

# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ

Α. Κ. Παπαδοπούλου-Μαθιοπούλου,

*Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ*

*e-mail: nat @ civil.auth . gr*

*Εργαστήριο Οικοδομικής, Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

Π. Γ. Παπαδόπουλος,

*Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ*

*Εργαστήριο Στατικής, Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,*

*Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

Κ. Σ. Κοταλακίδης

*Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Πολυτεχνείου Darmstadt/Γερμανίας*

Λέξεις κλειδιά: υαλοπίνακες, ανεμοπίεση, δικτυωτό προσομοίωμα, ANSYS

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην εργασία αυτή μελετώνται υαλοπίνακες υπό φόρτιση. Θεωρείται σημαντικότερη φόρτιση η ανεμοπίεση. Εξετάζονται υαλοπίνακες διαφόρων διαστάσεων με διάφορες συνθήκες στήριξης. Η πλάκα διακριτοποιείται σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα τα οποία προσομοιώνονται με δικτυωτά στοιχεία (δικτυωτό προσομοίωμα). Για να ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα λόγω των μεγάλων βυθίσεων οι συνθήκες ισορροπίας γράφονται ως προς τον παραμορφωμένο φορέα σε κάθε βήμα μιας διαδικασίας βαθμιαίας φόρτισης. Λόγω των μεγάλων βυθίσεων η πλάκα εμφανίζει λειτουργία κάμψης και λειτουργία μεμβράνης (πλάκα von Karman). Όσο μεγαλύτερες είναι οι βυθίσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής της λειτουργίας μεμβράνης. Συντάχθηκε σύντομο πρόγραμμα H/Y για το μη γραμμικό στατικό υπολογισμό τρισδιάστατου δικτυώματος για βαθμιαία φόρτιση. Τα αποτελέσματα επίλυσης με χρήση δικτυωτού προσομοιώματος συγκρίνονται με άλλα αντίστοιχα δημοσιευμένα αποτελέσματα. Αναπτύσσεται προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού με απλή αριθμομηχανή.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία για τη μελέτη υαλοπινάκων, εφαρμόζεται η χρήση τρισδιάστατου δικτυωτού προσομοιώματος, αντί των συνήθων

πεπερασμένων στοιχείων. Έχει συνταχθεί ένα ειδικό σύντομο πρόγραμμα, σε Fortran με περίπου 220 εντολές, για τη βαθμιαία φόρτιση του προτεινόμενου δικτυωτού προσομοιώματος. Το πρόγραμμα αυτό είναι σύντομο και απλό. Χρησιμοποιείται η μέθοδος βαθμιαίας φόρτισης. Σε κάθε στοιχειώδη αύξηση της φόρτισης οι συνθήκες δυσκαμψίας και ισορροπίας γράφονται ως προς τον παραμορφωμένο φορέα, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα που οφείλεται στις μεγάλες μετακινήσεις. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού συγκρίθηκαν με δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα. (Norville 1993) και με υπολογισμούς με το πρόγραμμα ANSYS και προέκυψαν ικανοποιητικές προσεγγίσεις.

## 2. ΥΛΙΚΟ-ΣΥΝΘΕΣΗ

Τα χημικά στοιχεία που συνθέτουν το κοινό γυαλί (Floatglass) είναι:

SiO <sub>2</sub> (Χαλαζίας)	70-74%
CaO (ασβέστιο)	5-12%
Na <sub>2</sub> O (οξείδιο του νατρίου)	12-16%
MgO (οξείδιο του μαγνησίου)	0-5%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (αλουμίνιο)	0,2-2%.

Στις δομικές κατασκευές τα χρησιμοποιούμενα είδη είναι: α) float, β) tempered (ESG) με θερμική κατεργασία.

Χρησιμοποιούνται συνήθως οι εξής μορφές γυαλιού: α) μονολιθική, β) (συμπαγής), γ) διπλής υάλωσης με φύλλα κολλημένα με PVD, δ) διπλής υάλωσης με κενό αέρα μεταξύ των φύλλων, ε) τριπλής υάλωσης με κενό αέρα μεταξύ των φύλλων.

## 3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το γυαλί ως δομικό υλικό έχει ορισμένες φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη στατική μελέτη, όπως είναι: διαφάνεια, λεία επιφάνεια, χημική αδράνεια, οπτικές ιδιότητες, διατήρηση μηχανικών και οπτικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες, σκληρότητα, διηλεκτρικές ιδιότητες καλές, αναλλοίωτη σύσταση στο πέρασμα του χρόνου, δεν έχει πόρους, ευκολία μορφοποίησης, έχει στιλπνές επιφάνειες.

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού μπορούν να τροποποιηθούν κατά την κατασκευή διαφόρων ειδών γυαλιού, ώστε να αντέχει σε μεγάλες καταπονήσεις (μεγάλα φορτία ανεμοπίεσης, χιονιού, θερμικά φορτία κ.λ.π) με ελαχιστοποίηση του απαραίτητου πάχους του.

Στον Πίνακα 1 αναφέρονται ιδιότητες που δεν αποτελούν φυσικές σταθερές του γυαλιού ως υλικό, αλλά εξαρτώνται άμεσα από τις εφαρμογές

(έκταση ζώνης ελκυσμού, διάρκεια και είδος φόρτισης, κατάσταση της επιφάνειας του γυαλιού κ.λ.π.).

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες και Κανονισμοί μονολιθικών υαλοπινάκων

Ιδιότητες	Σύμβολο	κοινό γυαλί Floatglass DIN 1249	Ενισχυμένο γυαλί Securit DIN 18516, DIN 1249 T12	Έλεγχος ως προς
Πυκνότητα	$\rho$		$2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	DIN 1249 DIN EN 572
Σκληρότητα χάραξης κατά Mohs	-		5 έως 6	DIN EN 101 DIN 52333, DIN ISO 9385
Σκληρότητα κατά Κnoop	HK 0,1/20		470 HK 0,1/20	
Πυκνότητα σε οπλισμένο γυαλί	$\rho$	$2,6 \cdot 10^3$ $\text{kg/m}^3$	-	-
Μέτρο ελαστικότητας	$E_{\text{stat}}$	$7,3 \cdot 10^4$ $\text{N/mm}^2$	$7,0 \cdot 10^4 \text{N/mm}^2$	DIN 52303 T1
Νούμερο Poisson	$\mu$		0,23	-
Αντοχή σε ελκυσμό	$\sigma_{\epsilon}$		30 – 80 MPa	
Αντοχή σε θλίψη	$\sigma_{\theta}$		700 έως 900 MPa	DIN 51067 T1

Αναφέρονται επίσης τα παρακάτω χαρακτηριστικά του γυαλιού:

- Έχει μεγάλη οπτική διαφάνεια.
- Δεν είναι στερεό διότι σε αυξανόμενη θερμοκρασία δεν παρουσιάζει σημείο τήξης, αλλά ελαττώνεται συνεχώς το ιξώδες του, ενώ στερεοποιείται μέρος του με την πάροδο του χρόνου.
- Έχει ειδικό βάρος= $2.23[\text{gr/cm}^3]$  (D50 της Jena) έως  $3.02[\text{gr/cm}^3]$  (μολυβδίαλος 8095 της Jena) και  $3.45[\text{gr/cm}^3]$  (τύπος 1190).
- Παρουσιάζει μεγάλη χημική αδράνεια και προσβάλλεται μόνο από το υδροφθόριο, ενώ έχει κάποια ευπάθεια σε βάσεις, οξέα και νερό ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη σύνθεσή του.
- Παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Επειδή όμως είναι τήγμα ηλεκτρολυτών με την αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνεται το ιξώδες και αυξάνει η αγωγιμότητα.

- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του είναι μικρός, αλλά ως δυσθερμαγωγό και εύθραυστο, κάθε απότομη ψύξη ή θέρμανση προκαλεί τάσεις που τείνουν να το καταστρέψουν. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής ελαττώνεται με αύξηση περιεκτικότητας σε SiO<sub>2</sub>.
- Είναι μονωτικό υλικό και δεν κονιοποιείται ούτε προσβάλλεται από μικροοργανισμούς.
- Εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη. Γενικά η αντοχή σε θλίψη κυμαίνεται από 4[kg/cm<sup>2</sup>] έως 5000[kg/cm<sup>2</sup>] και σε εφελκυσμό από 500[kg/cm<sup>2</sup>] έως 1000[kg/cm<sup>2</sup>].
- Η τάση εφελκυσμού είναι 70[kg/cm<sup>2</sup>] για κοινό γυαλί και 150[kg/cm<sup>2</sup>] έως 300[kg/cm<sup>2</sup>] για γυαλί με θερμική κατεργασία.
- Παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα λόγω ύπαρξης πυριτικών αλάτων. Το πυρίτιο και αργίλιο αυξάνουν τη σκληρότητα ενώ το ασβέστιο και νάτριο την ελαττώνουν.

Τα γυάλινα παράθυρα και πόρτες έχουν ελάχιστη πυραντίσταση. Τα μονωτικά υαλοήματα είναι δημοφιλή διότι δεν καίγονται και αποτελούν εξαιρετικό μονωτικό και δρουν ως ενίσχυση για θερμορύθμιση των ρητινών. Τα υαλοήματα είναι άκαυστα, αλλά τα προϊόντα τους είναι σχεδόν καύσιμα διότι περιέχουν ρητίνες σε ποσοστό περίπου 50%. [1].

#### 4. ΧΡΗΣΗ

Το γυαλί χρησιμοποιείται ευρύτατα ως δομικό υλικό. Χρησιμοποιείται με τρεις πρωταρχικούς τρόπους στις κατασκευές για υαλοστάσια, για μονωτικά υαλοήματα, για υαλοήματα ενίσχυσης πλαστικών κτιριακών προϊόντων. Η χρήση μεγάλων γυάλινων επιφανειών σε προσόψεις κτιρίων (glassfacades), κελύφη, πυραμίδες και γυάλινα στέγαστρα αντικαθιστά τις διάφανες γυάλινες μεμβράνες. Γυάλινες κατασκευές μπορούν να υποστούν μεγάλες καταπονήσεις επειδή σήμερα παράγονται ποιότητες γυαλιού με αυξημένες φυσικές και μηχανικές αντοχές (γυαλί Securit, τρίπλεξ). Γίνεται χρήση γυαλιού σε πολλές κατασκευές επιτρέποντας μεγάλα ανοίγματα (1.0-2.0m) με ελαχιστοποιημένο απαιτούμενο πάχος (5.0-15.0mm).

Λόγω υψηλών φορτίων, μεγάλων ανοιγμάτων και μικρού πάχους, οι υαλοπίνακες εμφανίζουν μετακινήσεις κάθετα προς το επίπεδο τους (βυθίσεις) μεγάλες σε σχέση με το πάχος τους (πλάκες von Karman). Εμφανίζουν δηλαδή γεωμετρική μη γραμμικότητα, ενώ συνήθως παρουσιάζουν φυσική μη γραμμικότητα του νόμου τάσης-παραμόρφωσης, ο οποίος παραμένει πρακτικά στη γραμμική ελαστική περιοχή μέχρι να συμβεί η πρώτη ρηγμάτωση.

Σε διάφορες δυνατές γυάλινες δομικές κατασκευές και εφαρμογές, όπου χρησιμοποιούνται υαλοπίνακες, απαιτείται στατική, θερμομονωτική και ηχομονωτική μελέτη όπως σε α) γυάλινες προσόψεις (με PLANAR ή κάναβο αλουμινίου), β) αυτόνομα γυάλινα κτίρια (κελύφη, πυραμίδες, πολιτιστικά περίπτερα), γ) συμπληρωματικές γυάλινες κατασκευές

(στέγαστρα, είσοδοι κτιρίων, Wintergarten), δ) διαμόρφωση, προβολή και προστασία μνημείων και αρχαιολογικών χώρων, ε) ενεργειακά σπίτια (PASSIVHAUS), στ) γήπεδα και αθλητικές εγκαταστάσεις (γυάλινοι προστατευτικοί τοίχοι, γήπεδα Squash κ.λ.π.), ζ) γυάλινους τοίχους ηχοπροστασίας κατά μήκος του αστικού οδικού δικτύου, η) ενυδρεία μεγάλων διαστάσεων (υψηλή υδροστατική πίεση), θ) γυάλινους θαλάμους ασανσέρ, ι) γυάλινες σκάλες και κιγκλιδώματα και κ) γυάλινα «έπιπλα πόλεως» όπως τηλεφωνικοί θάλαμοι, στάσεις λεωφορείων.

## 5. ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Η στατική μελέτη και διαστασιολόγηση υαλοπινάκων γίνεται σύμφωνα με διεθνείς κανονισμούς και με ανάλογη προσομοίωση όπως:

- με τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Methods), όπου και μελετώνται οι μετακινήσεις και οι τάσεις σε Plate, Shell και Solid στοιχεία
- με τη χρήση δικτυωτού προσομοιώματος (Truss Model). Γίνεται τρισδιάστατη προσομοίωση του υαλοπίνακα και θεωρούνται μη γραμμικοί μονοαξονικοί νόμοι τάσης-παραμόρφωσης σ-ε των ράβδων.

Για τη στατική μελέτη και διαστασιολόγηση των υαλοπινάκων χρησιμοποιούνται αναλυτικές και πειραματικές μέθοδοι ανάλογα με το είδος του γυαλιού, τον τρόπο στήριξής του, τη διάρκεια φόρτισης κ.λ.π.

A) Αναλυτικές μέθοδοι:

- μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements)
- μέθοδος με χρήση δικτυωτού προσομοιώματος (Truss Model).

B) Πειραματικές μέθοδοι:

Σε περίπτωση έλλειψης κανονισμών ή ασάφειας αποτελεσμάτων, απαιτούνται πειραματικές δοκιμές. Χρήσιμο είναι να γίνεται σύγκριση των πορισμάτων από τις αναλυτικές μεθόδους και πειραματικές μεθόδους.

Η συνολική στατική μελέτη γυάλινων εφαρμογών περιλαμβάνει:

- το στατικό υπολογισμό
- τη διαστασιολόγηση, δηλαδή την επιλογή του πάχους του γυαλιού ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες (παρεμφερής τρόπος με αυτόν του σκυροδέματος, χάλυβα κ.λ.π.)
- τη στατική μελέτη του φέροντα σκελετού λόγω άμεσης αλληλοεπίδρασης σκελετού-γυαλιού (υλικό σκελετού, εύκαμπτος ή δύσκαμπτος κ.λ.π.). Έτσι μετά τη διαστασιολόγηση του υαλοπίνακα απαιτείται και η στατική μελέτη του φέροντα οργανισμού (μεταλλικού, ξύλινου κ.λ.π.).

### 5.1. Στηρίξεις

Οι υαλοπίνακες μεγάλων διαστάσεων στηρίζονται με τους εξής τρόπους:

α) γραμμικά περιμετρικά σε πλαίσια αλουμινίου, β) σημειακά με οπές σε μεταλλικά εξαρτήματα υψηλής αντοχής (σύστημα PLANAR), γ) σημειακά χωρίς οπές.

### 5.2. Φορτίσεις

Οι θεωρούμενες φορτίσεις του φορέα για τη στατική μελέτη αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 1 ανάλογα με τις συνθήκες. Τα στατικά, (ίδιο βάρος, ανεμοπίεση, φορτία χιονιού, κρούση κ.λ.π.), δυναμικά (σεισμός) και θερμικά φορτία (όπως διαστολή-συστολή μεταλλικού σκελετού, διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια, πυρκαγιά) λαμβάνονται από Ευρωκώδικα 1, DIN 1055. Η μεγάλη διάρκεια επιβολής των φορτίσεων επιδρά αρνητικά (μείωση αντοχής έως 40% λόγω μακράς καταπόνησης). Το περιβάλλον του υαλοπίνακα επηρεάζει πολύ τη μηχανική του αντοχή. Σε υγρό περιβάλλον παρατηρείται απώλεια αντοχής έως 20%. Τέτοιου είδους φορτίσεις προκύπτουν από τους παρακάτω παράγοντες: ίδιο βάρος, ανεμοπίεση (EC1), σεισμό, μετακινήσεις των υαλοπινάκων, κλιματολογικές συνθήκες (σε μονωτικούς υαλοπίνακες λόγω διαφοράς πίεσης εντός και εκτός του υαλοπίνακα), πίεση λόγω διαφορετικών συντελεστών θερμοαγωγιμότητας των επιμέρους στοιχείων (χάλυβας, γυαλί κλπ.), κρούση (για προστατευτικούς υαλοπίνακες), εξαναγκασμός του υαλοπίνακα λόγω μονταρίσματος, φορτίσεις εξισορρόπησης.

### 5.3. Διαστασιολόγηση

Το απαιτούμενο πάχος του υαλοπίνακα που θα χρησιμοποιηθεί επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από:

- τον τύπο, μέγεθος και κατάσταση του γυαλιού (μηχανικές ιδιότητες και στατική συμπεριφορά αλλάζουν με την ηλικία του γυαλιού)
- τον τρόπο και διάρκεια φόρτισης (στατική, δυναμική και θερμική)
- τη στήριξη του φέροντα σκελετού (σε κάρναβο αλουμινίου ή σημειακά με σύστημα PLANAR)
- την κλίση τοποθέτησης των υαλοπινάκων
- τη χρήση (σημείο τοποθέτησης, απαιτούμενη ασφάλεια σε περίπτωση θραύσης για έμψυχο και άψυχο υλικό, εφαρμογές κ.λ.π.)
- την έκταση της ζώνης εφελκυσμού στο δοκίμιο
- τις θερμομονωτικές και ηχομονωτικές απαιτήσεις.

### 5.4 Έλεγχοι

Για τη στατική μελέτη υαλοπινάκων απαιτούνται να διατηρηθούν α) το επιτρεπόμενο βέλος κάμψης, β) οι τάσεις στα επιτρεπόμενα όρια, γ) η κατασκευή σε περίπτωση αστοχίας ενός ή περισσότερων φερόντων γυάλινων στοιχείων. Αστοχία του γυαλιού θεωρείται η εμφάνιση της πρώτης ρηγμάτωσης.

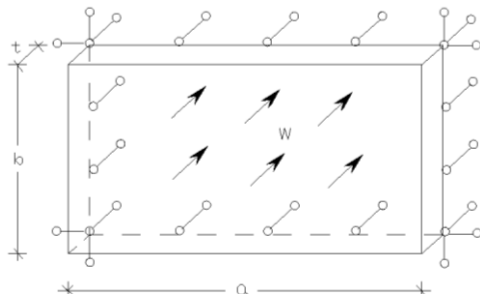
Μετά την στατική μελέτη ακολουθεί έλεγχος των αποτελεσμάτων και σύγκριση αυτών με τα επιτρεπτά όρια που ορίζουν οι διεθνείς κανονισμοί για το γυαλί (DIN, ANSI, CEN-Normes) όπως οι παρακάτω: DIN 1238 για καθρέπτες από κοινό γυαλί, DIN EN 572-2 για Floatglas (κοινό γυαλί), DIN EN 572-4 για “τραβηγμένο” κοινό γυαλί, DIN EN 572-6 για οπλισμένο γυαλί με πλέγμα, DIN 1249-12 για Floatglas κ.λ.π.

## 6. Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

### 6.1. Εφαρμογή

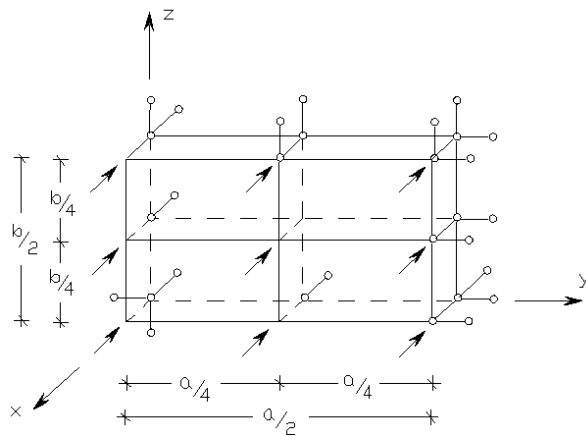
Για τη γεωμετρικά μη γραμμική στατική ανάλυση του προτεινόμενου δικτυωτού προσομοιώματος με τη μέθοδο βαθμιαίας φόρτισης συντάχθηκε όπως προαναφέρθηκε ένα σύντομο πρόγραμμα ΗΥ με περίπου 220 εντολές Fortran. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου βαθμιαίας φόρτισης ενημερώνονται οι συντεταγμένες των κόμβων του δικτυώματος και υπολογίζεται το μητρώο δυσκαμψίας. Επειδή οι συνθήκες ισορροπίας γράφονται ως προς τον παραμορφωμένο φορέα λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα που οφείλεται στις μεγάλες μετακινήσεις.

Το προτεινόμενο δικτυωτό προσομοίωμα και το πρόγραμμα εφαρμόστηκαν σε υαλοπίνακα. Θεωρείται ένας ορθογώνιος υαλοπίνακας (Σχ. 1), με διαστάσεις  $a=2.2[m]$ ,  $b=1.1[m]$ , πάχος  $t=8.0[mm]$ , με ομοιόμορφη ανεμοπίεση  $w$  κάθετα προς το επίπεδο του, που στηρίζεται περιμετρικά. Η ανεμοπίεση θεωρείται η κρίσιμη φόρτιση του υαλοπίνακα για τη διαστασιολόγησή του.



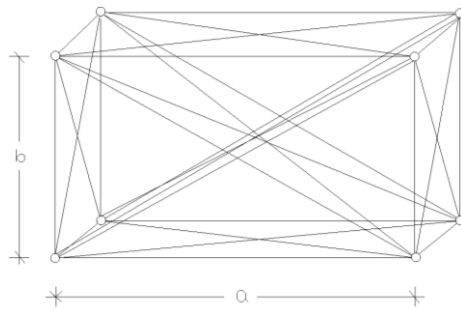
Σχήμα 1. Ορθογωνικός υαλοπίνακας με ανεμοπίεση  $w$

Λόγω διπλής συμμετρίας φορέα και φόρτισης μελετάται μόνο το  $\frac{1}{4}$  του υαλοπίνακα (Σχ. 2) τοποθετώντας τις κατάλληλες στηρίξεις στους άξονες συμμετρίας.



Σχήμα 2. Στοιχειώδη ορθογώνια παραλληλεπίπεδα

Το κάθε ένα από τα στοιχειώδη ορθογώνια παραλληλεπίπεδα προσομοιώνεται με ένα τρισδιάστατο δικτύωμα, στο οποίο είναι ράβδοι όλες οι πλευρές και οι διαγώνιές του (Σχ. 3).



Σχήμα 3. Προσομοίωση στοιχειώδους ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου με δικτύωμα

Οι διατομές των ράβδων  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ,  $A_{xy}$ ,  $A_{xz}$ ,  $A_{yz}$ ,  $A_{xyz}$  καθορίζονται από το συνδυασμό των σχέσεων που εκφράζουν τη γραμμική ελαστική ισότροπη συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων  $\sigma = \epsilon E$  (Σχ. 4) του στοιχειώδους ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου με τις σχέσεις επικόμβιων δυνάμεων-μετακινήσεων του αντίστοιχου δικτυωτού προσομοιώματος και δίδονται από τις σχέσεις:

$$A_x = ab/4 \quad (1a)$$



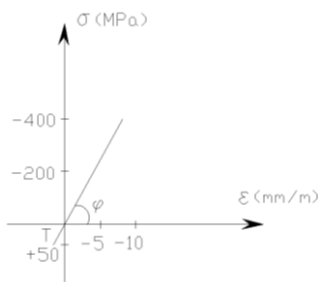
$$A_y=A_{xy}=1/8 (bt-at/5tg\theta) \quad (1b)$$

$$A_z=A_{xz}=1/8 (at-bt/5ctg\theta) \quad (1c)$$

$$A_{yz}=A_{xyz}=1/20 (lt/\sin 2\theta) \quad (1d)$$

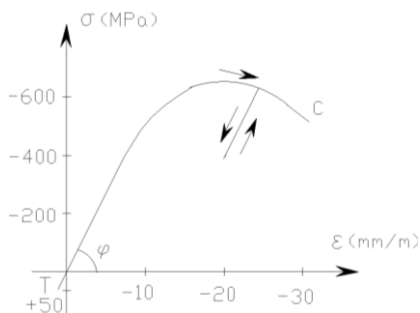
όπου  $tg\theta=b/a$  και  $l=(a^2+b^2)^{1/2}$

Ο παραπάνω νόμος  $\sigma=\varepsilon E$  θα ισχύει μέχρι να επέλθει η πρώτη ρηγμάτωση σε ελκυσμό οπότε διακόπτεται η βαθμιαία φόρτιση του στατικού υπολογισμού του υαλοπίνακα.



Σχήμα 4. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ράβδων

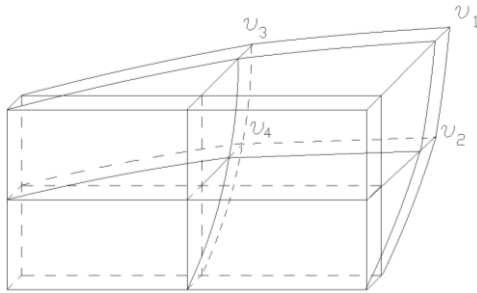
Οι ράβδοι του δικτυωτού προσομοιώματος μπορούν να ακολουθούν τους γραμμικούς μονοαξονικούς νόμους τάσεων-παραμορφώσεων του γυαλιού που περιλαμβάνουν ρηγμάτωση σε ελκυσμό (στις θετικές τιμές του διαγράμματος), πλαστική διαρροή, εξασθένηση και θραύση σε θλίψη (στις αρνητικές τιμές του διαγράμματος), (Σχ. 5). Είναι  $E= tg\varphi=70000[MPa]$ .



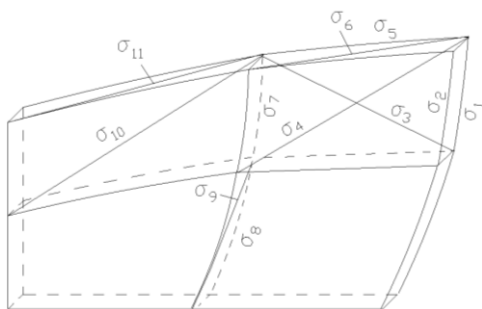
Σχήμα 5. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του γυαλιού

Το μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού θεωρείται:  $E=70000[\text{MPa}]$  και η αντοχή του σε ελκυσμό  $\sigma_t=50[\text{MPa}]$ . Ο λόγος εγκάρσιας παραμόρφωσης του Poisson είναι  $\nu=0.2$ .

Η παραμορφωμένη επιφάνεια φαίνεται στο σχήμα 6. Η μέγιστη βύθιση παρατηρείται στο κέντρο της πλάκας  $v_1=29[\text{mm}]$  κατά τη στιγμή της αστοχίας.



Σχήμα 6. Βυθίσεις στο  $\frac{1}{4}$  της παραμορφωμένης πλάκας



Σχήμα 7. Τάσεις ράβδων στο  $\frac{1}{4}$  της παραμορφωμένης πλάκας

Στο σχήμα 7 φαίνονται στο εξεταζόμενο τέταρτο της πλάκας οι τάσεις των ράβδων του δικτυωτού προσομοιώματος που κατά τη στιγμή της αστοχίας έχουν απόλυτη τιμή μεγαλύτερη από  $3.0[\text{kN/cm}^2]$ . Είναι:  $\sigma_1=+5.1$ ,  $\sigma_2=-5.2$ ,  $\sigma_3=+3.1$ ,  $\sigma_4=+3.0$ ,  $\sigma_5=+4.2$ ,  $\sigma_6=+3.1$ ,  $\sigma_7=+3.4$ ,  $\sigma_8=-3.6$ ,  $\sigma_9=+4.0$ ,  $\sigma_{10}=+3.3$ ,  $\sigma_{11}=+3.1$ . Η πρώτη εφελκυστική ρηγμάτωση ράβδου, ή η πρώτη υπέρβαση της τάσης  $\sigma=+5.0[\text{kN/cm}^2]$  συμβαίνει όπως είναι ευνόητο σε ράβδο της κεντρικής περιοχής της πλάκας.

## 7. ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ANSYS

Μελετήθηκαν επίσης υαλοπετάσματα με χρήση του προγράμματος ANSYS και τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 2, 3, 4. Για τη μελέτη κάθε υαλοπετάσματος που στηρίζονται περιμετρικά ελέγχονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις και μετακινήσεις να είναι μικρότερες από τις οριακές (επιτρεπόμενες τιμές). Οι συνδυασμοί φόρτισης καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα 1. Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση θεωρείται ο λόγος της μέγιστης διάστασης του υαλοπίνακα προς 100 ( $I_{max}/100$ ).

Οι υαλοπίνακες ανεμοφράκτη είναι tempered από δύο φύλλα πάχους 6[mm] που ενώνονται με μεμβράνη PVB, άρα με συνολικό πάχος 12[mm] και επιτρεπόμενη οριακή τάση  $\sigma_{\text{επιτ.}}=70.0[\text{MPa}]$ .

Οι υαλοπίνακες όψης και στέγης είναι securit από δύο φύλλα πάχους 6[mm] και 10[mm] που ενώνονται με μεμβράνη PVB, άρα με συνολικό πάχος 16[mm] και επιτρεπόμενη οριακή τάση  $\sigma_{\text{επιτ.}}=120.0[\text{MPa}]$ .

Πίνακας 2. Υαλοστάσια ανεμοφράκτη

Διαστάσεις	Τάσεις αναπτ.	Υαλοστάσια ανεμοφράκτη		
		Τάσεις επιτρ.	Μετ. αναπτ.	Μετ. επιτρ.
1 2.6X0.5	1.0	70.0	0.0009	0.026
2 2.9X2.2	16.2	70.0	0.003	0.029
3 2.9X0.53-0.59	1.34	70.0	0.0002	0.029

Πίνακας 3. Υαλοστάσια όψης

Διαστάσεις	Τάσεις αναπτ.	Υαλοστάσια όψης		
		Τάσεις επιτρ.	Μετ. αναπτ.	Μετ. επιτρ.
1 1.6X0.9	30.9	120.0	0.001	0.016
2 1.5X1.3	53.8	120.0	0.009	0.015
1.3X1.7	57.2	120.0	0.001	0.18

Πίνακας 3. Υαλοστάσια στέγης

Διαστάσεις	Τάσεις αναπτ.	Υαλοστάσια στέγης		
		Τάσεις επιτρ.	Μετ. αναπτ.	Μετ. επιτρ.
1 1.4X1.5	38.3	120.0	0.001	0.015
2 1.3X1.5	35.7	120.0	0.0009	0.015

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Λόγω του μικρού πάχους των υαλοπινάκων, των μεγάλων ανοιγμάτων τους και της ισχυρής φόρτισης (κρίσιμη φόρτιση η ανεμοπίεση), οι

μετακινήσεις κάθετα προς το επίπεδο τους είναι μεγάλες σε σχέση με το πάχος τους (πλάκα von Karman) προκαλώντας γεωμετρική μη γραμμική συμπεριφορά του καμπτόμενου υαλοπίνακα. Αντίθετα δεν υπάρχει φυσική μη γραμμικότητα του νόμου τάσης-παραμόρφωσης του γυαλιού, ο οποίος για τις συνήθεις φορτίσεις παραμένει πρακτικά στη γραμμική ελαστική περιοχή μέχρι να εμφανισθεί η πρώτη ρηγμάτωση λόγω ελκυσμού. Για τους παραπάνω λόγους, η μη γραμμική στατική ανάλυση των υαλοπινάκων πρέπει να γίνεται με τη μέθοδο βαθμιαίας φόρτισης και σε κάθε μικραύξηση της φόρτισης οι συνθήκες ισορροπίας και δυσκαμψίας πρέπει να γράφονται ως προς τον παραμορφωμένο φορέα. Το προτεινόμενο τρισδιάστατο δικτυωτό ομοίωμα και το πρόγραμμα HY εφαρμόστηκαν στη γεωμετρικά μη γραμμική στατική ανάλυση ενός ορθογωνίου υαλοπίνακα, περιμετρικά εδραζόμενου, που υπόκειται σε ανεμοπίεση. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού συγκρίθηκαν και βρέθηκαν σε ικανοποιητική προσέγγιση με δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα και με το ANSYS.

2. Χάρη στην μεγάλη αντοχή του γυαλιού σε ελκυσμό (λόγω κάμψης), σε σύγκριση με το σκυρόδεμα,  $\sigma_w=50[\text{MPa}]>5[\text{MPa}]$ , οι υαλοπίνακες μπορούν με μικρά πάχη (5-19[mm]) και μεγάλα ανοίγματα (2.0–3.0[m]) να αντέξουν σε ισχυρές φορτίσεις. Η ανεμοπίεση, που είναι η κρίσιμη φόρτίσή τους, μπορεί να φθάσει σε συνήθεις περιπτώσεις περίπου τα 25[kPa], ενώ η μέγιστη βύθιση στο κέντρο του υαλοπίνακα μπορεί να φτάσει τα 5[cm] τη στιγμή της αστοχίας.

3. Όσο μεγαλύτερες είναι οι μετακινήσεις του υαλοπίνακα κάθετα προς το επίπεδο του (βυθίσεις), τόσο μεγαλύτερο μερίδιο της λειτουργίας καμπτόμενης πλάκας αντικαθίσταται από τη λειτουργία μεμβράνης υπό εφελκυσμό. Η τελευταία είναι ευνοϊκή, επειδή προκαλεί μικρότερες τάσεις και παραμορφώσεις.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Norville Scott H., Bove Paul M., Sherridan Darrel L., Lawrence Stacey L., “Strength of new heat treated window glass lights and laminated glass units”, Journal of Structural Engineering, ASCE, March 1993, p.891-901

Vallabhan Girija C.V., “Iterative analysis of nonlinear glass plates”, Journal of Structural Engineering, ASCE, February 1983, p.489-502

Κοταλακίδης Κ. Σ., “Μη γραμμική στατική μελέτη σημειακά στηριγμένων υαλοπινάκων σε ανεμοπίεση”, Αρχιτεκτονική των γυάλινων κτιρίων, Ημερίδα 9/5/1999, κτίριο Αβέρωφ Ε.Μ.Π. Αθήνα

Κοταλακίδης Κ. Σ. & Παπαδόπουλος Π. & Πενέλης Γ. & Τσώνος Α. 1999, “Γεωμετρικά μη γραμμικός στατικός υπολογισμός σημειακά στηριγμένων υαλοπινάκων (planar system) σε ανεμοπίεση”, Ελληνικό συνέδριο σκυροδέματος. Ρέθυμνο

Arthur Cote, P.E. & Percy Bugbee, «Principles of Fire Protection», 1988, NFPA