

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ  
ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΦΕΡΟΥΣΕΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣΕΣ ΞΗΡΑΣ  
ΔΟΜΗΣΗΣ**

**Ηλίας Δ. Θανάσουλαι**  
Υποψήφιος Διδάκτορας  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [iliasthana@gmail.com](mailto:iliasthana@gmail.com)

**Ιάσων Κ. Βαρδακούλια**  
Πολιτικός Μηχανικός MSc  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail : [jason.vard@gmail.com](mailto:jason.vard@gmail.com)

**Διονύσιος Ι. Κολαΐτη**  
Μηχανολόγος Μηχανικός PhD  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [dkol@central.ntua.gr](mailto:dkol@central.ntua.gr)

**Χάρης Ι. Γαντέ**  
Καθηγητής  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail : [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

**Μαρία Α. Φούντη**  
Καθηγήτρια  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [mfou@central.ntua.gr](mailto:mfou@central.ntua.gr)

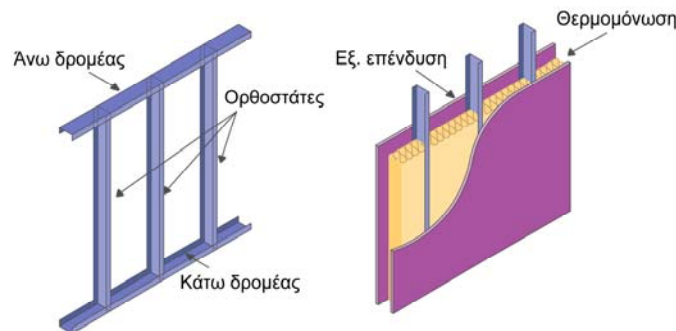
## **1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η αντοχή φερουσών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς εκτιμάται μέσω του δείκτη πυραντίστασης, ο οποίος προσδιορίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών πυραντίστασης, το κόστος των οποίων είναι σημαντικό. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης των δοκιμών πυραντίστασης μέσω συζευγμένων θερμικών και μηχανικών αναλύσεων σε χωρικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται στο λογισμικό ADINA και περιλαμβάνουν θερμοκρασιακά εξαρτημένες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες υλικών, μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, καθώς και στοιχεία επαφής για την προσομοίωση των διεπιφανειών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, όπως η εξέλιξη της θερμοκρασίας, η φέρουσα ικανότητα και η μορφή αστοχίας, συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα αντίστοιχων εργαστηριακών δοκιμών, καταδεικνύοντας ικανοποιητική σύγκλιση. Η παρούσα μεθοδολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με συμβατικές μεθόδους προσομοίωσης, οι οποίες εκτελούνται σε στάδια και εμπεριέχουν απλοποιήσεις λόγω της πολύπλοκης δομής της τοιχοποιίας και της αλληλεπίδρασης θερμότητας και κατασκευής.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι φέρουσες τοιχοποιίες ξηράς δόμησης αποτελούνται συνήθως από μεταλλικά στοιχεία ψυχρής έλασης ως φέροντα μέλη, γυψοσανίδες ή τσιμεντοσανίδες ως εξωτερική επένδυση και στρώσεις πετροβάμβακα ή υαλοβάμβακα ως θερμική μόνωση (Σχ. 1). Τα κατακόρυφα μεταλλικά μέλη της τοιχοποιίας ονομάζονται ορθοστάτες (studs) και συνδέονται κοχλιωτά ή με πρεσάρισμα με οριζόντια μεταλλικά μέλη, τους δρομείς (tracks), στο άνω και κάτω μέρος της τοιχοποιίας. Για τους ορθοστάτες και τους δρομείς συνήθως επιλέγονται διατομές τύπου C εξαιτίας της ευκολίας συνδέσεων που παρέχεται [1]. Τυπικά πλεονεκτήματα των συστημάτων ξηράς δόμησης σε σχέση με τις συμβατικές μορφές αποτελούν η μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό, ο σύντομος χρόνος εγκατάστασης και η εξαιρετική ενεργειακή απόδοσή τους. Η συμπεριφορά των συστημάτων ξηράς δόμησης σε συνθήκες πυρκαγιάς κρίνεται θετική στη διεθνή βιβλιογραφία [2] εξαιτίας κυρίως της εξωτερικής επένδυσης, η οποία καθυστερεί τη μετάδοση θερμότητας στους ορθοστάτες και επιπλέον τους εξασφαλίζει από πλευρικό λυγισμό μέσω της διαφραγματικής λειτουργίας που παρέχει. Η συμπεριφορά ενός συστήματος ξηράς δόμησης στη φωτιά αποτιμάται μέσω του δείκτη πυραντίστασης (Fire Resistance Rating - FRR), ο οποίος προσδιορίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών ελεγχόμενης καύσης σε ειδικούς φούρνους μεγάλης κλίμακας [3]. Ωστόσο, το κόστος για τη διενέργεια των δοκιμών είναι σημαντικό και η διαδικασία εκτέλεσής τους αρκετά χρονοβόρα.

Η συνήθης πρακτική για την αριθμητική προσομοίωση των δοκιμών πυραντίστασης με πεπερασμένα στοιχεία [4] περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο εκτελείται ανάλυση μεταφοράς θερμότητας (heat-transfer analysis) από την οποία προκύπτει η κατανομή της θερμοκρασίας στον ορθοστάτη συναρτήσει του χρόνου. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας (GMN analysis) με σκοπό τον υπολογισμό της οριακής αντοχής του ορθοστάτη για την επιβαλλόμενη κατανομή θερμοκρασίας. Ωστόσο, η χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων αμελεί την αλληλεπίδραση θερμικής και μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας, ενώ οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στο δεύτερο προσομοίωμα (πλευρική δέσμευση του ορθοστάτη στις θέσεις κοχλίωσης με την εξωτερική επένδυση) αγνοούν την προοδευτική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια περισσότερο ακριβής μέθοδος προσομοίωσης των δοκιμών πυραντίστασης μέσω της εκτέλεσης θερμικά και μηχανικά συζευγμένων αναλύσεων (Thermo-Mechanical-Coupling Analysis) σε χωρικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία του συστήματος ξηράς δόμησης. Τα αριθμητικά μοντέλα που δημιουργούνται, πιστοποιούνται με βάση πειραματικές μετρήσεις σε αντίστοιχες δοκιμές πυραντίστασης από τη βιβλιογραφία [2].



Σχ. 1: Τυπική διάταξη συστήματος τοιχοποιίας ξηράς δόμησης

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

#### 3.1 Περιγραφή δοκιμών πυραντίστασης

Οι δοκιμές προσδιορισμού του FRR πραγματοποιούνται σε εργαστηριακές εγκαταστάσεις που διαθέτουν ειδικό φούρνο με προσαρμόζόμενο πλαίσιο στήριξης και φόρτισης του δοκιμίου τοιχοποιίας (Σχ. 2), καθώς και συστήματα ελέγχου και μετρήσεων. Κανονιστικές διατάξεις [3] ορίζουν τις ελάχιστες διαστάσεις του δοκιμίου που εξετάζεται, τα υλικά επένδυσης του φούρνου και λεπτομέρειες για τα τοποθετούμενα θερμοζεύγη (thermocouples) όπως αριθμό, είδος, ανοχές και σημεία τοποθέτησης. Το δοκίμιο στηρίζεται αμφίπακτα ή μονόπακτα στις οριζόντιες δοκούς του πλαισίου, μη εμποδίζοντας την καθ' ύψος διαστολή του με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και τις μετακινήσεις και στροφές στις κατακόρυφες πλευρές. Εν συνεχεία, εφαρμόζεται ομοιόμορφα κατανεμημένο θλιπτικό φορτίο στην κορυφή ή τη βάση της τοιχοποιίας, που αντιστοιχεί στο φορτίο λειτουργίας για τη χρήση που προορίζεται. Ο ρυθμός της καύσης προσαρμόζεται αυτόματα στο εσωτερικό του φούρνου έτσι ώστε να αναπτύσσεται ομοιόμορφη θερμοκρασία στην εκτεθειμένη πλευρά του δοκιμίου στη φωτιά σύμφωνα με την πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου ISO 834 [5]. Τα συστήματα ελέγχου και μετρήσεων πληροφορούν σχετικά με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία και πίεση στο φούρνο, τη θερμοκρασία και τις μετακινήσεις σε διάφορες θέσεις της τοιχοποιίας, καθώς και το επιβαλλόμενο φορτίο.

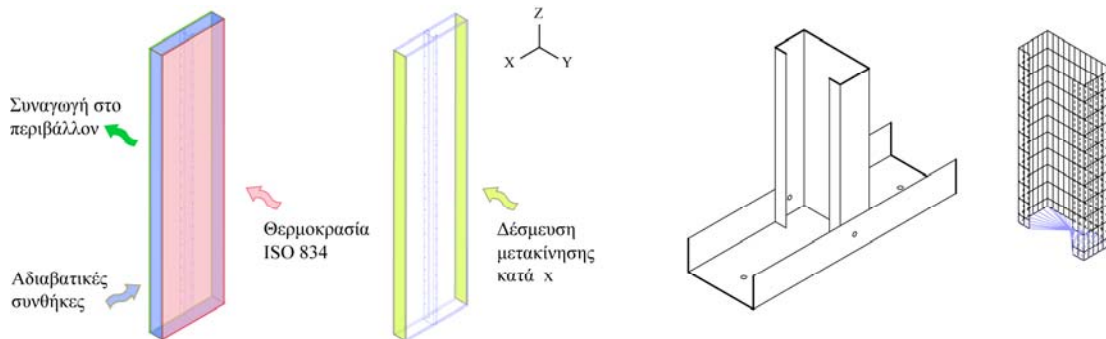
Σκοπός της εκτέλεσης των δοκιμών πυραντίστασης είναι ο προσδιορισμός του χρόνου πυραντίστασης του δοκιμίου, αξιολογώντας τη συμμόρφωση ή μη με τρία προκαθορισμένα κριτήρια επιτελεστικότητας. Το πρώτο κριτήριο αφορά την ακεραιότητα (Integrity) της τοιχοποιίας και παραβιάζεται όταν στη μη εκτεθειμένη πλευρά της τοιχοποιίας υπάρξει εμφάνιση ρωγμών που επιτρέπει τη διάδοση καπνού ή ανάπτυξη φλόγας. Το δεύτερο κριτήριο αφορά τη θερμομονωτική ικανότητα (Insulation) της τοιχοποιίας και ικανοποιείται όσο η μέση και η μέγιστη θερμοκρασία στη μη εκτεθειμένη πλευρά δεν υπερβαίνουν τους 160°C και 180°C, αντίστοιχα. Τέλος, το τρίτο κριτήριο αφορά τη στατική επάρκεια (structural adequacy) της τοιχοποιίας και ικανοποιείται για όσο χρόνο φέρεται το επιβαλλόμενο φορτίο χωρίς κατάρρευση. Το χρονικό διάστημα από την έναρξη της δοκιμής μέχρι τη στιγμή που παύει να ικανοποιείται το κάθε ένα εκ των παραπάνω κριτηρίων επιτελεστικότητας καθορίζει το δείκτη πυραντίστασης του δοκιμίου.



Σχ. 2: Ενδεικτική τοιχοποιία στο πλαίσιο φόρτισης (αριστερά) και στο τέλος δοκιμής (δεξιά).

### 3.2 Μεθοδολογία προσομοίωσης

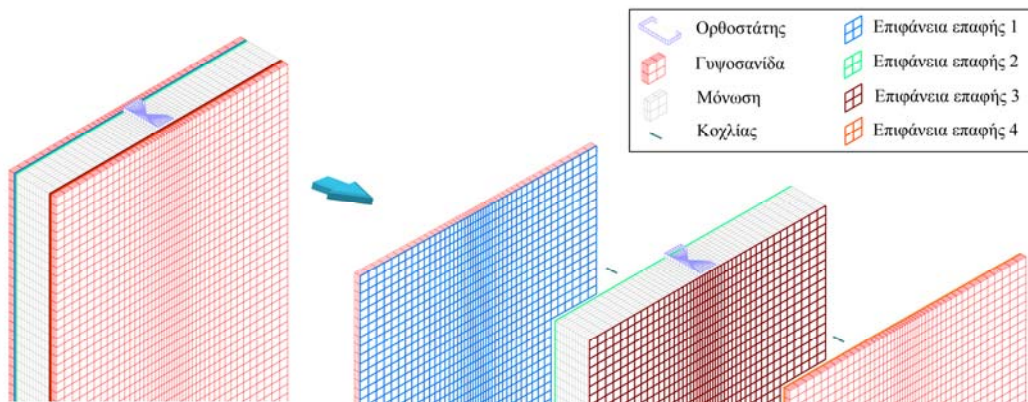
Η προσομοίωση των δοκιμών πυραντίστασης με πεπερασμένα στοιχεία είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, εξαιτίας των διαφόρων υλικών που συνιστούν την τοιχοποιία, την αλληλεπίδραση θερμότητας-κατασκευής που λαμβάνει χώρα και τη μεταβολή των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η πλέον ακριβής μέθοδος προσομοίωσης των δοκιμών είναι μέσω της εκτέλεσης θερμικά και μηχανικά συζευγμένων αναλύσεων (Thermo-Mechanical-Coupling ή TMC Analyses) σε χωρικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία του συστήματος ξηράς δόμησης. Στην εκτεθειμένη πλευρά του τοίχου εφαρμόζεται η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου ISO 834 [5], εκφράζοντας τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας από το φούρνο. Στη μη εκτεθειμένη πλευρά του τοίχου θεωρείται ελεύθερη συναγωγή προς το περιβάλλον με συντελεστή  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ενώ στις υπόλοιπες πλευρές λαμβάνονται αδιαβατικές συνθήκες, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3α (αριστερά). Αξιοποιώντας ότι η τοιχοποιία είναι πρόβλημα επίπεδης έντασης, δύναται να προσομοιωθεί τμήμα του τοίχου που αντιστοιχεί στο πλάτος επιρροής ενός μόνο ορθοστάτη, δεσμεύοντας τις εγκάρσιες μετακινήσεις εντός επιπέδου στις επιφάνειες τομής, όπως φαίνεται με κίτρινο χρώμα στο Σχ. 3α (δεξιά). Επιπλέον είναι δυνατή η προσομοίωση του μισού προβλήματος καθ' ύψος, λαμβάνοντας υπόψιν κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας ώστε να μειωθεί περαιτέρω το υπολογιστικό κόστος των αναλύσεων. Η σύνδεση του ορθοστάτη με το δρομέα προσομοιώνεται με χρήση άκαμπτων στοιχείων που εξαρτούν τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων στις δύο ακραίες διατομές με τους κεντροβαρικούς, για την υλοποίηση των στηρίξεων, όπως φαίνεται στο Σχ. 3β.



Σχ. 3α: Θερμικές (αριστερά) και μηχανικές (δεξιά) συνοριακές συνθήκες

Σχ. 3β: Σύνδεση ορθοστάτη - δρομέα και προσομοίωση με άκαμπτα στοιχεία

Τα μέλη του συστήματος ξηρής δόμησης που περιλαμβάνονται στην προσομοίωση είναι ο λεπτότοιχος μεταλλικός ορθοστάτης, η εξωτερική επένδυση γυψοσανίδας, οι κοχλίες σύνδεσης τους και το υλικό της θερμομόνωσης (αν υπάρχει) ή ο αέρας. Στοιχεία κελύφους (shell elements) χρησιμοποιούνται για τον ορθοστάτη καθώς ο τοπικός λυγισμός είναι συνήθως κρίσιμος για την απώλεια της φέρουσας ικανότητας. Χωρικά στοιχεία (3d-solid elements) χρησιμοποιούνται για τις γυψοσανίδες και στοιχεία δοκού (beam elements) για κοχλίες έτσι ώστε να παρέχεται ρεαλιστική σύνδεση και εξασφάλιση στον ορθοστάτη εξαιτίας της διαφραγματικής λειτουργίας των γυψοσανίδων. Χωρικά στοιχεία (3d-solid elements) χρησιμοποιούνται για τα θερμομονωτικά υλικά ή τον αέρα ώστε να προσομοιώνεται με ακρίβεια η διάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Στοιχεία επαφής (contact elements) χρησιμοποιούνται μεταξύ των διεπιφανειών των μελών για την μεταβίβαση ορθών και διατμητικών δυνάμεων καθώς και της θερμότητας. Η δομή του προσομοιώματος της τοιχοποιίας απεικονίζεται στο Σχ. 4.



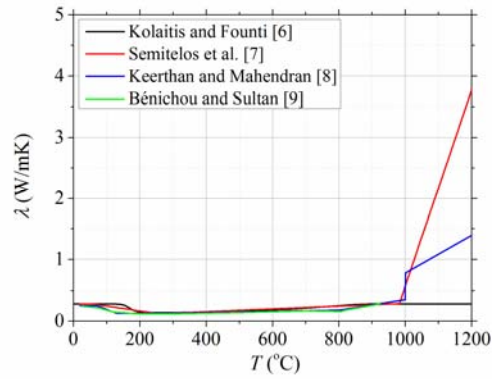
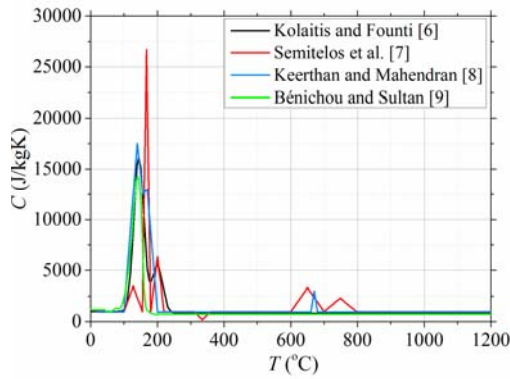
Σχ. 4: Αριθμητικό προσομοίωμα τοιχοποιίας ξηράς δόμησης

### 3.3 Ιδιότητες υλικών

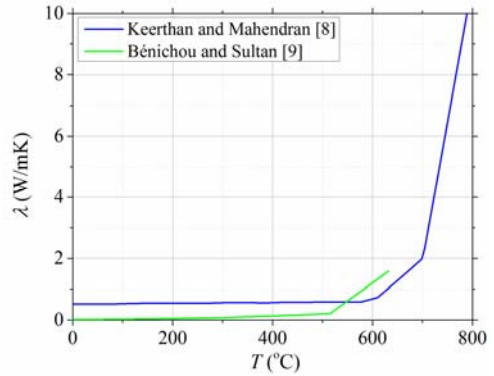
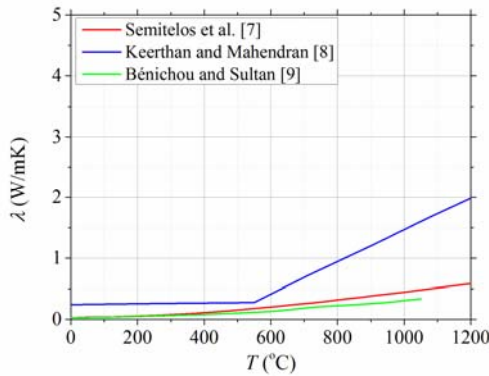
Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και για το λόγο αυτό στη συζευγμένη αριθμητική προσομοίωση εισάγονται μοντέλα υλικών με τιμές συναρτήσεων της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας. Οι θερμικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία του προσομοιώματος είναι η θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  (W/mK), η ειδική θερμοχωρητικότητα  $C$  (J/kgK), η πυκνότητα  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής  $\alpha$  (-). Αντίστοιχα, οι μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για το μεταλλικό ορθοστάτη είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E$  (MPa) και το όριο διαρροής  $f_{yb}$  (MPa), ενώ για τις γυψοσανίδες και τους κοχλίες είναι μόνο το μέτρο ελαστικότητας  $E$  (MPa), κάνοντας την παραδοχή ότι το υλικό δεν πλαστικοποιείται. Για τη θερμική μόνωση χρησιμοποιείται ελαστικό υλικό με πολύ χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, ώστε να μην υπάρχει συνεισφορά στη μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας.

Οι θερμικές ιδιότητες των γυψοσανίδων επηρεάζονται κυρίως από την περιεχόμενη υγρασία της γύψου. Κατά τη θέρμανσή τους, οι γυψοσανίδες αποβάλλουν σταδιακά το ελεύθερο και το χημικά δεσμευμένο νερό με αποτέλεσμα να απορροφούν σημαντικά ποσά θερμότητας έως ότου αφυγρανωθούν πλήρως. Έτσι, τόσο η ειδική θερμοχωρητικότητα όσο και η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλονται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5 [6-9]. Τα θερμομονωτικά υλικά όπως ο πετροβάμβακας και ο υαλοβάμβακας παρουσιάζουν μικρή μεταβολή με τη θερμοκρασία ως προς την ειδική θερμοχωρητικότητα και περισσότερο έντονη ως προς τη θερμική αγωγιμότητα (Σχ. 6). Τέλος, πληροφορίες για τις θερμικές ιδιότητες του χάλυβα δίνονται στο EN1993-1-2 [10].

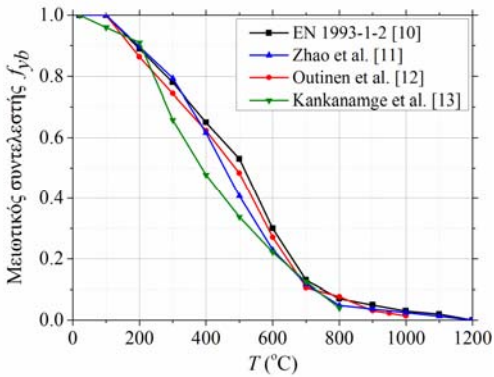
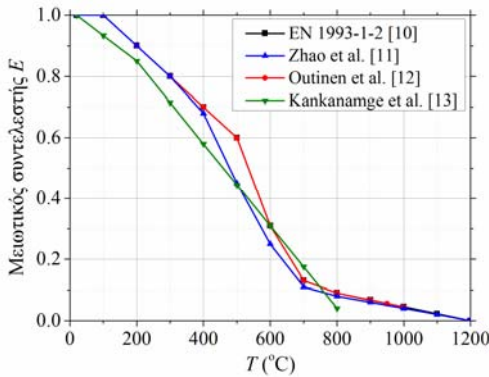
Το μέτρο ελαστικότητας και το όριο διαρροής για χάλυβα ψυχρής έλασης σε υψηλές θερμοκρασίες περιγράφεται στο EN1993-1-2 [10], καθώς και σε πειραματικές εργασίες από τη διεθνή βιβλιογραφία [11-13]. Σύγκριση μεταξύ των προτεινόμενων μειωτικών συντελεστών συναρτήσεων της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο Σχ. 7. Αντιθέτως, λίγα δεδομένα υπάρχουν για τα μηχανικά χαρακτηριστικά γυψοσανίδων σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς αυτές αποτελούν μη φέροντα στοιχεία. Από πειραματική εργασία που βασίστηκε σε δοκιμές κάμψης τριών σημείων κατά τη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση σε διάφορες θερμοκρασίες [14], προκύπτει ότι οι γυψοσανίδες παρουσιάζουν ορθότροπη συμπεριφορά μέχρι τους 400°C, όπου και χάνεται η αντοχή τους. Οι προτεινόμενοι μειωτικοί συντελεστές για το μέτρο ελαστικότητας και την τάση θραύσης των γυψοσανίδων σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται στο Σχ. 8.



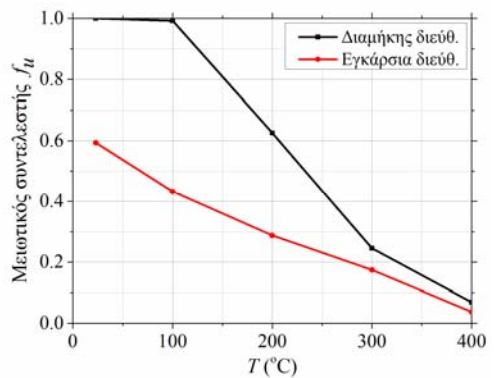
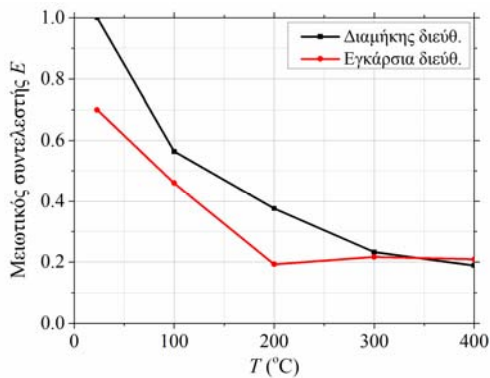
Σχ. 5: Ειδική θερμοχωρητικότητα (αριστερά) και θερμική αγωγιμότητα (δεξιά) γυψοσανίδας



Σχ. 6: Θερμική αγωγιμότητα πετροβάμβακα (αριστερα) και ναλοβάμβακα (δεξιά)



Σχ. 7: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας (αριστερά) και ορίου διαρροής (δεξιά) χάλυβα ψυχρής έλασης με τη θερμοκρασία



Σχ. 8: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας (αριστερά) και τάσης θραύσης (δεξιά) γυψοσανίδας με τη θερμοκρασία

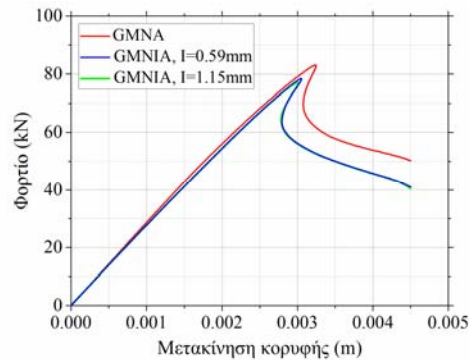
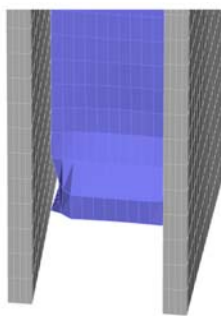
#### 4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

Δοκιμές πυραντίστασης σε φέρουσες τοιχοποιίες ξηράς δόμησης προσομοιώθηκαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, με σκοπό να πιστοποιηθούν τα αριθμητικά αποτελέσματα. Οι δομές που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν μονή ή διπλή επένδυση πυράντοχης γυψοσανίδας, με ή χωρίς θερμομόνωση (Πιν. 1). Τα δοκίμια τοιχοποιίας έχουν διαστάσεις 2400×2400 mm και το φορτίο φέρεται από 4 ορθοστάτες διατομής C 90×40×15 mm, πάχους 1,15 mm και ποιότητας χάλυβα G500. Οι γυψοσανίδες, πάχους 16 mm, στηρίζονται στους ορθοστάτες με κοχλίες ανά 200 mm καθ' ύψος. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο και τη διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών πυραντίστασης περιγράφονται στο [2].

Περίπτωση	I	II	III	IV	V
Διαμόρφωση					
Θερμομόνωση	-	-	-	Υαλοβάμβακας	Πετροβάμβακας
Συνθήκες	Περιβάλλοντος	Φωτιάς	Φωτιάς	Φωτιάς	Φωτιάς

Πιν. 1: Δομές τοιχοποιίας που προσομοιώθηκαν

Η πρώτη δοκιμή (περίπτωση I) αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της φέρουσας αντοχής της τοιχοποιίας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, υπό κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο στην κορυφή. Μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας πραγματοποιήθηκαν με και χωρίς αρχικές ατέλειες για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το προτεινόμενο μέγεθος των αρχικών ατελειών για το μεταλλικό ορθοστάτη προσδιορίστηκε από βιβλιογραφική έρευνα [15], σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή λυγισμού που είναι ο τοπικός λυγισμός του κορμού. Στο Σχ. 9 (αριστερά) παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας πειραματικά και αριθμητικά που οφείλεται και στις δύο περιπτώσεις σε τοπικό λυγισμό στη βάση του ορθοστάτη. Το οριακό φορτίο του κάθε ορθοστάτη βρέθηκε πειραματικά ίσο με 79 kN, αποτέλεσμα που συμφωνεί με την ανάλυση με αρχικές ατέλειες μεγέθους 0.59 mm ή 1.15 mm, όπως φαίνεται στο δρόμο ισορροπίας φορτίου-μετακίνησης στο Σχ. 9 (δεξιά).



Σχ. 9: Τοπικός λυγισμός στη βάση του ορθοστάτη (αριστερά) και δρόμος ισορροπίας φορτίου-μετακίνησης στην κορυφή (δεξιά)

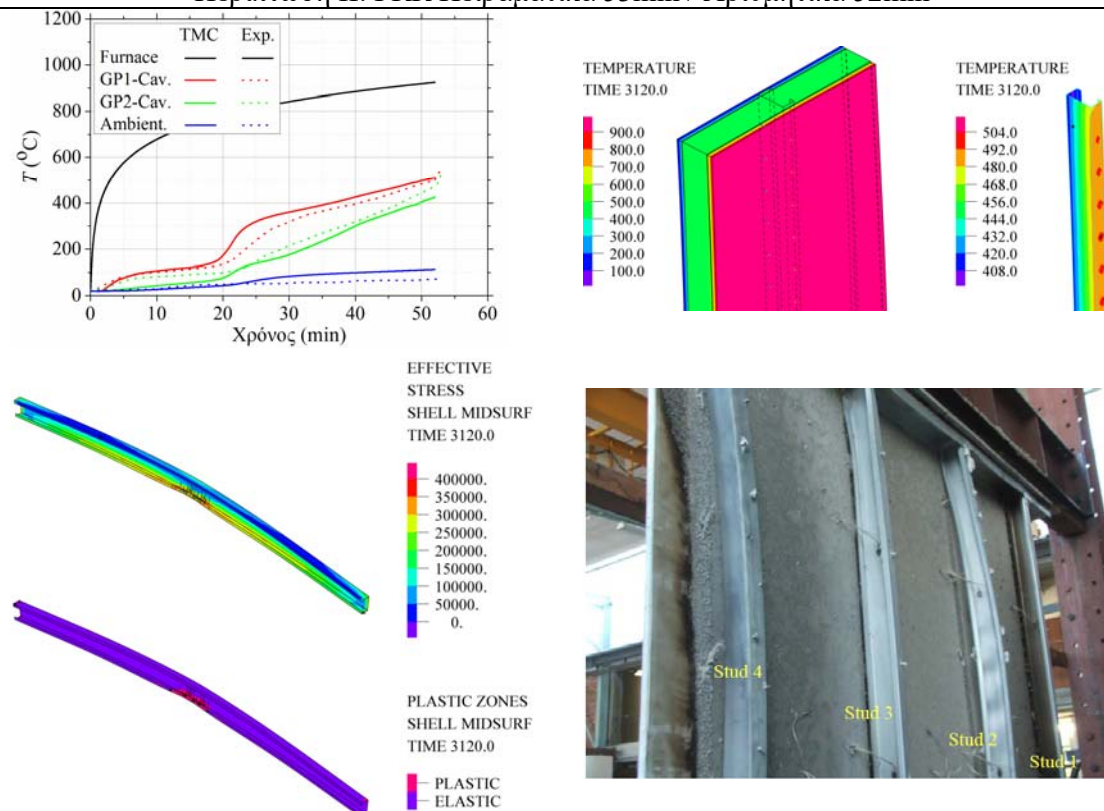
Οι επόμενες τέσσερις δοκιμές (Περιπτώσεις II-V), όπως απεικονίζονται στον Πιν. 1, αξιοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του δείκτη πυραντίστασης σε τυπικές δομές τοιχοποιιών ξηράς δόμησης. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις συζευγμένες αριθμητικές αναλύσεις προέκυψαν είτε από μετρημένες πειραματικά τιμές ή βιβλιογραφικές αναφορές και παρουσιάζονται στον Πιν. 2.

Υλικό	Θερμικές Ιδιότητες			Μηχανικές Ιδιότητες		
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (W/m·K)	$C$ (J/kg·K)	Συνθήκες Περιβάλλοντος $E$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	Φωτιά $E$ & $f_y$
Γυψοσανίδες	813 [8]	[6]	[6]	1750 [14]	-	[14]
Χάλυβας	7850 [10]	[10]	[10]	213520 [2]	569 [2]	[13]
Πετροβ/κας	100 [8]	[8]	840 [8]	0.1	-	σταθερό
Υαλοβ/κας	15,4 [8]	[8]	900 [8]	0.1	-	σταθερό
Αέρας	1,3 [16]	[16]	[16]	0.1	-	σταθερό

Πίν. 2: Ιδιότητες υλικών προσομοίωσης

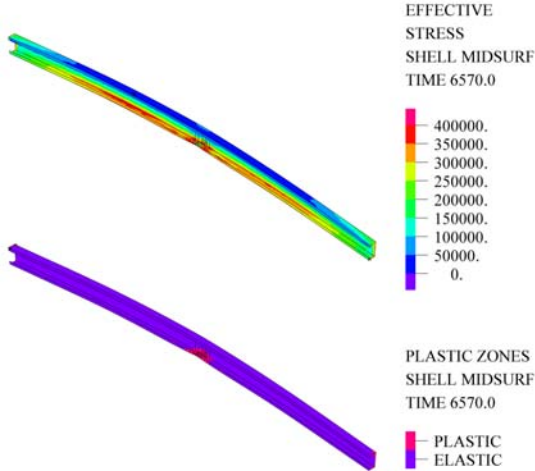
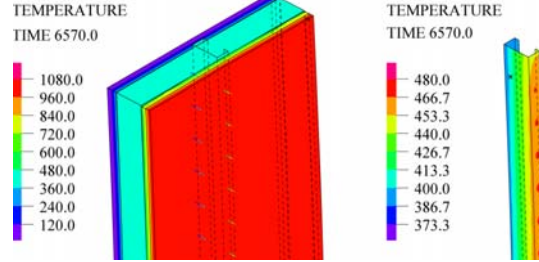
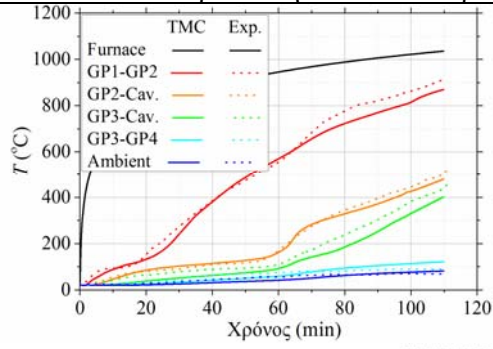
Η σύγκριση μεταξύ πειραματικών (Exp.) και αριθμητικών (TMC) αποτελεσμάτων αφορά το συνολικό χρόνο πυραντίστασης (ως προς το κριτήριο στατικής επάρκειας R), την εξέλιξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και τη μορφή της αστοχίας του ορθοστάτη. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας μετρήθηκε πειραματικά με θερμοζεύγη τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις της τοιχοποιίας, όπως η εκτεθειμένη (Furnace) και η μη εκτεθειμένη της πλευρά (Ambient) και οι διεπιφάνειες επαφής μεταξύ γυψοσανίδων και θερμομόνωσης (GP1-GP2, GP2-Cav, GP3-Cav, GP3-GP4). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης συνοψίζονται στον Πιν. 3, καταδεικνύοντας ικανοποιητική σύγκλιση όσον αφορά την εκτίμηση του συνολικού χρόνου πυραντίστασης και της εξέλιξης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας σε όλες τις περιπτώσεις. Η μορφή της αστοχίας που προέκυψε πειραματικά δεν συμφωνεί πάντοτε με αυτήν από τις αναλύσεις, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στο ότι, κατά τη δοκιμή, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στην εκτεθειμένη επιφάνεια της τοιχοποιίας δεν επιτυγχάνεται να είναι εντελώς ομοιόμορφη. Επιπλέον, μπορεί να οφείλεται σε τοπικές ατέλειες κατά της κατασκευή ή στην αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά σε ορισμένες θέσεις εξαιτίας ρηγμάτωσης των γυψοσανίδων, που οδηγούν τον τοπικό λυγισμό του ορθοστάτη σε αυτές τις περιοχές.

Περίπτωση II: FRR Πειραματικά 53min / Αριθμητικά 52min

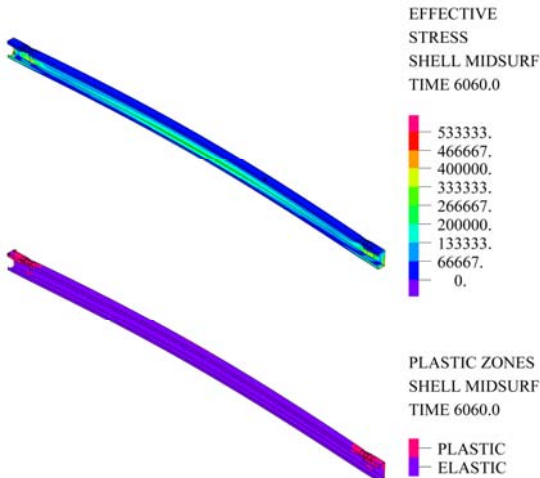
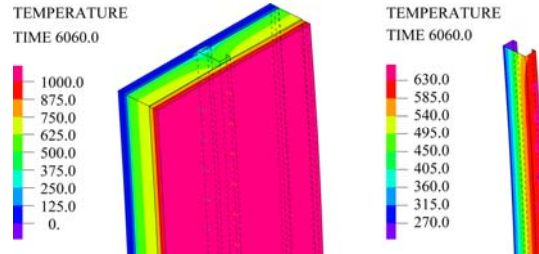
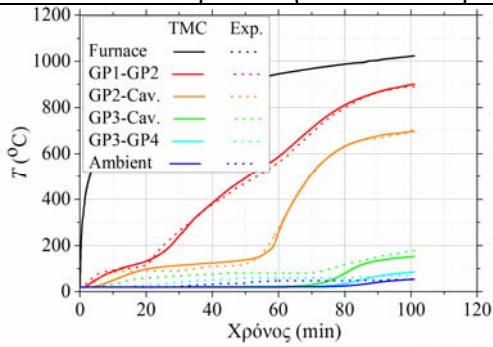




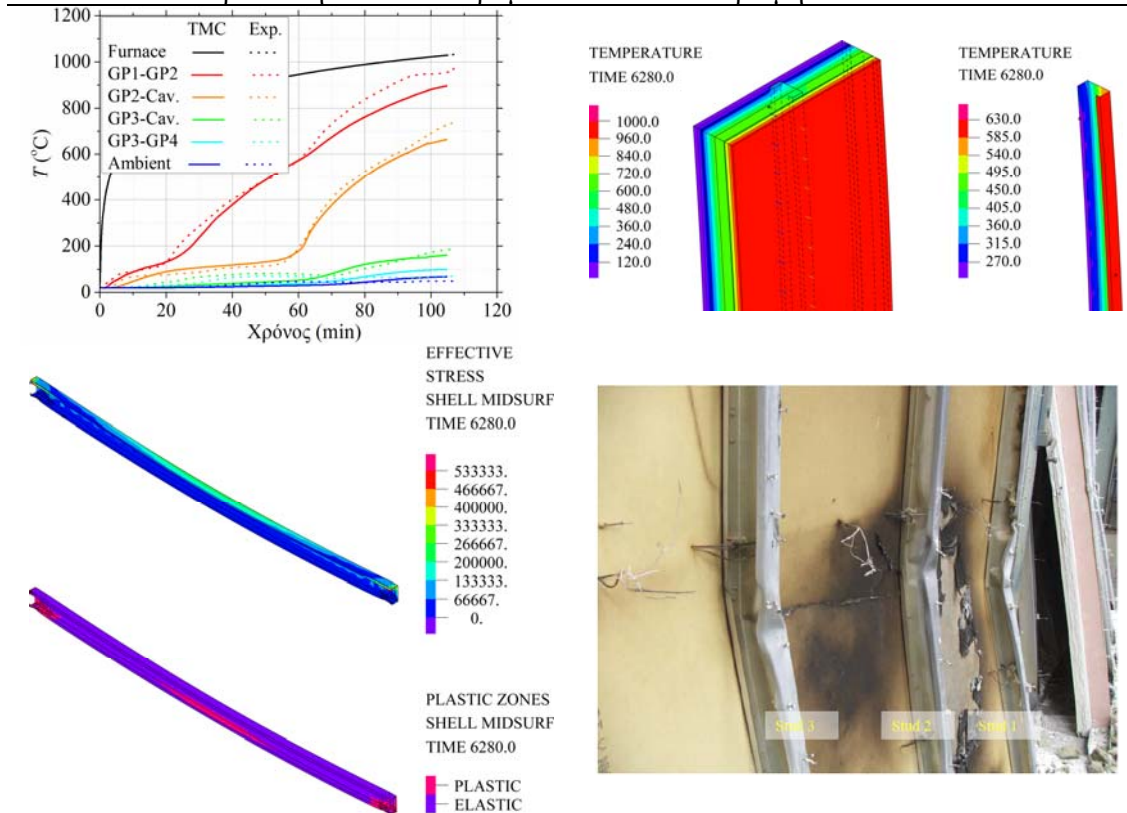
Περίπτωση III: FRR Πειραματικά 111min / Αριθμητικά 110min



Περίπτωση IV: FRR Πειραματικά 101min / Αριθμητικά 101min



Περίπτωση V: FRR Πειραματικά 107min / Αριθμητικά 105min



Πίν. 3: Σύνοψη αριθμητικών και πειραματικών [2] αποτελεσμάτων δοκιμών πυραντίστασης

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία προσομοίωσης δοκιμών πυραντίστασης σε φέρουσες τοιχοποιίες ξηράς δόμησης μέσω θερμικά και μηχανικά συζευγμένων αναλύσεων σε χωρικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Η μεθοδολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με το συμβατικό τρόπο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται μέχρι τώρα για το σκοπό αυτό, όπου γίνεται χρήση διαφορετικών αριθμητικών προσομοιωμάτων για τη θερμική και τη στατική ανάλυση. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, ένα ενιαίο αριθμητικό προσομοίωμα χρησιμοποιείται για ολόκληρη την τοιχοποιία, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση θερμικής και μηχανικής απόκρισης στο φορέα καθώς και την απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της εξωτερικής επένδυσης που είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση των λεπτότοιχων μεταλλικών ορθοστατών από πλευρικό λυγισμό. Στο πλαίσιο της διαδικασίας πιστοποίησης των αριθμητικών προσομοιωμάτων, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα δοκιμών πυραντίστασης από τη βιβλιογραφία. Ο συνολικός χρόνος πυραντίστασης των δοκιμών καθώς και η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας προβλέφθηκαν επαρκώς καλά, ενώ η μορφή της αστοχίας ήταν διαφορετική σε μερικές περιπτώσεις, γεγονός που πιθανόν οφείλεται σε ατέλειες της κατασκευής και στην ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας από τον φούρνο. Τέλος, η μεθοδολογία προσομοίωσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί εκτός από φέρουσες τοιχοποιίες και σε άλλα μέλη του φέροντα οργανισμού μιας κατασκευής όπως σε υποστυλώματα, δοκούς ή δάπεδα που διαθέτουν μεταλλικά μέλη καθώς και στοιχεία για την αύξηση του δείκτη πυραντίστασης τους.

## 6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «ELISSA: Energy Efficient Lightweight-Sustainable-Safe-Steel Construction» (EeB.NMP.2013-1, Grant No. 609086).

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] American Iron and Steel Institute, Strength of Cold-Formed Steel Jamb Stud-To-Track Connections, *Research report RP08-1*, 2008
- [2] S. Gunalan, P. Kolarkar, M. Mahendran, Experimental study of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions. *Thin Walled Structures*, **65**, 72–92, 2013
- [3] European Committee of Standardization, *EN 1365-1: Fire resistance tests for loadbearing elements - Part 1: Walls*, Belgium, 2012
- [4] I. D. Thanasoulas, I. K. Vardakoulis, D. I. Kolaitis, C. J. Gantes, M. A. Founti, Thermal and mechanical computational study of load-bearing cold-formed steel drywall systems exposed to fire. *Fire Technology*, **52**, 2071-2092, 2016
- [5] International Organization for Standardization, *ISO 834 - 1. Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. Switzerland, 1999
- [6] D. I. Kolaitis, M. A. Founti, Development of a solid reaction kinetics gypsum dehydration model appropriate for CFD simulation of gypsum plasterboard wall assemblies exposed to fire. *Fire Safety Journal*, **58**, 151–159, 2013
- [7] G. K. Semitelos, I. D. Mandilaras, D. A. Kontogeorgos, M. A. Founti, Simplified correlations of gypsum board thermal properties for simulation tools. *Fire Mater*, **40**, 229–245, 2016
- [8] P. Keerthan, M. Mahendran, Thermal Performance of Composite Panels under Fire Conditions Using Numerical Studies: Plasterboards, Rockwool, Glass, Fibre and Cellulose Insulations. *Fire Technology*, **49**, 329-356, 2012
- [9] N. Bénichou, M. A. Sultan, Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures. *Fire Materials*, **29**, 165–179, 2005
- [10] European Committee of Standardization, *EN 1993-1-2 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules-Structural fire design*, Belgium, 2002
- [11] B. Zhao, J. Kruppa, C. Renaud, M. O'Connor, E. Mecozzi, W. Apiazu, T. Demarco, P. Karlstrom, U. Jumppanen, O. Kaitila, T. Oksanen, P. Salmi, Calculation rules of lightweight steel sections in fire situations. *Technical Steel Research*, EU, 2005
- [12] J. Outinen, P. Mäkeläinen, Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down, *Second International Workshop on Structures in Fire*, Christchurch, 2002
- [13] N. Dolamune Kankanamge, M. Mahendran, Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, **49**, 26-44, 2011
- [14] S. M. Cramer, O. M. Friday, R.H. White, G. Sriprutkiat, Mechanical properties of gypsum board at elevated temperatures, *Proceedings of the Fire and Materials Conference*, San Francisco, USA, 2003
- [15] B. W. Schafer, T. Peköz, Computational modelling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, **47**, 193–210, 1998
- [16] International Organization for Standardization, *ISO 6946. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance–Calculation method*, Switzerland, 2007

# NONLINEAR NUMERICAL SIMULATION OF FIRE-RESISTANCE TESTS FOR LOAD-BEARING COLD-FORMED-STEEL DRYWALL SYSTEMS

**Ilias D. Thanasoulas**

Ph.D. Candidate

School of Civil Engineering, N.T.U.A.

Athens, Greece

e-mail: [iliasthana@gmail.com](mailto:iliasthana@gmail.com)

**Iason K. Vardakoulias**

Civil Engineer, MSc

School of Civil Engineering, N.T.U.A.

Athens, Greece

e-mail : [jason.vard@gmail.com](mailto:jason.vard@gmail.com)

**Dionysios I. Kolaitis**

Mechanical Engineer, Phd

School of Mech. Engineering, N.T.U.A.

Athens, Greece

e-mail: [dkol@central.ntua.gr](mailto:dkol@central.ntua.gr)

**Charis J. Gantes**

Professor

School of Civil Engineering, N.T.U.A.

Athens, Greece

e-mail : [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

**Maria A. Founti**

Professor

School of Mech. Engineering, N.T.U.A.

Athens, Greece

e-mail: [mfou@central.ntua.gr](mailto:mfou@central.ntua.gr)

## Abstract

Traditionally, the fire resistance rating of load-bearing cold-formed steel drywall systems is determined by means of large-scale resistance fire tests, which are significantly cost- and time-consuming. Limited information is available concerning the numerical simulation of the aforementioned furnace tests with finite elements, which is usually performed using two different models for the heat transfer and structural analyses; such an approach employs several assumptions and uncertainties due to the complexity of the assembly's actual configuration and the occurring thermal-structural interaction. In this work, an innovative and advantageous simulation methodology for Cold-Formed Steel drywall system fire tests is proposed, in terms of both accuracy and efficiency, consisting of 3-D finite element models. Transient Thermo-Mechanical Coupled (TMC) analyses accounting for geometry, contact and material nonlinearities are performed on the drywall assembly in order to determine its load-bearing capacity under fire conditions. Temperature-dependent thermal and mechanical properties are also employed in the numerical models. The validity of the proposed simulation methodology is validated using full-scale furnace test results available in the literature; typical and commercially available load-bearing drywall layouts are simulated in the finite element software ADINA.