

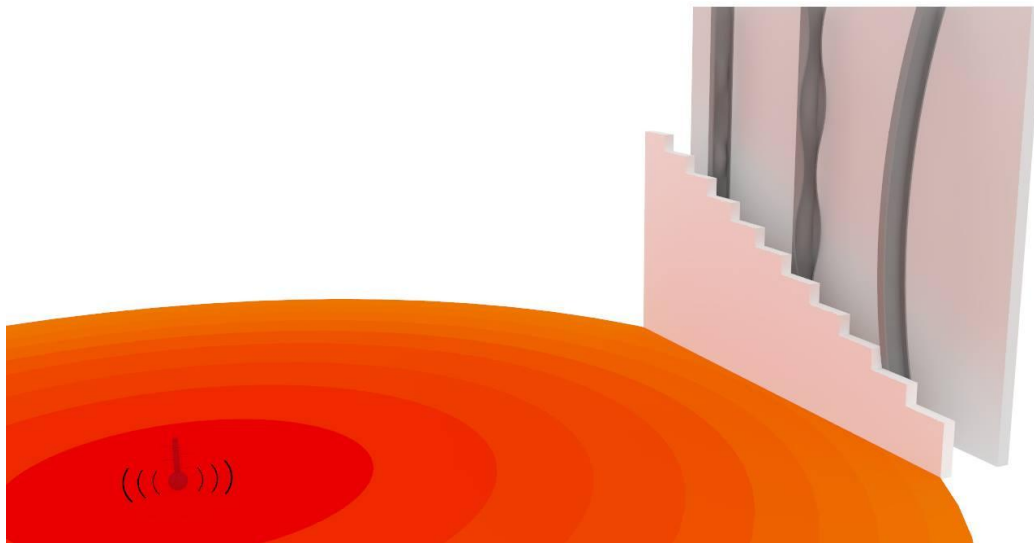


NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Civil Engineering

Institute of Steel Structures

## **Structural Behavior of Light Gauge Cold-Formed Steel Frame Walls under Fire Conditions**



Postgraduate Thesis  
Iason Vardakoulias

ISS PT 2015/07

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

Athens, October 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΜΕ 2015/07

## Συμπεριφορά λεπτότοιχων μεταλλικών φερόντων στοιχείων ψυχρής ελάσεως σε συνθήκες πυρκαγιάς

Ιάσων Βαρδακούλιας

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά τη συμπεριφορά των σύγχρονων συστημάτων ξηράς δόμησης σε συνθήκες πυρκαγιάς. Τα συστήματα ξηράς δόμησης αποτελούνται συνήθως από φέροντα μεταλλικά στοιχεία ψυχρής έλασης, εξωτερική επένδυση από γυψοσανίδες ή τσιμεντοσανίδες και ενδιάμεση θερμική μόνωση από πετροβάμβακα, υαλοβάμβακα ή άλλα θερμομονωτικά υλικά. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων έναντι των συμβατικών μεθόδων δόμησης είναι η μεγάλη ευελιξία τους στο σχεδιασμό, η ενεργειακή αποδοτικότητα τους καθώς και η μεγάλη ταχύτητα και το μικρότερο κόστος κατασκευής. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τέσσερις παραλλαγές τέτοιων συστημάτων με μονή ή διπλή γυψοσανίδα, με ή χωρίς θερμική μόνωση. Χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ποιότητας S320GD+Z και μέλη διατομής C με χείλη και δύο διαμήκεις νευρώσεις στον κορμό. Αερόκαρφα συνδέουν τις γυψοσανίδες με τα μεταλλικά στοιχεία, τα οποία εξασφαλίζουν παράλληλα το λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής των στύλων. Η τυποποιημένη καμπύλη πυρκαγιάς που προβλέπεται στο πρότυπο ISO 834 επιβάλλεται στη μια όψη του τοίχου, προκειμένου να προσομοιωθούν κατάλληλα οι συνθήκες πυρκαγιάς, προκαλώντας έτσι ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της διατομής.

Το λογισμικό ANSYS χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής κατανομής σε δισδιάστατο περιβάλλον προσομοιώνοντας ολόκληρο το σύστημα γυψοσανίδα-μόνωση-μεταλλικά στοιχεία. Οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών εκφράζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας τους, βάσει πρόσφατων ερευνητικών αποτελεσμάτων, ενώ για το χάλυβα λήφθηκαν σύμφωνα με τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 3, μέρος 1.2. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA, ώστε να καταστρωθούν οι καμπύλες απομείωσης της φέρουσας ικανότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας ή/και του χρόνου. Το πεδίο του χρόνου χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του δείκτη πυραντίστασης των στοιχείων και αξιοποιείται για παρατηρήσεις σε επίπεδο

σχεδιασμού. Αντιθέτως, από το πεδίο της θερμοκρασίας εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα της στατικής συμπεριφοράς των μελών, τα οποία απορρέουν από τα ποικίλα μεγέθη θερμοκρασίας που δύναται να αξιοποιηθούν, όπως μέγιστη θερμοκρασία, μέση θερμοκρασία κτλ.

Για τον προσδιορισμό των κρίσιμων φορτίων λυγισμού στους ορθοστάτες, πραγματοποιήθηκε γραμμική ανάλυση λυγισμού στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν από αντίστοιχη γραμμική ανάλυση λυγισμού με τη μέθοδο των πεπερασμένων λωρίδων που υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα CUFMS. Τα σχήματα των ιδιομορφών λυγισμού χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές γεωμετρικές ατέλειες, για την εκτέλεση μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού (GMNIA) υπό την επίδραση αξονικού θλιπτικού φορτίου εφαρμοζόμενο στο κέντρο βάρους της αρχικής διατομής, τόσο με έλεγχο μετατόπισης όσο και με έλεγχο δύναμης. Κατά τη διαδικασία επίλυσης έγινε χρήση των αλγορίθμων Newton-Raphson και Arc-Length για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Έπειτα, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις προβλέψεις κανονιστικών μεθόδων, όπως είναι η εναλλακτική μέθοδος "Direct Strength" που προτείνει ο Αμερικάνικος κανονισμός και η μέθοδος "Ενεργού πλάτους", η οποία προτείνεται στον Ευρωκώδικα 3, μέρος 1.3, περί μελών ψυχρής ελάσεως.

Οι αναλύσεις των μεταλλικών ορθοστατών υπό συνθήκες πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκαν τόσο για ομοιόμορφη θερμοκρασία, εντός της διατομής, όσο και για τις κατανομές θερμοκρασίας που προέκυψαν από τις αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας των τεσσάρων συστημάτων τοίχου ξηράς δόμησης. Η θερμοκρασία κατά μήκος του μέλους θεωρήθηκε σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις. Ο προσδιορισμός του ρυθμού απομείωσης της αντοχής έγινε με μη γραμμικές αναλύσεις GMNIA σταθερού αξονικού φορτίου και σταδιακά αυξανόμενης θερμοκρασίας (transient-state) όσο και σταθερής θερμοκρασίας και σταδιακά αυξανόμενου φορτίου (steady-state). Επιπρόσθετα, διαμορφώθηκαν διαγράμματα αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης-ροπής κάμψης υπό τριγωνικό και ομοιόμορφο διάγραμμα ροπής για διάφορες τιμές ομοιόμορφης θερμοκρασίας μέλους.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων επιβεβαιώνονται με αναλυτικούς και ημι-αναλυτικούς υπολογισμούς βάσει της μεθόδου του Ευρωκώδικα 3 και της direct strength αντίστοιχα. Ο Ευρωκώδικας 3 εξετάστηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται στο EN 1993-1-2, όσο και μιας τροποποιημένης μεθόδου που προτείνεται στη διεθνή βιβλιογραφία και βασίζεται στο πρότυπο EN 1993-1-3 χρησιμοποιώντας όμως απομειωμένες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα για κάθε εξεταζόμενη θερμοκρασία. Ομοίως ελέγχθηκε, ως μια άλλη προσέγγιση, η εφαρμογή της μεθόδου direct strength για το σχεδιασμό μελών σε συνθήκες πυρκαγιάς με χρήση απομειωμένων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων για κάθε στάθμη θερμοκρασίας. Τέλος, για την εξέταση της παραδοχής του Ευρωκώδικα, περί χρήσεως της μέγιστης θερμοκρασίας της διατομής σε περίπτωση ανομοιόμορφης κατανομής, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με ομοιόμορφη θερμοκρασία με αυτά που προέκυψαν για την ανομοιόμορφη θερμοκρασία και προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το σχεδιασμό μεταλλικών μελών έναντι πυρκαγιάς με βάση τις αναλυτικές και ημι-αναλυτικές μεθόδους των κανονισμών.



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

POSTGRADUATE THESIS  
ISS PT 2015/07

**Structural Behavior of Light Gauge Cold-Formed Steel Frame Walls  
under Fire Conditions**

**Iason Vardakoulias**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

**ABSTRACT**

This study investigates the structural behavior of modern load-bearing drywall formations under fire conditions. Drywall systems comprise load bearing cold-formed steel members sheathed in gypsum or cement boards and may additionally include thermal insulation placed in the cavities forming between the wallboards and the steel studs. These systems provide high design flexibility, energy efficiency, low cost and short installation time. Four different drywall configurations were considered with single or double plasterboards layers, with or without mineral wool as cavity insulation. The studs are made of steel S320GD+Z and have lipped channel sections with two web stiffeners. The plasterboards are attached to the studs using ballistic nails which additionally prevent minor axis buckling of the steel members. The standard ISO 834 fire curve is imposed at the inner wall face in order to simulate the fire conditions and non-uniform temperature distribution which is expected to occur across the member.

ANSYS CFX is used in a 2D finite element environment to derive proper temperature profiles across the investigated sections by modeling the whole plasterboard-insulation-stud system. For each material, temperature dependent thermal and mechanical property models are incorporated. Specifically, Eurocode 3 part 1.2 is utilized for the diminishing properties of steel and state of the art models proposed by recent researches are considered for the plasterboards and the mineral wool. The results of the thermal analysis were used to feed the finite element software ADINA in order to generate diminishing curves corresponding to bearing capacity deterioration as a function of time and/or temperature. Results in time domains are used to present a solution regarding the fire resistance rating of the four drywall assemblies considered. On the other hand, temperature domains are employed to display and compare the structural performance of the specimens in terms of various temperature aspects, such as maximum cross-sectional temperature, average temperature etc.

The finite element method is utilized by ADINA to perform linearized buckling analysis in order to determine the elastic buckling loads of the studs. These results are cross-validated using the freely available software CUFSM that incorporates the finite strip method in its solution process. Mesh refinements were examined in both programs in order to extrapolate the most efficient solutions in terms of both precision and computational effort. The shapes of the elastic buckling modes were used as initial geometric imperfections during the execution of geometric and material non-linear analyses with initial geometric imperfections in order to determine the most unfavorable mode-imperfection combination at ambient temperature conditions. In each case, the stud was strained by a vertical concentric compressive action, placed at the gravity center of the gross cross-section, under both load-control and displacement-control situations; Newton-Raphson and Arc-Length solution processes were performed in order to verify the corresponding results. The numerical results were compared to the predictions of AISI's direct strength method and the effective width method, executed according to the provisions of EN 1993-1-3.

The most unfavorable mode combination, comprising local and distortional buckling modes, was used to carry out the non-linear analyses at elevated temperatures. Uniform and non-uniform temperature profiles were considered across the member while the temperature distribution along the stud was considered constant. The temperature gradient was extracted by the heat transfer analyses for each of the four cases and non-linear analyses were performed to identify load-bearing capacity deterioration as a function of time and temperature. Load ratio reduction curves were determined using both steady state and transient state conditions which are supposed to produce identical solutions. Additionally, the results of the steady state are employed to construct equilibrium paths. Apart from merely imposing an axial load, an external bending moment is introduced to produce uniform and triangular moment distributions in order to create axial force-bending moment interaction diagrams under uniform temperature profiles.

The numerical investigation was followed by analytical and semi-analytical calculations relying on the provisions of the direct strength method and Eurocode 3. Regarding Eurocode 3, the official EN 1993-1-2 method was examined along with a modified EN 1993-1-3 solution process that was widely used by various literature sources. The modified method employs the equations of Eurocode 3, part 1.3 using the diminished values of elasticity modulus and yield stress at each considered temperature. CUFSM's solution process was executed with reduced elasticity modulus values to reflect the lesser behavior corresponding to higher temperatures; its results fed the direct strength method along with diminished yield stress values to represent the behavior at each temperature. These solutions were compared to the numerical results to investigate the prediction accuracy of the pertinent regulations. Finally, the results of the uniform temperature distribution were compared to the non-uniform profiles to provide significantly important information regarding the claim of Eurocode 3, part 1.2 to use the maximum cross-sectional temperature if a temperature gradient is applied across the members.