

ΤΟ ΓΥΑΛΙ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

του **Αλέξανδρου ΤΟΛΗ**, Πολιτικού μηχανικού Π.Θ.
MSc ΔΣΑΚ ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην τελευταία δεκαετία, έχουμε δει μια δραματική αύξηση στη χρήση του δομικού γυαλιού σε κατασκευές λόγω της αύξησης του ενδιαφέροντος των αρχιτεκτόνων και τις βελτιώσεις στην τεχνολογία του. Ο προφανής λόγος που επιλέγεται το γυαλί είναι το ότι είναι διαφανές αλλά και ανθεκτικό στα αποτελέσματα της διάβρωσης.

Η εργασία έχει σκοπό να συγκεντρώσει πληροφορίες σχετικές με την χρήση του υλικού και κυρίως να δώσει στον αναγνώστη το έναυσμα για βαθύτερη ενασχόληση με το αντικείμενο. Στηριγμένη στη βιβλιογραφία περιγράφει την εμπειρία που αποκτιέται από τη σχεδίαση και την κατασκευή γυάλινων δομικών έργων, που όμως λόγω της μεγάλης έκτασης του θέματος αλλά και του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος περιορίζεται κυρίως σε υαλοπετάσματα.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Πιστεύεται πως γύρω στα 3500 π.Χ. άρχισαν οι άνθρωποι να φτιάχνουν γυαλί, κυρίως αδιαφανείς χάντρες. Τέτοια αντικείμενα έχουν βρεθεί στην Αίγυπτο και στην Ανατολική Μεσοποταμία. Γυάλινα αγγεία εμφανίστηκαν στον δέκατο έκτο αιώνα π.Χ. και ακολούθησαν γυάλινα κιούπια. Η επόμενη σημαντική ανακάλυψη για το γυαλί ήταν το υαλοφύσημα κάπου μεταξύ 27 πΧ και 14 μΧ. Η ανακάλυψη αυτή έγινε από Σύριους χειροτέχνες. Οι Ρωμαίοι ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν πρώτοι το γυαλί για καλλιτεχνικούς σκοπούς, με την ανακάλυψη του καθαρού γυαλιού στην Αλεξάνδρεια στο 100 μ.Χ. περίπου, κατασκευάζοντας σε σημαντικά κτίρια γυάλινα παράθυρα παρόλο που αυτά είχαν κακή ποιότητα. Από τον ενδέκατο αιώνα και μετά, αναπτύχθηκαν νέοι τρόποι δημιουργίας φύλλων γυαλιού όταν μικρά ορθογώνια κομμάτια γυαλιού με κομμάτια καλωδίου ενώθηκαν και δημιούργησαν τα πρώτα παράθυρα. Το γυαλί εξακολούθησε να είναι υλικό πολυτελείας ως τα τέλη του μεσαίωνα. Η προώθηση του γυαλιού στη σύγχρονη εποχή έγινε από τους αδελφούς Pilkington στην Βρετανία το 1959 και από τότε χρησιμοποιείται ευρύτατα. Σήμερα μεγάλα κομμάτια από υψηλής ποιότητας γυαλιού παράγονται αξιόπιστα και με χαμηλό κόστος.



Παρίσι Λούβρο



Παρίσι Λούβρο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Επί αιώνες, η χρήση γυαλιού σε κτίρια ήταν ουσιαστικά περιορισμένη σε βιτρίνες και παράθυρα. Τα αισθητικά πλεονεκτήματα και οι σημερινές τάσεις της σύγχρονης αρχιτεκτονικής ζητούν την επέκταση της χρήσης του σε πραγματικά νέες περιοχές. Ταυτόχρονα τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μια συνεχής βελτίωση στην παραγωγή. Η τεχνολογία επέτρεψε τα στοιχεία από γυαλί να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία και έτσι να μπορούν να διαδραματίσουν ένα πιο ουσιαστικό ρόλο.

Ο δομικός σχεδιασμός τέτοιων στοιχείων παρόλα αυτά παραμένει προβληματικός. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται σχεδιαστικές μέθοδοι οι οποίες υποφέρουν από χαρακτηριστικές αδυναμίες. Δεν εφαρμόζονται, προς το παρόν, σε γενικές συνθήκες αλλά περιορίζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως ορθογώνιες κατασκευές, για ομοιόμορφα πλευρικά φορτία, σταθερές φορτίσεις και καταπονήσεις ανεξάρτητες του χρόνου. Έχουν δημιουργηθεί μερικές πρότυπες παράμετροι οι οποίες όμως συνδυάζουν ταυτόχρονα πολλά φυσικά χαρακτηριστικά μαζί και εξαρτώνται από τα πειράματα από τα οποία προκύπτουν. Οι σχεδιαστικές μέθοδοι περιέχουν ανακολουθίες και δεν δίνουν πραγματικά αποτελέσματα σε ειδικές περιπτώσεις όπου διαφορετικά μοντέλα παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα και πολλοί ερευνητές εξέφρασαν σοβαρές αμφιβολίες αναφορικά με την καταλληλότητα του κοινού γυαλιού. Η έλλειψη εμπιστοσύνης σε προηγμένα μοντέλα γυαλιού, η έλλειψη ενός κοινού σχεδιαστικού τρόπου και η ακρίβεια των πειραμάτων είναι ζητήματα που δημιουργούν εμπόδια στην μεγαλύτερη εφαρμογή του.

Η συνέπεια στην αλυσίδα σχεδιασμός – παραγωγή - κατασκευή - ποιοτικός έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με αξιοπιστία όταν υπάρξουν καλά καθιερωμένα πρότυπα γενικής εφαρμογής. Σε σχέση με την μελέτη έργων από γυαλί, αυτήν την περίοδο, δεν υπάρχουν διεθνώς διεξοδικά πρότυπα για εφαρμογή και έτσι απαιτείται γνώση εφαρμοσμένης μηχανικής σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού που θα αναζητηθούν στη βάση δημοσιευμένων ανακοινώσεων και ερευνών.

Η μελέτη των έργων θα πρέπει να έχει λάβει υπόψη της ότι η αστοχία του γυαλιού, που είναι ένα ψαθυρό υλικό, είναι αποτέλεσμα ανάπτυξης ρωγμών στην επιφάνεια του, κάτω ακόμη και από στατικές φορτίσεις. Η συμπεριφορά στοιχείων γυαλιού εξαρτάται σημαντικά από την κατάσταση της επιφάνειας του, λόγω παραμενουσών μόνιμων τάσεων, τις κλιματολογικές συνθήκες αλλά και την προϊστορία του σε φορτίσεις. Η αστοχία προκύπτει πάντα από εφελκυστικές τάσεις. Ένα πρωταρχικό στοιχείο στο σχεδιασμό είναι ο πλεονασμός αντοχής σε περίπτωση ξαφνικής αστοχίας ενός στοιχείου ή ενός φύλλου του που μπορεί να προκύψει σαν αποτέλεσμα κάποιου κρουστικού φορτίου ή τοπικής αστοχίας λόγω κακής πρόσμιξης του γυαλιού αλλά ακόμη και για να αποφευχθεί η περίπτωση μιας δυσανάλογης κατάρρευσης ως αποτέλεσμα μιας τοπικής αστοχίας. Με την εφαρμογή των κατάλληλων παραγόντων ασφάλειας, και με τη χρήση σύνθετου γυαλιού σε κρίσιμα δομικά μέλη, το γυαλί μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να είναι ασφαλές κάτω από τα λειτουργικά φορτία και καθώς επίσης κατά την αστοχία του.

ΤΥΠΟΙ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου, η οποία αποτελεί το βασικό συστατικό του (διαμορφωτής), ενός ή περισσότερων συλλιπασμάτων και ενός ή περισσότερων σταθεροποιητών. Αν δεν χρησιμοποιηθεί σταθεροποιητής, τότε το γυαλί γίνεται εύθρυπτο και αποσθρώνεται από το νερό. Το κοινό γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου (SiO_2 - 73,7%), ανθρακικού νατρίου (κοιν. Σόδα, Na_2CO_3 - 16%), οξειδίου του καλίου (K_2O - 0,5%) ως συλλιπάσματα και ανθρακικού ασβεστίου (κοιν. ασβεστόλιθου (CaCO_3 - 5,2%) ανθρακικού μαγνησίου (MgCO_3 - 3,6%) και οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3 - 1%) ως σταθεροποιητές. Ανάλογα με τον τύπο και το ποσοστό των συλλιπασμάτων και των σταθεροποιητών λαμβάνονται και οι διάφοροι τύποι γυαλιού.

Βασικοί τύποι

- **Κοινό γυαλί** (Soda-lime glass): Παρασκευάζεται με συλλίπασμα οξείδιο του νατρίου (12-18%) και σταθεροποιητή οξείδιο του ασβεστίου (5-12%). Ορισμένα άλλα οξείδια μπορεί να συμμετέχουν για λόγους απόδοσης χρωματισμών. Το κοινό γυαλί είναι φθινό στην κατασκευή του και παρουσιάζει οπτικές και φυσικές ιδιότητες κατάλληλες για την κατασκευή κοινών αντικειμένων, όπως υαλοπίνακες και οικιακά σκεύη (ποτήρια, φιάλες, δοχεία τροφίμων). Επειδή δεν είναι πορώδες, δεν συγκρατεί κανένα συστατικό και καθαρίζεται εύκολα. Δεν αντιδρά με υδατικά διαλύματα ή έλαια και λίπη, κι έτσι δεν αλλοιώνει τη σύσταση των τροφίμων και τη γεύση ή την οσμή τους. Είναι, επίσης, βιολογικά αδρανές και δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη βακτηρίων ή μυκήτων. Το κοινό γυαλί είναι, επίσης, αδιαφανές στην φωτεινή ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 400 nm. Αυτό το κάνει κατάλληλο για χρήση σε υαλοπίνακες παραθύρων.
- **Γυαλί μολύβδου**: Παρασκευάζεται με αντικατάσταση του οξειδίου του νατρίου από οξείδιο του καλίου και του οξειδίου του ασβεστίου από οξείδιο του μολύβδου (PbO). Η περιεκτικότητα του PbO μπορεί να φθάνει και το 30%, αλλά το γυαλί με περιεκτικότητα μέχρι 24% σε PbO χαρακτηρίζεται ως κρύσταλλο. Έχει υψηλή ανθεκτικότητα, τα αντικείμενα είναι εξαιρετικά στιλπνά και παρουσιάζει υψηλό δείκτη διάθλασης. Οι δύο τελευταίες ιδιότητες το κάνουν υλικό ιδιαίτερα κατάλληλο για την κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων αλλά και (ακριβών) ειδών οικιακής χρήσεως, όπως ποτήρια, ανθοδοχεία κτλ. Ο μολύβδος είναι δηλητηριώδες υλικό, αλλά επειδή τα άτομά του είναι ολοσχερώς εγκλωβισμένα στη μοριακή δομή του γυαλιού, δεν επιφέρει καμία απολύτως βλάβη στην ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι ευαίσθητο στις μεταβολές θερμοκρασίας και να θραύεται εύκολα από αυτές. Λόγω της υψηλής του διαθλαστικότητας χρησιμοποιείται στην κατασκευή οπτικών οργάνων (π.χ. φακών). Μια ειδική μορφή αυτού του τύπου γυαλιού, με περιεκτικότητα σε PbO περίπου στο 65% χρησιμοποιείται για την κατασκευή ειδικών προστατευτικών υαλοπινάκων, επειδή ο μολύβδος απορροφά τις επικίνδυνες ακτινοβολίες που περιέχονται στο ηλιακό φως.

- **Γυαλί βορίου:** Είναι γνωστότερο με την εμπορική ονομασία "Pyrex". Η σύστασή του είναι οξείδιο του πυριτίου (70-80%), οξείδιο του βορίου B_2O_3 (7-13%) μικρά ποσοστά οξειδίων των αλκαλίων (4-8% Na_2O και K_2O , και 2-7% οξείδιο του αργιλίου Al_2O_3). Η παρουσία βορίου και το μικρό ποσοστό αλκαλίων κάνουν το γυαλί αυτό ανθεκτικό στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και περισσότερο δύσπηκτο. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαστηριακών οργάνων και συσκευών, συσκευασίες φαρμακευτικών προϊόντων, σε λαμπτήρες υψηλών αποδόσεων (π.χ. προβολέων) αλλά και για οικιακές εφαρμογές (σκεύη Pyrex, τα οποία δεν θραύονται κατά το μαγείρεμα). Παρουσιάζει, επίσης, χαμηλό συντελεστή διαστολής, πράγμα που δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων στα πειράματα.
- **Υαλόνημα:** Κατασκευάζεται από ποικίλους τύπους γυαλιού σε μορφή νήματος με πολλαπλές χρήσεις. Το κοινό γυαλί παρέχει νήματα κατάλληλα για κατασκευή μονώσεων (υαλόμαλλο), ενώ το γυαλί βορίου δίνει υαλόνημα από το οποίο κατασκευάζονται υφαντικές δομές που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών από πλαστικό, όπως κράνη, μικρά σκάφη, σασί αυτοκινήτων, σωληνώσεις κτλ. και είναι γνωστό με το εμπορικό όνομα Fiberglass. Μια πιο πρόσφατη εφαρμογή του υαλονήματος είναι η κατασκευή οπτικών ινών, που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση φωτεινών σημάτων, παρακάμπτοντας το ευθύγραμμο της διάδοσης του φωτός. Χρησιμοποιούνται για ενδοσκοπήσεις οργάνων σε ζωντανούς οργανισμούς, στη διαχείριση σημάτων οδικής και σιδηροδρομικής κυκλοφορίας και στην κατασκευή ειδικών οργάνων, όπως Σόναρ, υδροφώνων κτλ. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, επίσης, στην τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών. Χάρη στη χρήση τους αναπτύχθηκαν πολύ η τηλεφωνία, τα δίκτυα υπολογιστών και το Διαδίκτυο (ευρυζωνικές συνδέσεις).

Ειδικοί τύποι

- **Γυαλί αργιλίου:** Περιέχει περίπου 20% οξειδίου του αργιλίου, μικρά ποσοστά οξειδίων του βορίου και του μαγνησίου, αλλά πολύ μικρό ποσοστό οξειδίων των αλκαλίων. Το γυαλί αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα θερμοανθεκτικό και χρησιμοποιείται σε θαλάμους καύσεων, σε γυαλιά οργάνων μέτρησης υψηλών θερμοκρασιών και σε λαμπτήρες αλογόνου, στους οποίους η θερμοκρασία αυτού του γυαλιού μπορεί να φθάσει και τους $750^{\circ}C$.
- **Γυαλί αλκαλίων - βαρίου:** Χωρίς αυτό τον τύπο γυαλιού, η χρήση οθονών για υπολογιστές και τηλεοράσεις θα ήταν επικίνδυνη. Η οθόνη καθοδικού σωλήνα, από τον τρόπο λειτουργίας της, παράγει ιδιαίτερα επικίνδυνες ακτινοβολίες (Ακτίνες X), οι οποίες απορροφώνται από αυτόν τον τύπο γυαλιού, που περιέχει εκτός από οξείδιο του μολύβδου σε χαμηλό ποσοστό, και οξείδιο του βαρίου (BaO) και του στροντίου (SrO).
- **Κεραμικό γυαλί:** Είναι γυαλί με οξείδια του αργιλίου και του λιθίου να συμμετέχουν στη σύστασή του και, λόγω θερμοανθεκτικότητας, έχει βρει εφαρμογή ως πυρίμαχο διάφανο υλικό σε θύρες κλιβάνων, κατόπτρων τηλεσκοπίων, υαλοποίησης πλακιδίων

διαστημοπλοίων, αλλά και σε οικιακές συσκευές (υαλοκεραμικές εστίες μαγειρέματος κτλ.).

- **Οπτικά γυαλιά:** Δεν έχουν σταθερή σύσταση, αλλά αυτή ποικίλει ανάλογα με τον τύπο που απαιτείται κάθε φορά. Τα συναντούμε στην κατασκευή γυαλιών οράσεως και ηλίου, σε συσκευές όπως φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες και μικροσκόπια (κατασκευή φακών) και σε συσκευές ακριβείας (οπτικά όργανα πλοήγησης, κάτοπτρα, τηλεσκόπια κτλ.).

ΚΟΙΝΟ ΓΥΑΛΙ

Από τους ποιο πάνω τύπους τις κατασκευές ενδιαφέρει το κοινό γυαλί. Το κοινό γυαλί χωρίζεται στο επίπεδο γυαλί (float ή flat glass) και σε αυτό της συσκευασίας (μπουκάλια κτλ.). Οι δύο τύποι αυτοί διαφέρουν:

- στην μέθοδο παρασκευής, Το επίπεδο γυαλί παράγεται με έγχυση του πάνω σε λιωμένο κασσίτερο, από όπου και η αγγλική ονομασία float, έτσι ώστε να του δίδεται ομοιόμορφο πάχος και επίπεδη επιφάνεια.
- στην χημική τους σύνθεση. Το επίπεδο γυαλί έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξείδια του μαγνησίου (MgO) και σε ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) ενώ μικρότερη περιεκτικότητα σε χαλαζιακή άμμο (SiO_2), οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3).

Το ιξώδες του γυαλιού αυξάνεται πολύ γρήγορα με την θερμοκρασία. Η μετάβαση γυαλιού από ένα στερεό ελαστικό σώμα σε ρευστό γίνεται πολύ γρήγορα. Στη θερμοκρασία αυτή, $555^{\circ}C$, έχει δοθεί ο όρος μεταβατική θερμοκρασία (transition temperature) ή σημείο ανόπτησης (annealing point).

Ανοπτημένο γυαλί (annealed glass)

Πρόκειται για μία διαδικασία αποβολής των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται μέσα στη κρυσταλλική δομή του γυαλιού. Κατ' αυτή το γυαλί θερμαίνεται στο σημείο ανόπτησης (annealing point) και ακολούθως ψύχεται ελεγχόμενα. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική για την αντοχή του και προηγείται της κοπής και της λοιπής επεξεργασίας του.

Το ανοπτημένο γυαλί παράγεται σε τυποποιημένα πάχη 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 19, και 25 χιλιοστών σε φύλλα μέγιστης διάστασης $3.0 \times 6.0m$ είναι όμως δυνατή η παραγωγή και σε διαστάσεις ως $3.2 \times 8.0m$.

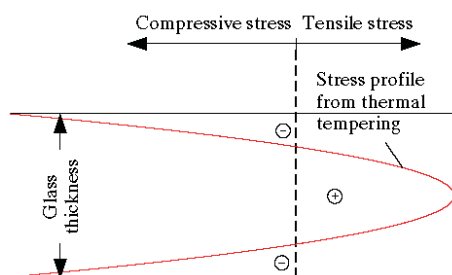
Η αντοχή του σε μόνιμη τάση υποβαθμίζεται με τον χρόνο λόγω της χημικής διάβρωσης στις μικρορωγμές που δημιουργούνται στην επιφάνεια του, από την δράση του νερού η οποία διευρύνει τις ρωγμές αυτές. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα όριο φόρτισης (περί τα $7Mpa$) κάτω από το οποίο η δράση αυτή δεν είναι σημαντική.

Ένα ακόμη φαινόμενο στο οποίο το ανοπτημένο γυαλί είναι ευαίσθητο είναι το θερμικό σοκ. Το θερμικό σοκ προκαλείται από διαφορές θερμοκρασίας που υπάρχουν σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του ιδίου φύλλου γυαλιού (π.χ. ένα τμήμα του βρίσκεται σε σκιά ενώ άλλο σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία) οι οποίες αναπτύσσουν εσωτερικές τάσεις που έχουν σαν αποτέ-

λεσμα την δημιουργία ρωγμών. Ως κρίσιμη θερμοκρασία έχει βρεθεί να είναι οι 33°C. Όπου το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό τότε στο γυαλί πρέπει να προδιαγράφεται με διαδικασία επαναφοράς (Tempered)..

Γυαλί με επαναφορά (tempered glass)

Αφού έχει ολοκληρωθεί η προβλεπόμενη επεξεργασία (κοπή, γυάλισμα, διάνοιξη οπών κτλ),



Σχήμα 1: Παραμένουσες τάσεις από την επαναφορά [6].

στο ανοπτημένο γυαλί, γίνεται επαναφορά με επαναθέρμανση του στους 650°C και ταχεία ψύξη της επιφάνειας του με προσεκτικά ελεγχόμενο τρόπο. Αυτή η διαδικασία προεντείνει (σχήμα 1) την εξωτερική επιφάνεια αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την αντοχή του γυαλιού σε εφελκυσμό. Το επίπεδο της παραμένουσας τάσης εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό της ψύξης και υπάρχουν βασικά δύο ποιότητες:

- **Σκληρυμένο γυαλί (Toughened glass)**, που προδιαγράφεται συνήθως με παραμένουσα επιφανειακή τάση κατ ελάχιστο 100Mpa. Όλα τα πάχη του ανοπτημένου γυαλιού παράγονται με εξαίρεση τα 25mm στα οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί παραμένουσα τάση στο όριο των 100Mpa. Οι μέγιστες διαστάσεις φύλλων εξαρτώνται από τον εξοπλισμό των εργοστασίων και είναι συνήθως 2.14x4.5m αν και μπορεί να βρεθούν έως 3.0x6.0m.
- **Θερμικά ενισχυμένο γυαλί (Heat strengthened glass)**, που προδιαγράφεται συνήθως με παραμένουσα επιφανειακή τάση ανάμεσα στα 40-50Mpa. Παράγονται τα πάχη του ανοπτημένου γυαλιού με μέγιστο όμως πάχος τα 12mm.

Στα γυαλιά με επαναφορά υπάρχει ο κίνδυνος του τυχαίου θρυμματισμού τους λόγω της περιεκτικότητας τους σε θειούχο νικέλιο. Η θραύση αυτή προκαλείται από την διαδικασία της σκλήρυνσης, λόγω της ταχείας ψύξης που υποβάλλεται η επιφάνεια του γυαλιού, κατά την οποία αλλάζει η κρυσταλλική δομή των κρυστάλλων του θειούχου νικελίου. Το φαινόμενο αυτό πάντως δεν αφορά το θερμικά ενισχυμένο γυαλί λόγω της ηπιότερης ψύξης του. Για την



Εικόνα 1: Μορφή θραύσης γυαλιού. Από αριστερά ανοπτημένο, heat strengthened, toughened [6].

ελαχιστοποίηση του ποιο πάνω κινδύνου το γυαλί υποβάλλεται σε θερμικό διαποτισμό (heat soaking) μετά την σκλήρυνση σε θερμοκρασία περί τους 280°C.

Το γυαλί (εικόνα 1) με επαναφορά έχει την ιδιότητα να σπάει σε μικρά κυβικά τμήματα αντί μεγάλα

και με οξείες γωνίες κομμάτια γεγονός που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο για τραυματισμούς ή θάνατο. Τέλος ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που υπάρχει στα άκρα τους μπορεί να προκληθεί η θραύση τους από κτυπήματα στις άκρες.

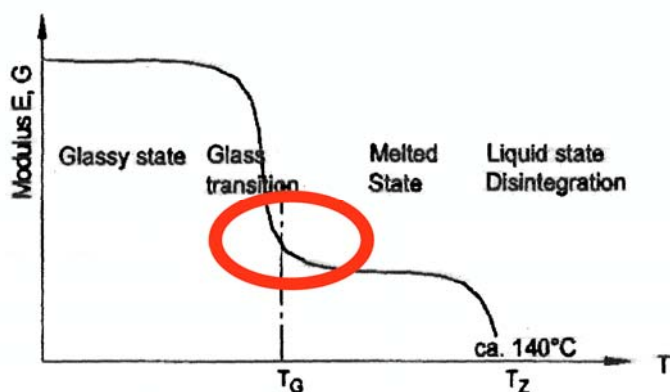
Σύνθετο γυαλί (Laminated glass).

Αποτελείται από φύλλα ολόσωμου γυαλιού συνδεδεμένα με συγκολλητικό υλικό, που σκοπό έχει την συγκράτηση τους αλλά και την δημιουργία διατμητικής συνεργασίας. Σαν τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται το πολυβινυλοβουτιλένιο (PVB), η πολυουρεθάνη ή ρευστές κατά την έγχυση ρητίνες.

Το πάχος σχεδιασμού του σύνθετου γυαλιού εξαρτάται από το είδος της φόρτισης (μόνιμο ή κινητό) και την θερμοκρασία. Κύριο πρόβλημα είναι η μεταβλητότητα του μέτρου διάτμησης

του συνδετικού υλικού με την θερμοκρασία και τον χρόνο επιβολής της φόρτισης.

Έτσι ενώ το μέτρο διάτμησης σε χαμηλές θερμοκρασίες και για στιγμιαίες φορτίσεις μπορεί να είναι σε τιμές ανάλογες με αυτές που έχει το γυαλί (περί τα 100MPa), σε υψηλές θερμοκρασίες και για μόνιμες φορτίσεις μπορεί ακόμη και να υποχλιαπ-
λασισασισαστεί. Η καμπύλη του σχήματος 2 αναφέρεται στη μεταβολή των E και G με την θερ-



Σχήμα 2: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και διατμήσεως με την θερμοκρασία στο PVB [1].

μοκρασία για το PVB και το σημείο κατά το οποίο η καμπύλη εμφανίζει απότομή κλίση είναι μεταξύ 15 και 20°C [1].

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ

Η θεωρητική αντοχή του γυαλιού υπαγορεύεται από την μοριακή συνοχή των δεσμών πυριτίου και οξυγόνου. Για το κοινό γυαλί (soda-lime) η θεωρητική δύναμη συνοχής είναι $\sigma_{coh} = 20000 \text{ MPa}$ η οποία όμως είναι μερικές εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από την πραγματική αντοχή. Έχει αποδειχθεί πως όλα τα χαρακτηριστικά αντοχής του γυαλιού έχουν εξήγηση στις ατέλειες που υπάρχουν στην επιφάνεια του και στις άκρες του. Έτσι και η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται από τις ατέλειες αυτές και οι οποίες έχουν προέλθει είτε κατά την διάρκεια της κατασκευής του είτε κατά την τοποθέτησή του. Κατά την παραγωγή του επίπεδου γυαλιού τέτοιες ατέλειες εμφανίζονται σε όλη την επιφάνεια με μήκος $a < 10 \mu\text{m}$. Χτυπήματα κατά την διάρκεια της τοποθέτησης, γρατσουνιές ή μικρές κρούσεις με άλλα αντικείμενα επιφέρουν ατέλειες της τάξης των $100 \mu\text{m}$. Η εφελκυστική δύναμη που επιβάλλεται στο γυαλί συγκεντρώνεται στις άκρες αυτών των ατελειών αυτών υπό μορφή αυξημένων εφελκυστικών τάσεων. Αν η

δύναμη συνοχής σ_{coh} στη περιοχή υπερκαλυφθεί τότε τα άτομα χωρίζουν και η ρωγμή μεγαλώνει. Αυτού του τύπου μηχανισμός οδηγεί σε μια ψαθιρή μορφή αστοχίας.

Εκτός από την παρουσία και την διανομή των ατελειών στην επιφάνεια, η αντοχή του γυαλιού εξαρτάται και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πρόκειται για χαρακτηριστικό που απαιτεί προσοχή κατά τον σχεδιασμό γιατί, αντίθετα με άλλα υλικά, η απόκλιση της αντοχής είναι μεγάλη και μπορεί να αυξηθεί επιπλέον κατά την διάρκεια της ζωής του υλικού.

Η θεμελιώδης θεωρία για το κριτήριο αστοχίας διατυπώθηκε από τον Griffith το 1920 και βασίζεται σε μια ενεργειακή ισορροπία σύμφωνα με την οποία η ρωγμή θα μεγαλώσει σε ένα υπό ένταση στοιχείο εάν η αύξηση της απελευθερώνει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που απαιτείται για την δημιουργία νέων ρωγμών.



Παρίσι λεωφόρος Ηλυσίων Πεδίων

Ορίζουμε τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης ως:

$$K_I = Y \cdot \sigma_t \cdot \sqrt{a} ,$$

όπου σ_t η εφελκυστική τάση από κεντρικό εφελκυσμό, που προσδιορίζεται χωρίς την παρουσία της ρωγμής, a το μήκος της ρωγμής και Y συντελεστής αναλογίας εξαρτώμενος από το σχήμα της ρωγμής, το λόγο του μήκους της προς το πάχος του στοιχείου και την θέση της ρωγμής στην περιοχή εφελκυσμού. Ο συντελεστής Y έχει βρεθεί πειραματικά ίσος με 1.77 για ρωγμή στο κέντρο του πλάτους της εφελκυσμένης περιοχής και 1.99 όταν βρίσκεται στο άκρο. Ο προσδιορισμός του κρίσιμου συντελεστή συγκέντρωσης τάσης K_{IC} γίνεται εάν στην προηγούμενη σχέση θέσουμε $K_I = K_{IC}$ και ο συσχετισμός γίνει με την τάση αστοχίας σ_f . Τότε

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sqrt{a}}$$

Ο συντελεστής K_{IC} έχει βρεθεί να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.72 και 0.82 MPa m^{-1/2}. ενώ μια συνηθισμένη τιμή είναι 0.75 MPa m^{-1/2}.

Στην προηγούμενη εξίσωση έχει υποτεθεί ότι η ακμή της ρωγμής είναι οξεία δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας της είναι μηδενική. Αν θεωρηθεί όμως ότι η ακτίνα δεν είναι μηδενική τότε προκύπτει:

$$\sigma_f = \sigma_{coh} \frac{\sqrt{\rho}}{2\sqrt{\alpha}}$$

Είναι προφανές ότι με την αύξηση της ακτίνας αυξάνει και η αντοχή. Σύμφωνα με τον Lawn και άλλους, η ελάχιστη ακτίνα βρίσκεται από τον τύπο

$$\rho_{min} = \left(\frac{2 \cdot K_{IC}}{Y \cdot \sigma_{coh}} \right)^2$$

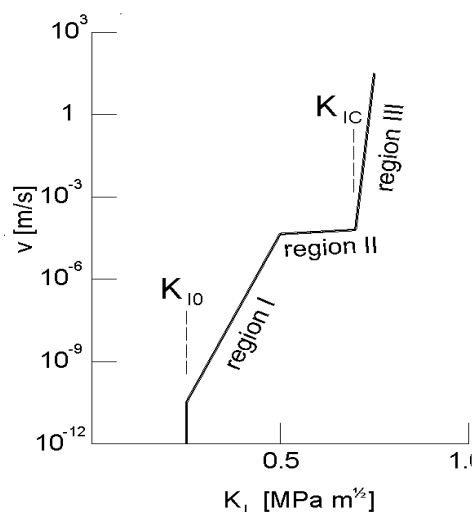
Με εφαρμογή των τιμών $K_{IC}=0.75$ MPa m^{-1/2}, $\sigma_{coh}= 20000$ MPa και $Y=1.99$ η ελάχιστη ακτίνα προκύπτει $\rho_{min}=1.4$ nm. Η τιμή αυτή είναι τέσσερις φορές το μήκος δεσμού Si-O-Si το οποίο είναι 0.32nm.

Μερικές φορές το μέγεθος των κρίσιμων ατελειών καθορίζεται από την επιφάνεια αστοχίας μετά την θραύση. Η μέτρηση απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο από ηλεκτρονικά μικροσκόπια.

Όταν ψαθυρά υλικά, όπως το γυαλί, χαράζονται από άλλα σκληρά υλικά, δημιουργούνται τελικά ρωγμές από αυτές τις εγκοπές. Από την στιγμή που η αστοχία του γυαλιού ξεκινάει από ατέλειες στην επιφάνεια σε μέγεθος μερικών μικρών του μέτρου, η αστοχία μπορεί να είναι αποτέλεσμα επαφής με μικροσκοπικούς αλλά σκληρούς κόκκους. Ο αέρας περιέχει σκόνη η οποία κατά ένα μεγάλο μέρος αποτελείται από μικρά κομμάτια χαλαζία που είναι αρκετά σκληρά ώστε να μπορούν να χαράξουν όλα τα υλικά εκτός από το διαμάντι. Χαρακτηριστικά εάν θεωρηθεί ένα κομμάτι χαλαζία με ακτίνα 1mm που βρίσκεται στην επιφάνεια γυαλιού, το κρίσιμο φορτίο για να χαραχθεί είναι μόλις 0.5N (Derby 1992). Είναι πολύ συχνό τέτοια κομμάτια να συγκεντρώνονται στις επιφάνειες των υλικών και όταν αυτά παγιδεύονται μεταξύ δύο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή, το κρίσιμο αυτό φορτίο εύκολα ξεπερνιέται. Έτσι στην άμεση επαφή του γυαλιού και του μεταλλικού πλαισίου που το περιβάλλει, τα μικροσκοπικά κομμάτια χαράζουν το γυαλί, αντί την μεταλλική επιφάνεια, και η αστοχία ξεκινάει. Ως εκ τούτου η επαφή μεταξύ γυαλιού και μετάλλου θα πρέπει να εμποδίζεται με την τοποθέτηση υλικών με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (π.χ. λάστιχο), μεταξύ των επιφανειών γυαλιού – μετάλλου.

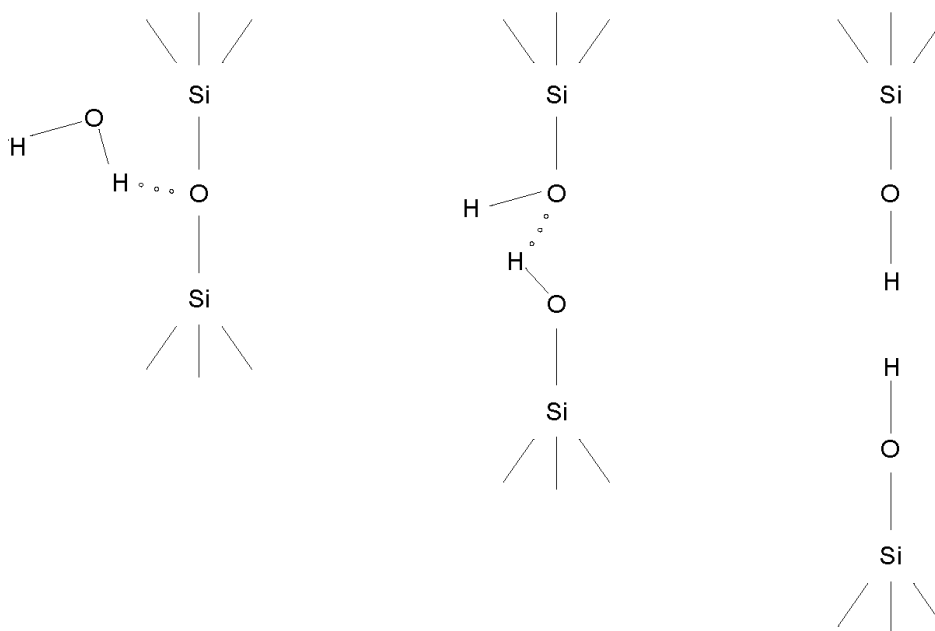
Παρόλο που το γυαλί χαρακτηρίζεται ως χημικά αδρανές και με σημαντική αντίσταση στη διάβρωση στην πραγματικότητα είναι πολύ ευαίσθητο στην αστοχία, λόγω διάβρωσης υπό τάση, η οποία προκαλείται από το νερό του περιβάλλοντος. Αυτό το φαινόμενο, συχνά καλούμενο ως στατική κόπωση, είναι ο λόγος για την αστοχία του γυαλιού υπό μακρόχρονες εφελκυστικές τάσεις.

Η διαδικασία της θραύσης του γυαλιού χωρίζεται στα ακόλουθα μέρη:



Σχήμα 3: Μεταβολή της ταχύτητας αστοχίας σε συνάρτηση με τον συντελεστή K_I [3].

- Η ρωγμή προκαλείται στην επιφάνεια του γυαλιού κατά την διάρκεια της παραγωγής ή και της τοποθέτησης.
- Εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται κανονικά στις ρωγμές. Εάν η ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης $K_I > K_{I0}$ ($K_{I0} = (20-30)\% K_{IC}$, (περιοχή I στο σχήμα 3) η ρωγμή αρχίζει να μεγαλώνει εξαιτίας της στατικής κόπωσης, η οποία προκαλείται από την χημική αντίδραση $Si_2O + H_2O \rightarrow 2SiOH$, με αποτέλεσμα να καταλύεται ο δεσμός (σχήμα 4).



Σχήμα 4: Σχηματική διαδικασία της κατάλυσης του δεσμού της χαλαζιακής άμμου από την δράση του νερού (από αριστερά προς τα δεξιά) [3].

- Μόλις ξεπεραστεί το όριο διάχυσης (περιοχή II στο σχήμα 3), η ρωγμή αυξάνεται με μεγάλους ρυθμούς ενώ και ο συντελεστής K_I αυξάνει. Σε αυτό το σημείο η ταχύτητα αστοχίας είναι ήδη μεγάλη και ο K_I αυξάνει πολύ γρήγορα έως ότου φτάσει την κρίσιμη τιμή K_{IC} .

- Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης εξισωθεί με τον κρίσιμο $K_I=K_{IC}$ η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής αυξάνεται δραματικά οδηγώντας άμεσα σε θραύση. Στην περίπτωση που η ρωγμή έχει χώρο να αναπτυχθεί μπορεί η ταχύτητα να φτάσει την τιμή $v_{max}=1500$ m/s. Όταν επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα, η ρωγμή χωρίζεται σε μικρότερες που αναπτύσσονται με μικρότερες ταχύτητες.
- Στην περίπτωση που το επίπεδο της τάσης είναι εξ αρχής υψηλό ή οι ατέλειες μεγάλες σε μέγεθος, ο συντελεστής συγκέντρωσης εξισώνεται άμεσα με τον κρίσιμο $K_I=K_{IC}$ αμέσως με της επιβολή της φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση η αντοχή του γυαλιού σε βραχυχρόνιες φορτίσεις ξεπερνιέται και το γυαλί θρυμματίζεται ακαριαία χωρίς καμία προειδοποίηση.

Ήδη φαίνεται από την παραπάνω διαδικασία και το σχήμα 3 ότι είναι δυνατό να προβλεφθεί κάποιο επίπεδο φόρτισης το οποίο να οδηγεί σε μια χαμηλή ταχύτητα διάδοσης ρωγμών που, για την χρονική διάρκεια επιβολής της φόρτισης, να οδηγεί σε προβλέψιμη, σε χρόνο, χρησιμότητα του υλικού. Είναι ακόμη φανερό ότι οι φορτίσεις με μεγάλη διάρκεια (π.χ. μόνιμα φορτία) πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό επίπεδο φόρτισης από ότι φορτία με μικρότερο χρόνο επιβολής (π.χ. χιόνι) είτε με σχεδόν στιγμιαίο χρόνο επιβολής όπως η ανεμοπτίεση.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟ prEN 13474

Από το 1999 δημιουργήθηκε το προσχέδιο του ευρωπαϊκού προτύπου για τον υπολογισμό του γυαλιού σε υαλοστάσια το οποίο αποτελείται από τρία μέρη, το πρώτο αφορά γενικές διατάξεις υπολογισμού το δεύτερο υπολογισμό με ομοιόμορφη φόρτιση και το τρίτο φόρτιση με γραμμικά φορτία. Αν και το πρότυπο αυτό θα έπρεπε να είχε γίνει EN (κανονικό πρότυπο για εφαρμογή) την στιγμή που γράφεται το παρόν κείμενο έχει αποσυρθεί για διορθώσεις.

Ο σχεδιασμός σύμφωνα με το πρότυπο αυτό αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Τον προσδιορισμό της αντοχής σχεδιασμού η οποία είναι συνάρτηση της φορτιζόμενης επιφάνειας, της διάρκειας επιβολής φορτίου του υλικού και βεβαίως των μερικών συντελεστών ασφαλείας που ορίζονται στο πρότυπο.
- Τον προσδιορισμό των φορτίων με βάση τους αντίστοιχους ευρωκώδικες φόρτισης (π.χ. EN 1991-1-4 Δράση στις κατασκευές – Γενικές δράσεις – Δράση ανέμου, κα)
- Τον προσδιορισμό της μέγιστης τάσης καθώς και της παραμόρφωσης του βέλους. Εδώ αξιολογείται ότι λόγω του πολύ μικρού πάχους που έχει το γυαλί σε σχέση με το αναπτυσσόμενο βέλος (πολλαπλάσιο του μισού πάχους της διατομής), δημιουργούνται θέματα μεγάλων παραμορφώσεων (γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά). Για το λόγο αυτό το προσχέδιο του κανονισμού δίνει έναν εύκολο τρόπο, για προκαθοριζόμενες φορτίσεις, του προσδιορισμού της έντασης και του βέλους μη γραμμικά.
- Τον προσδιορισμό μιας ισοδύναμης έντασης που λαμβάνει υπ' όψη της την μειωμένη πιθανότητα αστοχίας όταν η μέγιστη τάση είναι περιορισμένη σε έκταση.

Τα ανωτέρω αναλύονται στα επόμενα.

Προσδιορισμός της αντοχής

Ο προσδιορισμός αντοχής σχεδιασμού λόγω στατικών εφελκυστικών τάσεων στο κοινό γυαλί δίνεται από τον τύπο

$$f_{g,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{g,k}}{\gamma_m \cdot k_A} \cdot \gamma_n, \text{ όπου:}$$

- $k_{\text{mod}} = 0.72$ για τον άνεμο, 0.36 για χιόνι και 0.27 για μόνιμα φορτία
- $f_{g,k} = 45 \text{ Mpa}$ (EN 572)
- $\gamma_m = 1.8$
- $k_A = A^{1/\beta}$, ο συντελεστής σχήματος
- γ_n εξαρτάται από την χώρα και συνήθως είναι ίσο με 1.0

Για το tempered γυαλί ο τύπος γίνεται

$$f_{g,d} = \left(\frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_v} + k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_m \cdot k_A} \right) \cdot \gamma_n, \text{ όπου:}$$

- $f_{b,k} = 120 \text{ Mpa}$ (EN 12150) για το toughened γυαλί
- $f_{b,k} = 70 \text{ Mpa}$ (EN 1863) για το heat-strengthened γυαλί
- $\gamma_v = 2.3$

Σημειώνεται ότι οι τιμές των $f_{g,k}$ και $f_{b,k}$ αφορούν διάρκεια φόρτισης 1,5 sec και για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διόρθωση με τον k_{mod} .

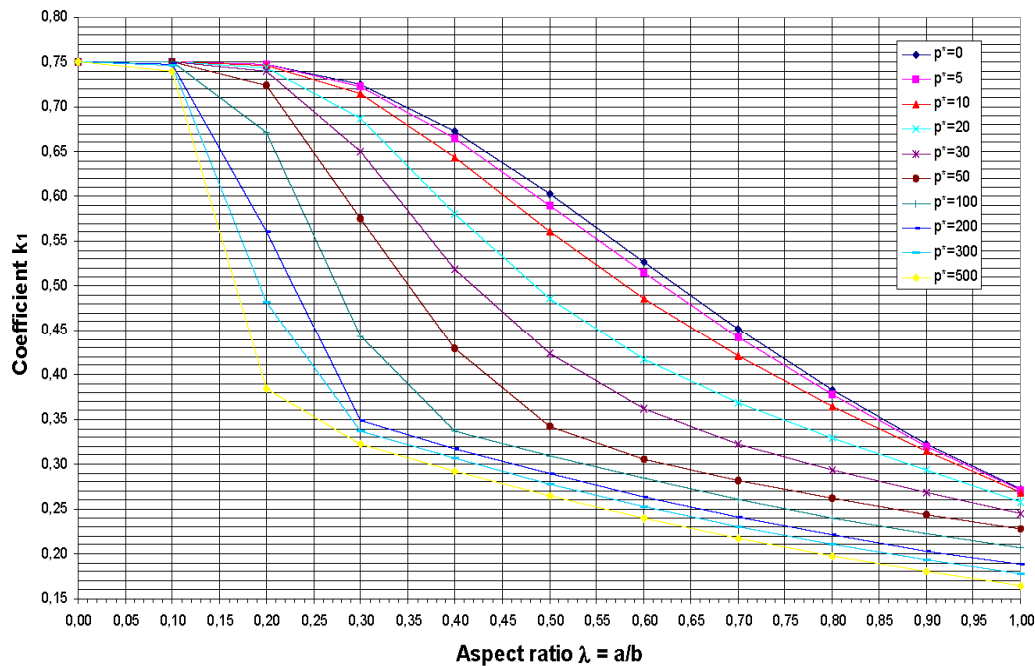
Προσδιορισμός της μέγιστης τάσης

Ο προσδιορισμός της μέγιστης τάσης δίδεται

$$\sigma_{\text{max}} = k_1 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \cdot q_d, \text{ όπου:}$$

- a , το μήκος της μικρότερης πλευράς του γυαλιού,
- t το πάχος του,
- q_d το φορτίο σχεδιασμού και
- k_1 συντελεστής σύμφωνα με το διάγραμμα 1
- p^* Ανηγγμένος συντελεστής φορτίου με $p^* = \left(\frac{a}{t} \right)^4 \cdot \frac{q_d}{E}$,

- $E=70000$ MPa το μέτρο ελαστικότητας.



Διάγραμμα 1: Υπολογισμός του συντελεστή k_1 από τον λόγο των πλευρών λ και τον ανηγμένο συντελεστή φορτίου p^* [3].

Για ορθογώνια τμήματα γυαλιού που στηρίζονται στις δύο πλευρές ο παραπάνω τύπος διαμορφώνεται

$$\sigma_{\max} = 0.75 \cdot \left(\frac{L}{t} \right)^2 \cdot q_d, \text{ με } L \text{ ίσο με το άνοιγμα.}$$

Προσδιορισμός της ισοδύναμης (ενεργής) τάσης.

Από την στιγμή που η εφελκυστική αντοχή του γυαλιού εξαρτάται από την διανομή και το μέγεθος των ατελειών της επιφάνειας του γυαλιού αποδεικνύεται πως η διανομή των τάσεων επηρεάζουν την αντοχή σχεδιασμού. Για παράδειγμα, εάν οι εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγαλύτερη από το αν οι εφελκυστικές τάσεις της ίδιας έντασης εφαρμόζονται σε ένα μικρότερο τμήμα.

Για να το λάβουμε υπόψη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, για τον έλεγχο αντοχής, αντί των μέγιστων τάσεων την ενεργή τάση σ_{ef} . Ως ενεργή εννοούμε μια μέση ζυγισμένη τιμή των κυρίων εφελκυστικών τάσεων η οποία προσδιορίζεται με τρόπο ανάλογο με τον συντελεστή k_A . Μέσω της ενεργής τάσης εξισώνεται η πιθανότητα αστοχίας που προκαλείται από την πραγματική διανομή τάσεων με αυτήν κατά την οποία η ενεργή τάση θα αναπτύσσεται σε όλη την επιφάνεια του γυαλιού.

Η ενεργή τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{ef} = \left[\frac{1}{A} \cdot \iint \sigma_1^\beta dx dy \right]^{\frac{1}{\beta}}, \text{ όπου:}$$

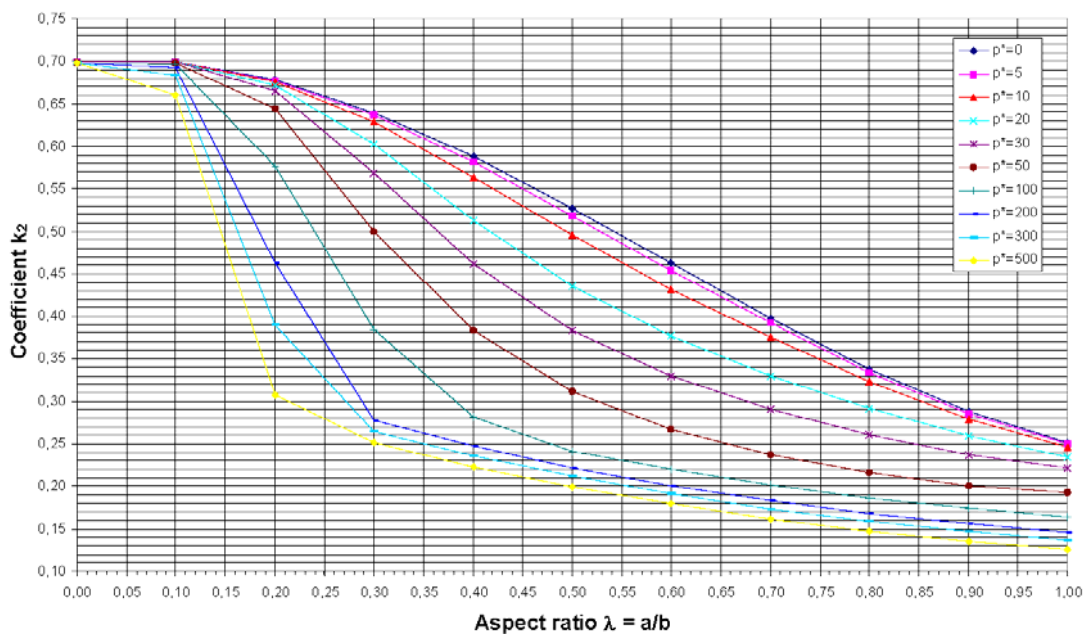
- Α το εμβαδόν
- σ_i η κύρια τάση στο σημείο (x, y)
- $\beta=25$ σταθερά.

Στο κείμενο του προσωρινού προτύπου δίδεται μια γραφική μέθοδος άμεσου υπολογισμού όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Υπολογίζεται

$$\sigma_{ef} = k_2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot q_d, \text{ όπου } k_2 \text{ συντελεστής που προσδιορίζεται από το ακόλουθο διάγραμμα.}$$

Οι υπόλοιπες μεταβλητές λαμβάνονται όπως στον προσδιορισμό της μέγιστης τάσης ανωτέρω.



Διάγραμμα 2: Υπολογισμός του συντελεστή k_2 από τον λόγο των πλευρών λ και τον ανηγμένο συντελεστή φορτίου ρ^* [3].

Για ορθογώνια τμήματα γυαλιού που στηρίζονται στις δύο πλευρές ο παραπάνω τύπος δια-

$$\text{μορφώνεται } \sigma_{\max} = 0.699 \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^2 \cdot q_d$$

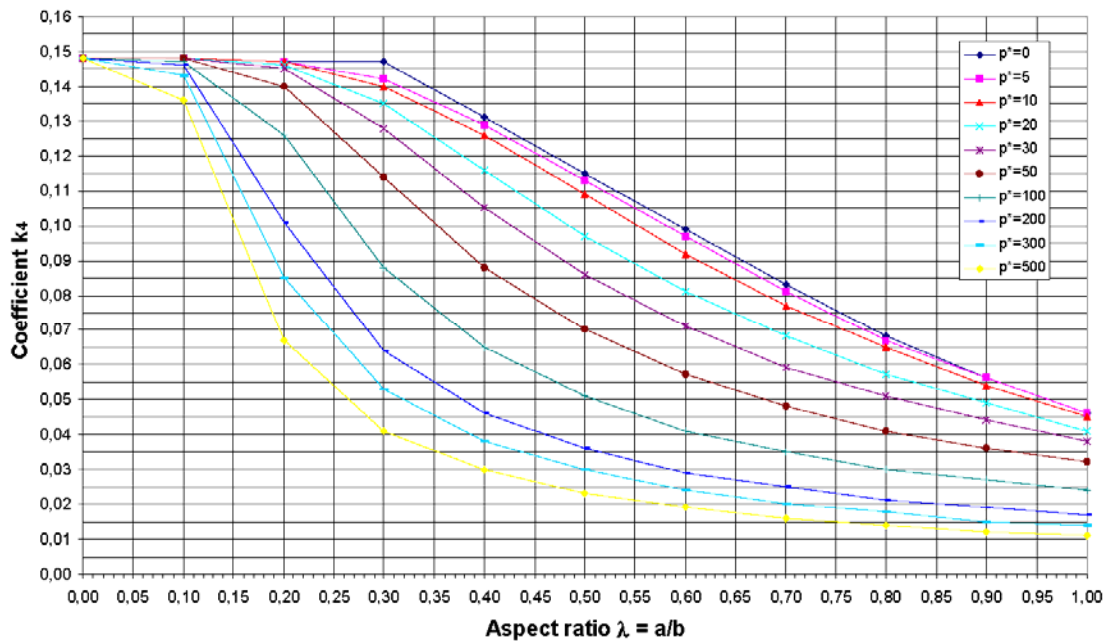
Προσδιορισμός του μέγιστου βέλους.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης κάμψης $\delta_{\max}$ τμημάτων γυαλιού που στηρίζονται και στις τέσσερις πλευρές χρησιμοποιείται ο τύπος

$$\delta_{\max} = k_4 \cdot \frac{L^4}{t^3} \cdot \frac{q_k}{E}, \text{ όπου:}$$

- q_k η ονομαστική (SLS) τιμή του φορτίου,

- k_4 συντελεστής που προσδιορίζεται όπως και στην περίπτωση της μέγιστης τάσης με την διαφορά ότι το p^* υπολογίζεται τώρα από την q_k



Διάγραμμα 3: Υπολογισμός του συντελεστή k_4 από τον λόγο των πλευρών λ και τον ανηγμένο συντελεστή φορτίου p^* (που υπολογίζεται όμως από την q_k) [3].

Για ορθογώνια τμήματα γυαλιού που στηρίζονται στις δύο πλευρές ο παραπάνω τύπος δια-

$$\text{μορφώνεται } \delta_{\max} = 0.148 \cdot \frac{L^4}{t^3} \cdot \frac{q_k}{E}$$

Το σχέδιο του προτύπου δεν διευκρινίζει το μέγεθος του μέγιστου βέλους κάμψης. Αντί αυτού δηλώνεται ότι τα όρια πρέπει να εφαρμόζονται στην βάση άλλων εφαρμόσιμων προτύπων ή κανονισμών. Η ποικιλία όμως των ορίων σε διάφορα έγγραφα είναι σημαντική. Συνηθίζεται πάντως να χρησιμοποιείται για κοινά γυαλιά ως μέγιστο βέλος κάμψης σε κατάσταση λειτουργικότητας η τιμή $\delta_{\max} = a/125$ όπου a η μικρότερη πλευρά του υπό διαστασιολόγηση κομματιού.

Διαφορά θερμοκρασίας

Σύντομη αναφορά γίνεται στη φόρτιση από διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών του γυαλιού. Διαφορές της τάξης των 10°C έχουν παρατηρηθεί σε κανονικού τύπου υαλοπίνακες (δηλ χωρίς επένδυση). Κάποιες επενδύσεις μπορεί να δημιουργούν και μεγαλύτερες διαφορές. Η εξίσωση που δίνει την ακραία τάση είναι $\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$.

Εάν στην εξίσωση αυτή αντικατασταθούν οι μεταβλητές με τις σταθερές του γυαλιού ($E=70000\text{Mpa}$, $\alpha=9.0 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$) θα έχουμε

$$\frac{\sigma_T}{\Delta T} = 0.63 \cdot \frac{\text{Mpa}}{^\circ\text{C}}$$

Σε επιλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία έχει βρεθεί ο τύπος αυτός αρκετά ακριβής, υπερεκτιμώντας μάλιστα ελαφρά την σ_T . Για την θερμοκρασία πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο $k_{mod}=0.36$

Συνδυασμένες φορτίσεις

Αν με βάσει τα ανωτέρω κάποιος προσπαθούσε να υπολογίσει ένα στοιχείο από γυαλί και ο συνδυασμός φόρτισης αποτελείτο από διαφορετικής διάρκειας φορτία τότε θα ανακάλυπτε ότι δεν υπάρχει τρόπος σύγκρισης αφού η οριακή τάση σχεδιασμού δεν είναι ίδια. Προτείνεται εδώ να γίνει η χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\sum_i \left[\frac{\sigma_{ef,i}}{\sigma_{g,d,i}} \right] \leq 1, \text{ στη θέση του } \sigma_{efx} \text{ μπορεί να είναι βεβαίως το } \sigma_{max}.$$

Αν οι τάσεις αυτές έχουν υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικότητα τότε κανονικά δεν μπορούν να αθροιστούν. Όμως η άθροιση αυτή θα βρίσκεται προς την πλευρά της ασφαλείας. Το τελευταίο αποδεικνύεται από το ότι οι χωριστά υπολογιζόμενες τάσεις λαμβάνουν μικρότερη (αθροιστικά) επιρροή από την γεωμετρική μη γραμμικότητα της οποίας όμως η επιρροή είναι ευνοϊκή (ίδη διαγράμματα υπολογισμού συντελεστών k) στα αποτελέσματα.

ΣΥΝΘΕΤΟ ΓΥΑΛΙ

Σε κρίσιμες θέσεις, η τοποθέτηση υαλοπινάκων μπορεί να θέτει θέματα ασφαλείας προσώπων. Αν π.χ. κατασκευαστεί η κάλυψη ενός υπόστεγου από υαλοπίνακες τότε τίθεται θέμα τι θα γινόταν αν αυτοί έσπαγαν από λόγους που δεν σχετίζονται από την φόρτιση τους. Τέτοιοι λόγοι θα μπορούσαν να είναι η κρούση με ένα αντικείμενο που έπεσε από ψηλά ή τυχαία αστοχία από προσμίξεις θειούχου νικελίου κα. Η τοποθέτηση γυαλιού tempered δεν διορθώνει πλήρως το πρόβλημα διότι αν και το γυαλί τελικά θρυμματίζεται σε μικρά τμήματα υπάρχει η πιθανότητα πτώσης από ύψος ενός ολόκληρου τμήματος του από χαλαρά συγκρατούμενα τέτοια τμήματα πάνω σε ανθρώπους, θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητά τους.

Σε τέτοιες περιπτώσεις συνίσταται η τοποθέτηση σύνθετου υαλοπίνακα στον υπολογισμό του οποίου θα ληφθεί υπόψη ότι ο ένας υαλοπίνακας έχει θραυστεί και φέρεται από το υπόλοιπο τμήμα. Τα φορτία με βάσει τα οποία βεβαίως θα υπολογιστεί το σύστημα θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη της επικινδυνότητας μία τέτοιας περίπτωσης. Έτσι αυτά μπορεί να μεταβάλλονται από το ίδιο φορτίο φορτίων των υαλοπινάκων (ακραία περίπτωση) έως το πλήρες φορτίο σχεδιασμού του συστήματος (ίσως επίσης ακραία περίπτωση).

Εκείνο που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι η διατμητική συνεργασία μέσω της στρώσης συγκόλλησης (πχ PVB) δεν είναι πλήρης λόγω της επιρροής του μέτρου διατμήσεως του συνδετικού αυτού υλικού από την θερμοκρασία, τον ερπυσμό και την γήρανση από την υπεριώδη ακτινοβολία. Είναι βέβαιο ότι τα μόνιμα φορτία ή αυτά με μεγάλη διάρκεια, θα πρέπει να κατανέμονται στα φύλλα ανάλογα με την ακαμψία τους (το πάχος τους στον κύβο). Θα πρέπει ακόμη να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα εμφάνισης φορτίων σε ακραίες (υψηλές) θερμοκρασίες. Ίσως όμως η θεώρηση απουσίας διατμητικής συνεργασίας σε στιγμιαία ή ατυχηματικά φορτία να είναι υπερβολή και να πρέπει ένα τμήμα του φορτίου να παραληφθεί από το σύνολο του πάχους (σαν να επρόκειτο για ενιαίο υλικό). Για παράδειγμα το Καναδέζικο πρότυπο

(CAN/CGS 12.20-M89, Structural design of glass for buildings) επιβάλλει τη θεώρηση του σύνθετου γυαλιού ως το αντίστοιχο με πλήρες πάχος μόνο για την φόρτιση ανέμου κάτω από την θερμοκρασία των 70F (21⁰C).

Ως σύνθετο γυαλί δεν θεωρούνται οι θερμομονωτικοί υαλοπίνακες (διπλά τζάμια) οι οποίοι, λόγω του αεροστεγούς διακένου που διαθέτουν έχουν ειδικό τρόπο αντιμετώπισης. Αναφέρονται επιγραμματικά, η μεταβολή της εξωτερικής πίεσης του αέρα (από μετεωρολογικούς λόγους ή από διαφορά υψομέτρου) σε σχέση με αυτή που υπήρχε όταν σφραγίστηκε, η μεταβολή της θερμοκρασίας, η μεταφορά φορτίων από τον ένα υαλοπίνακα στον άλλο μέσω του αέρα του διακένου κα.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Το παρόν κείμενο έχει στηριχθεί κατά μεγάλο τμήμα του στην αναφορά [3] ενώ έγινε και εκτεταμένη χρήση της [2]. Σημαντική βοήθεια στην παροχή των συγγραμμάτων βρήκα από τον πατέρα μου, και συνάδερφο, Δημήτρη Τόλη.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] University of Florence: Department of civil engineering Anna Bati, Maurizio Orlando, Ostilio Spadaccini, Paolo Spinelli «Use of Laminated Safety Glass plates under compression: application to the design of an arch pedestrian bridge» International Symposium on the Application of Architectural Glass (ISAAG) Munich, Germany 2006
- [2] Philip Wilson, Gennady Vasilchenko-Malishev, «The design and construction of all glass structures», International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Paris 2006.
- [3] Aki Vuolio, «Structural behaviour of glass structures in facades», Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 27, Espoo, October 2003
- [4] Leonardo Lani, «Progetto di elementi in vetro strutturale secondo la norma EN 13474-3 (CEN/TC129/WG8)», Dipartimento Ingegneria Strutturale, Facoltà Ingegneria, Università di PISA.
- [5] Matthias Haldimann, «Fracture strength of structural glass elements – analytical and numerical modelling, testing and design», THÈSE NO 3671 (2006), ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 13 décembre 2006
- [6] M. Overent, S. Gaetano, M. Haldimann, «Diagnostic interpretation of glass failure», Structural Engineering International 2/2007
- [7] Wikipedia Wikipedia – The Free Encyclopedia 2008. URL <http://en.wikipedia.org/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακες υπολογισμού αντοχής σχεδιασμού κατά το prEN 13474-1(1999) για φορτίσεις βραχείας διάρκειας [3].

Επιλέγονται οι διαστάσεις a (στήλες) > b (γραμμές) και στην τομή τους διαβάζεται η τάση σχεδιασμού.

	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000		
500	20,3	19,7	19,4	19,2	19,0																										500	
600	20,1	19,6	19,3	19,1	18,9	18,8																										600
700	20,0	19,5	19,2	18,9	18,8	18,6	18,5																									700
800	19,9	19,4	19,1	18,8	18,7	18,5	18,4	18,3																								800
900	19,8	19,3	19,0	18,8	18,6	18,4	18,3	18,2	18,2																							900
1000	19,7	19,2	18,9	18,7	18,5	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0																						1000
1100	19,7	19,1	18,8	18,6	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	17,9	17,9																					1100
1200	19,6	19,1	18,8	18,5	18,4	18,2	18,1	18,0	17,9	17,9	17,8	17,7																				1200
1300	19,5	19,0	18,7	18,5	18,3	18,2	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,7	17,6																			1300
1400	19,5	18,9	18,6	18,4	18,3	18,1	18,0	17,9	17,8	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5																		1400
1500	19,4	18,9	18,6	18,4	18,2	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,5	17,4																	1500
1600	19,4	18,8	18,5	18,3	18,2	18,0	17,9	17,8	17,7	17,7	17,6	17,5	17,5	17,4	17,4	17,3																1600
1700	19,3	18,8	18,5	18,3	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2															1700
1800	19,3	18,8	18,4	18,2	18,1	17,9	17,8	17,7	17,7	17,6	17,5	17,5	17,4	17,3	17,3	17,3	17,2	17,2														1800
1900	19,2	18,7	18,4	18,2	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,5	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,1												1900
2000	19,2	18,7	18,4	18,2	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,2	17,1	17,1	17,1	17,0											2000
2100	19,2	18,6	18,3	18,1	18,0	17,8	17,7	17,6	17,5	17,5	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	17,0										2100
2200	19,1	18,6	18,3	18,1	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9										2200
2300	19,1	18,6	18,3	18,1	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8									2300
2400	19,1	18,5	18,2	18,0	17,9	17,7	17,6	17,5	17,5	17,4	17,3	17,3	17,2	17,1	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8								2400
2500	19,0	18,5	18,2	18,0	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,7						2500
2600	19,0	18,5	18,2	18,0	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	2600
2700	19,0	18,4	18,2	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	2700
2800	18,9	18,4	18,1	17,9	17,8	17,6	17,5	17,4	17,3	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	2800
2900	18,9	18,4	18,1	17,9	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	2900
3000	18,9	18,4	18,1	17,9	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	3000
3100	18,9	18,3	18,1	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	3100
3200	18,8	18,3	18,0	17,8	17,7	17,5	17,4	17,3	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	3200
3300	18,8	18,3	18,0	17,8	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	3300
3400	18,8	18,3	18,0	17,8	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	3400
3500	18,8	18,3	18,0	17,8	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	3500
3600	18,8	18,2	17,9	17,7	17,6	17,5	17,3	17,3	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	3600
3700	18,7	18,2	17,9	17,7	17,6	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	3700
3800	18,7	18,2	17,9	17,7	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	3800
3900	18,7	18,2	17,9	17,7	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	3900
4000	18,7	18,2	17,9	17,7	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,3	4000
4100	18,7	18,1	17,9	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,3	16,3	4100
4200	18,6	18,1	17,8	17,6	17,5	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	4200
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000		

Πίνακας Α-1: Κοινό γυαλί φόρτιση βραχείας διάρκειας ($k_{mod}=0.72$)

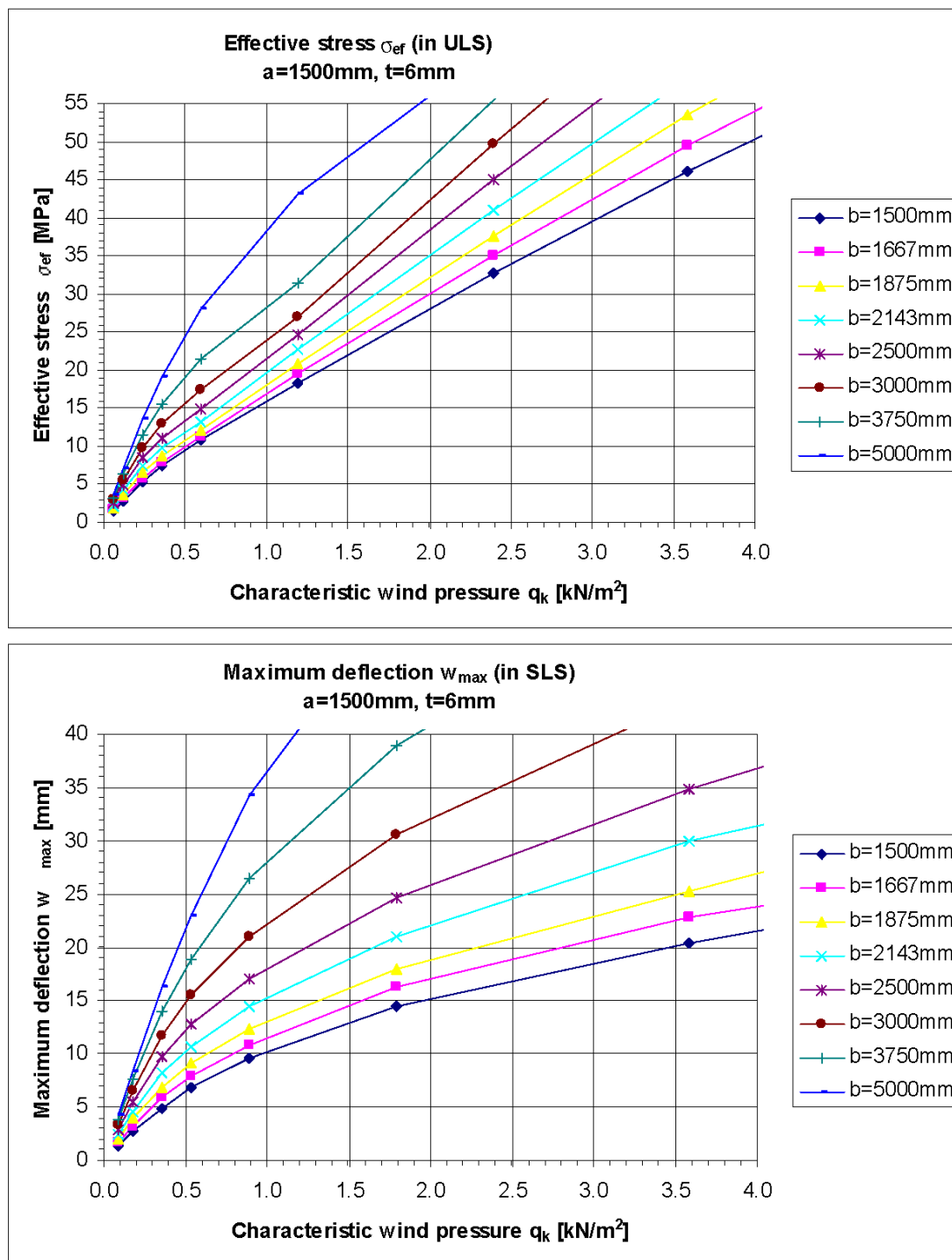
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000		
500	31,2	30,6	30,3	30,1	29,9																											500
600	31,0	30,5	30,1	29,9	29,8	29,6																										600
700	30,9	30,3	30,0	29,8	29,6	29,5	29,4																									700
800	30,8	30,2	29,9	29,7	29,5	29,4	29,3	29,2																								800
900	30,7	30,1	29,8	29,6	29,5	29,3	29,2	29,1	29,0																							900
1000	30,6	30,1	29,8	29,5	29,4	29,2	29,1	29,0	28,9	28,9																						1000
1100	30,5	30,0	29,7	29,5	29,3	29,2	29,1	29,0	28,9	28,8	28,7																					1100
1200	30,5	29,9	29,6	29,4	29,2	29,1	29,0	28,9	28,8	28,7	28,7	28,6																				1200
1300	30,4	29,9	29,6	29,3	29,2	29,0	28,9	28,8	28,8	28,7	28,6	28,6	28,5																			1300
1400	30,3	29,8	29,5	29,3	29,1	29,0	28,9	28,8	28,7	28,6	28,6	28,5	28,4	28,4																		1400
1500	30,3	29,8	29,5	29,2	29,1	28,9	28,8	28,7	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3	28,3																	1500
1600	30,2	29,7	29,4	29,2	29,0	28,9	28,8	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3	28,3	28,3	28,2																1600
1700	30,2	29,7	29,4	29,1	29,0	28,9	28,7	28,6	28,6	28,5	28,4	28,3	28,3	28,2	28,2	28,1																1700
1800	30,1	29,6	29,3	29,1	28,9	28,8	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3	28,3	28,2	28,2	28,1	28,1	28,1	28,0													1800
1900	30,1	29,6	29,3	29,1	28,9	28,8	28,7	28,6	28,5	28,4	28,3	28,3	28,2	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	28,0	28,0												1900
2000	30,1	29,5	29,2	29,0	28,9	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3	28,3	28,2	28,1	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,9											2000
2100	30,0	29,5	29,2	29,0	28,8	28,7	28,6	28,5	28,4	28,3	28,3	28,2	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,9	27,8	27,8										2100
2200	30,0	29,5	29,2	29,0	28,8	28,7	28,6	28,5	28,4	28,3	28,2	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,9	27,9	27,8	27,8	27,8									2200
2300	30,0	29,4	29,1	28,9	28,8	28,6	28,5	28,4	28,4	28,3	28,2	28,2	28,1	28,0	28,0	28,0	27,9	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7									2300
2400	29,9	29,4	29,1	28,9	28,7	28,6	28,5	28,4	28,3	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7							2400
2500	29,9	29,4	29,1	28,9	28,7	28,6	28,5	28,4	28,3	28,2	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6						2500
2600	29,9	29,3	29,0	28,8	28,7	28,6	28,4	28,3	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5						2600
2700	29,8	29,3	29,0	28,8	28,7	28,5	28,4	28,3	28,2	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5					2700
2800	29,8	29,3	29,0	28,8	28,6	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4					2800
2900	29,8	29,3	29,0	28,8	28,6	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4				2900
3000	29,8	29,2	28,9	28,7	28,6	28,5	28,3	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,4				3000
3100	29,7	29,2	28,9	28,7	28,6	28,4	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,4	27,3				3100
3200	29,7	29,2	28,9	28,7	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3				3200
3300	29,7	29,2	28,9	28,7	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3				3300
3400	29,7	29,1	28,9	28,6	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3				3400
3500	29,6	29,1	28,8	28,6	28,5	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,3			3500
3600	29,6	29,1	28,8	28,6	28,5	28,3	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2				3600
3700	29,6	29,1	28,8	28,6	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2	27,2			3700
3800	29,6	29,1	28,8	28,6	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2	27,2			3800
3900	29,6	29,0	28,8	28,6	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2	27,2				3900
4000	29,5	29,0	28,7	28,5	28,4	28,3	28,1	28,1	28,0	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2	27,2	27,2			4000
4100	29,5	29,0	28,7	28,5	28,4	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2	27,2	27,2			4100
4200	29,5	29,0	28,7	28,5	28,3	28,2	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,7	27,7	27,6	27,6	27,5	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3	27,3	27,2	27,2	27,2	27,1				4200
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000		

	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000		
500	52,9	52,3	52,0	51,8	51,6																										500	
600	52,8	52,2	51,9	51,7	51,5	51,4																										600
700	52,6	52,1	51,8	51,5	51,4	51,2	51,1																									700
800	52,5	52,0	51,7	51,4	51,3	51,1	51,0	50,9																								800
900	52,4	51,9	51,6	51,4	51,2	51,1	50,9	50,8	50,8																							900
1000	52,3	51,8	51,5	51,3	51,1	51,0	50,9	50,8	50,7	50,6																						1000
1100	52,3	51,7	51,4	51,2	51,0	50,9	50,8	50,7	50,6	50,5	50,5																					1100
1200	52,2	51,7	51,4	51,1	51,0	50,8	50,7	50,6	50,6	50,5	50,4	50,3																				1200
1300	52,1	51,6	51,3	51,1	50,9	50,8	50,7	50,6	50,5	50,4	50,4	50,3	50,2																			1300
1400	52,1	51,5	51,2	51,0	50,9	50,7	50,6	50,5	50,4	50,4	50,3	50,2	50,2	50,1																		1400
1500	52,0	51,5	51,2	51,0	50,8	50,7	50,6	50,5	50,4	50,3	50,3	50,2	50,1	50,1	50,0																	1500
1600	52,0	51,4	51,1	50,9	50,8	50,6	50,5	50,4	50,3	50,3	50,2	50,1	50,1	50,0	50,0	49,9																1600
1700	51,9	51,4	51,1	50,9	50,7	50,6	50,5	50,4	50,3	50,2	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,9	49,9															1700
1800	51,9	51,4	51,1	50,8	50,7	50,6	50,4	50,3	50,3	50,2	50,1	50,1	50,0	50,0	49,9	49,9	49,8	49,8														1800
1900	51,8	51,3	51,0	50,8	50,6	50,5	50,4	50,3	50,2	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7													1900
2000	51,8	51,3	51,0	50,8	50,6	50,5	50,4	50,3	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,7	49,6												2000
2100	51,8	51,2	50,9	50,7	50,6	50,4	50,3	50,2	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,8	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6											2100
2200	51,7	51,2	50,9	50,7	50,5	50,4	50,3	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6	49,5	49,5										2200
2300	51,7	51,2	50,9	50,7	50,5	50,4	50,3	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4									2300
2400	51,7	51,1	50,8	50,6	50,5	50,3	50,2	50,1	50,1	50,0	49,9	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4							2400
2500	51,6	51,1	50,8	50,6	50,4	50,3	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3							2500
2600	51,6	51,1	50,8	50,6	50,4	50,3	50,2	50,1	50,0	49,9	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3				2600
2700	51,6	51,1	50,8	50,6	50,4	50,3	50,2	50,1	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,2				2700
2800	51,5	51,0	50,7	50,5	50,4	50,2	50,1	50,0	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2		2800
2900	51,5	51,0	50,7	50,5	50,3	50,2	50,1	50,0	49,9	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2	49,1	2900
3000	51,5	51,0	50,7	50,5	50,3	50,2	50,1	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	3000
3100	51,5	51,0	50,7	50,5	50,3	50,2	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	3100
3200	51,4	50,9	50,6	50,4	50,3	50,1	50,0	49,9	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	3200
3300	51,4	50,9	50,6	50,4	50,3	50,1	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	3300
3400	51,4	50,9	50,6	50,4	50,2	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	3400
3500	51,4	50,9	50,6	50,4	50,2	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	3500
3600	51,4	50,8	50,6	50,3	50,2	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	3600
3700	51,3	50,8	50,5	50,3	50,2	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	3700
3800	51,3	50,8	50,5	50,3	50,2	50,0	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	48,9	3800
3900	51,3	50,8	50,5	50,3	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,7	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	48,9	48,9	3900
4000	51,3	50,8	50,5	50,3	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	48,9	48,9	48,9	4000
4100	51,3	50,8	50,5	50,3	50,1	50,0	49,9	49,8	49,7	49,6	49,6	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	48,9	48,9	48,9	4100
4200	51,2	50,7	50,4	50,2	50,1	50,0	49,8	49,8	49,7	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,3	49,2	49,2	49,2	49,1	49,1	49,1	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	48,9	48,9	48,9	48,9	4200
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000		

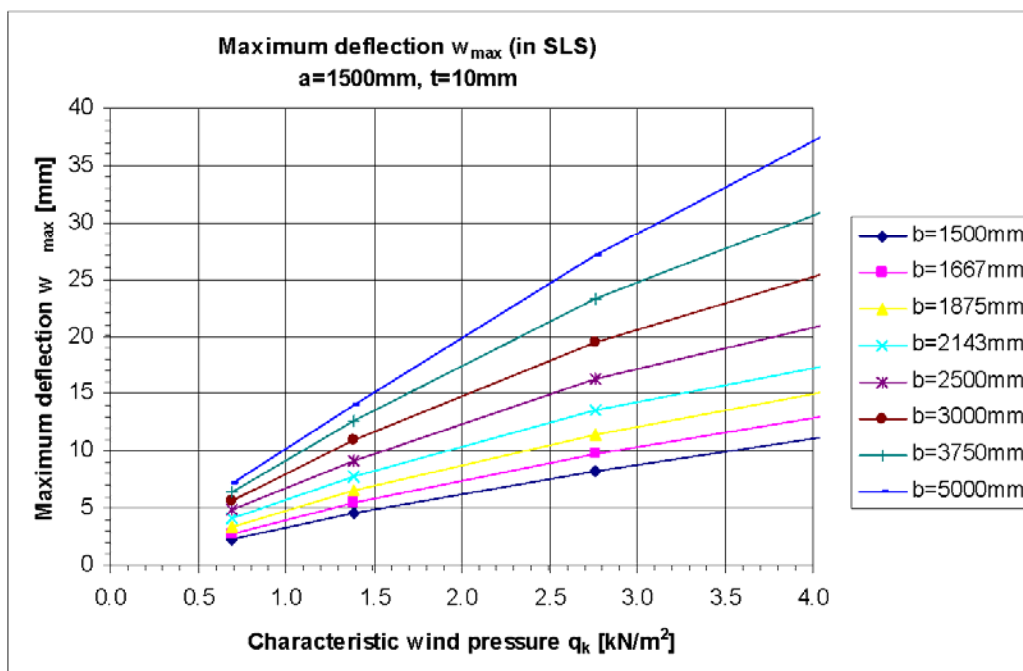
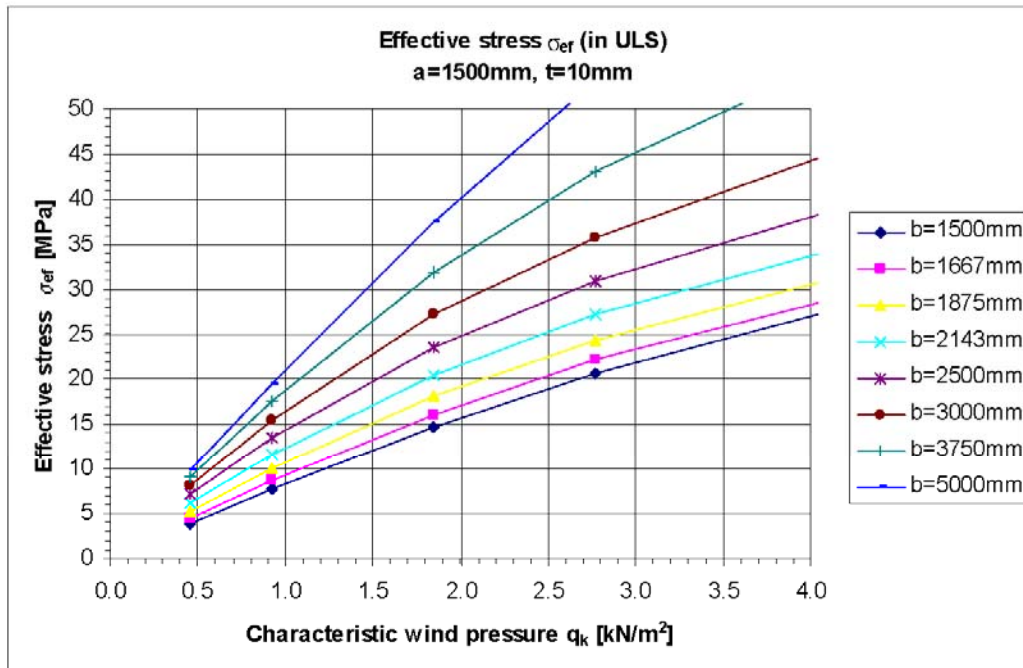
Πίνακας Α-3: Γυαλί toughened, φόρτιση βραχείας διάρκειας ($k_{mod}=0.72$)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

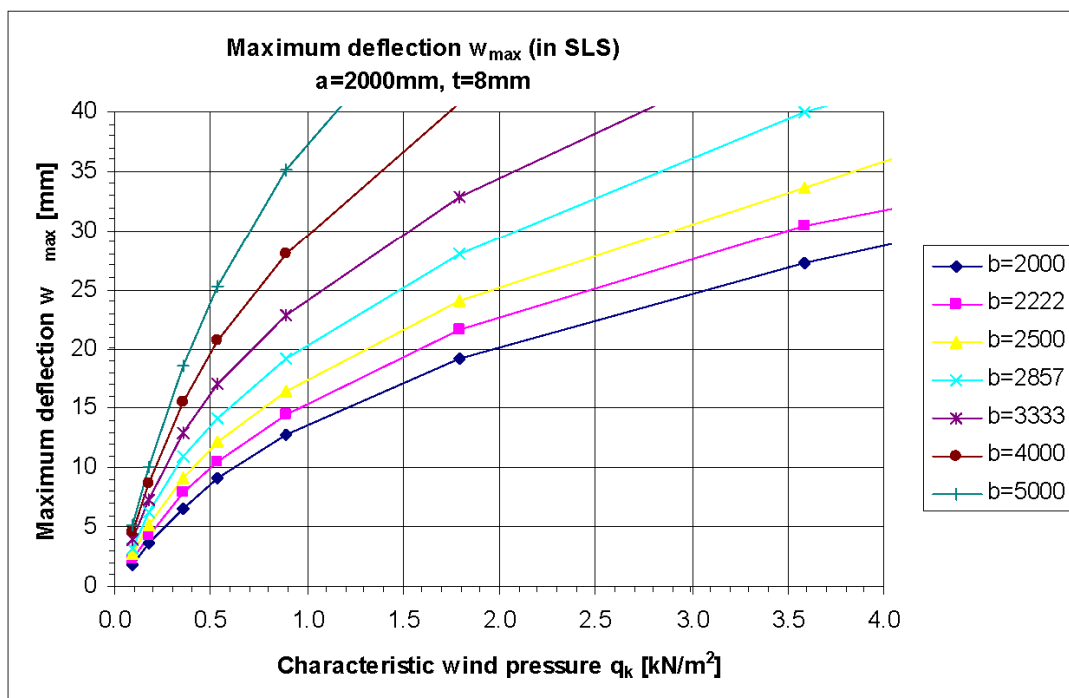
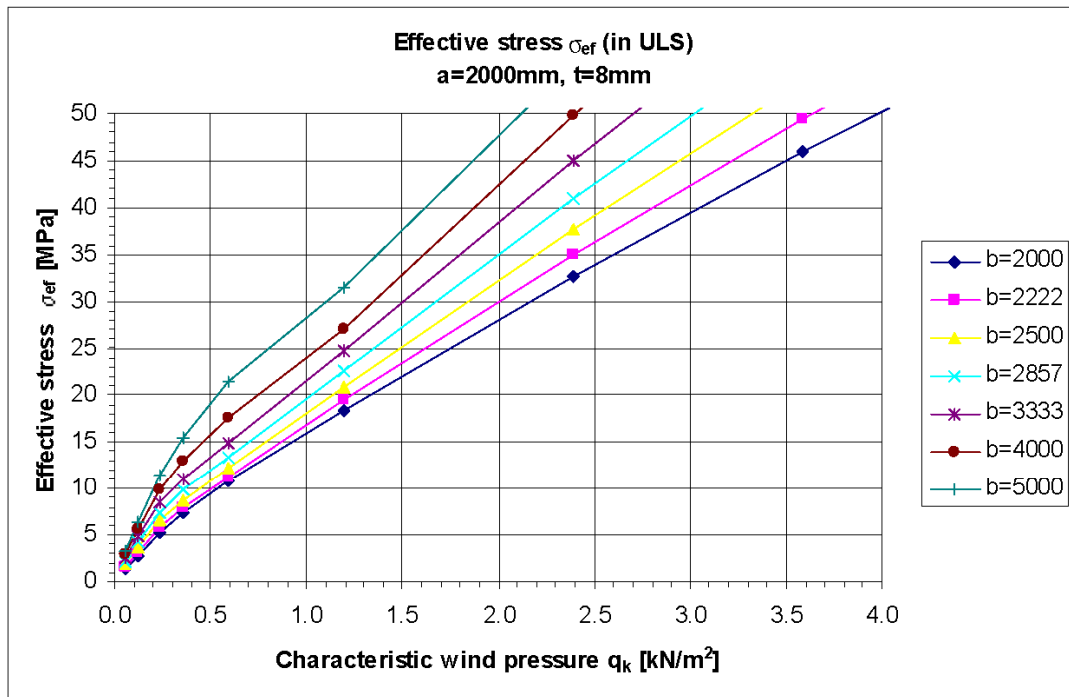
Διαγράμματα προεκτίμησης υαλοπινάκων σύμφωνα με το prEN 13474-2(2000) [3].



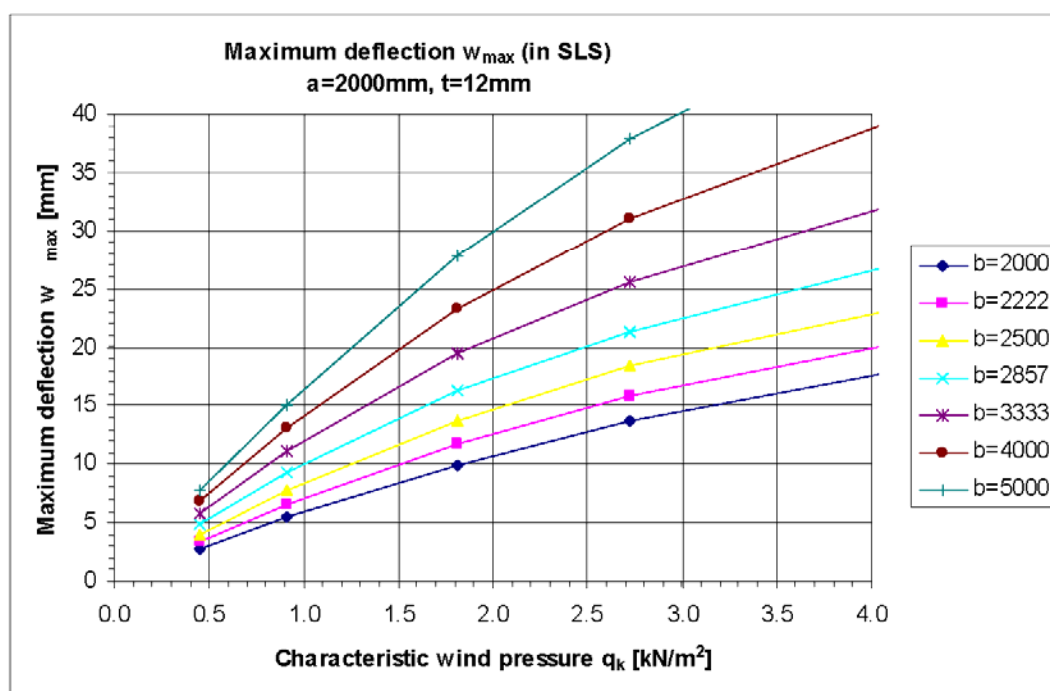
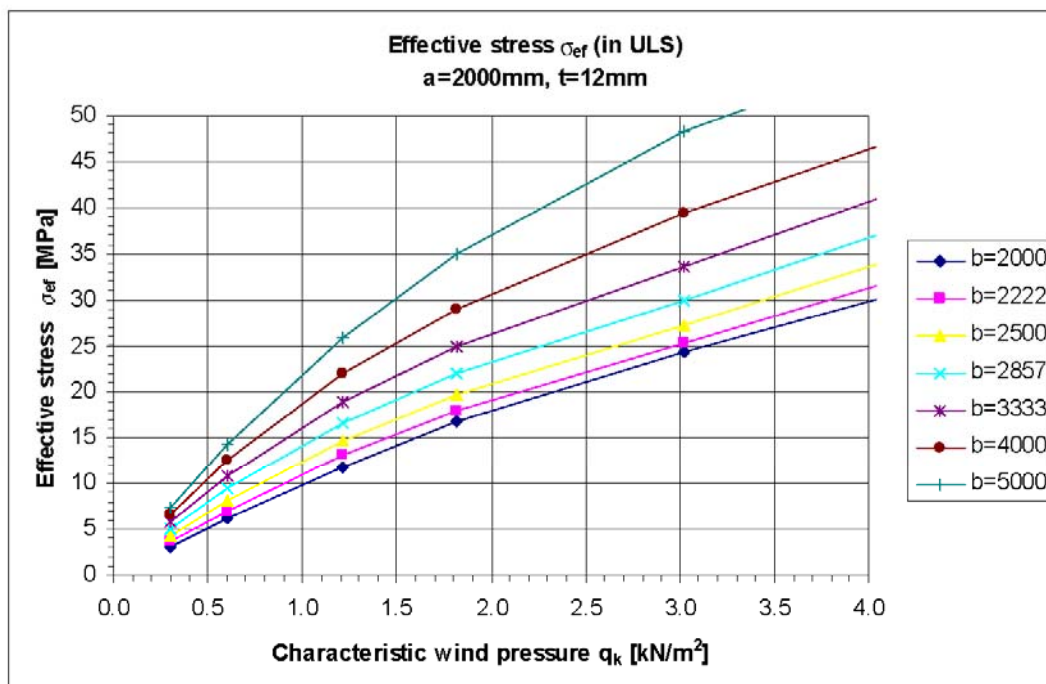
Διάγραμμα Β-1: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=1500\text{mm}$ και πάχους $t=6\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS.



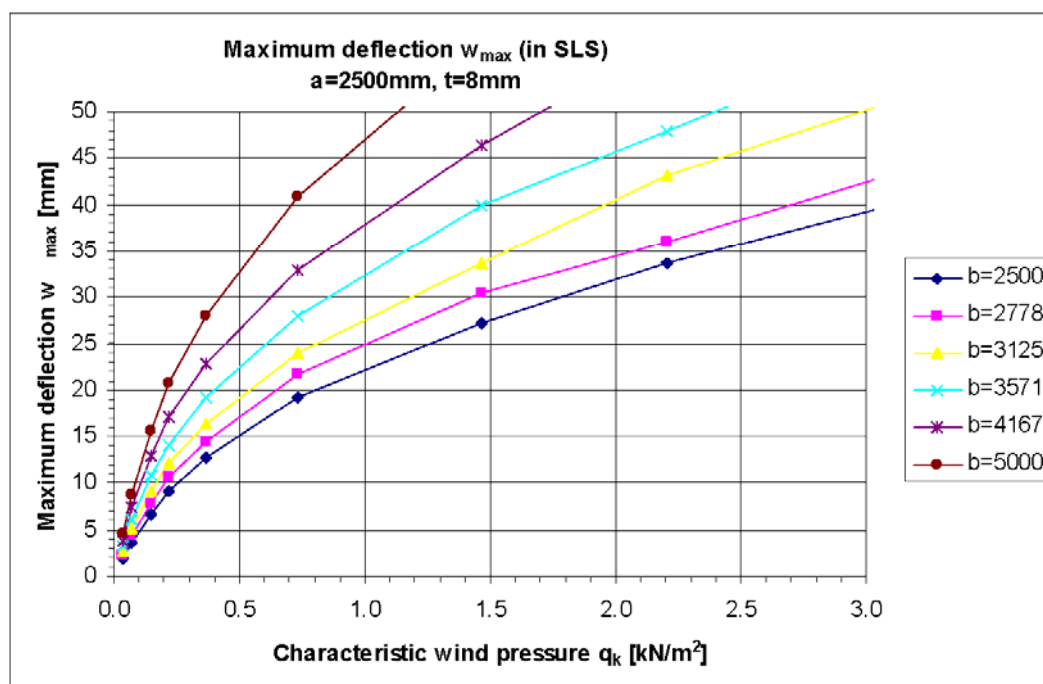
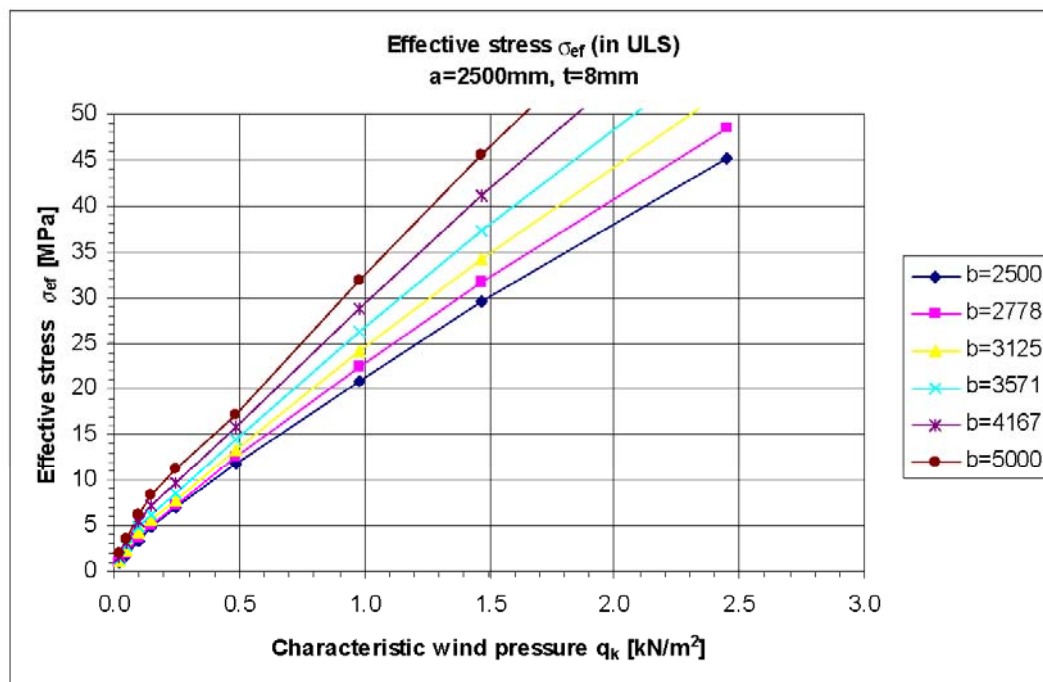
Διάγραμμα Β-2: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=1500\text{mm}$ και πάχους $t=10\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



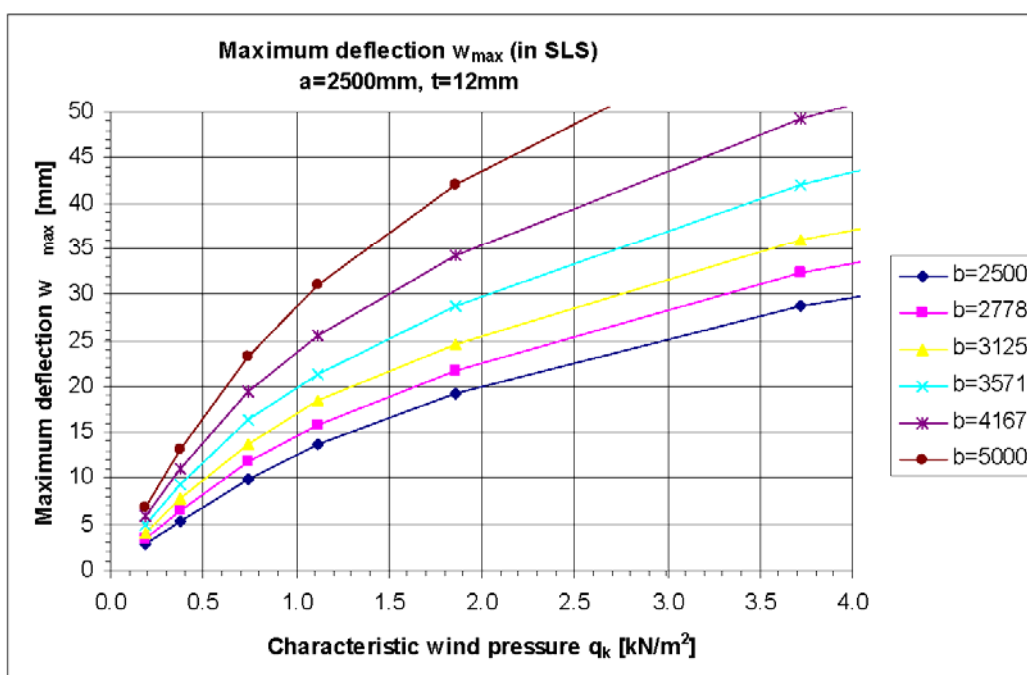
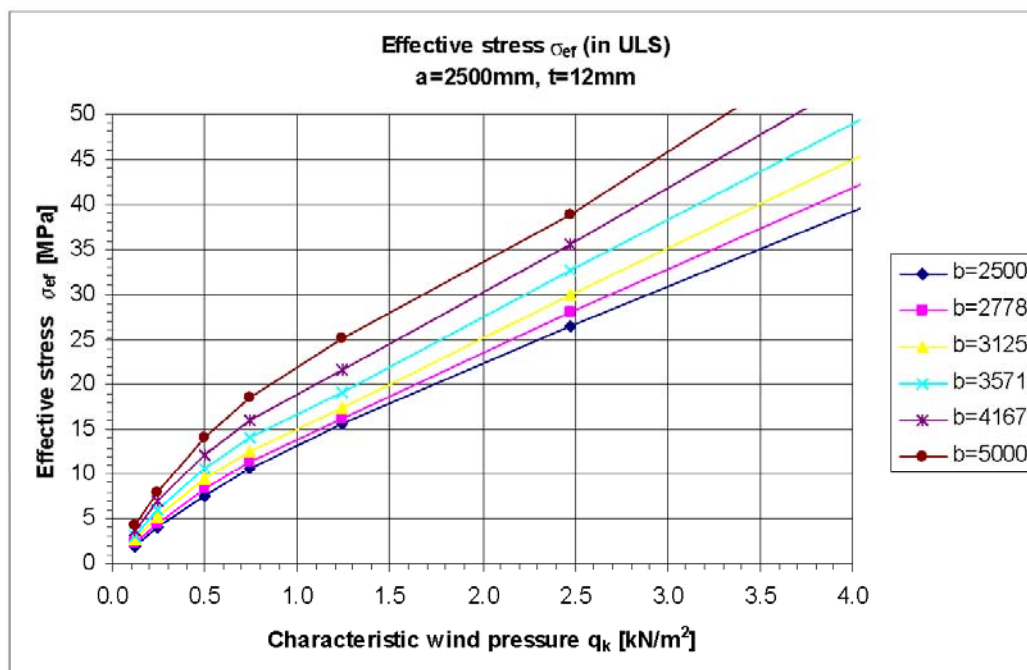
Διάγραμμα B-3: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=2000\text{mm}$ και πάχους $t=8\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



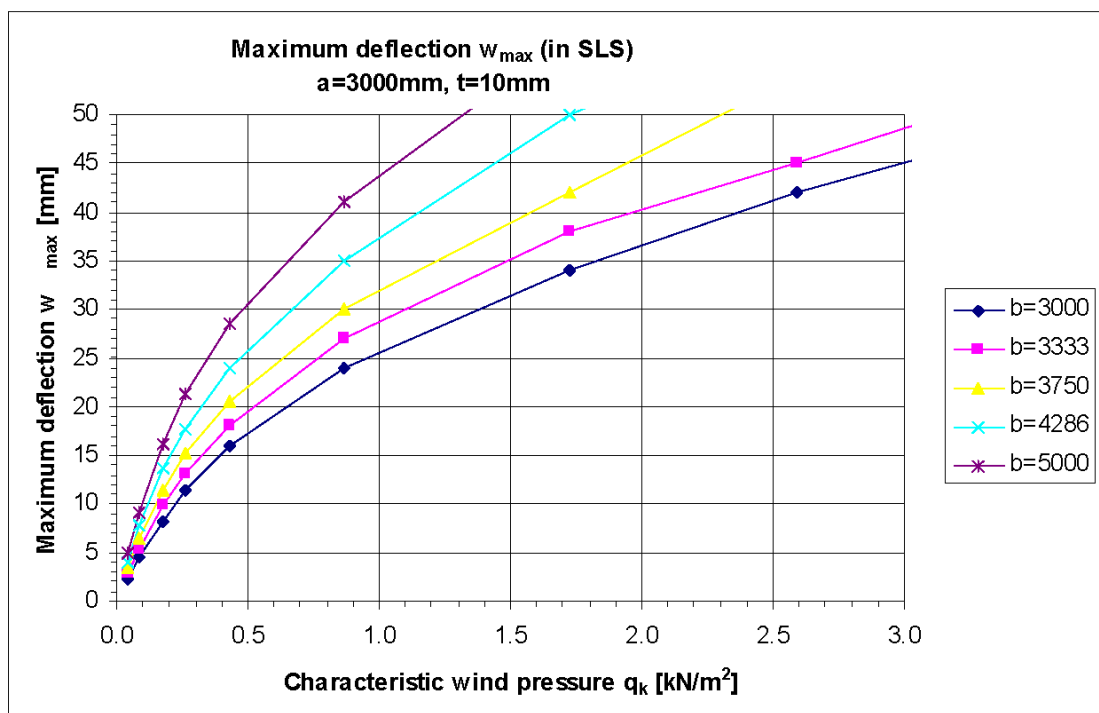
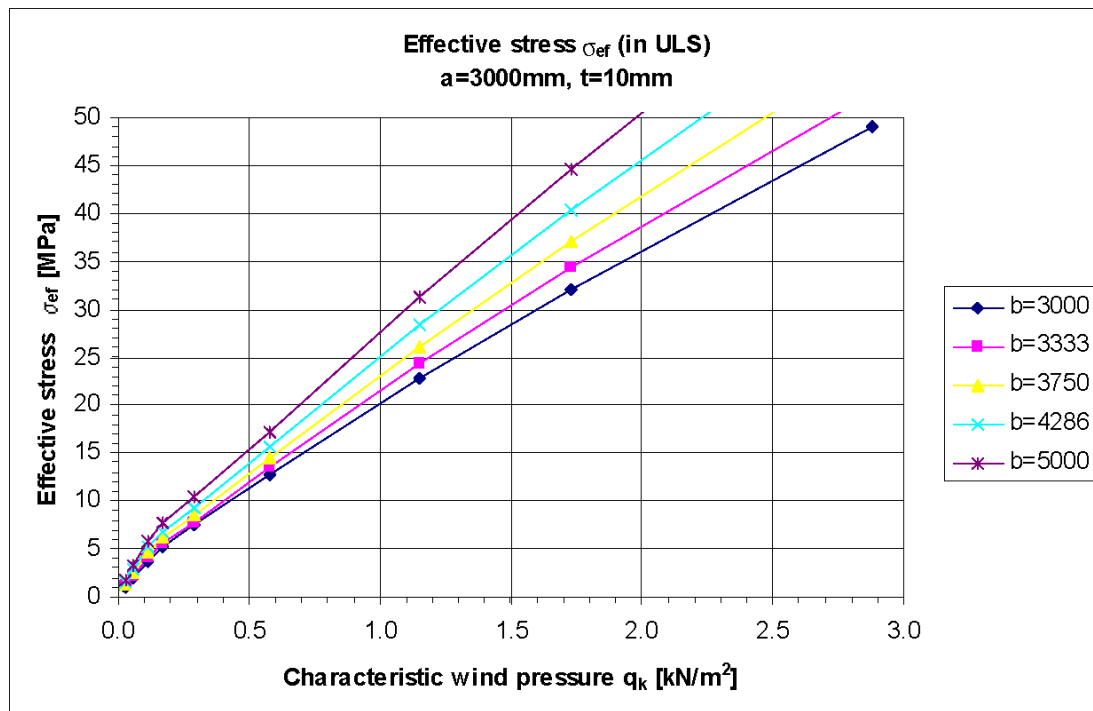
Διάγραμμα Β-4: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=2000\text{mm}$ και πάχους $t=12\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



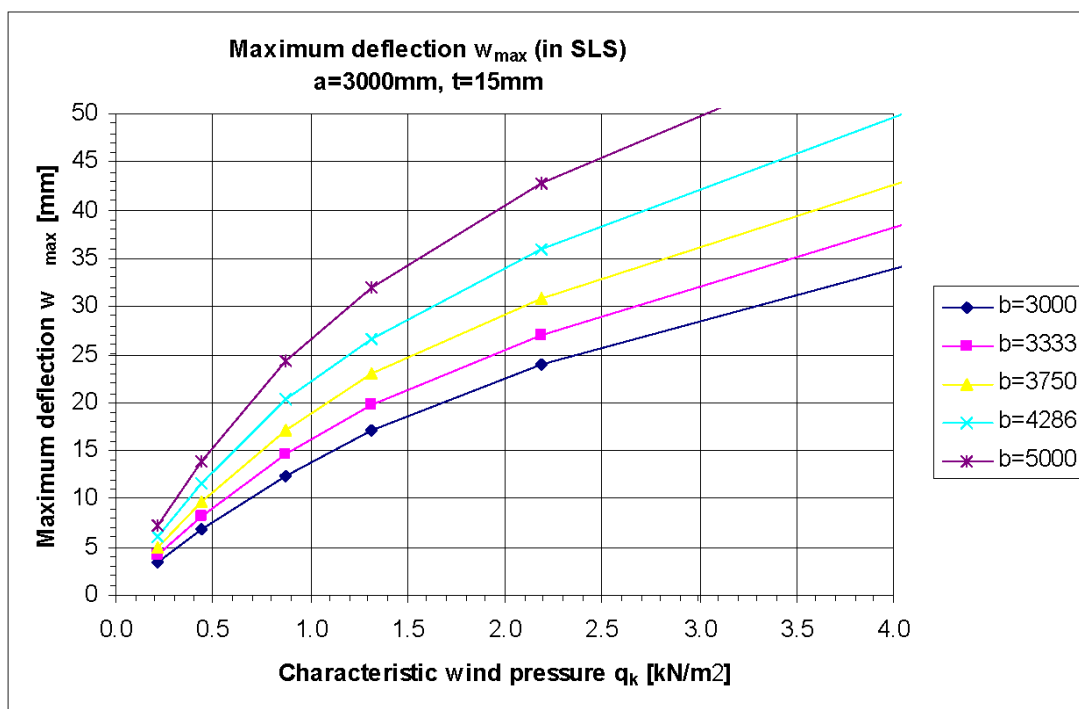
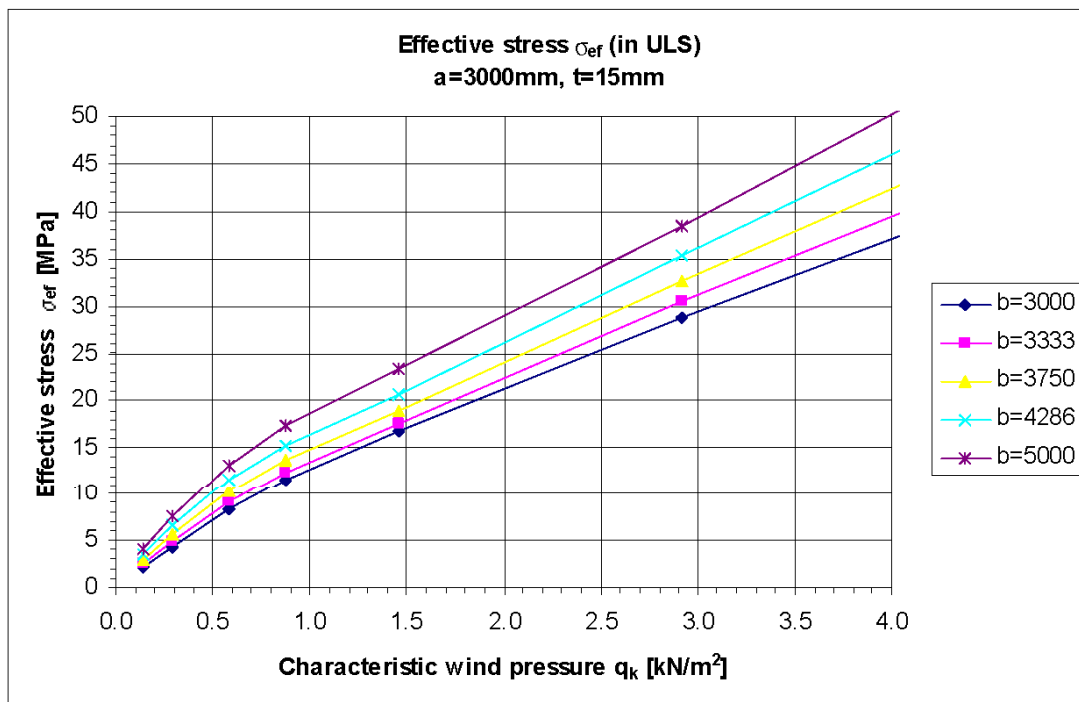
Διάγραμμα B-5: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=2500\text{mm}$ και πάχους $t=8\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



Διάγραμμα Β-6: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=2500\text{mm}$ και πάχους $t=12\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



Διάγραμμα Β-7: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=3000\text{mm}$ και πάχους $t=10\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



Διάγραμμα Β-8: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς $a=3000\text{mm}$ και πάχους $t=15\text{mm}$, περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση b και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης q_k . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS