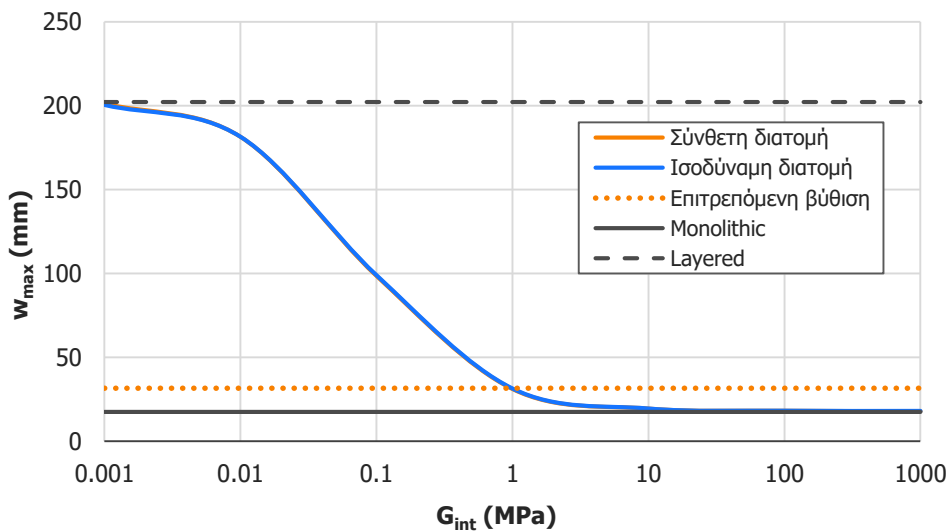
σαφήνεια τα κριτήρια για τον έλεγχο των μετατοπίσεων σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες κάθε διάταξης. Προς το παρόν, ακολουθεί ο έλεγχος του υαλοπίνακα σε ΟΚΑ και ΟΚΛ για $G_{int}=1$ MPa στα πλαίσια των θεωρήσεων της παρούσας εργασίας.

$$\text{Έλεγχος σε ΟΚΑ: } \sigma_{y,max} = 25.56 \text{ MPa} < f_{g,d} = 39.33 \text{ MPa} \quad (6.62)$$

$$\text{Έλεγχος σε ΟΚΛ: } w_{max} = 31.18 \text{ mm} < w_{all} = 31.67 \text{ mm} \quad (6.63)$$



(α)

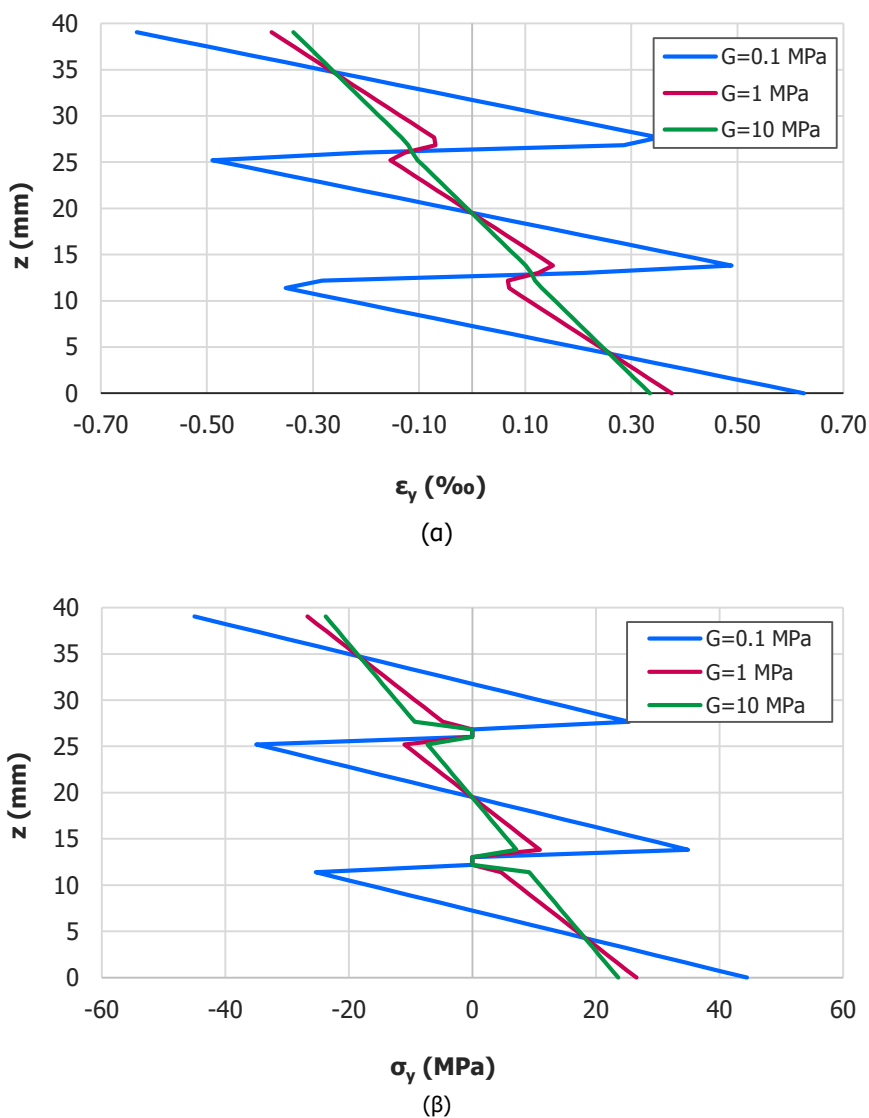


(β)

Εικόνα 6.23. (α) Μέγιστη ορθή τάση $\sigma_{y,max}$ (ULS1) και (β) μέγιστη βύθιση w_{max} (SLS1) συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int} -Σύγκριση με μέθοδο EET

Στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη θεώρηση μιας μονολιθικής διατομής ισοδύναμου πάχους κατά τη μέθοδο EET που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Τα πάχη αυτά προσδιορίστηκαν κατά το στάδιο της προδιαστασιολόγησης (Παράγραφος 5.3.2) για τις περιπτώσεις του υπολογισμού της μέγιστης τάσης και της μέγιστης βύθισης ανάλογα με την τιμή του G_{int} . Σε όλο το εύρος των πιθανών τιμών του παρατηρείται εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των

αποτελεσμάτων που προέρχονται από το προσομοίωμα σύνθετης διατομής και από αυτό της ισοδύναμης μονολιθικής. Η προσέγγιση λοιπόν του ισοδύναμου πάχους ενσωματώνει τις βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν την απόκριση του πολυστρωματικού γυαλιού και προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τα μέγιστα αναπτυσσόμενα μεγέθη. Μπορεί να αποτελέσει επομένως ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό πολυστρωματικών υαλοπινάκων περιορίζοντας δραστικά τις ανάγκες σε υπολογιστικούς πόρους. Ωστόσο η μέθοδος αυτή αδυνατεί να μελετήσει τη γενικότερη συμπεριφορά της διάταξης και απαιτείται η θεώρηση της σύνθετης διατομής για την εξαγωγή πληροφοριών όπως η κατανομή των παραμορφώσεων και τάσεων στα επιμέρους στρώματα. Οι κατανομές της Εικόνας 6.24 αναφέρονται στη φόρτιση ULS1 και αφορούν το σημείο όπου αναπτύσσεται η μέγιστη τάση.



Εικόνα 6.24. Κατανομή (α) της παραμόρφωσης ϵ_γ και (β) της τάσης σ_γ καθύψος της διατομής για πιθανές τιμές του G_{int}

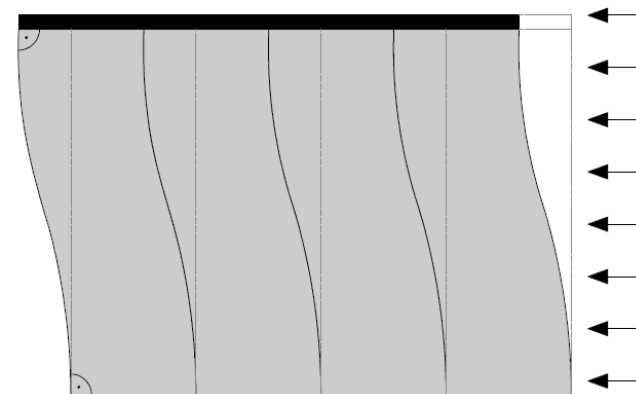
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων παρουσίασαν πολύ μικρές διαφορές σε σχέση με αυτά των γραμμικών αναλύσεων και για τον λόγο αυτό δεν συμπεριλήφθηκαν στο παρόν τεύχος. Είναι λογικό η ελευθερία κίνησης του υαλοπινάκα κατά τη διεύθυνση y να εμποδίζει την ενεργοποίηση της λειτουργίας μεμβράνης,

η οποία θα επέτρεπε την αύξηση της δυσκαμψίας του φορέα. Βέβαια, η ελευθερία αυτή αποτελεί παραδοχή του απλοποιημένου προσομοιώματος, το οποίο δεσμεύει μόνο τον βαθμό ελευθερίας u_z των κόμβων της κεφαλής του πάνελ. Και στην πραγματικότητα ωστόσο, η κόλλα συγκρατεί το πάνελ στο πάνω μέρος του, επιτρέπει όμως σε μεγάλο βαθμό τη μετατόπισή του κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και δεν ευνοεί την εισαγωγή πρόσθετων τάσεων στο επίπεδό του.

7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ

7.1 ΦΕΡΟΝΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ

Οι σύγχρονες εφαρμογές φέρουσας υάλωσης εμπεριέχουν όλο και συχνότερα τη χρήση των υαλοπινάκων ως φερόντων τοιχωμάτων (glass shear walls), τα οποία συνεισφέρουν στην παγίωση του φορέα και συμμετέχουν στην ανάληψη των οριζόντιων φορτίων. Πρόκειται για στοιχεία μεγάλης λυγηρότητας που υπόκεινται σε εντός επιπέδου διατμητικά φορτία, επομένως ο σχεδιασμός τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, αφού ο κίνδυνος εκδήλωσης φαινομένων αστάθειας παρουσιάζεται αυξημένος. Ωστόσο, η γνώση και η έρευνα για τον διατμητικό λυγισμό του πολυστρωματικού γυαλιού είναι ακόμα περιορισμένες, ενώ τα αναλυτικά μοντέλα που συναντώνται στη βιβλιογραφία και προέρχονται από τη θεωρία σύνθετων πλακών με πυρήνα (τύπου sandwich), απευθύνονται αποκλειστικά σε διατομές δύο στρώσεων και σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και στήριξης. Οι υπάρχουσες μέθοδοι σχεδιασμού, οι οποίες έχουν προσαρμοστεί σε κοινά δομικά υλικά όπως ο χάλυβας, δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας σε στοιχεία γυαλιού, καθώς το υπόβαθρό τους δεν ενσωματώνει ιδιαιτερότητες όπως η ψαθυρή θραύση και η εξάρτηση της μηχανικής απόκρισης από τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μπορούν λοιπόν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για τη διερεύνηση του λυγισμού των υαλοπινάκων και την αποτίμηση της επιρροής παραγόντων όπως το μέτρο διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης G_{int} , ή ο τρόπος σύνδεσης του γυαλιού με τον μεταλλικό σκελετό στην ευστάθεια του συστήματος.



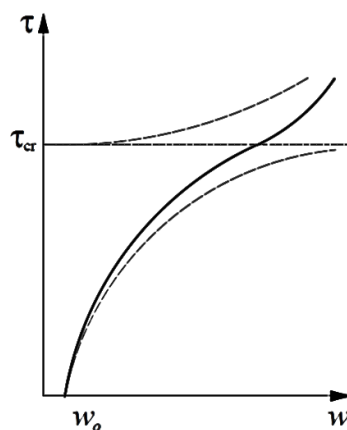
Εικόνα 7.1. Χρήση υαλοπίνακα ως φέροντος τοιχώματος

Προς αυτήν την κατεύθυνση, μελετάται στις επόμενες Παραγράφους η συμπεριφορά σε διατμητικό λυγισμό του πάνελ των Κεφαλαίων 5 και 6, με τη διάταξη στρώσεων που έχει οριστεί για κάθε σύστημα σύμφωνα με τους ελέγχους σε ΟΚΑ και ΟΚΛ, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες στήριξης κάθε συστήματος. Φυσικά και τα δύο αυτά συστήματα συνιστούν συστήματα πρόσοψης, ωστόσο ο κατάλληλος τρόπος σύνδεσής τους με τον φέροντα οργανισμό του κτιρίου επιτρέπει την ενεργοποίησή τους ως συνδέσμων δυσκαμψίας. Η σύνδεση αυτή προϋποθέτει να μην προβλέπονται ανοχές που να εξυπηρετούν την ανεξάρτητη κίνηση της γυάλινης διάταξης ως προς αυτή της υπόλοιπης κατασκευής. Αντιθέτως θα πρέπει να αναγκάζει την υάλωση να ακολουθεί την παραμόρφωση του ορόφου λόγω σεισμού ή πλευρικού ανέμου και να παραλαμβάνει φορτία ενισχύοντας τη δυσκαμψία του φορέα. Προσδιορίζονται και για τις δύο περιπτώσεις οι ιδιομορφές λυγισμού αλλά και οι δρόμοι ισορροπίας, προκειμένου να διαπιστωθούν φαινόμενα γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Η βαρύτητα δίνεται και εδώ στον βαθμό διατμητικής συνεργασίας μεταξύ των φύλλων γυαλιού, καθώς και στις ιδιότητες των υλικών που διαμορφώνουν τη στήριξη, αφού αναμφισβήτητα οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν σημαντικά την εντός επιπέδου στιβαρότητα του φορέα και το μέγεθος των εκδηλούμενων παραμορφώσεων.

7.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

7.2.1 Διατμητικός λυγισμός

Ο διατμητικός λυγισμός είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε λεπτές πλάκες όταν αυτές υποβάλλονται σε εντός επιπέδου διατμητική φόρτιση. Η πρώτη προσέγγιση στα φαινόμενα λυγισμού αποδίδεται στον Euler, ο οποίος διατύπωσε το 1974 την έκφραση για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Για το φορτίο αυτό το μέλος λυγίζει ξαφνικά και αποκτά εγκάρσιο βέλος άγνωστου προσήμου και μεγέθους. Αυτό παριστάνεται γραφικά στην Εικόνα 7.2, η οποία αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης τ και βύθισης w , με τον οριζόντιο κλάδο του διαγράμματος, ο οποίος αναφέρεται ως δευτερεύων δρόμος ισορροπίας. Βέβαια η γραμμή αυτή δεν περιγράφει το πραγματικό φυσικό φαινόμενο, αλλά είναι αποτέλεσμα των απλοποιητικών παραδοχών που έγιναν κατά την ανάλυση. Πρόκειται για τη γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού, η οποία βασίζεται στη διατύπωση των



Εικόνα 7.2. Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού με θεώρηση αρχικής ατέλειας

εξισώσεων στην παραμορφωμένη γεωμετρία, υιοθετώντας ωστόσο την παραδοχή ότι οι μετατοπίσεις είναι μικρές. Όταν λοιπόν οι μετατοπίσεις αρχίσουν να αυξάνονται, η παραδοχή αυτή καταλύεται και η γραμμική προσέγγιση παύει να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η συμπεριφορά του φορέα χαρακτηρίζεται πλέον από μη γραμμικότητα γεωμετρίας και οι μεμβρανικές τάσεις που εισάγονται στο επίπεδο του

επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκρισή του. Ο δρόμος ισορροπίας είναι τώρα καμπύλος και όχι ευθύγραμμος με την ανοδική μορφή του μετά το κρίσιμο φορτίο να φανερώνει τη μεταλυγισμική αντοχή της πλάκας (Εικόνα 7.2). Η φορά προς την οποία θα εκδηλωθεί ο λυγισμός καθορίζεται από την αρχική ατέλεια w_0 που έχει ληφθεί υπόψη στη μη γραμμική ανάλυση.

Τα κρίσιμα φορτία λυγισμού επομένως δε συνιστούν άνω όριο για τον σχεδιασμό, καθώς η διαδικασία υπολογισμού τους αγνοεί την επίδραση φαινομένων γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση επιδιώκεται ο προσδιορισμός τους, αφού επιτρέπουν μια γρήγορη πρώτη εκτίμηση της αντοχής, ενώ χρησιμοποιούνται συχνά και ως τιμές αναφοράς για τη δημιουργία καμπυλών λυγισμού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αναλυτική λύση για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου μιας μονολιθικής πλάκας και η επέκτασή της σε μια δομή σάντουιτς 2 φύλλων.

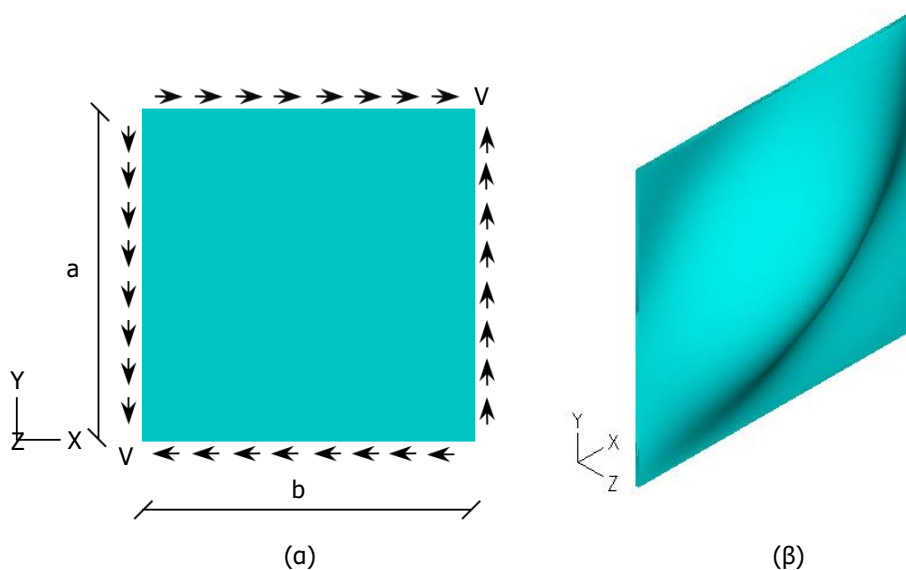
7.2.2 Υπολογισμός κρίσιμου φορτίου λυγισμού σύμφωνα με τη θεωρία πλακών

Η θεωρία πλακών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του κρίσιμου φορτίου διατμητικού λυγισμού V_{cr} ενός υαλοπίνακα μονολιθικής διατομής υπό την επίδραση εντός επιπέδου διατμητικού φορτίου V (Timoshenko et al. 1961). Έστω ο υαλοπίνακας της Εικόνας 7.3 (ύψους a , πλάτους b , πάχους t , μέτρου ελαστικότητας E και λόγου Poisson ν) ο οποίος εδράζεται κατά μήκος των τεσσάρων πλευρών του και υπόκειται στο διατμητικό φορτίο $N_{xy} = t \cdot \tau_{xy} = V$. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει σε αυτή την περίπτωση τη συμπεριφορά της πλάκας διατυπώνεται ως:

$$D\Delta^2 w = 2V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \quad (7.1)$$

όπου Δ ο τελεστής Laplace και D η δυσκαμψία ανά μονάδα πλάτους, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7.2)$$



Εικόνα 7.3. Απλά εδραζόμενος υαλοπίνακας υπό διατμητικό φορτίο (α) γεωμετρία, (β) παραμορφωμένη κατάσταση

Για τη συνάρτηση της εκτός επιπέδου μετατόπισης της πλάκας $w=w(x,y)$ θεωρείται η ακόλουθη μορφή:

$$w(x,y) = f(y)e^{ikx/b} \quad (7.3)$$

Εισάγοντας τη συνάρτηση w στη διαφορική εξίσωση (7.1) το κρίσιμο διατμητικό φορτίο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V_{cr} = \frac{\pi^2 D}{b^2} k_r = \frac{\pi^2 E b t}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 k_r, \quad (7.4)$$

επομένως η σχέση για την κρίσιμη διατμητική τάση γίνεται:

$$\tau_{cr} = \frac{V_{cr}}{tb} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 k_r \quad (7.5)$$

Ο συντελεστής k_r εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες και τον λόγο των πλευρών $a=a/b$. Οι σχέσεις που ακολουθούν δίνουν την τιμή του για την περίπτωση στοιχείων με απλή έδραση στις τέσσερις πλευρές καθώς και για την περίπτωση στοιχείων με πλήρη πάκτωση στις τέσσερις πλευρές.

$$\text{Πλάκα απλής έδρασης} \quad k_r = \begin{cases} 4.00 + \frac{5.34}{a^2} & a \leq 1 \\ 5.34 + \frac{4.00}{a^2} & a > 1 \end{cases} \quad (7.6)$$

$$\text{Πλάκα πλήρους πάκτωσης} \quad k_r = \begin{cases} 5.60 + \frac{8.98}{a^2} & a \leq 1 \\ 8.98 + \frac{5.60}{a^2} & a > 1 \end{cases} \quad (7.7)$$

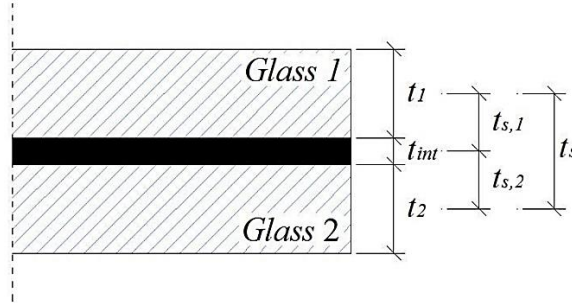
7.2.3 Υπολογισμός κρίσιμου φορτίου λυγισμού για πλάκα τύπου σάντουιτς

Το πολυστρωματικό γυαλί μπορεί να θεωρηθεί μια ιδιαίτερη περίπτωση δομής τύπου σάντουιτς, με την ιδιομορφία σε σχέση με τις συνθήκες εφαρμογής να έγκειται στον λεπτό πυρήνα και τις σχετικά μεγάλου πάχους επικαλύψεις. Στη βιβλιογραφία συναντώνται αναλυτικές λύσεις για το πρόβλημα των ορθογωνικών πλακών διατομής σάντουιτς οι οποίες υπόκεινται σε εντός επιπέδου διατμητικά φορτία (Kuenzi et al. 1975). Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας για την κάμψη και τον λυγισμό τέτοιων πλακών συνοψίζονται στις εξής (Zenkert 1997):

- τα υλικά των επικαλύψεων και του πυρήνα είναι ελαστικά
- οι επικαλύψεις είναι επίπεδες και έχουν σταθερό πάχος
- το πάχος και η ακαμψία των επικαλύψεων δεν μπορούν να αμεληθούν
- η διατμητική στιβαρότητα του πυρήνα είναι άπειρη
- ο πυρήνας είναι ένα μαλακό ελαστικό υλικό
- οι ιδιότητες είναι σταθερές σε όλο το πάνελ

Η Εικόνα 7.4 παρουσιάζει τη σύνθεση μιας πλάκας, η οποία αποτελείται συνολικά από τρεις στρώσεις. Τα δύο φύλλα γυαλιού πάχους t_1 και t_2 έχουν μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν . Η ενδιάμεση

στρώση του πολυμερούς (PVB ή SGP), πάχους t_{int} και μέτρου ελαστικότητας E_{int} , είναι πολύ λεπτή και μαλακή σε σχέση με αυτές του γυαλιού, επομένως αγνοούνται οι ορθές τάσεις και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι διατμητικές.



Εικόνα 7.4. Διατομή σύνθετου πάνελ 2 φύλλων γυαλιού

Η εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων και ροπών υπό την επίδραση διατμητικής δύναμης V στην παραμορφωμένη κατάσταση γράφεται:

$$\frac{D_i}{S_{int}} \Delta^3 w - \frac{D_{lam}}{D_o + D_c} \Delta^2 w = 2V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \left(\frac{\Delta w}{S_{int}} - \frac{1}{D_o + D_c} \right) \quad (7.8)$$

όπου,

$$D_i = \frac{E(t_1^3 + t_2^3)}{12(1 - \nu^2)} \quad (7.9)$$

η δυσκαμψία των φύλλων γυαλιού ως προς τον ουδέτερό τους άξονα,

$$D_o = \frac{E_t d^2}{2(1 - \nu^2)} \quad (7.10)$$

η δυσκαμψία των φύλλων γυαλιού ως προς τον ουδέτερο άξονα της συνολικής διατομής,

$$d = \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} + t_{int} \quad (7.11)$$

η απόσταση των μέσων επιπέδων των φύλλων γυαλιού,

$$D_c = \frac{E_{int} t_{int}^3}{12(1 - \nu_{int}^2)} \quad (7.12)$$

η δυσκαμψία της ενδιάμεσης στρώσης,

$$D_{lam} = D_i + D_o + D_c \quad (7.13)$$

η δυσκαμψία της σύνθετης διατομής,

$$S_{int} = \frac{G_{int} d^2}{t_{int}} \quad (7.14)$$

η δυσστημψία της ενδιάμεσης στρώσης.

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού δίνεται τελικά από τη σχέση:

$$V_{cr} = \frac{\pi^2 D_{lam}}{b^2} k_{\tau, lam} \quad (7.15)$$

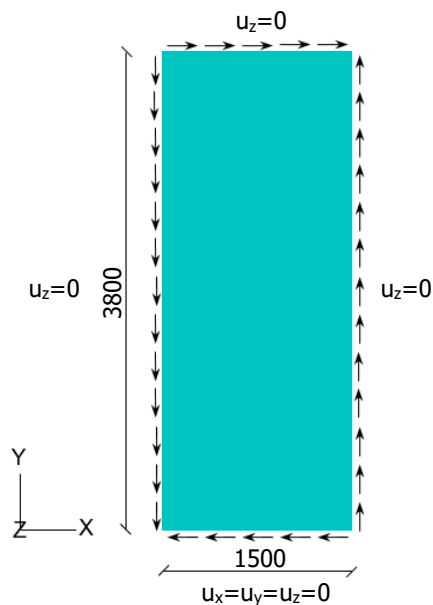
Οι προτεινόμενες σχέσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή $k_{\tau, lam}$ (Kuenzi et al. 1975) διατυπώνονται συναρτήσει του λόγου πλευρών a και της δυσστημίας S_{int} ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες ως εξής:

Πλάκα απλής έδρασης $k_{\tau, lam} = \frac{\frac{16}{3} + \frac{4}{a^2}}{1 + \frac{\pi^2 D_{lam}}{b^2 S_{int}} \left(\frac{13}{3} + \frac{3}{a^2} \right)}$ (7.16)

Πλάκα πλήρους πάκτωσης $k_{\tau, lam} = \frac{9 + \frac{17}{3a^2}}{1 + \frac{\pi^2 D_{lam}}{b^2 S_{int}} \left(\frac{23}{3} + \frac{13}{3a^2} \right)}$ (7.17)

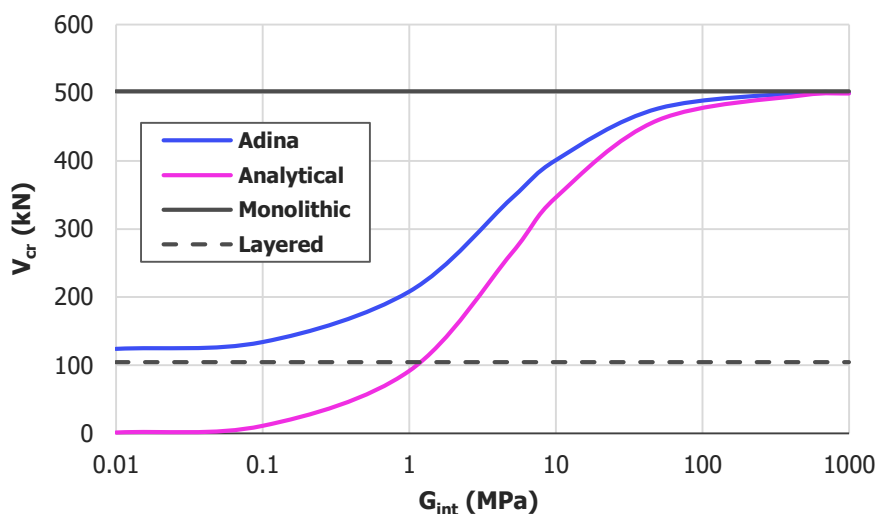
7.3 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ

Η αναλυτική λύση της σχέσης (7.15) εφαρμόζεται για την περίπτωση του υαλοπίνακα του συστήματος δομικής σιλικόνης (Εικόνα 6.1). Παράλληλα, πραγματοποιούνται για τον ίδιο φορέα γραμμικές αναλύσεις λυγισμού στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina. Το προσομοίωμα, το οποίο αποτελείται και εδώ από στοιχεία τύπου 3d-solid, στηρίζεται στις τέσσερις πλευρές του όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.5, ενώ τα διατμητικά φορτία V ασκούνται με τη μορφή πίεσης (pressure) που δρα εφαπτομενικά στο επίπεδο της κάθε πλευράς. Ο υπολογισμός των κρίσιμων φορτίων περιλαμβάνει τον πολλαπλασιασμό του συντελεστή που εξάγει η γραμμική ανάλυση με την τιμή της πίεσης και το εμβαδό $A=bt$.

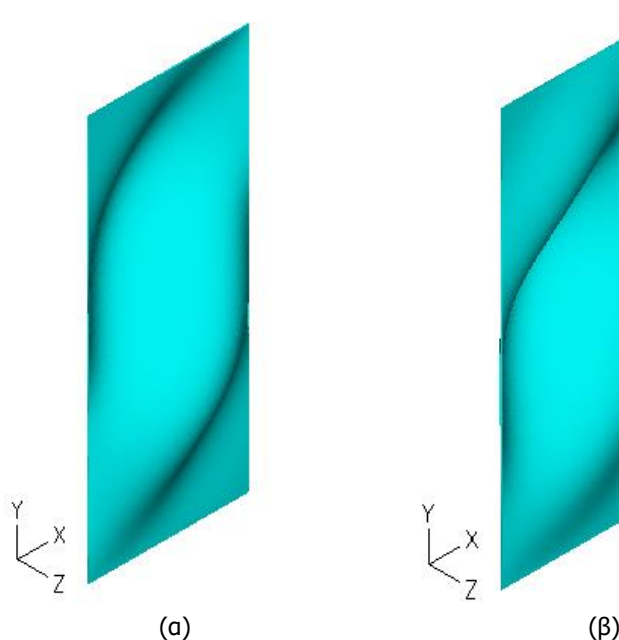


Εικόνα 7.5. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση υαλοπίνακα

Η Εικόνα 7.6 συγκρίνει τα κρίσιμα φορτία λυγισμού της πρώτης ιδιομορφής που προκύπτουν από την αναλυτική και αριθμητική προσέγγιση. Αποδεικνύεται πως η εξίσωση του Kuenzi εκτιμά με μεγάλη ακρίβεια το πλήρες φορτίο του σύνθετου γυαλιού δίο στρώσεων, υποτιμά όμως σε μεγάλο βαθμό την αντοχή όταν το υλικό της μεμβράνης είναι αρκετά μαλακό. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για τιμές του μέτρου διάτμησης μικρότερες του 0.1 MPa, το κρίσιμο φορτίο τείνει να λάβει μηδενική τιμή. Αυτή η αδυναμία του αναλυτικού μοντέλου να αποδώσει σωστά το μέγεθος της αντοχής σε ολόκληρο το φάσμα των πιθανών G_{int} μπορεί να ερμηνευτεί από την παραβίαση της παραδοχής άπειρης διατμητικής στιβαρότητας του πυρήνα που αναφέρθηκε παραπάνω. Επιβεβαιώνεται επομένως πως ο σχεδιασμός του πολυστρωματικού γυαλιού σε λυγισμό δεν μπορεί προς το παρόν να βασιστεί σε αναλυτικά μοντέλα και κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή αριθμητικών αναλύσεων.



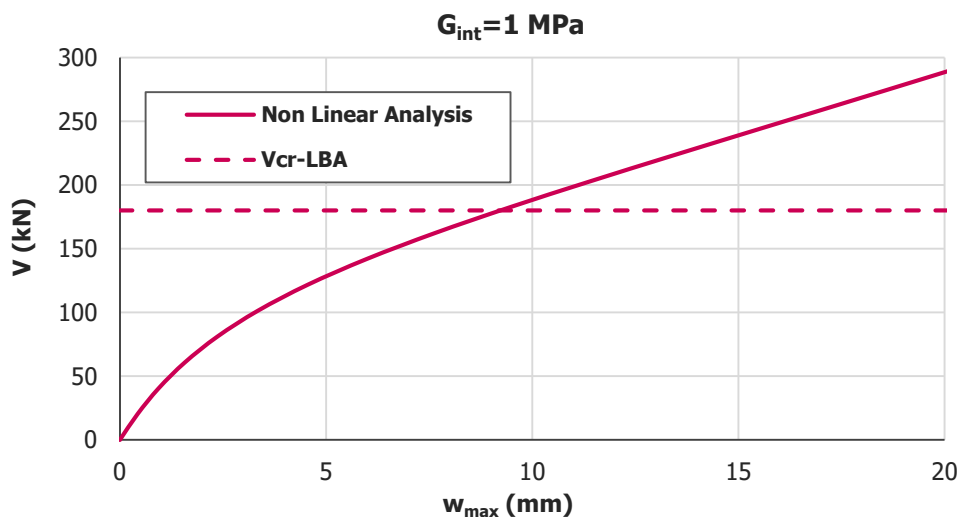
Εικόνα 7.6. Κρίσιμο φορτίο λυγισμού 1^{ης} ιδιομορφής συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int} . Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης



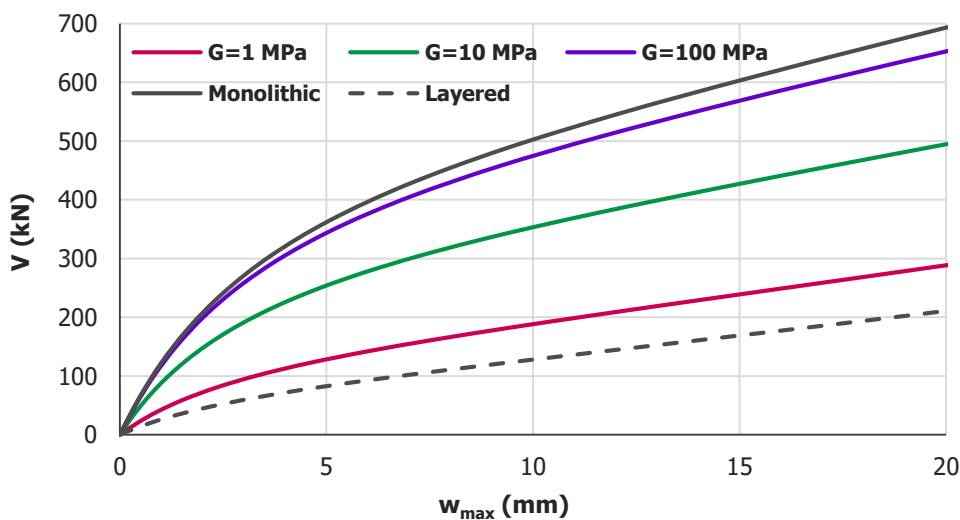
Εικόνα 7.7. (α) 1^η και (β) 2^η ιδιομορφή λυγισμού

Όπως και στην περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης του υαλοπίνακα, έτσι και εδώ η σύνθετη δράση που παρέχει η μεμβράνη μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συμπεριφορά της πολυστρωματικής διάταξης. Μεγάλες τιμές του G_{int} εξασφαλίζουν σημαντική μεταφορά διάτμησης από το ένα φύλλο γυαλιού στο άλλο και πετυχαίνουν κρίσιμο φορτίο συγκρίσιμο με αυτό του μονολιθικού γυαλιού πάχους $t=13.52$ mm. Όταν όμως ο σχεδιασμός αφορά μεγάλης διάρκειας φορτίσεις ή υψηλές θερμοκρασίες, που αντιστοιχούν σε μικρά G_{int} , η διατμητική συνεργασία των φύλλων γυαλιού αποδεικνύεται αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί. Στην Εικόνα 7.7 παρουσιάζονται οι δύο πρώτες ιδιομορφές λυγισμού.

Ακολουθούν μη γραμμικές αναλύσεις, προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια η απόκριση του υαλοπίνακα, όπως αυτή αποτυπώνεται στους δρόμους ισορροπίας. Για τις αναλύσεις αυτές επιλέγεται η μέθοδος Newton-Raphson και εισάγεται αρχική ατέλεια ανάλογη της πρώτης ιδιομορφής με μέγεθος $w_0=a/1000=3800/1000=3.8$ mm. Το διάγραμμα της Εικόνας 7.8 εκφράζει, ενδεικτικά για $G_{int}=1$ MPa, τη σχέση μεταξύ της επιβεβλημένης διατμητικής δύναμης V κατά τη διεύθυνση x και της μέγιστης βύθισης w_{max} του υαλοπίνακα και φανερώνει μια μεταλυγισμική συμπεριφορά που επιτρέπει την ανάληψη φορτίου μεγαλύτερου από αυτό που υποδεικνύει η γραμμική προσέγγιση.



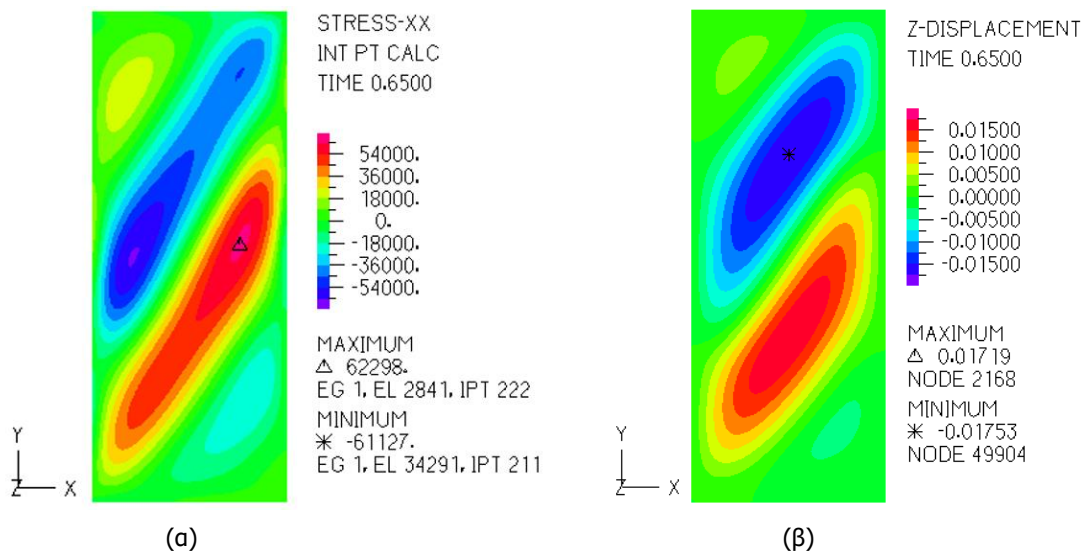
Εικόνα 7.8. Σχέση δύναμης V -μέγιστης βύθισης w_{max} για $G_{int}=1$ MPa (4-SSG)



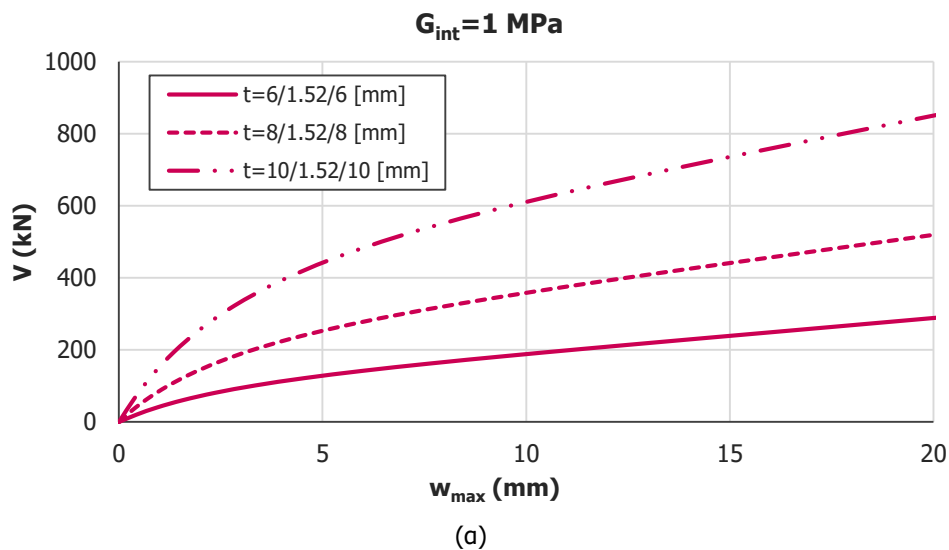
Εικόνα 7.9. Παραμετρική μελέτη της σχέσης δύναμης V -μέγιστης βύθισης w_{max} ως προς το μέτρο διάτμησης G_{int} (4-SSG)

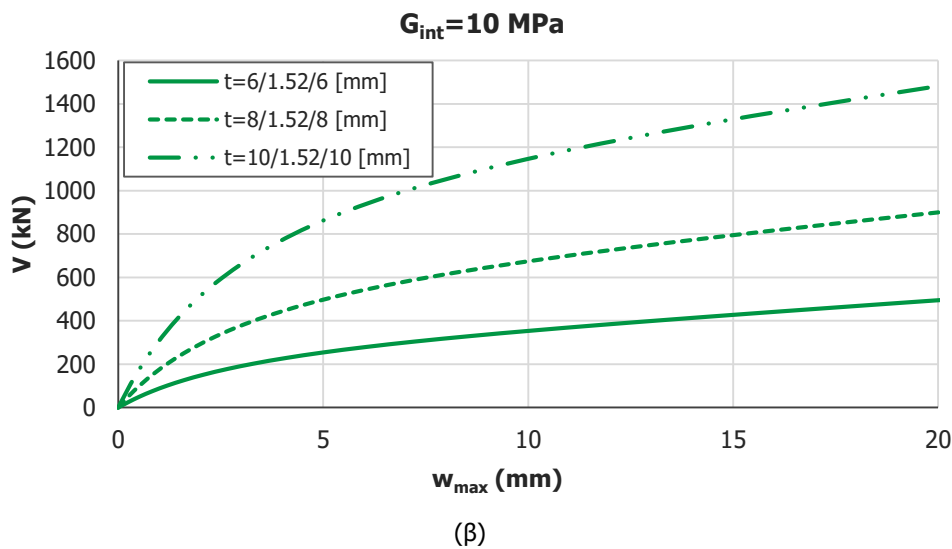
Η παραμετρική μελέτη της σχέσης δύναμης V-βύθισης w_{max} ως προς το μέγεθος G_{int} στην Εικόνα 7.9 αναδεικνύει σημαντικές αποκλίσεις της συμπεριφοράς μεταξύ ανώτατου και κατώτατου ορίου. Όπως αναφέρθηκε λοιπόν και στο Κεφάλαιο 3, κρίνεται σκόπιμο να εντάσσονται οι φορτίσεις τις οποίες αφορά ο σχεδιασμός σε συγκεκριμένα προφίλ καιρικών συνθηκών ανάλογα με την περιοχή και να εξάγονται ρεαλιστικές τιμές του G_{int} . Με αυτόν τον τρόπο θα επιτυγχάνεται η οικονομικότερη κάθε φορά λύση και θα αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση λόγω συντηρητικών παραδοχών, που ενδεχομένως να αγνοούν πλήρως τη συνεισφορά της μεμβράνης. Βέβαια η ανάγκη αυτή εμφανίζεται μικρότερης σημασίας, όταν τον ρόλο της μεμβράνης αναλαμβάνει το ιονισμένο πολυμερές, το οποίο προσεγγίζει το μονολιθικό όριο σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών σε σχέση με τη βουτυράλη.

Στην Εικόνα 7.10 παρουσιάζονται η κατανομή των ορθών τάσεων σ_x και η χρωματική απεικόνιση της βύθισης w , ενδεικτικά για την περίπτωση $G_{int}=1$ MPa, όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση πλησιάζει τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής ($\sigma_{Rk}=70$ MPa).



Εικόνα 7.10. Κατανομή (α) των τάσεων σ_x (kPa) και (β) της βύθισης w (mm) για $G_{int}=1$ MPa (4-SSG)



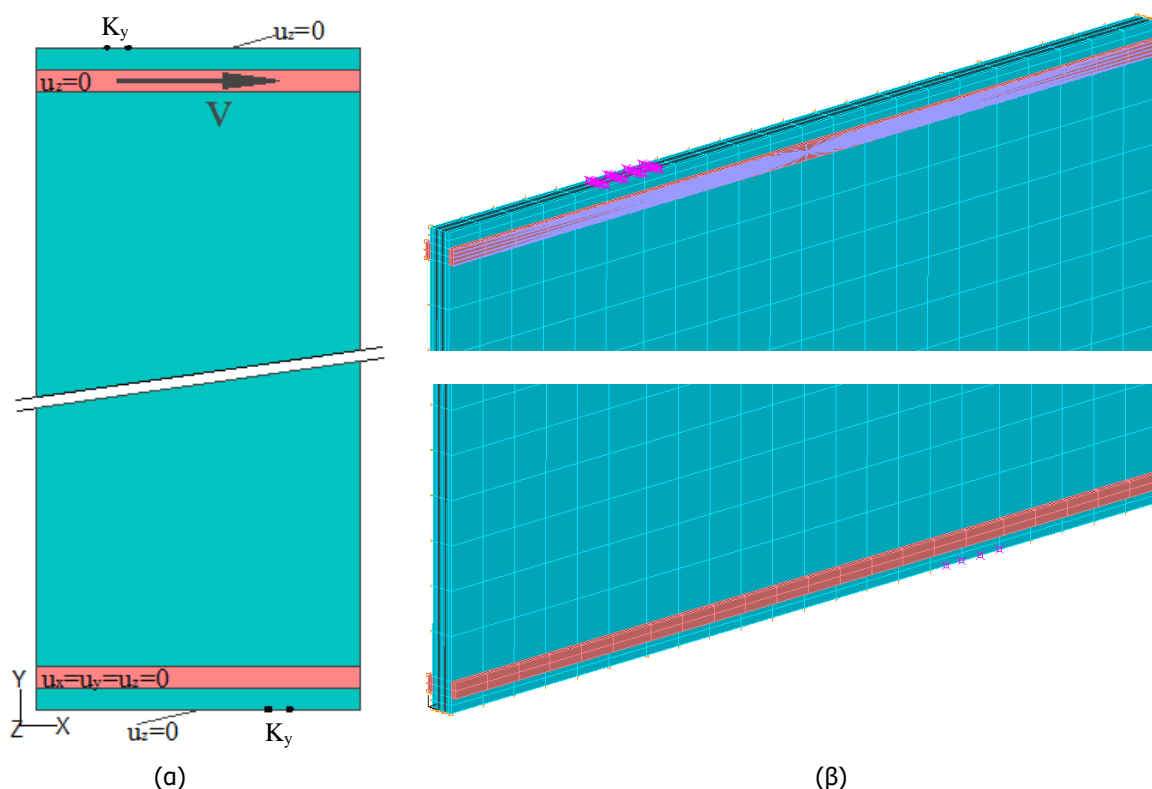


Εικόνα 7.11. Παραμετρική μελέτη της σχέσης δύναμης V -μέγιστης βύθισης w_{max} ως προς το πάχος της διατομής (4-SGS)

Τα διαγράμματα της Εικόνας 7.11 φανερώνουν τη μεγάλο βαθμού επίδραση του πάχους της διατομής στη δυσκαμψία του υαλοπίνακα. Η μετάβαση από τη μία διάταξη στην επόμενη, η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση του συνολικού πάχους κατά μόλις 4 mm, συνοδεύεται από διπλασιασμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Υπογραμμίζεται επομένως η ευχέρεια που προσδίδει στον σχεδιασμό η διάθεση των φύλλων γυαλιού σε πάχη που ξεκινούν από 2 και φτάνουν μέχρι τα 25 mm. Αυτή η ποικιλία στις διαστάσεις σε συνδυασμό με τη δυνατότητα σύνδεσης πολλών μεμονωμένων φύλλων προς τον σχηματισμό ενός ενιαίου συνόλου επιτρέπει τη μόρφωση φορέων που θα ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

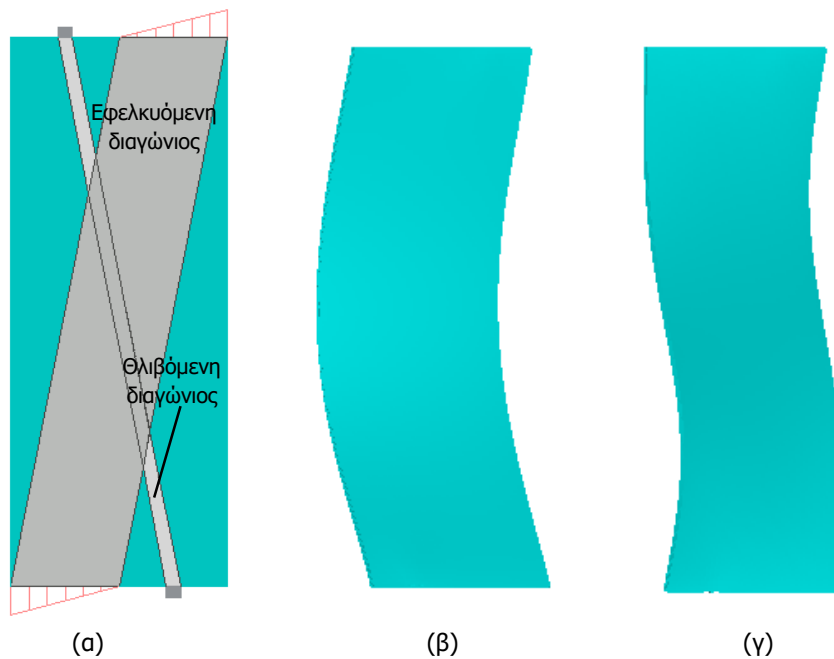
7.4 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης η γεωμετρία του φορέα αντιστοιχεί σε αυτήν της Εικόνας 6.16. Από τα υλικά που συμμετέχουν στη στήριξη, η προσομοίωση εδώ περιλαμβάνει μόνο την κόλλα, ενώ η λειτουργία των setting blocks και spacers (με τα οποία το γυαλί απλά εφάπτεται, χωρίς να συνδέεται μαζί τους) περιγράφεται με τη χρήση ελατηρίων και κατάλληλων συντοκικών συνθηκών (Εικόνα 7.12). Η εντός επιπέδου διατμητική δύναμη που ασκείται στο μεταλλικό πλαίσιο της κεφαλής μεταφέρεται μέσω της κόλλας στον υαλοπίνακα και τον αναγκάζει σε στροφή, με αποτέλεσμα να χάνει την επαφή του με δύο διαγώνια τοποθετημένους τάκους και να συγκρατείται μόνο από τους άλλους δύο (οι τάκοι λειτουργούν μόνο σε θλίψη και όχι σε εφελκυσμό). Στις θέσεις των δύο τάκων που λειτουργούν ως στηρίξεις τοποθετούνται μετακινησιακά ελατήρια σταθεράς k_y . Κατά μήκος των ακμών του πάνελ στην κάτω και πάνω πλευρά του επιβάλλονται κυλίσεις που δεσμεύουν τη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση z , ώστε να ληφθεί υπόψη η πλευρική στήριξη που παρέχουν στο γυαλί οι αφρώδεις ταινίες. Στις επιφάνειες της κόλλας της βάσης που είναι σε επαφή με το μεταλλικό πλαίσιο επιβάλλεται άρθρωση, ενώ στις αντίστοιχες της κεφαλής επιβάλλεται κύλιση μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links), η οποία εξασφαλίζει πλευρικά το γυαλί, επιτρέπει όμως τη μετατόπιση κατά τις διευθύνσεις x , y .

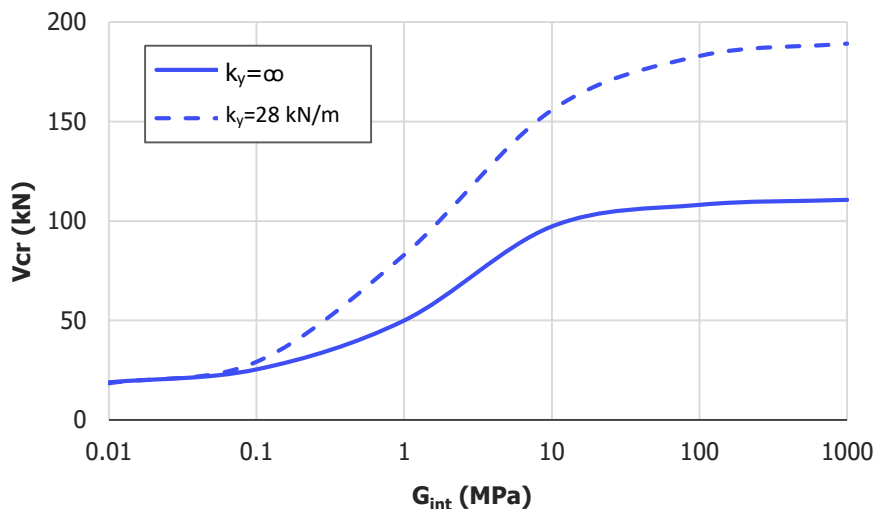


Εικόνα 7.12. (α) Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος
 (β) Χρήση ελατηρίων στις θέσεις των τάκων έδρασης,
 δημιουργία άκαμπτου συνδέσμου στην κόλλα της κεφαλής

Για τη γραμμική ανάλυση λυγισμού ασκείται ένα μοναδιαίο φορτίο V_x στον master κόμβο του rigid link και μεταφέρεται έτσι σε όλη την επιφάνεια της κόλλας καθώς και στη διεπιφάνεια με το γυαλί. Το κρίσιμο φορτίο σε αυτή την περίπτωση ισούται με τον φορτικό συντελεστή που δίνει ως αποτέλεσμα το πρόγραμμα για την κάθε ιδιομορφή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.13(a), οι αντιδράσεις στήριξης στις θέσεις των τάκων έδρασης δημιουργούν μια θλιβόμενη διαγώνιο, η οποία προσπαθεί να προκαλέσει την εκτός επιπέδου παραμόρφωση του υαλοπίνακα. Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από τις ιδιότητες του συγκολλητικού υλικού, αφού αυτό αναλαμβάνει τον εφελκυσμό και επιδιώκει μέσω της εφελκυσμένης διαγωνίου να αποτρέψει τον λυγισμό. Για τη μικρού μέτρου ελαστικότητας κόλλα που χρησιμοποιήθηκε στο υπό μελέτη παράδειγμα (DC 993), η 1^η ιδιομορφή αντιστοιχεί σε αυτή της Εικόνας 7.13(β), ενώ για ένα μεγαλύτερης ελαστικότητας υλικό ο λυγισμός θα εκδηλωνόταν υπό τη μορφή της Εικόνας 7.13(γ). Η επιρροή του μέτρου διάτμησης G_{int} στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού καταγράφεται στην Εικόνα 7.14 για την πρώτη περίπτωση κόλλας. Οι δύο καμπύλες του διαγράμματος αντιπροσωπεύουν διαφορετική τιμή της σταθεράς k_y των ελατηρίων. Αρχικά οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με τη θεώρηση ελατηρίων άπειρης στιβαρότητας, τα οποία ισοδυναμούν ουσιαστικά με δέσμευση του βαθμού ελευθερίας u_y των κόμβων στις συγκεκριμένες θέσεις. Στη συνέχεια επαναλαμβάνονται για την τιμή του k_y που υπολογίστηκε στη σχέση (6.58) ($k_y=28$ kN/m) σύμφωνα με το μέτρο ελαστικότητας του νεοπρενίου. Όπως ήταν αναμενόμενο, όταν λαμβάνεται υπόψη η ενδοσιμότητα των συνθηκών στήριξης του γυαλιού, η αντοχή έναντι λυγισμού αυξάνεται αισθητά. Θα πρέπει επομένως τα μοντέλα για τον σχεδιασμό των υαλοπινάκων να μπορούν να προβλέπουν τη συμπεριφορά των συνδέσεων με βάση τις ιδιότητες των υλικών που περιβάλλουν το πάνελ και τον τρόπο με τον οποίο αυτά διατάσσονται στο μεταλλικό πλαίσιο.

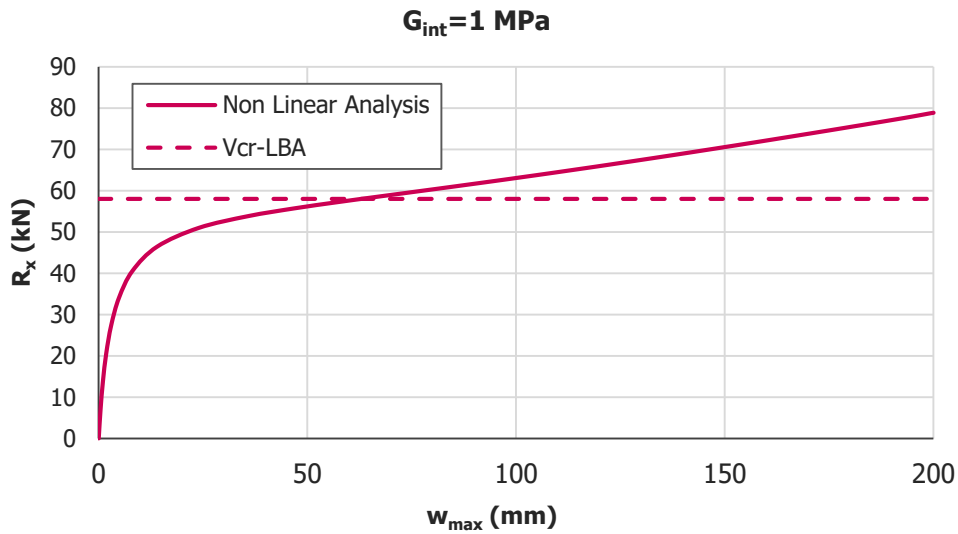


Εικόνα 7.13. (α) Λειτουργία μεμβράνης του υαλοπίνακα, (β) 1^η ιδιομορφή για κόλλα μικρού μέτρου ελαστικότητας, (γ) 1^η ιδιομορφή για κόλλα μεγάλου μέτρου ελαστικότητας

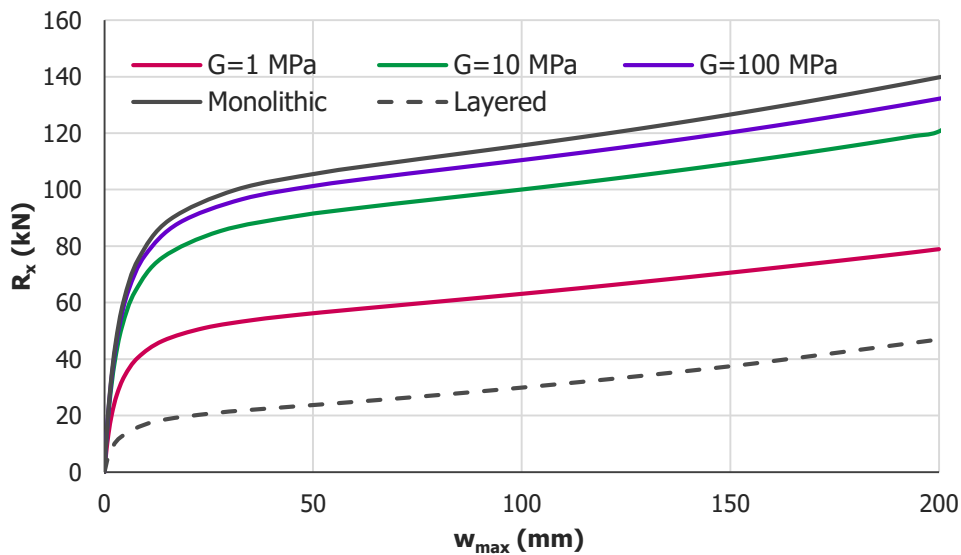


Εικόνα 7.14. Κρίσιμο φορτίο λυγισμού 1^{ης} ιδιομορφής συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G_{int} . Θεώρηση ακλόνητης και ενδόσιμης στήριξης στις θέσεις των τάκων έδρασης

Οι μη γραμμικές αναλύσεις υλοποιούνται για το προσομοίωμα με τη θεώρηση ακλόνητης στήριξης με την επιβολή μιας οριζόντιας μετατόπισης στον master κόμβο του rigid link. Στην Εικόνα 7.15 απεικονίζεται το διάγραμμα αντίδρασης στήριξης R_x –μέγιστης βύθισης w_{max} του υαλοπίνακα για τιμή του μέτρου διάτμησης $G_{int}=1$ MPa. Αν και η κόλλα είναι αρκετά μαλακή για να αντισταθμίσει την επίδραση της θλιβόμενης διαγώνιου, καταφέρνει εντούτοις να εξασφαλίσει τη λειτουργία μεμβράνης, η οποία αποδίδει στο σύστημα μεταλυγισμική αντοχή. Στην Εικόνα 7.16 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες και για άλλες τιμές του G_{int} . Διαπιστώνεται και εδώ πως η συμπεριφορά του υαλοπίνακα βελτιώνεται σημαντικά όταν προσεγγίζεται το μονολιθικό όριο.

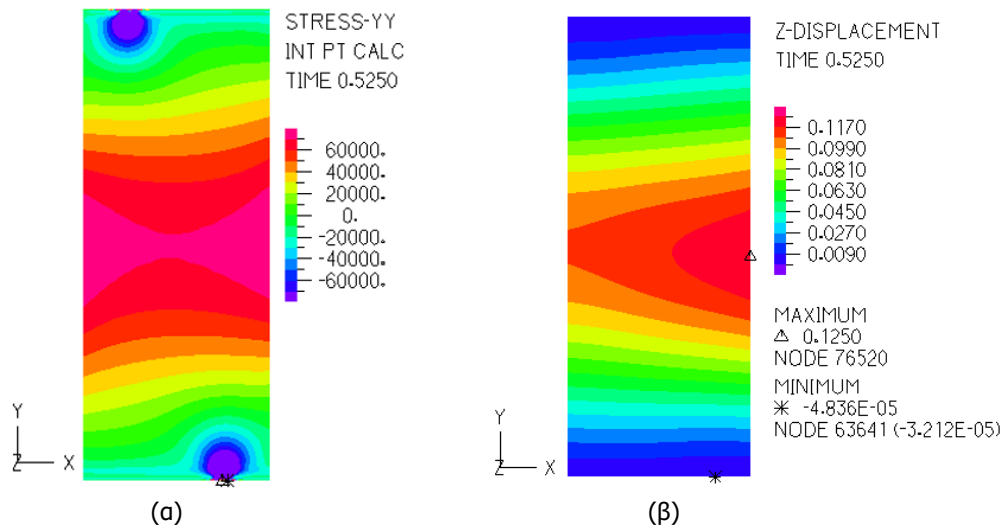


Εικόνα 7.15. Σχέση αντίδρασης R_x -μέγιστης βύθισης w_{max} για $G_{int}=1$ MPa (BJG)



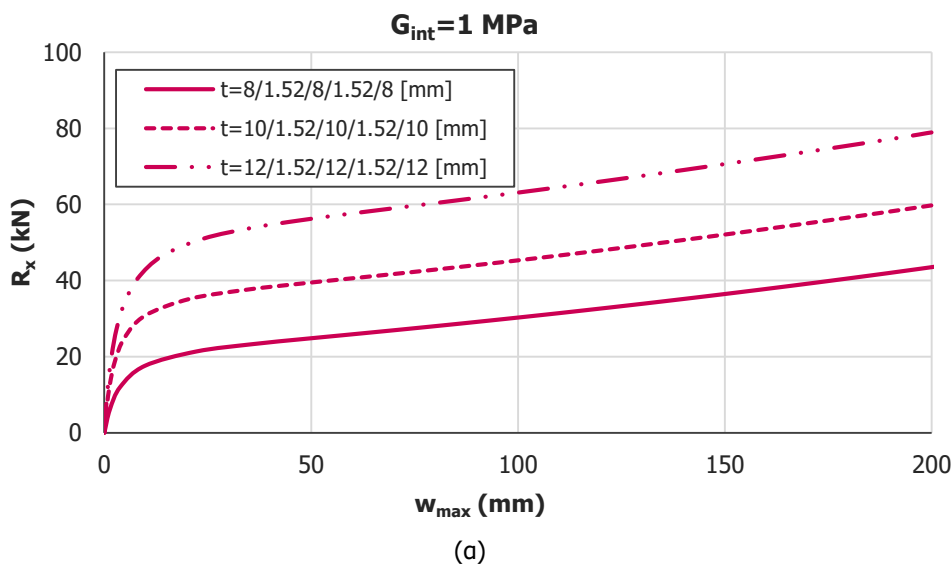
Εικόνα 7.16. Παραμετρική μελέτη της σχέσης αντίδρασης R_x -μέγιστης βύθισης w_{max} ως προς το μέτρο διάτμησης G_{int} (BJG)

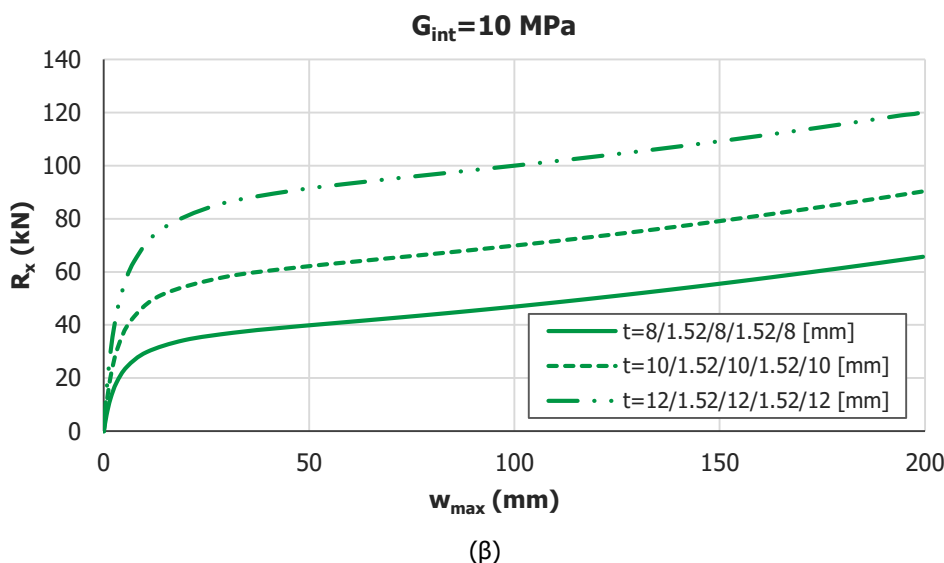
Στις Εικόνες 7.17(α) και 7.17(β) αποτυπώνονται για $G_{int}=1$ MPa οι ορθές τάσεις σ_y και οι βυθίσεις w αντίστοιχα, κάποια στιγμή πριν η εφελκυστική τάση στο μέσον του υαλοπίνακα ξεπεράσει τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής ($\sigma_{Rk}=70$ MPa). Επισημαίνεται πως οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις σημειώνονται στις περιοχές κοντά σε εκείνα τα setting blocks, που αναλαμβάνουν, ανάλογα με τη φορά της δύναμης, τη μεταφορά των αντιδράσεων στήριξης στο μεταλλικό πλαίσιο. Η προσομοίωση με ελατήρια αποδίδει ποιοτικά αυτές τις συγκεντρώσεις τάσεων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.17(α), οδηγεί όμως αριθμητικά σε μη ρεαλιστικές τιμές στα σημεία εφαρμογής των ελατηρίων, οι οποίες για τον λόγο αυτό δε συμπεριλήφθηκαν στα αποτελέσματα. Βέβαια, η διερεύνηση της συμπεριφοράς του γυαλιού κατά την επαφή του με τα setting blocks κρίνεται αναγκαία, ώστε να εκτιμηθεί ο κίνδυνος μηχανισμού τοπικής αστοχίας να προηγηθούν του καθολικού λυγισμού του φορέα.



Εικόνα 7.17. Κατανομή (α) των τάσεων σ_y (kPa) και (β) της βύθισης w (mm) για $G_{int}=1$ MPa (BJG)

Τέλος, πραγματοποιούνται και για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης παραμετρικές μη γραμμικές αναλύσεις ως προς το πάχος της διατομής (Εικόνα 7.18). Προκειμένου να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των διαγραμμάτων που προκύπτουν για τις τρεις εξεταζόμενες διατάξεις ($t_1=8/1.52/8/1.52/8$ mm, $t_2=10/1.52/10/1.52/10$ mm, $t_3=12/1.52/12/1.52/12$ mm), χρησιμοποιείται σε κάθε ανάλυση η μέθοδος Newton-Raphson και ορίζεται αρχική ατέλεια με το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής και μέγεθος ίσο με $w_0=3.8$ mm. Όπως στο σύστημα του τετραέρειστου υαλοπινάκα, το πάχος των φύλλων γυαλιού διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο και στην απόκριση του αμφιέρειστου υαλοπινάκα έναντι λυγισμού. Θα πρέπει βέβαια να εξετάζονται σε κάθε περίπτωση και οι αναπτυσσόμενες τάσεις του συγκολλητικού υλικού, καθώς η συμπεριφορά του επηρεάζει τη δυσκαμψία ολόκληρου του φορέα. Συγκεκριμένα, η υπέρβαση του ορίου διαρροής της κόλλας αποτυπώνεται με αλλαγή της κλίσης στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, με το πάνελ να συνεχίζει να μπορεί να αναλαμβάνει φορτίο αλλά με μειωμένο πλέον ρυθμό. Για μικρά πάχη διατομής το φορτίο διαρροής της κόλλας τοποθετείται συνήθως μετά το κρίσιμο φορτίο του πάνελ. Όσο όμως το πάχος αυξάνεται, αναμένεται η πλαστικοποίηση της κόλλας να προηγείται της εκδήλωσης φαινομένων λυγισμού.





Εικόνα 7.18. Παραμετρική μελέτη της σχέσης αντίδρασης R_x -μέγιστης βύθισης w_{max} ως προς το πάχος της διατομής (BJG)

7.5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ

Το υψηλό υπολογιστικό κόστος των μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί την ανάγκη για μια πιο απλή και γρήγορη μέθοδο σχεδιασμού, όπως οι καμπύλες λυγισμού. Οι καμπύλες αυτές δίνουν την τιμή του μειωτικού συντελεστή χ της αντοχής ως συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των γεωμετρικών ατελειών και των παραμενουσών τάσεων μέσω μιας γενικευμένης αρχικής ατέλειας. Η διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή χ περιγράφεται στις διατάξεις του EN 1993-1-1 και απευθύνεται σε χαλύβδινα μέλη, αναμένεται ωστόσο να ενσωματωθεί και στον επερχόμενο Ευρωκώδικα για κατασκευές από γυαλί με τις κατάλληλες προσαρμογές. Σε αντίθεση με τον χάλυβα, στην περίπτωση του γυαλιού οι παράμετροι χ και $\bar{\lambda}$ καθορίζονται με βάση την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Φυσικά, η αντοχή σε θλίψη είναι σημαντικά μεγαλύτερη, αφού οι ρωγμές δε διαδίδονται υπό θλίψη, δεν είναι όμως πρακτικά αξιοποιήσιμη, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις η εφελκυστική αντοχή ενός στοιχείου γυαλιού είναι αυτή που εξαντλείται πρώτη, με την αστοχία να εκδηλώνεται πάντα στην εφελκυσόμενη επιφάνεια του θλιβόμενου μέλους. Σύμφωνα με τις ιταλικές οδηγίες CNR-DT-210 η ευστάθεια τόσο του μονολιθικού όσο και του πολυστρωματικού πάνελ προϋποθέτει το διατμητικό φορτίο σχεδιασμού V_{Ed} να παραμένει μικρότερο από το φορτίο $V_{b,Rd}$, το οποίο εκφράζει την αντοχή του μέλους σε διατμητικό λυγισμό και ορίζεται ως:

$$V_{b,Rd} = \chi \frac{A t_{Rk}}{Y_M} \quad (7.18)$$

Η χαρακτηριστική αντοχή σε διάτμηση t_{Rk} θεωρείται ίση με την χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή σ_{Rk} , ενώ ο συντελεστής ασφαλείας γ_M λαμβάνεται ίσος με 1.4. Η παράμετρος A αντιπροσωπεύει το εμβαδό της διατομής ($A=bt$). Ο μειωτικός συντελεστής χ υπολογίζεται κατά τον ΕΚ3 σύμφωνα με τη σχέση:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \chi \leq 1 \quad (7.19)$$

όπου,

$$\Phi = 0.5 \left[1 + a(\bar{\lambda} - a_0) + \bar{\lambda}^2 \right], \quad (7.20)$$

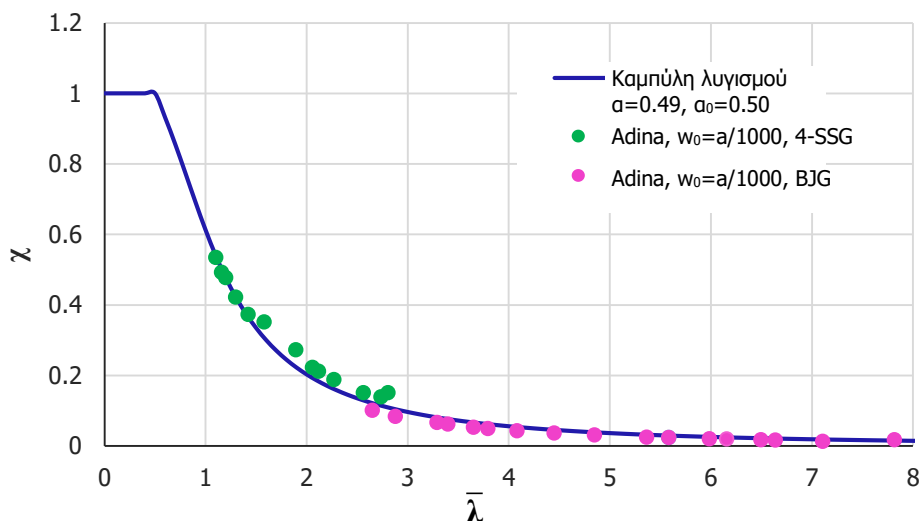
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A\tau_{Rk}}{V_{cr}}} \quad (7.21)$$

Από πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι οι συντελεστές ατελειών $a=0.49$ και $a_0=0.50$ είναι κατάλληλοι για να αποδώσουν την επιρροή μιας ατέλειας ανάλογης της πρώτης ιδιομορφής με μέγεθος ίσο προς το 1/1000 του ύψους του υαλοπίνακα.

Προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότητα της προτεινόμενης καμπύλης για τον σχεδιασμό του πολυστρωματικού γυαλιού, διεξάγεται στη συνέχεια πλήθος γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων για διάφορες γεωμετρίες του υαλοπίνακα και ιδιότητες του πολυμερούς και προσδιορίζεται για κάθε περίπτωση ένα ζεύγος ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ και μειωτικού συντελεστή χ . Η λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ προκύπτει από την εξίσωση (7.21), στην οποία υπεισέρχεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ενώ ο συντελεστής χ καθορίζεται με βάση το οριακό φορτίο V_{ult} των μη γραμμικών αναλύσεων, όπως υποδεικνύει η σχέση:

$$\chi = \frac{V_{ult}}{A\sigma_{Rk}} \quad (7.22)$$

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές και πειράματα, η οριακή αντοχή συνδέεται με την ανάπτυξη μέγιστης εφελκυστικής τάσης ίσης με $\sigma_{Rk}/1.4$ ή με την εμφάνιση μέγιστης βύθισης w_{max} ίσης με $a/300$. Επομένως ως V_{ult} λαμβάνεται η διατμητική δύναμη τη στιγμή που σημειώνεται πρώτη κάποια από τις δύο αυτές τιμές.



Εικόνα 7.19. Καμπύλη λυγισμού για τον σχεδιασμό του υαλοπίνακα σε διατμητικό λυγισμό
Σύγκριση με αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Στην Εικόνα 7.19 αποδεικνύεται πως πράγματι η εξίσωση (7.19) προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τα ζεύγη $(\bar{\lambda}, \chi)$ που προκύπτουν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, είναι επομένως εφικτός ο σχεδιασμός καμπυλών λυγισμού για πλάκες από γυαλί, οι οποίες θα βασίζονται στην εφελκυστική αντοχή του υλικού. Όπως ήταν αναμενόμενο, η στήριξη του υαλοπίνακα μέσω συγκολλητικού υλικού στο πάνω και κάτω μέρος του συνδέεται με μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης λυγηρότητας σε σύγκριση με αυτές που σημειώνονται στο τετραέρειστο σύστημα. Η παραμορφωσιμότητα της κόλλας οδηγεί σε μεγάλη βύθιση του γυαλιού και σε μικρή αντοχή έναντι διατμητικού λυγισμού (μικρές τιμές του συντελεστή χ). Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως κριτήριο για τον καθορισμό του V_{ult} στο σύστημα της μετωπικής σύνδεσης αποτέλεσε στην πλειονότητα των περιπτώσεων ο περιορισμός των παραμορφώσεων ($u_{max} > a/300$).

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση του γυαλιού ως δομικού υλικού έχει πλέον καθιερωθεί ως μία δημοφιλής επιλογή που ανταποκρίνεται στις σύγχρονες απαιτήσεις αισθητικής και λειτουργίας των κτιρίων. Η τεχνική της θερμικής κατεργασίας επιτυγχάνει βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του πριν τη θραύση μέσω της αύξησης της εφελκυστικής του αντοχής. Παράλληλα η διάταξή του σε πολλές στρώσεις με την παρεμβολή μεμβράνης κάποιου θερμοπλαστικού πολυμερούς εγγυάται την ασφάλεια και τη διατήρηση μέρους της φέρουσας ικανότητας μετά την υπέρβαση των ορίων αντοχής του. Η μεμβράνη του πολυμερούς επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του φορέα, ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο εξασφαλίζει τη διατμητική συνεργασία των μεμονωμένων φύλλων γυαλιού. Τον ρόλο αυτής της ενδιάμεσης στρώσης αναλαμβάνει συνήθως η πολυβινυλική βουτυράλη (PVB), αν και τον τελευταίο καιρό απαντάται συχνά και η χρήση του ιονισμένου πολυμερούς (SGP), το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για εφαρμογές υάλωσης ανθεκτικές σε τυφώνα. Και τα δύο υλικά χαρακτηρίζονται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά, δηλαδή μεταβολή των ιδιοτήτων τους με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Στην περίπτωση που οι συνθήκες στις οποίες απευθύνεται ο σχεδιασμός είναι εκ των προτέρων γνωστές, καθίσταται δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική ανάλυση μοντέλο γραμμικού ελαστικού υλικού με δεδομένο το αντίστοιχο μέτρο διάτμησης, όπως αυτό δίνεται από τον κατασκευαστή για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και διάρκειας φόρτισης. Με βάση μια απλή εφαρμογή αμφιέριστης πολυστρωματικής δοκού στο Κεφάλαιο 3 αποδεικνύεται πως το ιονισμένο πολυμερές παρουσιάζει πολύ μικρότερη ευαισθησία στα ιξωδοελαστικά φαινόμενα σε σχέση με τη βουτυράλη. Στη συνέχεια του ίδιου Κεφαλαίου γίνεται αναφορά στην προσέγγιση του ισοδύναμου πάχους και περιγράφονται τρεις εναλλακτικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του. Κατά την εφαρμογή μιας εκ των τριών μεθόδων παρατηρείται εξαιρετική συμφωνία των αποτελεσμάτων που προέρχονται από τη θεώρηση της σύνθετης και της ισοδύναμης μονολιθικής διατομής.

Οι πολυστρωματικοί υαλοπίνακες αξιοποιούνται συχνά ως φέροντα στοιχεία σε συστήματα προσόψεων, καθώς επιτρέπουν τη μεγιστοποίηση της διαφάνειας και τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων διατηρώντας το βάρος της κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα. Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στα υαλοπετάσματα δομικής σιλικόνης και στη μετωπική σύνδεση υαλοπινάκων. Το πρώτο σύστημα, της δομικής σιλικόνης, παρέχει συνεχή περιμετρική στήριξη στο γυαλί μέσω οριζόντιων και κατακόρυφων προφίλ αλουμινίου (τραβέρσες και ορθοστάτες αντίστοιχα). Η στερέωση των πάνελ στα μεταλλικά μέλη επιτυγχάνεται μέσω σιλικονούχας κόλλας υψηλής αντοχής, η οποία επιτρέπει την ομαλή μεταφορά των φορτίων στο επίπεδο του γυαλιού (περίπου ομοιόμορφη κατανομή τάσεων χωρίς υψηλές συγκεντρώσεις), ενώ εξασφαλίζει τις απαραίτητες ανοχές για τις συστολοδιαστολές των δύο υλικών, τα οποία έχουν διαφορετικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Το δεύτερο σύστημα, της μετωπικής σύνδεσης, περιλαμβάνει τον εγκιβωτισμό της βάσης και της κεφαλής των υαλοπινάκων σε μεταλλικές διατομές (συνήθως μορφής U), οι οποίες στερεώνονται στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου. Η στήριξη, η οποία χαρακτηρίζεται ως συμβατική, υλοποιείται με ελαστικά παρεμβύσματα και αρμοπληρωτικά λάστιχα, τα οποία αναλαμβάνουν τη στεγανότητα της κατασκευής και αποτρέπουν την επαφή γυαλιού

και πλαισίου. Με στόχο τον σχεδιασμό μιας πρόσοψης στα πλαίσια των δύο αυτών διατάξεων, το Κεφάλαιο 5 προσδιορίζει τους συνδυασμούς δράσεων για τους ελέγχους σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας και προχωρά στην προδιαστασιολόγηση των επιμέρους στοιχείων που διαμορφώνουν το κάθε σύστημα. Για τον υαλοπίνακα και των δύο συστημάτων χρησιμοποιείται πολυστρωματική διάταξη θερμικά ενισχυμένου γυαλιού, με τον αριθμό και το πάχος των στρώσεων να καθορίζονται σε κάθε περίπτωση με βάση τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι έλεγχοι μέγιστης τάσης και βύθισης του προτύπου prEN 16612. Για τους ορθοστάτες και τις τραβέρσες κρίνεται ως πλέον κατάλληλο το κράμα αλουμινίου EN AW 6063 T6, ενώ τα αντίστοιχα προφίλ επιλέγονται σύμφωνα με την απαιτούμενη ροπή αδράνειας από τον κατάλογο προϊόντων ETEM του Παραρτήματος Α.

Έλεγχος των διατομών που αναδεικνύει αυτή η διαδικασία της προδιαστασιολόγησης πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 6 μέσα από αριθμητικές αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον υαλοπίνακα του τετραέρειστου συστήματος. Από την έκφραση της μέγιστης τάσης και βύθισης συναρτήσεως του μέτρου διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης προκύπτει πως με τη χρήση του υλικού SGP εξασφαλίζεται η επάρκεια της επιλεγείσας διατομής σε όλες τις πιθανές θερμοκρασίες, ενώ τη χρήση του πολυμερούς PVB ενδέχεται να χρειαστούν φύλλα μεγαλύτερου πάχους, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Η διερεύνηση της κατανομής των τάσεων καθύψος της δυσμενέστερης διατομής του υαλοπίνακα αποκαλύπτει πως για τιμές του μέτρου διάτμησης G_{int} μεγαλύτερες από 10 MPa ενεργοποιείται πλήρως η σύνθετη δράση και η συμπεριφορά του πολυστρωματικού στοιχείου πλησιάζει αυτή του αντίστοιχου μονολιθικού ίσου πάχους. Για μικρές όμως τιμές του G_{int} η συνεισφορά της ενδιάμεσης στρώσης αποδεικνύεται αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί υπέρ της ασφαλείας. Η θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας εμφανίζει διαφορές σε σχέση με τη γραμμική προσέγγιση, αναδεικνύοντας έτσι τη λειτουργία μεμβράνης του πάνελ, η οποία συνιστά έναν πρόσθετο μηχανισμό αντίστασης στο επιβαλλόμενο φορτίο. Οι διαφορές αυτές αφορούν τόσο το μέγεθος των αναπτυσσόμενων μεγεθών, όσο και τον τρόπο κατανομής των τάσεων στην επιφάνεια του υαλοπίνακα, παρατηρούνται ωστόσο για τιμές φορτίου μεγαλύτερες από τις συνήθεις σχεδιασμού. Ο έλεγχος επάρκειας των προφίλ αλουμινίου βασίζεται στις διατάξεις του EN 1999-1-1 και συνίσταται σε έλεγχο σε κάμψη, διάτμηση και πλευρικό λυγισμό για τον ορθοστάτη και σε έλεγχο σε διάτμηση και διαξονική κάμψη για την τραβέρσα. Και στις δύο περιπτώσεις διαπιστώνεται η επάρκεια των διατομών. Για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης μορφώνονται δύο προσομοιώματα. Το πρώτο περιλαμβάνει τις λεπτομέρειες στήριξης στη βάση και κεφαλή του πάνελ, ενώ το δεύτερο επιδιώκει μια απλοποιημένη προσέγγιση της συμπεριφοράς της διάταξης μέσω της χρήσης ελατηρίων και κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από τα δύο μοντέλα για την περίπτωση μονολιθικής διατομής επιβεβαιώνει πως το δεύτερο μπορεί να αποδώσει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση του πρώτου πετυχαίνοντας σημαντική μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων σε χρόνο και μνήμη. Το απλοποιημένο αυτό μοντέλο λοιπόν χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την περίπτωση της σύνθετης διατομής, προκειμένου να διερευνηθεί η ευαισθησία μεγεθών όπως η κύρια τάση σ_y και η βύθιση w του υαλοπίνακα στη μεταβολή των ιδιοτήτων της ενδιάμεσης στρώσης. Προκύπτει και εδώ πως η απόκριση του πολυστρωματικού φορέα κυμαίνεται μεταξύ δύο ορίων, layered και monolithic, όπως αυτά αναφέρονται στο κείμενο, ανάλογα με την τιμή του μέτρου διάτμησης G_{int} . Η επανάληψη των αναλύσεων με τη θεώρηση αυτή τη φορά της ισοδύναμης μονολιθικής διατομής αποκαλύπτει σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε όλο το εύρος των πιθανών τιμών του G_{int} . Επομένως η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό, αφού προβλέπει με ακρίβεια τη μέγιστη τάση και βύθιση του φορέα.

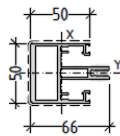
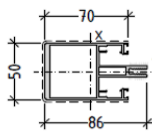
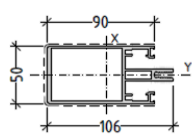
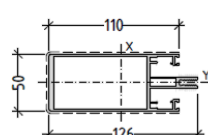
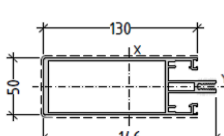
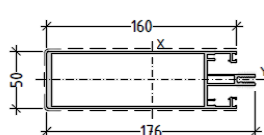
Το Κεφάλαιο 7 προσεγγίζει τους πολυστρωματικούς υαλοπίνακες ως φέροντα τοιχώματα, τα οποία αντικαθιστούν τους συμβατικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, και μελετά τη συμπεριφορά σε διατμητικό λυγισμό των φορέων των δύο συστημάτων πρόσοψης με τις διατομές που ορίστηκαν για την περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης. Οι υπάρχουσες μέθοδοι σχεδιασμού που προέρχονται από τη θεωρία σύνθετων πλακών με πυρήνα απευθύνονται σε ένα αρκετά περιορισμένο φάσμα εφαρμογών με συγκεκριμένες

συνθήκες γεωμετρίας, φόρτισης και στήριξης, ενώ το υπόβαθρό τους δεν είναι προσαρμοσμένο σε ιδιαιτερότητες του πολυστρωματικού γυαλιού όπως η ψαθυρή θραύση και η εξάρτηση της μηχανικής απόκρισης από τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Πράγματι κατά την εφαρμογή της αναλυτικής λύσης για τον προσδιορισμό των κρίσιμων φορτίων λυγισμού του τετραέρειστου πάνελ, διαπιστώνεται πως η μέθοδος υποτιμά σε μεγάλο βαθμό την αντοχή, όταν η συμπεριφορά της διάταξης απομακρύνεται από το μονολιθικό όριο. Ο σχεδιασμός επομένως του πολυστρωματικού γυαλιού σε λυγισμό δεν μπορεί προς το παρόν να βασιστεί σε αναλυτικά μοντέλα και κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή αριθμητικών αναλύσεων. Οι δρόμοι ισορροπίας που προκύπτουν από μη γραμμικές αναλύσεις υπερβαίνουν και για τα δύο συστήματα το κρίσιμο φορτίο, αναδεικνύοντας τη μεταλυγισμική αντοχή που εξασφαλίζει η λειτουργία μεμβράνης των υαλοπινάκων. Σημαντική αύξηση της αντοχής αυτής επιτυγχάνεται με μικρή αύξηση του συνολικού πάχους της διατομής. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται περισσότερο έντονο στο σύστημα της δομικής σιλικόνης, όπου αύξηση του πάχους κάθε φύλλου γυαλιού κατά 2 mm συνοδεύεται από σχεδόν διπλασιασμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Εξετάζεται, τέλος, η καταλληλότητα μιας προτεινόμενης καμπύλης λυγισμού για τον σχεδιασμό του πολυστρωματικού γυαλιού που υπόκειται σε εντός επιπέδου διατμητικά φορτία και κατά τη σύγκριση κανονιστικής και αριθμητικής προσέγγισης παρατηρείται μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων. Η ιδιαιτερότητα που εντοπίζεται στη μεθοδολογία υπολογισμού της οριακής αντοχής για την περίπτωση του γυαλιού είναι πως στον προσδιορισμό της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ και του μειωτικού συντελεστή χ υπεισέρχεται η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό, σε αντίθεση με τον χάλυβα όπου τα αντίστοιχα μεγέθη καθορίζονται με βάση την αντοχή διαρροής f_y . Αν και η άμεση σύγκριση των δύο συστημάτων δεν είναι εφικτή λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας των διατομών τους, τα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα επιβεβαιώνουν πως στο σύστημα SSG σημειώνονται μικρότερες παραμορφώσεις και μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με το σύστημα BJG.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

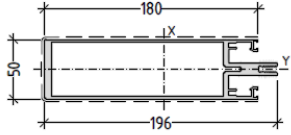
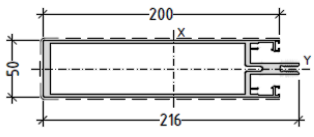
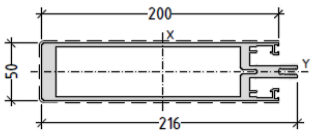
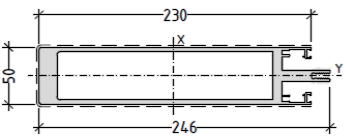
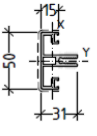
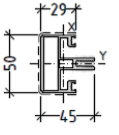
**ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ Ε85-ΕΤΕΜ
ΠΡΟΦΙΛ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΓΙΑ ΥΑΛΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ**

curtain wall system **E85**

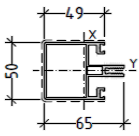
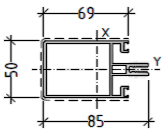
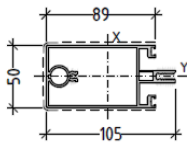
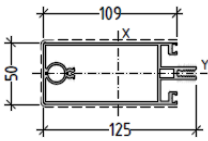
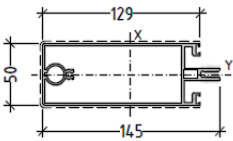
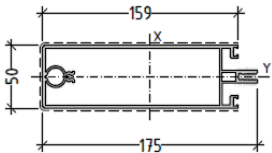
code description	profile	length weight ext.perimeter vis.perimeter	static values			
E85100 mullion		6,6 m 2006 g/m 448 mm 149 mm	lx= 27,70 Wx= 6,96 ex= 2,50 ix= 1,93	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 19,39 Wy= 7,75 ey= 3,98 iy= 1,62	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85101 mullion		6,6 m 2211 g/m 488 mm 189 mm	lx= 58,04 Wx= 12,19 ex= 2,50 ix= 2,66	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 23,79 Wy= 9,51 ey= 4,76 iy= 1,70	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85102 mullion		6,6 m 2417 g/m 528 mm 229 mm	lx= 104,15 Wx= 18,65 ex= 2,50 ix= 3,41	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 28,19 Wy= 11,27 ey= 5,58 iy= 1,78	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85103 mullion		6,6 m 2665 g/m 568 mm 269 mm	lx= 169,00 Wx= 26,15 ex= 2,50 ix= 4,14	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 33,43 Wy= 13,37 ey= 6,46 iy= 1,84	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85104 mullion		6,6 m 2881 g/m 608 mm 309 mm	lx= 252,55 Wx= 34,40 ex= 2,50 ix= 4,87	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 38,03 Wy= 15,21 ey= 7,34 iy= 1,89	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85105 mullion		6,6 m 3205 g/m 668 mm 369 mm	lx= 417,97 Wx= 46,90 ex= 2,50 ix= 5,93	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 44,95 Wy= 17,98 ey= 8,91 iy= 1,95	cm ⁴ cm ³ cm cm

curtain wall system

E85

code description	profile	length weight ext.perimeter vis.perimeter	static values			
E85106 mullion		6,6 m 4628 g/m 708 mm 409 mm	lx= 752,98 cm ⁴ Wx= 74,89 cm ³ ex= 2,50 cm ix= 6,63 cm	ly= 60,74 cm ⁴ Wy= 24,30 cm ³ ey= 10,06 cm iy= 1,88 cm		
E85107 mullion		6,6 m 5165 g/m 748 mm 449 mm	lx= 1003,76 cm ⁴ Wx= 91,01 cm ³ ex= 2,50 cm ix= 7,24 cm	ly= 71,32 cm ⁴ Wy= 28,53 cm ³ ey= 11,03 cm iy= 1,93 cm		
E85108 mullion		6,6 m 6423 g/m 748 mm 449 mm	lx= 1326,00 cm ⁴ Wx= 116,21 cm ³ ex= 2,50 cm ix= 7,47 cm	ly= 80,93 cm ⁴ Wy= 32,37 cm ³ ey= 11,41 cm iy= 1,85 cm		
E85109 mullion		6,6 m 8416 g/m 808 mm 509 mm	lx= 2161,67 cm ⁴ Wx= 162,85 cm ³ ex= 2,50 cm ix= 8,33 cm	ly= 110,05 cm ⁴ Wy= 44,02 cm ³ ey= 13,27 cm iy= 1,88 cm		
E85300 2nd level transom		6,01 m 1015 g/m 300 mm 79 mm	lx= 2,78 cm ⁴ Wx= 1,33 cm ³ ex= 2,50 cm ix= 0,86 cm	ly= 7,64 cm ⁴ Wy= 3,06 cm ³ ey= 2,10 cm iy= 1,43 cm		
E85301 2nd level transom		6,01 m 1293 g/m 330 mm 107 mm	lx= 7,12 cm ⁴ Wx= 2,76 cm ³ ex= 2,50 cm ix= 1,22 cm	ly= 11,55 cm ⁴ Wy= 4,62 cm ³ ey= 2,61 cm iy= 1,55 cm		

curtain wall system **E85**

code description	profile	length weight ext.perimeter vis.perimeter	static values			
E85302 2nd level transom		6,01 m 1455 g/m 370 mm 147 mm	lx= 19,52 Wx= 6,00 ex= 2,50 ix= 1,90	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 15,08 Wy= 6,03 ey= 3,26 iy= 1,67	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85303 2nd level transom		6,01 m 1785 g/m 410 mm 187 mm	lx= 45,83 Wx= 10,54 ex= 2,50 ix= 2,64	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 21,60 Wy= 8,64 ey= 4,35 iy= 1,81	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85304 2nd level transom		6,01 m 2276 g/m 450 mm 227 mm	lx= 98,87 Wx= 18,06 ex= 2,50 ix= 3,42	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 26,45 Wy= 10,58 ey= 5,47 iy= 1,77	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85305 2nd level transom		6,01 m 2492 g/m 490 mm 267 mm	lx= 160,52 Wx= 25,02 ex= 2,50 ix= 4,17	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 31,06 Wy= 12,42 ey= 6,42 iy= 1,83	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85306 2nd level transom		6,01 m 2708 g/m 530 mm 307 mm	lx= 240,58 Wx= 32,66 ex= 2,50 ix= 4,90	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 35,67 Wy= 14,27 ey= 7,37 iy= 1,89	cm ⁴ cm ³ cm cm
E85307 2nd level transom		6,01 m 3032 g/m 590 mm 367 mm	lx= 398,72 Wx= 45,28 ex= 2,50 ix= 5,96	cm ⁴ cm ³ cm cm	ly= 42,59 Wy= 17,04 ey= 8,81 iy= 1,95	cm ⁴ cm ³ cm cm

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΥΘΙΣΗΣ
ΤΕΤΡΑΕΡΕΙΣΤΟΥ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ ΚΑΤΑ prEN 13474-2**

Έστω a , b οι πλευρές του τετραέρειστου υαλοπίνακα, όπου b η μικρότερη διάσταση. Ο λόγος των πλευρών λαμβάνεται ως b/a . Το πάχος της διατομής συμβολίζεται με h . Για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης και της μέγιστης βύθισης δίνονται οι εξής τύποι:

$$\sigma_{\max} = k_1 \frac{b^2}{h^2} F_d \quad (\text{B.1})$$

$$w_{\max} = k_4 \frac{b^4}{h^3} \frac{F_k}{E} \quad (\text{B.2})$$

Οι τιμές των συντελεστών k_1 και k_4 δίνονται στους Πίνακες B.1 και B.2 αντίστοιχα, ως συνάρτηση του λόγου λ και του κανονικοποιημένου φορτίου p^* .

$$p^* = \frac{b^4}{h^4} \frac{F}{E} \quad (\text{B.3})$$

$\lambda=b/a$	p^*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1	0.272	0.271	0.268	0.258	0.245	0.227	0.207	0.188	0.178	0.165
0.9	0.323	0.320	0.314	0.293	0.269	0.243	0.222	0.203	0.193	0.180
0.8	0.383	0.378	0.365	0.329	0.294	0.262	0.240	0.221	0.210	0.198
0.7	0.451	0.442	0.421	0.368	0.322	0.282	0.261	0.241	0.230	0.217
0.6	0.526	0.514	0.485	0.417	0.362	0.305	0.284	0.263	0.252	0.239
0.5	0.603	0.590	0.560	0.485	0.424	0.342	0.309	0.289	0.277	0.264
0.4	0.673	0.665	0.643	0.580	0.519	0.429	0.337	0.317	0.306	0.292
0.3	0.725	0.722	0.714	0.687	0.650	0.575	0.444	0.349	0.337	0.323
0.2	0.748	0.747	0.746	0.744	0.739	0.724	0.671	0.561	0.481	0.384
0.1	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.748	0.746	0.739
0	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750

Πίνακας B.1. Συντελεστής k_1 για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης

$\lambda=b/a$	p^*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1	0.046	0.046	0.045	0.041	0.038	0.032	0.024	0.017	0.014	0.011
0.9	0.056	0.056	0.054	0.049	0.044	0.036	0.027	0.019	0.015	0.012
0.8	0.068	0.067	0.065	0.057	0.051	0.041	0.030	0.021	0.018	0.014
0.7	0.083	0.081	0.077	0.068	0.059	0.048	0.035	0.025	0.020	0.016
0.6	0.099	0.097	0.092	0.081	0.071	0.057	0.041	0.029	0.024	0.019
0.5	0.115	0.113	0.109	0.097	0.086	0.070	0.051	0.036	0.030	0.023
0.4	0.131	0.129	0.126	0.116	0.105	0.088	0.065	0.046	0.038	0.030
0.3	0.147	0.142	0.140	0.135	0.128	0.114	0.088	0.064	0.053	0.041
0.2	0.147	0.147	0.147	0.146	0.145	0.140	0.126	0.101	0.085	0.067
0.1	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.147	0.146	0.143	0.136
0	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148

Πίνακας B.2. Συντελεστής k_4 για τον υπολογισμό της μέγιστης βύθισης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Feldmann, R. Kasper. "Guidance for European Structural Design of Glass Components", Joint Research Center of the European Commission, 2014.
- [2] Matthias Haldimann, Andreas Luble, Mauro Overend. "Structural Use of Glass", ETH Zurich, 2008.
- [3] Draft prEN 16612: Glass in building – Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing, European Committee for Standardization, 2013.
- [4] Draft prEN 13474-2: Glass in building – *Part 2*: Design for uniformly distributed loads, European Committee for Standardization, 2000.
- [5] Draft prEN 13474-2: Glass in building – Determination of the strength of glass panes – Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing, European Committee for Standardization, 2009.
- [6] Tomas Serafinavicius, Jean-Paul Lebet, Christian Louter, Tomas Lenkimas, Artiomas Kuranovas. "Long-Term Laminated Glass Four Point bending Test with PVB, EVA and SG Interlayers at Different Temperatures", Procedia Engineering, Vol. 57, 2013, pp. 996-1004.
- [7] Didier Delince, Dieter Callewaert, Jan Belis, Rudy Van Impe. "Post-breakage behaviour of laminated glass in structural applications", Laboratory for Research on Structural Models, Ghent University, Belgium.
- [8] Ivelin V. Ivanov. "Analysis, modelling, and optimization of laminated glasses as plane beam", International Journal of Solids and Structures, 43 (2006), pp. 6887–6907.
- [9] Alena Zemanova, Jan Zemana, Michal Sejnoha. "Simple Numerical Model of Laminated Glass Beams", Department of Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague.
- [10] Mehmet Zulfu Asik. "Laminated glass plates: revealing of nonlinear behavior", Computers and Structures, 81 (2003), pp 2659-2671.
- [11] Laura Galuppi, Gianni Royer-Carfagni. "Enhanced Effective Thickness of multi-layered laminated glass", Composites Part B: Engineering, Vol. 64, August 2014, pp. 202-213.
- [12] Laura Galuppi, Giampiero Manara, Gianni Royer Carfagni. "Practical expressions for the design of laminated glass", Composites Part B: Engineering, Vol. 45, February 2013, pp. 1677-1688.
- [13] Laura Galuppi, Gianni Royer-Carfagni. "The effective thickness of laminated glass: Inconsistency of the formulation in a proposal of EN-standards", Composites Part B: Engineering, Vol. 55, December 2013, pp. 109-118.
- [14] Paolo Foraboschi. "Optimal design of glass plates loaded transversally", Materials and Design, Vol. 62, October 2014, pp. 443-458.
- [15] Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part1-1: General rules – General rules and rules for buildings.
- [16] Dow Corning Corporation. "Structural Silicone Glazing".
- [17] European Organization for Technical Approvals. "ETAG 002 for Structural Sealant Glazing Kits (SSGK) – Part 1: Supported and Unsupported Systems", 2012.

- [18] Claudio Amadio, Chiara Bedon. "An Equivalent Thickness for Buckling Verification of Laminated Glass Panel Under In-Plane Shear Loads", *Journal of Civil Engineering and Science*, Vol. 2 Iss.3, 2013, pp. 108-123.
- [19] Claudio Amadio, Chiara Bedon. "Exploratory Finite-Element investigation and assessment of standardized design buckling criteria for two-side linear adhesively supported glass panels under in-plane loads", *Engineering Structures*, Vol. 120, 2016, pp. 273-287.
- [20] Danijel Mociobob. "Glass Panel Under Shear Loading – Use of Glass Envelopes in Building Stabilization", EPFL, 2008.
- [21] Committee BD-007, Glazing and Fixing of Glass. "Australian Standard: Glass in buildings – Selection and installation", 2006.
- [22] ADINA System 8.3, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2005.
- [23] ETEM. Technical Catalogue: Curtain Wall System E85.