

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ

**Σοφία Κ. Κορλού**  
Πολιτικός Μηχανικός  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [sofiakor3@gmail.com](mailto:sofiakor3@gmail.com)

**Ηλίας Δ. Θανάσουλαι**  
Υποψήφιος Διδάκτορας  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [liasthana@gmail.com](mailto:liasthana@gmail.com)

**Κοσμάς Η. Μουπαγιτσόγλου**  
Πολιτικός Μηχανικός  
Eckersley O'Callaghan  
Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο  
e-mail: [kosmasm@gmail.com](mailto:kosmasm@gmail.com)

**Χάρης Ι. Γαντές**  
Καθηγητής  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

### 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

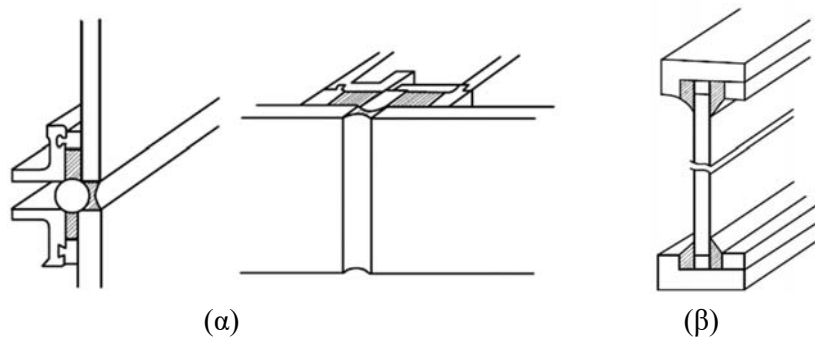
Οι σύγχρονες εφαρμογές του γυαλιού σε προσόψεις κτιρίων εμπεριέχουν όλο και συχνότερα τη χρήση του ως φέροντος τοιχώματος (shear wall), που συνεισφέρει στην οριζόντια παγίωση του φορέα και αντικαθιστά τους συμβατικούς συνδέσμους δυσκαμψίας. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη λυγηρότητα των στοιχείων γυαλιού και την επακόλουθη ευαισθησία τους σε φαινόμενα αστάθειας, το παρόν άρθρο μελετά τη συμπεριφορά πολυστρωματικών υαλοπινάκων (φύλλα γυαλιού ενωμένα μεταξύ τους με ενδιάμεσες στρώσεις πολυμερούς) σε διατμητικό λυγισμό στα πλαίσια δύο διαφορετικών συστημάτων φέρουσας υάλωσης (structural silicone glazing και butt-joint glazing). Η επιρροή στην απόκριση του φορέα της διατμητικής σύνδεσης που εξασφαλίζει η ενδιάμεση στρώση, καθώς και του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνει κάθε σύστημα τη στερέωση του υαλοπίνακα στον μεταλλικό σκελετό, αποτελεί βασικό πυρήνα της μελέτης και διερευνάται με τη διεξαγωγή γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων. Κρίσιμα φορτία λυγισμού δίνουν μια πρώτη εκτίμηση της αντοχής, ενώ στη συνέχεια δρόμοι ισορροπίας περιγράφουν με ακρίβεια τη μεταλυγισμική συμπεριφορά και αναδεικνύουν φαινόμενα γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Τέλος, οι υπολογιζόμενες οριακές αντοχές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε όρους μειωτικού συντελεστή  $\chi$  και συγκρίνονται με προτεινόμενες καμπύλες λυγισμού, ώστε να ελεγχθεί η καταλληλότητα των κανονιστικών διατάξεων που βασίζονται στον Ευρωκώδικα 3 για τον σχεδιασμό των υαλοπινάκων.

### 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αυξανόμενη χρήση του γυαλιού ως δομικού υλικού. Η σύγχρονη τεχνική παρασκευής του επίπεδου γυαλιού (float glass), όπως την εισήγαγε το

1953 ο Alastair Pilkington, άνοιξε νέους ορίζοντες στην αξιοποίησή του και εκτόξευσε τη δημοτικότητά του στην αρχιτεκτονική και τη βιομηχανία. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την περαιτέρω επεξεργασία του βρίσκουν εφαρμογή ως φέροντα στοιχεία σε πατώματα, οροφές, στέγαστρα, προσόψεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργία των φερόντων τοιχωμάτων από γυαλί (glass shear walls), τα οποία ενισχύουν τη δυσκαμψία του φορέα και συμμετέχουν στην ανάληψη των οριζόντιων φορτίων. Ο σχεδιασμός τους απαιτεί προσοχή, καθώς πρόκειται για στοιχεία μεγάλης λυγηρότητας, τα οποία υπόκεινται σε εντός επιπέδου διατμητικά φορτία με αυξημένο τον κίνδυνο εκδήλωσης φαινομένων αστάθειας.

Το παρόν άρθρο μελετά τη συμπεριφορά ενός υαλοπίνακα (ύψους  $a=3800$  mm και πλάτους  $b=1500$  mm) σε διατμητικό λυγισμό, εστιάζοντας στα συστήματα Δομικής Σιλικόνης (Structural Silicone Glazing-SSG) και Μετωπικής Σύνδεσης (Butt-Joint Glazing-BJG) (Σχ. 1) [1]. Και τα δύο συνιστούν συστήματα πρόσοψης, ωστόσο ο κατάλληλος τρόπος σύνδεσής τους με το υπόλοιπο κτίριο επιτρέπει την ενεργοποίησή τους ως συνδέσμων δυσκαμψίας. Το πρώτο σύστημα, της δομικής σιλικόνης, αποτελείται από κατακόρυφους ορθοστάτες (mullions) και οριζόντιες τραβέρσες (transoms) αλουμινίου, που παρέχουν περιμετρική στήριξη στο γυαλί. Τα πάνελ συγκρατούνται στα μεταλλικά προφίλ με τη βοήθεια πιστοποιημένης φέρουσας σιλικόνης δύο συστατικών, η οποία επιτρέπει την ομαλή μεταφορά των φορτίων στο επίπεδο του γυαλιού (περίπου ομοιόμορφη κατανομή τάσεων χωρίς υψηλές συγκεντρώσεις), ενώ εξασφαλίζει τις απαραίτητες ανοχές για τις συστολοδιαστολές των δύο υλικών, που εμφανίζουν διαφορετικό συντελεστή γραμμικής διαστολής. Το δεύτερο σύστημα, της μετωπικής σύνδεσης, περιλαμβάνει τον εγκιβωτισμό της βάσης και της κεφαλής των υαλοπινάκων σε μεταλλικές διατομές (συνήθως μορφής U), οι οποίες στερεώνονται στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου. Η στήριξη, η οποία χαρακτηρίζεται ως συμβατική, υλοποιείται με ελαστικά παρεμβύσματα και αρμοπληρωτικά λάστιχα, που αναλαμβάνουν τη στεγανότητα της κατασκευής και αποτρέπουν την επαφή γυαλιού και πλαισίου. Οι αρμοί μεταξύ διαδοχικών υαλοπινάκων σφραγίζονται με σιλικονούχα κόλλα, η οποία επισημαίνεται πως σε αυτή την περίπτωση εξυπηρετεί αποκλειστικά σκοπούς στεγανοποίησης και δεν μπορεί να θεωρηθεί πως συμβάλλει στη στήριξη της διάταξης.



Σχ. 1: Λεπτομέρειες σύνδεσης υαλοπίνακα-μεταλλικού σκελετού για τα συστήματα (α) SSG και (β) BJG

### 3. ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ Η ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το γυαλί είναι ένα άμορφο, μη-κρυσταλλικό στερεό, που έχει ελαστική, ισότροπη συμπεριφορά και εμφανίζει ψαθυρή μορφή θραύσης [2,3]. Υπό την επίδραση μιας καταπόνησης παρατηρείται δυσκολία στην αναδιάρθρωση της δομής του και δεν

προσφέρεται η δυνατότητα πλαστικοποίησης, ώστε να επιτευχθεί ανακατανομή της έντασης. Αυτός είναι και ο λόγος που η εφελκυστική του αντοχή απομειώνεται σημαντικά με την ύπαρξη επιφανειακών ατελειών, οι οποίες συνιστούν σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Έτσι, ενώ θεωρητικά υπολογίζεται πως μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 8000 MPa, στην πράξη διαπιστώνονται πολύ μικρότερες τιμές, που κυμαίνονται μεταξύ των 30 και 60 MPa. Αύξηση των τιμών αυτών επιδιώκεται μέσω της θερμικής κατεργασίας του γυαλιού. Η βασική ιδέα έγκειται στη δημιουργία ενός ευνοϊκού πεδίου παραμενουσών τάσεων με την εισαγωγή εφελκυσμού στον πυρήνα, όπου δε συναντώνται ατέλειες και θλίψης στις περιοχές κοντά στις επιφάνειες. Όσο οι αναπτυσσόμενες, υπό την επίδραση εξωτερικής φόρτισης, εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες από τις παραμένουσες θλιπτικές, επικρατεί καθεστώς θλίψης και εμποδίζεται η περαιτέρω επέκταση των ρωγμών. Διακρίνονται δύο προϊόντα θερμικής κατεργασίας: το πλήρως σκληρυμένο ( $\sigma_{Rk}=120\text{MPa}$ ) και το θερμικά ενισχυμένο γυαλί ( $\sigma_{Rk}=70\text{MPa}$ ). Και τα δύο έχουν ως βάση το ανοπτημένο γυαλί ( $\sigma_{Rk}=45\text{MPa}$ ) [4].

Το πολυστρωματικό γυαλί (laminated glass) αποτελείται από δύο ή περισσότερα φύλλα γυαλιού ενωμένα μεταξύ τους με μια διάφανη ενδιάμεση στρώση πολυμερούς [5,6]. Μετά τη θραύση τα κομμάτια του γυαλιού παραμένουν προσκολλημένα στην ενδιάμεση στρώση, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος τραυματισμού. Παράλληλα εξασφαλίζεται ένα μέρος της φέρουσας ικανότητας και μετά την αστοχία, καθώς μέσα από την επαφή των θραυσμάτων είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένας δρόμος μεταφοράς του θλιπτικού φορτίου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεση στρώση είναι θερμοπλαστικά. Ο όρος αυτός αποδίδει την ιδιότητά τους να μαλακώνουν και να λιώνουν όταν θερμαίνονται και να στερεοποιούνται όταν ψύχονται. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά, δηλαδή οι ιδιότητές τους μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Η πολυβινυλική βουτυράλη (Polyvinyl Butyral-PVB) αποτελεί μέχρι σήμερα την πιο κοινή επιλογή για την ενδιάμεση στρώση των πολυστρωματικών υαλοπινάκων. Πρόκειται για ένα υλικό ιδιαίτερα ευαίσθητο στα ιξωδοελαστικά φαινόμενα, σε αντίθεση με το ιονισμένο πολυμερές SentryGlass Plus-SGP, το οποίο παρουσιάζει αυξημένη αντοχή και στιβαρότητα, αφού αρχικά αναπτύχθηκε για εφαρμογές υάλωσης ανθεκτικές σε τυφώνα. Και τα δύο υλικά διατίθενται σε φύλλα πάχους 0,38 mm, ενώ συνήθως μία στρώση συντίθεται από δύο (0,76 mm) ή τέσσερα (1,52 mm) φύλλα. Στον Πίν. 1 καταγράφονται τα μέτρα διάτμησης των δύο υλικών για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και διάρκειας φόρτισης.

G (MPa)		Διάρκεια φόρτισης									
		1s		1min		1h		1day		10years	
		PVB	SGP	PVB	SGP	PVB	SGP	PVB	SGP	PVB	SGP
Θερμοκρασία	10°C	107.74	240	31.56	225	4.46	206	1.20	190	0.36	153
	20°C	14	217	1.51	195	0.83	169	0.54	146	0.05	88.60
	30°C	1.20	151	0.75	110	0.44	59.90	0.28	49.70	0.05	5.31
	40°C	0.79	77	0.45	30.70	0.20	9.28	0.06	4.54	0.05	2.95
	50°C	0.49	36.20	0.29	11.30	0.05	4.20	0.05	2.82	0.05	2

Πίν. 1: Μέτρο διάτμησης των υλικών PVB και SGP ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης

Η ενδιάμεση στρώση δρα ως διατμητική σύνδεση μεταξύ των φύλλων γυαλιού και η απόκριση του συστήματος τοποθετείται μεταξύ δύο οριακών καταστάσεων. Για μεγάλες τιμές του μέτρου διάτμησης  $G_{PVB}$  ή  $G_{SGP}$ , η συμπεριφορά του πολυστρωματικού υαλοπίνακα πλησιάζει αυτή του αντίστοιχου μονολιθικού ίσου πάχους (monolithic limit). Στο άλλο

άκρο, όταν η μεταφορά διάτμησης μεταξύ των φύλλων γυαλιού είναι αμελητέα, θεωρείται ότι τα φύλλα δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, αφού απλά εφάπτονται χωρίς να συνδέονται (layered limit).

#### 4. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ

Η γνώση και η έρευνα για τον διατμητικό λυγισμό του πολυστρωματικού γυαλιού είναι ακόμα περιορισμένες, ενώ τα αναλυτικά μοντέλα που συναντώνται στη βιβλιογραφία και προέρχονται από τη θεωρία σύνθετων πλακών με πυρήνα (τύπου sandwich), απευθύνονται αποκλειστικά σε διατομές δύο στρώσεων και σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και στήριξης. Οι υπάρχουσες μέθοδοι σχεδιασμού, που έχουν προσαρμοστεί σε κοινά δομικά υλικά όπως ο χάλυβας, δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας σε στοιχεία γυαλιού, καθώς το υπόβαθρό τους δεν ενσωματώνει ιδιαιτερότητες όπως η ψαθυρή θραύση και η εξάρτηση της μηχανικής απόκρισης από τη θερμοκρασία και τη διάρκεια φόρτισης. Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μπορούν λοιπόν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για τη διερεύνηση του λυγισμού των υαλοπινάκων και την αποτίμηση της επιρροής παραγόντων όπως το μέτρο διάτμησης της ενδιάμεσης στρώσης  $G_{int}$ , ή ο τρόπος σύνδεσης του γυαλιού με τον μεταλλικό σκελετό στην ευστάθεια του συστήματος. Αναμφισβήτητα, ο βαθμός της διατμητικής συνεργασίας μεταξύ των φύλλων γυαλιού καθώς και οι ιδιότητες των υλικών που διαμορφώνουν τη στήριξη επηρεάζουν σημαντικά την εντός επιπέδου στιβαρότητα του φορέα και το μέγεθος των εκδηλούμενων παραμορφώσεων, ενώ και η κατανομή των τάσεων καθορίζεται από τα υλικά της στήριξης και τον τρόπο με τον οποίο αυτά διατάσσονται στο μεταλλικό πλαίσιο.

Αρχικά λοιπόν εκτελούνται και για τα δύο συστήματα γραμμικές αναλύσεις λυγισμού με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιομορφών και των κρίσιμων φορτίων  $V_{cr}$ . Τα φορτία αυτά επιτρέπουν μια πρώτη εκτίμηση της αντοχής και χρησιμοποιούνται συχνά ως τιμές αναφοράς για τη δημιουργία καμπυλών λυγισμού, δε συνιστούν ωστόσο άνω όρια για τον σχεδιασμό, καθώς η γραμμική προσέγγιση αγνοεί την επίδραση φαινομένων γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Κρίνεται επομένως απαραίτητη στη συνέχεια η διεξαγωγή μη γραμμικών αναλύσεων, ώστε να προβλεφθεί με ακρίβεια η μεταλυγισμική συμπεριφορά των υαλοπινάκων, όπως αυτή αποτυπώνεται στους δρόμους ισορροπίας. Για τις αναλύσεις αυτές επιλέγεται η μέθοδος Newton-Raphson και εισάγεται αρχική ατέλεια ανάλογη της πρώτης ιδιομορφής με μέγεθος  $w_0 = a/1000 = 3,8 \text{ mm}$ .

Το υψηλό υπολογιστικό κόστος των μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, δημιουργεί την ανάγκη για μια πιο απλή και γρήγορη μέθοδο σχεδιασμού, όπως οι καμπύλες λυγισμού. Οι καμπύλες αυτές δίνουν την τιμή του μειωτικού συντελεστή  $\chi$  της αντοχής της πλάκας ως συνάρτηση της ανηγμένης της λυγηρότητας  $\bar{\lambda}$  λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των γεωμετρικών ατελειών και των παραμενουσών τάσεων μέσω μιας γενικευμένης αρχικής ατέλειας. Σε αντίθεση με τον χάλυβα, στην περίπτωση του γυαλιού οι παράμετροι  $\chi$  και  $\bar{\lambda}$  καθορίζονται με βάση την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Φυσικά, η αντοχή σε θλίψη είναι σημαντικά μεγαλύτερη, αφού οι ρωγμές δε διαδίδονται υπό θλίψη, δεν είναι όμως πρακτικά αξιοποιήσιμη, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις η εφελκυστική αντοχή ενός στοιχείου γυαλιού είναι αυτή που εξαντλείται πρώτη, με την αστοχία να εκδηλώνεται πάντα στην εφελκυστική επιφάνεια του θλιβόμενου μέλους. Σύμφωνα με τις ιταλικές οδηγίες CNR-DT-210 [2] η ευστάθεια τόσο του μονολιθικού όσο και του πολυστρωματικού πάνελ προϋποθέτει το διατμητικό φορτίο σχεδιασμού  $V_{Ed}$  να παραμένει

μικρότερο από το φορτίο  $V_{b,Rd}$ , το οποίο εκφράζει την αντοχή του μέλους σε διατμητικό λυγισμό και ορίζεται ως:

$$V_{b,Rd} = \chi \frac{A\tau_{Rk}}{\gamma_M} \quad (1)$$

Η χαρακτηριστική αντοχή σε διάτμηση  $\tau_{Rk}$  θεωρείται ίση με την χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή  $\sigma_{Rk}$ , ενώ ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_M$  λαμβάνεται ίσος με 1,4. Η παράμετρος  $A$  αντιπροσωπεύει το εμβαδό της διατομής ( $A=bt$ ). Ο μειωτικός συντελεστής  $\chi$  υπολογίζεται κατά τον ΕΚ3 σύμφωνα με τη σχέση:

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

όπου,

$$\Phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - \alpha_0) + \bar{\lambda}^2 \right], \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A\tau_{Rk}}{V_{cr}}} \quad (4)$$

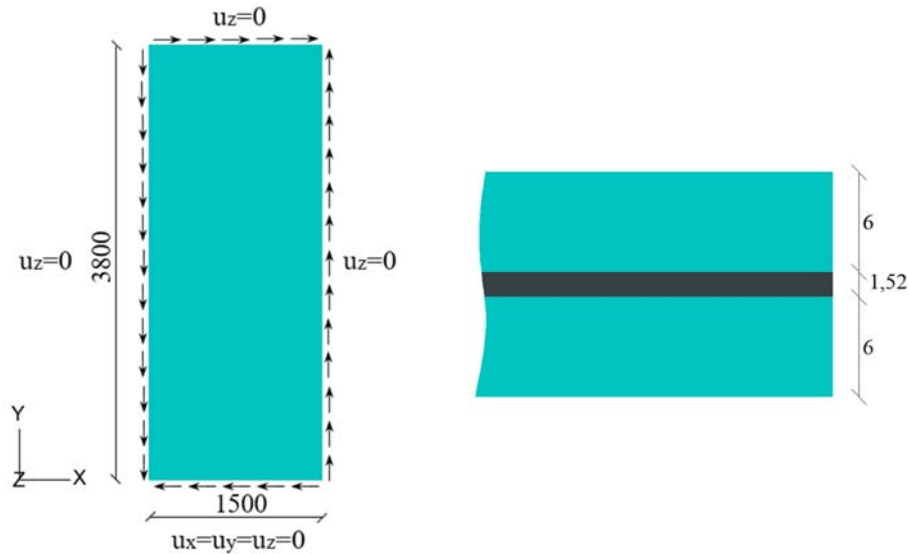
Από αριθμητικές αναλύσεις και πειράματα προκύπτει ότι οι συντελεστές ατελειών  $\alpha=0,49$  και  $\alpha_0=0,50$  είναι κατάλληλοι για να αποδώσουν την επιρροή μιας ατέλειας ανάλογης της πρώτης ιδιομορφής με μέγεθος ίσο προς το 1/1000 του ύψους του υαλοπίνακα [2,7].

## 5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Και για τα δύο συστήματα πρόσοψης επιλέχθηκαν πολυστρωματικά πάνελ θερμικά ενισχυμένου γυαλιού, το οποίο διατίθεται στα πάχη των 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 και 25 mm. Ο αριθμός και το πάχος των στρώσεων καθορίστηκαν στην κάθε περίπτωση με βάση τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας για τη δράση του ανέμου. Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA [9] με στοιχεία τύπου 3d-solid και η συμπεριφορά του γυαλιού και της ενδιάμεσης στρώσης περιγράφηκε με μοντέλο ελαστικού ισότροπου υλικού. Συγκεκριμένα για το γυαλί ορίστηκε μέτρο ελαστικότητας  $E=70000$  MPa και λόγος Poisson  $\nu=0,22$  (prEN16612 [4]), ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη της ενδιάμεσης στρώσης αποτέλεσαν τη βάση παραμετρικών αναλύσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής τους με τον χρόνο και τη θερμοκρασία στην απόκριση του συστήματος (εύρος τιμών για  $E_{int}$ : 0,3-2880 MPa, εύρος τιμών για  $\nu_{int}$ : 0,49-0,44).

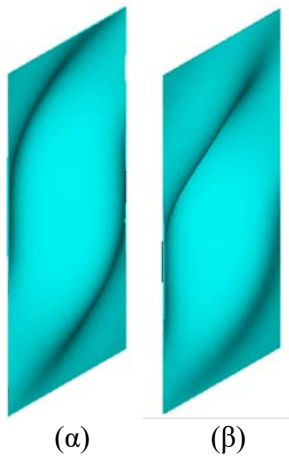
## STRUCTURAL SILICONE GLAZING

Ο υαλοπίνακας συντίθεται από δύο φύλλα γυαλιού πάχους  $t_1=t_2=6$  mm και μία ενδιάμεση στρώση πολυμερούς πάχους  $t_{int}=1,52$  mm ( $t=6/1,52/6$  mm). Στηρίζεται στις 4 πλευρές του, όπως φαίνεται στο Σχ. 2, και τα διατμητικά φορτία  $V$  ασκούνται με τη μορφή πίεσης (pressure) που δρα εφαπτομενικά στο επίπεδο της κάθε πλευράς.

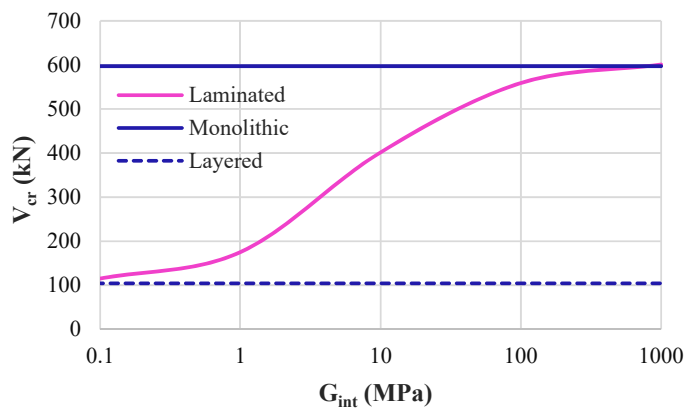


Σχ. 2: Γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες και φόρτιση υαλοπίνακα

Στο Σχ. 3 παρουσιάζονται οι δύο πρώτες ιδιομορφές, ενώ στο Σχ. 4 τα κρίσιμα φορτία λυγισμού της πρώτης ιδιομορφής συναρτήσει του μέτρου διάτμησης  $G_{int}$ . Ο υπολογισμός των κρίσιμων φορτίων περιλαμβάνει τον πολλαπλασιασμό του συντελεστή που εξάγει η γραμμική ανάλυση με την τιμή της πίεσης και το εμβαδό  $A=bt$ . Από το διάγραμμα του Σχ. 4 προκύπτει πως η σύνθετη δράση που παρέχει το πολυμερές αυξάνει την αντοχή έναντι λυγισμού και επιβεβαιώνεται πως η συμπεριφορά της πολυστρωματικής διάταξης κυμαίνεται μεταξύ δύο ορίων (monolithic και layered). Μεγάλες τιμές του  $G_{int}$  εξασφαλίζουν σημαντική μεταφορά διάτμησης από το ένα φύλλο γυαλιού στο άλλο και πετυχαίνουν κρίσιμο φορτίο συγκρίσιμο με αυτό του μονολιθικού γυαλιού πάχους  $t=13,52$  mm. Όταν όμως ο σχεδιασμός αφορά μεγάλης διάρκειας φορτίσεις ή υψηλές θερμοκρασίες, που αντιστοιχούν σε μικρά  $G_{int}$ , η διατμητική συνεργασία των φύλλων γυαλιού αποδεικνύεται αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί.

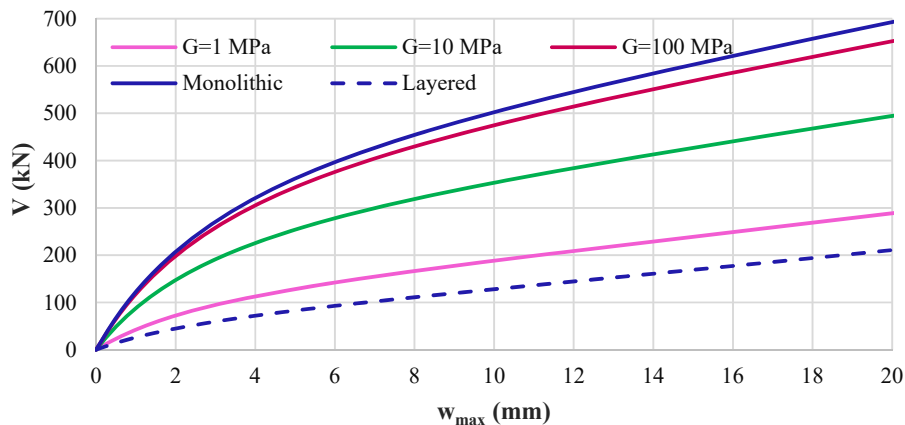


Σχ. 3: (α) 1<sup>η</sup> και (β) 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

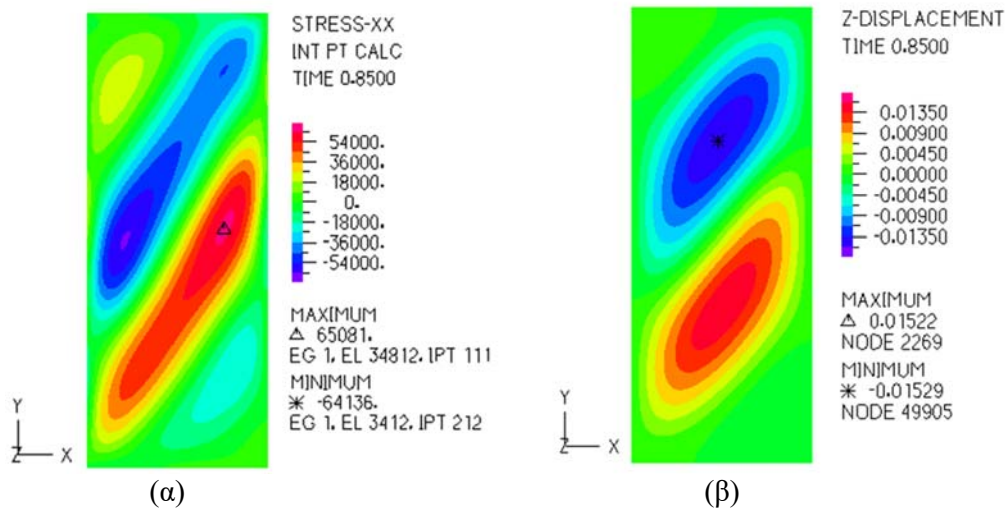


Σχ. 4: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής συναρτήσει του μέτρου διάτμησης  $G_{int}$  (SSG)

Οι δρόμοι ισορροπίας του Σχ. 5, που προέκυψαν από μη γραμμικές αναλύσεις, εκφράζουν τη σχέση μεταξύ της επιβεβλημένης διατμητικής δύναμης  $V$  κατά τη διεύθυνση  $x$  και της μέγιστης βύθισης  $w_{max}$  του υαλοπίνακα. Όλες οι καμπύλες φανερώνουν μια μεταλυστική συμπεριφορά που επιτρέπει την ανάληψη φορτίου μεγαλύτερου από αυτό που υποδεικνύει η γραμμική προσέγγιση. Αυτό οφείλεται στις μεμβρανικές τάσεις που εισάγονται στο επίπεδο της πλάκας από την αλληλεπίδραση θλιβόμενης και εφελκυστικής διαγωνίου, καθώς η πρώτη τείνει να προκαλέσει τον λυγισμό της πλάκας γυαλιού, ενώ η δεύτερη αντιστέκεται και προσπαθεί να διατηρήσει την ευθυγραμμία της. Στο Σχ. 6 παρουσιάζεται η κατανομή των ορθών τάσεων  $\sigma_{xx}$  και η χρωματική απεικόνιση της βύθισης  $w$ , ενδεικτικά για την περίπτωση  $G_{int}=10$  MPa, όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση πλησιάζει τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής ( $\sigma_{Rk}=70$ MPa).



Σχ. 5: Παραμετρική μελέτη της σχέσης δύναμης  $V$ -μέγιστης βύθισης  $w_{max}$  ως προς το μέτρο διάτμησης  $G_{int}$  (SSG)



Σχ. 6: Κατανομή (α) των τάσεων  $\sigma_{xx}$  (kPa) και (β) της βύθισης  $w$  (m) για  $G_{int}=10$  MPa (SSG)

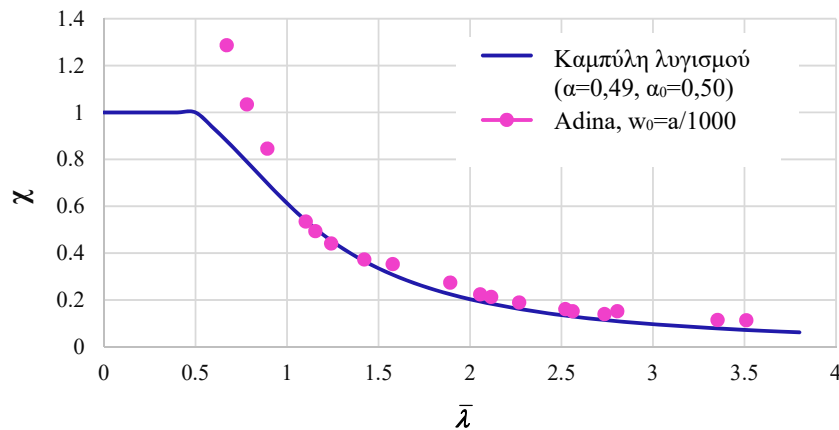
Στη συνέχεια διεξάγεται πλήθος γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων για διάφορες γεωμετρίες του υαλοπίνακα και μέτρα διάτμησης  $G_{int}$  και προσδιορίζεται για κάθε περίπτωση ένα ζεύγος ανηγμένης λυγηρότητας  $\bar{\lambda}$  και μειωτικού συντελεστή  $\chi$ . Η ανηγμένη

λυγρηρότητα προκύπτει από την Εξ. (4) που αφορά τις γραμμικές αναλύσεις, ενώ ο μειωτικός συντελεστής  $\chi$  προέρχεται από τις μη γραμμικές αναλύσεις όπως ορίζει η σχέση:

$$\chi = \frac{V_{ult}}{A\sigma_{Rk}} \quad (5)$$

Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα και βιβλιογραφικές αναφορές [2,8] η οριακή αντοχή συνδέεται με την ανάπτυξη μέγιστης εφελκυστικής τάσης ίσης με  $\sigma_{Rk}/1,4$  ή με την εμφάνιση μέγιστης βύθισης  $w_{max}$  ίσης με  $a/300$ . Επομένως ως  $V_{ult}$  λαμβάνεται η διατμητική δύναμη τη στιγμή που σημειώνεται πρώτη κάποια από τις δύο παραπάνω τιμές.

Στο Σχ. 7 αποδεικνύεται πως η Εξ. (2) προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τα ζεύγη  $(\bar{\lambda}, \chi)$  που προκύπτουν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, είναι επομένως εφικτός ο σχεδιασμός καμπυλών λυγισμού για πλάκες από γυαλί που θα βασίζονται στην εφελκυστική αντοχή του υλικού. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως στην περίπτωση του γυαλιού, τιμές του συντελεστή  $\chi$  μεγαλύτερες της μονάδας είναι πιθανές, καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων μεγαλύτερων της αντοχής του σε εφελκυσμό. Αυτό το φαινόμενο δε συναντάται στον χάλυβα, όπου ο υπολογισμός του  $\chi$  γίνεται με βάση την αντοχή διαρροής  $f_y$ .



Σχ. 7: Καμπύλη λυγισμού για τον σχεδιασμό του υαλοπίνακα σε διατμητικό λυγισμό Σύγκριση με αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (Adina) (SSG)

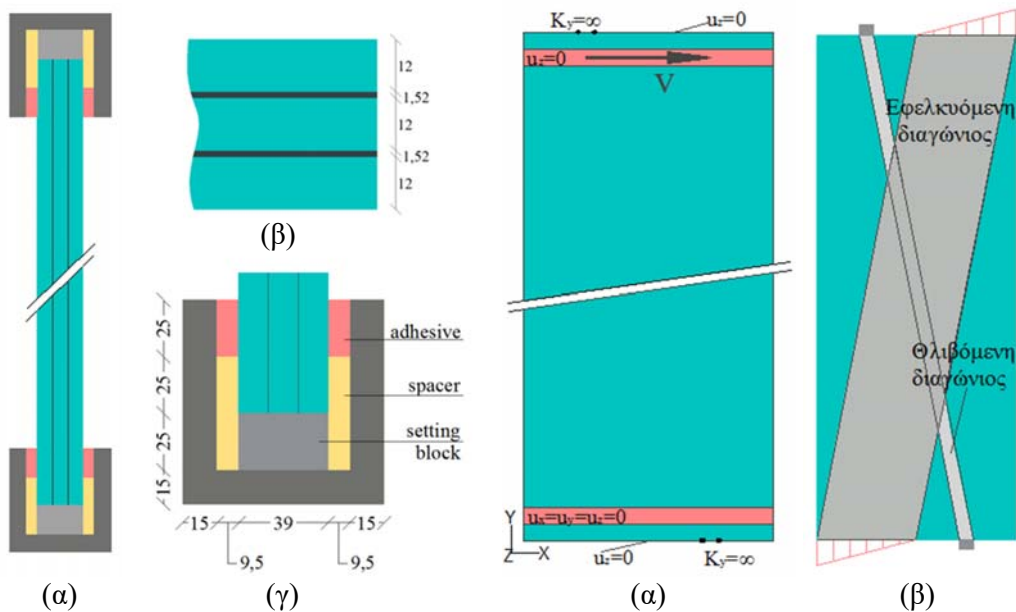
## BUTT-JOINT GLAZING

Για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων επιλέγονται 3 φύλλα γυαλιού πάχους  $t_1=t_2=t_3=12$  mm ενωμένα ανά δύο με στρώση πολυμερούς πάχους  $t_{int}=1,52$  mm. Η στήριξη της βάσης και της κεφαλής διαμορφώνεται στο Σχ. 8 για συνολικό πάχος υαλοπίνακα  $t=39,04$  mm κατά τα πρότυπα του αυστραλιανού κανονισμού AS 1288-2006 [10], ο οποίος αφορά θέματα εγκατάστασης φέρουσας υάλωσης. Το γυαλί θα πρέπει να εισέρχεται εντός των μεταλλικών U προφίλ σε βάθος όχι μικρότερο από 1 με 1,5 φορές το πάχος του, ενώ το πάχος της κόλλας θα πρέπει να ξεπερνάει τα 6 mm. Η μεταφορά των φορτίων από το πάνελ στον σκελετό πραγματοποιείται μέσα από 4 ορθογωνικά τακάκια (setting blocks) υλικού σκληρότητας  $85\pm 5$  Shore A (π.χ. νεοπρένιο), τα οποία διατάσσονται σε απόσταση  $b/4$  από



το κάθε άκρο. Το μήκος τους ορίζεται στα 27 mm ανά m<sup>2</sup> γυαλιού, αλλά δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 100 mm. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή των 100 mm. Δύο αφρώδεις ταινίες υλικού σκληρότητας 65±5 Shore A (spacers) τοποθετούνται εκατέρωθεν του γυαλιού και αποτρέπουν την επαφή του με τα προφίλ U, ενώ παράλληλα το διατηρούν στοιχισμένο στο κέντρο της διατομής.

Από τα υλικά που συμμετέχουν στη στήριξη, η προσομοίωση περιλαμβάνει μόνο την κόλλα, ενώ η λειτουργία των setting blocks και spacers (με τα οποία το γυαλί απλά εφάπτεται, χωρίς να συνδέεται μαζί τους) περιγράφεται με τη χρήση ελατηρίων και κατάλληλων συνοριακών συνθηκών (Σχ.9(α)) [11]. Η εντός επιπέδου διατμητική δύναμη που ασκείται στο μεταλλικό πλαίσιο της κεφαλής μεταφέρεται μέσω της κόλλας στον υαλοπίνακα και τον αναγκάζει σε στροφή, με αποτέλεσμα να χάνει την επαφή του με δύο διαγώνια τοποθετημένα setting blocks και να συγκρατείται μόνο από τα άλλα δύο (τα setting blocks λειτουργούν μόνο σε θλίψη και όχι σε εφελκυσμό). Στις θέσεις των δύο setting blocks που λειτουργούν ως στηρίξεις τοποθετούνται μετακινησιακά ελατήρια πολύ μεγάλης στιβαρότητας  $K_y$ . Κατά μήκος των ακμών του πάνελ στην κάτω και πάνω πλευρά του επιβάλλονται κυλίσεις που δεσμεύουν τη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση z, ώστε να ληφθεί υπόψη η πλευρική στήριξη που παρέχουν στο γυαλί οι αφρώδεις ταινίες.



Σχ. 8: (α) Συνδέση σε βάση και κεφαλή, (β) γεωμετρία διατομής, (γ) λεπτομέρεια σύνδεσης στη βάση, Σχ. 9: (α) Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος, (β) λειτουργία μεμβράνης του υαλοπίνακα

Όσον αφορά την κόλλα, επιλέγεται η Dow Corning 993 που έχει ως βάση τη σιλικόνη και συναντάται ευρέως σε συστήματα γυαλινών προσόψεων ( $E=2,4$  MPa,  $\nu=0,49$ ). Στις επιφάνειες της κόλλας της βάσης που είναι σε επαφή με το μεταλλικό πλαίσιο επιβάλλεται άρθρωση, ενώ στις αντίστοιχες της κεφαλής επιβάλλεται κύλιση μέσω rigid links, η οποία εξασφαλίζει πλευρικά το γυαλί, επιτρέπει όμως τη μετατόπιση κατά τις διευθύνσεις x, y.

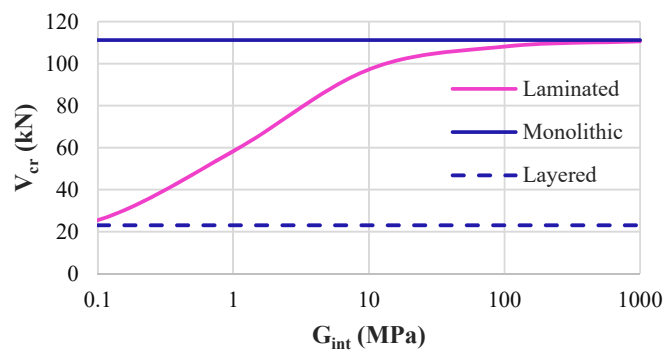
Για τη γραμμική ανάλυση λυγισμού ασκείται ένα μοναδιαίο φορτίο  $V_x$  στον master κόμβο του rigid link και μεταφέρεται έτσι σε όλη την επιφάνεια της κόλλας καθώς και στη

διεπιφάνεια με το γυαλί. Το κρίσιμο φορτίο σε αυτή την περίπτωση ισούται με τον φορτικό συντελεστή που δίνει ως αποτέλεσμα το πρόγραμμα για την κάθε ιδιομορφή. Όπως φαίνεται στο Σχ. 9(β), οι αντιδράσεις στήριξης στις θέσεις των setting blocks δημιουργούν μια θλιβόμενη διαγωνίου, η οποία προσπαθεί να προκαλέσει την εκτός επιπέδου παραμόρφωση του υαλοπίνακα. Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από τις ιδιότητες του συγκολλητικού υλικού, αφού αυτό αναλαμβάνει τον εφελκυσμό και επιδιώκει μέσω της εφελκυσόμενης διαγωνίου να αποτρέψει τον λυγισμό. Για τη μικρού μέτρου ελαστικότητας κόλλα που χρησιμοποιήθηκε στο υπό μελέτη παράδειγμα, η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή αντιστοιχεί σε αυτή του Σχ. 10(α), ενώ για ένα μεγαλύτερης στιβαρότητας υλικό ο λυγισμός θα εκδηλωνόταν υπό τη μορφή του Σχ. 10(β). Η επιρροή του μέτρου διάτμησης  $G_{int}$  στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού καταγράφεται στο Σχ. 11 για την πρώτη περίπτωση κόλλας.



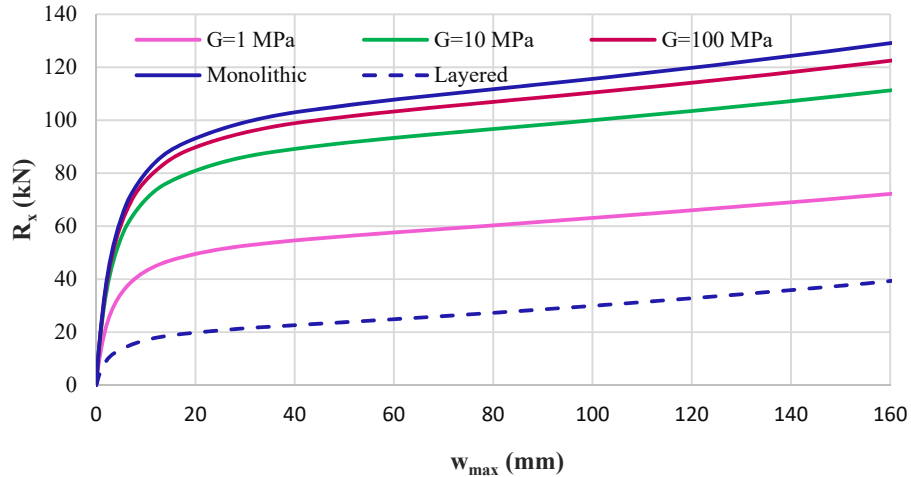
(α) (β)

Σχ. 10: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή για κόλλα (α) μικρής και (β) μεγάλης στιβαρότητας

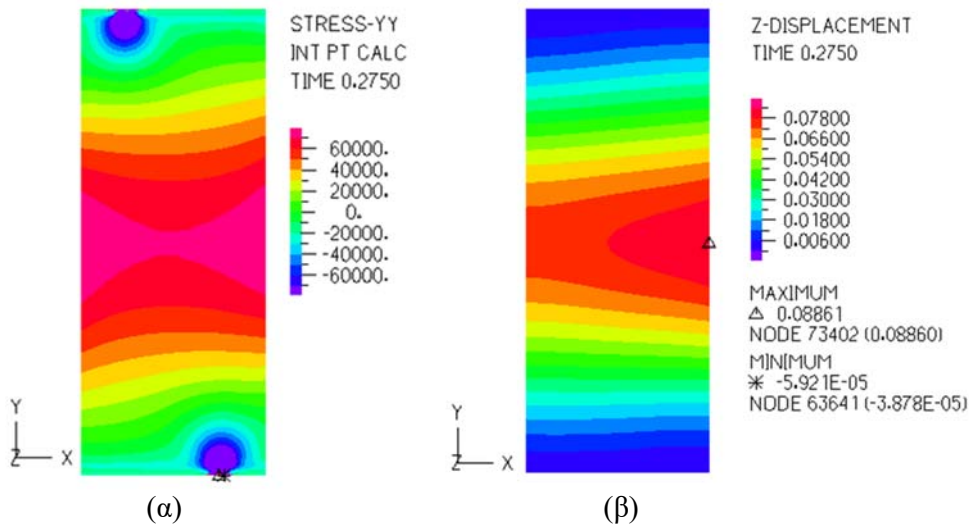


Σχ. 11: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής συναρτήσει του μέτρου διάτμησης  $G_{int}$  (BJG)

Οι μη γραμμικές αναλύσεις υλοποιούνται με την επιβολή μιας οριζόντιας μετατόπισης στον master κόμβο του rigid link. Στο Σχ. 12 απεικονίζονται τα διαγράμματα αντίδρασης στήριξης  $R_x$  – μέγιστης βύθισης  $w_{max}$  του υαλοπίνακα για διάφορες τιμές του μέτρου διάτμησης  $G_{int}$ . Αν και η κόλλα είναι αρκετά μαλακή για να αντισταθμίσει την επίδραση της θλιβόμενης διαγωνίου, καταφέρνει εντούτοις να εξασφαλίσει τη λειτουργία μεμβράνης, η οποία αποδίδει στο σύστημα μεταλυσμική αντοχή. Στο Σχ. 13(α) και στο Σχ. 13(β) αποτυπώνονται για  $G_{int}=10$  MPa οι ορθές τάσεις  $\sigma_{yy}$  και οι βυθίσεις  $w$  αντίστοιχα, κάποια στιγμή πριν η εφελκυστική τάση στο μέσον του υαλοπίνακα ξεπεράσει τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής ( $\sigma_{Rk}=70$ MPa). Επισημαίνεται πως οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις σημειώνονται στις περιοχές κοντά σε εκείνα τα setting blocks, που αναλαμβάνουν, ανάλογα με τη φορά της δύναμης, τη μεταφορά των αντιδράσεων στήριξης στο μεταλλικό πλαίσιο. Η προσομοίωση με ελατήρια αποδίδει ποιοτικά αυτές τις συγκεντρώσεις τάσεων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 13(α), οδηγεί όμως αριθμητικά σε μη ρεαλιστικές τιμές στα σημεία εφαρμογής των ελατηρίων, οι οποίες για τον λόγο αυτό δε συμπεριλήφθηκαν στα αποτελέσματα. Βέβαια, η διερεύνηση της συμπεριφοράς του γυαλιού κατά την επαφή του με τα setting blocks κρίνεται αναγκαία, ώστε να εκτιμηθεί ο κίνδυνος μηχανισμοί τοπικής αστοχίας να προηγηθούν του καθολικού λυγισμού του φορέα.

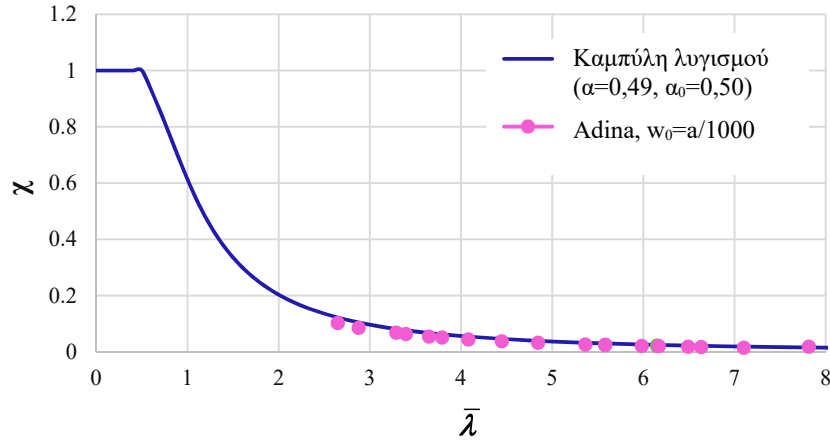


Σχ. 12: Παραμετρική μελέτη της σχέσης αντίδρασης  $R_x$ -μέγιστης βύθισης  $w_{max}$  ως προς το μέτρο διάτμησης  $G_{int}$  (BJG)



Σχ. 13: Κατανομή (α) των τάσεων  $\sigma_{yy}$  (kPa) και (β) της βύθισης  $w$  (m) για  $G_{int}=10$  MPa (BJG)

Στο Σχ. 14 παρατίθενται κάποια ζεύγη  $(\bar{\lambda}, \chi)$  που υπολογίστηκαν για το σύστημα της μετωπικής σύνδεσης υαλοπινάκων με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε για το σύστημα της δομικής κόλλας. Ως καμπύλη αναφοράς χρησιμοποιείται και εδώ η Εξ. (2). Όπως ήταν αναμενόμενο, η στήριξη του υαλοπίνακα μέσω συγκολλητικού υλικού στο πάνω και κάτω μέρος του συνδέεται με μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης λυγηρότητας σε σύγκριση με αυτές που σημειώνονται στο τετραέρειστο σύστημα (Σχ. 7). Η παραμορφωσιμότητα της κόλλας οδηγεί σε μεγάλη βύθιση του γυαλιού και σε μικρή αντοχή έναντι διατμητικού λυγισμού (μικρές τιμές του συντελεστή  $\chi$ ). Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως κριτήριο για τον καθορισμό του  $V_{ult}$  αποτέλεσε στην πλειονότητα των περιπτώσεων ο περιορισμός των παραμορφώσεων ( $u_{max} > a/300$ ).



Σχ. 14: Καμπύλη λυγισμού για τον σχεδιασμό του υαλοπίνακα σε διατμητικό λυγισμό  
Σύγκριση με αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (Adina) (BJG)

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το παρόν άρθρο μελετά τον λυγισμό υαλοπινάκων που υπόκεινται σε εντός επιπέδου διατμητικά φορτία, εστιάζοντας σε δύο συστήματα φέρουσας υάλωσης, της δομικής κόλλας και της μετωπικής σύνδεσης. Παραμετρικές αναλύσεις διερευνούν την επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του πολυμερούς στην απόκριση της πολυστρωματικής διάταξης και αποδεικνύουν πως για υψηλές τιμές του μέτρου διάτμησης  $G_{int}$  ενεργοποιείται η σύνθετη δράση και επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής σε λυγισμό. Οι δρόμοι ισορροπίας που προκύπτουν από μη γραμμικές αναλύσεις, υπερβαίνουν και για τα δύο συστήματα το κρίσιμο φορτίο, αναδεικνύοντας τη μεταλυγισμική αντοχή που εξασφαλίζει η λειτουργία μεμβράνης των υαλοπινάκων. Η αντοχή αυτή μπορεί να προβλεφθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από καμπύλες λυγισμού, αφού κατά τη σύγκριση της κανονιστικής και της αριθμητικής προσέγγισης παρατηρείται μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων. Οι ιδιαιτερότητες που εντοπίζονται στη μεθοδολογία υπολογισμού της οριακής αντοχής για την περίπτωση του γυαλιού είναι πως στον προσδιορισμό της ανηγμένης λυγηρότητας και του μειωτικού συντελεστή υπεισέρχεται η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό, ενώ είναι πιθανό να εμφανιστούν τιμές του  $\chi$  μεγαλύτερες της μονάδας. Αν και η άμεση σύγκριση των δύο συστημάτων δεν είναι εφικτή λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας των διατομών τους, τα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα επιβεβαιώνουν πως στο σύστημα SSG σημειώνονται μικρότερες παραμορφώσεις και μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με το σύστημα BJG.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Organisation for Technical Approvals. “ETAG 002 for Structural Sealant Glazing Kits (SSGK) – Part 1: Supported and Unsupported Systems”, 2012.
- [2] M. Feldmann, R. Kasper. “Guidance for European Structural Design of Glass Components”, Joint Research Center of the European Commission, 2014.
- [3] Matthias Haldimann, Andreas Luible, Mauro Overend. “Structural Use of Glass”, ETH Zurich, 2008.

- [4] Draft prEN 16612: Glass in building – Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing, European Committee for Standardization, 2013.
- [5] Didier Delince, Dieter Callewaert, Jan Belis, Rudy Van Impe. “Post-breakage behaviour of laminated glass in structural applications”, Laboratory for Research on Structural Models, Ghent University, Belgium.
- [6] Tomas Serafinavicious, Jean-Paul Lebet, Christian Louter, Tomas Lenkimas, Artiomas Kuranovas. “Long-Term Laminated Glass Four Point bending Test with PVB, EVA and SG Interlayers at Different Temperatures”, *Procedia Engineering*, Vol. 57, 2013, pp. 996-1004.
- [7] Claudio Amadio, Chiara Bedon. “An Equivalent Thickness for Buckling Verification of Laminated Glass Panel Under In-Plane Shear Loads”, *Journal of Civil Engineering and Science*, Vol. 2 Iss.3, 2013, pp. 108-123.
- [8] Claudio Amadio, Chiara Bedon. “Exploratory Finite-Element investigation and assessment of standardized design buckling criteria for two-side linear adhesively supported glass panels under in-plane loads”, *Engineering Structures*, Vol. 120, 2016, pp. 273-287.
- [9] ADINA System 8.3, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2005.
- [10] Committee BD-007, Glazing and Fixing of Glass. “Australian Standard: Glass in buildings – Selection and installation”, 2006.
- [11] Danijel Mocibob. “Glass Panel Under Shear Loading – Use of Glass Envelopes in Building Stabilization”, EPFL, 2008.

## INVESTIGATION OF SHEAR BUCKLING OF LAMINATED GLASS PANES

**Sofia K. Korlou**

Civil Engineer

School of Civil Engineering

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: [sofiakor3@gmail.com](mailto:sofiakor3@gmail.com)

**Ilias D. Thanasoulas**

PhD Candidate

School of Civil Engineering

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: [liasthana@gmail.com](mailto:liasthana@gmail.com)

**Kosmas H. Moupagitsoglou**

Civil Engineer

Eckersley O'Callaghan

London, United Kingdom

e-mail: [kosmasm@gmail.com](mailto:kosmasm@gmail.com)

**Charis J. Gantes**

NTUA Professor

School of Civil Engineering

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

### SUMMARY

Glass panes are increasingly being used in modern buildings as shear walls, able to ensure stabilization and stiffening contribution to entire structural systems and thus replace conventional bracings. Considering the high slenderness of glass elements and their subsequent susceptibility to stability failure, the present paper focuses on the buckling behavior of laminated glass panes (two or more glass sheets bonded together by a transparent plastic interlayer) subjected to in-plane shear loads with regard to two different glazing systems, structural silicone glazing and butt-joint glazing. Linear and non-linear analyses investigate the influence of the composite action achieved by the adopted interlayer, as well as the type of joint used for the retention of glass to the substructure on the response of the system. Critical buckling loads represent a first approach to upper strength limits, while following load paths take into account geometric non-linearity and demonstrate a post-buckling reserve caused by the membrane effect. Finally, the numerically derived ultimate strengths are presented in terms of shear reduction factor  $\chi$  and compared with recommended buckling curves, so that the applicability of this Eurocode 3-based design method to glass panes can be assessed.