

ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΪΑΣ**Μαρία-Άννα Α. Σκορδέλη**

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτορας
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
54124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
e-mail : mskordel@civil.auth.gr

Χρήστος Δ. Μπίσμπος

Καθηγητής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
54124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
e-mail: cbisbos@civil.auth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην οριακή ανάλυση χωρικών μεταλλικών πλαισίων υπό συνθήκες πυρκαϊάς. Η εργασία επικεντρώνεται στον υπολογισμό της οριακής θερμοκρασίας που προκαλεί πλαστική κατάρρευση τριδιάστατων πλαισίων και γενικεύει ανάλογη τεχνική για διδιάστατα (επίπεδα) πλαίσια από την διεθνή βιβλιογραφία. Το πρόβλημα μορφώνεται ως ειδικό πρόβλημα οριακής ανάλυσης με την τάση διαρροής γραμμικώς εξαρτώμενη από την θερμοκρασία. Τα κριτήρια διαρροής των διατομών ελέγχου θεωρούνται γραμμικοποιημένα, οπότε προκύπτει πρόβλημα γραμμικού μαθηματικού προγραμματισμού, το οποίο επιλύεται με σύζευξη τυποποιημένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και αντίστοιχου λογισμικού υπολογιστικής βελτιστοποίησης. Παρατίθεται μικρό αριθμητικό παράδειγμα διόροφου χωρικού πλαισίου και σχολιάζεται η χρησιμότητα της μεθόδου.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξασφάλιση επαρκών περιθωρίων ασφάλειας έναντι πλαστικής κατάρρευσης των μεταλλικών κατασκευών υπό συνθήκες πυρκαϊάς εμπεριέχεται στους κεντρικούς στόχους του αντιπυρικού τους σχεδιασμού (βλ. π.χ. [1-2]).

Η οριακή ανάλυση (limit analysis) – καθώς και η γενίκευση της που είναι γνωστή ως ανάλυση προσαρμογής (shakedown analysis) - αποτελούν δόκιμες τεχνικές της υπολογιστικής πλαστικότητας για τον έλεγχο των περιθωρίων ασφάλειας των κατασκευών έναντι πλαστικής αστοχίας (βλ. π.χ. [3]). Επειδή τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα, - όπως το μέτρο ελαστικότητας και η τάση διαρροής - είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας, απαιτούνται ειδικές διατυπώσεις των προβλημάτων οριακής ανάλυσης υπό συνθήκες πυρκαϊάς. Σχετικά έχουν αναπτυχθεί ειδικές προσεγγίσεις της οριακής ανάλυσης

και ανάλυσης προσαρμογής με κύρια μέχρι σήμερα εφαρμογή στις μηχανολογικές κατασκευές, όπως π.χ. σωληνώσεις υπό πίεση και θερμικά φορτία (βλ. π.χ. [4-5]).

Πρόσφατα εμφανίστηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία εργασίες που προτείνουν την εφαρμογή της οριακής ανάλυσης στον υπολογισμό της οριακής θερμοκρασίας που προκαλεί την πλαστική κατάρρευση μεταλλικών πλαισίων υπό πυρκαϊά. Έτσι, στην Εργασία [6] προτείνεται καταρχήν συνδυασμός ελαστικών και πλαστικών μεθόδων (οριακής ανάλυσης) για την αριθμητική προσομοίωση κατασκευών από χάλυβα σε συνθήκες πυρκαϊάς.

Στην Εργασία [7] χρησιμοποιείται το μεθοδολογικό πλαίσιο συνδυασμού της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και του γραμμικού μαθηματικού προγραμματισμού (βλ. [3]) για τον υπολογισμό των πλαστικών οριακών θερμοκρασιών διδιάστατων χαλύβδινων πλαισίων με ημιάκαμπτους κόμβους. Τα κριτήρια διαρροής των διατομών θεωρούνται γραμμικοποιημένα (απλές γραμμικές σχέσεις πλαστικής αλληλεπίδρασης $N-M_y$). Αντίστοιχα απομειωμένα κριτήρια λαμβάνονται για τους ημιάκαμπτους κόμβους. Η τάση διαρροής θεωρείται γραμμικά εξαρτώμενη από την θερμοκρασία (τριγραμμικό διάγραμμα κατά προσέγγιση των σχέσεων του EC3).

Ο υπολογισμός της πλαστικής οριακής θερμοκρασίας αποτελεί βεβαίως το πρώτο βήμα για μια πλήρη ανάλυση, καθόσον πρέπει να ακολουθήσει α) η ανάλογη ανάλυση με αντίστοιχα μειωμένο μέτρο ελαστικότητας και β) η υπολογιστική κάλυψη φαινομένων απώλειας της ελαστικής ευστάθειας.

Η παρούσα εργασία επεκτείνει την Εργασία [7] σε χωρικούς φορείς. Χρησιμοποιείται η ειδική μόρφωση του προβλήματος οριακής ανάλυσης που είναι ανάλογη του προβλήματος προσαρμογής κατά την [8]. Οι κόμβοι θεωρούνται απολύτως άκαμπτοι για λόγους απλότητας καθόσον η επέκταση στο πνεύμα της [7] είναι άμεση. Στο υπολογιστικό προσομοίωμα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται τριδιάστατα τρίκομβα πεπερασμένα στοιχεία δοκού Timoshenko με δύο σημεία αριθμητικής ολοκλήρωσης (σημεία Gauss) που αποτελούν και τα σημεία ελέγχου της έντασης [9]. Όσον αφορά το μέρος της υπολογιστικής βελτιστοποίησης, σημειώνεται ότι τα προκύψαντα προβλήματα μαθηματικού γραμμικού προγραμματισμού επιλύθηκαν στην εργασία αυτή με το λογισμικό MOSEK[10].

3. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΠΥΡΚΑΪΑΣ

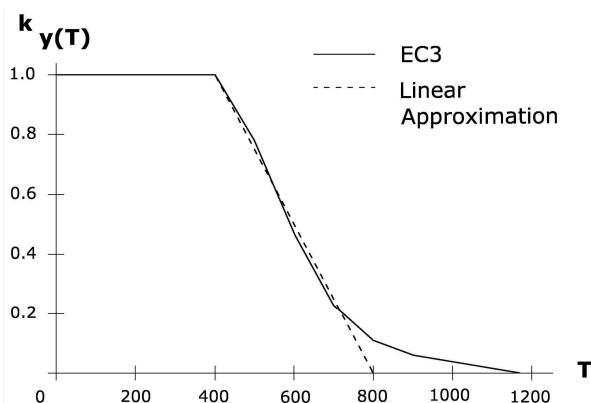
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα (τάση διαρροής, μέτρο Young) απομειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στους διεθνείς κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένου του EC3, ορίζονται μειωτικοί συντελεστές συναρτήσεων των οποίων εκφράζονται τα παραπάνω μεγέθη σε αυξημένη θερμοκρασία. Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη μόνον η εξάρτηση της τάσης διαρροής από την θερμοκρασία.

Έστω $f_{y(20)}$ η τάση διαρροής του χάλυβα σε θερμοκρασία 20 °C. Σε θερμοκρασία πυρκαϊάς T, η μειωμένη τάση διαρροής $f_{y(T)}$ δίνεται από την σχέση:

$$f_{y(T)} = k_{y(T)} f_{y(20)} \quad (1)$$

όπου $k_{y(T)}$ είναι ο μειωτικός συντελεστής της τάσης διαρροής όπως ορίζεται στον EC3 [1]. Για λόγους απλότητας στους υπολογισμούς, υιοθετείται η προσέγγιση του Σχ. 1 [7], η οποία περιγράφεται από τις σχέσεις:

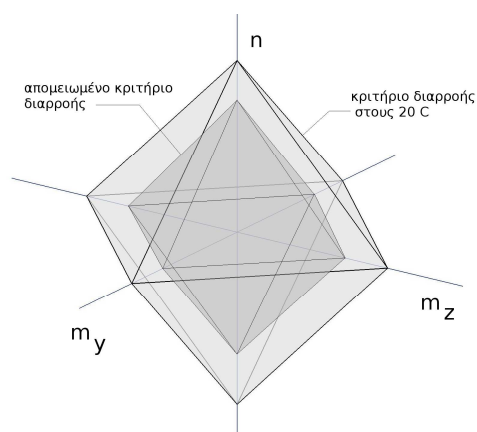
$$\begin{aligned} k_{y(T)} &= k_1 = 1, & T \leq 400^\circ \\ k_{y(T)} &= k_{2(T)} = 2,0267 - (0,76/300) T, & 400^\circ \leq T < 800^\circ \\ k_{y(T)} &= k_3 = 0, & 800^\circ \leq T \leq 1200^\circ \end{aligned} \quad (2)$$



Σχ. 1: Μειωτικός συντελεστής $k_{y(T)}$ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

Έστω ότι στα πλαίσια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ελέγχεται η j -θέση (διατομή) ελέγχου ενός χωρικού πλαισίου Ω , διακριτοποιημένου με NE στοιχεία δοκού και NG διατομές ελέγχου συνολικά. Στην ενλόγω j -θέση ορίζεται το τοπικό διάνυσμα έντασης της διατομής $s_j = (N, V_Y, V_Z, M_T, M_X, M_Y)^T$ που πρέπει να ικανοποιεί το τοπικό κριτήριο διαρροής.

Στην παρούσα εργασία, ως κριτήριο διαρροής εφαρμόζεται η απλή σχέση γραμμικής αλληλεπίδρασης του EC3 που αφορά δοκούς διατομής διπλού T υπό διπλή κάμψη και αξονική δύναμη. Σε συνθήκες πυρκαϊάς ο συντελεστής $k_{y(T)}$ μειώνει την τάση διαρροής και συνεπώς και τις επιμέρους φέρουσες ικανότητες $N_{pl,Rd}$ κτλ (βλ. Σχ.2).



Σχ. 2: Απομειωμένο κριτήριο διαρροής δοκων κατά EC3 σε θερμοκρασία T.

Το προκύπτον γραμμικό κριτήριο διαρροής είναι μορφής αδάμαντος και μπορεί να εκφραστεί ως ένα σύνολο 8 ανισοτήτων της μορφής:

$$\mathbf{N}_j^T \mathbf{s}_j \leq \mathbf{k}_{oj(T)}, \quad j=1, \dots, NG, \quad \mathbf{k}_{oj(T)} = k_{y(T)} \mathbf{k}_{oj(20)} \quad (3)$$

Το μητρώο \mathbf{N}_j έχει ως στήλες τα συνημίτονα κατεύθυνσης των 8 επιφανειών του κριτηρίου ενώ το διάνυσμα $\mathbf{k}_{oj(20)}$ έχει 8 συνιστώσες και αποτελείται από θετικές ποσότητες πλαστικής αντοχής (αποστάσεις της αρχής των αξόνων από τα επιμέρους επίπεδα).

4. ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΪΑΣ

Έστω το χωρικό μεταλλικό πλαίσιο Ω , διακριτοποιημένο με NU ελεύθερους βαθμούς ελευθερίας και NE στοιχεία ράβδου. Το κάθε στοιχείο ράβδου έχει $NGE = 2$ σημεία Gauss (G.P.), οπότε το πλαίσιο Ω έχει συνολικά $NG = 2(NE)$ τέτοια σημεία.

Στο πλαίσιο Ω ξεσπά τοπικά πυρκαϊά και τα περιβάλλοντα στοιχεία αποκτούν τη θερμοκρασία αναφοράς T_0 . Την στιγμή εκείνη, στο φορέα ασκούνται κατακόρυφα φορτία \mathbf{p}_p . Η θερμοκρασία T_0 καθώς και η φόρτιση \mathbf{p}_p παράγουν στη j -θέση τις ελαστικές τάσεις \mathbf{v}_j και \mathbf{p}_j . Η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη (ζητούμενη) μέγιστη θερμοκρασία κατάρρευσης T . Η ελαστοπλαστική ένταση \mathbf{s}_j για τη θερμοκρασία T , η οποία πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο διαρροής, δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{s}_j = T \left(\frac{1}{T_0} \right) \mathbf{v}_j + \mathbf{p}_j + \rho_j, \quad j=1, \dots, NG \quad (4)$$

Τα διανύσματα ρ_j συναποτελούν το πεδίο παραμένουσων τάσεων ρ που αποτελεί αυτένταση και οφείλει να ικανοποιεί τη συνθήκη του μηδενικού υπόχωρου (βλ. και [9]):

$$\sum_{j=1}^{NG} w_j \mathbf{B}_j^T \rho_j = 0, \quad j=1, \dots, NG \quad (5)$$

όπου w_j είναι το βάρος αριθμητικής ολοκλήρωσης στη j -θέση ελέγχου και \mathbf{B}_j είναι το τοπικό μητρώο παραμορφώσεων – μετακινήσεων.

Το πρόβλημα της οριακής ανάλυσης του χωρικού πλαισίου σε συνθήκες πυρκαϊάς με γραμμικά κριτήρια διαρροής ανάγεται πλέον στο ακόλουθο γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με αγνώστους την θερμοκρασία κατάρρευσης T και το αυτεντατικό πεδίο τάσεων ρ :

$$\max T, \quad \text{υπό τους περιορισμούς:} \quad (6a)$$

$$\sum_{j=1}^{NG} w_j \mathbf{B}_j^T \rho_j = \mathbf{0} \quad (6b)$$

$$\mathbf{N}_j^T \rho_j + \mathbf{N}_j^T \mathbf{p}_j + T (1/T_0) \mathbf{N}_j^T \mathbf{v}_j \leq \mathbf{k}_{oj(20)} k_{2(T)} \quad j=1, \dots, NG1 \quad (6c)$$

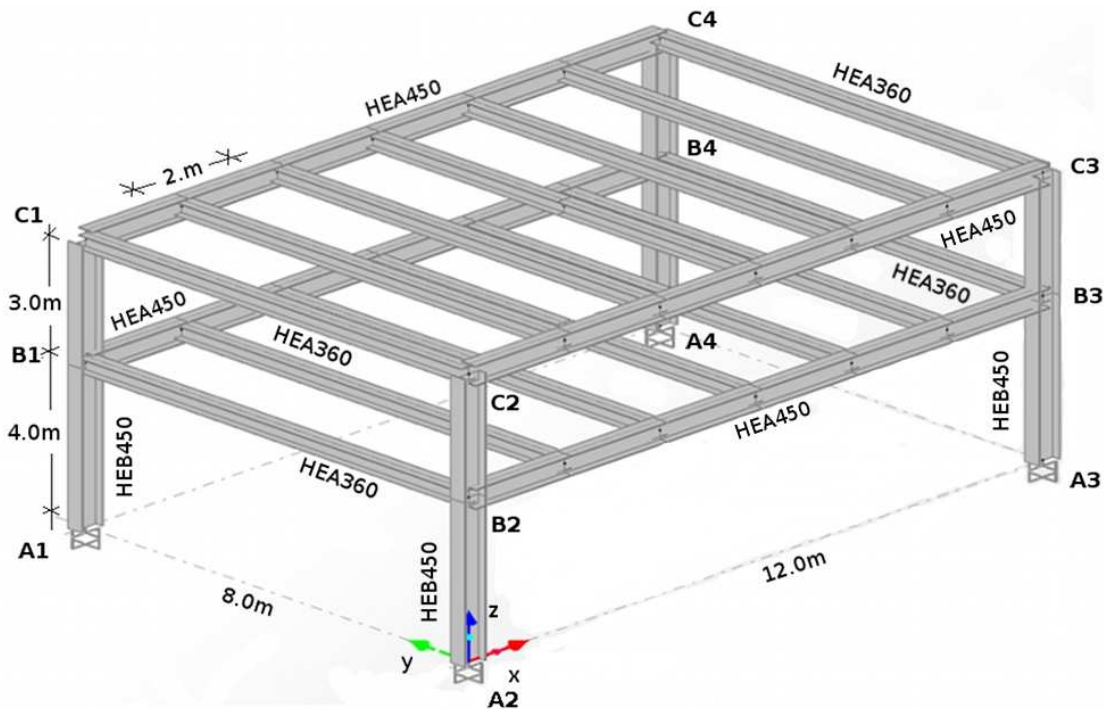
$$\mathbf{N}_j^T \rho_j + \mathbf{N}_j^T \mathbf{p}_j + T (1/T_0) \mathbf{N}_j^T \mathbf{v}_j \leq \mathbf{k}_{oj(20)} \quad j=NG1+1, \dots, NG \quad (6d)$$

όπου αριθμούνται πρώτες οι $NG1$ διατομές ελέγχου, οι οποίες υποβάλλονται σε αύξηση της θερμοκρασίας. Στην (6c) χρησιμοποιείται από την (2) ο συντελεστής $k_{2(T)}$, καθόσον θεωρείται πως η αναμενόμενη θερμοκρασία κατάρρευσης θα εμπίπτει στην μεσαία

περιοχή: $400^{\circ} \leq T < 800^{\circ}$. Η ανωτέρω διατύπωση αποτελεί εναλλακτική διατύπωση του προβλήματος οριακής ανάλυσης, η οποία είναι σύμμορφη με το γενικότερο πρόβλημα της ανάλυσης προσαρμογής (βλ. και [9]) και η ζητούμενη μέγιστη θερμοκρασία T επέχει τον ρόλο του συντελεστή ασφάλειας της οριακής ανάλυσης.

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση διάωροφου χαλύβδινου κτιρίου με τέσσερεις στύλους σε συνθήκες πυρκαϊάς.



Σχ. 1: Μεταλλικό διάωροφο κτίριο

Το κτίριο της εφαρμογής είναι κατασκευασμένο από χάλυβα S235. Το μέτρο ελαστικότητας στους 20°C λήφθηκε $E = 210 \text{ GPa}$ και ο λόγος του Poisson $\nu = 0.3$. Η σύνδεση των δοκών με τις πλάκες σκυροδέματος του 1ου και 2ου ορόφου πραγματοποιείται με απλή έδραση, χωρίς την ανάπτυξη σύμμικτης λειτουργίας. Επιπλέον, το κτίριο δεν παρουσιάζει διαφραγματική λειτουργία. Επομένως, θα χρησιμοποιηθεί τόσο για τους στύλους όσο και για τις δοκούς το απλοποιημένο γραμμικό κριτήριο διαρροής διατομών του Σχ. 2, όπως ορίστηκε προηγουμένως.

Η πλάκα B1-B2-B3-B4 δέχεται μόνιμο φορτίο $g = 3.5 \text{ kN/m}^2$ και κινητό $q = 5 \text{ kN/m}^2$ ενώ η πλάκα C1-C2-C3-C4 δέχεται μόνιμο φορτίο $g = 4.5 \text{ kN/m}^2$ και κινητό $q = 1.5 \text{ kN/m}^2$. Τα φορτία παραλαμβάνονται από τις διαδοκίδες μήκους 8m και στη συνέχεια μεταφέρονται ως μοναχικά φορτία στις κύριες δοκούς, μήκους 12m.

Στα πλαίσια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, ο φορέας, μετά την αφαίρεση των διαδοκίδων, διακριτοποιείται με το 3κομβο στοιχείο δοκού του Timoshenko [10]. Η ένταση ελέγχεται στα 2 σημεία Gauss του κάθε στοιχείου. Οι κύριες δοκοί 12m

διακριτοποιήθηκαν με 12 ισομήκη στοιχεία δοκού, ενώ οι δοκοί 8m με 8 στοιχεία δοκού. Οι στύλοι 4m και 3m διακριτοποιήθηκαν με 8 και 6 στοιχεία δοκού αντίστοιχα.

Στο κτίριο ξεσπάει πυρκαϊά και τη στιγμή της πυρκαϊάς θεωρούμε πως το κτίριο καταπονείται με φόρτιση $\varphi_p = g + 0.5q$. Αρχικά υπολογίζονται τα περιθώρια ασφαλείας της κατασκευής σε οριακή ανάλυση μόνο για τη φόρτιση φ_p και λαμβάνεται ο παρακάτω συντελεστής ασφαλείας:

$$\text{Φόρτιση } \varphi_p: \quad \alpha = 3.4216$$

Στην συνέχεια εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις για την πυρκαϊά:

- α) η πυρκαϊά ξεσπάει στον 1ο όροφο του κτιρίου και δεν έχει ληφθεί κανένα μέτρο πυροπροστασίας των στύλων και των δοκών.
- β) η πυρκαϊά ξεσπάει στον 1ο όροφο του κτιρίου και οι στύλοι είναι προστατευμένοι
- γ) η πυρκαϊά ξεσπάει στον 2ο όροφο του κτιρίου και δεν έχει ληφθεί κανένα μέτρο πυροπροστασίας των στύλων και των δοκών.
- δ) η πυρκαϊά ξεσπάει στον 2ο όροφο του κτιρίου και οι στύλοι είναι προστατευμένοι
- ε) η πυρκαϊά ξεσπάει στον 1ο όροφο του κτιρίου και η θερμοκρασία των δοκών είναι ίση με 0.8 της θερμοκρασίας των στύλων.
- ζ) η πυρκαϊά ξεσπάει στον 2ο όροφο του κτιρίου και η θερμοκρασία των δοκών είναι ίση με 0.8 της θερμοκρασίας των στύλων.

Η θερμοκρασία κατάρρευσης του κτιρίου υπολογίστηκε για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα σενάρια και παρατίθεται στον Πίν. 1. Σε κάθε περίπτωση η πυρκαϊά πλήττει τους περιβάλλοντες στύλους και δοκούς του ορόφου που εμφανίζεται. Στις περιπτώσεις (ε) και (ζ) η αναγραφόμενη θερμοκρασία του Πίν. 1 αφορά τους στύλους.

Περίπτωση πυρκαϊάς	(α)	(β)	(γ)	(δ)	(ε)	(ζ)
T (°C)	684,646	684,646	684,646	684,646	777,129	789,334

Πίν. 1: Θερμοκρασία κατάρρευσης για τις περιπτώσεις (α) – (ζ)

Οι περιπτώσεις (α), (β), (γ) και (δ) παρουσιάζουν κοινό μηχανισμό κατάρρευσης με τις πλαστικές αρθρώσεις να σχηματίζονται στα άκρα και στο μέσο των δοκών B1-B4 και B2-B3. Η θερμοκρασία κατάρρευσης είναι κοινή και για τις 4 αυτές περιπτώσεις, όπως ήταν αναμενόμενο με δεδομένο τον κοινό μηχανισμό κατάρρευσης.

Η αύξηση της θερμοκρασίας των στύλων στις περιπτώσεις (ε) και (ζ) οδηγεί σε μηχανισμό κατάρρευσης στύλων. Έτσι στην περίπτωση (ε) οι πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στους 4 στύλους του 1ου ορόφου ενώ στην (ζ) στους στύλους του 2ου ορόφου. Οι στύλοι του 2^{ου} ορόφου αστοχούν σε μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τους στύλους του 1^{ου} ορόφου, καθώς η ένταση που αναπτύσσεται σε αυτούς λόγω κατακόρυφων φορτίων είναι μικρότερη.

6. ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε μεθοδολογία υπολογισμού της πλαστικής οριακής θερμοκρασίας χωρικών μεταλλικών πλαισίων σε συνθήκες πυρκαϊάς. Το πρόβλημα υπολογισμού της μέγιστης θερμοκρασίας κατάρρευσης μορφώνεται ως ειδικό πρόβλημα οριακής ανάλυσης και ανάγεται σε γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού. Στην αριθμητική εφαρμογή παρουσιάστηκε η αξία της τεχνικής για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κατάρρευσης με απλό τρόπο, χωρίς γνώση της εξέλιξης της πυρκαϊάς ή προαπαιτούμενη θερμική ανάλυση της κατασκευής. Σε επόμενες εργασίες θα παρουσιαστούν και οι ανάλογες τεχνικές που απαιτούνται για την πλήρη υπολογιστική προσομοίωση, όπως συνοπτικά αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να εκφράσουν τις ευχαριστίες τους προς την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας για την οικονομική υποστήριξη που παρασχέθηκε στα πλαίσια της Επιστημονικής Συνεργασίας Ελλάδας-Τσεχίας (Έρευνητ. Πρόγραμμα #4.3.6.1γ-201: «Large-scale computational optimization techniques in the evaluation of behaviour and bearing capacity of civil and mechanical engineering structures”).

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Eurocode 3 (EC3). *Design of steel structures. Draft prEN 1993-1-2:2002 General rules – Structural fire design*, 2002, CEN, Brussels.
- [2] FRANSSEN J.-M. and ZAHARIA R. *Design of Steel Structures subjected to Fire: Background and Design Guide to Eurocode 3*, 2006, University of Liège, Liège.
- [3] COHN M.Z. and MAIER G. (Eds) *Engineering plasticity by mathematical programming*, 1977, Pergamon Press, New York.
- [4] GOKHFELD D.A. and CHERNIAVSKY O.F. *Limit analysis of structures at thermal cycling*, 1980, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands.
- [5] BORINO G., “Consistent shakedown theorems for materials with temperature dependent yield function”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, 2000, pp. 3121-3147.
- [6] WONG M.B. “Elastic and plastic methods for numerical modeling of steel structures subject to fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 57, 2001, pp. 1-14.
- [7] VIMONSATIT V., TAN K. H. and TING S. K. ‘Plastic Limit Temperatures of Flexibly Connected Steel Frames: A Linear Programming Problem’, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, 2003, pp. 79-86
- [8] BISBOS C.D. and AMPATZIS A.T. “Shakedown analysis of spatial frames with parameterized load domain”, *Engineering Structures*, 2008 (accepted).
- [9] BATHE K.-J. *Finite Element Procedures*, 1996, Prentice-Hall, New Jersey.
- [10] MOSEK ApS (2008), *The MOSEK optimization tools version 5.0 (Revision 79)*, available from <http://www.mosek.com>.

LIMIT ANALYSIS OF 3D STEEL FRAMES UNDER FIRE

Maria-Anna A. Skordeli

Civil Engineer, Graduate Student
Institute of Metal Structures, Dept. of Civil Eng., Aristotle University
54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: cbisbos@civil.auth.gr

Christos D. Bisbos

Professor
Institute of Metal Structures, Dept. of Civil Eng., Aristotle University
54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: cbisbos@civil.auth.gr

SUMMARY

This paper addresses the problem of limit analysis of spatial steel frames exposed to fire, extending the respective work of Vimonsatit et al. [1], which concerns two dimensional structures.

Since elevated temperatures alter the mechanical properties of steel, the yield surface is temperature-dependent and the overall strength of the structure decreases. In this work, we adopt a linearized dependency of the yield stress on the temperature. Furthermore, linearized yield criteria (plastic interaction curves for $N-M_Y-M_Z$) are considered in the simple form of diamond-shaped regions. Under these conditions, the problem of determination of the plastic limit temperature of the spatial frame is a special limit analysis problem within the general framework of geometrically linear displacement FEM. This limit analysis problem is a linear programming problem, which can be solved by appropriate methods.

The present work uses standard spatial beam-column finite elements with three nodes and two Gauss integration points per element. The elastic stresses of the spatial frame and the local strain-displacement matrices at the various Gauss points serve as the main input for the commercial interior-point linear programming solver MOSEK.

The proposed method is simple, efficient and less time-consuming and computationally expensive than step-by-step analysis. Its functionality and effectiveness are presented through a simple example of a 2-storey 3D frame.