



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση της συμπεριφοράς γυάλινων προσόψεων ενεργειακών
κτιρίων σε κατάσταση πυρκαγιάς**

ΧΡΥΣΗ ΠΕΤΙΚΑΚΗ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

© 2025 Χρυσή Πετικάκη

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δάφνη Παντούσα
(Επιβλέπων) Εντεταλμένη Διδάσκουσα, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Ευριπίδης Μυστακίδης
 Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Ολυμπία Παναγούλη
 Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, Εντεταλμένη Διδάσκουσα κα. Δάφνη Παντούσα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, την ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου δόθηκε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία, αλλά και για τις μεθόδους προσομοίωσης και τις γνώσεις που μου μετέφερε. Είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητές κ. Ευριπίδη Μυστακίδη και κα. Ολυμπία Παναγούλη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Παντελεήμων και Μαρία Πετικάκη για την κατανόηση και την υποστήριξη τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου.

Χρυσή Πετικάκη

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς Γυάλινων Προσόψεων Ενεργειακών Κτιρίων σε Κατάσταση Πυρκαγιάς

Χρυσή Πετικάκη

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέποντες: Παντούσα Δάφνη, Εντεταλμένη Διδάσκουσα - Ευριπίδης Μυστακίδης, Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη της συμπεριφοράς πλαισιωμένων πολυστρωματικών υαλοπινάκων, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ενεργειακά αποδοτικές προσόψεις κτιρίων, κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Η μελέτη διεξάγεται αριθμητικά. Αρχικά αναπτύσσεται ένα αριθμητικό προσομοίωμα και η ορθότητα της προσομοίωσης ελέγχεται μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα. Μέσω αυτής της προκαταρκτικής μελέτης γίνονται κατανοητά τα μηχανικά και θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια έκθεσης ενός πολυστρωματικού υαλοπίνακα σε μια πυρκαγιά. Στη συνέχεια πραγματοποιείται διερεύνηση του μηχανισμού θραύσης των υαλοπινάκων μέσω απλοποιημένων μηχανικών μοντέλων και αναπτύσσεται ένα προχωρημένο αριθμητικό προσομοίωμα ικανό να προβλέψει την σύνθετη θερμομηχανική συμπεριφορά ενός πολυστρωματικού υαλοπίνακα σε κατάσταση πυρκαγιάς ISO. Τέλος, πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη για την διερεύνηση της επιρροής των λεπτομερειών διαμόρφωσης των πολυστρωματικών υαλοπινάκων (γεωμετρία στρώσεων, γεωμετρία πλαισίου και τύπος γυαλιού). Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα πως η αύξηση του πάχους του υαλοπίνακα και η χρήση γυαλιού χαμηλής εκπομπής βελτιώνουν σημαντικά την πυραντοχή των υαλοπινάκων.

Λέξεις Κλειδιά: γυάλινες προσόψεις, ενεργειακά κτίρια, πυρκαγιά, αριθμητική προσομοίωση, θραύση υαλοπινάκων, γυαλί χαμηλής εκπομπής, απλοποιημένα μηχανικά μοντέλα.

Investigation of the Behavior of Glass Façades in Energy Efficient Buildings under Fire Conditions

Chrysi Petikaki

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisors: Dafni Pantousa, Adjunct Lecturer - Euripidis Mistakidis, Professor

Abstract

This study focuses on the investigation of the behavior of framed laminated glass panes, which are widely used in building energy façades, during fire. The study is conducted numerically. Initially, a numerical model is developed, and the accuracy of the simulation is validated through comparison with experimental data. Through this preliminary study, the mechanical and thermal phenomena occurring during the exposure of a laminated glass pane to fire are understood. Subsequently, the fracture mechanism of the glass panes is examined using simplified mechanical models, and an advanced numerical model is developed, capable of predicting the complex thermo-mechanical behavior of a laminated glass pane under ISO fire conditions. Finally, a parametric study is conducted to investigate the influence of the design details of the laminated glass panes (layer geometry, frame geometry, and type of glass). The results led to the conclusion that increasing the thickness of the glass pane and using low-emissivity glass can significantly improve the fire resistance of the glass panes.

Keywords: *glass façades, energy-efficient buildings, fire, numerical simulation, glass fracture, low-emissivity glass, simplified mechanical models.*

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή	1
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
Οργάνωση διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 1 Σύγχρονα συστήματα προσόψεων κτιρίων	4
1.1 Τρόπος συναρμολόγησης	4
1.1.1 Σύστημα ράβδων (Stick system)	5
1.1.2 Ενιαίο σύστημα (Unit system)	8
1.1.3 Ενιαίο σύστημα με ράβδους (Unit and mullion system)	9
1.1.4 Σύστημα πάνελ (Panel system)	10
1.1.5 Κάλυμμα υποστυλώματος και σύστημα spandrel (Column cover and spandrel system)	10
1.1.6 Σύστημα στήριξης τεσσάρων σημείων (Four-point supported glazing system)	11
1.2 Υλικά	12
1.2.1 Αδιαφανείς προσόψεις (Opaque curtain walls)	13
1.2.2 Διαφανής προσόψεις (Transparent curtain walls)	19
Κεφάλαιο 2 Θεωρία μεταφοράς θερμότητας	22
2.1 Αγωγή	22
2.2 Συναγωγή	25
2.3 Ακτινοβολία	26
2.4 Συνοριακές συνθήκες	27
2.4.1 Σταθερές συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας	27
2.4.2 Σταθερές συνοριακές συνθήκες ροής	27
2.4.3 Συνοριακές συνθήκες στα όρια στερεού-ρευστού	28
Κεφάλαιο 3 Ιδιότητες υλικών των προσόψεων σε υψηλές θερμοκρασίες	29
3.1 Γυαλί επίπλευσης (float glass)	29
3.1.1 Μηχανικές ιδιότητες	30
3.1.2 Θερμικές ιδιότητες	32
3.2 Επικαλυμμένο γυαλί χαμηλής εκπομπής (low-E glass)	33

3.2.1	Μηχανικές ιδιότητες	33
3.2.2	Θερμικές ιδιότητες	34
3.3	PVB (polyvinyl butyral) - Μεμβράνη πολυβινυλοβουτυράλης	35
3.3.1	Μηχανικές ιδιότητες	35
3.3.2	Θερμικές ιδιότητες	36
3.4	Ανοξείδωτος χάλυβας	37
3.4.1	Θερμικές ιδιότητες	37
Κεφάλαιο 4	Περιγραφή του προβλήματος	39
4.1	Φυσικό πρόβλημα	39
4.2	Σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση	41
4.3	Τύποι υαλοπινάκων προς μελέτη	43
Κεφάλαιο 5	Αριθμητική προσομοίωση – Διακρίβωση αριθμητικού μοντέλου	45
5.1	Περιγραφή του πειράματος	45
5.1.1	Πειραματική διάταξη	46
5.1.2	Πειραματικά αποτελέσματα	48
5.2	Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου	50
5.2.1	Διακριτοποίηση	51
5.2.2	Τύπος πεπερασμένων στοιχείων και ιδιότητες των υλικών	51
5.2.3	Συνθήκες επαφής	52
5.2.4	Θερμικές συνοριακές και αρχικές συνθήκες	53
5.2.5	Μηχανικές συνοριακές συνθήκες	55
5.2.6	Κριτήριο θραύσης	55
5.3	Αριθμητική ανάλυση	56
5.4	Σύγκριση αριθμητικών - πειραματικών αποτελεσμάτων	57
5.4.1	Επαλήθευση ορθότητας αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης	57
5.4.2	Επαλήθευση ορθότητας του μηχανισμού θραύσης	58
Κεφάλαιο 6	Παραμετρική διερεύνηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς ISO	61
6.1	Περιγραφή του νέου αριθμητικού μοντέλου	61

6.1.1	Διακριτοποίηση και τύπος πεπερασμένων στοιχείων	62
6.1.2	Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες των υλικών	63
6.1.3	Συνθήκες επαφής	63
6.1.4	Θερμικές συνοριακές συνθήκες	64
6.1.5	Μηχανικές συνοριακές συνθήκες	65
6.1.6	Κριτήριο θραύσης	66
6.2	Αριθμητική ανάλυση	66
6.3	Διερεύνηση μηχανισμού θραύσης	66
6.3.1	Λεπτός υαλοπίνακας με ανομοιόμορφη θεοκρασία εντός επιπέδου	69
6.3.2	Παχύς υαλοπίνακας υπό θερμοκρασιακή κλίση κατά το πάχος	74
6.3.3	Πλαισιωμένος υαλοπίνακας σε συνθήκες πυρκαγιάς, μέσω της καμπύλης ISO	75
6.4	Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης	81
6.4.1	Διερεύνηση επιρροής πάχους γυαλιού (μονοί υαλοπίνακες)	82
6.4.2	Διερεύνηση επιρροής πάχους γυαλιού (διστρωματικοί υαλοπίνακες)	86
6.4.3	Διερεύνηση επιρροής αριθμού στρώσεων (πολυστρωματικοί υαλοπίνακες)	90
6.4.4	Διερεύνηση επιρροής πάχους PVB (διστρωματικοί υαλοπίνακες)	92
6.4.5	Διερεύνηση επιρροής πλάτους πλαισίου (πολυστρωματικοί υαλοπίνακες)	96
6.4.6	Διερεύνηση επιρροής τύπου γυαλιού (μονοί και διστρωματικοί υαλοπίνακες)	97
Κεφάλαιο 7	Συμπεράσματα	100
Βιβλιογραφία		102

Εισαγωγή

Στην σύγχρονη αρχιτεκτονική, οι γυάλινες προσόψεις χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο λόγω της αισθητικής και της συμβολή τους στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Από τους εμπορικούς ουρανοξύστες έως και σε σύγχρονα πολυώροφα κτίρια, τα διαφανή κελύφη κτιρίων έχουν γίνει καθοριστικό στοιχείο του σύγχρονου σχεδιασμού. Ωστόσο, στον τομέα της πυρασφάλειας αντιμετωπίζουν σοβαρές προκλήσεις και αποτελούν τον «αδύναμο κρίκο» του κτιρίου. Το γυαλί παρουσιάζει περιορισμένη εφελκυστική αντοχή, και πολύ γρήγορα ρηγματώνεται.

Ο σχεδιασμός πυρκαγιάς κτιρίων με γυάλινες προσόψεις είναι απαιτητικός εφόσον πρέπει να συμβιβαστούν οι αρχιτεκτονικές απαιτήσεις με την ασφάλεια. Η συμπεριφορά των γυάλινων προσόψεων σε πυρκαγιά διέπεται από μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση θερμικών και μηχανικών μηχανισμών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, παράμετροι όπως ο τύπος γυαλιού, ο τύπος του υαλοπίνακα (πολυστρωματικοί, υαλοπίνακες με κενό αέρος κ.τ.λ.), το πάχος των γυάλινων πάνελ, οι συνθήκες στήριξης και η διαμόρφωση του πλαισίου επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή του σε πυρκαγιά. Επιπλέον, η θραύση των υαλοπινάκων αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο που επηρεάζει την εξάπλωση της πυρκαγιάς, τη διάδοση του καπνού και την προστασία των ανθρώπινων ζών. Για τους παραπάνω λόγους, τα τελευταία χρόνια διενεργούνται πολλές πειραματικές, αλλά και αριθμητικές μελέτες που εστιάζουν στη διερεύνηση της θραύσης των γυάλινων προσόψεων.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη πολυστρωματικών υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς. Ο βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη προχωρημένων αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των πολυστρωματικών υαλοπινάκων κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Για τον σκοπό αυτό γίνεται επαλήθευση της ορθότητας των αποτελεσμάτων,

της αριθμητικής προσομοίωσης μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα. Επόμενος στόχος είναι η διερεύνηση του μηχανισμού θραύσης και για τον λόγο αυτό αναπτύσσονται απλοποιημένα μηχανικά μοντέλα. Στην συνέχεια δίνεται έμφαση στην κατανόηση του ρόλου των πλαισίων που χρησιμοποιούνται για την στήριξη των υαλοπινάκων και της επίδρασης των λεπτομερειών διαμόρφωσης των πολυστρωματικών υαλοπινάκων. Μέσω παραμετρικής ανάλυσης και προχωρημένων μοντέλων προσομοίωσης, η μελέτη αυτή συμβάλλει στην κατανόηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς των υαλοπινάκων και συνεισφέρει συνεπώς στον τομέα της πυρασφάλειας.

Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε έξι ενότητες, που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 1 - 7, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Το Κεφάλαιο 1 αναφέρεται στα συστήματα προσόψεων (curtain wall systems), τα οποία εμφανίζονται σε σύγχρονες πολυώροφες κατασκευές και στους τύπους που χρησιμοποιούνται συνήθως, σε σχέση με τα υλικά και τον τρόπο συναρμολόγησης τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποδίδεται στις γυάλινες προσόψεις, καθώς προσφέρουν υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και αισθητική.

Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται οι βασικές αρχές της θεωρίας μεταφοράς θερμότητας. Αρχικά συζητούνται οι βασικοί μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας - αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία και στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις για την εφαρμογή της θεωρίας στην αριθμητική προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας.

Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στη μελέτη των υλικών, των πολυστρωματικών υαλοπινάκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Με σκοπό την προσομοίωση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς των γυάλινων προσόψεων σε συνθήκες πυρκαγιάς, παρουσιάζονται οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του συστήματος.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει την αδυναμία των γυάλινων προσόψεων κατά την έκθεση τους σε μία πυρκαγιά σε ένα διαμέρισμα. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά του θερμομηχανικού προβλήματος, μέσω της μελέτης προηγούμενων ερευνητικών εργασιών. Τέλος, παρατείνονται πληροφορίες σχετικά με το πεδίο της έρευνας στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το αριθμητικό μοντέλο, το οποίο αναπτύσσεται για την προσομοίωση ενός πειράματος, που αφορά την συμπεριφορά των πολυστρωματικών υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς. Η επαλήθευση της ορθότητάς του μοντέλου βασίζεται στα πειραματικά δεδομένα.

Η διερεύνηση ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 6. Μετά την επαλήθευση της ορθότητας της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα νέο αριθμητικό μοντέλο, για τη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των πλαισιωμένων υαλοπινάκων, όταν εκτίθενται σε φωτιά. Επιπλέον, πραγματοποιείται μια παραμετρική μελέτη, σχετικά με τους παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν το μηχανισμό θραύσης.

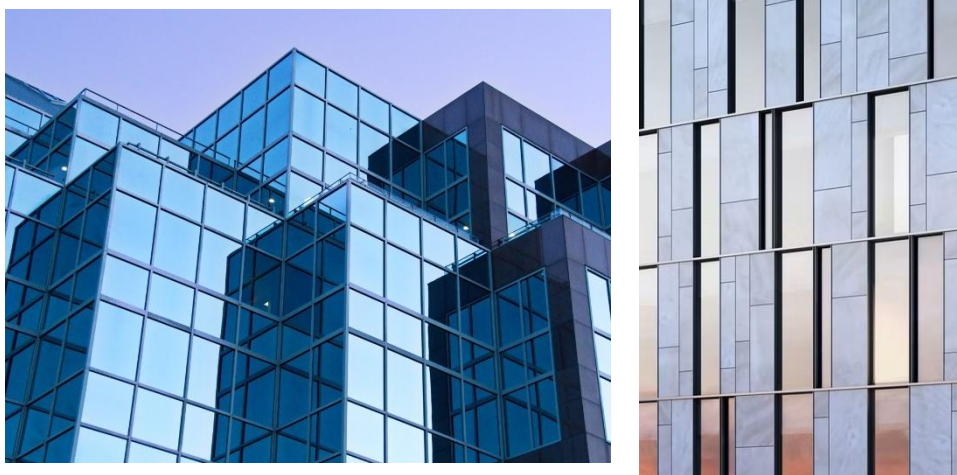
Τέλος, το Κεφάλαιο 7 διεξάγει τα συμπεράσματα της μελέτης της διπλωματικής εργασίας. Ο μηχανισμός θραύσης των υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς και οι παράγοντες που τον επηρεάζουν συνοψίζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 1 Σύγχρονα συστήματα προσόψεων κτιρίων

Ο κύριος σκοπός της πρόσοψης είναι να διαχωρίσει το εσωτερικό περιβάλλον από το εξωτερικό, με τέτοιο τρόπο ώστε οι συνθήκες του εσωτερικού χώρου να μπορούν να διατηρούνται σε επίπεδο κατάλληλο για την προβλεπόμενη χρήση των κτιρίων. Επομένως μπορεί να οριστεί ως το στοιχείο του κτιρίου που είναι μη δομικό και πρέπει να προστατεύει την κατασκευή από την εισβολή του νερού, του ανέμου, της θερμότητας και όλων των δυνάμεων της φύσης. Εκτός αυτού, πρέπει επίσης να πληροί τις αισθητικές και οικονομικές εκτιμήσεις, αλλά και τα ζητήματα ασφάλειας. Συνεπώς ο σχεδιασμός προσόψεων είναι μια περίπλοκη διαδικασία, ιδιαίτερα μετά την ανάπτυξη νέων μεθόδων κατασκευής και τις απαιτήσεις για υψηλά ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα σύγχρονα συστήματα προσόψεων των κτιρίων και στους τύπους που προκύπτουν με την κατηγοριοποίηση τους, ανάλογα τον τρόπο συναρμολόγησης και τα υλικά.

1.1 Τρόπος συναρμολόγησης

Ένα σύστημα πρόσοψης (curtain wall system) είναι μια εξωτερική επένδυση, η οποία κρέμεται στη δομή του κτιρίου, συνήθως μεταξύ των ορόφων, και φέρει μόνο το βάρος της και τα φορτία ανέμου. Μπορεί να προσφέρει μια ποικιλία εξωτερικών εμφανίσεων και χαρακτηρίζεται από ελαφριά πάνελ που στηρίζονται σε μεταλλικούς μηχανισμούς (Σχήμα 1.1). Οι προσόψεις μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τρόπο συναρμολόγησης τους κατά την διάρκεια της κατασκευής τους. Σύμφωνα με αυτήν την κατηγοριοποίηση εμφανίζονται έξι τύποι προσόψεων.

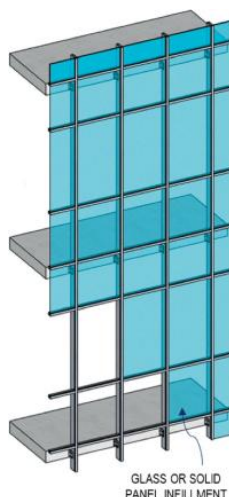


Σχήμα 1.1: Σύγχρονα συστήματα προσόψεων.

1.1.1 Σύστημα ράβδων (Stick system)

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος συναρμολόγησης για την κατασκευή προσόψεων είναι το σύστημα ράβδων ή σύστημα πλαισίου (frame system). Βασίζεται σε ένα καθορισμένο σύστημα πλέγματος, αλουμινίου ή ανοξείδωτου χάλυβα, που αποτελείται από κάθετα (mullions) και οριζόντια (transoms) μέλη πλαισίου. Για να διασφαλιστεί η λειτουργία της πρόσοψης, απαιτείται η προσεκτική συναρμολόγηση του συστήματος με τη δομή του κτιρίου, με ένα σετ εξαρτημάτων που αποτελείται από αγκυρώσεις, μεταλλικά φύλλα, συνδέσμους αλουμινίου, ελαστικά στερέωσης, γωνιακά ελαστικά, πλάκες πίεσης, καπάκια, παρεμβύσματα και στεγανωτικά.

Το πλαίσιο εγκαθίσταται με τοποθέτηση των κάθετων ράβδων, συνδεδεμένες στις άκρες των ορόφων με μία μεταλλική αγκύρωση. Η άρθρωση αυτή λειτουργεί ως σύνδεσμος διαστολής για να αντισταθμίσει τις τάσεις που προκαλούνται από τις φορτίσεις μεταξύ του κτιρίου και της πρόσοψης, επιτρέποντας τους να κινούνται ανεξάρτητα. Στη συνέχεια, οι οριζόντιες ράβδοι προσαρτώνται στις κάθετες, έτσι ώστε να δημιουργήσουν ανοίγματα μεταλλικών πλαισίων. Τα ορθογώνια διαστήματα πληρούνται με διαφανή ή αδιαφανή πάνελ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Μεταλλικά συστήματα ράβδων.

Στο τελικό στάδιο της εγκατάστασης, οι αρθρώσεις του πλαισίου πρέπει να καλύπτονται με παρεμβύσματα ή στεγανωτικά σιλικόνης, τα οποία σφραγίζουν το χώρο μεταξύ των πάνελ και εμποδίζουν τη διείσδυση νερού και αέρα. Πιο συγκεκριμένα, η συγκράτηση των πάνελ στο άνοιγμα του πλαισίου πραγματοποιείται συνήθως με την περιμετρική τοποθέτηση παρεμβυσμάτων και πλακών πίεσης, οι οποίες είναι καλυμμένες με μεταλλικά καπάκια (Σχήμα 1.3(α)). Στην περίπτωση των υαλοπινάκων, η συγκράτηση μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη χρήση δομικής σιλικόνης, η οποία δημιουργεί έναν συνεχή δομικό δεσμό μεταξύ των γυάλινων πάνελ (Σχήμα 1.3(β)). Επιπλέον, είναι εφικτός ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων, σε κατακόρυφα και οριζόντια μέλη πλαισίου (Σχήμα 1.4(α)). Οι τυχαίες διαμορφώσεις ή τα μοτίβα πλαισίων αποτελούν επίσης επιλογή (Σχήμα 1.4(β)).

Το κύριο υλικό πλήρωσης των συστημάτων πλαισίου είναι οι διαφανείς υαλοπίνακες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε σύγχρονα πολυώροφα κτίρια. Η τοποθέτηση των πάνελ περιλαμβάνει την πλήρωση δύο ανοιγμάτων, των ορατών και μη ορατών (spandrel) περιοχών. Τα ορατά ανοίγματα περιέχουν διαφανή πάνελ, με τη δυνατότητα δύο ή περισσότερων στρώσεων γυαλιού. Τα ανοίγματα spandrel περιέχουν αδιαφανή υλικά πλήρωσης, συμπεριλαμβανομένων υαλοπινάκων με μη διαφανή επίστρωση (spandrel glass), για να καλύψουν τον εξοπλισμό που υπάρχει μεταξύ των οροφών. Μια τυπική περιοχή spandrel περιλαμβάνει μονωτικά στοιχεία, προσκολλημένα σε ένα γαλβανισμένο φύλλο χάλυβα, που τοποθετείται στο εσωτερικό του ανοίγματος. Λόγω της ψαθυρής φύσης του γυαλιού, απαιτείται η επαφή με μαλακά υλικά που ονομάζονται ελαστικά στερέωσης, για την αποφυγή θραυσής.

Τα εξαρτήματα του συστήματος είναι μεμονωμένα, που σημαίνει ότι έχουν σχετικά χαμηλό κόστος υλικού και μεταφοράς, έχουν μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό προσαρμοσμένων και περίπλοκων συστημάτων και τέλος είναι προσβάσιμα για την διατήρηση ή την αντικατάστασή τους. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα προκύπτει από την μέθοδο εγκατάστασής, καθώς απαιτεί χρόνο και εργασία υψηλής ειδίκευσης, γενικά οδηγεί σε προβλήματα ποιότητας και ενδέχεται να καθυστερήσει από τις καιρικές συνθήκες.



(α) Περιμετρική καλυψη των πάνελ



(β) Υγρή στεγανοποίηση

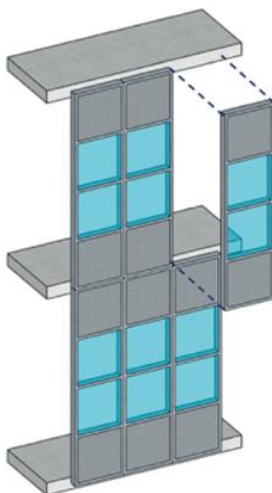
Σχήμα 1.3: Τρόποι συγκράτησης των πάνελ.

(α) Ημι-καλυμμένα πλαίσια



(β) Μοτίβα πλαισίων

Σχήμα 1.4: Εναλλακτικοί τρόποι συγκράτησης.

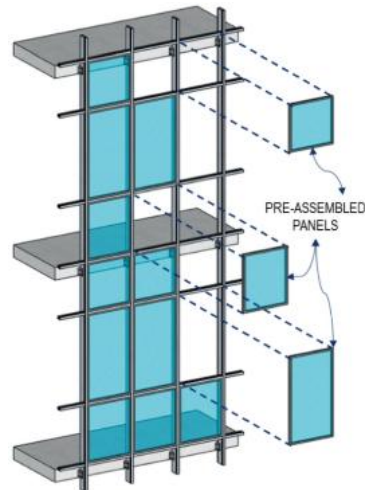


Σχήμα 1.5: Προκατασκευασμένα ενιαία συστήματα.

1.1.2 Ενιαίο σύστημα (Unit system)

Το ενιαίο σύστημα αποτελείται από τα ίδια στοιχεία που κατασκευάζεται και το σύστημα ράβδων, με τη διαφορά ότι, αυτό το σύστημα πρόσοψης εκμεταλλεύεται πλήρως την εργοστασιακή συναρμολόγηση. Αποτελείται δηλαδή από ένα προκατασκευασμένο πλαίσιο, επενδυμένο με διαφανή ή αδιαφανή πάνελ, τα οποία συναρμολογούνται σε ένα εργοστάσιο υπό ελεγχόμενες συνθήκες εργασίας, πριν εγκατασταθούν στο εργοτάξιο ως πλήρεις μονάδες (Σχήμα 1.5). Το γεγονός αυτό προωθεί την ποιοτική συναρμολόγηση και προάγει την γρήγορη ολοκλήρωση της κατασκευής.

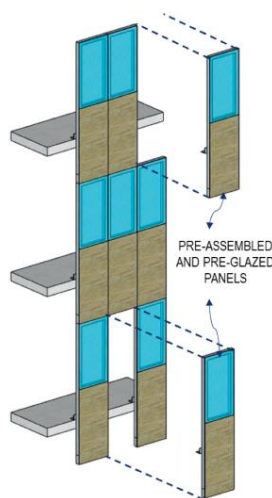
Το ενιαίο σύστημα πρόσοψης τοποθετείται στο κτίριο ως σύστημα πάνελ. Τα πάνελ εγκαθίστανται τμηματικά, ξεκινώντας από το κάτω μέρος του κτιρίου και στη συνέχεια γύρω από κάθε όροφο μέχρι την οροφή. Ενώ το σύστημα αυτό έχει μεγάλη ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες, υπάρχει ένας προβληματισμός που αφορά την απόδοση εγκατάστασης. Οι μεταλλικές ράβδοι κατασκευάζονται αρχικά ως μισά τμήματα, από τα οποία προκύπτουν τρεις αρθρώσεις (αντί για δύο) κατά μήκος μια ράβδου και αυξάνουν τις πιθανές διαρροές αέρα και νερού κατά 50%, σε σχέση με ένα σύστημα ράβδων. Σε περίπτωση διείσδυσης νερού και αέρα στην ενδιάμεση άρθρωση, δεν υπάρχει τρόπος επισκευής, εκτός εάν έχουν δοθεί οδηγίες από τον κατασκευαστή. Σε ένα ενιαίο σύστημα, απαιτείται η παρουσία εξειδικευμένων ανθρώπων, για να διασφαλιστεί η σωστή εγκατάσταση των στεγανωτικών στην ενδιάμεση άρθρωση. Παρόλα αυτά, το ενιαίο σύστημα είναι πλέον τόσο δημοφιλές όσο και το σύστημα ράβδων και αποδίδει ικανοποιητικά, όταν έχει συναρμολογηθεί σωστά.



Σχήμα 1.6: Ενιαία συστήματα με ράβδους.

1.1.3 Ενιαίο σύστημα με ράβδους (Unit and mullion system)

Το ενιαίο σύστημα με ράβδους αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων συστημάτων και πλέον χρησιμοποιείται σπάνια. Πρώτα τοποθετούνται οι ράβδοι και στη συνέχεια προσαρτώνται τα προσυναρμολογημένα ενιαία πάνελ (Σχήμα 1.6). Χρησιμοποιείται κυρίως όταν ράβδοι με ιδιαίτερα μεγάλη διατομή, καθιστούν ανέφικτη την εγκατάσταση του ενιαίου συστήματος. Τα συγκεκριμένα συστήματα μπορούν να έχουν το μέγεθος ενός ορόφου ή μπορούν να τοποθετηθούν ξεχωριστά, στην ορατή και μη ορατή περιοχή. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα είναι παρόμοια με εκείνα του ενιαίου συστήματος και το μέγεθος των ενιαίων στοιχείων είναι μικρότερο σε αυτό το σύστημα.



Σχήμα 1.7: Συστήματα πάνελ.

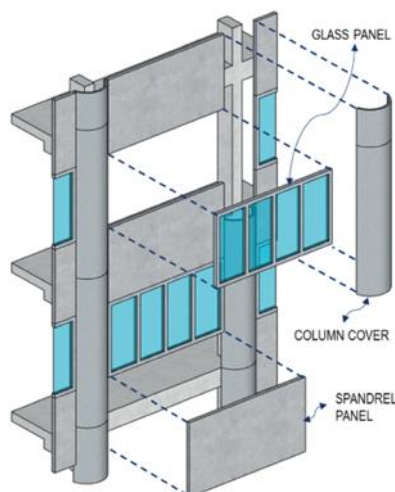
1.1.4 Σύστημα πάνελ (Panel system)

Τα συστήματα πάνελ είναι κυρίως σύνθετα μεταλλικά πάνελ, τα οποία εμπεριέχουν ελαφριές στρώσεις από κυψελιδωτό υλικό ή αφρώδη μόνωση ανάμεσα σε δύο λεπτά φύλλα μετάλλου· προκατασκευασμένα πάνελ από σκυρόδεμα, ειδικά σχεδιασμένα για την κάθε χρήση· και πάνελ με λεπτή πέτρινη επένδυση, τα οποία προσαρτώνται στη δομή του κτιρίου χρησιμοποιώντας μεταλλικά κλιπ και αγκυρώσεις. Ο κεραμικός πηλός και το γυψομάρμαρο χρησιμοποιούνται επίσης στην κατασκευή σύνθετων πάνελ.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα πάνελ είναι κατασκευασμένο από ομοιογενείς μονάδες που σχηματίζονται από διαφορετικά υλικά (Σχήμα 1.7). Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα είναι παρόμοια με εκείνα του ενιαίου συστήματος, αλλά η παραγωγή τους περιλαμβάνει υψηλότερο κόστος εργαλείων, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο μόνο για ένα κτίριο που απαιτεί μεγάλο αριθμό πανομοιότυπων πάνελ.

1.1.5 Κάλυμμα υποστυλώματος και σύστημα spandrel (Column cover and spandrel system)

Το σύστημα αυτό δίνει έμφαση στη δομή του κτιρίου και όχι στη δημιουργία δικού του πλέγματος. Για κάθε έργο πρέπει να δημιουργηθεί προσαρμοσμένο σχέδιο, καθώς δεν υπάρχουν συγκεκριμένα μεγέθη δοκών και υποστυλωμάτων. Πρώτα εγκαθίστανται τα καλύμματα των υποστυλωμάτων, που μπορεί να έχουν ύψος ενός ή δύο ορόφων και στην συνέχεια στερεώνονται ανάμεσα τους μακρά spandrel πάνελ. Τέλος, προσυναρμολογημένες σειρές υαλοπινάκων προσαρτώνται μεταξύ των spandrel περιοχών (Σχήμα 1.8). Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην στήριξη των spandrel πάνελ, για να διασφαλιστεί ότι τα πάνελ δεν εκτρέπονται όταν εφαρμόζονται φορτία στις δοκούς του κτιρίου· διαφορετικά οι λωρίδες των παραθύρων θα μπορούσαν να υποβληθούν σε φορτίσεις, που θα παραμόρφωναν τις ράβδους του πλαισίου και να ραγίσουν το γυαλί.



Σχήμα 1.8: Κάλυψη υποστυλώματος και σύστημα spandrel.

1.1.6 Σύστημα στήριξης τεσσάρων σημείων (Four-point supported glazing system)

Η μοντέρνα αρχιτεκτονική πολυώροφων κτιρίων περιλαμβάνει τα συστήματα υαλοπινάκων, τα οποία στηρίζονται σε τέσσερα σημεία και προσδίδουν υψηλότερη διαφάνεια, ευελιξία και αισθητική, σε σχέση με την συνεχή στήριξη των άκρων που παρέχεται από τους παραδοσιακούς πλαισιωμένους υαλοπίνακες (Σχήμα 1.9). Τα γυάλινα πάνελ συγκρατούνται μεταξύ τους με ένα σύστημα βιδωτών συνδέσεων, όπως τα εξαρτήματα τύπου αράχνη (Σχήμα 1.10), οι οποίες τοποθετούνται συνήθως στις γωνίες των υαλοπινάκων. Οι γυάλινες άκρες σφραγίζονται με χρήση της δομικής σιλικόνης. Το βάρος των πάνελ μεταφέρεται μέσω των συνδέσεων σε μια μεταλλική δομή στήριξης που μπορεί να είναι συνήθης χαλύβδινες κατασκευές ή συστήματα καλωδίων. Με αυτόν τον τρόπο, η πρόσοψη αναγνωρίζεται ως ένα δομικό σύστημα υαλοπινάκων (structural glazing system) ή ως μία γυάλινη πρόσοψη χωρίς πλαίσιο (frameless glazing), καθώς αποτελείται από μία ομάδα γυάλινων στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους για τη μεταφορά φορτίων.

Η εισαγωγή εξαρτημάτων από ανοξείδωτο χάλυβα και η χρήση των καλωδίων μειώνουν στο ελάχιστο την χρησιμοποιούμενη ποσότητα μετάλλου, γεγονός που συμβάλει στη μείωση της διάβρωσης του χάλυβα. Δεδομένου ότι τα σημειακά συστήματα στήριξης αφαιρούν το πλαίσιο από το επίπεδο της πρόσοψης, η αρχιτεκτονική έκφραση της εξαρτάται πλέον από τη γεωμετρική διαμόρφωση και τη δομική απόδοση του συστήματος. Ειδικότερα, η εκμετάλλευση αυτών των συστημάτων έχει αποκτήσει εκτεταμένες δυνατότητες μέσω της διεξαγωγής αριθμητικών αναλύσεων σε προχωρημένα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 1.9: Σύστημα στήριξης τεσσάρων σημείων.



Σχήμα 1.10: Εξαρτήματα τύπου αράχνη.

1.2 Υλικά

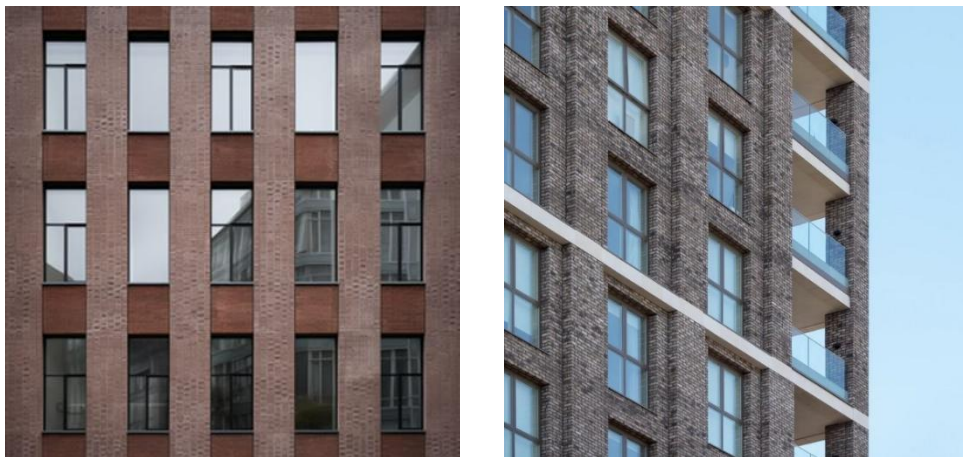
Η ποικιλομορφία των υλικών στην επένδυση των προσόψεων, δεν επηρεάζει μόνο την αισθητική του κτιρίου, αλλά και την διαδικασία και τα εξαρτήματα της συναρμολόγησης του συστήματος. Τα υλικά των πάνελ έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση και μακροβιότητα της πρόσοψης και η επιλογή τους γίνεται με βάση τις επιθυμητές ιδιότητες της κατασκευής. Η χρήση του γυαλιού στη δημιουργία σύγχρονων προσόψεων είναι μια διαδεδομένη και πολύπλευρη προσέγγιση, προσφέροντας τόσο αισθητική, όσο και λειτουργικά πλεονεκτήματα. Εάν η διαφάνεια ή η διαπερατότητα του φωτός δεν είναι επιθυμητή, τότε χρησιμοποιούνται πάνελ από αδιαφανή υλικά, ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατός ο συνδυασμός τους με συστήματα υαλοπινάκων.

1.2.1 Αδιαφανείς προσόψεις (Opaque curtain walls)

Τα αδιαφανή υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα για την επένδυση των κτιρίων είναι: πέτρα και τεχνητή πέτρα, πάνελ από σκυρόδεμα, τερακότα και κεραμικά πάνελ, μεταλλικά πάνελ, ξύλινα και σύνθετα ξύλινα πάνελ και σύνθετα πολυμερή πάνελ.

1.2.1.1 Πέτρα και τεχνητή πέτρα

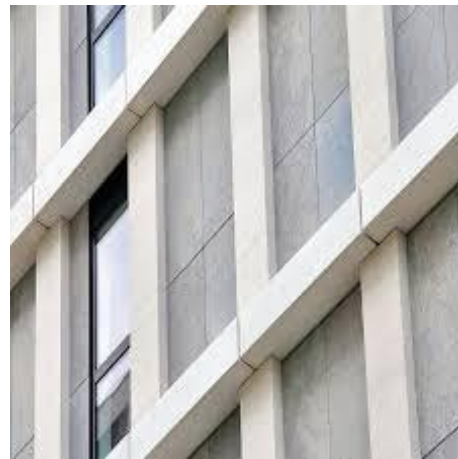
Η πέτρα από τη φύση της είναι μεταβλητή και ψαθυρή και για αυτό η χρήση της στην κατασκευή προσόψεων ποικίλει και διαφέρει περισσότερο από κάθε άλλο δομικό στοιχείο. Η φυσική της αντοχή πρέπει πρώτα να εξεταστεί με δοκιμές, ενώ οι ιδιότητες του υλικού δεν μπορούν να προκαθοριστούν σε μία εργασία, όπως τα περισσότερα υλικά και για αυτόν το λόγο δεν προϋποθέτει ασφάλεια. Η ευρεία χρήση της συμπεριλαμβάνει την κάλυψη των υποστυλωμάτων και των spandrel περιοχών (Σχήμα 1.11), την χύτευση σε πάνελ από σκυρόδεμα, γνωστή ως handset stone cladding (Σχήμα 1.12(α)) και τη δημιουργία πέτρινων πάνελ που στηρίζονται σε χαλύβδινα δικτυώματα πλαισίων, τα οποία αναφέρονται ως πέτρινα δικτυώματα (Σχήμα 1.12(β)).



Σχήμα 1.11: Πέτρινη επένδυση υποστυλωμάτων και spandrel περιοχών.



(α) «Handset stone» επένδυση



(β) Πέτρινα δικτυώματα

Σχήμα 1.12: Μορφές πέτρινων επενδύσεων.

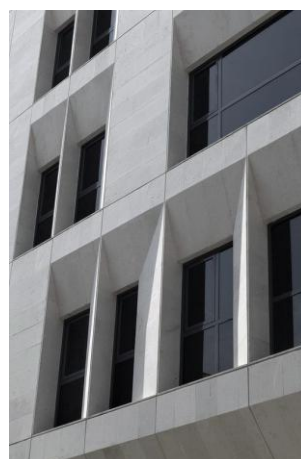
Εκτός από τις δομικές λειτουργίες της, η πέτρα ως επένδυση πρέπει να αντιστέκεται σε περιβαλλοντικά φαινόμενα. Πρέπει να έχει την ιδιότητα να αντιστέκεται στη διείσδυση του αέρα και της υγρασίας και να φιλτράρει τον ήλιο, τη θερμοκρασία και τον ήχο. Κάποιες από αυτές τις εκθέσεις είναι προβλέψιμες και άλλες όχι. Πιο συγκεκριμένα οι πέτρινες προσόψεις εξαρτώνται από τα συστήματα στήριξης, για τη διατήρηση της δομικής τους ακεραιότητας και απόδοσης. Η γνώση της κατανομής της κάμψης στο πάνελ είναι εξαιρετικά σημαντική για τον σχεδιασμό ενός ψαθυρού, μη πλαστικού υλικού όπως είναι η πέτρα, καθώς είναι εξαιρετικά εύθραυστη και ευαίσθητη στις συγκεντρώσεις στρες, που είναι αποτέλεσμα μονοαξονικής κάμψης. Η κατανομή της δύναμης στο πάνελ βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη θέση και αν το πάνελ έχει ατέλειες ή αδυναμίες στη θέση αυτή, πρώιμες αστοχίες είναι πολύ πιθανό να συμβούν. Κάποιο όφελος χρειάζεται να προσφερθεί στα εξαρτήματα συγκράτησης που αναγνωρίζουν τις εγγενείς ιδιότητες των τύπων αγκυρώσεων και της διάταξης τους, τα οποία ανταποκρίνονται καλύτερα στη φύση της πέτρας.

1.2.1.2 Πάνελ σκυροδέματος

Τα προκατασκευασμένα πάνελ σκυροδέματος προτιμώνται λόγω της αντοχής τους και του χαμηλού κόστους. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως καλύμματα υποστυλωμάτων και οριζόντια καλύμματα spandrel. Επίσης κατασκευάζονται σε μεγάλα μήκη και παρέχουν περιμετρική υποστήριξη σε παράθυρα πλήρωσης όπως οι λωρίδες παραθύρων (Σχήμα 1.13(α)). Το

σκυρόδεμα μπορεί να χυτευθεί με μια ποικιλία φινιρισμάτων και χρωμάτων, χρησιμοποιώντας πέτρινα ή κεραμικά αδρανή, διαφορετικών χρωμάτων, τύπων και μεγεθών. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα αυτού του συστήματος είναι η λεπτομέρεια των πάνελ με τη δομή στήριξης της πρόσοψης. Ενώ το σκυρόδεμα εμποδίζει αποτελεσματικά τη διείσδυση του αέρα και του νερού, οι αρθρώσεις είναι αυτές που παρουσιάζουν τα περισσότερα προβλήματα. Δεδομένου ότι το σκυρόδεμα δεν προσφέρει καλή μόνωση, η πρόσθετη θερμομόνωση απαιτεί ακόμα μεγαλύτερη προσοχή.

Το μειονέκτημα των πάνελ από σκυρόδεμα είναι το βάρος τους. Σε αναζήτηση ελαφρύτερων πάνελ, κατασκευάστηκε σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού. Το πάχος και το βάρος των πάνελ είναι περίπου το ένα τέταρτο εκείνων των συμβατικών προκατασκευασμένων πάνελ από σκυρόδεμα, γεγονός που εξοικονομεί πολλά κατά τη μεταφορά, καθιστούν τα πάνελ ευκολότερα στο χειρισμό και επιτρέπουν τη χρήση ελαφρύτερου εξοπλισμού στήριξης. Με αυτόν τον τρόπο το μικρό βάρος της πρόσοψης επιτρέπει στο φέρον πλαίσιο του κτιρίου να είναι ελαφρύτερο και λιγότερο δαπανηρό. Η πρόσμιξη του σκυροδέματος με ίνες γυαλιού παρέχει επίσης αρκετή αντοχή σε εφελκυσμό και έτσι δεν απαιτείται ενίσχυση χάλυβα. Το οπλισμένο σκυρόδεμα από υαλοίνες μπορεί να διαμορφωθεί σε τρισδιάστατες μορφές, με περίπλοκες λεπτομέρειες και εκτεταμένο φάσμα χρωμάτων και υφών (Σχήμα 1.13(β)).



(α) Περιμετρική στήριξη υαλοπινάκων (β) Περίπλοκες μορφές πάνελ

Σχήμα 1.13: Πάνελ σκυροδέματος.

1.2.1.3 Κεραμικά πάνελ από τερακότα

Η τερακότα είναι ένας σκληρός, ημιπυρίμαχος, αδιάβροχος κεραμικός πηλός που χρησιμοποιείται στην επένδυση των προσόψεων ή στην διακόσμηση τους, καθώς μπορεί να ψηθεί σε καλούπια. Ως ένα από τα παλαιότερα δομικά υλικά είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις καιρικές εκθέσεις, ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες, προσφέρει μόνωση και εξοικονόμηση ενέργειας και είναι ευέλικτη στον σχεδιασμό. Χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη ποικιλία φινιρισμάτων, είτε στο φυσικό κόκκινο-καφέ χρώμα της, είτε επικαλυμμένη με λευκό ή έγχρωμο σμάλτο και έχει τέτοια ομορφιά που δεν μπορεί να αντιγραφεί (Σχήμα 1.14).

Οι νεότερες μέθοδοι στήριξης κεραμικών πάνελ χρησιμοποιούν εξαρτήματα και αγκυρώσεις από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην σύγχρονη πρακτική, η τερακότα κατασκευάζεται από προσεκτικά επιλεγμένους αργίλους, οι οποίοι σε συνδυασμό με νερό και υαλοποιημένα συστατικά τοποθετούνται σε ένα μύλο για να δημιουργηθεί ο πηλός. Στη συνέχεια, ο πηλός οδηγείται στο δωμάτιο χύτευσης, σε επιθυμητού σχήματος πλάκες. Τα μεμονωμένα κεραμικά στοιχεία διαμορφώνονται με χειροκίνητο ή μηχανολογικό εξοπλισμό. Στην περίπτωση επαναλαμβανόμενων στοιχείων, ο πηλός τοποθετείται σε γύψινα καλούπια για να σχηματιστεί ένα περίβλημα. Αφού αφαιρεθούν τα καλούπια, τα πάνελ είναι έτοιμα να ψηθούν σε καμίνια ή άλλους κεραμικούς φούρνους. Τα κεραμικά πάνελ δημιουργούνται επίσης με μεθόδους εξώθησης, παρόμοιες με την παραγωγή εξωθημένων τούβλων αργίλου, τα οποία προσφέρουν περίπλοκους σχηματισμούς, παράγονται σε μεγάλες, τυποποιημένες ποσότητες και είναι πιο οικονομικά.



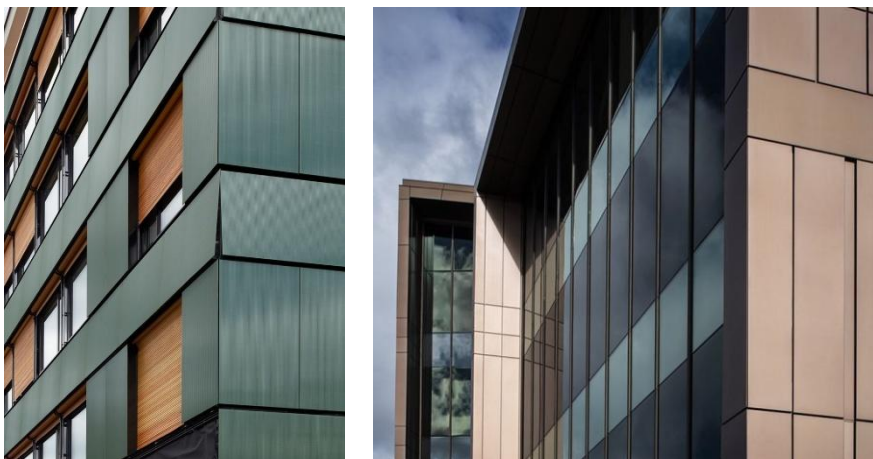
Σχήμα 1.14: Κεραμικά πάνελ.

1.2.1.4 Μεταλλικά πάνελ

Τα μεταλλικά πάνελ μπορούν να δημιουργηθούν με τη μορφή μονολιθικών ή συνθέτων στοιχείων (Σχήμα 1.15). Τα μονολιθικά πάνελ αποτελούνται από μια λεπτή στρώση μετάλλου και προσαρτώνται σε συνηθισμένα συστήματα πλαισίων. Τα σύνθετα πάνελ είναι πολυστρωματικά και αποτελούνται από δυο λεπτά μεταλλικά φύλλα, με ένα ενδιάμεσο στρώμα αφρώδους μόνωσης (foamed panels) ή κυψελοειδή υλικού (honeycomb backed panels). Η μόνωση αναμένεται να προσφέρει επιπρόσθετα θερμικά χαρακτηριστικά, με μείωση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, ενώ ο κυψελοειδής πυρήνας είναι κατάλληλος για την ενίσχυση της ακαμψίας και της αντοχής ελαφριών προσόψεων. Η εγκατάσταση των σύνθετων πάνελ πραγματοποιείται σε μεταλλικά συστήματα τροχιάς, που προσφέρουν πλαισιωμένη υποστήριξη.

Όσο αναφορά τη δομική απόδοση των πάνελ, τα μεταλλικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα, μεγάλη διάρκεια ζωής και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση. Περιλαμβάνουν ορισμένα εγγενή χαρακτηριστικά σχεδιασμού, όπως προφίλ με ραβδώσεις ή ανάγλυφα, που προσδίδουν στην πραγματικότητα προσθετή δυσκαμψία και βελτιωμένη αισθητική. Εκτός από τα περίτεχνα αρχιτεκτονικά προφίλ, διάφορες επιφανειακές επεξεργασίες μπορούν να εφαρμοστούν στα μεταλλικά πάνελ, έτσι ώστε να ενισχύσουν την αντοχή και την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Τα πιο συχνά μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κάλυψη των κτιρίων είναι το αλουμίνιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας (Σχήμα 1.16(α)-(β)). Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ υλικό και η υψηλή του αντοχή, σε αναλογία με το βάρος του, το καθιστά ιδανικό στην επένδυση των προσόψεων. Ωστόσο, έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και τα εξαρτήματα του συστήματος κινδυνεύουν να σπάσουν θερμικά, σε περίπτωση που υποβληθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη, ο ανοξείδωτος χάλυβας δημιουργείται από ένα κράμα σιδηρού και χρωμίου, γεγονός που προσδίδει εξαιρετική αντοχή και αντίσταση στη διάβρωση. Το κύριο μειονέκτημα του ανοξείδωτου χάλυβα είναι το υψηλό αρχικό κόστος. Ωστόσο, το κόστος του κύκλου ζωής του, το καθιστά πιο οικονομικό σε σύγκριση με λιγότερο ανθεκτικά υλικά.



Σχήμα 1.15: Μεταλλικά πάνελ.

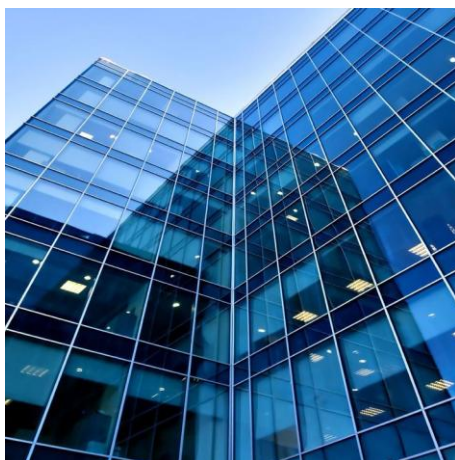


(α) Αλουμίνιο



(β) Ανοξείδωτος χάλυβας

Σχήμα 1.16: Συνήθης μέταλλα στην κατασκευή πάνελ.



Σχήμα 1.17: Διαφανείς προσόψεις.

1.2.2 Διαφανής προσόψεις (Transparent curtain walls)

Η αρχιτεκτονική γοητεία του γυαλιού προέρχεται από την ικανότητα της ανάκλασης και της μετάδοσης του φωτός, ιδιότητες μοναδικές για το γυαλί. Η ένταξη του στα σύγχρονα συστήματα των προσόψεων προσφέρει ποικιλομορφία προηγμένων επιλογών και αισθητικής, φυσικό εσωτερικό φωτισμό και στενότερη επαφή με το φυσικό περιβάλλον (Σχήμα 1.17). Σήμερα είναι δυνατό να βρεθούν πολλοί διαφορετικοί τύποι υαλοπινάκων, αλλά το επίκεντρο του ενδιαφέροντος είναι οι επικαλύψεις, τα κενά αέρος, οι ενδιάμεσες μεμβράνες και οι μικροί χειρισμοί στο ανοπτημένο γυαλί. Υποκινούμενοι από ανησυχίες για την ενέργεια, την αισθητική και την ασφάλεια, πολλές έρευνες εξακολουθούν να συμβαίνουν σε αυτούς τους τομείς.

Το γυαλί μπορεί να είναι ανοπτημένο (annealed) ή πλήρως σκληρυμένο (fully tempered). Το πάνελ ανοπτημένου γυαλιού, γνωστό και ως γυαλί επίπλευσης (float glass), είναι η θεμελιώδης μορφή γυαλιού, που παράγεται από τη διαδικασία της επίπλευσης και στη συνέχεια υποβάλλεται σε ελεγχόμενη διαδικασία ψύξης (ανόπτηση), για την ελαχιστοποίηση των εσωτερικών τάσεων. Ο πιο σημαντικός προβληματισμός αφορά την ασφάλεια, καθώς σε περίπτωση θραύσης δημιουργούνται μεγάλα, αιχμηρά θραύσματα, ενέχοντας κίνδυνο τραυματισμού (Σχήμα 1.18(α)).



(α) Ανοπτημένο γυαλί



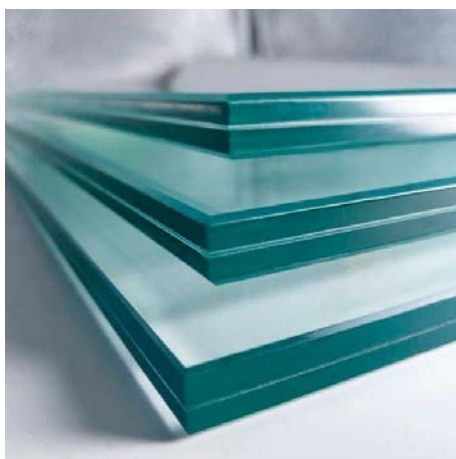
(β) Πλήρως σκληρυμένο γυαλί

Σχήμα 1.18: Θραύση διαφορετικών τύπων γυαλιού.

Το πλήρως σκληρυμένο γυαλί, δημιουργείται μέσω μιας διαδικασίας θερμικής ενίσχυσης, όπου το ανοπτημένο γυαλί θερμαίνεται σε θερμοκρασία 600-700 °C και στη

συνέχεια ψύχεται πολύ γρήγορα, έτσι ώστε ο πυρήνας του υαλοπίνακα να βρίσκεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τις επιφάνειες του. Κατά αυτόν τον τρόπο, αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις στις επιφάνειες του γυαλιού και εφελκυστικές τάσεις στο εσωτερικό του, προσδίδοντας τέσσερις με πέντε φορές μεγαλύτερη αντοχή, καθώς και μεγαλύτερη αντίσταση στις θερμικές καταπονήσεις, σε σχέση με το ανοπτημένο γυαλί. Ως συνέπεια των τάσεων, το σκληρυμένο γυαλί έχει τη δυνατότητα να σπάει σε μικρότερα σωματίδια, και για αυτόν το λόγο θεωρείται ασφαλές (Σχήμα 1.18(β)). Ωστόσο να σημειωθεί ότι, η ύπαρξη των τάσεων απαγορεύει την κοπή ή οποιαδήποτε άλλη επιφανειακή επεξεργασία.

Οι επικαλύψεις έχουν επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης των υαλοπινάκων, καθώς ενισχύουν τις ιδιότητες του γυαλιού, προσθέτοντας ένα λεπτό στρώμα μεταλλικών οξειδίων ή άλλων υλικών. Η επιφανειακή επεξεργασία του γυαλιού μπορεί να ενισχύσει την ενεργειακή του απόδοση, με μείωση της μεταφοράς θερμότητας ή ηλιακό έλεγχο. Οι συνήθεις τύποι επιστρώσεων περιλαμβάνουν το ανακλαστικό γυαλί (reflective glass) και το γυαλί χαμηλής εκπομπής (low-E glass), ενώ ορισμένες επικαλύψεις, όπως οι κεραμικές, προσδίδουν μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα στον υαλοπίνακα. Η επιλογή της κατάλληλης μεμβράνης, στην σωστή επιφάνεια εξαρτάται από τις επιθυμητές ιδιότητες του κτιρίου.



(α) Πολυστρωματικοί υαλοπίνακες (β) Σύνθετος υαλοπίνακας με κενό αέρος

Σχήμα 1.19: Υαλοπίνακες δύο ή περισσότερων στρώσεων.

Οι παραπάνω τύποι γυαλιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μονάδων, δύο ή περισσότερων στρώσεων, όπως οι πολυστρωματικοί (laminated) και οι σύνθετοι υαλοπίνακες με ενδιάμεσο κενό αέρα (insulated). Η πολυστρωματική μονάδα

παράγεται από την συγκόλληση δύο ή περισσότερων μονολιθικών πάνελ σε ένα ενδιάμεσο στρώμα μεμβράνης, η οποία εμποδίζει την αποκόλληση των θραυσμάτων, σε περίπτωση θραύσης (Σχήμα 1.19(α)). Συνεπώς, ο πολυστρωματικός υαλοπίνακας θεωρείται γυαλί ασφαλείας.

Οι σύνθετοι υαλοπίνακες με ενδιάμεσο κενό αέρος, οι οποίες αναφέρονται και ως διπλές προσόψεις (double skin facades), δημιουργούνται συνδυάζοντας δύο ή περισσότερα γυάλινα πάνελ, τα οποία είναι διαχωρισμένα με κενό αέρα σε ένα ερμητικά σφραγισμένο στοιχείο (Σχήμα 1.19(β)). Το κενό αέρος μεταξύ των πάνελ λειτουργεί σαν θερμομονωτικό στρώμα, που μειώνει τη μεταφορά θερμότητας, ενισχύοντας τη μόνωση και την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Αυτή η διαμόρφωση προσφέρει ένα μεγάλο φάσμα συγχρόνων επιλογών, συνδυάζοντας προηγμένες τεχνολογίες και υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα.

Στις γυάλινες προσόψεις, ολόκληρο το σύστημα λειτουργεί ως μηχανισμός αδιάβροχης προστασίας. Στην πράξη, ωστόσο, απαιτείται η προσεκτική τοποθέτηση των στεγανωτικών για την επαρκή λειτουργία του συστήματος. Τα γυάλινα πάνελ συγκρατούνται σε μεταλλικούς μηχανισμούς με δύο βασικούς τρόπους. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος περιλαμβάνει την περιμετρική κάλυψη των άκρων του υαλοπίνακα με παρεμβύσματα, πλάκες πίεσης και μεταλλικά καπάκια, τα οποία παρουσιάζουν την εικόνα ενός υαλοπίνακα με κορνιζά (Σχήμα 1.20(α)). Από την άλλη, η χρήση της δομικής σιλικόνης, για την ένωση και την στεγανοποίηση των πάνελ αποτελεί μια σύγχρονη μέθοδο, η οποία προσδίδει την οπτική εντύπωση ενός συνεχούς γυαλιού (Σχήμα 1.20(β)).



(α) Κορνίζες υαλοπινάκων



(β) Συνεχές δομικό γυαλί

Σχήμα 1.20: Μέθοδοι συγκράτησης υαλοπινάκων.

Κεφάλαιο 2 Θεωρία μεταφοράς θερμότητας

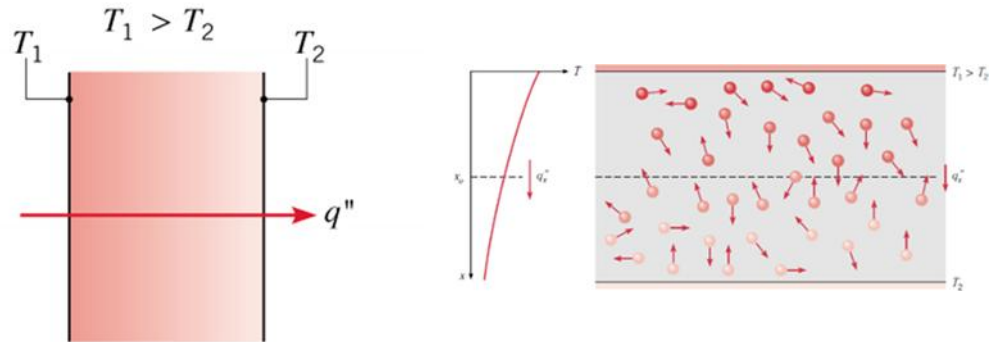
Το Κεφάλαιο 2 επικεντρώνεται στη θεωρία μεταφοράς θερμότητας, που εφαρμόζεται σε προβλήματα πυρκαγιάς, για τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου των συστημάτων υαλοπινάκων. Η μετάδοση της θερμότητας είναι θερμική ενέργεια σε μεταφορά, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα μιας διαβάθμισης ή διαφοράς της θερμοκρασίας. Αυτή η διαβάθμιση θεωρείται η κινητήρια δύναμη που προκαλεί τη ροή της θερμότητας από περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας (Janna, 2009). Η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει με τρεις βασικούς μηχανισμούς: αγωγή (conduction), συναγωγή (convection) και ακτινοβολία (radiation).

Η μεταφορά θερμότητας από τα θερμά αέρια στις γυάλινες ή μεταλλικές επιφάνειες των συστημάτων πραγματοποιείται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, η θερμότητα μεταφέρεται στην πρόσοψη μέσω του μηχανισμού της αγωγής. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το πρόβλημα της αγωγής, επιλύεται με την εφαρμογή κατάλληλων οριακών συνθηκών στερεού-ρευστού, που περιγράφουν τους μηχανισμούς της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα είναι μη-γραμμικές και στην συγκεκριμένη εργασία επιλύονται αριθμητικά, με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

2.1 Αγωγή

Αγωγή είναι η θερμική ενέργεια που μεταδίδεται μεταξύ γειτονικών μορίων ή ατόμων μέσω ενός υλικού, χωρίς την αντιληπτή κίνηση του ίδιου του υλικού. Λόγω της θερμοκρασιακής διαβάθμισης, τα μόρια σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας δονούνται και μεταφέρουν μέρος της κινητικής ενέργειας σε μόρια που βρίσκονται σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω τυχαίων συγκρούσεων (Σχήμα 2.1). Η αγωγή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω

στερεών, υγρών, και αερίων. Στην περίπτωση των ρευστών, η αγωγή είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας, όταν το ρευστό έχει μηδενική ταχύτητα.



Σχήμα 2.1: Μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής.

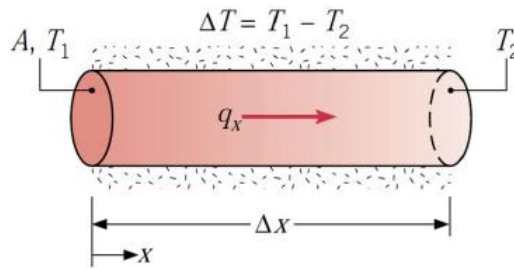
Το κύριο ενδιαφέρον εδώ, δεν είναι τόσο στην περιγραφή της μοριακής ή της μικροσκοπικής δραστηριότητας που σχετίζεται με την αγωγή, αλλά στην ικανότητα να περιγράψει μαθηματικά το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής. Η μεταφορά θερμότητας σχετίζεται με παρατηρούμενα φαινόμενα και όχι σε θεμελιώδεις αρχές (Incropera et al, 2006). Ως εκ τούτου, για την περιγραφή του μαθηματικού προβλήματος παρουσιάζεται ένα πειρατικό μοντέλο αγωγής στο Σχήμα 2.2. Η διαφορά θερμοκρασίας ΔT προκαλεί μετάδοση της θερμότητας μέσω αγωγής, η οποία εκφράζεται με τη σχέση:

$$q_x = KA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.1)$$

όπου K η θερμική αγωγιμότητα, A το εμβαδόν και ΔX το μήκος. Εκτιμώντας αυτή την έκφραση στο όριο ως $\Delta X \rightarrow 0$, λαμβάνεται ο ρυθμός θερμότητας (heat rate):

$$q_x = -KA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

όπου q_x ο ρυθμός θερμότητας στη διεύθυνση x .



Σχήμα 2.2: Πειραματικό μοντέλο αγωγής.

Συνεπώς, η μονοδιάστατη αγωγή της θερμότητας, που κυβερνάται από το γνωστό νόμο του Fourier, δίνεται με τη μορφή:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

όπου q'' είναι η ροή θερμότητας (heat flux), dx ένα απειροελάχιστο πάχος ενός συγκεκριμένου υλικού, dT η αντίστοιχη διαφορά θερμοκρασίας σε αυτό το πάχος και k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού και αυτό το γεγονός καθιστά τη λύση ακόμα και των πιο απλών προβλημάτων μη γραμμική, απαιτώντας αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση τους.

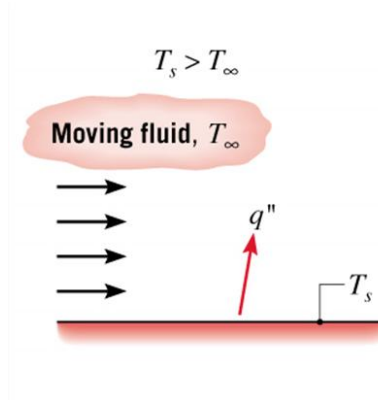
Στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού, η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει συνήθως σε τρεις διαστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρείται ένας απειροελάχιστος όγκος υλικού $dx \times dy \times dz$. Η εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας συνεπάγεται ότι για σταθερή μεταφορά θερμότητας, η εισροή θερμότητας σε ένα στοιχείο πρέπει να είναι ίση με την εκροή και οδηγεί στη μερική διαφορική εξίσωση:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

όπου k_x , k_y , k_z είναι οι θερμικές αγωγιμότητες του υλικού σε κάθε μία από τις τρεις χωρικές κατευθύνσεις. Στη μεταβατική κατάσταση της μεταφοράς θερμότητας, η θερμοκρασία σε έναν όγκο υλικού αυξάνεται ή μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Σε αυτή την περίπτωση, η μερική διαφορική εξίσωση γράφεται με τη μορφή:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και C η ειδική θερμοχωρητικότητα του. Όπως και στην περίπτωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, η ειδική θερμοχωρητικότητα εξαρτάται συνήθως από τη θερμοκρασία του υλικού.



Σχήμα 2.3: Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής.

2.2 Συναγωγή

Η συναγωγή είναι η μετάδοση της θερμότητας, η οποία προκύπτει από την κίνηση ενός θερμού ρευστού, το οποίο έρχεται σε επαφή με μια οριοθετημένη επιφάνεια ενός στερεού σώματος (Σχήμα 2.3). Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής μπορεί να ταξινομηθεί ανάλογα με τη φύση της ροής. Η εξαναγκαστική συναγωγή συμβαίνει όταν το ρευστό ρέει με ταχύτητα σε στερεή επιφάνεια. Αντίθετα, για την ελεύθερη (ή φυσική) συναγωγή, η ροή προκαλείται από δυνάμεις άνωσης, οι οποίες οφείλονται σε αλλαγές της πυκνότητας, που προκαλούνται από την ίδια τη θέρμανση.

Ανεξάρτητα από τη φύση της συναγωγής, η κατάλληλη εξίσωση ροής θερμότητας έχει τη μορφή:

$$q'' = \alpha_c (T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

όπου q'' η ροή θερμότητας μέσω συναγωγής, T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας, T_∞ η θερμοκρασία του ρευστού πριν έρθει σε επαφή με την επιφάνεια και α_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής. Ο συγκεκριμένος συντελεστής εξαρτάται από τις συνθήκες στο οριακό στρώμα, οι οποίες επηρεάζονται από την επιφανειακή γεωμετρία, τη φύση της κίνησης του ρευστού και μια ποικιλία θερμοδυναμικών και μεταφορικών ιδιοτήτων του ρευστού. Για τη λύση αριθμητικών προβλημάτων θεωρείται γνωστός και χρησιμοποιούνται οι τυπικές τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής.

	α_c (W/m ² ·K)
<u>Ελεύθερη συναγωγή</u>	

Αέρια	2-25
Υγρά	50-1000
<u>Εξαναγκασμένη συναγωγή</u>	
Αέρια	25-250
Υγρά	100-20000
<u>Συναγωγή με αλλαγή φάσης</u>	
Εξάτμιση ή συμπύκνωση	2500-100000

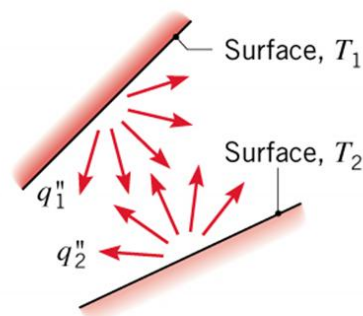
2.3 Ακτινοβολία

Η ακτινοβολία είναι η μετάδοση της θερμικής ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα οποία εκπέμπονται από μία επιφάνεια ή ένα σώμα, που βρίσκεται σε μη μηδενική θερμοκρασία (Σχήμα 2.4). Όπως και στην περίπτωση του φωτός, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να απορροφηθούν, να μεταδοθούν ή να ανακλαστούν σε μία επιφάνεια. Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας πραγματοποιείται πάντα όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός ρευστού ή ενός στερεού, ανεξάρτητα από το αν έρχεται σε επαφή με το άλλο σώμα. Στην πραγματικότητα η ακτινοβολία συμβαίνει πιο αποτελεσματικά στο κενό. Να σημειωθεί ότι όλες οι ουσίες εκπέμπουν ακτινοβολούμενη θερμότητα, αλλά η καθαρή ροή θερμότητας είναι από την περιοχή υψηλής στην περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας. Έτσι, η ψυχρότερη ουσία θα απορροφήσει περισσότερη ενέργεια από ότι εκπέμπει.

Η ροή θερμότητας που εκπέμπεται από ένα σώμα δίνεται από την εξίσωση:

$$q'' = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.7)$$

όπου q'' η ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, σ η σταθερά Stefan–Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) και ε ο συντελεστής εκπομπής, που παίρνει τιμές από 0 ως 1.



Σχήμα 2.4: Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.

2.4 Συνοριακές συνθήκες

Σημαντικός στόχος σε μία θερμική ανάλυση είναι ο προσδιορισμός του θερμοκρασιακού πεδίου σε ένα μέσο, που προκύπτει από τις συνθήκες που επιβάλλονται στα σύνορα του. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η μερική διαφορική εξίσωση αγωγής (Εξ. (2.5)), της οποίας η λύση παρέχει το πεδίο θερμοκρασίας στο στοιχείο, για καθορισμένες συνοριακές συνθήκες. Τις συνοριακές συνθήκες αποτελούν η μετάδοση της θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, ενώ εάν η κατάστασή είναι χρονικά εξαρτώμενη, στο πρόβλημα εισάγονται και οι αρχικές συνθήκες. Στη μεταφορά θερμότητας, οι συνοριακές συνθήκες είναι τριών γενικών τύπων (Pantousa, 2013).

2.4.1 Σταθερές συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας

Αυτή είναι η απλούστερη μορφή συνοριακών συνθηκών, όπου σε συγκεκριμένα σημεία του υλικού ή κατά μήκος των ακρών ή των επιφανειών, η θερμοκρασία θεωρείται γνωστή (Σχήμα 2.5(α)):

$$T = T_0 \quad (2.8)$$

2.4.2 Σταθερές συνοριακές συνθήκες ροής

Στην περίπτωση αυτή, η ροή θερμότητας σε μία κατεύθυνση κάθετη προς μια οριακή επιφάνεια θεωρείται γνωστή (Σχήμα 2.5(β)). Η συνοριακή συνθήκη γράφεται με τη μορφή:

$$-k_n \frac{\partial T}{\partial n} = q_0'' \quad (2.9)$$

όπου k_n είναι η θερμική αγωγιμότητα, μετρούμενη στην κατεύθυνση κάθετη προς την συνοριακή επιφάνεια και q_0'' είναι η γνωστή ροή θερμότητας. Μια ειδική περίπτωση της συγκεκριμένης συνοριακής συνθήκης είναι αυτή του αδιαβατικού ορίου. Σε ένα τέτοιο σύνορο δεν πραγματοποιείται ανταλλαγή θερμότητας, επομένως η ροή θερμότητας είναι ίση με μηδέν. Επομένως, η αδιαβατική συνοριακή συνθήκη γράφεται με τη μορφή:

$$-k_n \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (2.10)$$

Τα αδιαβατικά σύνορα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση συνθηκών συμμετρίας (δεν πραγματοποιείται ανταλλαγή θερμότητας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας ή της επιφάνειας) ή συνόρων που είναι (σχεδόν) πλήρως μονωμένα.

2.4.3 Συνοριακές συνθήκες στα όρια στερεού-ρευστού

Στην περίπτωση που τα στερεά σύνορα έρχονται σε επαφή με κινούμενα ρευστά (Σχήμα 2.5(γ)), μπορεί να γραφεί η ακόλουθη συνοριακή κατάσταση:

$$-k_n \frac{\partial T}{\partial n} = h_f (T_f - T_s) = h_f \Delta T \quad (2.11)$$

όπου h_f είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής, T_f είναι η θερμοκρασία του ρευστού (θεωρείται γνωστή) και T_s είναι η θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας, η οποία δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή, αλλά υπολογίζεται ως αποτέλεσμα της διαδικασίας επίλυσης. Για περιπτώσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε προβλήματα μηχανικής ανάλυσης και πραγματοποιείται ανταλλαγή θερμότητας τόσο με συναγωγή όσο και με ακτινοβολία, η Εξ. (2.11) μπορεί να γραφτεί με τη μορφή:

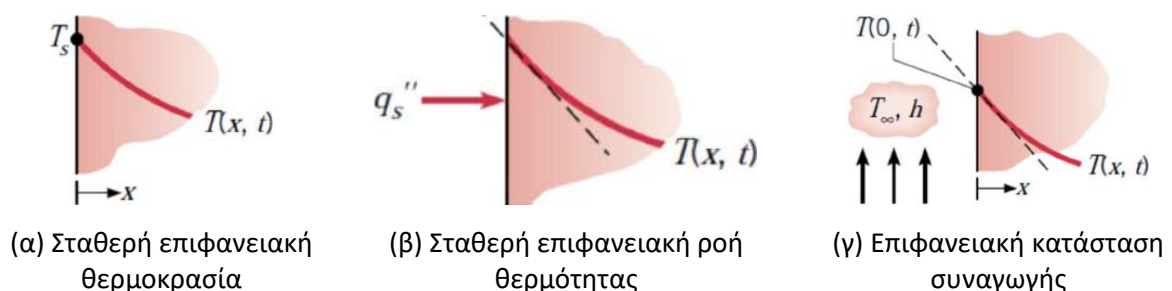
$$-k_n \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_f - T_s)^\beta + \Phi \varepsilon_r \sigma (T_f^4 - T_s^4) \quad (2.12)$$

όπου α και β συντελεστές που εξαρτώνται από την πλευρά των δομικών στοιχείων (θερμή ή ψυχρή πλευρά), Φ ο συντελεστής θέασης, ε_r ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας και σ η σταθερά του Stefan-Boltzmann.

Το πρώτο μέρος της της Εξίσωσης είναι γνωστό ως όρος συναγωγής, ενώ το δεύτερο ως όρος ακτινοβολίας. Ο όρος ε_r μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_f \times \varepsilon_s \quad (2.13)$$

όπου ε_f είναι ο συντελεστής εκπομπής της πυρκαγιάς (συνήθως λαμβάνεται ίσος με 1) και ε_s είναι ο συντελεστής εκπομπής του υλικού.



Σχήμα 2.5: Συνοριακές συνθήκες μέσου.

Κεφάλαιο 3 Ιδιότητες υλικών των προσόψεων σε υψηλές θερμοκρασίες

Η κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάλυση του μηχανισμού θερμικής θραύσης στις γυάλινες προσόψεις. Ειδικότερα, η ακριβής προσομοίωση αυτών των ιδιοτήτων αποτελεί βασικό παράγοντα για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων κατά την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς.

Η ακόλουθη ενότητα περιγράφει τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των υλικών που υιοθετούνται στην παρούσα μελέτη. Στην περίπτωση έλλειψης σχετικών οδηγιών από τους κανονισμούς (Ευρωκώδικες) σχετικά με τις ιδιότητες υλικών, χρησιμοποιούνται τιμές από πειραματικές εργασίες.

3.1 Γυαλί επίπλευσης (float glass)

Το γυαλί είναι ένα ανόργανο και μη κρυσταλλικό στερεό και σχηματίζεται συνήθως κατά την στερεοποίηση από το στάδιο της τήξης. Η ψύξη είναι τόσο γρήγορη που η κρυστάλλωση δεν έχει το χρόνο να πραγματοποιηθεί. Κατά τη μείωση της θερμοκρασίας, το ιξώδες αυξάνεται, με αποτέλεσμα την προοδευτική πήξη του υγρού, μέχρι την τελική στερεοποίηση.

Η συμπεριφορά του είναι δύσκολο να μελετηθεί λόγω της μη κρυσταλλικότητας του. Στις υψηλές θερμοκρασίες, το γυαλί αλλάζει σταδιακά την κατάσταση του από στερεό ελαστικό υλικό, σε ιξωδοελαστικό και τελικά σε υγρή μορφή. Επειδή όμως, στην εργασία αυτή δε θα ληφθούν υπόψη πολύ υψηλές θερμοκρασίες, θα μελετηθεί μόνο η στερεά φάση (όπου αρχικά έχει ελαστική συμπεριφορά).

Το πυριτικό γυαλί σόδα-άσβεστο (soda-lime glass), που αποτελείται από 73% διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), 9% οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και 14% οξείδιο του νατρίου (Na_2O), είναι ο τύπος του γυαλιού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τυπικών γυαλιών επίπλευσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Lagowski, 2004), η θερμοκρασία τήξης είναι ίση

με 1723 °C. Σε περίπτωση θραύσης, δημιουργούνται μεγάλα θραύσματα, γνωστά ως «νησίδες», οι οποίες μπορούν πολύ εύκολα να αποκολληθούν.

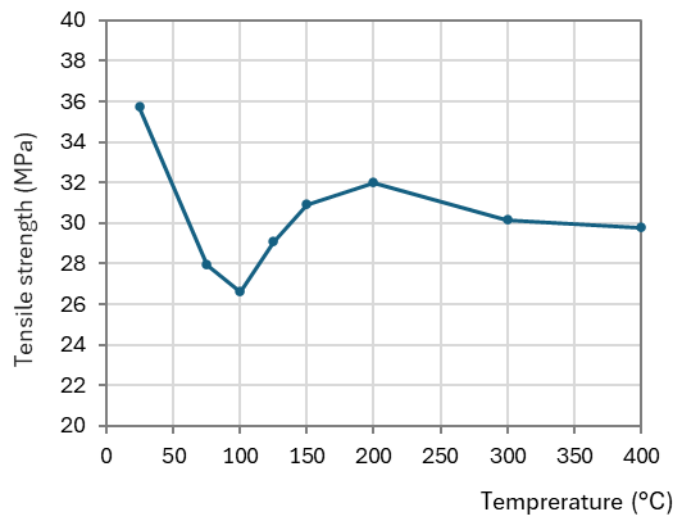
Το πυριτικό γυαλί σόδα-ασβέστιο αποτελεί βασικό προϊόν για την παραγωγή υαλοπινάκων με βελτιωμένες ιδιότητες, καθώς οι κανονισμοί απαιτούν τη χρήση πυρίμαχων γυαλιών ή γυαλιών ασφάλειας, όπως ο πολυστρωματικός υαλοπίνακας, για τον περιορισμό της εξάπλωσης της πυρκαγιάς και του καπνού.

Το πυριτικό γυαλί σόδα-ασβέστιο αποτελεί βασικό προϊόν για την παραγωγή υαλοπινάκων με βελτιωμένες ιδιότητες, καθώς οι κανονισμοί απαιτούν τη χρήση πυρίμαχων γυαλιών ή γυαλιών ασφάλειας, όπως ο πολυστρωματικός υαλοπίνακας, για τον περιορισμό της εξάπλωσης της πυρκαγιάς και του καπνού.

3.1.1 Μηχανικές ιδιότητες

Αν και η αντοχή σε εφελκυσμό είναι η πιο σημαντική παράμετρος για τη θραύση του γυαλιού σε υψηλές θερμοκρασίες, δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία στην βιβλιογραφία. Να σημειωθεί ότι θλιπτική αντοχή είναι πολύ μεγαλύτερη από την εφελκυστική, με τιμή 360 MPa, σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Wang et al, 2015).

Εφόσον οι ιδιότητες του γυαλιού δεν περιλαμβάνονται στις διατάξεις του Ευρωκώδικα, χρησιμοποιήθηκαν τιμές που προτείνονται στην βιβλιογραφία. Για τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του καθαρού γυαλιού επίπλευσης στις υψηλές θερμοκρασίες, οι Wang et al (2014a) διεξήγαγαν μια σειρά πειραματικών δοκίμων αμέσου εφελκυσμού. Μέσω μιας μηχανής εφελκυσμού (Material testing system 810 (MTS 810)), μέτρησε την εφελκυστική αντοχή ενός δοκιμίου γυαλιού, πάχους 6 mm, υπό κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες. Αρχικά ελέγχθηκαν δείγματα σε θερμοκρασίες 25 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C και 400 °C. Αφού διαπιστώθηκε ότι οι τάσεις που μετρήθηκαν στους 100 °C είναι σημαντικά μικρότερες από τις άλλες, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετα πειράματα για τις θερμοκρασίες των 75 °C, 125 °C και 150 °C. Το Σχήμα 3.1 απεικονίζει την τη μεταβολή της αντοχής του γυαλιού σε εφελκυσμό με την αύξηση της θερμοκρασίας. Δεδομένου δεν υπάρχουν δεδομένα για ενδιάμεσες τιμές, τα σημεία συνδέονται με ευθείες γραμμές, απλά για την διευκόλυνση στην συσχέτιση τους.



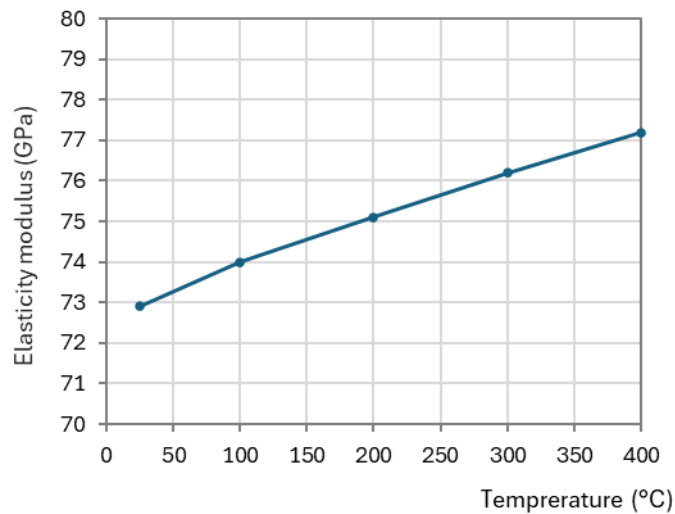
Σχήμα 3.1: Μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του γυαλιού επίπλευσης με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η αυξανόμενη θερμοκρασία μπορεί να αλλάξει τη μηχανική ιδιότητα του γυαλιού και να αστοχήσει πιο εύκολα. Η εφελκυστική αντοχή μεταβάλλεται από 26.6 έως 35.72 MPa, για τις συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασιών που διερευνήθηκαν στο πείραμα. Συγκεκριμένα, η εφελκυστική αντοχή σε θερμοκρασία δωματίου 25 °C είναι μεγαλύτερη κατά 22%, 26% και 19% από τις τιμές που μετρήθηκαν στους 75 °C, 100 °C και 125 °C, αντίστοιχα. Ακόμη και η αντοχή στους 200 °C, είναι 10% μικρότερη από εκείνη σε θερμοκρασία δωματίου.

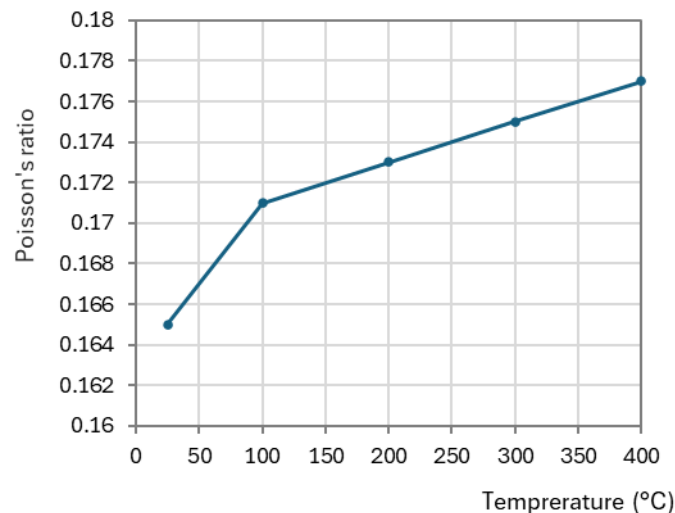
Στο ίδιο πείραμα καταγράφηκαν οι παραμορφώσεις θραύσης (Πίνακας 3.1). Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα η συμπεριφορά του γυαλιού είναι ψαθυρή. Συγκεκριμένα αρχικά παρουσιάζεται ένας γραμμικός ελαστικός κλάδος και για τιμή παραμόρφωσης ε_u επέρχεται η θραύση. Διαπιστώθηκε, επίσης, το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson ν δεν παρουσιάζουν αξιόλογη μεταβολή με τη θερμοκρασία (Σχήμα 3.2 και 3.3).

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού επίπλευσης σύμφωνα τα πειραματικά δεδομένα

	25 °C	100 °C	200°C	300°C	400°C
ε_u	4.90e-04	3.59e-04	4.26e-04	3.96e-04	3.86e-04
E (GPa)	72.90	74.00	75.10	76.20	77.20
σ_u (MPa)	35.72	26.60	32.00	30.16	29.78



Σχήμα 3.2: Μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού επίπλευσης.



Σχήμα 3.3: Λόγος Poisson του γυαλιού επίπλευσης.

3.1.2 Θερμικές ιδιότητες

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν τιμές που προτείνονται στην βιβλιογραφία (Wang and Hu, 2019), εφόσον ο Ευρωκώδικας δεν περιλαμβάνει συγκεκριμένες συστάσεις για τις θερμικές ιδιότητες του γυαλιού. Συγκεκριμένα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k για το γυαλί επίπλευσης θεωρήθηκε πως δε μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και ίσος με $0.94 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Η ειδική θερμότητα C είναι ίση με $820 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Η πυκνότητα του γυαλιού είναι ίση με 2500 kg/m^3 . Στην εργασία αυτή δεν λαμβάνεται υπόψιν η μεταβολή των ιδιοτήτων με τη

θερμοκρασία. Η εκπομπή ακτινοβολίας (ε) εκφράζεται με τον συντελεστή εκπομπής και για το γυαλί επίπλευσης θεωρήθηκε ίσος με 0.85 (Wang and Hu, 2019).

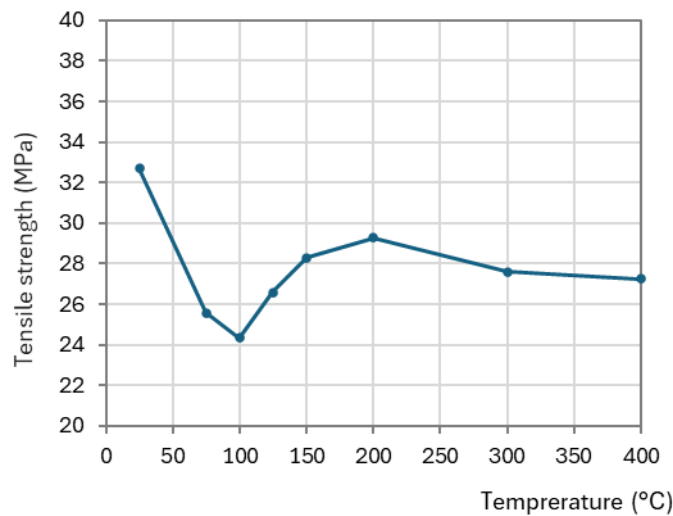
Με την αύξηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται αύξηση των διαστάσεων του στερεού σώματος, ιδιότητα που εκφράζεται με τη θερμική διαστολή $\Delta l/l$. Το πυριτικό γυαλί σόδα-άσβεστο έχει σταθερό συντελεστή στους 25-400 °C, 9.6×10^{-6} 1/K (Schmid et al, 1934). Ωστόσο, οι συγγραφείς μέτρησαν το μέσο συντελεστή θερμικής διαστολής α 8.46×10^{-6} 1/K, χρησιμοποιώντας διασταλόμετρο Netzsch (Wang et al, 2014a). Η μικρή διαφορά μπορεί να οφείλεται στη διαδικασία παρασκευής και τις πρώτες ύλες. Στα αριθμητικά προβλήματα, χρησιμοποιείται η μετρούμενη παράμετρος.

3.2 Επικαλυμμένο γυαλί χαμηλής εκπομπής (low-E glass)

Η κύρια διαφορά μεταξύ του γυαλιού χαμηλής εκπομπής (low-E glass) και του συνηθισμένου γυαλιού επίπλευσης είναι ότι η επιφάνεια του γυαλιού χαμηλής εκπομπής είναι επικαλυμμένη με ένα λεπτό φίλτρο μεμβράνης χαμηλής εκπομπής. Λόγω της παρουσίας αυτού του διαφανούς στρώματος μεμβράνης, το γυαλί έχει την ικανότητα να αντανakλά τη θερμική ακτινοβολία που προκαλείται από μία πυρκαγιά, δημιουργώντας μία σύνθεση με μειωμένη επιφανειακή εκπομπή. Ως αποτέλεσμα μειώνεται η μεταφορά θερμότητας στο γυαλί, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη συμπεριφορά κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς.

3.2.1 Μηχανικές ιδιότητες

Οι Wang et al (2014a) διερεύνησαν τον μηχανισμό θραύσης από δείγματα επικαλυμμένου γυαλιού, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C. Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η επιφανειακή επεξεργασία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αντοχή εφελκυσμού του γυαλιού, καθώς σε όλα τα δείγματα οι τάσεις θραύσης μειώνονται σταθερά από το γυαλί επίπλευσης στο επικαλυμμένο κατά 8.5%. Από τα πειράματα αυτά προέκυψε η εφελκυστική αντοχή του επικαλυμμένου γυαλιού σε υψηλές θερμοκρασίες, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Στην εργασία αυτή οι μηχανικές ιδιότητες του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson θεωρούνται ίδιες με το απλό, μη επικαλυμμένο γυαλί επίπλευσης.



Σχήμα 3.4: Εφελκυστική αντοχή για το επικαλυμμένο γυαλί σε υψηλές θερμοκρασίες

Είναι γενικά αποδεκτό ότι, οι γυάλινες ρωγμές επηρεάζονται από αρχικές ατέλειες, η πλειοψηφία των οποίων εντοπίζονται στην επιφάνεια. Ωστόσο, η διαδικασία κατασκευής επικαλυμμένων υαλοπινάκων παράγει σημαντικά περισσότερα και μεγαλύτερα μικροσκοπικά ελαττώματα στην επιφάνεια του γυαλιού, τα οποία ενδέχεται να μειώσουν την αντοχή του. Παρόλο που αυτές οι μικρορωγμές είναι αόρατες κάτω από ένα μικροσκόπιο, λόγω της περιορισμένης έκτασης τους, προκαλούν συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες μπορεί να είναι μεγαλύτερες από τις θεωρητικές, στο ίδιο σημείο. Αυτός πιστεύεται ότι είναι ο κύριος λόγος, κατά τον οποίο οι επιφανειακές επεξεργασίες μείωσαν την εφελκυστική αντοχή των δειγμάτων στο πείραμα. Επομένως, η περεταίρω επεξεργασία στο γυαλί μπορεί να βελτιστοποιεί τις θερμικές του ιδιότητες, αλλά αναπόφευκτα θα προκαλέσει αδυναμία στις γυάλινες προσόψεις, μειώνοντας την αντοχή τους κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς.

3.2.2 Θερμικές ιδιότητες

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Lu and Sun, 2021), ο συντελεστής εκπομπής του γυαλιού είναι σχετικά χαμηλός, με τιμή 0,25, γεγονός που σημαίνει ότι το 25% της θερμικής ακτινοβολίας απορροφάται και εκπέμπεται από το υλικό. Η θερμική αγωγιμότητα ισούται με 0.90 W/(m·K), η ειδική θερμότητα είναι ίση με 817 J/(kg·K) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι 9×10^{-6} 1/K. Η πυκνότητα του επικαλυμμένου γυαλιού θεωρήθηκε ίση με 2500 kg/m³, όπως και στο γυαλί επίπλευσης.

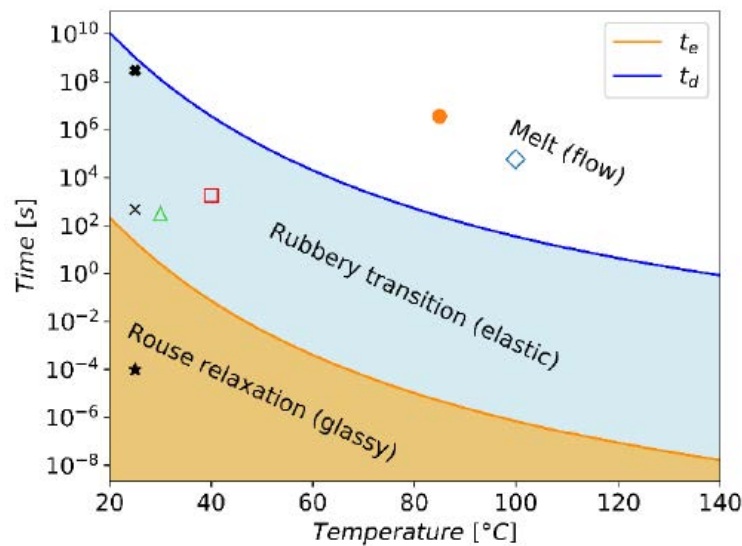
3.3 PVB (polyvinyl butyral) - Μεμβράνη πολυβινυλοβουτυράλης

Προκειμένου να διερευνηθεί αριθμητικά ο μηχανισμός θραύσης ενός πολυστρωματικού υαλοπίνακα στις υψηλές θερμοκρασίες, είναι απαραίτητη η μελέτη των ιδιοτήτων της ενδιάμεσης μεμβράνης PVB, που χρησιμοποιείται στη χημική ένωση των γυάλινων πάνελ. Η πολυβινυλοβουτυράλη μπορεί να οριστεί ως ένα άμορφο, τυχαίο και διαφανές πολυμερές που αποτελείται από τρία διαφορετικά μονομερή με ειδικές ιδιότητες. Σχηματίζεται από την αντίδραση πολυβινυλικής αλκοόλης με βουτανάλη. Η βινυλοβουτυράλη (76-80%) είναι μια υδρόφοβη ελαστική μονάδα και παρέχει καλή επεξεργασία και συμβατότητα με πολλούς πλαστικοποιητές, ενώ η αλκοόλη βινυλίου (18-22%) και το οξικό βινύλιο (1-2%) που είναι υδρόφιλες, παρέχουν υψηλή πρόσφυση σε ανόργανα υλικά όπως το γυαλί (Martín et al, 2019).

Αυτό το σύνθετο πολυμερές βελτιώνει σημαντικά την απόκριση του υαλοπίνακα τόσο πριν, όσο και μετά τη θραύση. Πριν από τη θραύση, παρέχει εξαιρετικές οπτικές και μηχανικές ιδιότητες στον πολυστρωματικό υαλοπίνακα, ενώ στην περίπτωση θραύσης του γυαλιού, οι νησίδες που δημιουργούνται παραμένουν προσκολλημένες στο ενδιάμεσο στρώμα μέσω διατμητικής αλληλεπίδρασης (Debuyser et al, 2016).

3.3.1 Μηχανικές ιδιότητες

Η μηχανική συμπεριφορά του έχει αποδειχθεί περίπλοκη. Το διάγραμμα στο Σχήμα 3.5, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον χρόνο εφαρμογής του φορτίου, είναι εξαιρετικά χρήσιμο για την κατανόηση των πιθανών μετασχηματισμών που μπορεί να βιώσει το PVB κατά τη διάρκεια της ζωής του. Στις υψηλές θερμοκρασίες, οι μηχανικές καταπονήσεις θα προκαλέσουν τρεις τύπους απόκρισης από το PVB: την υαλώδη (glassy), την ελαστική (rubber) και την υγρή (flow) κατάσταση (Moreno et al, 2022).



Σχήμα 3.5: Μετασχηματισμοί PVB.

Σε έναν πολυστρωματικό υαλοπίνακα, το κύριο υλικό που φέρει αντοχή είναι το γυαλί, ενώ το ενδιάμεσο στρώμα είναι ουσιαστικά αυτό που συμβάλει στην ακεραιότητα του σύνθετου υαλοπίνακα. Αποτελέσματα από πειραματικές δοκιμές δείχνουν ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, η μεμβράνη PVB αρχίζει να υφίσταται ερπυσμό ή αποσύνθεση υπό τη δύναμή της βαρύτητας, καθώς γίνεται πολύ μαλακή, επηρεάζοντας την συνεκτική συμπεριφορά της πολυστρωματικής μονάδας (Moreno et al, 2022).

Στην παρούσα εργασία, η μηχανική συμπεριφορά του PVB θεωρήθηκε ελαστική, με το μέτρο ελαστικότητας να λαμβάνεται ίσο με 5×10^7 Pa και τον λόγο Poisson να θεωρείται 0,49 (Wang and Hu, 2019).

3.3.2 Θερμικές ιδιότητες

Μολονότι το PVB δεν συμβάλει στην αντοχή του πολυστρωματικού υαλοπίνακα, είναι πολύ σημαντική η μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων του, καθώς συμμετέχει στο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος του πάχους του υαλοπίνακα (αγωγή). Στην εργασία αυτή θεωρήθηκαν οι εξής τιμές: πυκνότητα 1070 kg/m^3 , συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $0.221 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, ειδική θερμότητα $1100 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ και συντελεστή θερμικής διαστολής $4 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$ (Wang and Hu, 2019).

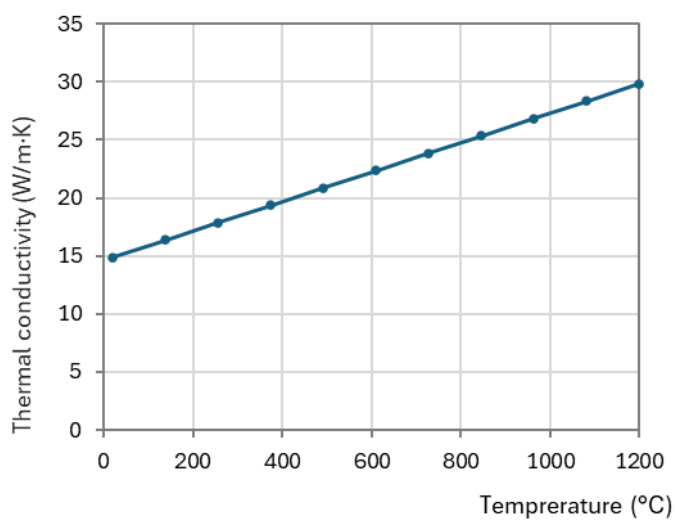
3.4 Ανοξείδωτος χάλυβας

Η στήριξη του συστήματος των υαλοπινάκων περιλαμβάνει μεταλλικά πλαίσια από ανοξείδωτο χάλυβα, τα οποία συναρμολογούνται περιμετρικά στις γυάλινες άκρες. Οι ιδιότητες των στοιχείων του κράματος προσδίδουν μεγάλη αντοχή στην οξείδωση, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες εντείνουν τις δονήσεις του πλέγματος και την κινητικότητα των ηλεκτρονίων, ενισχύοντας τη μεταφορά θερμότητας (αρκετά μεγάλος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας).

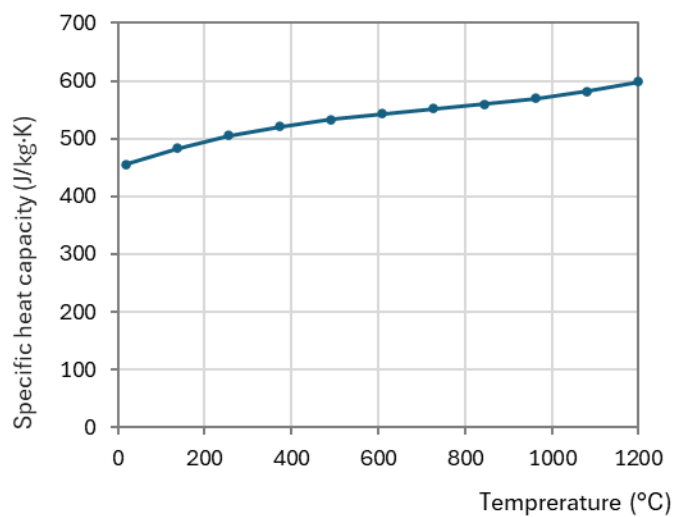
Για τη διερεύνηση του μηχανισμού θραύσης του γυαλιού, σε έναν πολυστρωματικό υαλοπίνακα, που είναι το κύριο ζητούμενο σε αυτήν την εργασία, η θερμική διαστολή ή η παραμόρφωση του πλαισίου δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στη μηχανική απόκριση του πάνελ. Επομένως οι μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα δεν μελετήθηκαν. Επίσης, να σημειωθεί ότι, το πλαίσιο δεν περιορίζει τον υαλοπίνακα να επεκταθεί, αφού η μέγιστη διαστολή του γυαλιού είναι μικρότερη από 1 mm, που είναι μικρότερη από το κανονικό χώρο που χρησιμοποιείται μεταξύ πλαισίου και υαλοπίνακα.

3.4.1 Θερμικές ιδιότητες

Η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμότητας του ανοξείδωτου χάλυβα σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-2, 2003) παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.6 και 3.7. Παρατηρείται πως αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που οφείλεται στις ιδιότητες των στοιχείων του κράματος. Ο συντελεστής εκπομπής είναι ίσος με 0.40 και η πυκνότητα του ανοξείδωτου χάλυβα είναι 7850 kg/m³.



Σχήμα 3.6: Θερμική αγωγιμότητα ανοξείδωτου χάλυβα.



Σχήμα3.7: Ειδική θερμότητα ανοξείδωτου χάλυβα.

Κεφάλαιο 4 Περιγραφή του προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια οι γυάλινες προσόψεις χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως κέλυφος των κτιρίων λόγω της υψηλής ενεργειακής τους απόδοσης αλλά και για λόγους αρχιτεκτονικής. Οι υαλοπίνακες αποτελούν τον πιο «αδύναμο κρίκο» της πρόσοψης ενός κτιρίου στην περίπτωση μιας πυρκαγιάς. Μπορούν εύκολα να σπάσουν, ακόμη και να καταρρεύσουν όταν υποβληθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ακεραιότητα της πρόσοψης, την επιτάχυνση της πυρκαγιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα και να αποτελέσει σοβαρό κίνδυνο για την απώλεια ανθρώπινων ζωών. Παρόλα αυτά η δομική τους πυρασφάλεια δεν καλύπτεται από τους σύγχρονους κανονισμούς.

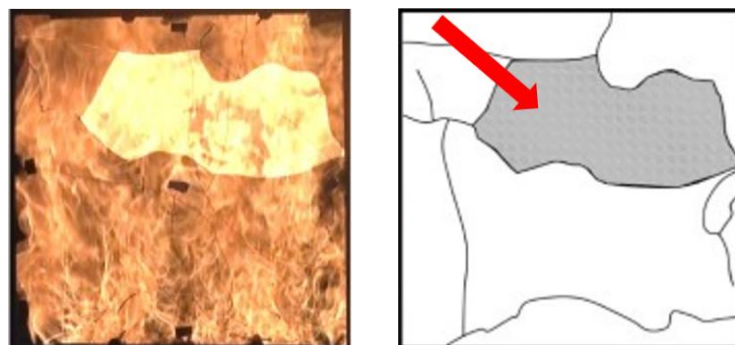
Αν και μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί εκτεταμένες έρευνες, ο μηχανισμός θερμικής θραύσης των υαλοπινάκων δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητός. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά του προβλήματος που παρουσιάζεται με την ένταξη των υαλοπινάκων στα σύγχρονα συστήματα προσόψεων κτιρίων, αλλά και οι τύποι που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία.

4.1 Φυσικό πρόβλημα

Το σύγχρονο κανονιστικό πλαίσιο (Ευρωκώδικες) δεν περιλαμβάνει ένα εξειδικευμένο πρότυπο που να αφορά αποκλειστικά την πυροπροστασία των γυάλινων προσόψεων. Ωστόσο, σχετικές απαιτήσεις καλύπτονται έμμεσα μέσω γενικών προβλέψεων για την πυραντοχή δομικών στοιχείων, κυρίως στο EN 1991-1-2 (EN 1991-1-2, 2001) και στο EN 1364 -Δοκιμές πυραντοχής για μη φέροντα στοιχεία (EN 1364-1, 2015, EN 1364-2, 2018, EN 1364-3, 2014 και EN 1364-4, 2014). Αν και τα πρότυπα αυτά καθορίζουν τις θερμικές δράσεις και τα κριτήρια πυραντοχής, η εφαρμογή τους στις γυάλινες προσόψεις, παραμένει περιορισμένη και σε πολλές περιπτώσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα. Η υφιστάμενη πρακτική βασίζεται κυρίως σε εθνικά προσαρτήματα, ειδικές δοκιμές πυρκαγιάς

προϊόντων και συστήματα ταξινόμησης (π.χ. E, I, R) , εστιάζοντας στην ακεραιότητα και τη θερμομόνωση. Σε υψηλά κτίρια εφαρμόζονται πρόσθετα μέτρα, όπως ζώνες πυραντοχής (spandrel panels), πυροφραγές και στρατηγικές διαμερισματοποίησης, ώστε να αντισταθμιστεί η περιορισμένη πυραντοχή των συμβατικών υαλοπινάκων. Παρ' όλα αυτά, η σύνθετη συμπεριφορά του γυαλιού υπό θερμική καταπόνηση—όπως η θερμική θραύση, η αποκόλληση των στρώσεων σε πολυστρωματικούς υαλοπίνακες και ο κίνδυνος πτώσης θραυσμάτων—δεν αντιμετωπίζεται επαρκώς στο υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο, αναδεικνύοντας την ανάγκη για ενιαία, εξειδικευμένα πρότυπα πυροπροστασίας γυάλινων προσόψεων.

Στην περίπτωση πυρκαγιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα, οι υαλοπίνακες δέχονται θερμική φόρτιση στην εσωτερική τους επιφάνεια. Λόγω της χαμηλής εφελκυστικής αντοχής του γυαλιού, τόσο στην κανονική θερμοκρασία όσο και στις υψηλές, πραγματοποιείται θραύση των υαλοπινάκων. Η θραύση του γυαλιού μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία «νησίδων» (Σχήμα 4.1), οι οποίες μπορεί να αποκολληθούν, αποτελώντας κίνδυνο για διερχόμενους περαστικούς, πυροσβεστικά σώματα, ομάδες διάσωσης κτλ. (Σχήμα 4.2). Ο νέος αεραγωγός που δημιουργείται από την αστοχία του γυαλιού οδηγεί επίσης σε διαφοροποίηση των συνθηκών αερισμού, γεγονός που αναμένεται να αλλάξει την εξέλιξη της πυρκαγιάς και την θερμοκρασία των θερμών αερίων στο πυροδιαμέρισμα, σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό.



Σχήμα 4.1: Δημιουργία «νησίδων».



Σχήμα 4.2: Πτώση υαλοπινάκων από πυρκαγιά διαμερίσματος.

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει δύο καταστροφικές πυρκαγιές που συνέβησαν αντίστοιχα στην Κίνα και το Ηνωμένο Βασίλειο τον Ιούνιο του 2017. Μπορεί να φανεί ότι, μετά την θραύση του γυαλιού από πυρκαγιά διαμερίσματος, η εξωτερική φλόγα έφτασε στους υαλοπίνακες στον επάνω όροφο, προκαλώντας μεγαλύτερη καταστροφή. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η συμπεριφορά θραύσης και ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας των υαλοπινάκων στο σύγχρονο περίβλημα του κτιρίου.



Σχήμα 4.3: Καταστροφικές πυρκαγιές που συνέβησαν τον Ιούνιο του 2017.

4.2 Σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση

Η μελέτη του μηχανισμού θραύσης των υαλοπινάκων κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς σε ένα διαμέρισμα προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Emmons (1986). Έκτοτε, η θερμική αντοχή

των υαλοπινάκων έχει προσελκύσει αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον, ως αποτέλεσμα της ευρείας χρήσης γυάλινων κατασκευαστικών στοιχείων στον σύγχρονο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Keski-Rahkonen, 1988, Skelly et al, 1991 και Pagni, 2002), ο μηχανισμός θραύσης ενός πλαισιωμένου υαλοπίνακα οφείλεται στις θερμικές τάσεις που δημιουργούνται από τις θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις, όταν είναι ανομοιόμορφα φορτισμένος. Επίσης, αποδεικνύεται ότι η κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υαλοπίνακα και της ψυχρής περιοχής που καλύπτει το πλαίσιο είναι 60-90 °C.

Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλά πειράματα διεξήχθησαν για να διερευνήσουν την συμπεριφορά θερμικής θραύσης του γυαλιού όταν εκτεθεί σε πυρκαγιά (Skelly et al, 1991, Harada et al, 2000, Shields et al, 2001 και Shields et al, 2002). Στις μετρήσεις τους ανέφεραν τους ρυθμούς απελευθέρωσης θερμότητας, τις θερμοκρασίες των θερμών αερίων, τις κατανομές της ροής θερμότητας, τις θερμοκρασίες της γυάλινης επιφάνειας, τις θερμοκρασίες των καλυπτόμενων περιοχών του υαλοπίνακα, τις θερμικές παραμορφώσεις, τα μοτίβα διάδοσης των ρωγμών και την απώλεια ακεραιότητας του συστήματος των υαλοπινάκων.

Επίσης μελετήθηκε το θερμοκρασιακό πεδίο και το πεδίο των θερμικών τάσεων στις υψηλές θερμοκρασίες με την χρήση αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων (Fischer-Cripps et al, 1995, Chow and Gao, 2008 και Tofilo and Delichatsios, 2010). Προκειμένου να προβλεφθεί η θερμική συμπεριφορά και ο χρόνος θραύσης του γυαλιού, αναπτύχθηκαν ορισμένα μοντέλα και τα κριτήρια θραύσης αυτών των μοντέλων βασίστηκαν στην θερμοκρασιακή κατανομή ή στη διαφορά θερμοκρασίας των υαλοπινάκων (Joshi and Pagni, 1991 και Pore and Bailey, 2007).

Σύγχρονες μελέτες (Wang and Hu, 2019), διεξήγαγαν πειράματα θερμικής θραύσης, χρησιμοποιώντας πυρκαγιές τύπου λίμνης και στην συνέχεια προσομοίωσαν τα πειράματα, δημιουργώντας αριθμητικά μοντέλα σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, για να την διακρίβωση του μηχανισμού θραύσης. Τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα συμπίπταν αρκετά καλά και με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατή η δημιουργία μοντέλων που θα μπορούσαν να προβλέψουν τη θερμική συμπεριφορά των υαλοπινάκων σε διαφορετικές

συνθήκες, όπως οι συνθήκες στήριξης (Wang et al, 2014b) ή θέση της πυρκαγιάς (Wang et al, 2016).

Ο τύπος υαλοπίνακα έχει πολύ σημαντική επιρροή στο μηχανισμό θραύσης του γυαλιού. Τα τελευταία χρόνια με τη συντρυπτική χρήση του γυαλιού στα σύγχρονα συστήματα προσόψεων, διαφορετικά είδη υαλοπινάκων γίνονται όλο και πιο δημοφιλή λόγω της καλής τους απόδοσης στη θερμότητα και στην ενέργεια, όπως οι επικαλυμμένοι, οι σύνθετοι υαλοπίνακες με ενδιάμεσο κενό αέρος και οι πολυστρωματικοί υαλοπίνακες. Οι Wang et al (2017) εξέτασαν τους παραπάνω υαλοπίνακες και συμπέραναν ότι οι σύνθετοι υαλοπίνακες με ενδιάμεσο κενό αέρος και οι πολυστρωματικοί υαλοπίνακες μπορούν να επιβιώσουν περισσότερο από το μονό υαλοπίνακα. Το κενό αέρος και το δεύτερο γυάλινο πάνελ μπορούν να λειτουργήσουν ως ασπίδα για το εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου. Αν και οι σύνθετοι υαλοπίνακες με ενδιάμεσο κενό αέρος έχουν την μεγαλύτερη πυραντοχή, οι ερευνητές αναγνώρισαν ότι οι πολυστρωματικές μονάδες είναι πιο ασφαλείς, καθώς έχουν την καλύτερη ικανότητα να διατηρούν την ακεραιότητα τους μετά τη θραύση.

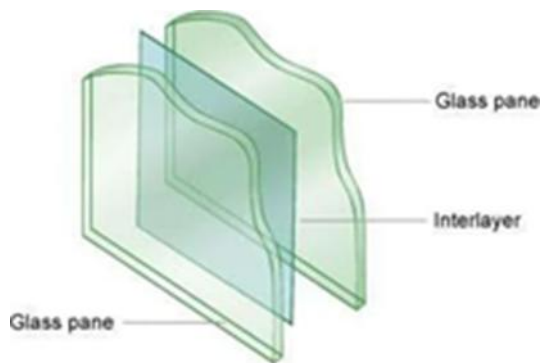
4.3 Τύποι υαλοπινάκων προς μελέτη

Η εργασία αυτή εστιάζει στους πολυστρωματικούς υαλοπίνακες, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από δύο ή περισσότερα πάνελ ανοπτημένου, επικαλυμμένου ή πλήρους σκληρυσμένου γυαλιού, συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω λεπτών φύλλων μεμβράνης PVB (Σχήμα 4.4). Το παρεμβαλλόμενο στρώμα επιτρέπει στον υαλοπίνακα να παραμορφώνεται ακόμα και μετά την θραύση, γεγονός που βοηθάει αποφυγή της ξαφνικής αστοχίας της πρόσοψης. Κατά αυτόν τον τρόπο το πολυστρωματικό γυαλί μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί ως φράγμα ακόμη και μετά τη θραύση του γυαλιού. Οι νησίδες παραμένουν στη θέση τους, καθώς συγκρατούνται μεταξύ τους από το PVB και ο κίνδυνος της δημιουργίας νέων ανοιγμάτων κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς μειώνεται σημαντικά.

Μεταξύ των πολυστρωματικών υαλοπινάκων θα μελετηθούν κυρίως οι υαλοπίνακες δύο στρώσεων (διστρωματικοί υαλοπίνακες), αλλά θα πραγματοποιηθούν και παραμετρικές μελέτες για μία, τρεις και τέσσερις στρώσεις. Οι τύπος γυαλιού που θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο είναι το ανοπτημένο γυαλί επίπλευσης, διότι το μέγεθος των νησίδων που δημιουργούνται κατά τη θραύση θεωρείται ιδανικό για την συγκράτηση των θραυσμάτων,

σε σύγκριση με το σκληρυμένο γυαλί, στου οποίου τα θραύσματα είναι πολύ μικρά. Επιπλέον, θα μελετηθεί το επικαλυμμένο γυαλί χαμηλής εκπομπής, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της επικαλυμμένης επιφάνειας στον μηχανισμό θραύσης της πολυστρωματικής μονάδας.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο αναφοράς ο χρόνος θραύσης και στα αποτελέσματα θα συμπληρωθούν η κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας ΔT , οι θερμοκρασίες των γυάλινων επιφανειών και η περιοχή εμφάνισης της πρώτης ρωγμής. Η διάδοση των ρωγμών είναι ένας βασικός μηχανισμός που οδηγεί σε αστοχία του γυαλιού. Ωστόσο η πρόβλεψη της διάδοσης είναι μία πολύ δύσκολη διαδικασία, καθώς απαιτεί βαθύτερες γνώσεις θραυστομηχανικής και δεν αποτελεί μέρος αυτής της εργασίας. Η γρήγορη αστοχία συμβαίνει γενικά μέσω ταχείας διάδοσης των ρωγμών. Συνεπώς το κύριο ερώτημα στην παρούσα εργασία είναι: πότε σπάει το γυαλί;



Σχήμα 4.4: Πολυστρωματικός υαλοπίνακας.

Κεφάλαιο 5 Αριθμητική προσομοίωση – Διακρίβωση αριθμητικού μοντέλου

Ο κύριος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει την διακρίβωση της ορθότητας της αριθμητικής προσομοίωσης, της θερμομηχανικής συμπεριφοράς ενός πολυστρωματικού υαλοπίνακα σε υψηλές θερμοκρασίες. Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκε ένα πείραμα που είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Wang and Hu, 2019), το οποίο αφορά έναν πολυστρωματικό υαλοπίνακα σε συνθήκες πυρκαγιάς τύπου λίμνης.

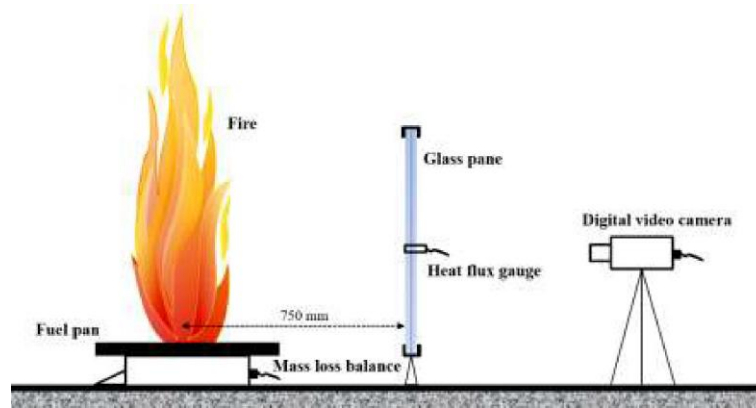
Το αριθμητικό μοντέλο αναπτύχθηκε μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό μη γραμμικής ανάλυσης MSC Marc (2020). Μετά την σύγκριση των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, αποδεικνύεται ότι το αριθμητικό μοντέλο είναι ικανό να προβλέψει τη θερμική και μηχανική συμπεριφορά του υαλοπίνακα και στην συνέχεια διεξάγεται μια παραμετρική μελέτη, η οποία παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.

5.1 Περιγραφή του πειράματος

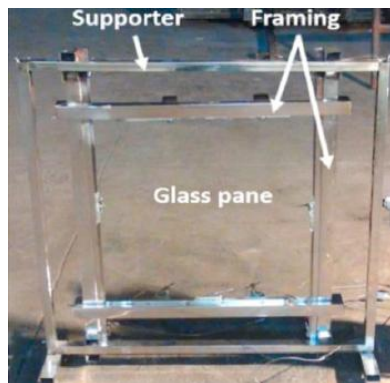
Η πειραματική εγκατάσταση αποτελούνταν από μία πυρκαγιά τύπου λίμνης που λειτουργεί ως πηγή θερμότητας, έναν πολυστρωματικό υαλοπίνακα σε πλαίσιο και το σύστημα οργάνων μέτρησης που κατέγραψε τη θερμοκρασία, το χρόνο θραύσης, τη θέση έναρξης της πρώτης ρωγμής και τη διάδοση της. Η πειραματική δοκιμή του πολυστρωματικού γυαλιού μπορεί να βρεθεί σε προηγούμενες εργασίες των συγγραφέων (Wang et al, 2017). Σε αυτή την εργασία οι βασικές πληροφορίες δίνονται παρακάτω.

5.1.1 Πειραματική διάταξη

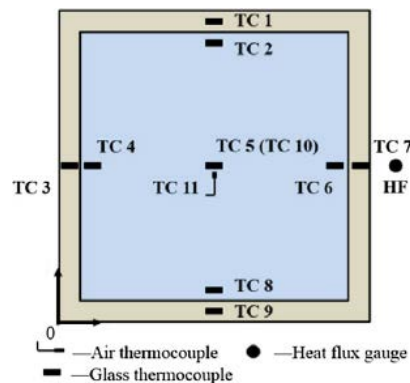
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1(α), ένα πάνελ πολυστρωματικού γυαλιού τοποθετήθηκε 20 cm πάνω από το έδαφος και 750 mm μακριά από μία τετραγωνική πυρκαγιά τύπου λίμνης διαστάσεων $500 \times 500 \text{ mm}^2$ με μάζα καυσίμου 4 kg, χρησιμοποιώντας καύσιμο που αποτελείται από 99% κλάσμα μάζας N-επτανίου. Ο υαλοπίνακας αποτελούνταν από δύο στρώσεις καθαρού γυαλιού επίπλευσης $600 \times 600 \times 6 \text{ mm}^3$ που συνδέονταν μεταξύ τους με μία ενδιάμεση στρώση μεμβράνης PVB 0.38 mm, δημιουργώντας συνολικό πάχος 12.38 mm (Σχήμα 5.2). Μια ψηφιακή κάμερα τοποθετήθηκε στην ψυχρή πλευρά του γυαλιού (ambient side) για να καταγράψει τον χρόνο θραύσης και τη διαδρομή. Η δοκιμή διήρκεσε 492 s.



(α) Πειραματική διάταξη

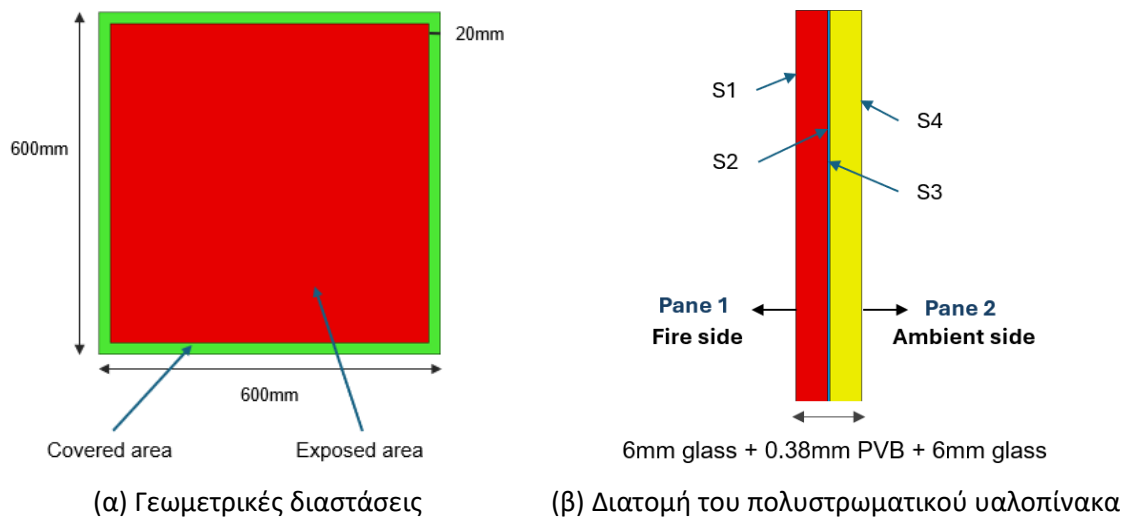


(β) Συναρμολόγηση του υαλοπίνακα



(γ) Κατανομή των οργάνων μέτρησης

Σχήμα 5.1: Αποτύπωση του πειραματικού συστήματος.



Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστικά του συστήματος.

Το γυάλινο πάνελ από τη θερμή πλευρά (fire side) ονομάστηκε Pane 1 και το πάνελ από την ψυχρή πλευρά (ambient side), Pane 2. Οι τέσσερις επιφάνειες του πολυστρωματικού γυαλιού ονομάστηκαν S1, S2, S3 και S4 από τη θερμή προς την ψυχρή πλευρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2(β).

Ένα καλά σχεδιασμένο πλαίσιο από ανοξείδωτο χάλυβα χρησιμοποιήθηκε για την στήριξη του υαλοπίνακα (Σχήμα 5.1(β)). Το πλάτος της καλυμμένης περιοχής (covered area) στην άκρη του γυαλιού ήταν 20 mm (Σχήμα 5.2(α)). Κατά την κατεύθυνση του πάχους, ο υαλοπίνακας στερεώθηκε χρησιμοποιώντας αρκετές λεπτές λωρίδες και η πίεση σύσφιξης η οποία μπορούσε να ελεγχθεί από περιστρεφόμενες βίδες. Ο σχεδιασμός αυτός εξασφάλισε ότι οι υαλοπίνακες ήταν κατάλληλα περιορισμένοι στις κατευθύνσεις x, y και z, έτσι ώστε οι συνοριακές συνθήκες μιας πραγματικής μονάδας υαλοπίνακα θα μπορούσαν να προσεγγιστούν καλύτερα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση του πλαισίου δε θα είναι σημαντική κάτω τέτοιες θερμοκρασίες. Το πλαίσιο δεν περιορίζει τον υαλοπίνακα, αφού η μέγιστη διαστολή του γυαλιού είναι μικρότερη από 1 mm, που είναι μικρότερη από το κανονικό κενό που χρησιμοποιείται μεταξύ πλαισίου και υαλοπινάκων. Αυτό θα μπορούσε να εξασφαλίσει ότι ο υαλοπίνακας θα ήταν ελεύθερος να διασταλεί στο πλαίσιο, έτσι ώστε η μηχανική επίδραση του πλαισίου στο γυαλί να είναι πολύ περιορισμένη.

Ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων με 16 κανάλια χρησιμοποιήθηκε ως θερμοστοιχεία, με το χρόνο δειγματοληψίας προσαρμοσμένο στα 1 s. Ένας υδρόψυκτος

μετρητής συνολικής ροής θερμότητας Gardon με εύρος μέτρησης 0-50 kW/m² χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της προσπίπτουσας ροής θερμότητας (incident heat flux). Οι μετρητές στερεώθηκαν στην πλευρά κάθε πάνελ και τοποθετήθηκαν στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια των γυάλινων διατομών, έτσι ώστε να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μετρήσιμη τοποθεσία. Καθώς είναι αδύνατο να τρυπηθεί το γυαλί για την τοποθέτηση των μετρητών, αυτή η μέθοδος θεωρείται επιθυμητή για τη μέτρηση της ροής θερμότητας του υαλοπίνακα.

Θερμοζεύγη τύπου K προσαρτήθηκαν στον υαλοπίνακα χρησιμοποιώντας κόλλα ανθεκτική σε υψηλές θερμοκρασίες και αριθμήθηκαν ως TC1-TC10 (Σχήμα 5.1(γ)). Μόνο το TC10 τοποθετήθηκε στην ψυχρή επιφάνεια (S4), ενώ τα άλλα εννέα θερμοστοιχεία κατανεμήθηκαν στη θερμή επιφάνεια (S1). Η καταγραφή δεδομένων για τις επιφάνειες S2 και S3 δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί. Τα θερμοζεύγη κατασκευάστηκαν από έναν επαγγελματία τοπικό κατασκευαστή, με εύρος μέτρησης 0-1200 °C και ευαισθησία 41 μV/°C. Λόγω της επίδρασης της ακτινοβολίας του καπνού/φωτιάς, η αβεβαιότητα της μετρούμενης θερμοκρασίας εκτιμήθηκε σε ±5%.

5.1.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Για το πείραμα καταγράφηκαν η προσπίπτουσα ροή θερμότητας, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας, η θερμοκρασία θερμού αερίου, οι θερμοκρασίες των γυάλινων επιφανειών και οι χρόνοι θραύσης των δύο πάνελ. Σε αυτή την εργασία ωστόσο, παρουσιάζονται μόνο οι θερμοκρασίες των επιφανειών και ο χρόνος θραύσης για τη διακρίβωση του αριθμητικού μοντέλου. Τα πειραματικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

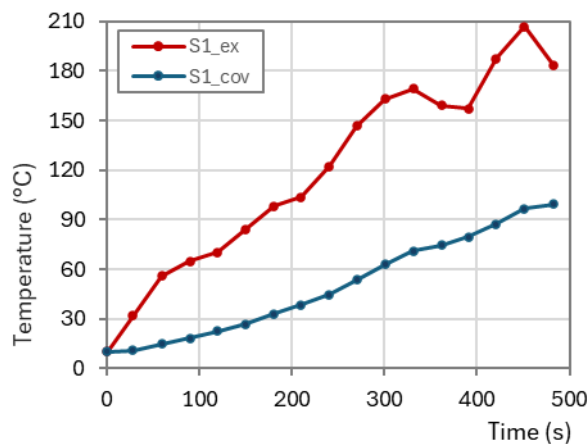
Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν σε διάφορα σημεία της εκτεθειμένης περιοχής (exposed area), συγκεκριμένα στα T2, T4, T5, T6 και T8, παρουσιάζουν μικρή διασπορά και είναι σχεδόν ταυτόσημες. Αυτό αποδίδεται στην τοποθέτηση της εστίας της πυρκαγιάς σε μικρή απόσταση από τον υαλοπίνακα, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός σχεδόν ομοιόμορφου θερμοκρασιακού πεδίου. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στις θερμοκρασίες που καταγράφηκαν κάτω από το πλαίσιο (covered area), στα σημεία T1, T3, T7 και T9. Συνεπώς, κατά την αριθμητική προσομοίωση, η θερμική φόρτιση θεωρήθηκε ομοιόμορφη στην εκτεθειμένη περιοχή και προσδιορίστηκε με βάση τον μέσο όρο των

θερμοκρασιών των T2, T4, T5, T6 και T8. Αντίστοιχα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των T1, T3, T7 και T9 για την προσομοίωση της θερμικής φόρτισης του υαλοπίνακα στις καλυμμένες περιοχές.

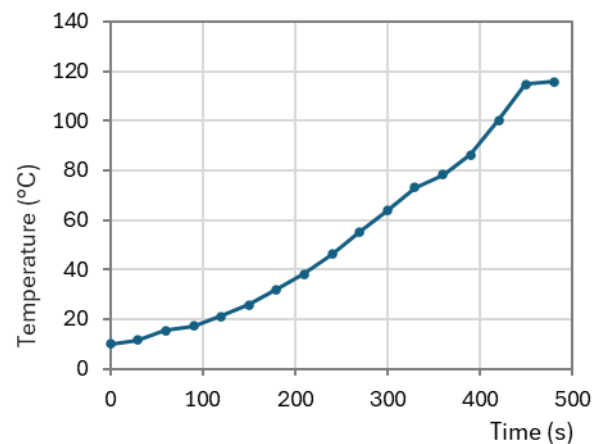
Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι χρονικά μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες των γυάλινων επιφανειών S1 (μέσοι όροι των αντίστοιχων σημείων στην εκτεθειμένη και την καλυμμένη περιοχή) και S4 που μετρήθηκαν στο πείραμα. Από το Σχήμα 5.3(α) φαίνεται η σημαντική διαφορά της θερμοκρασίας ΔT μεταξύ εκτεθειμένων και καλυμμένων περιοχών, η οποία έχει μεγάλη σημασία στον μηχανισμό θραύσης του υαλοπίνακα, όπως θα αποδειχθεί στην συνέχεια. Συγκεκριμένα η διαφορά θερμοκρασίας που μετρήθηκε στο πείραμα κατά το χρόνο εμφάνισης της πρώτης ρωγμής, στο Pane 1 είναι ίση με 79 °C (Πίνακας 5.1), η οποία συμφωνεί με την κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας των 60-90 °C από προηγούμενες εργασίες (Keski-Rahkonen, 1988, Skelly et al, 1991 και Pagni, 2002).

Πίνακας 5.1: Πειραματικά αποτελέσματα.

	Breakage time (s)	ΔT (°C)
Pane 1	258	79
Pane 2	332	-

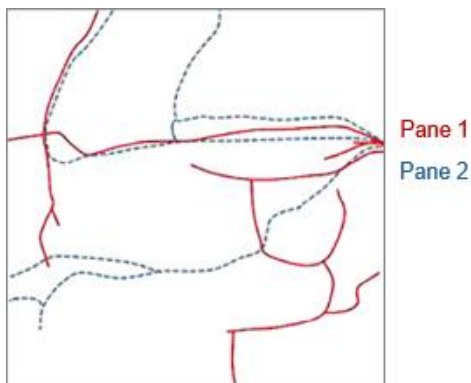


(α) Μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια S1

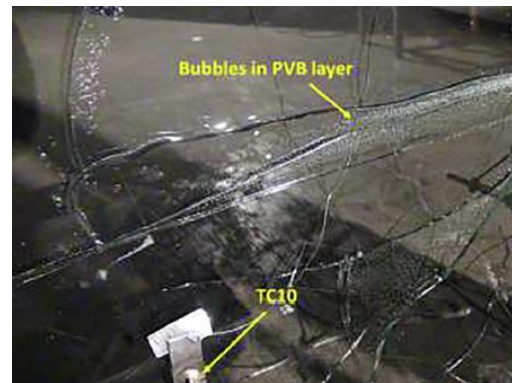


(β) Θερμοκρασία στο κέντρο της επιφάνειας S4

Σχήμα 5.3: Θερμοκρασίες του υαλοπίνακα σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα.



(α) Διαδρομή της ρωγμής των δύο πάνελ



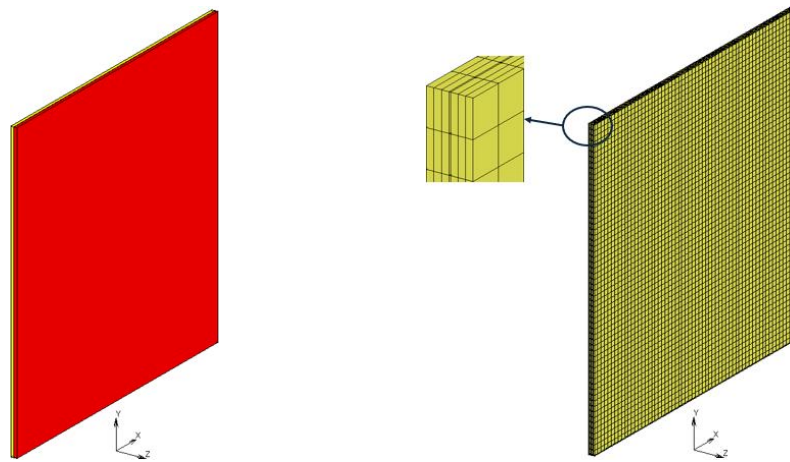
(β) Εμφάνιση φυσαλίδων στο στρώμα PVB

Σχήμα 5.4: Απεικόνιση του υαλοπίνακα μετά τη θραύση.

Το Σχήμα 5.4(α) δείχνει την διαδρομή της ρωγμής του πολυστρωματικού υαλοπίνακα. Παρόλο που και τα δύο πάνελ έσπασαν, μπορούσαν να συγκρατηθούν μεταξύ τους από το συνδετικό στρώμα μεμβράνης, αποτρέποντας τον σχηματισμό ενός νέου αεραγωγού. Δεδομένου ότι ο υαλοπίνακας ήταν καλυμμένος στις τέσσερις άκρες, η ρωγμή στο Pane 1 ξεκίνησε εκεί λόγω της ανομοιόμορφης θερμοκρασίας μεταξύ της εκτεθειμένης και καλυμμένης περιοχής. Η θέση έναρξης της ρωγμής στο Pane 2 ήταν σχεδόν η ίδια με το Pane 1 λόγω της στενής συγκόλλησης τους. Αέρια όπως υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα και υδροχλώριο ξεκίνησαν να εκπέμπονται από το παρεμβαλλόμενο στρώμα PVB, όταν η θερμοκρασία του έφτασε περίπου στους 200 °C. Έτσι, ένας μεγάλος αριθμός φυσαλίδων εμφανίστηκε στο ενδιάμεσο στρώμα μετά τη θέρμανση, ειδικά κατά μήκος της διαδρομής των ρωγμών, όπου μπορεί να περάσει περισσότερη θερμότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4(β).

5.2 Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου

Για την προσομοίωση του πειράματος αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο θερμομηχανικό μοντέλο στο προχωρημένο λογισμικό μη γραμμικής ανάλυσης MSC Marc (2020).



(α) Σχεδιασμός αριθμητικού μοντέλου (β) Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Σχήμα 5.5: Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στο Marc.

5.2.1 Διακριτοποίηση

Για τη δημιουργία ενός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα στερεά στοιχεία (Hex 8). Τα στοιχεία υποδιαιρέθηκαν σε μήκος (y) και πλάτος (x) ίσο με 10 mm και κατά το πάχος (z) δημιουργήθηκαν επτά πεπερασμένα στοιχεία (τρία για κάθε γυάλινο πάνελ-2 mm και ένα για την στρώση PVB-0.38 mm). Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα του πολυστρωματικού υαλοπίνακα που αποτελείται από 25200 στοιχεία και 37210 κόμβους.

5.2.2 Τύπος πεπερασμένων στοιχείων και ιδιότητες των υλικών

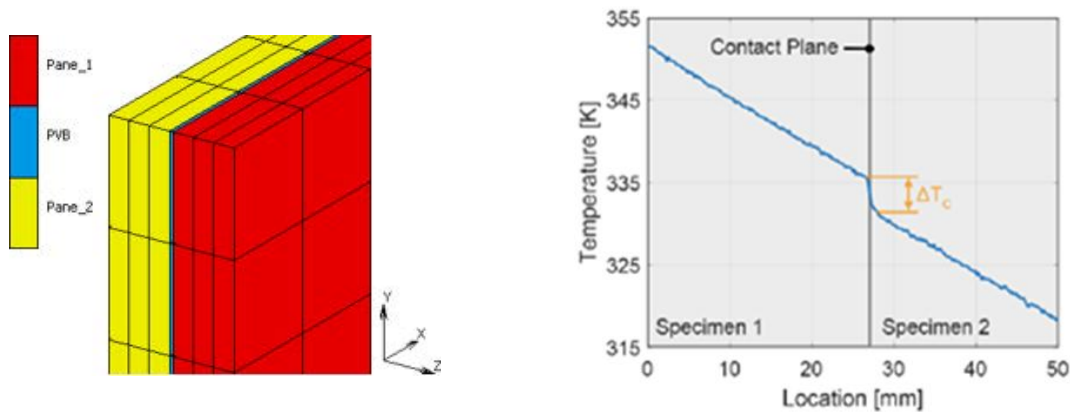
Αφού ορίστηκε η θερμομηχανική ανάλυση, ενσωματώθηκαν οι γεωμετρικές ιδιότητες και ο τύπος του στοιχείου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του στοιχείου 7 από τη βιβλιοθήκη του MSC Marc. Πρόκειται για ένα οκτακόμβο, ισοπαραμετρικό, αυθαίρετο εξαγωνικό (εξαεδρικό) στοιχείο. Καθώς το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί τριγραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής, οι παραμορφώσεις τείνουν να είναι σταθερές σε ολόκληρο το στοιχείο. Το στοιχείο αυτό προτιμάται έναντι στοιχείων ανώτερης τάξης όταν χρησιμοποιείται σε ανάλυση επαφής. Η δυσκαμψία του στοιχείου υπολογίζεται με χρήση ολοκλήρωσης κατά Gauss οκτώ σημείων. Επιπρόσθετα, ο τύπος του στοιχείου 43 χρησιμοποιήθηκε για την θερμική ανάλυση. Πρόκειται για ένα οκτακόμβο, ισοπαραμετρικό, αυθαίρετο εξαγωνικό (εξαεδρικό) στοιχείο, σχεδιασμένο για τρισδιάστατες εφαρμογές

μεταφοράς θερμότητας. Καθώς το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί τριγωνικές συναρτήσεις παρεμβολής, οι θερμικές κλίσεις τείνουν να είναι σταθερές σε ολόκληρο το στοιχείο. Το στοιχείο αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα θερμικής επαφής. Η αγωγιμότητα του στοιχείου υπολογίζεται με χρήση ολοκλήρωσης 8 σημείων κατά Gauss.

Οι ιδιότητες του γυαλιού επίπλευσης και του PVB που ενσωματώθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.

5.2.3 Συνθήκες επαφής

Προκειμένου να προσομοιωθεί η επαφή των υαλοπινάκων με το PVB, δημιουργήθηκαν τρία σώματα επαφής, δύο για τα γυάλινα πάνελ και ένα για το στρώμα PVB, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6(α). Ο τύπος επαφής ορίστηκε ως glue contact type, η οποία απαγορεύει τη σχετική μετακίνηση των κόμβων της διεπιφάνειας. Σχετικά με τη θερμική ανάλυση, η συνθήκη επαφής glue από προεπιλογή δεν ενεργοποιεί την εφαρμογή δεσμεύσεων (tyings), αλλά επιτρέπει την αλληλεπίδραση στη διεπιφάνεια επαφής μέσω της χρήσης ενός συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (contact heat transfer coefficient). Για μικρές ή μηδενικές τιμές του συντελεστή, τα σώματα συμπεριφέρονται πρακτικά σαν να είναι θερμικά μονωμένα. Πρακτικά ο συντελεστής προσομοιώνει τη μεταφορά θερμότητας από το ένα σώμα στο άλλο. Για να προσομοιωθεί η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των υλικών, ορίστηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ίσος με $800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε κατόπιν δοκιμών μέσω σύγκρισης των αριθμητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η εφαρμογή του έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός άλματος στην διεπιφάνεια. (Σχήμα 5.6(β)). Τέλος, δημιουργήθηκε ο πίνακας επαφών που αποτελείται από τα ζεύγη των διασυνδέσεων μεταξύ πάνελ και PVB.



(α) Σώματα επαφής

(β) Πτώση θερμοκρασίας στο επίπεδο επαφής

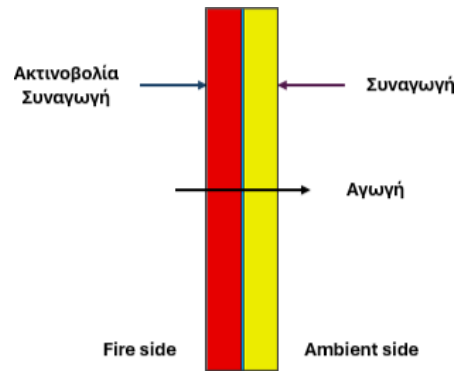
Σχήμα 5.6: Συνθήκες επαφής.

5.2.4 Θερμικές συνοριακές και αρχικές συνθήκες

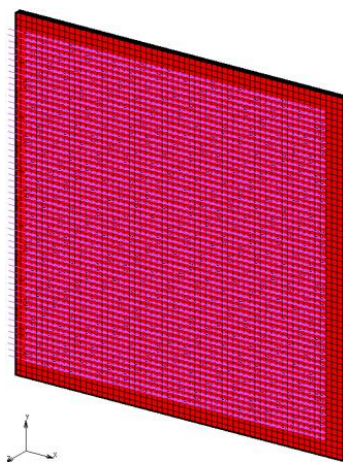
Στο πείραμα που είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία, η μετάδοση της θερμότητας στη θερμή επιφάνεια του υαλοπίνακα πραγματοποιείται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, ενώ η μετάδοση στην ψυχρή επιφάνεια μέσω αγωγής και συναγωγής. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συνοριακές συνθήκες:

- Εκτεθειμένη επιφάνεια S1: επιβεβλημένη θερμοκρασία στους κόμβους (οι μέσες θερμοκρασίες από τις μετρήσεις του πειράματος (Σχήμα 5.3).
- Καλυμμένη επιφάνεια S1: επιβεβλημένη θερμοκρασίας στους κόμβους (οι μέσες θερμοκρασίες από τις μετρήσεις του πειράματος (Σχήμα 5.3).
- Όλες οι υπόλοιπες εξωτερικές επιφάνειες: συνοριακή συνθήκη συναγωγής όπου η θερμοκρασία του αερίου θεωρήθηκε ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (10°C), εφόσον το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανοιχτό χώρο.

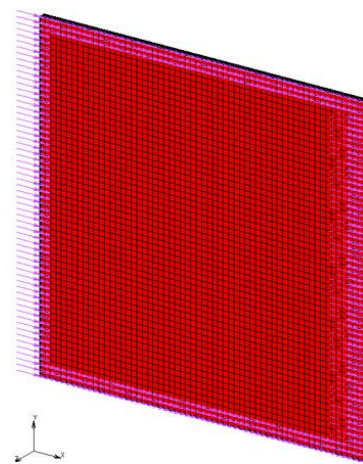
Σχετικά με τις αρχικές συνθήκες του μοντέλου, ορίστηκε αρχική θερμοκρασία ίση με 10 °C, η οποία εφαρμόστηκε σε όλους του κόμβους.



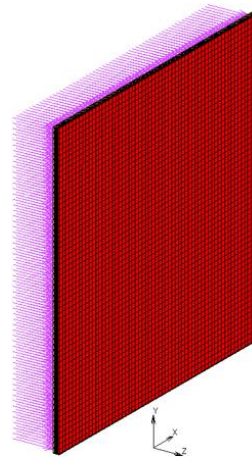
Σχήμα5.7: Μετάδοση της θερμότητας στο πολυστρωματικό μοντέλο.



(α) Θερμοκρασίες εκτεθειμένης περιοχής (S1)

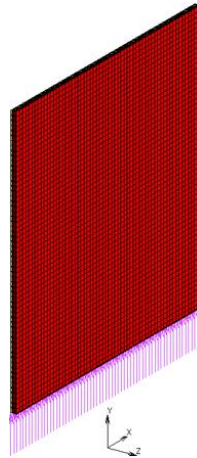


(β) Θερμοκρασίες καλυμμένης περιοχής (S1)



(γ) Θερμοκρασία θερμού αερίου (S4)

Σχήμα5.8: Θερμικές συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 5.9: Κάθετη στήριξη υαλοπίνακα.

5.2.5 Μηχανικές συνοριακές συνθήκες

Οι μηχανικές συνοριακές συνθήκες προσομοιώνονται με τις δεσμεύσεις των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας κατά τους άξονες x , y και z . Η κάθετη στήριξη του υαλοπίνακα διαμορφώθηκε περιορίζοντας την κατακόρυφη κίνηση (y) στην κάτω επιφάνεια του Pane 2 (Σχήμα 5.9). Κατά τον άξονα x , δεσμεύτηκε μόνο ένας κόμβος, για να αποφευχθεί η οριζόντια κίνηση στερεού. Για τον άξονα z , δεσμευτήκαν τέσσερις κόμβοι, ένας σε κάθε γωνία, έτσι ώστε ο υαλοπίνακας να μπορέσει να διογκωθεί.

5.2.6 Κριτήριο θραύσης

Αρχικά ως κριτήριο θραύσης επιλέχθηκε το κριτήριο της κύριας τάσης (Principal stress) που είναι διαθέσιμο στο MSC Marc (2020). Το κριτήριο αυτό ορίζει πως όταν η κύρια τάση γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή, επέρχεται η θραύση. Η οριακή τιμή αφαίρεσης στοιχείου (element removal threshold), χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την απομάκρυνση του στοιχείου (στο οποίο έχει εξαντληθεί η εφελκυστική αντοχή) από την ανάλυση. Το κριτήριο αυτό έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την πρόβλεψη του χρόνου θραύσης σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά μόνο για το πάνελ που βρίσκεται στην θερμή/μπροστινή πλευρά του υαλοπίνακα.

Για τον λόγο αυτό τελικά το γυαλί προσομοιώθηκε σαν υλικό χαμηλής εφελκυστικής αντοχής (low tension material). Στην περίπτωση αυτή, μια ρωγμή θα αναπτυχθεί κάθετα προς την κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης, εάν η μέγιστη κύρια τάση στο υλικό υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή. Το υλικό χάνει όλη την ικανότητα μεταφοράς φορτίου κατά μήκος

της ρωγμής, εκτός εάν οριστούν οι παράμετροι σχετικά με το tension softening. Η συμπεριφορά του softening χαρακτηρίζεται από έναν φθίνοντα κλάδο στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (στον εφελκυσμό). Στην εργασία αυτή ορίστηκε το softening modulus το οποίο εκφράζει την κλίση του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης του γυαλιού μετά την εξάντληση της εφελκυστικής του αντοχής. Συνήθως η τιμή του είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας. Στην συγκεκριμένη εργασία το softening modulus επιλέχθηκε ίσο με 104 Pa. Για τον ορισμό της τιμής του softening modulus πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές παραμετρικές αναλύσεις.

Επιπλέον ορίστηκε και η παράμετρος shear retention, η οποία εκφράζει τη μεταφορά της διάτμησης κατά το μήκος της ρωγμής και παρέχει πληροφορίες για την εξέλιξη της. Συνήθως παίρνει τιμές από 0 έως 1. Στην παρούσα εργασία, μέσω παραμετρικών αναλύσεων βρέθηκε πως η τιμή 0.5 είναι ικανοποιητική για το πρόβλημα που εξετάζεται.

5.3 Αριθμητική ανάλυση

Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η προσαρμοστική μέθοδος υπολογισμού βήματος φόρτισης (adaptive multi-criteria load stepping scheme). Το χρονικό βήμα ελέγχεται με κριτήρια που βασίζονται στην επανάληψη (recycling based criteria). Το βήμα μπορεί να ρυθμιστεί με βάση τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για την επίτευξη ισορροπίας. Το κριτήριο των επαναλήψεων για το βελτιωμένο σύστημα αυτόματων βημάτων λειτουργεί ως εξής: Για κάθε αύξηση, ανάλογα με το αρχικό βήμα και το ελάχιστο χρονικό βήμα, καθορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα ένας μέγιστος αριθμός περικοπών που σχετίζονται με την επανάληψη. Εάν μια αύξηση συγκλίνει σε λιγότερο από το επιθυμητό των ανακυκλώσεων, το χρονικό βήμα για την επόμενη αύξηση κλιμακώνεται χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή που καθορίζεται από το χρήστη. Εάν ξεπεραστεί ο επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων στην τρέχουσα αύξηση, το χρονικό βήμα μειώνεται με έναν αυτόματα καθορισμένο συντελεστή και ο πραγματικός αριθμός περικοπών που σχετίζεται με την ανακύκλωση, ενημερώνεται κατά 1. Για κάθε πρόσθετη περικοπή, το μέγεθος του συντελεστή μείωσης αυξάνεται προοδευτικά έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο χρονικό βήμα.

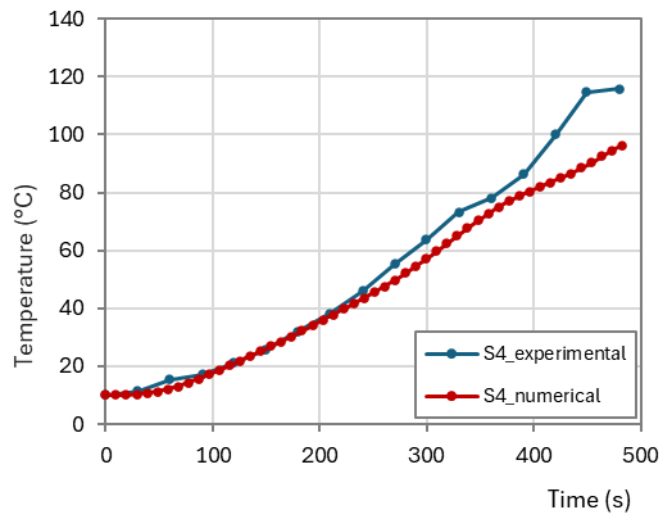
5.4 Σύγκριση αριθμητικών - πειραματικών αποτελεσμάτων

Για τη διακρίβωση της ορθότητας του αριθμητικού μοντέλου, συγκρίθηκαν τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα.

5.4.1 Επαλήθευση ορθότητας αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης

Προκειμένου να επαληθευθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης του θερμικού προσομοιώματος, η χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία που μετρήθηκε από το θερμοστοιχείο TC10, στο κέντρο του S4, συγκρίθηκε με το θερμοκρασιακό πεδίο από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 5.10). Μπορεί να φανεί ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν αρκετά καλά με τα πειραματικά, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο είναι ικανό να προβλέψει τη θερμοκρασιακή κατανομή των πλαισιωμένων υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10, η θερμοκρασία που μετρήθηκε στο πείραμα, είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αριθμητική, μετά από περίπου 400 s. Αυτό είναι πιθανό να προκλήθηκε από την άμεση θέρμανση που πέρασε από το περιβάλλον του PVB και τις ρωγμές, γύρω από το TC10 στο Pane 2, κάτι το οποίο δεν έχει ληφθεί υπόψη στην αριθμητική προσομοίωση. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι όλες οι ρωγμές εμφανίστηκαν πριν από τα 350 s, οπότε η απόκλιση δεν επηρεάζει την αριθμητική ανάλυση στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών θερμοκρασιών στο κέντρο του S4.

5.4.2 Επαλήθευση ορθότητας του μηχανισμού θραύσης

Για την επαλήθευση της ορθότητας της μηχανικής προσομοίωσης και του μηχανισμού θραύσης, οι χρόνοι θραύσης που προέκυψαν από την ανάλυση συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στον Πίνακα 5.2 συγκρίνονται οι χρόνοι θραύσης του πειράματος με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά κριτήρια θραύσης (Ενότητα 5.2.6). Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση του μοντέλου που εισάγει την παραμόρφωση θραύσης συμφωνούν αρκετά καλά με τα πειραματικά (με σφάλμα μικρότερα από 10% και για τα δύο πάνελ). Ως εξ τούτου, αυτή η μέθοδος επιλέγεται για την συνέχεια της μελέτης.

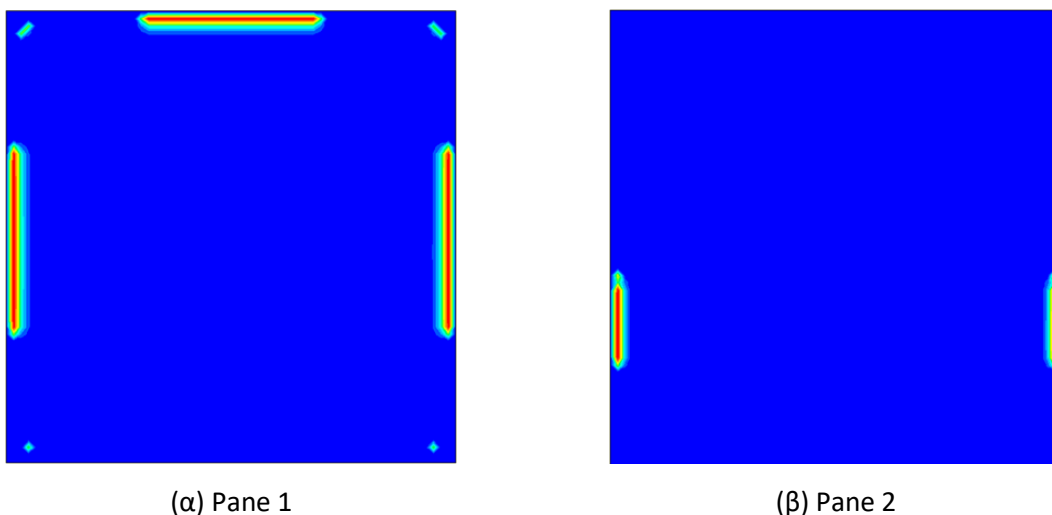
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ανάλυσης για δύο διαφορετικά κριτήρια θραύσης.

	Experimental	Numerical
Pane 1	258	227
Pane 2	332	-

(α) Μέθοδος με κριτήριο θραύσης κύριας τάσης

	Experimental	Numerical
Pane 1	258	237
Pane 2	332	305

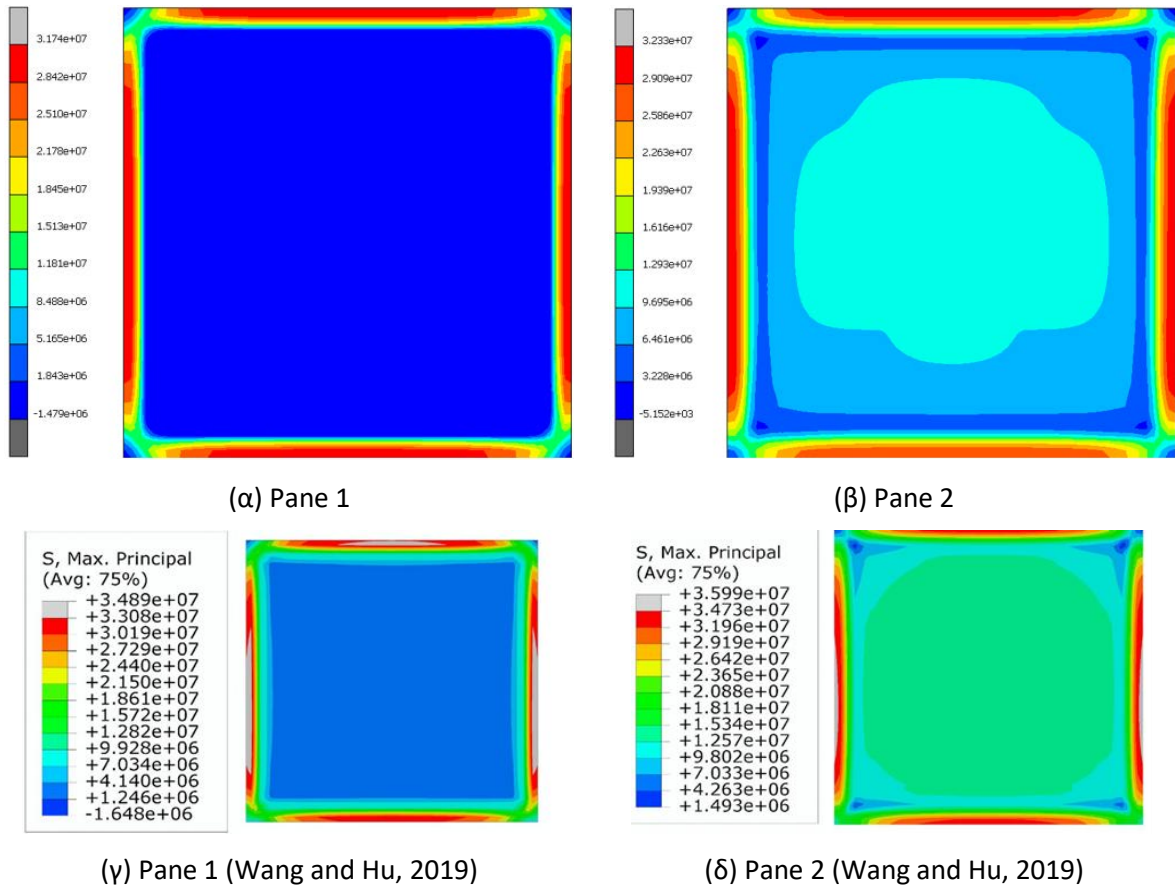
(β) Μέθοδος που εισάγει την παραμόρφωση θραύσης



Σχήμα 5.11: Περιοχή εμφάνισης της πρώτης ρωγμής.

Μόλις η μέγιστη κύρια τάση ξεπεράσει τη θερμικά μεταβαλλόμενη εφελκυστική αντοχή του γυαλιού, λαμβάνει χώρα η θραύση του υαλοπίνακα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Σχήμα 5.11), η εκκίνηση των ρωγμών εντοπίζεται στα άκρα του υαλοπίνακα και αυτό είναι σε απόλυτη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 5.4) όπου η πρώτη ρηγμάτωση εντοπίστηκε στο δεξί άκρο του μπροστινού/θερμού υαλοπίνακα. Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης υποδεικνύουν πως η ρηγμάτωση θα συμβεί ταυτόχρονα σε όλα τα άκρα του υαλοπίνακα. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν πρόκειται να συμβεί διότι η ρηγμάτωση θα ξεκινήσει ένα σημείο που υπάρχει μια αρχική ατέλεια. Στη συνέχεια λόγω της ρηγμάτωσης θα γίνει ανακατανομή της έντασης, επομένως δεν είναι σίγουρο ότι θα εμφανιστούν ρωγμές στα υπόλοιπα άκρα του υαλοπίνακα.

Το Σχήμα 5.12 απεικονίζει το πεδίο των μέγιστων κύριων τάσεων του Cauchy, την στιγμή της θραύσης για τα Pane 1 και Pane 2. Όπως φαίνεται η μέγιστη τάση εμφανίζεται στα άκρα του υαλοπίνακα. Επιπρόσθετα, στο ίδιο σχήμα περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης του ίδιου πειράματος που έχει διεξαχθεί στα πλαίσια της εργασίας των Wang and Hu (2019). Παρατηρείται πως το πεδίο των τάσεων που προέκυψε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι παρόμοιο με αυτό που προκύπτει από την βιβλιογραφία. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης και η θέση έναρξης της ρωγμής συμφωνεί αρκετά με τα πειραματικά αποτελέσματα, επιβεβαιώνοντας την αριθμητική προσομοίωση.



Σχήμα 5.12: Μέγιστη κύρια τάση του Cauchy.

Κεφάλαιο 6 Παραμετρική διερεύνηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς ISO

Με στόχο την τη ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς πλαισιωμένων υαλοπινάκων υπό συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO (EN 1991-1-2, 2001), αναπτύχθηκε ένα πιο σύνθετο μοντέλο. Το νέο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των υαλοπινάκων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την διερεύνηση της συμπεριφοράς διαφόρων τύπων υαλοπινάκων και τον προσδιορισμό της πυραντοχής τους. Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων αναδεικνύουν τις πιο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την πυραντοχή των υαλοπινάκων.

6.1 Περιγραφή του νέου αριθμητικού μοντέλου

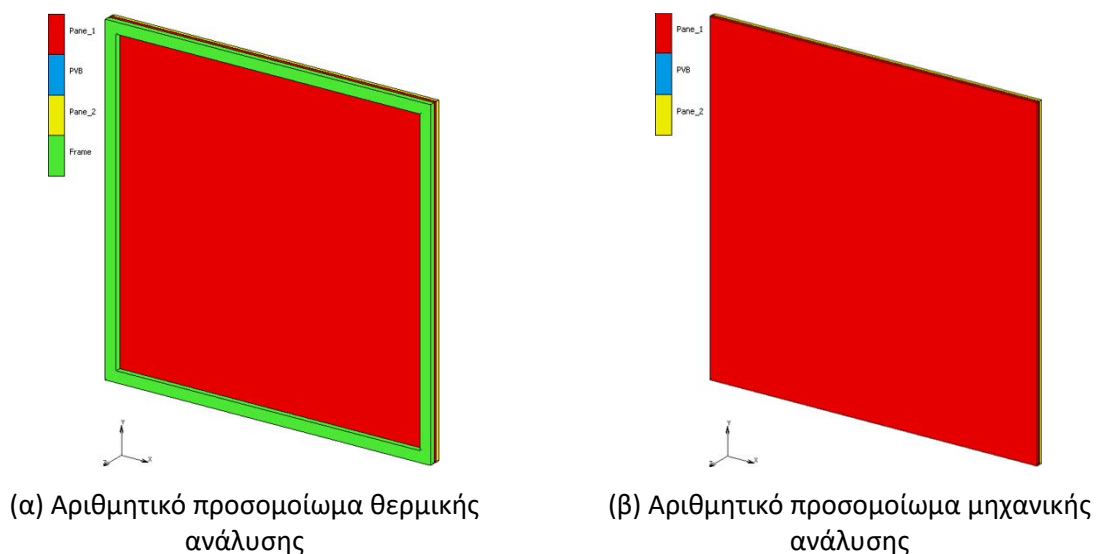
Εφόσον έχει γίνει η επαλήθευση της ορθότητας της προσομοίωσης, ο επόμενος στόχος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Για να γίνει αυτό πρέπει η θερμική φόρτιση να περιγράφεται από μια κανονιστική καμπύλης πυρκαγιάς και στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η πυρκαγιά ISO (EN 1991-1-2) που χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση της πυραντοχής των δομικών και μη-δομικών στοιχείων. Το αριθμητικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, βασίζεται στο προφίλ θερμοκρασίας της πειραματικής εργασίας που χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση της ορθότητας του και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια την μελέτη της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς ISO. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα νέο πιο σύνθετο μοντέλο που να μπορεί να δεχτεί την θερμική φόρτιση της ISO πυρκαγιάς.

Το νέο μοντέλο περιλαμβάνει το πλαίσιο ανοξείδωτου χάλυβα (πάχους 1 cm), έτσι ώστε να προσομοιωθεί η σκίαση που εισάγεται. Για να αποφευχθούν αριθμητικά προβλήματα που εμφανίζονται λόγω της επαφής του πλαισίου με τον υαλοπίνακα,

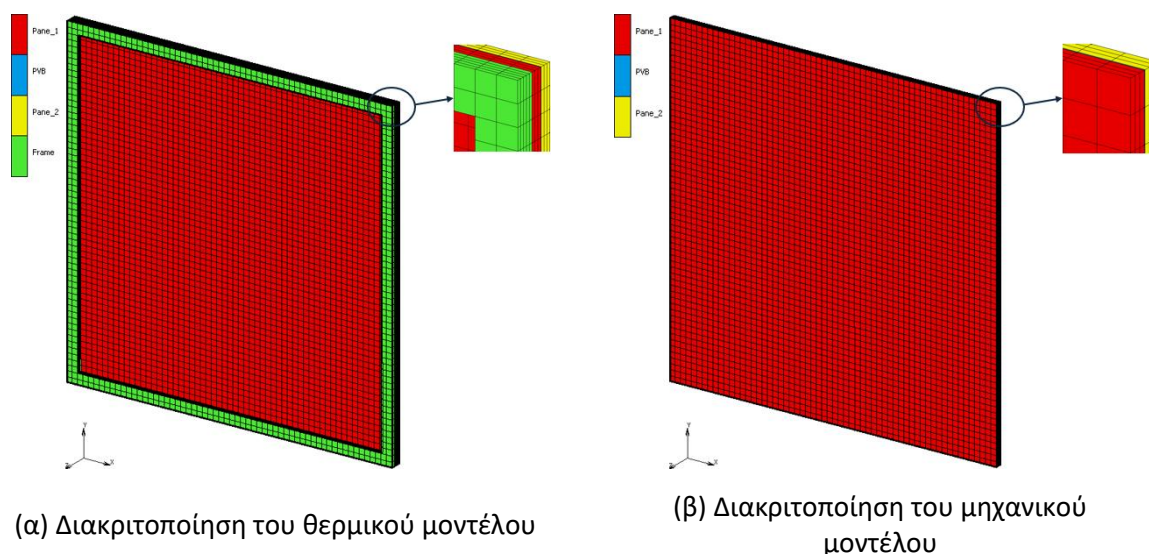
αποφασίστηκε να γίνει διάσπαση της επίλυσης του θερμομηχανικού προβλήματος σε θερμική και μηχανική ανάλυση (Σχήμα 6.1) δηλαδή να επιλυθούν χωριστά τα δύο προβλήματα. Η θερμική ανάλυση είναι αυτή που ενσωματώνει το πλαίσιο και το αποτέλεσμα της είναι η χρονοϊστορία του θερμικού πεδίου του υαλοπίνακα. Η χρονοϊστορία αυτή εισάγεται στην μηχανική ανάλυση μέσω της λειτουργίας Map temperature που είναι διαθέσιμη στο MSC Marc (2020). Μέσω αυτής της λειτουργίας σε κάθε κόμβο επιβάλλεται η χρονοϊστορία της θερμοκρασίας που έχει προκύψει από την θερμική ανάλυση. Στην περίπτωση διαφορετικής διακριτοποίησης του χρονικού βήματος, γίνεται γραμμική παρεμβολή.

6.1.1 Διακριτοποίηση και τύπος πεπερασμένων στοιχείων

Για τη δημιουργία του τρισδιάστατου πλέγματος χρησιμοποιήθηκε ο τύπος στοιχείου 43 για το θερμικό προσομοίωμα και ο τύπος 7 για το μηχανικό όπως περιγράφεται με λεπτομέρεια στην Ενότητα 5.2.2. Η διακριτοποίηση έγινε με τον ίδιο τρόπο που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο και κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τα πεπερασμένα στοιχεία, διαστάσεων 10 x 10 x 2 mm για τα γυάλινα πάνελ, 10 x 10 x 1 mm για το PVB και 10 x 10 x 2 mm για το πλαίσιο (Σχήμα 6.2). Το θερμικό μοντέλο αποτελείται από 27520 στοιχεία και 41386 κόμβους και το μηχανικό μοντέλο από 25200 στοιχεία και 37210 κόμβους.



Σχήμα 6.1: Διάσπαση θερμομηχανικού προβλήματος.



Σχήμα 6.2: Διακριτοποίηση αριθμητικών μοντέλων.

6.1.2 Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες των υλικών

Για την γεωμετρία των μοντέλων ορίστηκαν τρισδιάστατα στερεά στοιχεία, ενώ οι ιδιότητες του καθαρού γυαλιού επίπλευσης, του PVB και του ανοξειδωτού χάλυβα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.

6.1.3 Συνθήκες επαφής

Για την προσομοίωση της επαφής των υαλοπινάκων με το PVB και το πλαίσιο, δημιουργήθηκαν τέσσερα παραμορφώσιμα σώματα επαφής (deformable contact bodies). Δύο παραμορφώσιμα σώματα επαφής αντιστοιχούν στα γυάλινα πάνελ Pane 1 και Pane 2, ένα παραμορφώσιμο σώμα επαφής στο PVB και ένα στο πλαίσιο (Frame). Στη συνέχεια ορίστηκε ο τρόπος αλληλεπίδρασης των επαφών. Για τη θερμική ανάλυση, θεωρήθηκε ότι τα σώματα ακουμπούν μεταξύ τους (touching contact type), έτσι ώστε να προσομοιωθεί η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των στρωμάτων με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $800 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Για το μηχανικό πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος επαφής που δεν επιτρέπει την σχετική μετακίνηση των κόμβων της διεπιφάνειας (glued contact type). Τέλος, δημιουργήθηκε ο πίνακας επαφών που αποτελείται από τα ζεύγη των διασυνδέσεων μεταξύ πάνελ, PVB και πλαισίου.

6.1.4 Θερμικές συνοριακές συνθήκες

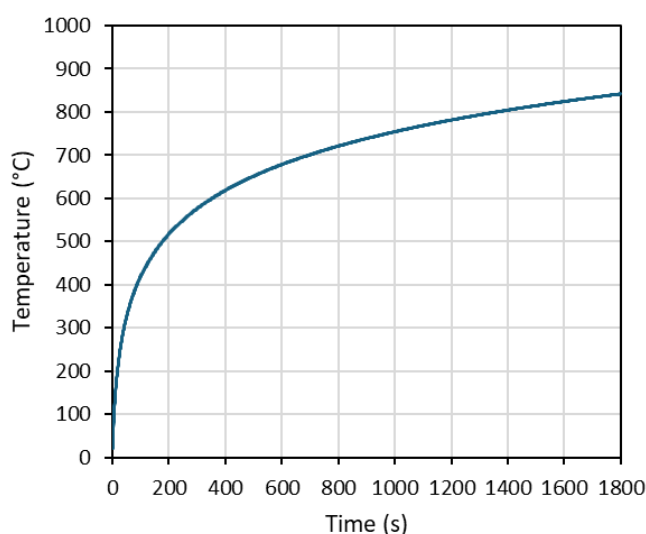
Για την προσομοίωση της πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου ISO-834 (EN 1991-1-2, 2001), η οποία αντιπροσωπεύει μια πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά σε ένα πυροδιαμέρισμα και εκφράζεται με τη μαθηματική σχέση:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (6.1)$$

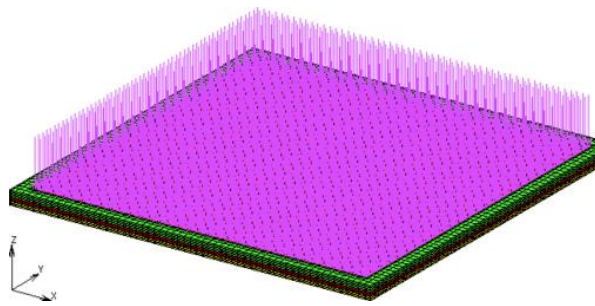
όπου θ_g είναι η θερμοκρασία αερίου σε °C και t ο χρόνος σε min. Για τη θερμική φόρτιση του θερμικού μοντέλου ορίστηκε χρόνος $t = 1800$ s και προκύπτει η καμπύλη πυρκαγιάς που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3, με αρχική θερμοκρασία 20 °C.

Στη θερμή πλευρά του μοντέλου (μπροστινή πλευρά) και δημιουργήθηκαν δύο συνοριακές συνθήκες, οι οποίες προσομοιώνουν τη μετάδοση της θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας στον υαλοπίνακα και στο πλαίσιο (Σχήμα 6.4α-β). Για την συνοριακή συνθήκη της συναγωγής, η θερμοκρασία του θερμού αερίου εισάγεται μέσω της καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου της ISO και ο συντελεστής συναγωγής είναι ίσος με 25 W/(m²·K). Για την συνοριακή συνθήκη της ακτινοβολίας, η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας είναι η πυρκαγιά ISO. Στις υπόλοιπες πλευρές προσομοιώνεται η συνοριακή συνθήκη της συναγωγής όπου η θερμοκρασία του αερίου είναι ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (20°C) και ο συντελεστής συναγωγής είναι ίσος με 4 W/(m²·K) (Σχήμα 6.4γ).

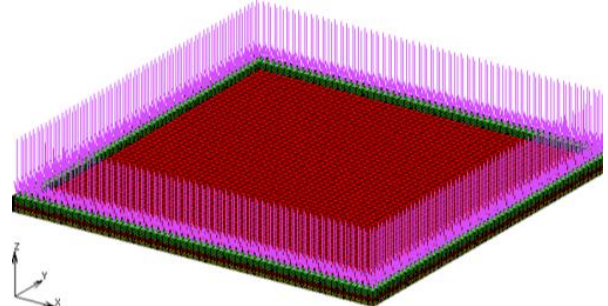
Τα αποτελέσματα από τη θερμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν ως χρονοϊστορία (map temperature) και εφαρμόστηκαν σε όλους τους κόμβους του μηχανικού προσομοιώματος.



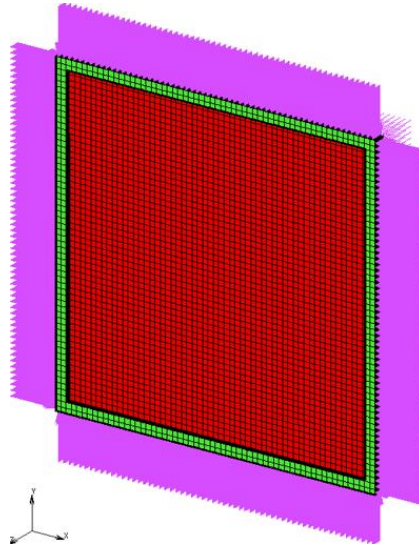
Σχήμα 6.3: Θερμική φόρτιση μέσω πρότυπης καμπύλης ISO.



(α) Θερμική φόρτιση υαλοπίνακα



(β) Θερμική φόρτιση πλαισίου

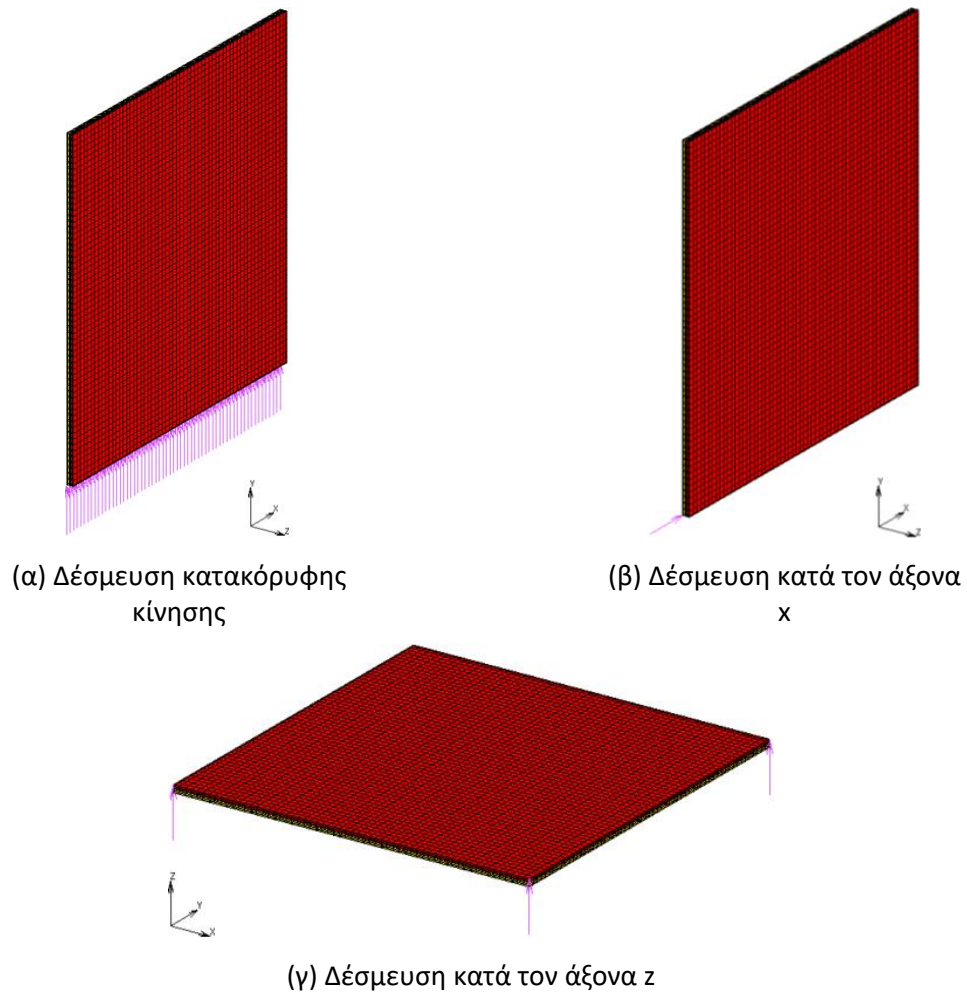


(γ) Θερμοκρασία θερμού αερίου στις ψυχρές επιφάνειες του συστήματος

Σχήμα 6.4: Συνοριακές συνθήκες θερμικού μοντέλου.

6.1.5 Μηχανικές συνοριακές συνθήκες

Οι μηχανικές συνοριακές συνθήκες του μηχανικού μοντέλου προσομοιώνονται με τις δεσμεύσεις των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας κατά τους άξονες x , y , z . Η κάθετη στήριξη του υαλοπίνακα διαμορφώθηκε περιορίζοντας την κατακόρυφη κίνηση (y) της κάτω επιφάνειας του Pane 2 (Σχήμα 6.5α). Κατά τον άξονα x , δεσμεύτηκε μόνο ένας κόμβος, για να την δέσμευση της κίνησης του στερεού (Σχήμα 6.5β). Το ίδιο συμβαίνει και για τον άξονα z , όπου δεσμευτήκαν τέσσερις κόμβοι, ένας σε κάθε γωνία του Pane 1, (Σχήμα 6.5γ).



Σχήμα 6.5: Συνοριακές συνθήκες μηχανικού μοντέλου.

6.1.6 Κριτήριο θραύσης

Το γυαλί προσομοιώθηκε ως υλικό χαμηλής εφελκυστικής αντοχής όπως περιγράφεται στην Ενότητα 5.2.6.

6.2 Αριθμητική ανάλυση

Η αριθμητική ανάλυση περιγράφεται στην Ενότητα 5.3.

6.3 Διερεύνηση μηχανισμού θραύσης

Η ενότητα αυτή εμβαθύνει στο μηχανισμό θραύσης των πλαισιωμένων υαλοπινάκων, κατά την έκθεση τους σε πυρκαγιά, από τη μία όψη τους. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση επικεντρώνεται σε έναν υαλοπίνακα εγκατεστημένο μέσα σε ένα πλαίσιο, το οποίο είναι

συνήθως κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα ή αλουμίνιο. Το μεγαλύτερο μέρος του υαλοπίνακα εκτίθεται απευθείας στην πυρκαγιά (exposed area), εκτός από την περιοχή που βρίσκεται κάτω από το πλαίσιο (καλυμμένη περιοχή–covered area). Το πλάτος του πλαισίου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 15-30 mm. Προκειμένου να προσεγγιστούν ρεαλιστικά οι συνοριακές συνθήκες θεωρείται ότι, ο υαλοπίνακας διαστέλλεται ελευθέρα αγνοώντας τη μηχανική επίδραση του πλαισίου.

Ο πλαισιωμένος υαλοπίνακας που εκτίθεται σε φωτιά, σπάει γρήγορα, λόγω του εφελκυσμού που προκαλείται στην ψυχρή καλυμμένη άκρη, από τη θερμική διαστολή της θερμότερης περιοχής. Πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι, το γυαλί σπάει σε μία μικρή ατέλεια, περίπου στη μέση, σε μία από τις τέσσερις καλυμμένες άκρες (Wang and Hu, 2019).

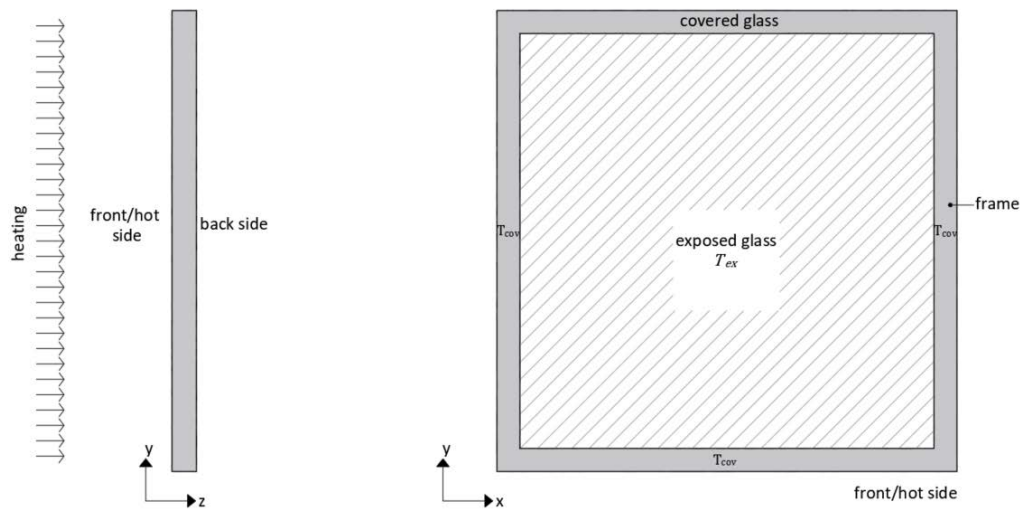
Μια πολύ απλή λύση στο πρόβλημα μπορεί να προκύψει υποθέτοντας ότι, η θερμοκρασία του καλυμμένου γυαλιού T_{cov} είναι ομοιόμορφη (Σχήμα 6.6). Λαμβάνοντας υπόψη την εφελκυστική αντοχή του γυαλιού $\sigma_{tu} = 35 \text{ MPa}$ και το μέτρο ελαστικότητας $E = 70 \text{ GPa}$, η ελαστική παραμόρφωση που απαιτείται για τη θραύση του υαλοπίνακα είναι:

$$\varepsilon_{cr}^{el} = \frac{\sigma_{tu}}{E} = 0.05\% \quad (6.2)$$

Επομένως, η θερμοκρασιακή διαφορά στην κατεύθυνση x ή y που απαιτείται για τη δημιουργία της κρίσιμης παραμόρφωσης είναι:

$$\Delta T_{x \text{ or } y} = T_{ex} - T_{cov} = \frac{\varepsilon_{cr}^{el}}{\alpha} \approx 60^\circ \text{C} \quad (6.3)$$

όπου ε_{cr}^{el} είναι η κρίση ελαστική παραμόρφωση που προκαλείται λόγω της επίπεδης θερμοκρασιακής διαφοράς $\Delta T_{x \text{ or } y}$ και α ο γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής, για το γυαλί επίπλευσης $\alpha \approx 8.46 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.



Σχήμα 6.6: Θερμή πλευρά του πλαισιωμένου υαλοπίνακα (ομοιόμορφη θερμοκρασία στην καλυμμένη περιοχή).

Σε πρακτικές εφαρμογές, η θερμοκρασία στην καλυμμένη επιφάνεια είναι συνήθως ανομοιόμορφη και μειώνεται σταδιακά προς τις άκρες. Η λύση της Εξ. (6.3) μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δισδιάστατο μοντέλο, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση στην κατεύθυνση z ή σε πολύ λεπτά γυαλίνα πάνελ, όπου η θερμοκρασία παραμένει ομοιόμορφη κατά το πάχος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η αστοχία του γυαλιού οφείλεται στην επίπεδη θερμοκρασιακή διαφορά ($\Delta T_{x/y}$), χωρίς την επιρροή της θερμοκρασιακής κλίσης κατά το πάχος του υαλοπίνακα. Ωστόσο, οι υαλοπίνακες που χρησιμοποιούνται στην πράξη δεν είναι πολύ λεπτοί και το θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος του πάχους είναι ανομοιόμορφο. Επομένως, η προηγούμενη λύση δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα.

Ως αποτέλεσμα του ανομοιόμορφου θερμοκρασιακού προφίλ κοντά στην άκρη της επιφάνειας του γυαλιού και κατά το πάχος, κάθε στοιχείο τείνει να διαστέλλεται κατά διαφορετική ποσότητα, ανάλογη με τη δική του αύξηση της θερμοκρασίας. Τα διαφορετικού μεγέθους στοιχεία που προκύπτουν, δεν μπορούν να ταιριάζουν μεταξύ τους, αλλά το σώμα πρέπει να παραμείνει συνεχές. Επομένως, κάθε στοιχείο πρέπει να συγκρατεί τις παραμορφώσεις των γειτονικών στοιχείων και για το λόγο αυτό αναμένεται να εμφανιστούν τάσεις (θερμικές τάσεις).

Στις επόμενες ενότητες, περιγράφεται λεπτομερώς η συμπεριφορά ενός υαλοπίνακα υπό ανομοιόμορφη θερμοκρασία στις κατευθύνσεις x , y και z , με σκοπό να εξηγηθεί ο μηχανισμός θραύσης του.

6.3.1 Λεπτός υαλοπίνακας με ανομοιομορφή θεοκρασία εντός επιπέδου

Υποθέτοντας έναν πολύ λεπτό υαλοπίνακα, η θερμοκρασιακή κλίση στην κατεύθυνση z , μπορεί να αγνοηθεί, και το πρόβλημα γίνεται δισδιάστατο. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να εξεταστεί ένα απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ των εκτεθειμένων και καλυμμένων περιοχών (Σχήμα 6.7). Οι δύο περιοχές του υαλοπίνακα (εκτεθειμένη-exposed και καλυμμένη-covered) προσομοιώνονται από δυο ραβδωτά στοιχεία, ίσου μήκους l , κατασκευασμένα από το ίδιο γραμμικό ελαστικό υλικό, που χαρακτηρίζεται από ένα μέτρο ελαστικότητας E και ένα συντελεστή θερμικής διαστολής α . Στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψη μόνο η αξονική δυστένεια των ράβδων. Οι επιφάνειες των διατομών, των εκτεθειμένων και καλυμμένων ράβδων είναι A_{ex} και A_{cov} , αντίστοιχα. Οι αξονικοί βαθμοί ελευθερίας των ράβδων που συνδέονται αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες συμβιβαστού του συνεχούς σώματος.

Οι ράβδοι υποβάλλονται σε μεταβολή της θερμοκρασίας (T_{ex} και T_{cov}). Εφαρμόζοντας την εξίσωση στατικής ισορροπίας, οι δυνάμεις των δύο ράβδων πρέπει να είναι ίσες και αντίθετες, δηλ.

$$F_{ex} = -F_{cov} \quad (6.4)$$

Επομένως,

$$A_{ex}\sigma_{ex} = -A_{cov}\sigma_{cov} \rightarrow A_{ex}E\varepsilon_{ex}^{el} = -A_{cov}E\varepsilon_{cov}^{el} \quad (6.5)$$

Κατά αυτόν τον τρόπο, προκύπτει η σχέση που συνδέει τις ελαστικές παραμορφώσεις των ράβδων:

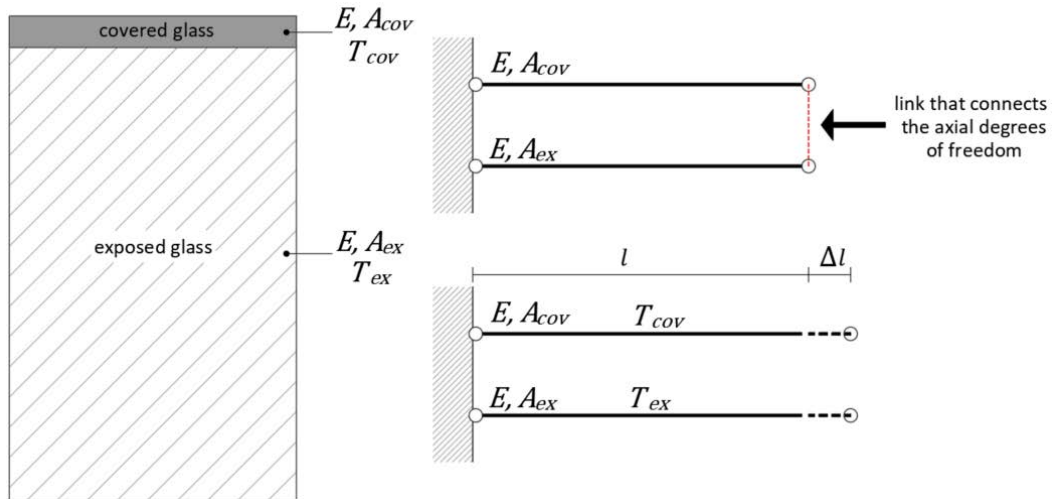
$$\varepsilon_{ex}^{el} = -\frac{A_{cov}}{A_{ex}}\varepsilon_{cov}^{el} \quad (6.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιφάνεια της εκτεθειμένης περιοχής είναι πολύ μεγάλη, σε σύγκριση με την περιοχή της καλυμμένης περιοχής, δηλ.

$$A_{ex} \gg A_{cov} \quad (6.7)$$

παρατηρείται ότι, η ελαστική παραμόρφωση της εκτεθειμένης περιοχής θα είναι πολύ μικρή. Επομένως στην περίπτωση ενός πάνελ με αρκετά μεγάλη επιφάνεια (δηλαδή όταν το A_{ex} είναι τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από το A_{cov}), η παραμόρφωση θα είναι περίπου ίση με μηδέν, δηλ.

$$\varepsilon_{ex}^{el} \cong 0 \quad (6.8)$$



Σχήμα 6.7: Το απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο.

Η συνθήκη συμβιβαστού για το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί απλοποιητικά να εκφραστεί μέσω της ισότητας των αξονικών μετατοπίσεων των ράβδων, δηλαδή:

$$\Delta l_{ex} = \Delta l_{cov} \rightarrow l \varepsilon_{ex}^{total} = l \varepsilon_{cov}^{total} \rightarrow \varepsilon_{ex}^{el} + \varepsilon_{ex}^{thermal} = \varepsilon_{cov}^{el} + \varepsilon_{cov}^{thermal} \quad (6.9)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (6.8) στην Εξ. (6.9):

$$\varepsilon_{cov}^{el} = \varepsilon_{ex}^{thermal} - \varepsilon_{cov}^{thermal} \rightarrow \varepsilon_{cov}^{el} = a(T_{ex} - T_{cov}) \quad (6.10)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $T_{ex} > T_{cov}$, συμπεραίνεται ότι η ελαστική παραμόρφωση στην καλυμμένη περιοχή είναι θετική, ενώ στην εκτεθειμένη έχει μια πολύ μικρή αρνητική τιμή ή σχεδόν μηδενική για μια πολύ μεγάλη πάνελ, δηλ.

$$\varepsilon_{cov}^{el} \approx a(T_{ex} - T_{cov}) > 0 \quad (6.11)$$

$$\varepsilon_{ex}^{el} < 0 \text{ και } \varepsilon_{ex}^{el} \rightarrow 0 \quad (6.12)$$

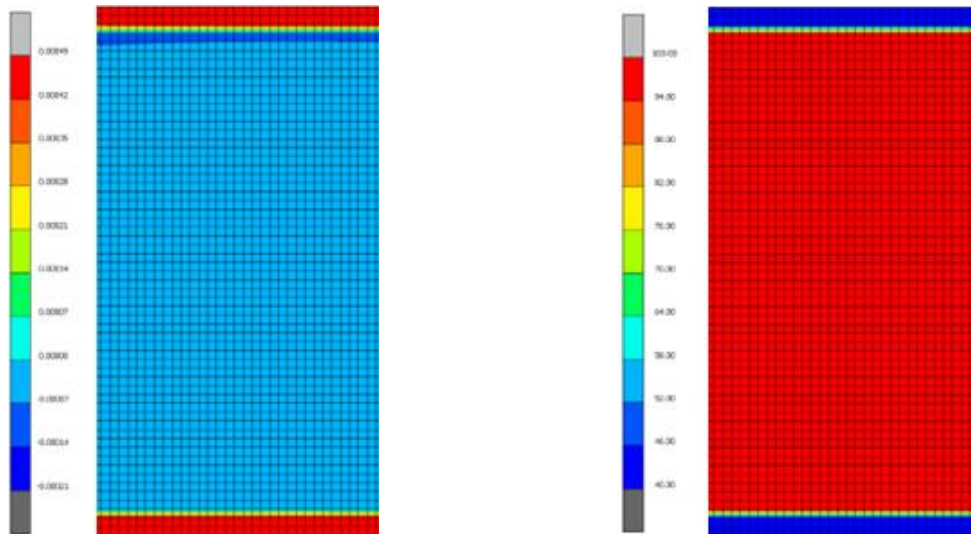
Επομένως, το ελαστικό μέρος της παραμόρφωσης στην καλυμμένη περιοχή είναι ανάλογο με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εκτεθειμένης και της καλυμμένης περιοχής.

Επίσης, συμπεραίνεται ότι, οι εφελκυστικές (θερμικές) τάσεις θα αναπτυχθούν στην καλυμμένη περιοχή και θα πραγματοποιηθεί θραύση, μόλις οι τάσεις αυτές φτάσουν την αντοχή εφελκυσμού του γυαλιού σ_{tu} . Αντίθετα, στην εκτεθειμένη περιοχή αναμένεται να εμφανιστούν θλιπτικές (θερμικές) τάσεις, σχετικά μικρού μεγέθους.

Επιπλέον είναι προφανές ότι και στις δυο περιοχές, η συνολική παραμόρφωση θα είναι περίπου ίση με τη θερμική παραμόρφωση της εκτεθειμένης περιοχής:

$$\varepsilon_{cov}^{total} = \varepsilon_{cov}^{el} + \varepsilon_{cov}^{thermal} \approx a(T_{ex} - T_{cov}) + \alpha T_{cov} \approx \alpha T_{ex} > 0 \quad (6.13)$$

$$\varepsilon_{ex}^{total} = \varepsilon_{ex}^{el} + \varepsilon_{ex}^{thermal} \approx \alpha T_{ex} > 0 \quad (6.14)$$

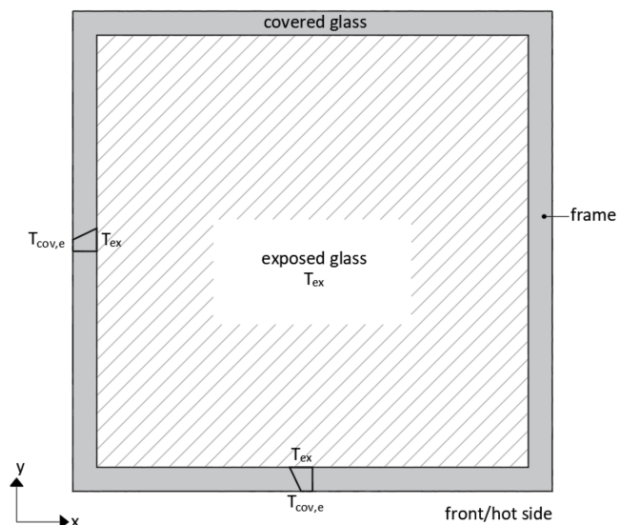
(α) Ελαστικό μέρος της παραμόρφωσης xx

(β) Θερμοκρασία

Σχήμα 6.8: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης για έναν πλαισιωμένο υαλοπίνακα (ομοιόμορφη θερμοκρασία στην καλυμμένη περιοχή).

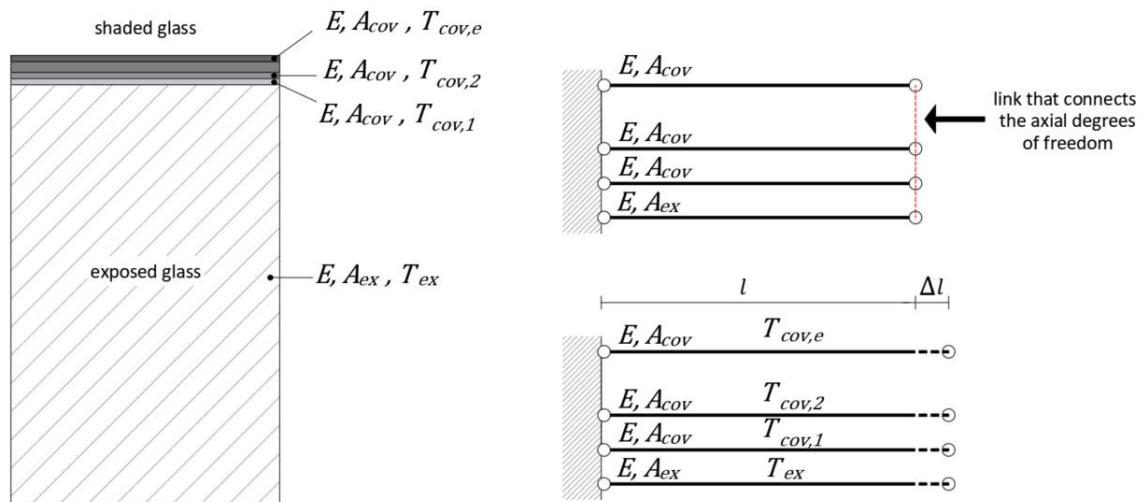
Για την διακρίβωση των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου μηχανικού μοντέλου, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης ενός πλαισιωμένου υαλοπίνακα (Σχήμα 6.6.) Το Σχήμα 6.8 εστιάζει σε μια λωρίδα, στη μέση του υαλοπίνακα και απεικονίζει την ελαστική παραμόρφωση στην κατεύθυνση x . Παρατηρείται ότι, η καλυμμένη περιοχή είναι υπό εφελκυσμό, ενώ στην εκτεθειμένη περιοχή εμφανίζονται πολύ μικρές αρνητικές τιμές ελαστικής παραμόρφωσης.

Στην συνέχεια διερευνάται η περίπτωση του πλαισιωμένου υαλοπίνακα με ανομοιόμορφη θερμοκρασία στην καλυμμένη περιοχή (Σχήμα 6.9). Μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέγιστη ελαστική παραμόρφωση εμφανίζεται στην ψυχρότερη άκρη, οδηγώντας στην ανάπτυξη υψηλότερης εφελκυστικής τάσης.



Σχήμα 6.9: Θερμή πλευρά του πλαισιωμένου υαλοπίνακα που εκτίθεται σε πυρκαγιά (ανομοιόμορφη θερμοκρασία στην καλυμμένη περιοχή).

Αυτό μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο (Σχήμα 6.10). Οι ζώνες της περιοχής με την ανομοιόμορφη θερμοκρασία προσομοιώνονται από πολλαπλά ραβδωτά στοιχεία, ίσου μήκους l . Οι επιφάνειες των διατομών των εκτεθειμένων και καλυμμένων ράβδων, είναι A_{ex} και $A_{cov,T1}, A_{cov,T2}, \dots, A_{cov,Te}$, αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι, οι αξονικές μετατοπίσεις των ράβδων συνδέονται, ώστε να αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες συμβιβαστού του συνεχούς μέσου.



Σχήμα 6.10: Το απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο, τροποποιημένο για ανομοιόμορφη καλυμμένη περιοχή.

Οι ράβδοι υποβάλλονται σε ομοιόμορφες θερμοκρασίες (T_{ex} and $T_{cov,1}$, $T_{cov,2}$, ..., $T_{cov,e}$). Λαμβάνοντας υπόψη $A_{ex} \gg A_{cov,T1} = A_{cov,T2} = \dots = A_{cov,Te}$, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί:

$$\varepsilon_{cov,T1}^{el} \approx a(T_{ex} - T_{cov,1}) > 0 \quad (6.15)$$

$$\varepsilon_{cov,T2}^{el} \approx a(T_{ex} - T_{cov,2}) > 0 \quad (6.16)$$

.

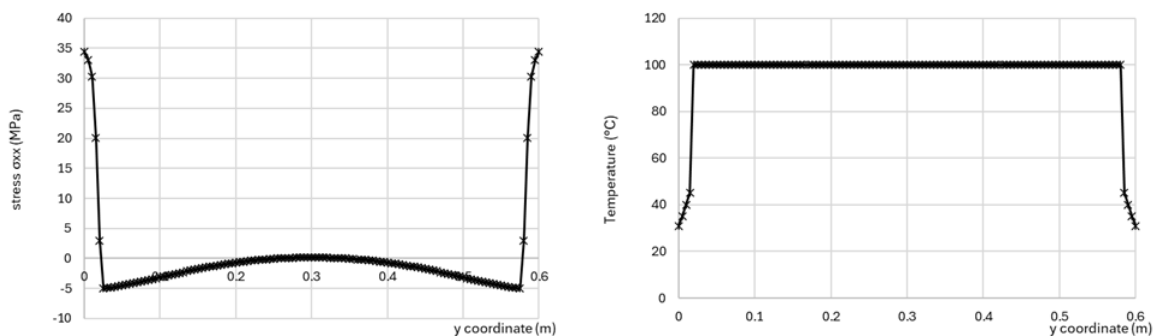
.

$$\varepsilon_{cov,Te}^{el} \approx a(T_{ex} - T_{cov,e}) > 0 \quad (6.17)$$

$$\varepsilon_{ex}^{el} < 0 \text{ και } \varepsilon_{ex}^{el} \rightarrow 0 \quad (6.18)$$

Δεδομένου ότι $T_{cov,1} > T_{cov,2} > \dots > T_{cov,e}$, προκύπτει ότι $\varepsilon_{cov,T1}^{el} < \varepsilon_{cov,T2}^{el} < \dots < \varepsilon_{cov,Te}^{el}$. Συνεπώς, η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής τάσης αναμένεται στις άκρες, όπου το γυαλί σπάει, όταν η ελαστική παραμόρφωση θα είναι ίση με 0.05 % (Εξ. 6.2).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης ενός υαλοπίνακα με ανομοιόμορφη θερμοκρασία στην καλυμμένη περιοχή. Το Σχήμα 6.11 απεικονίζει τη διακύμανση της ελαστικής παραμόρφωσης, κατά μήκος του άξονα y , στη μέση του πλαισιωμένου υαλοπίνακα. Η θερμοκρασία της εκτεθειμένης περιοχής είναι $T_{ex} \approx 100$ °C, η οποία μειώνεται κάτω από το πλαίσιο σε $T_{cov,e} \approx 30$ °C. Παρατηρείται ότι η ελαστική παραμόρφωση φτάνει τις μέγιστες τιμές της στην άκρη, όπου καταγράφεται η ελάχιστη θερμοκρασία.



Σχήμα 6.11: Η διακύμανση της τάσης και της θερμοκρασίας, κατά μήκος του άξονα y στη μέση του υαλοπίνακα.

6.3.2 Παχύς υαλοπίνακας υπό θερμοκρασιακή κλίση κατά το πάχος

Η συμπεριφορά του υαλοπίνακα που υποβάλλεται σε θερμοκρασιακή κλίση κατά το πάχος του, μπορεί να γίνει κατανοητή χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο, παρόμοιο με αυτό της προηγούμενης ενότητας. Ας υποθέσουμε τρεις ράβδους ίσου εμβαδού $A_{thi} = A$, που είναι κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό (μέτρο ελαστικότητας E και συντελεστή θερμικής διαστολής α). Οι ράβδοι προσομοιώνουν τις ζώνες με διαφορετική θερμοκρασία κατά τη διεύθυνση του πάχους του υαλοπίνακα. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές των ράβδων είναι T_i . Σε αυτή την περίπτωση, η συνθήκη συμβιβαστού του συνεχούς σώματος προσομοιώνεται απλοποιητικά μέσω της σύνδεσης των ράβδων σε μια άκαμπτη πλάκα (Σχήμα 6.12).

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι:

$$\varepsilon_{T1}^{el} = \varepsilon_{T3}^{el} = \alpha(2T_2 - T_1 - T_3) \quad (6.19)$$

$$\varepsilon_{T2}^{el} = -2\alpha(2T_2 - T_1 - T_3) \quad (6.20)$$

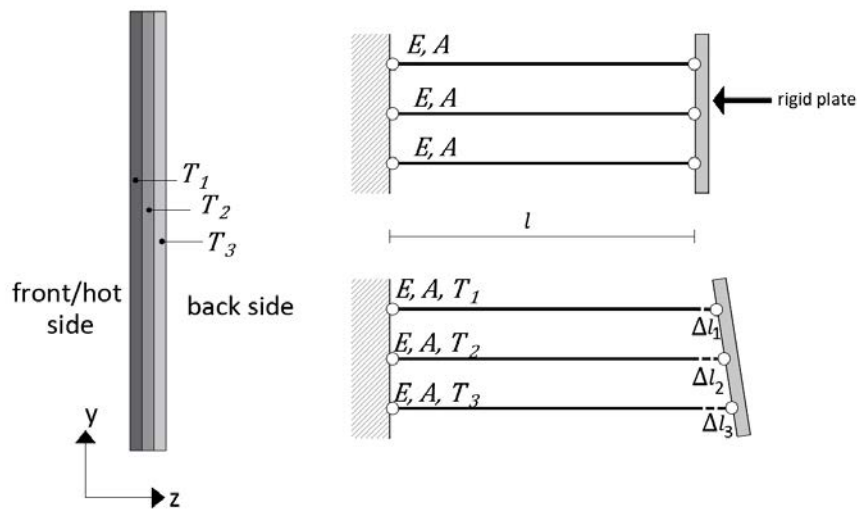
Και οι θερμικές τάσεις θα είναι:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T3} = E\alpha(2T_2 - T_1 - T_3) \quad (6.21)$$

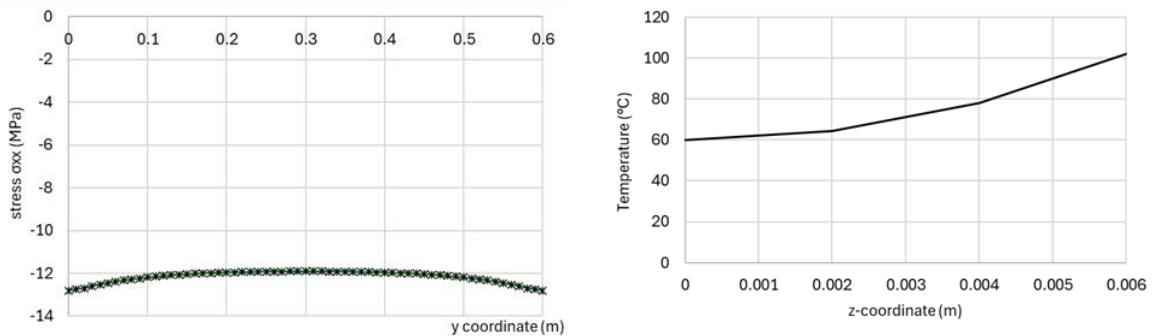
$$\sigma_{T2} = -2E\alpha(2T_2 - T_1 - T_3) \quad (6.22)$$

Εάν η κατανομή θερμοκρασίας κατά το πάχος είναι γραμμική, δηλαδή, $T_2 = (T_1 + T_3)/2$, τότε οι προκύπτουσες θερμικές τάσεις είναι μηδέν. Ωστόσο για μη-γραμμική κατανομή θερμοκρασίας, το πρόσημο των θερμικών τάσεων καθορίζεται από τον όρο $2T_2 - T_1 - T_3$, ο οποίος προσομοιώνει το θερμοκρασιακό προφίλ του υαλοπίνακα κατά το πάχος του.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες (Ενότητα 6.4), αποδεικνύουν ότι ο όρος αυτός προκύπτει αρνητικός για υαλοπίνακες που εκτίθενται σε πυρκαγιά από τη μια πλευρά. Επομένως αναμένεται η ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων στη θερμή πλευρά του υαλοπίνακα, λόγω της θερμικής κλίσης στην κατεύθυνση z . Στο Σχήμα 6.13: παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα ενός υαλοπίνακα υπό μη-γραμμική θερμοκρασιακή κλίση κατά το πάχος. Παρατηρείται πως οι θερμικές τάσεις στη θερμή πλευρά του υαλοπίνακα είναι αρνητικές.



Σχήμα 6.12: Το απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο για την προσομοίωση του υαλοπίνακα υπό θερμική κλίση ΔT_z .



Σχήμα 6.13: Το πεδίο των τάσεων στη θερμή πλευρά, υπό θερμοκρασιακή κλίση στην κατεύθυνση z.

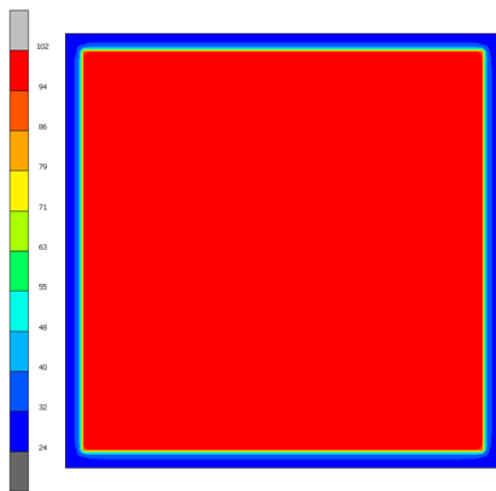
6.3.3 Πλαισιωμένος υαλοπίνακας σε συνθήκες πυρκαγιάς, μέσω της καμπύλης ISO

Με στόχο να κατανοηθεί καλύτερα η θερμική συμπεριφορά του εκτεθειμένου υαλοπίνακα, παρουσιάζονται στην συνέχεια τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης ενός πλαισιωμένου υαλοπίνακα σε συνθήκες πυρκαγιάς ISO. Στο Σχήμα 6.14 αποτυπώνεται το θερμοκρασιακό προφίλ του πλαισιωμένου υαλοπίνακα, πάχους 6 mm (πλάτος πλαισίου 20 mm) και η κατανομή της θερμοκρασίας στους άξονες x , y στο 70^ο δευτερόλεπτο της έκθεσης στην πυρκαγιά (λίγο πριν τη θραύση). Το Σχήμα 6.14(δ) παρέχει μια λεπτομερή απεικόνιση του Σχήμα 6.14(γ), εστιάζοντας στην περιοχή των άκρων.

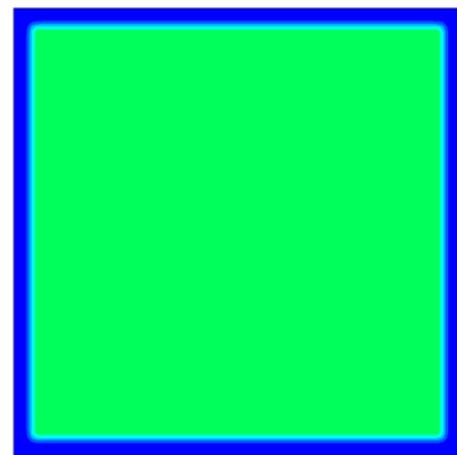
Στα αρχικά στάδια της έκθεσης στην πυρκαγιά, $t = 70$ s (Σχήμα 6.14(δ)), η θερμοκρασία στην καλυμμένη περιοχή κατά μήκος των αξόνων x και y , παραμένει σχεδόν ομοιόμορφη. Ωστόσο με την πάροδο του χρόνου ($t = 170$ s και $t = 1000$ s), η κατανομή της θερμοκρασίας τείνει να γίνεται ανομοιόμορφη. Μια ζώνη μετάβασης αναπτύσσεται στην

καλυμμένη περιοχή, κατά την οποία η θερμοκρασία σταθεροποιείται. Αυτό το μοτίβο παρατηρείται τόσο στην εκτεθειμένη όσο και στην καλυμμένη επιφάνεια του υαλοπίνακα.

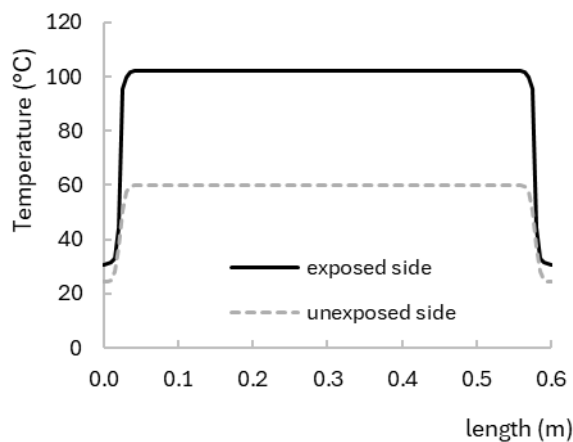
Επιπλέον, στο Σχήμα 6.15 παρατηρείται θερμοκρασιακή κλίση κατά μήκος του άξονα z , στο κέντρο του υαλοπίνακα, ακόμη και στα αρχικά στάδια της πυρκαγιάς. Εντός της καλυμμένης περιοχής (στην άκρη), η θερμοκρασία παραμένει αρχικά ομοιόμορφη στην κατεύθυνση z , αλλά η κλίση αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.



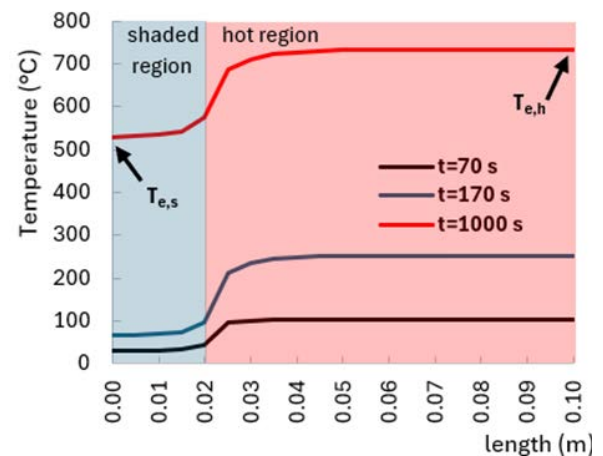
(α) Θερμοκρασιακό προφίλ στους άξονες x και y (εκτεθειμένη περιοχή) σε $t=70$ s



(β) Θερμοκρασιακό προφίλ στους άξονες x και y (καλυμμένη περιοχή) σε $t=70$ s

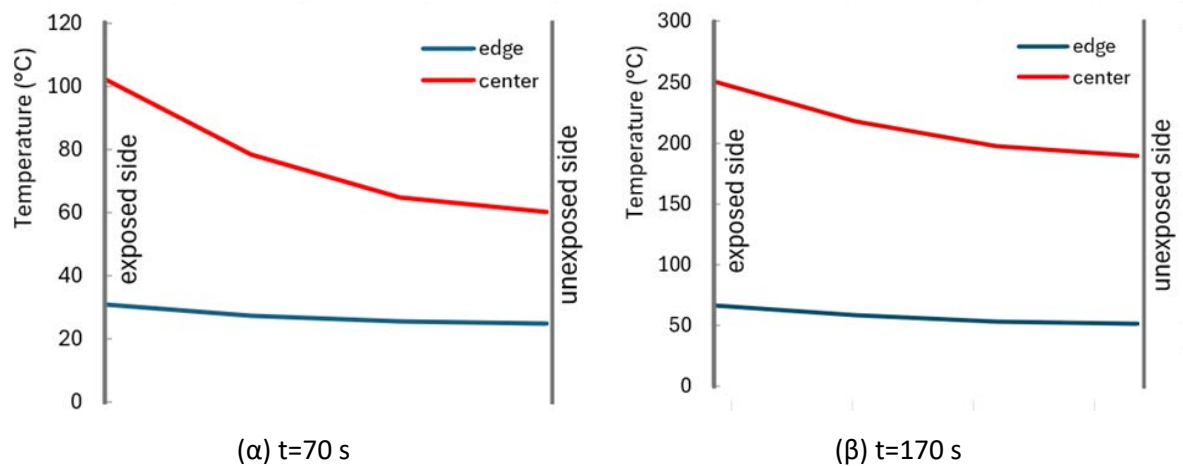


(γ) Θερμοκρασιακή κατανομή κατά τον άξονα x και y σε $t=70$ s (εκτεθειμένη περιοχή)



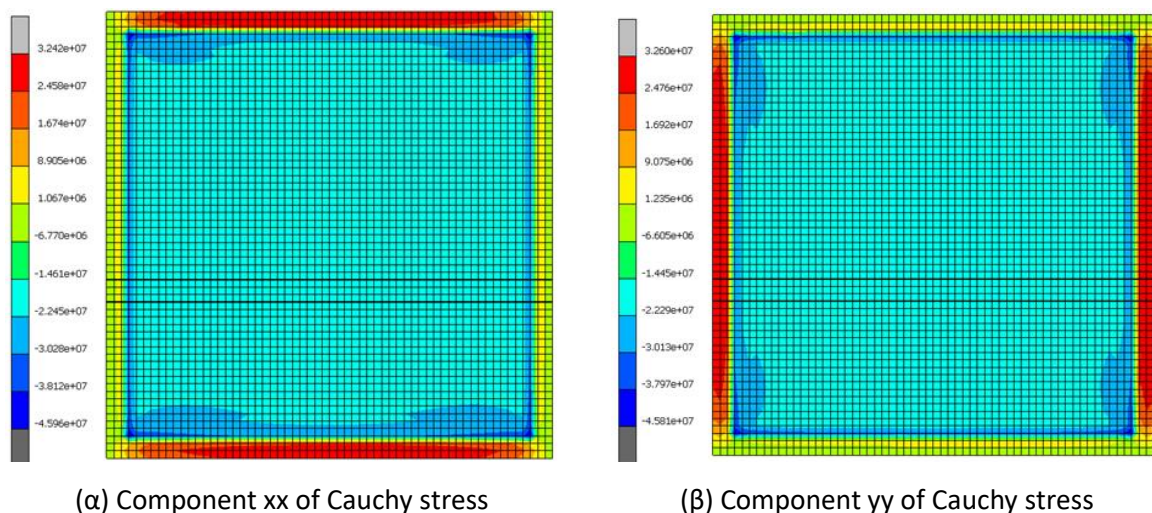
(δ) Θερμοκρασιακή κατανομή κατά τον άξονα x και y - κοντά στην καλυμμένη περιοχή (θερμή πλευρά)

Σχήμα 6.14: Θερμοκρασιακό προφίλ του υαλοπίνακα.



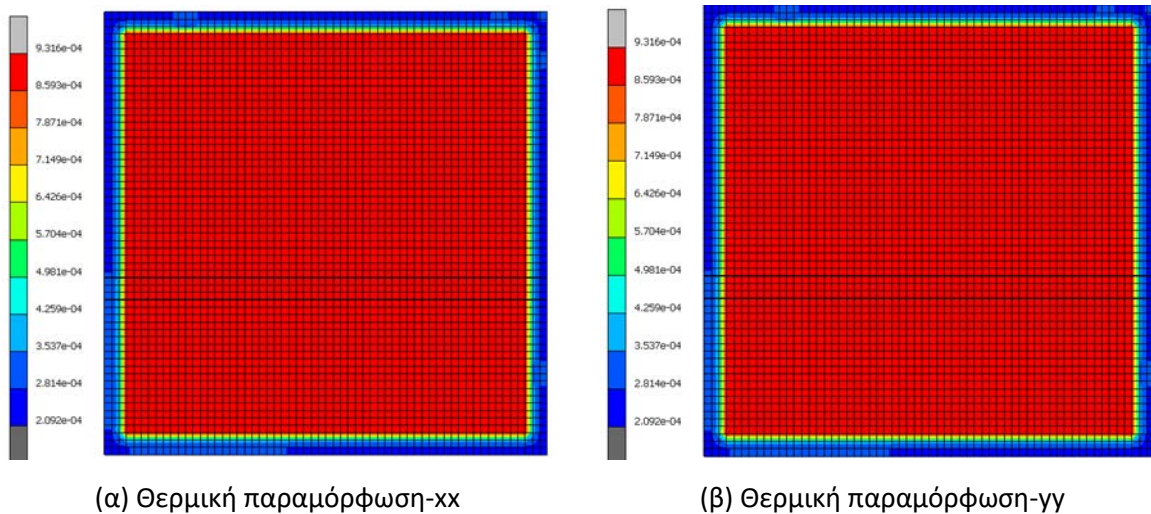
Σχήμα 6.15: Θερμοκρασιακό προφίλ κατά τον άξονα z .

Για τη βαθύτερη κατανόηση του μηχανισμού θραύσης, παρουσιάζονται στην συνέχεια τα πεδία των τάσεων και των παραμορφώσεων. Όπως αναμένεται (Εξ. (6.12)), το θερμό τμήμα μια ίνας, προσανατολισμένης προς την κατεύθυνση x , τοποθετημένη μεταξύ των άνω και κάτω καλυμμένων περιοχών, βρίσκεται σε θλίψη (Σχήμα 6.16). Οι τάσεις εντός των καλυμμένων περιοχών της ίδιας ίνας ανακουφίζονται σταδιακά μέσα στις καλυμμένες περιοχές, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία. Οι ίνες που βρίσκονται στις άνω ή κάτω καλυμμένες περιοχές (προσανατολισμένες προς την κατεύθυνση x), υποβάλλονται σε εφελκυσμό κατά τον άξονα x . Ο εφελκυσμός προκαλείται από τη θερμική διαστολή γειτονικών, θερμότερων ινών κατά της κατεύθυνσης x , όπως περιγράφεται λεπτομερώς στην Ενότητα 6.3.1. Το ίδιο μοτίβο εμφανίζεται και στην κατεύθυνση y .

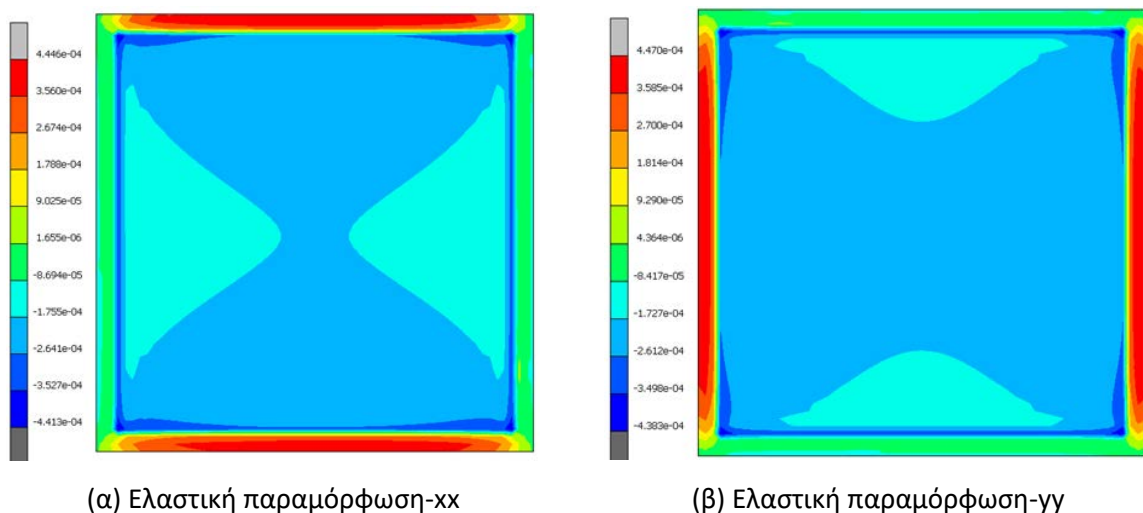


Σχήμα 6.16: Τάση του Cauchy (πριν τη θραύση).

Οι συνολικές παραμορφώσεις σε κάθε σημείο ενός θερμαινόμενου σώματός αποτελούνται από δυο μέρη. Το πρώτο μέρος (θερμικές παραμορφώσεις) εκφράζουν την θερμική διαστολή, η οποία είναι ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας. Δεδομένου ότι η διαστολή είναι ισότροπη (ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις), εμφανίζονται μόνο ορθές παραμορφώσεις και οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι αμελητέες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17, οι θερμικές τάσεις ακολουθούν το θερμοκρασιακό προφίλ του θερμαινόμενου υαλοπίνακα.



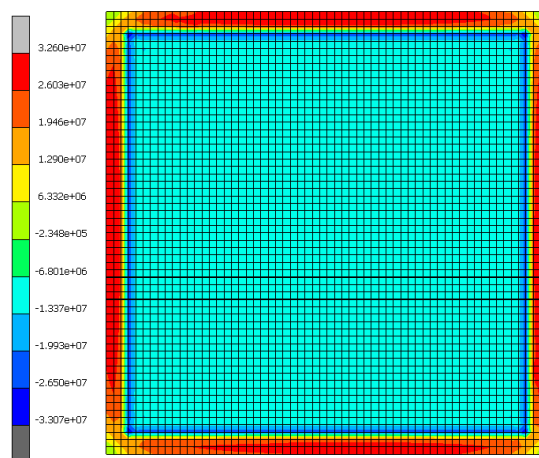
Σχήμα 6.17: Θερμική παραμόρφωση (λίγο πριν τη θραύση).



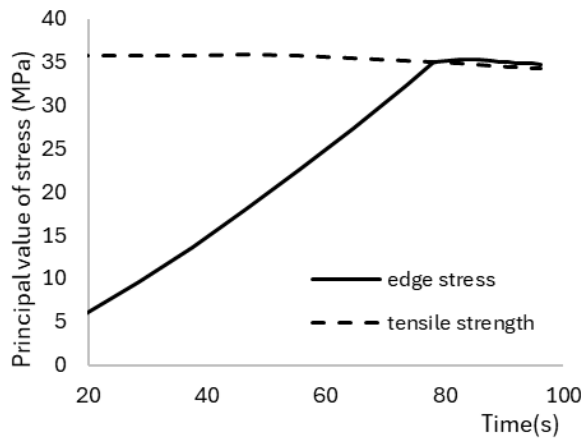
Σχήμα 6.18: Ελαστική παραμόρφωση (λίγο πριν τη θραύση).

Το δεύτερο μέρος (ελαστικές παραμορφώσεις) περιλαμβάνει τις παραμορφώσεις που απαιτούνται για τη διατήρηση της συνέχειας του σώματός, καθώς και εκείνες που προκύπτουν λόγω εξωτερικών φορτίων (αλλά στην περίπτωση αυτή τα εξωτερικά φορτία είναι μηδενικά). Αυτά τα στελέχη, που διέπονται από το νόμο του Hooke για γραμμική ελαστικότητα, επηρεάζονται αποκλειστικά από τη θερμοκρασιακή κλίση, καθώς δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία ή δυνάμεις βαρύτητας. Το Σχήμα 6.18 απεικονίζει το ελαστικό πεδίο των παραμορφώσεων, που ακολουθεί το μοτίβο των τάσεων.

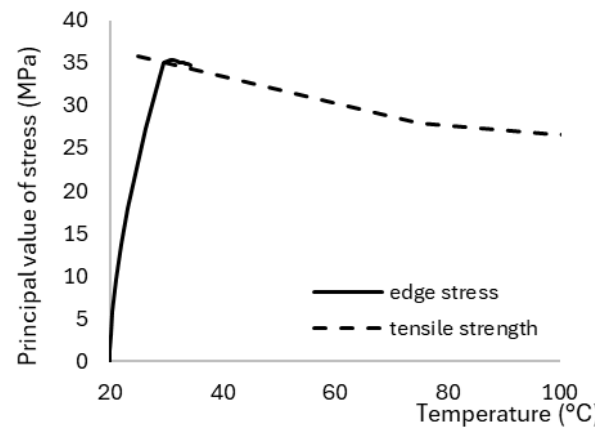
Η θραύση συμβαίνει όταν η μέγιστη κύρια τάση γίνεται ίση με την εφελκυστική αντοχή του γυαλιού (Σχήμα 6.19) Στη συγκριμένη περίπτωση, η θραύση εμφανίζεται στο 78^ο δευτερόλεπτο της πυρκαγιάς ISO (Σχήμα 6.20(α)), όταν η θερμοκρασία στην εκτεθειμένη θερμή επιφάνεια του γυαλιού φτάσει περίπου στους 116 °C, ενώ η θερμοκρασία στην άκρη του υαλοπίνακα (καλυμμένη θερμή επιφάνεια) είναι περίπου 33 °C (Σχήμα 6.20(β)). Αυτό αντιστοιχεί σε θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T_{x/y} = 83$ °C. Το Σχήμα 6.21 επιβεβαιώνει ότι η εμφάνιση της πρώτης ρωγμής συμβαίνει στην άκρη του πάνελ.



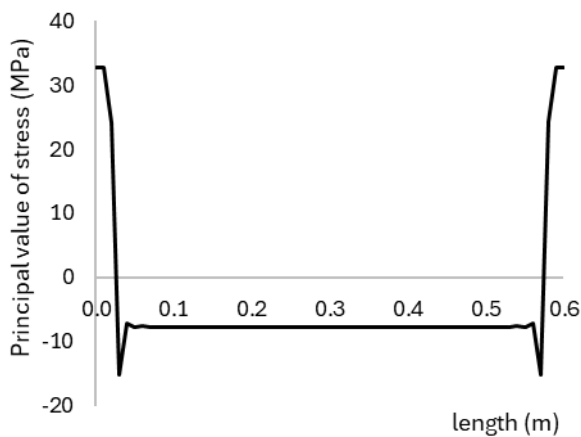
Σχήμα 6.19: Μέγιστη κύρια τάση του Cauchy (λίγο πριν τη θραύση).



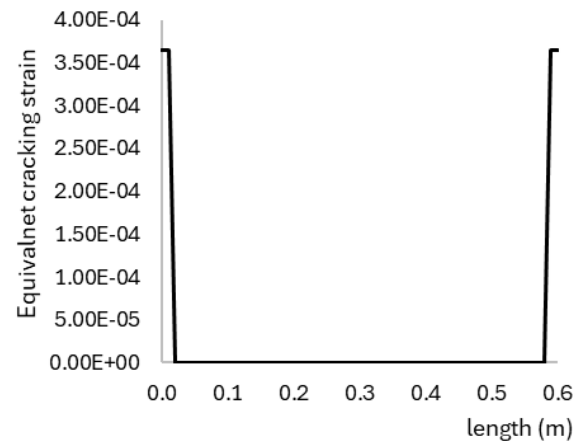
(α) Εξέλιξη με το χρόνο.



(β) Εξέλιξη με τη θερμοκρασία

Σχήμα 6.20: Εξέλιξη της κύριας τάσης στην άκρη του υαλοπίνακα (θερμή πλευρά).

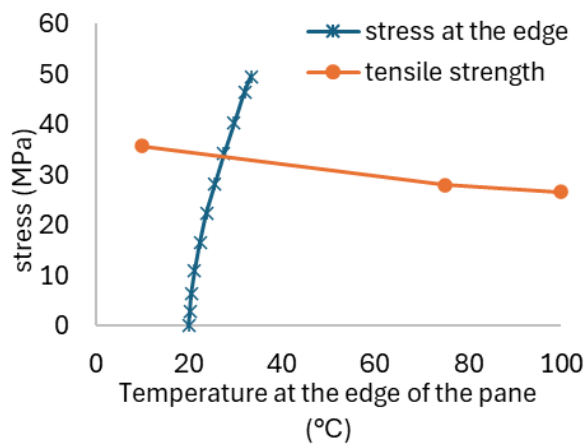
(α) Μεταβολή κύριας τάσης



(β) Μεταβολή παραμόρφωσης τάσης.

Σχήμα 6.21: Μεταβολή τάσεων, κατά τον άξονα γ, στο κέντρο του υαλοπίνακα (θερμή πλευρά), την στιγμή εμφάνισης της ρωγμής.

Επίσης, παρατηρείται πως η κρίσιμη θερμοκρασιακή διαφορά κατά την οποία συμβαίνει η θραύση είναι $\Delta T_{x/y} = 83^\circ\text{C}$. Θεωρώντας πως το πρόβλημα είναι δισδιάστατο (Ενότητα 6.3.1), λόγω εντός επιπέδου διαφοράς θερμοκρασίας, η θραύση θα πραγματοποιούνταν για $\Delta T_{x/y} = 55.3^\circ\text{C} < 83^\circ\text{C}$, κατά το 56ο δευτερόλεπτο της ανάλυσης (ο υπολογισμός βασίστηκε στις τιμές $\sigma_{u,T=27.5^\circ\text{C}} = 34.21\text{ MPa}$, $E_{T=27.5^\circ\text{C}} = 73.1\text{ GPa}$, όπως έχουν οριστεί στην ανάλυση-Σχήμα 6.22).



Σχήμα 6.22: Μεταβολή της τάσης με τη θερμοκρασία, λόγω της επίπεδης θερμοκρασιακή κλίσης στην άκρη του υαλοπίνακα.

Επομένως η διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για την θραύση του υαλοπίνακα είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από τη θεώρηση του δισδιάστατου υαλοπίνακα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην επιρροή της θερμοκρασιακής κλίσης κατά το πάχος του υαλοπίνακα. Συγκεκριμένα, οι εφελκυστικές θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται στις καλυμμένες περιοχές της θερμής πλευράς, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά x ή y ($\Delta T_{x \text{ or } y}$), αντισταθμίζονται εν μέρη από θλιπτικές τάσεις που προκύπτουν από τη θερμοκρασιακή διαφορά στην κατεύθυνση z (ΔT_z), με αποτέλεσμα η θράση να λαμβάνει χώρα για μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T_{x \text{ or } y}$ και να «καθυστερεί» η εμφάνιση της θραύσης.

6.4 Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη, έτσι ώστε να διερευνηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την πυραντοχή των υαλοπινάκων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Πάχος υαλοπίνακα
- Αριθμός γυάλινων πάνελ
- Πάχος PVB
- Πλάτος πλαισίου υαλοπίνακα
- Τύπος γυαλιού (επικαλυμμένο γυαλί χαμηλής εκπομπής).

Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις παραμετρικές αναλύσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις ο υαλοπίνακας έχει διάσταση 0.6 m x 0.6 m και το πάχος του διαφοροποιείται κατά περίπτωση. Σέ όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε γυαλί επίπλευσης και διαφοροποιήθηκε μόνο για τη μελέτη του τύπου γυαλιού.

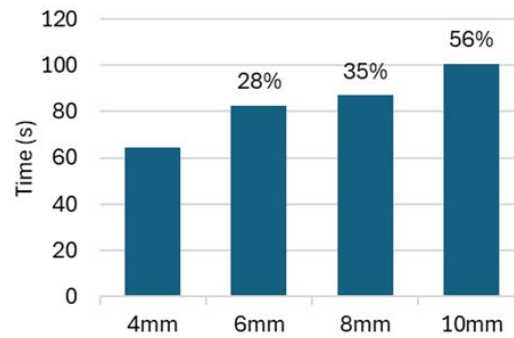
Πίνακας 6.1: Σύνοψη των παραμετρικών αναλύσεων.

Παράμετρος	Περιπτώσεις που εξετάστηκαν			
Πάχος υαλοπίνακα	4mm	6mm	8mm	10mm
Αριθμός πάνελ	1	2	3	4
Πάχος PVB	0.38mm	0.76mm	1.14mm	1.52mm
Πλάτος πλαισίου	10mm	20mm	30mm	40mm
Τύπος γυαλιού	επικαλυμμένο γυαλί χαμηλής εκπομπής			

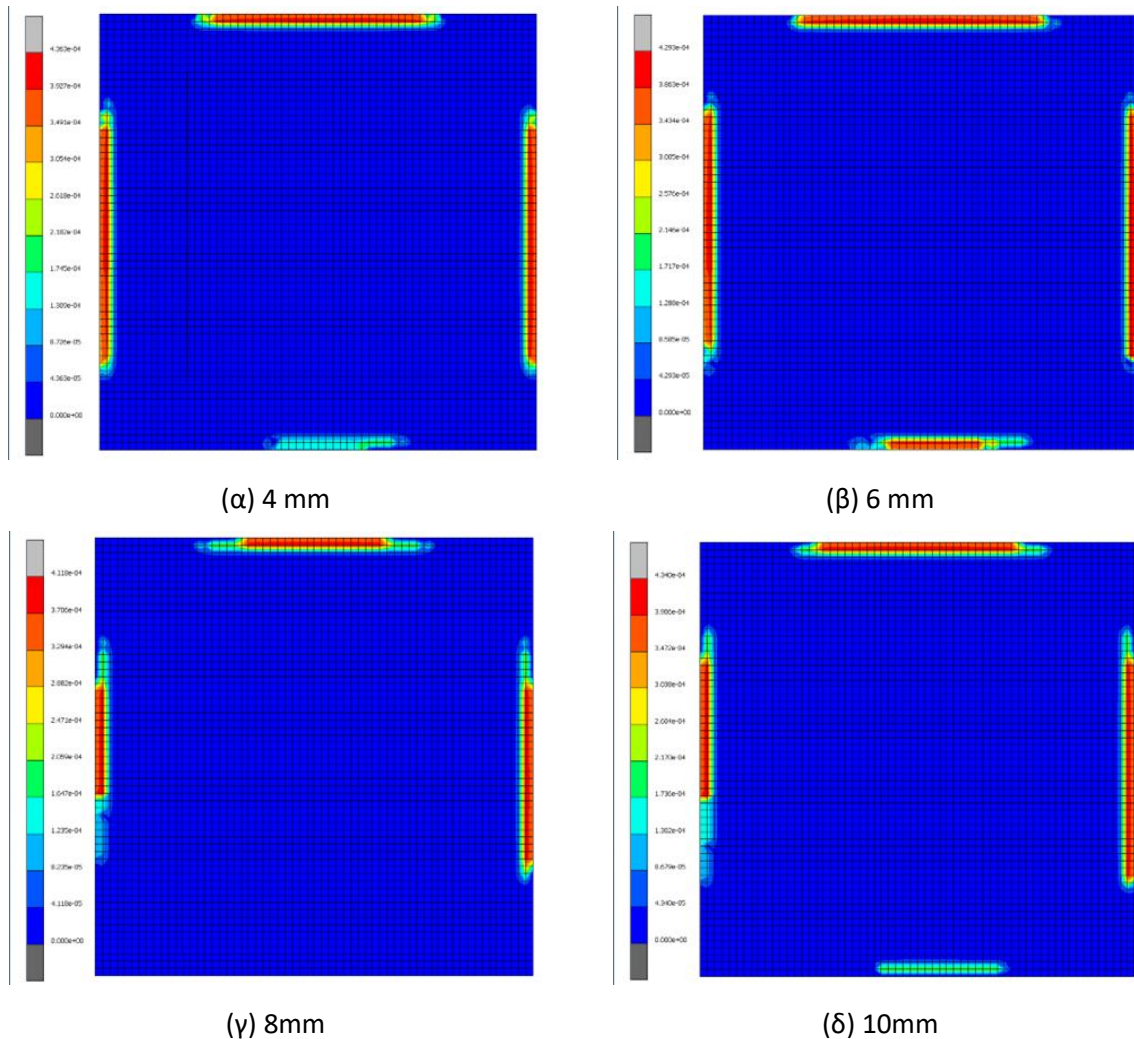
6.4.1 Διερεύνηση επιρροής πάχους γυαλιού (μονοί υαλοπίνακες)

Αρχικά, μελετήθηκε η επιρροή του πάχους ενός μονού υαλοπίνακα, με πλάτος πλαισίου 20 mm. Για αυτόν τον σκοπό θεωρήθηκαν τιμές πάχους 4, 6, 8, 10 mm, που είναι τυπικές για τα πάχη που χρησιμοποιούνται συνήθως σε πρακτικές εφαρμογές.

Το Σχήμα 6.23 παρουσιάζει την μεταβολή του χρόνου πυραντοχής του υαλοπίνακα, ο οποίος αντιστοιχεί στην θραύση του γυαλιού. Παρατηρείται πως ο χρόνος πυραντοχής είναι πολύ μικρός σε όλες τις περιπτώσεις ($1 \text{ min} < t_R < 2 \text{ min}$). Επίσης, παρατηρείται ότι, καθώς αυξάνεται το πάχος του γυαλιού, αυξάνεται και ο χρόνος στον οποίο συμβαίνει η θραύση, δηλαδή η πυραντοχή του. Σε όλες τις περιπτώσεις, η θραύση έλαβε χώρα στην άκρη του υαλοπίνακα (καλυμμένη περιοχή). Το Σχήμα 6.24 απεικονίζει το πεδίο της ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης (equivalent cracking strain) για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



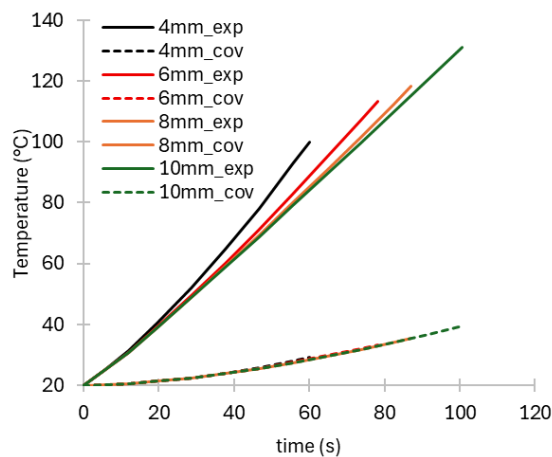
Σχήμα 6.23: Μεταβολή του χρόνου πυραντοχής μονού υαλοπίνακα, για διαφορετικές τιμές πάχους.



Σχήμα 6.24: Πεδίο ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης, για μονούς υαλοπίνακες.

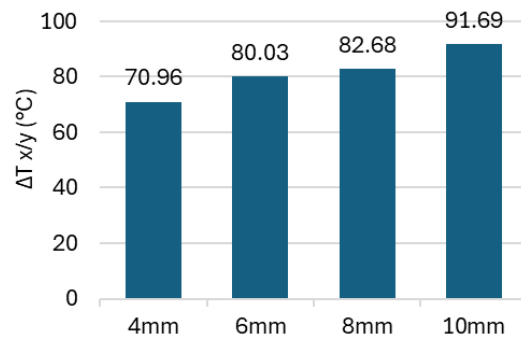
Με σκοπό την κατανόηση της μεταβολής του χρόνου θραύσης, τα Σχήματα 6.25-6.28 παρουσιάζουν αποτελέσματα σχετικά με το θερμικό προφίλ των υαλοπινάκων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.25 παρατηρείται ότι, η θερμοκρασία στην άκρη της καλυμμένης περιοχής του υαλοπίνακα είναι σχεδόν η ίδια και δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου για

υαλοπίνακες με διαφορετικό πάχος. Αντιθέτως, για την εκτεθειμένη περιοχή διακρίνεται ότι, καθώς αυξάνεται το πάχος του υαλοπίνακα, η θερμοκρασία μειώνεται. Επομένως, ο υαλοπίνακας με το μικρότερο πάχος, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά και η θραύση επέρχεται πιο νωρίς, σε σχέση με υαλοπίνακες μεγαλύτερου πάχους.

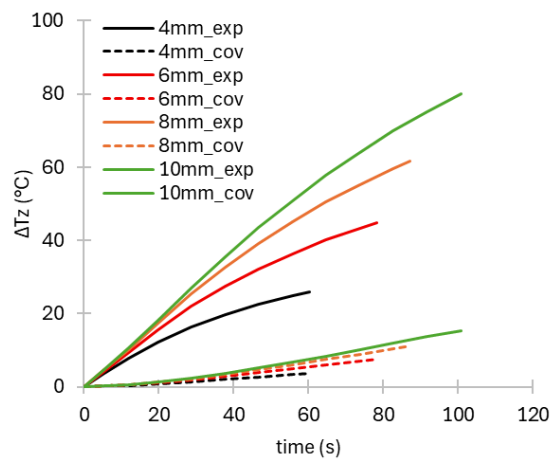


Σχήμα 6.25: Χρονοϊστορία της θερμοκρασίας στο κέντρο της εκτεθειμένης και στην άκρη της καλυμμένης περιοχής.

Το Σχήμα 6.26 αποτυπώνει τη διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T_{x/y}$ (μπροστινή/θερμή πλευρά), την στιγμή της θραύσης για υαλοπίνακες με διαφορετικό πάχος. Παρατηρείται πως, η κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται το πάχος του γυαλιού και κυμαίνεται από 70 έως περίπου 90 °C ($70^{\circ}\text{C} < \Delta T_{x/y} < 90^{\circ}\text{C}$). Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της Ενότητας 6.3.2, το γεγονός αυτό οφείλεται στη θερμοκρασιακή κλίση κατά το πάχος του υαλοπίνακα. Πρέπει να σημειωθεί πως, εάν το πρόβλημα ήταν δισδιάστατο ή δεν υπήρχε η κλίση της θερμοκρασίας κατά τον άξονα z , οι υαλοπίνακες θα αστοχούσαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, αλλά για το ίδιο $\Delta T_{x/y}$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.27, η διαφορά θερμοκρασίας κατά z αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το πάχος του γυαλιού. Επομένως, όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του υαλοπίνακα, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ΔT_z , το οποίο καθυστερεί το φαινόμενο της θραύσης. Σημειώνεται πως, το θερμοκρασιακό προφίλ κατά το πάχος των υαλοπινάκων, καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς, είναι μη-γραμμικό. Το 6.27 παρουσιάζει την κατανομή της θερμοκρασίας, κατά το πάχος των υαλοπινάκων, την στιγμή της θραύσης.



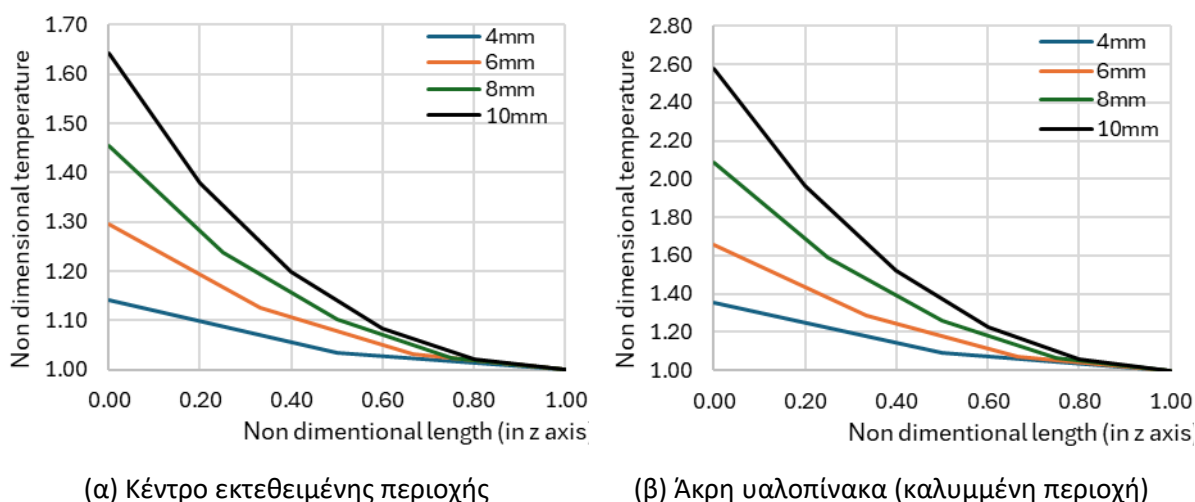
Σχήμα 6.26: Διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T_{x/y}$, (κέντρο εκτεθειμένης και άκρη καλυμμένης περιοχής), την στιγμή της θραύσης.



Σχήμα 6.27: Χρονοϊστορία της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT_z (κέντρο εκτεθειμένης και άκρη καλυμμένης περιοχής).

Τέλος, το Σχήμα 6.28 παρουσιάζει τη θερμοκρασία στο κέντρο της εκτεθειμένης περιοχής και στην άκρη του υαλοπίνακα την στιγμή της θραύσης, για τους υαλοπίνακες που εξετάστηκαν.

Συμπερασματικά, το πάχος του γυαλιού είναι μια παράμετρος που επηρεάζει την πυραντοχή και η αύξηση του λειτουργεί ευεργετικά. Η πυραντοχή των μονών υαλοπινάκων είναι πολύ μικρή και συνοψίζεται στον Πίνακα 6.2, σε όρους θερμοκρασίας και χρόνου.



Σχήμα 6.28: Αδιάστατη κατανομή θερμοκρασίας κατά το πάχος των υαλοπινάκων, την στιγμή της θραύσης.

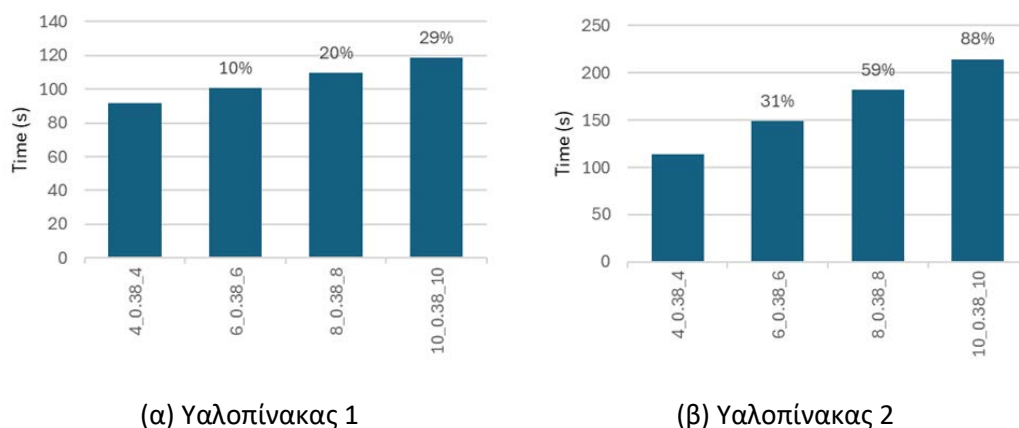
Πίνακας 6.2: Πυραντοχή μονών υαλοπινάκων.

	4mm	6mm	8mm	10mm
Κρίσιμος χρόνος θραύσης	60.2 s	78.2 s	87.2 s	100.7 s
Κρίσιμη θερμοκρασία (εκτεθειμένη περιοχή)	100 °C	113 °C	118 °C	131 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$	71 °C	80 °C	83 °C	92 °C

6.4.2 Διερεύνηση επιρροής πάχους γυαλιού (διστρωματικοί υαλοπίνακες)

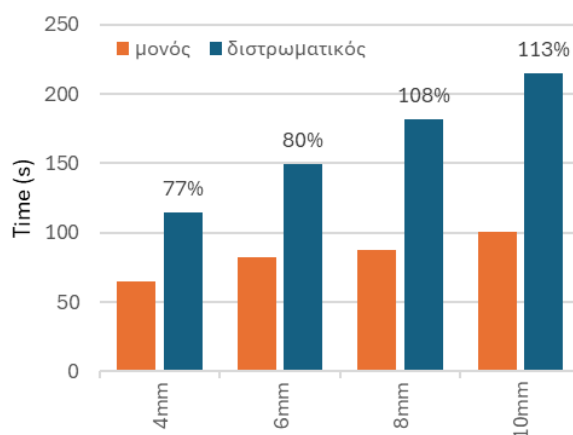
Στη συνέχεια μελετήθηκαν διστρωματικοί υαλοπίνακες (γυαλί επίπλευσης) για διαφορετικά πάχη γυαλινών πάνελ (4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm) με πλάτος πλαισίου 20 mm. Το πάχος του PVB διατηρήθηκε σταθερό και σε όλες τις περιπτώσεις είναι ίσο με 0.38 mm. Στη συνέχεια ο υαλοπίνακας που βρίσκεται στην πλευρά της πυρκαγιάς ονομάζεται-υαλοπίνακας 1 και ο υαλοπίνακας που δεν εκτίθεται απευθείας σε πυρκαγιά ονομάζεται-υαλοπίνακας 2.

Το Σχήμα 6.29 παρουσιάζει το χρόνο θραύσης των υαλοπινάκων 1 και 2. Η θραύση λαμβάνει χώρα πρώτα στον υαλοπίνακα 1 και στη συνέχεια στον υαλοπίνακα 2. Παρατηρείται πως ο χρόνος θραύσης του υαλοπίνακα 1 είναι πολύ μικρός σε όλες τις περιπτώσεις ($1 \text{ min} < t_R < 2 \text{ min}$) και δεν έχει μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με τον μονό υαλοπίνακα (Σχήμα 6.30). Η θραύση στον υαλοπίνακα 2 πραγματοποιείται με καθυστέρηση 36 s, 54 s, 81 s και 94.5 s για τα εξεταζόμενα πάχη 4 mm, 6 mm, 8 mm και 10 mm αντίστοιχα. Η χρονική υστέρηση αυξάνεται με την αύξηση του πάχους του υαλοπίνακα.



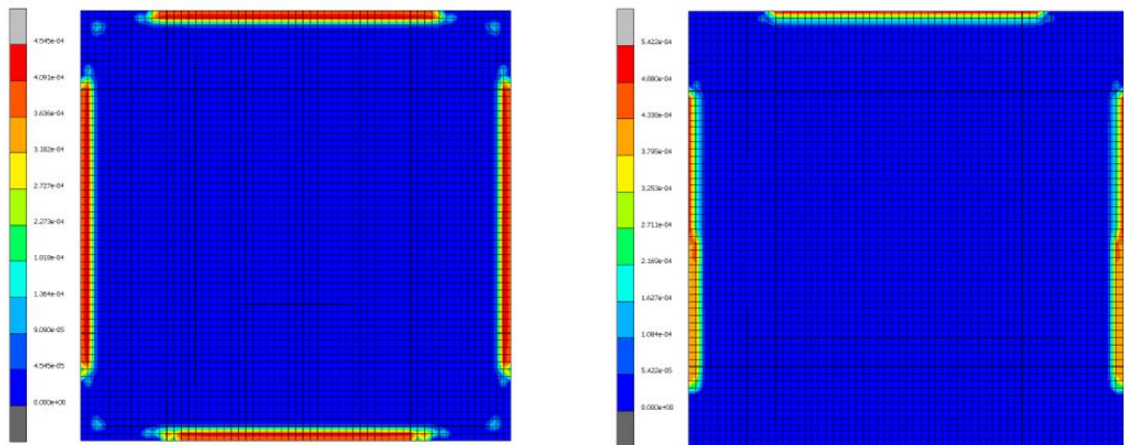
Σχήμα 6.29: Κρίσιμος χρόνος θραύσης των διστρωματικών υαλοπινάκων.

Στην εργασία αυτή, ο χρόνος πυραντοχής των διστρωματικών υαλοπινάκων λαμβάνεται ίσος με το χρόνο θραύσης του υαλοπίνακα 2. Παρατηρείται πως η αύξηση του πάχους του υαλοπίνακα οδήγησε σε μεγάλη αύξηση του χρόνου πυραντοχής και ειδικότερα για πάχος 10 mm η αύξηση είναι της τάξης του 80% (σε σύγκριση με πάχος 4 mm), ενώ η αντίστοιχη αύξηση για το μονό υαλοπίνακα είναι 56%. Επιπρόσθετα, η χρήση διστρωματικού υαλοπίνακα αυξάνει την πυραντοχή σημαντικά. Στο Σχήμα 6.30 συγκρίνεται ο χρόνος πυραντοχής του μονού και του διστρωματικού υαλοπίνακα για τα εξεταζόμενα πάχη και προκύπτει πως για πάχος 10 mm η πυραντοχή μπορεί να αυξηθεί κατά περίπου 110% σε σχέση με τον μονό υαλοπίνακα με το ίδιο πάχος. Πάρα ταύτα η πυραντοχή παραμένει πολύ χαμηλή ($t_R < 4 \text{ min}$).



Σχήμα 6.30: Σύγκριση πυραντοχής μονών και διστρωματικών υαλοπινάκων.

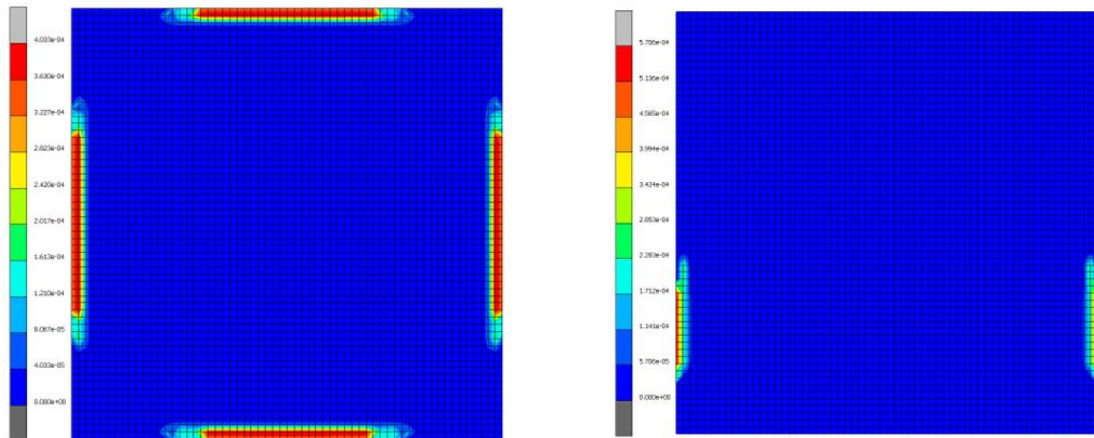
Σε όλες τις περιπτώσεις, η θραύση έλαβε χώρα στην άκρη του υαλοπίνακα (καλυμμένη περιοχή). Το Σχήμα 6.31 και 6.32 αποτυπώνει το πεδίο της ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης (equivalent cracking strain) για πάχος γυαλιού 4 και 10 mm, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνται για τα άλλα πάχη που εξετάστηκαν. Σημειώνεται πως η θραύση του υαλοπίνακα 2 εμφανίζεται στη θερμότερη επιφάνεια (επιφάνεια S3 σύμφωνα με το Σχήμα 5.2).



(α) Υαλοπίνακας 1

(β) Υαλοπίνακας 2

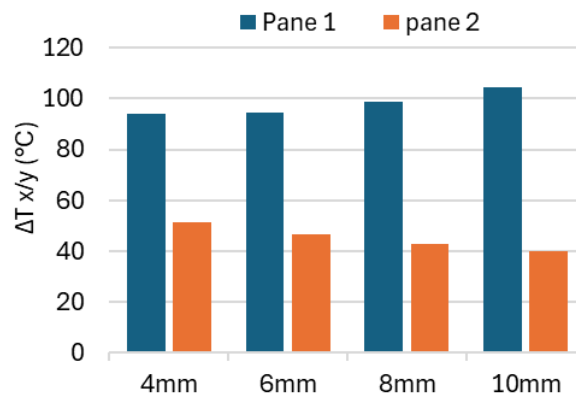
Σχήμα 6.31: Πεδίο ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης, για διστρωματικούς υαλοπίνακες-4x0.38x4.



(α) Υαλοπίνακας 1

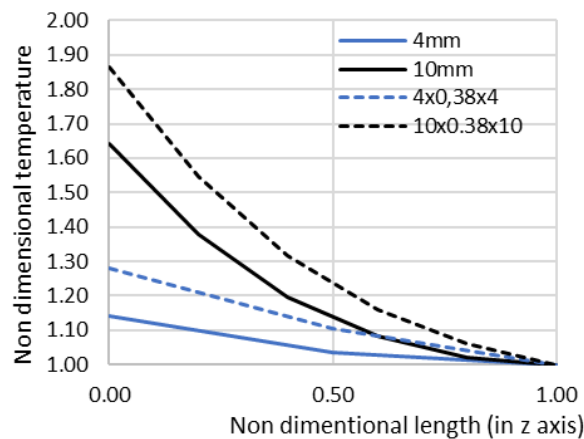
(β) Υαλοπίνακας 2

Σχήμα 6.32: Πεδίο ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης, για διστρωματικούς υαλοπίνακες-10x0.38x10.

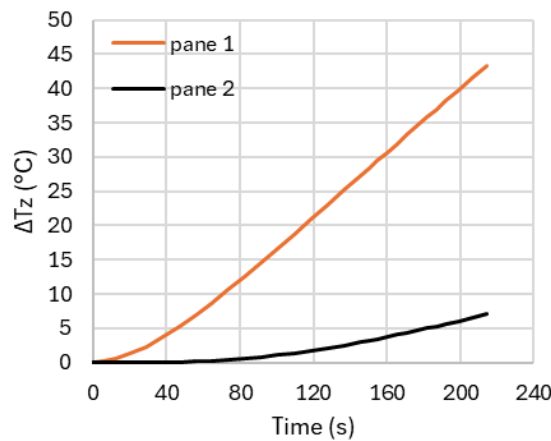


Σχήμα 6.33: Διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T_{x/y}$ (κέντρο εκτεθειμένης και άκρη καλυμμένης περιοχής), την στιγμή της θραύσης, για διστρωματικούς υαλοπίνακες).

Η διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T_{x/y}$ την στιγμή της θραύσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.33. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το $\Delta T_{x/y}$ που αντιστοιχεί στον υαλοπίνακα 1 είναι για όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο από 90°C , ($\Delta T_{x/y} > 90^\circ\text{C}$) και επομένως προκύπτει μεγαλύτερο σε σχέση με τους μονούς υαλοπίνακες (με $70^\circ\text{C} < \Delta T_{x/y} < 90^\circ\text{C}$). Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη κλίση της θερμοκρασίας στην περίπτωση των διστρωματικών υαλοπινάκων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.34.



Σχήμα 6.34: Αδιάστατη κατανομή θερμοκρασίας κατά το πάχος των υαλοπινάκων, την στιγμή της θραύσης.



Σχήμα 6.35: Χρονοϊστορία ΔT_z για τους υαλοπίνακες 1 και 2 (10x0.38x10).

Για τον υαλοπίνακα 2, η κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T_{x/y}$ είναι μικρότερη σε σχέση με τον υαλοπίνακα 1. Αυτό οφείλεται στη μικρή θερμοκρασιακή κλίση (σχεδόν γραμμική κατανομή θερμοκρασίας) κατά τον πάχος του. Από το Σχήμα 6.35 παρατηρείται πως το ΔT_z είναι πολύ μικρό για το Pane 2 (διστρωματικός υαλοπίνακας-10x0.38x10).

Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι οι διστρωματικοί υαλοπίνακες έχουν μεγαλύτερη πυραντοχή σε σχέση με τους μονούς υαλοπίνακες, αλλά η αντοχή τους παραμένει πολύ χαμηλή. Ο Πίνακας 6.3 συνοψίζει την αντοχής τους σε όρους θερμοκρασίας και χρόνου.

Πίνακας 6.3: Πυραντοχή διστρωματικών υαλοπινάκων (πάχος PVB-0.38 mm)

	4mm	6mm	8mm	10mm
Κρίσιμος χρόνος θραύσης (πυραντοχή)	114s	149s	182s	214s
Κρίσιμη θερμοκρασία (εκτεθειμένη περιοχή)	161°C	192°C	221°C	250°C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 1)	94°C	95°C	99°C	104°C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 2)	51°C	47°C	43°C	40°C

6.4.3 Διερεύνηση επιρροής αριθμού στρώσεων (πολυστρωματικοί υαλοπίνακες)

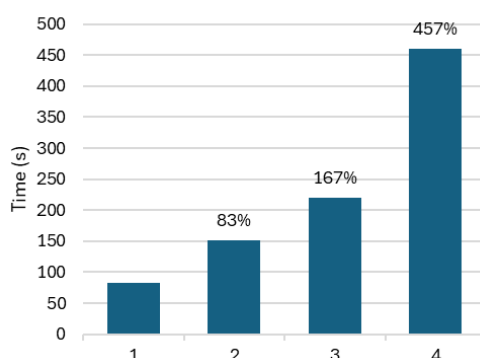
Στην συνέχεια μελετήθηκαν πολυστρωματικοί υαλοπίνακες (σύγκριση για 1,2,3 και 4 στρώσεις), με πλάτος πλαισίου 20 mm. Για τους υαλοπίνακες χρησιμοποιήθηκε γυαλί επίπλευσης 6 mm και το πάχος του PVB θεωρήθηκε παντού ίσο με 0.38 mm. Στόχος είναι να βρεθεί η επιρροή του αριθμού των στρώσεων στην πυραντοχή.

Οι πολυστρωματικοί υαλοπίνακες αποτελούνται από πολλαπλούς υαλοπίνακες μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται στρώσεις PVB. Η ονομασία που χρησιμοποιήθηκε για τα επιμέρους πάνελ είναι υαλοπίνακας 1, 2, 3 και 4 με το μικρότερο νούμερο να αντιστοιχεί στην πιο θερμή όψη του πολυστρωματικού υαλοπίνακα.

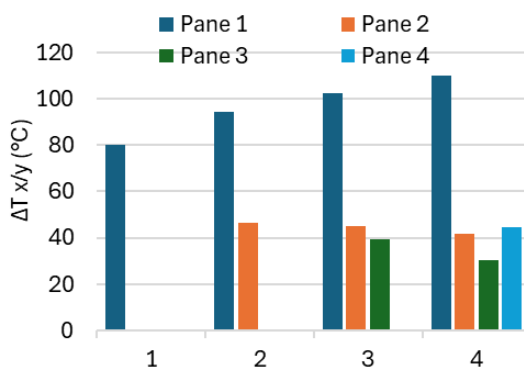
Η συμπεριφορά των πολυστρωματικών υαλοπινάκων έχει σχολιαστεί στις Ενότητες 6.4.2 και 6.4.3, για την περίπτωση των διστρωματικών υαλοπινάκων. Ομοίως, η συμπεριφορά ενός πολυστρωματικού υαλοπίνακα χαρακτηρίζεται από την σταδιακή θραύση των υαλοπινάκων 1, 2, 3 και 4 με την αντίστοιχη χρονική σειρά. Ως χρόνος πυραντοχής (ή κρίσιμος χρόνος θραύσης) λαμβάνεται ο χρόνος στον οποίο συμβαίνει η θραύση του τελευταίου υαλοπίνακα.

Το Σχήμα 6.36 παρουσιάζει την πυραντοχή των πολυστρωματικών υαλοπινάκων που μελετήθηκαν και συγκρίνεται με την περίπτωση του μονού υαλοπίνακα. Παρατηρείται πως ο αριθμός των στρώσεων έχει σημαντική επιρροή στην πυραντοχή τους.

Επιπλέον, από τη μελέτη των κρίσιμων $\Delta T_{x/y}$ (Σχήμα 6.37), συμπεραίνεται πως σε κάθε περίπτωση η θραύση του υαλοπίνακα 1 επέρχεται λόγω του σύνθετου μηχανισμού $\Delta T_{x/y}$ και ΔT_z , λόγω της μη-ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας κατά το πάχος του. Οι υπόλοιποι υαλοπίνακες (2, 3, 4) έχουν σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας κατά z (λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας που οφείλεται στο PVB), με αποτέλεσμα να αστοχούν μέσω του δισδιάστατου μηχανισμού θραύσης λόγω του $\Delta T_{x/y}$.



Σχήμα 6.36: Πυραντοχή πολυστρωματικών υαλοπινάκων, σε σύγκριση με το μονό υαλοπίνακα ίδιου πάχους (6 mm ανά πάνελ).



Σχήμα 6.37: Μεταβολή του κρίσιμου $\Delta T_{x/y}$ για πολυστρωματικούς υαλοπίνακες.

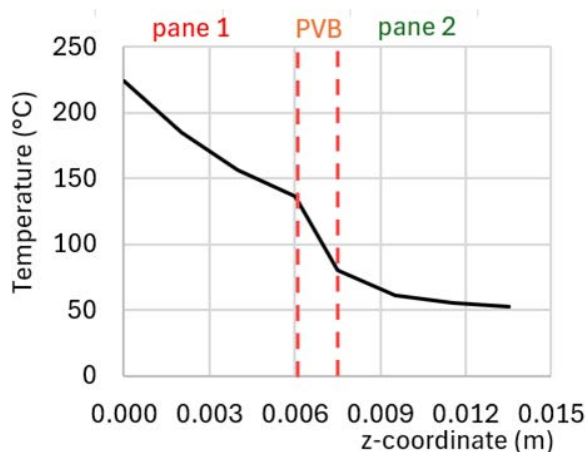
Ο Πίνακας 6.4 συνοψίζει την αντοχή των πολυστρωματικών υαλοπινάκων που μελετήθηκαν σε αυτή την ενότητα, σε όρους θερμοκρασίας και χρόνου.

Πίνακας 6.4: Πυραντοχή πολυστρωματικών υαλοπινάκων (πάχος υαλοπίνακα 6 mm).

	1	2	3	4
Κρίσιμος χρόνος θραύσης (πυραντοχή)	83 s	151 s	220 s	460 s
Κρίσιμη θερμοκρασία (εκτεθειμένη περιοχή)	113 °C	192 °C	311 °C	462 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 1)	80 °C	95 °C	102 °C	110 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 2)		47 °C	45 °C	42 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 3)			39 °C	30 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 4)				45 °C

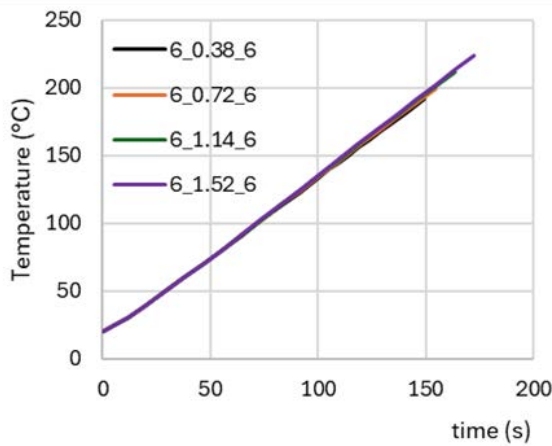
6.4.4 Διερεύνηση επιρροής πάχους PVB (διστρωματικοί υαλοπίνακες)

Με στόχο την διερεύνηση της επιρροής του PVB στη θερμική και μηχανική απόκριση των υαλοπινάκων (με γυαλί επίπλευσης), μελετήθηκαν διστρωματικοί υαλοπίνακες με πλάτος πλαισίου 20 mm και πάχος PVB 0.38 mm, 0.76 mm, 1.14 mm και 1.52 mm. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του PVB ο υαλοπίνακας 2 προστατεύεται και παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.38 (πρόκειται για την περίπτωση του υαλοπίνακα 6x1.52x6 σε χρόνο $t=173$ s), η θερμοκρασία παρουσιάζει ένα «άλμα» στη θέση του PVB και επίσης παρατηρείται ότι η κλίση της θερμοκρασίας να είναι μειωμένη στον υαλοπίνακα 2.

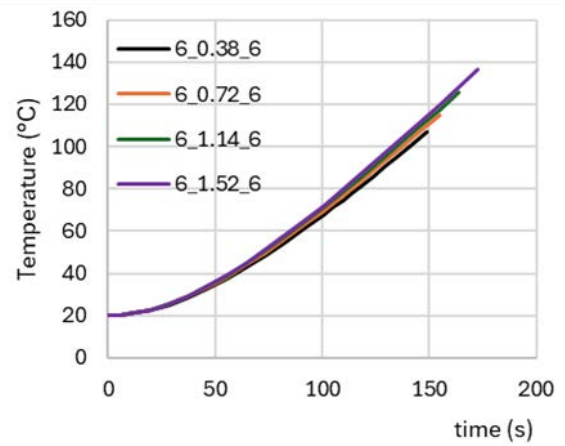


Σχήμα 6.38: Προφίλ θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση του πάχους για ένα διστρωματικό υαλοπίνακα.

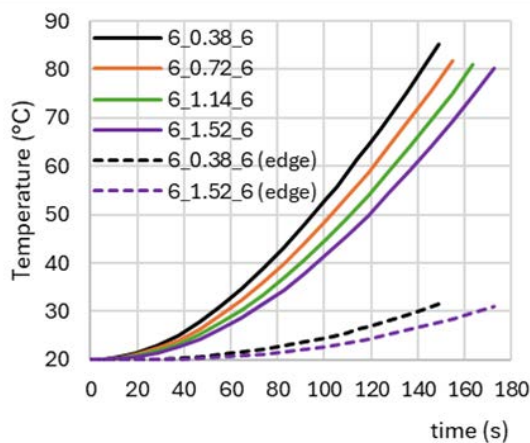
Το Σχήμα 6.39 παρουσιάζει την ιστορία της θερμοκρασίας στο κέντρο του υαλοπίνακα στις επιφάνειες S1, S2, S3 και S4 (όπως αυτές ορίζονται στο Σχήμα 5.2(β)) για τους υαλοπίνακες που μελετήθηκαν. Παρατηρείται πως η θερμοκρασία στις επιφάνειες S1 και S2 δεν άλλαξε σχεδόν καθόλου, ενώ στις επιφάνειες S3 και S4 η αύξηση του πάχους του PVB προκάλεσε μείωση της θερμοκρασίας. Επομένως, όπως ήταν αναμενόμενο επηρεάστηκε μόνο το θερμικό προφίλ του υαλοπίνακα 2. Ενδεικτικά αναφέρεται πως, η μείωση στα 120 s ανάλυσης είναι περίπου 20-25%, για PVB-1.52 mm. Στην άκρη του υαλοπίνακα 2, η επιρροή του PVB είναι πιο μικρή όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.39(γ, δ) (η μείωση στα 120 s ανάλυσης είναι περίπου 10%, για PVB-1.52 mm). Από τα παραπάνω διαφαίνεται πως η μεταβολή του πάχους του PVB δεν επηρεάζει το θερμικό προφίλ του υαλοπίνακα 1 και δεν αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την θραύση του. Σχετικά με τον υαλοπίνακα 2, η αύξηση του πάχους του PVB προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας, τόσο στο κέντρο (περιοχή ομοιόμορφης θερμοκρασίας) όσο και στις άκρες. Επομένως, συνολικά η επίπεδη θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T_{x/y}$ που είναι η πηγή των εφελκυστικών τάσεων που οδηγούν στη θραύση, δεν επηρεάζεται σημαντικά.



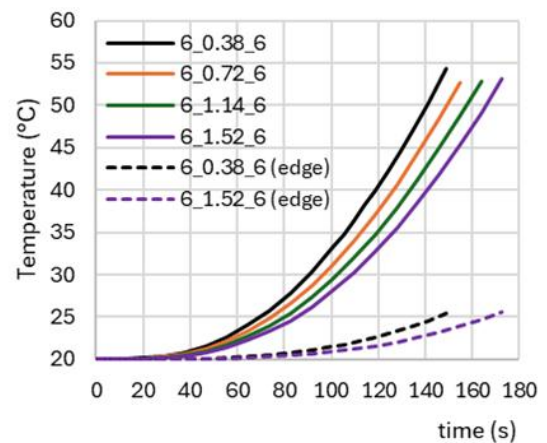
(α) S1



(β) S2



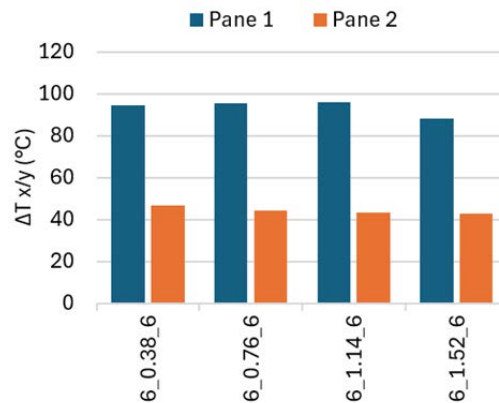
(γ) S3



(δ) S4

Σχήμα 6.39: Χρονοϊστορία της θερμοκρασίας στο κέντρο και στην άκρη του υαλοπίνακα, στις επιφάνειες S1, S2, S3 και S4.

Στο Σχήμα 6.40 παρουσιάζεται η μεταβολή του $\Delta T_{x/y}$ για τους διστρωματικούς υαλοπίνακες με διαφορετικά πάχη PVB. Παρατηρείται πως το κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου και για τους δύο υαλοπίνακες. Σχετικά με τον υαλοπίνακα 1 αυτό ήταν αναμενόμενο, εφόσον δεν μεταβλήθηκε το θερμοκρασιακό του πεδίο. Σχετικά με τον υαλοπίνακα 2, δεν υπάρχει διαφοροποίηση, αν και σημειώθηκε μείωση της θερμοκρασίας του, διότι το προφίλ θερμοκρασίας κατά z είναι σχεδόν γραμμικό. Η θραύση λοιπόν επέρχεται λόγω του $\Delta T_{x/y}$ και η ευεργετική δράση του ΔT_z απουσιάζει (πρόκειται δηλαδή για το δισδιάστατο μηχανισμό θραύσης).

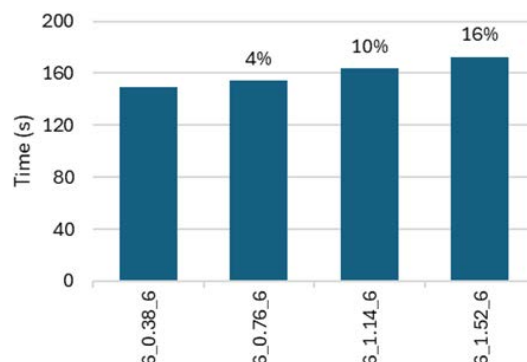


Σχήμα 6.40: Μεταβολή του κρίσιμου $\Delta T_{x/y}$ για διστρωματικούς υαλοπίνακες με διαφορετικά πάχη PVB.

Το Σχήμα 6.41 παρουσιάζει την μεταβολή της πυραντοχής (κρίσιμος χρόνος θραύσης) με για τους διστρωματικούς υαλοπίνακες με διαφορετικά πάχη PVB. Παρατηρείται πως ο χρόνος πυραντοχής παραμένει πολύ μικρός ($t_R < 3 \text{ min}$) και η μεταβολή που προκαλεί η αύξηση του PVB είναι πολύ μικρή.

Ο Πίνακας 6.5 συνοψίζει την αντοχή των διστρωματικών υαλοπινάκων που μελετήθηκαν σε αυτή την ενότητα με όρους θερμοκρασίας και χρόνου.

Συμπεραίνεται πως η αύξηση του πάχους του PVB μειώνει τη θερμοκρασία του υαλοπίνακα 2, αλλά δε συντελεί σημαντικά στην αύξηση της πυραντοχής του. Επίσης, παρατηρείται πως ο υαλοπίνακας 2, λόγω της ύπαρξης του PVB, έχει σχεδόν γραμμικό προφίλ θερμοκρασίας κατά το πάχος του (στο άκρο) και αστοχεί λόγω του επιπέδου μηχανισμού θραύσης.



Σχήμα 6.41: Κρίσιμος χρόνος θραύσης των διστρωματικών υαλοπινάκων με διαφορετικά πάχη PVB.

Πίνακας 6.5: Πυραντοχή διστρωματικών υαλοπινάκων για διάφορα πάχη PVB (πάχος υαλοπίνακα 6 mm)

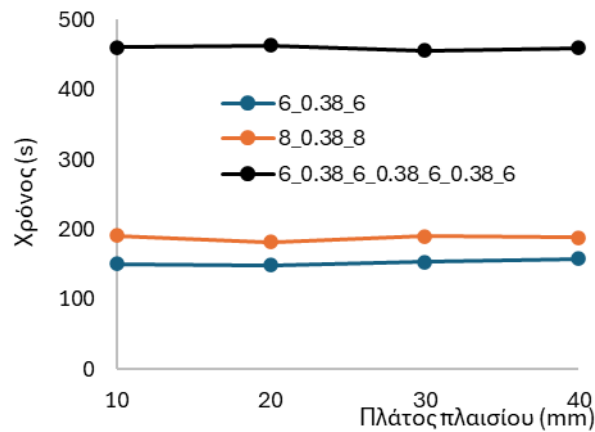
	0.38 mm	0.76 mm	1.14 mm	1.52 mm
Κρίσιμος χρόνος θραύσης (πυραντοχή)	149 s	155 s	164 s	173 s
Κρίσιμη θερμοκρασία (εκτεθειμένη περιοχή)	95 °C	95 °C	96 °C	88 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 1)	192 °C	200 °C	212 °C	224 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 2)	47 °C	44 °C	43 °C	43 °C

6.4.5 Διερεύνηση επιρροής πλάτους πλαισίου (πολυστρωματικοί υαλοπίνακες)

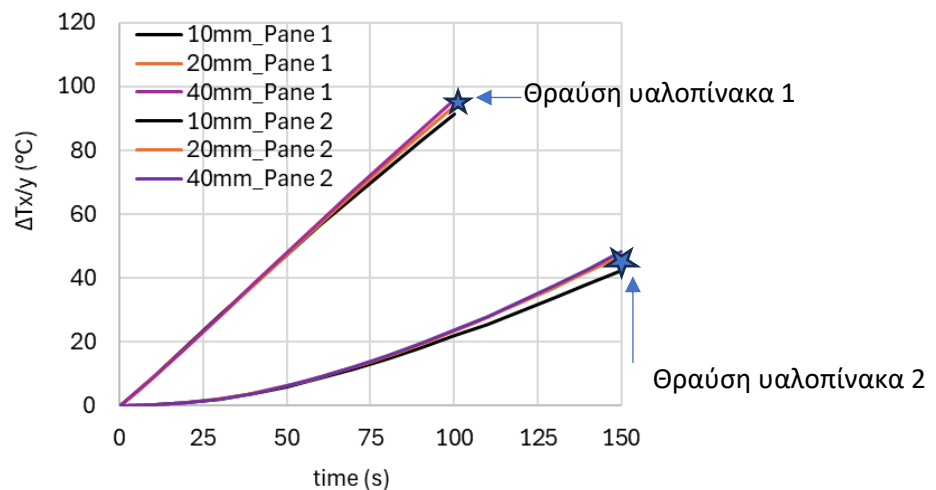
Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται διερεύνηση σχετικά με την επιρροή του πλάτους του πλαισίου. Εφόσον το $\Delta T_{x/y}$ προκαλεί τις εφελκυστικές τάσεις στην καλυμμένη περιοχή του υαλοπίνακα, προκύπτει το ερώτημα εάν η αύξηση του πλάτους του πλαισίου θα προκαλέσει μεταβολή της θερμοκρασίας στο άκρο του υαλοπίνακα (που θα επηρεάσει το $\Delta T_{x/y}$, άρα και τις εφελκυστικές τάσεις). Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές επιλύσεις με πλάτος πλαισίου 10 mm, 20 mm, 30 mm και 40 mm. Σε όλες τις περιπτώσεις οι υαλοπίνακες χρησιμοποιούν γυαλί επίπλευσης και το πάχος του PVB θεωρήθηκε ίσο με 0.38 mm. Η μελέτη περιλαμβάνει δύο διστρωματικούς υαλοπίνακες με πάχος γυαλιού 6 mm και 8 mm και έναν πολυστρωματικό υαλοπίνακα (4 στρώσεις), με πάχος γυαλιού 6 mm.

Το Σχήμα 6.42 συνοψίζει την πυραντοχή των πολυστρωματικών υαλοπινάκων που μελετήθηκαν και για τα διάφορα πλάτη πλαισίου. Παρατηρείται πως το πλάτος του πλαισίου δεν έχει επιρροή στην πυραντοχή τους.

Για να μελετηθεί περισσότερο η συμπεριφορά των υαλοπινάκων, το Σχήμα 6.43 παρουσιάζει την χρονοϊστορία του $\Delta T_{x/y}$ για τους υαλοπίνακες που μελετήθηκαν. Παρατηρείται πως η μεταβολή του πλάτους του πλαισίου δεν επηρεάζει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του άκρου και του κέντρου του υαλοπίνακα και επομένως δεν προκύπτει διαφορά και στους χρόνους αστοχίας.



Σχήμα 6.42: Πυραντοχή πολυστρωματικών υαλοπινάκων για διαφορετικά πλάτη πλαισίου.

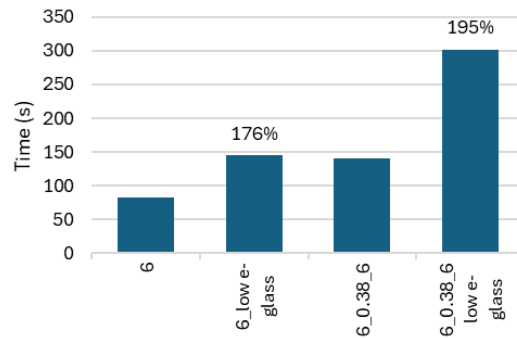


Σχήμα 6.43: Χρονοϊστορία του $\Delta T_{x/y}$ για την περίπτωση του διστρωματικού υαλοπίνακα 6x0.38x6 για διαφορετικά πάχη πλαισίου.

6.4.6 Διερεύνηση επιρροής τύπου γυαλιού (μονοί και διστρωματικοί υαλοπίνακες)

Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σχετικά με τον τύπο του γυαλιού που χρησιμοποιούν οι υαλοπίνακες και συγκεκριμένα εξετάστηκε το επικαλυμμένο γυαλί χαμηλής εκπομπής (low-E glass). Για τον σκοπό μελετήθηκε ένα μόνος υαλοπίνακας πάχους 6 mm και ένας διστρωματικός υαλοπίνακας πάχους 6 mm και PVB πάχους 0.38 mm. Και στις δύο περιπτώσεις το πλάτος του πλαισίου ήταν 20 mm.

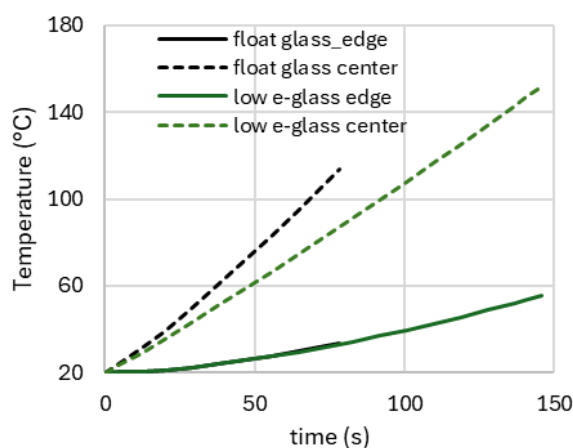
Το low e-glass έχει πολύ χαμηλό συντελεστή εκπομπής και αναμένεται να προκαλέσει μείωση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των υαλοπινάκων και αναμένεται ότι η χρήση του θα έχει θετική επίδραση στην πυραντοχή των υαλοπινάκων.



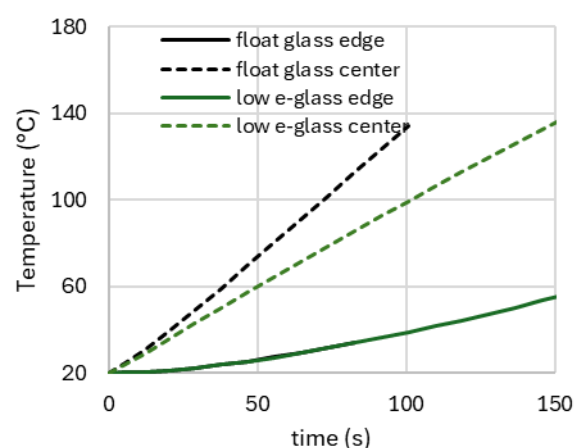
Σχήμα 6.44: Πυραντοχή υαλοπινάκων low e-glass σε σχέση με τους υαλοπίνακες με γυαλί επίπλευσης.

Το Σχήμα 6.44 αποδίδει την πυραντοχή των υαλοπινάκων που μελετήθηκαν και συγκρίνει τους αντίστοιχους υαλοπίνακες που χρησιμοποιούν γυαλί επίπλευσης. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις η χρήση του low e-glass αυξάνει πολύ την πυραντοχή (αύξηση μεγαλύτερη από το 175%).

Προκειμένου να διερευνηθεί το παραπάνω συμπέρασμα, το Σχήμα 6.45 παρουσιάζει την χρονοϊστορία της θερμοκρασίας στο κέντρο του θερμού υαλοπίνακα για όλες τις περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως λόγω του χαμηλού συντελεστή εκπομπής επέρχεται μια μείωση στη θερμοκρασία των υαλοπινάκων και για το λόγο αυτό καθυστερεί η θραύση τους. Ο Πίνακας 6.6 συνοψίζει την αντοχή των υαλοπινάκων που μελετήθηκαν σε αυτή την ενότητα σε όρους θερμοκρασίας και χρόνου.



(α) Μονός υαλοπίνακας



(β) Διστρωματικός υαλοπίνακας

Σχήμα 6.45: Χρονοϊστορία θερμοκρασίας στην θερμή επιφάνεια των υαλοπινάκων από γυαλί επίπλευσης και low e-glass.

Πίνακας 6.6: Πυραντοχή υαλοπινάκων από low e-glass και γυαλί επίπλευσης (πάχος υαλοπίνακα 6 mm).

	6	6	6x0.38x6	6x0.38x6
	float glass	low e-glass	float glass	low e-glass
Κρίσιμος χρόνος θραύσης (πυραντοχή)	78 s	146 s	149 s	302 s
Κρίσιμη θερμοκρασία (εκτεθειμένη περιοχή)	113 °C	151 °C	192 °C	239 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 1)	80 °C	96 °C	94 °C	111 °C
Κρίσιμο $\Delta T_{x/y}$ (υαλοπίνακας 2)			47 °C	64 °C

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία μελέτησε την συμπεριφορά πλαισιωμένων υαλοπινάκων σε συνθήκες πυρκαγιάς. Αρχικά αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση ενός πειράματος που είναι διαθέσιμο στην βιβλιογραφία (Wang and Hu, 2019) και αφορά έναν διστρωματικό υαλοπίνακα που εκτίθεται σε μια πυρκαγιά τύπου λίμνης. Η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων του θερμικού, αλλά και του μηχανικού προβλήματος επιβεβαίωσε την ορθότητα της αριθμητικής προσομοίωσης.

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού θραύσης αναπτύχθηκαν απλοποιημένα μηχανικά μοντέλα που οδήγησαν στο συμπέρασμα πως, η θραύση είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών τάσεων που εισέρχονται λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς εντός επιπέδου του υαλοπίνακα, μεταξύ της εκτεθειμένης και της καλυμμένης περιοχής (εντός επιπέδου μηχανισμός λόγω $\Delta T_{x/y}$). Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε πως λόγω της μη-γραμμικής κατανομής της θερμοκρασίας κατά το πάχος του υαλοπίνακα, εισέρχονται θλιπτικές τάσεις που δρουν ευεργετικά και καθυστερούν την εμφάνιση της θραύσης (εκτός επιπέδου μηχανισμός λόγω ΔT_z).

Στην συνέχεια, αναπτύχθηκε ένα πιο εξελιγμένο αριθμητικό μοντέλο, με στόχο την προσομοίωση της συμπεριφοράς πλαισιωμένων υαλοπινάκων υπό συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO (EN 1991-1-2). Το νέο μοντέλο αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των υαλοπινάκων. Η ορθότητα των συμπερασμάτων των απλοποιημένων μηχανικών μοντέλων επιβεβαιώθηκε μέσω της ερμηνείας των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη για να διερευνηθεί ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την πυραντοχή των υαλοπινάκων. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα πως, το πάχος του υαλοπίνακα είναι μια παράμετρος που επηρεάζει την πυραντοχή του και η αύξηση του οδηγεί δρα ευεργετικά. Επίσης διαπιστώθηκε

πως οι διστρωματικοί υαλοπίνακες έχουν μεγαλύτερη πυραντοχή σε σχέση με τους μονούς υαλοπίνακες λόγω και πως η αύξηση των στρώσεων αυξάνει σημαντικά την πυραντοχή. Επίσης παρατηρήθηκε πως οι υαλοπίνακες που δεν εκτίθενται απευθείας στην πυρκαγιά, έχουν σχεδόν γραμμικό προφίλ θερμοκρασίας κατά το πάχος (στην άκρη) και αστοχούν λόγω του επιπέδου μηχανισμού θραύσης. Τέλος, βρέθηκε πως η μεταβολή του πάχους του PVB και το πλάτος του πλαισίου δεν επηρεάζουν την πυραντοχή των υαλοπινάκων.

Βιβλιογραφία

- Chow, W. K., & Gao, Y. (2008). Thermal stresses on window glasses upon heating, 2157-2164.
- Debuyser, M., Sjöström, J., Lange, D., Honfi, D., Sonck, D., & Belis, J. (2016). Post breaking behavior of laminated glass. Behavior of monolithic and laminated glass exposed to radiant heating, 1-2.
- Emmons, H. W. (1986). The needed fire science. Fire Safety Science-Proceedings of the First International Symposium (pp. 33-53). IAFSS.
- EN 1364-1. (2015). Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 1: Walls. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 1364-2. (2018). Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 2: Ceilings. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 1364-3. (2014). Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 3: Curtain walling - Full configuration (complete assembly). European Committee for Standardization (CEN).
- EN 1364-4. (2014). Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 4: Curtain walling - Part configuration. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 1991-1-2. (2001). Eurocode 1: Actions on structures exposed to fire – Part 1-2. General actions – structural fire design. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 1993-1-2. (2003). Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1.2: General rules-structural fire design. European Committee for Standardization (CEN).
- Fischer-Cripps, A. C., Collins, R. E., Turner, G. M., & Bezzel, E. (1995). Stresses and fracture probability in evacuated glazing, 41-59.

- Harada, K., Enomoto, A., Uede, K., & Wakamatsu, T. (2000). An experimental study on glass cracking and fallout by radiant heat exposure. *Fire Safety Science - Proceedings of the Sixth International Symposium* (pp. 1063-1074). IAFSS.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley.
- Janna, W. S. (2009). *Engineering heat transfer*. CRC Press.
- Joshi, A. A., & Pagni, P. J. (1991). Users' guide to BREAK1, The Berkeley algorithm for breaking window glass in a compartment fire. National Institute of Standards and Technology.
- Keski-Rahkonen, O. (1988). Breaking mechanism of glass. *Breaking of window glass close to fire*, 61-69.
- Lagowski, J. J. (2004). *Chemistry: Foundations and Applications*. Macmillan Reference USA.
- Lu, W., & Sun, J. (2021). Thermal properties of low-E glass. *Thermal response of low-E and float glass facades under various heating rates*, 2-4.
- Martín, M., Centelles, X., Solé, A., Barreneche, C., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2019). PVB chemical chain structure. *Polymeric interlayer materials for laminated glass: A review*, 5-6.
- Moreno, C. A., Piroird, K., & Lorenceau, E. (2022). Time-temperature state diagram for PVB and increasing temperature-reading. *Extended time-temperature rheology of polyvinyl butyral (PVB)*, 2-3, 7-11.
- Pagni, P. J. (2002). *Thermal Glass Breakage*, 3-22.
- Pantousa, D. (2013). *Behaviour of structures under fire conditions after earthquake events*. Volos.
- Pope, N. D., & Bailey, C. G. (2007). Development of a Gaussian glass breakage model within a fire field model, 366-376.
- Schmid, B. C., Finn, A. N., & Young, J. C. (1934). Thermal expansion of soda-lime glass. *Thermal expansions of some soda-lime-silica glasses as functions of the composition*, 421-428.

- Shields, T. J., Silcock, G. W., & Flood, M. (2002). Performance of a single glazing assembly exposed to a fire in the centre of an enclosure, 51-75.
- Shields, T. J., Silcock, G. W., & Flood, M. F. (2001). Experimental research. Performance of a single glazing assembly exposed to enclosure corner fires of increasing severity, 123-152.
- Skelly, M. J., Roby, R. J., & Beyler, C. L. (1991). Temperature gradient. An experimental investigation of glass breakage in compartment fires, 25-34.
- Tofilo, P., & Delichatsios, M. (2010). Thermally induced stresses in glazing systems, 101–116.
- Wang, Y., & Hu, J. (2019). Experimental and numerical analysis of laminated glass, and material properties. Performance of laminated glazing under fire conditions, 2-4.
- Wang, Y., Wang, Q., Sun, J., He, L., & Liew, K. M. (2015). Compressive strength of float glass. Thermal performance of exposed framing glass facades, 2967-2969.
- Wang, Y., Wang, Q., Shao, G., Chen, H., Sun, J., He, L., & Liew, K. M. (2014a). Mechanical properties of float and coated glass at different temperatures. Experimental study on critical breaking stress of float glass, 44-46.
- Wang, Y., Wang, Q., Sun, J., He, L., & Liew, K. M. (2016). Influence of fire location. Influence of fire location on the thermal performance of glass facades, 438-442.
- Wang, Y., Wang, Q., Wen, J. X., Sun, J., & Liew, K. M. (2017). Experimental analysis of different types of glass. Investigation of thermal breakage and heat transfer in single, insulated and laminated glazing under fire conditions, 662-672.
- Wang, Y., Wu, Y., Wang, Q., Liew, K. M., Chen, H., Sun, J., & He, L. (2014b). Influence of installation form. Numerical study on fire response of glass facades in different installation forms, 172-180.