

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΜΕΙΓΜΑΤΑ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΥΣΗΣ
Καθηγήτρια Δρ. Μ. ΦΟΥΝΤΗ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9- 15780 ΑΘΗΝΑ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
THERMAL ENGINEERING DEPARTMENT
HETEROGENEOUS MIXTURES & COMBUSTION SYSTEMS
Professor Dr. M. FOUNTI
POLYTECHNIUPOULI-ZOGRAFU
HEROON POLYTECHNIU 9-15780 ATHENS

☎ 210 - 772 -3605/3886/3664/1218

Fax: 210 -772-3527

e-mail: mfou@central.ntua.gr

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση της διδακτορικής διατριβής της Υποψήφιας Διδάκτορος κας. **Ασημακοπούλου Ελένης**, με τίτλο:

«Ανάπτυξη και αξιολόγηση πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων για το χαρακτηρισμό φλογών εξερχομένων από άνοιγμα και εκτίμηση των επιπτώσεων τους σε προσόψεις κτιρίων»

“Development and assessment of experimental and numerical tools for characterization of Externally Venting Flames and evaluation of their effect on building facades”

η οποία πρόκειται να γίνει τη Πέμπτη, 21 Ιουλίου 2016 και ώρα 11.30 π.μ., στην Αίθουσα Τηλεκπαίδευσης του κτιρίου Βιβλιοθήκης του Ε.Μ.Π.

Η επταμελής εξεταστική επιτροπή απαρτίζεται από τους:

Καθ. Κ. Αντωνόπουλο

Καθ. Εμμ. Ρογδάκη

Καθ. Κ. Σπύρου (Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων – Μηχανικών)

Καθ. Α. Μπουντουβή (Σχολή Χημικών Μηχανικών).

Αν. Καθ. Θ. Πανίδα (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών),

Ομ.Καθ. Π. Τουλιάτο (Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών)

Καθ. Μ. Φούντη (επιβλέπουσα)

Εκ μέρους της εξεταστικής επιτροπής,

Καθ. Μ. Φούντη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ελένη Κ. Ασημακοπούλου

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, Μ.Δ.Ε., Ε.Μ.Π.

Τίτλος: Ανάπτυξη και αξιολόγηση πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων για το χαρακτηρισμό φλογών εξερχομένων από άνοιγμα και εκτίμηση των επιπτώσεων τους σε προσόψεις κτιρίων»

Ο σχεδιασμός έναντι πυρασφάλειας αποτελεί έναν σχετικά νέο ερευνητικό πεδίο, ειδικά στην Ελλάδα, κατά τον οποίο απαιτείται βαθιά κατανόηση των εμπλεκόμενων φυσικών φαινομένων προκειμένου να γίνει εφικτή με αποτελεσματικό τρόπο η εγγύηση της ασφάλειας μειώνοντας τις απώλειες λόγω πυρκαγιάς, βελτιώνοντας το νομοθετικό πλαίσιο, βελτιώνοντας την ανάλυση μετά το πέρας μιας πυρκαγιάς και αυξάνοντας την περιβαλλοντολογική προστασία. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διενεργήθηκε η θεωρητική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση της διάδοσης πυρκαγιάς σε κτίρια και συστήματα προσόψεων λόγω Φλογών Εξερχόμενων από Άνοιγμα (ΦΕΑ).

Κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο, οι φλόγες ενδέχεται να εξέλθουν από ανοίγματα και έχει παρατηρηθεί ότι αυτός είναι ο κύριος μηχανισμός εξάπλωσης φωτιάς σε προσόψεις που ευθύνεται για την διάδοση της πυρκαγιάς σε άλλους ορόφους ή και παρακείμενα κτίρια. Σήμερα, λόγω των ολοένα και αυστηρότερων απαιτήσεων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση για την εγκατάσταση εύφλεκτων υλικών θερμομόνωσης στις προσόψεις τους. Αυτή η πρακτική εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς τα χαρακτηριστικά πυρασφάλειας του κτιρίου που σχετίζονται με ΦΕΑ. Ωστόσο, η πλειοψηφία των κωδικών πυρασφάλειας δεν παρέχουν συγκεκριμένες μεθοδολογίες για την αξιολόγηση των κινδύνων που συνδέονται με ΦΕΑ, δεδομένου ότι οι νέες απαιτήσεις σχεδιασμού πρόσοψη και τα υλικά κατασκευής αμφισβητούν τις καθιερωμένες λύσεις πυρασφάλειας. Μια πληθώρα πρόσφατων πυρκαγιών και εξάπλωσής τους λόγω ΦΕΑ σε ψηλά κτίρια, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό θυμάτων, δομικές βλάβες και απώλεια περιουσίας, γεγονός που καθιστά την ανάγκη για βελτίωση των κανονισμών πυροπροστασίας μια επείγουσα προτεραιότητα.

Με αυτόν τον γνώμονα δημιουργείται και αξιολογείται μια εμπειριστατωμένη μεθοδολογία ενώ συλλέγονται και παρουσιάζονται για πρώτη φορά οι απαραίτητες πληροφορίες για έναν μηχανικό πυρασφάλειας προκειμένου να μπορέσει να αξιολογήσει μια πληθώρα Εμπειρικών Σχέσεων (Ε.Σ.) και μεθοδολογιών κατά την διάρκεια σχεδιασμού έναντι ΦΕΑ. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζεται μια εκτεταμένη ανασκόπηση της φαινομενολογίας και των στοιχείων πυρασφάλειας που αφορούν την διάδοση φωτιάς λόγω ΦΕΑ, δίνοντας έμφαση στην επίδραση των γεωμετρικών και θερμικών χαρακτηριστικών πλουμίων ΦΕΑ αλλά και της ροής θερμότητας σε συστήματα προσόψεων. Συγκεντρώνεται για πρώτη φορά ένα ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων των πιο πρόσφατων πειραμάτων φωτιάς μεσαίας και μεγάλης κλίμακας, που δίνουν έμφαση σε ΦΕΑ, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα να αναγνωριστούν οι πιο σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξη ΦΕΑ. Διενεργείται επίσης και μια ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων Ε.Σ. και ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθοδολογιών οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό πυρασφάλειας και εντοπίζονται με αυτόν τον τρόπο τα όρια εφαρμογής και οι

περιορισμοί χρήσης τους. Σχεδιάστηκαν και διενεργήθηκαν μια σειρά πειραμάτων φωτιάς μεσαίας κλίμακας προκειμένου να διενεργηθούν οι φυσικοί μηχανισμοί και οι παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξη ΦΕΑ. Συγκεκριμένα διενεργείται παραμετρική μελέτη προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της ποσότητας πυροθερμικού φορτίου και της γεωμετρίας του ανοίγματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του πλουμίου ΦΕΑ. Επιπλέον, σχεδιάστηκε και διενεργήθηκε ένα καινοτόμο μεγάλης κλίμακας πείραμα προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση ΦΕΑ σε Συστήματα Αεριζόμενης Πρόσοψης. Αναπτύσσεται μια αυτόνομη υπολογιστική μεθοδολογία για την ακριβή περιγραφή των χαρακτηριστικών ΦΕΑ σε μεσαίας και μεγάλης κλίμακας διατάξεις δωματίων πρόσοψης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια των κανονισμών σχεδιαστικής απόδοσης. Σε αυτήν την μεθοδολογία ενσωματώθηκε και μεθοδολογία για την ακριβή πρόλεξη της αντίδρασης γυψοσανίδας σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος φωτιάς. Οι προλέξεις αξιολογούνται χρησιμοποιώντας δεδομένα μεσαίας κλίμακας αλλά και μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, αξιολογούνται Ε.Σ. και μεθοδολογίες για την εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών πλουμίων ΦΕΑ, θερμοκρασία του κεντρικού άξονα πλουμίου ΦΕΑ και εκτίμησης ροής θερμότητας στην εκτιθέμενη πλευρά συστημάτων πρόσοψης χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα μεσαίας και μεγάλης κλίμακας από την βιβλιογραφία αλλά και από τα πειράματα που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Η καινοτομία της παρούσας διατριβής έγκειται στο ότι η εκτεταμένη θεωρητική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση της διάδοσης πυρκαγιάς σε κτίρια και συστήματα προσόψεων λόγω ΦΕΑ ενσωματώθηκε για πρώτη φορά σε μια ενιαία μεθοδολογία μελέτης πυρασφάλειας προσόψεων. Επιπλέον, δημιουργήθηκε βάση δεδομένων πειραματικών μετρήσεων δοκιμών φωτιάς μεγάλης κλίμακας με εστίαση σε ΦΕΑ. Αυτή η βάση δεδομένων καθώς και τα πειράματα μεσαίας και μεγάλης κλίμακας που διενεργήθηκαν επιπλέον στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας. Τέλος, αναπτύχθηκαν υπολογιστικά εργαλεία επεξεργασίας εικόνας για εντοπισμό ΦΕΑ και διόρθωσης τιμής θερμοκρασίας λόγω ακτινοβολίας στο εσωτερικό δωματίων φωτιάς.

ABSTRACT Ph.D. Thesis

Eleni K. Asimakopoulou
Mechanical Engineer, M.Sc., NTUA

Title: “Development and assessment of experimental and numerical tools for characterization of Externally Venting Flames and evaluation of their effect on building facades”

The current thesis targets the computational, experimental and theoretical investigation of fire spreading in buildings and façade systems due to Externally Venting Flames (EVF). When a building fire is fully developed, flames may spill out of external openings and it is well established that they significantly increase the risk of fire spreading to higher floors or adjacent buildings. Nowadays, due to the ever-stricter requirements for building energy performance, there is a growing trend of installing combustible thermal insulation materials on building façades. In this aspect, such energy saving practice may adversely affect the building’s fire safety characteristics related to EVF. However, the majority of fire safety codes lack specific methodologies to evaluate the risks associated with EVF, since new façade design requirements and construction materials challenge the established fire safety solutions. There is an alarming occurrence of recent EVF events in high rise buildings, resulting in a large number of casualties, structural damage and property loss a fact that renders the need to improve design guidelines for EVF an urgent priority.

This necessity motivated the development of a holistic fire safety design methodology in the frame of performance based design, as presented in the current thesis, challenging traditional concepts of fire safety that can be applied in real life structures and fire safety engineering problems. In the present thesis, focus is given on the fundamental physical phenomena governing EVF in medium- and large-scale configurations, aiming to advance the frontiers of scientific knowledge and improve the relevant design guidelines. This multi-disciplinary research applies in the diverse fields of fire science, fire safety, materials performance and building codes and standards. Fire engineers, product manufacturers, building owners, fire and public services, construction sector, stand to benefit from the understanding of the physical phenomena governing the fundamental flow and thermal characteristics of EVF. The main phenomenology and fire safety aspects of façade fires due to EVF are reviewed emphasizing on the impact of heat fluxes and EVF plume geometric characteristics on the fire resistance and spread on façade assemblies. A complete dataset on the current state-of-the art medium- and large-scale fire experiments and numerical studies related to EVF fire events, formed for the first time, provides the opportunity to identify the important parameters influencing EVF development. A key parameters sensitivity analysis is performed towards identifying the origins, applicability and limitations of widely applied fire engineering design correlations and methodologies. Correlations and methodologies for the estimation of EVF geometric characteristics have been evaluated in terms of applicability, accuracy and ease of implementation. A range of methodologies for the estimation of the heat flux on the exposed façade surface has been presented, and the best methodology for the accurate estimation of the heat flux on exposed façade surface has been identified. A dedicated series of medium-scale compartment-façade experiments has been designed and performed in

order to investigate the fundamental physical phenomena and factors influencing the dynamic development of EVF. A parametric study has been further performed to investigate the effect of fire load and opening factor to the EVF geometric and thermal characteristics; EVF plume effect on the façade wall was also thoroughly investigated in terms of heat flux and temperature temporal measurements. In addition, a large-scale compartment façade experiment has been designed and performed for the first time in order to investigate the EVF related phenomena associated with an innovative energy efficient Ventilated Façade (VF) system. The relevant phenomena influencing EVF development and its impact on VF systems have been analyzed and assessed. A dedicated numerical methodology for the accurate description of the EVF characteristics in medium- and large-scale compartment façade configurations has been developed in the context of performance-based design guidelines currently implemented in many countries. A methodology has been developed accounting for the fire behavior of gypsum plasterboards. Numerical predictions were thoroughly compared to the obtained experimental measurements from medium-scale configurations and available data for large-scale configurations from the dataset in order to evaluate the accuracy of the numerical methodology. Correlations and methodologies for EVF description have been extensively validated against available and in house performed medium- and large-scale compartment façade experiments. It is widely accepted that the suitability of a holistic fire safety engineering design methodology, as the one developed in the current thesis, is determined by its intended application and by verification through detailed experimental measurements; only a method that is both versatile and practical, yielding sufficiently accurate results, may prove suitable for practical applications. Taking into account that simplified methodologies, should produce conservative design values, there is an urgent need for design guidelines that provide explicit recommendations on how to use them. Even when more sophisticated models are available a compromise is often necessary between accuracy, cost and time during fire safety design. Knowledge of the errors and limitations of fire engineering correlations is necessary if an analytical approach is intended to be used as an alternative to the more advanced performance-based methodologies. Implementation of the current thesis research results can be proven very beneficial for society, as it will contribute to the reduction of fire losses and improve fire protection by providing tangible fire safety engineering techniques relating advantages in innovative design and construction techniques to everyday life safety.

The innovation of the current thesis is that the extensive theoretical, experimental and computational investigation of the fire spreading in buildings and facades systems due to EVF are incorporated for the first time into a holistic fire safety engineering methodology for the design of facades systems. In addition, a large-scale compartment-façade fire test database focusing on EVF has been created. This extended database and the results from medium and large scale fire tests conducted in the frame of the current thesis have been used for the assessment of the developed methodology. Supplementary, an EVF detection image processing tool and a post process correction methodology for radiation correction of the thermocouples at the interior of fire compartments have been developed.