



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

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

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



Μεταπτυχιακή Εργασία
Σοφία Κορλού

ΕΜΚ ΔΕ 2017/11

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Copyright © Σοφία Κορλού, 2017
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

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

Copyright © Sofia Korlou, 2017
All Rights Reserved

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

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

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

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

*Στους γονείς μου,
Άσπα και Κώστα*

Ευχαριστίες

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

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

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

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

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

Σοφία Κορλού,
Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2017/11

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

Σοφία Κορλού

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Οκτώβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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

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

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



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

MASTER THESIS
EMK ΔΕ 2017/11

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

Sofia Korlou

Supervisor: Professor Charis Gantes
October 2017

ABSTRACT

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

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

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

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