| I.  | POGLAVJE : TOPLOTNI IN MEHANSKI VPLIVI V PRIMERU POŽARA      | 5  |
|-----|--|----|
| 1   | UVOD   | 5  |
| 2   | METODOLOGIJA   | 7  |
| 2.1 | Uvod   | 7  |
| 2.2 | Cilji  | 8  |
| 2.3 | Računska metoda za določitev razvoja požara                  | 8  |
| 2.4 | Obnašanje konstrukcij med požarom                            | 9  |
| 2.5 | Vhodni podatki   | 9  |
| 3   | KARAKTERISTIKE POŽARNIH SEKTORJEV                            | 9  |
| 3.1 | Uvod   | 9  |
| 3.2 | Mejni elementi požarnega sektorja                            | 10 |
| 3.3 | Toplotne karakteristike zidov                                | 10 |
| 3.4 | Karakteristike odprtin                                       | 13 |
| 3.5 | Mehansko prezračevanje                                       | 13 |
| 4   | LASTNOSTI POŽARA   | 13 |
| 4.1 | Požarna obtežba  | 13 |
| 4.2 | Vrsta požara   | 16 |
| 4.3 | Projektni požar  | 17 |
| 5   | VERJETNOSTNI PRISTOP   | 20 |
| 5.1 | Uvod   | 20 |
| 5.2 | Statistika   | 21 |
| 5.3 | Verjetnosti  | 21 |
| 5.4 | Postopek   | 23 |
| 6   | IZRAČUN RAZVOJA POŽARA                                       | 29 |
| 6.1 | Uvod   | 29 |
| 6.2 | Lokaliziran požar  | 29 |
| 6.3 | POLNO RAZVIT POŽAR   |    |
| 6.4 | Kombinacija enoconskega in dvoconskega modela. Izbira modela | 40 |
| 7   | MEHANSKI VPLIVI PO EVROKODIH                                 | 42 |
| 8   | ZAKLJUČEK  | 44 |
| 9   | REFERENCE  | 45 |

| II.<br>OB      | POGLAVJE: TERMIČNI ODZIV KONSTRUKCIJE PRI<br>REMENITVI   | <b>POŽARNI</b>                |
|----------------|--|-------------------------------|
| 1              | UVOD   | 47                            |
| 2              | OSNOVNE ENAČBE IN PRIMERI  |                               |
| 3              | ANALIZA JEKLENIH ELEMENTOV   | 50                            |
| 3.1            | Uvod   |                               |
| 3.2            | Nezaščitena jeklena konstrukcija   |                               |
| 3.3            | Zaščitena jeklena konstrukcija   | 54                            |
| 3.4            | Projektni parametri za izračun temperature   | 55                            |
| 4              | ANALIZA SOVPREŽNIH ELEMENTOV   |                               |
| 4.1            | Uvod   |                               |
| 4.2            | Enostavna pravila za toplotni odziv sovprežnega stebra z delno zaprtim je<br>61                          | klenim profilom               |
| 4.3            | Izolacijski kriterij za sovprežne betonske plošče s profilirano jekleno ploče                            | evino61                       |
| 4.4<br>ploč    | Računska pravila za izračun armature v sovprežni betonski plošči z jek<br>ževino                         | leno profilirano64            |
| 4.5<br>prof    | Model toplotnega odziva za račun požarne odpornosti sovprežnega stebr<br>fili (SHS) zapolnjeni z betonom | a – jekleni votli<br>66       |
| 4.6            | Povzetek   |                               |
| VIR            | ۲  | 69                            |
| DO             | DATEK A: FOURIERJEVA DIFERENCIALNA ENAČBA  | 71                            |
| DO<br>ENA      | DATEK B: TOPLOTNI ODZIV JEKLENEGA ELEMENTA OB PRI<br>AKOMERNE RAZPOREDITVE TEMPERATURE V JEKLU           | EDPOSTAVKI<br>72              |
| DO<br>UP<br>PL | DATEK D: PRAVILA POŽARNOODPORNEGA PROJEK<br>OŠTEVANJEM TOPLOTNE IZOLACIJE SOVPREŽIH PLOŠČ S P<br>OČEVINO | ΓIRANJA Z<br>ROFILIRANO<br>75 |
| DO<br>SOV      | DATEK E: IZRAČUN ARMATURE ZA PREVZEM POZITIVNEGA<br>VPREŽNI PLOŠČI S PROFILIRANO JEKLENO PLOČEVINO       | MOMENTA V<br>77               |
| III.<br>OB     | POGLAVJE: MEHANSKI ODZIV KONSTRUKCIJE PR<br>REMENITVI  | [ POŽARNI<br>78               |
| 1              | UVOD   |                               |
| 2<br>SOV       | SPLOŠNA NAČELA POŽARNEGA PROJEKTIRANJA JE<br>VPREŽNIH KONSTRUKCIJ  | KLENIH IN<br>80               |
| 2.1<br>prin    | Osnovne značilnosti določevanja mehanskega odziva jeklenih in sovprežr<br>neru požara                    | ih konstrukcij v<br>80        |

| 2.2  | Mehanski vplivi – Obtežne kombinacije v skladu z Evrokod standardi  |
|--|---|
| 2.3  | Osnovne materialne lastnosti jeklenih in sovprežnih konstrukcij pri povišani temperaturi 82   |
| 2.4  | Metode preverjanja mehanskega odziva konstrukcij v primeru požara   |
| 3<br>JEI   | OSNOVNI OPIS RAČUNSKIH MODELOV ZA ANALIZO ELEMENTOV<br>KLENIH IN SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ91   |
| 3.1  | Uporaba tabel91   |
| 3.2  | Enostavni računski modeli93   |
| 3.3  | Metoda kritične temperature96   |
| 3.4  | Napredni računski modeli99  |
| 4  | OSNOVE GLOBALNE ANALIZE KONSTRUKCIJE101   |
| 4.1  | Osnovne značilnosti globalne analize konstrukcij101   |
| 4.2<br>ali s   | Posebne zahteve glede uporabe naprednih računskih modelov v globalni analizi jeklenih sovprežnih konstrukcij  |
| 4.3  | Primer globalne analize jeklenih in sovprežnih konstrukcij104   |
| 5<br>KO  | POSEBNOSTI POŽARNEGA PROJEKTIRANJA JEKLENIH IN SOVPREŽNIH<br>Instrukcij   |
| 6  | REFERENCE112  |
| <b>I</b> V   | POCLAVIE 1. RAČUNALNIŠKI PROCRAMI ZA POŽARNO ANALIZO  |
| KO   | NSTRUKCIJ   |
| KO   | UVOD  |
| 1v.<br>KO<br>1<br>2  | UVOD  |
| <ul> <li>IV.</li> <li>KO</li> <li>1</li> <li>2</li> <li>2.1</li> </ul>   | Instrukcij  |
| <ol> <li>KO</li> <li>1</li> <li>2</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> </ol>   | Interview       Interview |
| <ol> <li>KO</li> <li>1</li> <li>2</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> </ol>  | Interview       Interview |
| <ol> <li>KO</li> <li>1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> </ol>  | Interview       Interview |
| IV.         KO         1         2         2.1         2.2         2.3         2.4         2.5   | Interview       Interview |
| IV.         KO           1         2           2.1         2.2           2.3         2.4           2.5         3                         | NSTRUKCIJ   |
| Iv.       KO         1       2         2.1       2.2         2.3       2.4         2.5       3         3.1                               | <b>IOOLAVJE 4.</b> RACCHARINISKI TROORAMI ZA TOZARIO ANALIZO <b>INSTRUKCIJ</b>  |
| IV.       KO         1       2         2.1       2.2         2.3       2.4         2.5       3         3.1       3.2                     | 1001LAVJE       4. KACOVALIVISKI TROGRAMI ZA TOZAKIO AKALIZO         0NSTRUKCIJ   |
| Iv.       KO         1       2         2.1       2.2         2.3       2.4         2.5       3         3.1       3.2         3.3         | 1001LAVJE       4.       RACUNALINISKI       11001LAUJE       113         0NSTRUKCIJ  |
| Iv.       KO         1       2         2.1       2.2         2.3       2.4         2.5       3         3.1       3.2         3.3       4 | 1001LAVJE       4.       RACONALIUSKI       TROORAMI 2A       1022ARRO       ANALIZO         NSTRUKCIJ  |

| 4.2  | Petnajst računalniških programov:                        | 131 |
|------|--|-----|
| 5    | ANEKS I: PROGRAMSKA OPREMA                               |     |
| 5.1  | DIFISEK-EN 1991-1-2 Annex A                              |     |
| 5.2  | FAST/CFAST:  |     |
| 5.3  | OZONE  |     |
| 5.4  | FDS - Fire Dynamics Simulator & Smokeview:               |     |
| 5.5  | AFCB (Požarno odporno projektiranje sovprežnih nosilcev) |     |
| 5.6  | AFCC (Composite Column Fire Design)                      | 141 |
| 5.7  | Elefir:  | 144 |
| 5.8  | Elefir-EN:   |     |
| 5.9  | H-Fire   | 146 |
| 5.10 | Potfire (ID št. 81):                                     |     |
| 5.11 | ABAQUS   | 149 |
| 5.12 | BoFire   | 151 |
| 5.13 | Evacnet4:  |     |

# I.POGLAVJE : Toplotni in mehanski vplivi v primeru požara

O. Vassart, L.G. Cajot & M. Brasseur

ArcelorMittal, Esch/Alzette, Grand-Duchy of Luxembourg

# 1 UVOD

V šestdesetih letih 20. st. so številni dramatični požari, kot so požar v supermarketu "Innovation" v Bruslju, ki je terjal 300 življenj in požar v diskoteki 'Le cinq Sept' v mestu Saint-Laurent-du-Pont v Franciji, pripeljali do uvedbe številnih novih predpisov po celi Evropi.

Sedanji predpisi obravnavajo številna področja, vključno z:

- načini evakuacije,
- širjenje požara: vključuje "požarno odpornost" in "odziv na požar",
- požarna odpornost konstrukcije v časovnem intervalu, R30, 60, 90 ali 120,
- prezračevalni sistemi za črpanje dima in toplote,
- aktivni protipožarni ukrepi, kot so ročne gasilne naprave, detektorji dima, šprinklerji in
- dostop za gasilce.

Čeprav sta splošna miselnost in splošna predstava o požarni varnosti v Evropi enaki, predpisi niso enaki. To je bilo ugotovljeno v okviru projekta NFSC1 [11] in nato potrjeno s projektom ECSC "Risk Based Fire Requirements" [18]. Na primer, za eno etažno stavbo, je v Španiji predpisana požarna odpornost razreda R120 medtem, ko v Švici požarna odpornost ni zahtevana [18]. Za srednje visoke pisarniške objekte je predpisana požarna odpornost na Nizozemskem R60, v Franciji pa R120 [11]. Glavni parametri za določitev zahtev so višina in zasedenost objekta, ki se nanaša na število ljudi in vrsto dejavnosti v objektu. Požarna odpornost bi morala temeljiti na parametrih, ki vplivajo na širjenje in razvoj požara. Ti vključujejo:

- požar [verjetnost nastanka požara, širjenje požara, trajanje požara, požarna obtežba, resnost požara...],
- prezračevalne pogoje,
- požarno območje (tip, velikost, geometrija),
- tip konstrukcijskega elementa,
- evakuacijske pogoje,
- varnost reševalnih ekip,
- ogroženost sosednjih objektov in
- aktivne protipožarne ukrepe.

Sedanji predpisi ne upoštevajo v zadostni meri vpliva šprinklerjev pri dušenju ali gašenju požara. Zbrani podatki [11, 18] kažejo, da sedanji predpisi v večini primerov požarno ogroženost obravanavajo enako, ne glede ali so šprinklerji prisotni ali ne. V okviru različnih raziskovalnih projektov ECSC-ja in na podlagi "Koncepta požarne varnosti na osnovi naravnega požara" [11, 12, 13, 18] je bil razvit bolj realističen in verodostojen pristop k analizi požarne varnosti konstrukcije ob upoštevanju aktivnih protipožarnih ukrepov in dejanskih požarnih karakteristik. Ta metodologija je bila razvita na osnovi statističnega, verjetnostnega in determinističnega pristopa in analize. Metoda je uporabna za vse gradbene materiale in konstrukcije.

Slika 1.1 prikazuje primerjavo med "naravnimi" požarnimi krivuljami pri različnih konfiguracijah (velikost prostora, požarne obtežbe, zaščita sten, karakteristike gorenja,...) in standardno ISO požarno krivuljo.



Slika 1.1 Krivulje Temperatura-čas naravnih požarov in ISO-požara

Velika razlika dobljenih rezultatov kaže na težavnost pri razumevanju obnašanja elementov v primeru naravnih požarov, ob upoštevanju podatkov, dobljenih iz ene same ISO požarne krivulje. Karakteristike naravnega požara niso upoštevane v standardni ISO požarni krivulji. Faze naravnega požara so prikazane na Sliki 1.2:

- Začetna faza: vžig in tleče gorenje pri zelo nizki temperaturi s časom trajanja, ki ga je pogosto težko oceniti. (Ta faza ni prikazana na Sliki 1.2)
- Faza naraščanja (lokalni požar): trajanje faze je večinoma odvisno od karakteristik prostora. Požar ostane omejen do potencialnega izbruha.
- Izbruh požara: faza izbruha pomeni izbruh polno razvitega požara. Ta faza je v splošnem zelo kratka.
- Polno razvit požar: trajanje je odvisno od požarne obtežbe in ventilacije.



- Faza pojemanja: požar pojema, dokler vsi gorljivi materiali popolnoma ne zgorijo.

Slika 1.2 Faze naravnega požara.

# 2 METODOLOGIJA

# **2.1** Uvod

Določitev razvoja požara v požarnem sektorju zahteva poznavanje velikega števila parametrov. Številni parametri so določeni s karakteristikami stavbe. Glavna karakteristika, požarna obtežba, je v splošnem funkcija dejavnosti in ne more biti konstantna skozi življenjsko dobo konstrukcije. Požarna obtežba se lahko določi kot statistična porazdelitev. Za projektiranje pri ambientni temperaturi so mehanske obtežbe, kot so lastna teža, koristna obtežba in veter prav tako določene s statistično porazdelitvijo.

Tako je bila požarna varnost v stavbi določena z verjetnostnim pristopom. V globalnem konceptu požarne varnosti na osnovi naravnega požara je cilj določen s ciljno vrednostjo porušitve. Namen ni spremeniti obstoječih varnostnih kriterijev, določenih v predpisih, ampak jih ovrednotiti z ustrezno verjetnostjo porušitve ali varnostnim faktorjem. Za doseg sprejemljivega nivoja varnosti, se lahko uporabi kombinacija aktivnih in pasivnih ukrepov.

Splošna metoda ovrednotenja varnosti temelji na metodi za projektiranje pri ambientni temperaturi in določa računsko požarno obtežbo ob upoštevanju verjetnosti nastanka požara in vpliva aktivnih protipožarnih ukrepov.

Projektna požarna obtežba je potem uporabljena v računskih modelih požara, za določitev obnašanja objekta pri požaru. Modeli za določitev temperature znotraj požarnega sektorja so opisani v tem dokumentu.

# 2.2 Cilji

Cilj je doseči sprejemljiv nivo varnosti. Ta nivo se določi s primerjavo drugih obstoječih življenjskih nevarnosti, vključno s porušitvijo objekta v normalnih okoliščinah. Ciljna verjetnost porušitve objekta v normalnih okoliščinah je  $7,23 \cdot 10^{-5}$  na življenjsko dobo konstrukcije [10]. Cilj je:

# $P_t$ (verjetnost potušitve) $\leq P_t$ (ciljna verjetnost)

Kot je definirano v Evrokodih, je požar nezgodna obtežba. Opravljena je bila obsežna statistična študija z namenom določiti verjetnost nastopa požara. Vžig je funkcija vrste objekta. Ugotovljena je bila tesna povezava med statistikami različnih evropskih držav [11]. Pri pojavu požara lahko pride do porušitve samo takrat, ko požar doseže polno razvito stanje, zato je potrebno določiti verjetnost, da požar to stanje doseže. V tej fazi aktivni ukrepi, kot so stanovalci in gasilci odigrajo zelo pomembno vlogo. To pomeni, da bo v večini primerov požar ustavljen zelo hitro in do širjenja požara na bo prišlo. Učinki aktivnih ukrepov in posredovanja gasilcev v objektu so bili za določitev verjetnosti nastanka polno razvitega požara statistično ocenjeni. Na ta način se glede na uporabljene aktivne (šprinkler, požarno javljanje, ...) in pasivne (razdelitev na požarne sektorje) ukrepe v stavbi, dejavnosti v stavbi in posredovanje gasilcev, projektno požarno obtežbo izračuna iz ciljne verjetnosti. Postopek je natančno razložen v poglavju 5.

# 2.3 Računska metoda za določitev razvoja požara

Obstajajo različni nivoji računskih metod za določanje razvoja požara:

- Enostavni modeli: večinoma parametrski požari
- Sektorski modeli: ti modeli upoštevajo vse glavne parametre za nadzor požara
- Prostorski modeli: preveč kompleksni za splošno uporabo. Vseeno pa so prostorski modeli edino učinkovito orodje za izrazito neregularne geometrije [19].

Predpostavke eno-conskih modelov se nanašajo na posplošen požar z enakomerno temperaturo v požarnem sektorju, medtem ko se dvo-conski modeli nanašajo na slojevit dimni pas zaradi lokaliziranega požara.

Glavni parameter razvoja požara je hitrost sproščanja toplote (RHR – rate of heat release). Hitrost sproščanja toplote je funkcija velikosti požarnega sektorja in dejavnosti ter funkcija časa. Na začetku je požar lokaliziran in v naraščajoči fazi. Začetek faze je opredeljen z razvojem požara, ki je bil določen po  $t^2$ -požarni predpostavki. To pomeni, da je hitrost sproščanja toplote določena s kvadratno enačbo. Stavbe so razvrščene v 4 kategorije, glede na hitrost širjenja požara: počasen, srednji, hiter in ultra-hiter. Hitrost sproščanja toplote bo dosegla maksimalno vrednost, ki ustreza stalnemu stanju, definiranemu za primere prisotnosti goriv ali ventilacije.

Eden od ciljev je ugotoviti razvoj RHR in razložiti ali bo prišlo do izbruha požara, ali pa bo požar ostal lokaliziran. Ko pogoji izbruha požara ali polno razvitega požara niso doseženi, požar ostane

lokaliziran. V tem primeru je za oceno splošnega efekta dimnega sloja uporabljen dvoconski model. Lokalni efekt v bližini požara je prav tako študiran z empiričnimi modeli, razvitimi v raziskavi 'Naravni požar v velikih požarnih conah' [8]. Hasemi [17] je izvedel eksperimentalne raziskave za določitev lokalnih temperaturnih vplivov požara, iz katerih je bila razvita poenostavljena metoda. Kombinacija obeh modelov omogoča določitev temperature v bližnjih in bolj oddaljenih območij od požara.

## 2.4 Obnašanje konstrukcij med požarom

Na osnovi toplotnih vplivov je potrebno izračunati prenos toplote do gradbenih elementov. Uporabimo lahko modele različnih nivojev.

Uporabijo se lahko poenostavljeni modeli, ki uporabljajo račun element/element. V splošnem ti modeli temeljijo na določanju kritične temperature. Pri temperaturi, nižji od kritične, do porušitve ne pride, v nasprotnem primeru pa nastopi porušitev. Pogoju je torej zadoščeno, če je čas za dosego porušitve večji od predpisane izpostavljenosti naravnemu požaru.

Uporabijo se lahko tudi naprednejši modeli, na primer uporaba končnih elementov. Rezultat modela je v splošnem časovni potek deformacij za čas trajanja požara. V nekaterih primerih, je kriterij ustreznosti podan s potekom deformacij.

Poznavanje obnašanja konstrukcije med požarom vključuje oceno območja kriterija ustreznosti, v smislu omejitve deformacij ali poškodb konstrukcije.

Požarna varnost konstrukcije je odvisna od posledic porušitve in od vrste objekta. Za določene visoke več etažne objekte to lahko pomeni, da med celotnim potekom požara ne sme priti do porušitve posameznih konstrukcijskih delov.

Modeli so podrobneje predstavljeni v 3. dokumentu.

## 2.5 Vhodni podatki

Poznane morajo biti značilnosti objekta. Analiza poteka za vsak požarni sektor posebej. Požarnemu sektorju je potrebno poleg geometrije določiti tudi toplotne karakteristike zidov, ki so sposobni akumulirati in prevajati velike količine sproščene energije pri požaru in odprtine, ki omogočajo izmenjavo zraka s prostori izven požarnega sektorja. Nekaj pravil in preglednic za določitev teh podatkov je podano v 3. poglavju.

# **3** KARAKTERISTIKE POŽARNIH SEKTORJEV

### **3.1** Uvod

Pri konceptu požarne varnosti na osnovi naravnega požara projektiranje temelji na fizikalno določenem toplotnem delovanju. V nasprotju z običajnim projektiranjem parametri, kot so velikost požarne obtežbe, količina sproščene toplote in obseg prezračevanja igrajo pomembno vlogo pri projektiranju naravnega požara. V večini objektov je število možnih požarnih scenarijev

neskončno in ga je potrebno zmanjšati. Obravnavani bodo samo "najhujši verodostojni požarni scenariji ". Ko so požarni scenariji izbrani, so na voljo številni modeli za določitev termičnega delovanja.

# 3.2 Mejni elementi požarnega sektorja

Pri konceptu požarne varnosti na osnovi naravnega požara je razvoj požara obravnavan v enem požarnem sektorju. Predpostavimo, da se požar ne bo razširil v druge sektorje. Ali to drži, je odvisno od obnašanja mejnih konstruktivnih elementov pri požaru (tla, stene (vključno z vrati), itd.).

Razumevanje obnašanja teh elementov je zelo pomembno za oceno njihove sposobnosti delovanja kot požarne pregrade. Razpoložljive so naslednje možnosti:

- Ad-hoc testi: element se v peči izpostavi krivulji Temperatura-čas, ki jo določimo s požarnimi modeli, ki temeljijo na najhujšem požarnem scenariju.
- Strokovna ocena: ta pristop temelji na rezultatih ISO-odpornostnih testov na posameznih elementih
- Direktna uporaba ISO-zahtev: nacionalni predpisi definirajo požarne sektorje z ISOpožarno odpornostjo za zidove, strope, vrata in tla, glede na uporabo in geometrijo stavbe.

Prvi dve možnosti se lahko uporabita pri omejenem številu ločilnih elementov in bosta vodili do visokih stroškov. V praksi se pogosto uporablja tretja možnost.

# 3.3 Toplotne karakteristike zidov

Izguba toplote v požarnem sektorju je pomemben faktor pri določanju temperature. Izgube toplote v mejnih elementih požarnega sektorja je posledica konvekcije in radiacije. Toplotne karakteristike zidov morajo biti poznane.

Glavni parametri, ki opisujejo toplotne lastnosti materiala so:

- toplotna kapaciteta  $c_p$ ,
- gostota  $\rho$  in
- prevodnost  $\lambda$ .

Kondukcija in toplotna kapaciteta sta odvisni od temperature.

V poenostavljenih modelih je uporabljena le toplotna vztrajnost, imenovana b-faktor, ki se izračuna iz toplotnih karakteristik po naslednji enačbi (3.1)

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \tag{3.1}$$

Za izračun koeficienta b se lahko vrednosti gostote  $\rho$ , specifičn3 toplotne kapacitete  $c_p$  in toplotne kondukcije  $\lambda$  mejnih elementov lahko vzamejo pri ambientni temperaturi [1].

V primeru, ko je stena sestavljena iz več materialov, je predlagana izpeljava koeficienta b po naslednji metodi:

- Ko je material (2) izoliran s težkim materialom (1), velja  $b_1 < b_2$ , in je koeficient b enak koeficient b materiala 1:  $b = b_1$ .
- V nasprotnem primeru, če je  $b_1 > b_2$ , lahko določimo mejno debelino materiala 1, ki je enaka (3.2):

$$s_{l,lim} = \sqrt{\frac{t_d \lambda_l}{c_l \rho_l}}$$
 kjer je  $t_d$  čas, od začetka požara do faze pojemanja. (3.2)

Koeficient b je potem:

če 
$$s_1 > s_{1,\text{lim}}$$
, potem je  $b = b_1$   
če  $s_1 < s_{1,\text{lim}}$ , potem je  $b = \frac{s_1}{s_{1,\text{lim}}} b_1 + \left(I - \frac{s_1}{s_{1,\text{lim}}}\right) b_2$ 

V preglednici 3.1 so podane toplotne lastnosti najpogosteje uporabljenih materialov, pri različnih temperaturah.

| Material                     | Temperature<br>(°C) | λ<br>(W/m/K) | ρ<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | c <sub>p</sub><br>(J/kg°K) |
|------------------------------|---------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|
| Običajno težek beton         | 20                  | 2            | 2300                      | 900                        |
|                              | 200                 | 1,63         | 2300                      | 1022                       |
|                              | 500                 | 1,21         | 2300                      | 1164                       |
|                              | 1000                | 0,83         | 2300                      | 1289                       |
| Lahki beton                  | 20                  | 1            | 1500                      | 840                        |
|                              | 200                 | 0,875        | 1500                      | 840                        |
|                              | 500                 | 0,6875       | 1500                      | 840                        |
|                              | 1000                | 0,5          | 1500                      | 840                        |
| Jeklo                        | 20                  | 54           | 7850                      | 425                        |
|                              | 200                 | 47           | 7850                      | 530                        |
|                              | 500                 | 37           | 7850                      | 667                        |
|                              | 1000                | 27           | 7850                      | 650                        |
| Mavčni izolacijski materiali | 20                  | 0,035        | 128                       | 800                        |
|                              | 200                 | 0,06         | 128                       | 900                        |
|                              | 500                 | 0,12         | 128                       | 1050                       |
|                              | 1000                | 0,27         | 128                       | 1100                       |
| Tesnilni cement              | 20                  | 0,0483       | 200                       | 751                        |
|                              | 250                 | 0,0681       | 200                       | 954                        |
|                              | 500                 | 0,1128       | 200                       | 1052                       |
|                              | 800                 | 0,2016       | 200                       | 1059                       |
| CaSi plošče                  | 20                  | 0,0685       | 450                       | 748                        |
|                              | 250                 | 0,0786       | 450                       | 956                        |
|                              | 450                 | 0,0951       | 450                       | 1060                       |
|                              | 1050                | 0,157        | 450                       | 1440                       |
| Les                          | 20                  | 0,1          | 450                       | 1113                       |
|                              | 250                 | 0,1          | 450                       | 1125                       |
|                              | 450                 | 0,1          | 450                       | 1135                       |
|                              | 1050                | 0,1          | 450                       | 1164                       |
| Opeka                        | 20                  | 1,04         | 2000                      | 1113                       |
|                              | 200                 | 1,04         | 2000                      | 1125                       |
|                              | 500                 | 1,18         | 2000                      | 1135                       |
|                              | 1000                | 1,41         | 2000                      | 1164                       |
| Steklo                       | 20                  | 0,78         | 2700                      | 840                        |

Preglednica 3.1: Toplotne karakteristike materialov.

#### 3.4 Karakteristike odprtin

Odprtine so sestavljene iz oken, vrat in strešnih odprtin. Stopnja razvitost požara v zaprtem prostoru je odvisna od velikosti odprtin v prostoru.

Koeficient odprtin O, uporabljen v poenostavljenih modelih, je za eno vertikalno odprtino definiran z enačbo (3.3)

$$O = A_w \sqrt{H} \tag{3.3}$$

Kadar je potrebno upoštevati več vertikalnih odprtin, je potrebno upoštevati celotno površino in ekvivalentno višino. Določeni sta z enačbama (3.4) in (3.5):

$$A_w = \sum A_{wi} \tag{3.4}$$

$$H = \left[\frac{\sum A_{wi} \sqrt{H_i}}{\sum A_{wi}}\right]^2, \qquad (3.5)$$

kjer je:

 $A_w$  površina odprtine, *H* višina odprtine in *i* številka odprtine.

#### 3.5 Mehansko prezračevanje

Zanimiv način varovanja stopnišč je uporaba naprav za vzdrževanje normalnega zračnega pritiska. Mehansko prezračevanje je pogosto uporabljeno pri prezračevalnih sistemih za odvod dima in toplote (Smoke And Heat Exhaust Ventilation System - SHEVS).

# 4 LASTNOSTI POŽARA

Namen tega poglavja je projektantu priskrbeti vse potrebne informacije, ki jih potrebuje pri projektiranju požara. Prvi potrebni podatek pri požarnem projektiranju stavbe je ocena sproščene energije pri požaru. To lahko ugotovimo le s požarnim testom na konstrukciji. Ta opcija ni ekonomična, po vrhu pa s testom dobimo informacije za enega od mnogih možnih požarov. Informacije požarnih testov, obstoječi modeli in dinamika požarov so bili združeni tako, da lahko določimo lastnosti požara za drugačne okoliščine.

#### 4.1 Požarna obtežba

Osnovni problem je ugotoviti, katero požarno obtežbo upoštevati pri projektiranju. Zelo redko je požarna obtežba določljiva na deterministični način. V splošnem mora biti določena na statistični način.

# 4.1.1 Deterministični pristop

Požarna obtežba Q v požarnem sektorju je definirana kot vsota celotne sproščene energije pri požaru. Del te energije se porabi za gretje požarnega sektorja (stene in notranji plini) medtem, ko

se ostala energija porazgubi skozi odprtine. Stavbni elementi, kot so stene in talne oblog, ter pohištvo so sestavni del požarne obtežbe. S porazdelitvijo požarne obtežbe Q na površino prostora dobimo gostoto požarne obtežbe  $q_{f}$ .

V standardu SIST EN 1991-1-2 je karakteristična ploskovna požarna obtežba definirana z enačbo (4.1):

$$q_{f} = \frac{1}{A_{f}} \sum_{i} \left( \psi_{i} \cdot m_{i} \cdot H_{ui} \cdot M_{i} \right), \qquad (4.1)$$

kjer je:

| $M_{i}$  | masa materiala i [kg]   |
|----------|---|
| $H_{ui}$ | neto kalorična vrednost materiala i [MJ/kg] (Preglednica 4.1) |
| $m_i$    | koeficient, odvisen od načina izgorevanja materiala i         |
| $\psi_i$ | koeficient zaščitene požarne obtežbe, materiala i             |
| $A_f$    | površina požarnega sektorja [m <sup>2</sup> ]                 |

Produkt  $H_{ui} \cdot M_i$  predstavlja količino energije materiala i in celotno sproščeno energijo materiala ob predpostavki, da ves material zgori. Koeficient 'm' je brezdimenzijski koeficient z vrednostjo med 0 in 1, ki predstavlja učinkovitost gorenja: m = 1 predstavlja popolno izgorevanje medtem, ko m = 0 pomeni, da material k požaru ne prispeva nič.

Vrednost m = 0,8 je priporočena za standardne materiale. Za les je priporočena neto kalorična vrednost 17,5 MJ/kg, torej je produkt  $m \cdot H_{ui} = 14MJ / kg$ .

| Trdne snovi                               |      |  |  |
|---|------|--|--|
| Les                                       | 17,5 |  |  |
| Drugi celulozni materiali                 | 20   |  |  |
| Oblačila                                  |      |  |  |
| Pluta                                     |      |  |  |
| Bombaž                                    |      |  |  |
| Papir, karton                             |      |  |  |
| Svila                                     |      |  |  |
| Slama                                     |      |  |  |
| Volna                                     |      |  |  |
| Ogljik                                    | 30   |  |  |
| antracit                                  |      |  |  |
| oglje                                     |      |  |  |
| premog                                    |      |  |  |
| Kemikalije                                |      |  |  |
| Parafinske (alkanske) spojine             | 50   |  |  |
| Metan                                     |      |  |  |
| Etan                                      |      |  |  |
| Propan                                    |      |  |  |
| Butan                                     |      |  |  |
| Olefinske (alkenske) spojine              | 45   |  |  |
| Etilen (eten)                             |      |  |  |
| Propilen (propen)                         |      |  |  |
| Buten                                     |      |  |  |
| Aromatske spojine                         | 40   |  |  |
| Benzen                                    |      |  |  |
| Toluen                                    |      |  |  |
| Alkoholi                                  | 30   |  |  |
| Metanol                                   |      |  |  |
| Etanol                                    |      |  |  |
| Etilni alkohol                            |      |  |  |
| Goriva                                    | 45   |  |  |
| Bencin, petrolej, kerozin                 |      |  |  |
| Nafta, Diesel                             |      |  |  |
| Čisti ogljikovodikovi plastični materiali | 40   |  |  |
| Polietilen                                |      |  |  |
| Polistiren                                |      |  |  |
| Polipropilen                              |      |  |  |
| Ostali proizvodi                          |      |  |  |
| ABS plastike                              | 35   |  |  |
| Poliesterske plastike                     | 30   |  |  |
| Polisocianatske in poliuretanske plastike | 25   |  |  |
| Polivinilkloridne, PVC plastike           | 20   |  |  |
| Bitumen, asfalt                           | 40   |  |  |
| Usnje                                     | 20   |  |  |
| Linolej                                   | 20   |  |  |
| Gumaste pnevmatike                        | 30   |  |  |
|   |      |  |  |

Preglednica 4.1: Priporočena neto kalorična vrednost gorljivih materialov  $H_{\scriptscriptstyle ui}$  (MJ/kg)

OPOMBA: Vrednosti, podane v tej tabeli, niso primerne za izračun energetske vrednosti goriv.

# 4.1.2 Statistični pristop

Pri determinističnem pristopu lahko gostoto požarne obtežbe ocenimo z vsoto vseh obtežb, prisotnih v objektu. Nekateri podatki o gostoti požarne obtežbe za določene rabe objektov, kot so pisarne in šole so razpoložljivi. Ta statistični pristop je veljaven samo za primere rabe objektov pri katerih se lahko pričakuje podoben nivo požarne obtežbe. V teh primerih se gostota požarne obtežbe lahko poda kot statistična porazdelitev s povprečno vrednostjo in standardnim odklonom.

V spodnji preglednici so podane vrednosti za določene rabe objektov. Vrednosti temeljijo na Gumbelovi porazdelitvi tipa I. Vrednosti (za 80, 90 in 95% fraktilo) so izračunane s porazdelitvijo ob predpostavki koeficienta variacije 0,3. Vrednosti v Preglednici 4.2 so izpeljane iz priročnika, o splošno priznanih vrednostih povzetih iz mednarodnih dokumentov [2, 21, 22].

Preglednica 4.2 Gostota požarne obtežbe za različne rabe [MJ/m<sup>2</sup>] (V skladu s Gumbel-ovo distribucijo tipa I).

| 1)•                        |            |          |          |          |          |
|----------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|
|                            | Standardna | Srednja  | 80%      | 90 %     | 95 %     |
|                            | deviacija  | vrednost | fraktila | fraktila | fraktila |
| Stanovanja                 | 234        | 780      | 948      | 1085     | 1217     |
| Bolnišnice (Sobe)          | 69         | 230      | 280      | 320      | 359      |
| Hoteli (sobe)              | 93         | 310      | 377      | 431      | 484      |
| Knjižnice                  | 450        | 1500     | 1824     | 2087     | 2340     |
| Pisarne                    | 126        | 420      | 511      | 584      | 655      |
| Šolski razredi             | 85,5       | 285      | 347      | 397      | 445      |
| Nakupovalna središča       | 180        | 600      | 730      | 835      | 936      |
| Dvorane (kino)             | 90         | 300      | 365      | 417      | 468      |
| Transport (javni prostori) | 30         | 100      | 122      | 139      | 156      |

# 4.2 Vrsta požara

Naslednje vprašanje, na katerega je potrebno odgovoriti, je količina požarne obtežbe, ki bo zgorela in kako bo le to vplivalo na krivuljo temperatura – čas.

Požar se nikoli (razen požig ali eksplozija, ki nista okvir te raziskave) ne začne istočasno na območju celotnega požarnega sektorja. Požar se vedno začne v obliki lokalnega požara, ki se nato, odvisno od številnih pogojev, razvije v obsežnejši požar.

Glavne razlike med lokaliziranim in polno razvitim požarom so podane v Preglednici 4.3.

|                    | Požarna obtežba  | Temperatura plinov                           |
|--------------------|--|--|
| Lokalni požar      | Del požarnega sektorja je zajel<br>požar.  | Dve coni<br>(dve krivulji Temperatura - čas) |
| Polno razvit požar | Cel požarni sektor je zajel požar.<br>Požarna obtežba je enakomerno<br>razporejena čez cel sektor. | Ena cona<br>(ena krivulja Temperatura - čas) |

Preglednica 4.3 Razlike med lokaliziranim in polno razvitim požarom.

V primerih, ko je požar zajel celotni požarni sektor predpostavimo enakomerno temperaturo plinov. Pri polno razvitem požaru, ko gori vsa požarna obremenitev, je ves požarni sektor zapolnjen z dimom in gorečo opremo, zato lahko predpostavimo, da je požarni sektor homogen prostor z enakomerno temperaturo. Metoda za določitev krivulje Temperatura – čas je predstavljena v poglavju 6.

# 4.3 Projektni požar

Ko je požarna obtežba ovrednotena, je potrebno ugotoviti do katere stopnje se bo razvil požar. To nas vodi k faktorju, ki opisuje hitrost sproščanja toplote – RHR.

# 4.3.1 Gorivno in ventilacijsko nadzorovan požar

Požarna obtežba definira razpoložljivo energijo, vendar pa je temperatura plinov odvisna od hitrosti sproščanja toplote (RHR). Gorenje ali tlenje iste požarne obtežbe lahko vodi do različnih krivulj temperature plinov.

Za požar je značilno, da se začne kot majhen požar, ki nato preide v fazo naraščanja. Če je v požarnem sektorju prisotna zadostna količina kisika za vzdrževanje gorenja, sta možna dva pojava. Ko požar doseže polno razvitost brez omejitev kisika, je količina sproščene toplote omejena z razpoložljivo požarno obtežbo (z gorivom kontroliran požar).

Če je velikost odprtin premajhna za dotok ustrezne količine kisika v požarni sektor, je hitrost sproščanja energije omejena z razpoložljivo količino kisika (ventilacijsko kontroliran požar).

Fazo izbruha požara (flash-over) lahko doseže z gorivom ali ventilacijsko kontroliran požar.



Slika 4.1: Dve RHR krivulji z enako površino, pri enaki količini požarne obtežbe

Izbruh požara predstavlja prehod iz lokalnega požara v požar, ki zajame vse izpostavljene gorljive površine v požarnem sektorju. Dva režima sta prikazana na Sliki 4.2, ki prikazuje krivulje hitrost sproščanja toplote v odvisnosti od prezračevalnega parametra  $A_w \sqrt{h}$ , kjer je  $A_w$ površina odprtine in h višina odprtine. Krivulje so prikazane za različne gostote požarne obtežbe. Pri ventilacijsko kontroliranem režimu (leva stran slike) se z večanjem prezračevalnega parametra razvitost požara povečuje do mejne vrednosti, ki jo določa gostota požarne obtežbe, in potem ostane približno linearna (z gorivom kontrolirano območje).



Slika 4.2 Masni tok za različne gostote požarne obtežbe

## 4.3.2 Projektna hitrost sproščanja toplote (RHR)

Naraščanje hitrosti sproščanja toplote (glej Sliko 4.3) je definirano z izrazom (4.2):

$$RHR = \left(t / t_{\alpha}\right)^{2}, \qquad (4.2)$$

kjer je:

RHRhitrost sproščanja toplote požara med fazo naraščanja (MW)tčas (s) $t_{\alpha}$ čas, potreben, da se doseže hitrost sproščanja toplote 1 MW(Slika 4.3)RHR<br/>[W]



Slika 4.3 : Hitrost sproščanja toplote v odvisnosti od časa

Iz slike so razvidne tri faze: faza naraščanja, vodoravni plato (po izbruhu) in faza pojemanja.

Parameter razvoja požara, podan v [1, 2], se spreminja v odvisnosti od vrste objekta. Napotki za razvrstitev in določitev tega parametra so prikazani na Sliki 4.4.

Faza naraščanja je omejena z vodoravnim platojem, ki doseže največjo vrednost RHR, ki ustreza razpoložljivosti goriva ali prezračevalno kontroliranim pogojem (Slika 4.4).

V [1, 2] in [7] je za fazo pojemanja predpostavljeno linearno upadanje RHR. Podani so izrazi za izračun začetka in trajanja faze pojemanja. Na podlagi rezultatov testov je za fazo pojemanja predpostavljeno, da se prične, ko dogori 70% požarne obtežbe.

Na Sliki 4.4 je podan predlog RHR krivulje za projekt NFSC. Krivulja vključuje fazo naraščanja, plato in fazo pojemanja.



Slika 4.4: Projektna RHR krivulja [1]

## 4.3.3 Eksperimantalni podatki

Krivulja RHR se lahko določi s pomočjo testov. Načini merjenja hitrosti sproščanja toplote so postali bolj dostopni šele pred nekaj leti, ko je bil razvit princip merjenja oddane toplote v odvisnosti od porabe kisika. Metoda porabe kisika, je omogočila izvedbo meritev enostavno in z zadovoljivo natančnostjo. Metoda predpostavlja, da je oddajanje toplote pri izgorevanju neposredno odvisna od porabljenega kisika [6]. Narejena je podatkovna baza testov, ki so na razpolago v literaturi [3,4,5,6].

Hazard-ov [5] dvo-conski simulacijski model vsebuje podatkovno bazo z različnimi predmeti predmeti, za katere so podane vrednosti RHR (stoli, televizijski sprejemniki in božična drevesa). Še ena podatkovna baza, v okviru programov za požarne simulacije je Argos [4]. V Argosu so podani različni izrazi za požare pri trdnih, topljivih, tekočih in tlečih materialih. Ti izrazi definirajo RHR kot funkcijo hitrosti širjenja požara v horizontalni in vertikalni smeri. V Argos-ovi bazi podatkov so podana veljavne numerične vrednosti za različne materiale in predmete.

Vir informacij o rezultatih testov je tudi dokument z naslovom "Začetni požari", narejen na Univerzi v Lundu [3]. Dokument ima enako obliko kot podatkovna baza Hazard, le da vsebuje več rezultatov. V dokumentu so poleg informacij o običajnih objektih tudi informacije o različnih vrstah prevoznih sredstev. CTICM je na podlagi požarnih testov izvedenih na novih avtomobilih (izdelanih leta 1996) [9], hotelskih sobah in pravem pohištvu izmeril hitrosti sproščanja toplote. Ti eksperimentalni podatki so zanimivi predvsem zato, ker je bila večina do sedaj izvedenih požarnih testov, katerih poročila najdemo v literaturi, izvršena na lesenih hišah.

## **5 VERJETNOSTNI PRISTOP**

#### **5.1** Uvod

Verjetnost, da se požar razširi in popolnoma uniči požarni sektor, je odvisna od površine požarnega sektorja in aktivnih požarnih ukrepov, kot so šprinklerji, avtomatsko zaznavanje požara in avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto. Izpeljani so bili različni projekti v okviru ECSC-ja [11, 18] za določitev verjetnosti, da:

- pride do nastanka požara,
- stanovalci ne uspejo pogasiti požara,
- aktivni ukrepi (šprinklerji, ...) ne uspejo pogasiti požara in
- gasilska enota ne uspe pogasiti požara.

Verjetnost uspešnega posredovanja gasilske enote je odvisna od časa, potrebnega za odkritje požara (avtomatsko zaznavanje požara) in časa, potrebnega za dostop do objekta (avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto in oddaljenost gasilske enote od objekta).

Iz teh verjetnosti je mogoče po postopku, podanem v Dodatku C standarda SIST EN 1990 [10], izpeljati koeficient  $\gamma_{q,f}$ , s katerim lahko zmanjšamo požarno obtežbo. Postopek je povzet v poglavju 5.4.

Skupen koeficient je sestavljen iz koeficientov  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  *in*  $\delta_{ni}$ , s katerimi upoštevamo velikost požarnega sektorja, vrsto objekta in aktivne požarne ukrepe. Projektno požarno obtežbo dobimo s količnikom karakteristične požarne obtežbe  $q_{f,k}$  in koeficienta  $\gamma_{qf} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{ni}$ , torej

$$q_{f,d} = \gamma_{qf} \cdot q_{f,k} \, .$$

Za določitev projektne toplote pri naravnem požaru, v "Modelu naravnih požarov" (glej poglavje 6) uporabimo projektno požarno obtežbo  $q_{f,d}$ .

# 5.2 Statistika

Statistična študija temelji na podatkih [11] iz naslednjih držav:

Švica: izčrpne informacije in analize ~40.000 požarov v Bernu, med leti 1986 in 1995, ki so povzročili več kot 1.000.000 CHF škode.

Francija: podatki o požarih v industrijskih objektih med Januarjem 1983 in Februarjem 1984 in vseh 312.910 posredovanjih gasilskih enot v letu 1995.

Nizozemska: podatki o požarih v industrijskih objektih med Januarjem 1983 in Januarjem 1985.

Finska: podatki o vseh 2109 požarih v letu 1995 in podatki, ki temeljijo na kombiniranju informacij narodne požarne statistične podatkovne baze "PRONTO" Ministrstva za notranje zadeve in drugih ustreznih narodnih statističnih podatkovnih baz za obdobje let 1996-1999.

Poročila luksemburških požarnih enot za obdobje med leti 1995 in 1997.

Mednarodni podatki iz različnih virov in različnih pogledov na učinkovitost šprinklerjev. Iz podatkov o učinkovitosti šprinklerjev iz ZDA, Finske, Nemčije, Francije, Avstralije in VB [13], je bila narejena podatkovna baza.

Statistični izračuni obravnavajo predvsem stanovanjske, pisarniške in industrijske objekte. S koeficientom  $\delta_{a1}$ , podanim v Preglednici 5.6, je bil postopek razširjen tudi na ostale objekte.

### 5.3 Verjetnosti

#### 5.3.1 Dogodkovno drevo

Drevesna struktura dogodkov (Slika 5.1) se za opis rasti požara vodi od začetka požara po priporočenih privzetih vrednostih podanih, v Preglednici 5.1.



Slika 5.1: Drevesna struktura za primer širjenja požara v pisarniškem požarnem sektorju površine 150 m<sup>2</sup>

| 8  | 8                |                    |                       |                      |
|--|------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
|  |                  | Stanovanja         | Pisarne               | Industrijski objekti |
| Nastop požara[1/(m <sup>2</sup> .leto)]          | p <sub>occ</sub> | $30 \cdot 10^{-6}$ | 10 · 10 <sup>-6</sup> | $10 \cdot 10^{-6}$   |
| Požar pogasijo stanovalci                        | poccup           | 0,75               | 0,60                  | 0,45                 |
| Požar pogasi sistem šprinklerjev p <sub>SP</sub> |                  | glej Preglednico   | 5.5                   |                      |
| Požar pogasi gasilska enota                      | $p_{\text{FB}}$  | 0,90 - 0,95        | 0,90 - 0,95           | 0,80 - 0,90          |

Preglednica 5.1: Koeficienti za drevesno strukturo dogodkov

### 5.3.2 Nastop in širjenje požara

Verjetnost, da se v enem letu zgodi požar, ki bi ogrozil stabilnost konstrukcije, se izrazi kot:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot A_{fi} \cdot p_4, \tag{5.1}$$

kjer je:

- p<sub>1</sub> verjetnost nastanka polno razvitega požara, ob upoštevanju vplivov stanovalcev in gasilskih enot
- p<sub>2</sub> koeficient, odvisen od vrste gasilske enote in časom med alarmom in posredovanjem gasilskih enot
- p<sub>3</sub> koeficient, ki upošteva prisotnost avtomatskega zaznavanja požara in avtomatske povezave alarma z gasilsko enoto
- p<sub>4</sub> koeficient, ki upošteva prisotnost šprinklerjev

A<sub>fi</sub> površina požarnega sektorja

Opomba: Koeficient  $p_1$  upošteva vpliv stanovalcev in požarne enote na preprečitev nastanka polno razvitega požara in ne sme biti razumljen napačno, kot pogostost nastopa požara.

Vpliv vrste požarnih enot, časa med alarmom in posredovanjem gasilcev, avtomatskega zaznavanja in prenosa alarma ( $p_2$ ,  $p_3$ ) niso bili upoštevani v Preglednici 5.1. Poleg tega je  $p_1$  v Preglednici 5.2 enak  $p_{occ}$  (1- $p_{occup}$ ) (1- $p_{FB}$ ).

Po [11, 18], so za koeficiente p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub> in p<sub>4</sub> priporočene naslednje vrednosti.

Preglednica 5.2 Pogostost nastanka polno razvitega požara, ob upoštevanju standardnih gasilskih enot

| Primeri rabe | $p_1 [10^{-7}/(m^2 \cdot leto)]$ |
|--------------|----------------------------------|
| Pisarne      | 2-4                              |
| Stanovanja   | 4-9                              |
| Industrija   | 5-10                             |

|                       | Časa med alarmom in posredovanjem gasilcev |                   |                   |  |
|-----------------------|--|-------------------|-------------------|--|
| <b>p</b> <sub>2</sub> | ≤ 10'                                      | $10' < t \le 20'$ | $20' < t \le 30'$ |  |
| Gasilci               |  |                   |                   |  |
| Poklicni              | 0,05                                       | 0,1               | 0,2               |  |
| Prostovoljni          | 0,1  | 0,2               | 1                 |  |

Preglednica 5.3: Koeficient, odvisen od vrste požarnih enot in časa med alarmom in posredovanjem gasilcev

Preglednica 5.4: Koeficient, ki upošteva avtomatsko zaznavanje požara in avtomatsko povezavo alarma z gasilsko enoto

| Aktivni ukrepi                              | <b>p</b> <sub>3</sub> |
|---|-----------------------|
| Zaznavanje dima                             | 0,0625                |
| Zaznavanje toplote                          | 0,25                  |
| Avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto | 0,25                  |

| D 1 1 '        |              | TZ (*** 4  |           | ¥.       | • • •      | × • • • •    |    |
|----------------|--------------|------------|-----------|----------|------------|--------------|----|
| Predlednica    | <b>~ ~</b> . | Koeticient | ZI        | unosteva | nricofnoct | snrinklerie  | 17 |
| I I CEICUIIICA | J.J.         | KUCHCICHL, | <b>NI</b> | upositva | prisounosi | sprinkier je | v  |
|                |              | ,          |           | 1        | 1          | 1 3          |    |

| Vrsta šprinklerjev  | <b>p</b> <sub>4</sub> |
|---|-----------------------|
| Običajni (v skladu s predpisi)  | 0,02                  |
| Višje razredni (t.j. elektronsko nadzorovani, dva neodvisna vodna vira) | 0,01 - 0,005          |
| Nižje razredni (t.j. ni v skladu s predpisi)                            | ≥ 0,05                |

### 5.4 Postopek

# 5.4.1 Določitev projektnih vrednosti vplivov in odpornosti – varnostni faktor γ v Evrokodih – Princip uporabe v normalnih pogojih

Odpornost R in vpliv E se določita s statistično porazdelitvijo, ki je definirana s standardnim odklonom ( $\sigma_S, \sigma_R$ ) in povprečno vrednostjo ( $m_S, m_R$ ). Da zagotovimo ustrezno varnost proti porušitvi (E>R) mora biti verjetnost porušitve  $p_f$ , ki jo predstavlja šrafiran del na Sliki 5.2, zelo nizka. To območje opišemo z indeksom zanesljivosti  $\beta$ .

Evrokodi, za normalne pogoje, zahtevajo največjo verjetnost porušitve v življenjski dobi objekta  $p_f=7,23.10^{-5}$ , kar ustreza indeksu zanesljivosti  $\beta_t=3,8$ .



 $s_d$  in  $r_d$  sta projektni vrednosti učinkov vplivov E in odpornosti R. V Evrokodu je za njuno določitev privzeta semiprobabilistična metoda, ki temelji na metodi zanesljivosti prvega reda FORM.

Poenostavitev predpostavlja:

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = 0.8 \text{ za odpornost.}$$
(5.2)

$$\alpha_{s} = \frac{\sigma_{s}}{\sqrt{\sigma_{R}^{2} + \sigma_{s}^{2}}} = (-0,7) \text{ za glavni vpliv in } (-0,28) \text{ za sekundarni vpliv}$$
(5.3)  

$$\Rightarrow s_{d,i} = m_{s,i} + 0,7 \beta \sigma_{s,i}$$
  

$$\Rightarrow r_{d,i} = m_{R,i} - 0,8 \beta \sigma_{R,i}$$

Ob upoštevanju konstantnih vrednosti faktorjev občutljivosti po metodi prvega reda  $\alpha_s$  je  $\alpha_R$ , je projektna vrednost učinkov vplivov  $S_{d,i}$  odvisna le od indeksa zanesljivosti  $\beta$ , standardnega odklona in srednje vrednosti ter vrste porazdelitve (glej enačbo na sliki 5.2 [10]).

Projektne vrednosti učinkov vplivov  $S_{d,i}$  je potrebno upoštevati za zagotovitev potrebne varnosti. Če je ciljni indeks zanesljivosti  $\beta$  enak vrednosti 3.8, podani v Evrokodu, je verjetnost porušitve v življenjski dobi konstrukcije enaka 7,23.10<sup>-5</sup>.

Varnostni faktor  $\gamma$  je definiran kot razmerje projektne vrednosti S<sub>d</sub> in karakteristične vrednosti S<sub>k</sub>, ki je običajna referenčna vrednost:

$$\gamma = \frac{s_d}{s_k} \tag{5.4}$$

V Evrokodu so podane naslednje vrednosti varnostnih faktorjev: 1.35 in 1.5 za lastno težo in spremenljivo obtežbo ter 1.0, 1.15, in 1.5 za nosilnost konstrukcijskega jekla, armature in betona [1, 16, 20, 24].

Spodaj je podan primer izračuna varnostnega faktorja armature  $\gamma_s = 1,15$  [20]:

$$\beta = 3.8$$
;  $\alpha a = 0.8$ 

Statistična porazdelitev: Log normalna

Koeficient variacije  $\left(=\frac{\sigma}{m}\right)$ :

| V <sub>R</sub>   | koeficient variacije za projektno vrednost       | $=\sqrt{V_G^2 + V_m^2 + V_f^2} = 0,087$ |
|------------------|--|---|
| V <sub>m</sub>   | koeficient variacije za modelno nepopolnost      | = 0,05                                  |
| V <sub>G</sub>   | koeficient variacije za geometrijsko nepopolnost | = 0,05                                  |
| $V_{\mathrm{f}}$ | koeficient variacije za mehanske lastnosti       | = 0,05                                  |

Projektna vrednost:

$$X_{d} = m_{X} \exp(-\alpha_{R} \beta V_{R}) = m_{X} \exp(-0.8 \beta V_{R})$$

Karakteristična vrednost :

$$X_k = m_X \exp(-k V_f)$$

k = 1,645 ob upoštevanju 5 % fraktile

Varnostni faktor:

$$\gamma_{\rm s} = \frac{X_{\rm k}}{X_{\rm d}} = \exp\left(0.8 \ \beta \ V_{\rm R} - k \ V_{\rm f}\right) = \exp\left(0.8 \cdot 3.8 \cdot 0.087 - 1.645 \cdot 0.05\right) = 1.198$$

#### 5.4.2 Ciljna vrednost

Predpostavljena ciljna vrednost verjetnosti porušitve  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$ , v življenjski dobi konstrukcije (1,3 $\cdot 10^{-6}$  na leto), je definirana v standardu SIST EN 1990 [10]. Varnostna zahteva  $\beta > 3,8$  je bila za mejno stanje nosilnosti v običajnih pogojih prav tako privzeta kot sprejemljiv kriterij za požarno varnost konstrukcije. Vendar pa bi lahko bila zahtevana varnost v primeru požara spremenljiva. Ta zamisel je bila razvita v končnem poročilu [11] (poglavje 2.8 Dodatka B dela WG5), kjer je predlagana uporaba ciljne verjetnosti  $p_t$ , odvisno od možnosti evakuacije ljudi, in sicer:

 $p_t = 1, 3 \cdot 10^{-4}$  za normalno evakuacijo  $p_t$ 

 $p_t = 1, 3 \cdot 10^{-5}$  za oteženo evakuacijo (bolnišnice,...)

 $p_t = 1, 3 \cdot 10^{-6}$  za nezmožnost evakuacije (visoki objekti).

To lahko sicer vodi k bodočim spremembam, vendar je bilo odločeno, da se zaenkrat obdrži vrednost iz EN 1990 [10].

#### 5.4.3 Požarno projektiranje in pogojna verjetnost

Dodatek C standarda SIST EN 1990 [10], ki obravnava semiprobabilistično metodo za določitev projektnih vrednosti učinkov vplivov in materialnih lastnosti, je bil razširjen na požarno odpornost konstrukcije.

Za sobno temperaturo, sta bila varnostna faktorja učinkov vplivov  $\gamma_{E,i}$  in materialnih lastnosti  $\gamma_{R,i}$ , izpeljana s semiprobabilistično metodo, ki implicitno predpostavlja, da je verjetnost porušitve konstrukcije  $p_f$  manjša od ciljne verjetnosti v življenjski dobi konstrukcije  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$ , ki je ekvivalentna indeksu zanesljivosti  $\beta = 3,8$ :

$$p_{f}(verjetnost \ porušitve) = p_{t}(ciljna \ vrejetnost)$$
 (5.5)

V primeru požara je glavna obtežba požar, ki se ovrednoti s požarno obtežbo izraženo s težo lesa ali v MJ. To požarno obtežbo v konstrukciji obravnavamo samo v primeru požara.

Požarna obtežba vpliva na konstrukcijo samo z določeno verjetnostjo  $p_{fi}$ , ki je enaka produktu verjetnosti nastanka požara  $p_{start}$  in verjetnosti, da požar preide v fazo izbruha  $p_{spread}$ .

Enačbo (5.5) zapišemo v obliki:

 $p_{f,fi}$  (verjetnost porušitve pri požaru)  $\cdot p_{fi}$  (verjetnost nastanka požara)  $\leq p_{t}$  (ciljna verjetnost)

ki se lahko zapiše kot:

$$p_{f,fi} \leq \frac{p_t}{p_{fi}}$$

$$p_{f,fi} \leq p_{t,fi} \rightarrow \beta_{f,fi} \geq \beta_{fi,t}$$
(5.6)

Medtem, ko je pri ciljni vrednosti  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  in pri sobni temperaturi ciljni indeks zanesljivosti  $\beta_t$  konstantna vrednost, je v primeru požara indeks zanesljivosti  $\beta_{fi,t}$ spremenljivka, saj je ciljna vrednost  $p_{t,fi}$  preko enačbe (5.5) odvisna od verjetnosti nastanka požara  $p_{fi}$ . Ob poznanem  $\beta_{fi,t}$ , se projektno vrednost požarne obtežbe izpelje, kot je razloženo v nadaljevanju.

#### 5.4.4 Projektna požarna obtežba in δ faktor

Izračuni zanesljivosti (glej poglavje 7.4 v [11]) so pokazali, da je faktor uteži glavnega vpliva (gravitacijske obtežbe) pri sobni temperaturi v primeru požara močno zmanjšan in je zato lahko obravnavan kot sekundarni vpliv, medtem ko požarna obtežba postane glavni vpliv.

Izračuni so dodatno pokazali, da je potrebno predpostavljen faktor uteži (-0,7) za glavni vpliv spremeniti in za koeficient  $\alpha_{af}$  izbrati vrednost (-0,9).

Glede na gostote potresne obtežbe, podane v [14] in analizah prof. Fontane, se podatki o požarnih obtežbah ujemajo z Gumbelovo porazdelitvijo tipa I pri koeficientu variacije  $V_{qf} = 0,3$  [11].

Glede na [10], se projektna vrednost za Gumbelovo porazdelitev izračuna iz:

$$q_{f,d} = m_{qf} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln \phi \left( 0,9 \beta_{fi,t} \right) \right) \right] \right\},$$
(5.7)

kjer je:

 $m_{qf}$  srednja vrednost požarne obtežbe in

 $\phi$  porazdelitvena funkcija standardizirane normalne porazdelitve.

Kot je predlagano v [16] je potrebno pri modelu za izračun učinka vpliva upoštevati varnostni faktor  $\gamma_{sD} = 1,05$ .

Z izbiro karakteristične vrednosti  $q_{f,k}$  z 80 % fraktilo (glej Dodatek E standarda SIST EN1991-1-2 [1] in [11]) se faktor  $\delta_{qf}$  preoblikuje v:

$$\delta_{qf} = \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1.05 \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[ 0.577 + \ln\left( -\ln\phi(0.9\,\beta_{fi,t}) \right) \right] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[ 0.577 + \ln\left( -\ln 0.8 \right) \right] \right\}}$$

$$= 2.38 \ za \ \beta = 3.8 \ in \ 0.82 \ za \ \beta = 0.$$
(5.8)

Potek faktorja  $\delta_{qf}$  kot funkcije  $\beta_{fi,t}$  je podan na Sliki 5.3.



Slika 5.3 Varnostni faktor  $\delta_{\it qf}$  kot funkcija  $m eta_{\it fi,t}$ .

Indeks zanesljivosti  $\beta_{f_{i,t}}$  se izračuna iz verjetnosti polno razvitega požara  $p_{f_i}$  kot:

$$\beta_{\rm fi,t} = \phi^{-1}\left(\frac{p_{\rm t}}{p_{\rm fi}}\right) = \phi^{-1}\left(\frac{7,23.10^{-5}}{p_{\rm fi}}\right),$$

kjer je:

 $\phi^{-1}$  inverzna porazdelitvena funkcija standardizirane normalne porazdelitve.

Koeficient  $\delta_{qf}$  odčitamo iz Slike 5.3.

Postopek omogoča:

- določitev verjetnosti nastanka polno razvitega požara  $p_{fi}$
- izračun  $p_t / p_{fi}$
- izpeljava ciljnega indeksa zanesljivosti  $\beta_{f_{i,t}}$
- določitev faktorja  $\delta_{qf}$

Pristop je bil spremenjen z razdelitvijo faktorja  $\delta_{qf}$  na tri koeficiente  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  in  $\delta_{ni}$ , ki upoštevajo vpliv velikosti požarnega sektorja, verjetnost nastanka požara in aktivne protipožarne ukrepe, v omenjenem vrstnem redu na verjetnost nastanka polno razvitega požara p<sub>fi</sub> (Preglednica 5.6).

| Talna površina $A_{\rm f}$ [m <sup>2</sup> ] sektorja | Nevarnost nastanka požara $\delta_{q1}$ | Nevarnost nastanka požara $\delta_{q2}$ | Primeri rabe (naselitve)                           |
|---|---|---|--|
| 25  | 1,10                                    | 0,78                                    | umetnostne galerije,<br>muzeji, plavalni bazeni    |
| 250   | 1,50                                    | 1,00                                    | pisarne, stanovanja, hoteli,<br>papirna industrija |
| 2500  | 1,90                                    | 1,22                                    | tovarne za proizvodnjo<br>strojev in motorjev      |
| 5000  | 2,00                                    | 1,44                                    | kemični laboratoriji,<br>barvarske delavnice       |
| 10000   | 2,13                                    | 1,66                                    | tovarne pirotehničnih<br>izdelkov ali barv         |

Preglednica 5.6 Faktorji  $\delta_{q1}$  ,  $\delta_{q2}$  in  $\delta_{ni}$  [1]

| $\delta_{ni}$ funkcija aktivnih ukrepov za preprečevanje požara |                   |                    |           |   |                              |   |                             |                              |                                      |                        |                               |
|---|-------------------|--------------------|-----------|---|------------------------------|---|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Avtomatsko<br>požara  | pr                | eprečev            | vanje     | Avtomat   | Avtomatsko zaznavanje požara |   |                             | Ročno preprečevanje požara   |                                      |                        |                               |
| Avtomatski<br>vodni<br>gasilni<br>sistem                        | Neo<br>presi<br>0 | dvisna<br>krba z v | vodo<br>2 | Avtomatsko<br>zaznavanje<br>požara in alarm<br>s z<br>toploto dimom |                              | Avtomatska<br>povezava<br>alarma z<br>gasilsko<br>enoto | Lastna<br>gasilska<br>enota | Zunanja<br>gasilska<br>enota | Varne<br>interven-<br>cijske<br>poti | Gasilski<br>pripomočki | Sistem<br>za<br>odvod<br>dima |
| $\delta_{n1}$   | $\delta_{n2}$     |                    |           | $\delta_{n3}$   | $\delta_{n4}$                | $\delta_{\rm n5}$                                       | $\delta_{\rm n6}$           | $\delta_{\!n7}$              | $\delta_{\rm n8}$                    | $\delta_{n9}$          | $\delta_{n10}$                |
| 0,61  | 1,0               | 0,87               | 0,7       | 0,87 ali  | 0,73                         | 0,87  | 0,61 ali                    | 0,78                         | 0,9 ali<br>1,0 ali<br>1,5            | 1,0 ali 1,5            | 1,0 ali<br>1,5                |

Za normalne ukrepe preprečevanja požara, ki naj bi bili praviloma vedno prisotni, na primer gasilski pripomočki, varne intervencijske poti, sistemi za odvod dima s stopnišč, je treba za  $\delta_{ni}$  iz Preglednice 5.6 privzeti vrednost 1,0. V kolikor ti ukrepi preprečevanja požara niso predvideni, naj se kot ustrezna vrednost za  $\delta_{ni}$  privzame 1,5.

Če se v primeru požara v stopnišču vzpostavi nadtlak, se lahko faktor  $\delta_{n8}$  iz tabele Preglednice 5.6 privzame z vrednostjo 0,9.

Projektno požarno obtežbo q<sub>f,d</sub> izračunamo kot:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{ni} \cdot q_{f,k}$$

Projektno požarno obtežbo se nato uporabi na način, opisan v poglavju 6.

# 6 IZRAČUN RAZVOJA POŽARA

### 6.1 Uvod

To poglavje podaja modele za fazo pred izbruhom požara (modeli lokaliziranega požara in dvoconski modeli) in fazo po izbruhu požara (v požaru zajeti vsi elementi). Modeli, ki temeljijo na enačbah hidrodinamike (Computer Fluid Dynamics ali CFD) zaradi kompleksnosti niso obravnavani.

### 6.2 Lokaliziran požar

Pri lokaliziranem požaru se produkti izgorevanja nabirajo v vroči plasti plinov pod stropom, ki je od hladnejše plasti plinov spodnjega sloja ločena s horizontalno mejno ploskvijo.

To situacijo opišemo z dvoconskim modelom, ki je uporaben za fazo pred izbruhom požara. Poleg izračuna razvoja temperature plinov, se modeli uporabljajo tudi za ugotavljanje načina širjenja plinov po objektu in za oceno varnosti življenja, kot funkcije debeline dimnega sloja, koncentracije strupenih plinov, radiacije (sevanja) toplotnega toka in vidne gostote dima.

Toplotni vpliv na horizontalne elemente nad požarom je odvisen tudi od oddaljenosti elementov od požara. Ocenimo ga s specifičnimi modeli za ovrednotenje lokalnih učinkov požara na bližnje elemente, na primer z metodami Heskestad ali Hasemi [17].

# 6.2.1 Dvoconski modeli

Conski modeli so numerični programi za določitev razvoja temperature plinov kot funkcije časa, za posamezni požarni sektor. Temeljijo na hipotezi, da je temperatura v vsaki coni enakomerna.

Poleg razvoja temperature plinov v požarnem sektorju, nam conski modeli dajejo informacije tudi o temperaturi zidov in hitrosti prehajanja plinov skozi odprtine.

Podatki, potrebni za conski model so:

- geometrijski podatki, kot so dimenzije požarnega sektorja, odprtin in oddelkov,
- materialne karakteristike zidov
- podatki o požaru, kot so RHR krivulja, stopnja pirolize, hitrost izgorevanja goriva

V dvoconskem modelu so enačbe, ki izražajo ravnotežje med maso in energijo, zapisane za vsak sloj plinov posebej

Rezultati simulacije so temperature plinov vsakega sloja in informacije o temperaturi zidov in toplotnem toku skozi odprtine. Pomemben rezultat simulacije je razvoj debeline slojev plinov v odvisnosti od časa. Debelina spodnjega sloja, ki ostane hladnejši in ne vsebuje produktov izgorevanja je zelo pomembna za oceno ustreznosti požarnega sektorja za uporabnika.



Slika 6.1 Dvoconski model požarnega sektorja.

Slika 6.1 prikazuje tipično situacijo, kjer izmenjava mase in energije poteka le med požarnim sektorjem in zunanjim okoljem. Takšni modeli omogočajo tudi analize bolj kompleksnih primerov, kjer izvorni požarni sektor izmenjuje maso in energijo z zunanjim okoljem in drugimi požarnimi sektorji objekta. Tu je pomembna predvsem analiza širjenja dima iz izvornega v bližnje požarne sektorje. Takšna situacija, analizirana z večconskim modelom, je opisana na Sliki 6.2.



Slika 6.2: Požarni sektor v večconskem modelu.

### 6.2.2 Metoda Heskestad

Toplotni vpliv lokaliziranega požara se lahko določi z uporabo metode Heskestad [1].

Upoštevati je potrebno relativno višino plamena glede na višino plamena.

Dolžino plamena L<sub>f</sub> lokaliziranega požara (Slika 6.3) je podana z izrazom:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Če plamen ne doseže stropa požarnega sektorja ( $L_f < H$ ; Slika 6.3) ali v primeru požara v odprtem prostoru, je temperatura  $\Theta_{(z)}$  v zubljih plamena vzdolž navpične plamenske osi podana z izrazom:

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0.25 Q_c^{2/5} \cdot (z - z_0)^{-5/3},$$

kjer je

| D  | premer ognja [m], glej sliko 6.3   |
|----|--|
| Q  | hitrost sproščanja toplote [W] požara                                      |
| Qc | konvekcijski del hitrosti sproščanja toplote [W], navadno je $Q_c = 0.8 Q$ |
| -  | vičina [m] vzdalž agi nlamana, glaj glika 6.2                              |

z višina [m] vzdolž osi plamena, glej sliko 6.3
 H razdalja med virom požara in stropom, glej sliko 6.3



Slika 6.3: Lokalizirano požar z višino plamena, ki ne doseže stropa

## 6.2.3 Metoda Hasemi's [1, 17]

Metoda Hasemi [1, 17] je preprosto orodje za ovrednotenje lokalnih učinkov požara, na vodoravne elemente tik pod stropom nad požarom. Metoda temelji na rezultatih testov, narejenih na Inštitutu za stavbne raziskave v Tsukubi na Japonskem (Building Research Institute in Tsukuba, Japan).



Slika 6.4: Shema lokaliziranega požara in opis požara po metodi Hasemi

Podatki za uporabo metode Hasemi:

- Q Količina sproščene toplote pri požaru[W]
- H<sub>f</sub> relativna višina med tlemi in stropom [m]
- D premer (karakteristična dolžina) požara[m]
- H<sub>s</sub> navpična razdalja med tlemi in izvorom požara [m]

Spremenljivke so:

H razdalja med izvorom požara in stropom [m]
Q<sup>\*</sup> brezdimenzijska hitrost sproščanja toplote [-]
Q<sub>H</sub><sup>\*</sup> brezdimenzijska hitrost sproščanja toplote [-]
z' navpična koordinata navideznega vira požara , glede na izvor požara [m]
L<sub>H</sub> horizontalna dolžina plamena na stropu [m]
r horizontalna razdalja med vertikalno osjo požara in točko na stropu, kjer računamo toplotni tok [m]

Postopek računa:

Izračun H  $H = H_f - H_s$  (6.1)

Izračun Q<sup>\*</sup> 
$$Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2.5}}$$
 (6.2)

Izračun 
$$Q_{H}^{*} \quad Q_{H}^{*} = \frac{Q}{1,11 \times 10^{6} H^{2.5}}$$
 (6.3)

Izračun z' 
$$z' = 2,4 D \left( Q^{*2/3} - Q^{*2/3} \right)$$
 pri  $Q^* < 1,00$  (6.4)

$$z' = 2,4 D(1,00 - Q^{*2/3})$$
 pri  $Q^* \ge 1,00$  (6.5)

Izračun (L<sub>H</sub>+H)/H
$$\frac{L_{H} + H}{H} = 2,90 Q_{H}^{*0.33}$$
 (6.6)

Vrednost L<sub>H</sub> izračunamo iz zgornje enačbe.

Vrednost toplotnega toka q'' v  $[kW/m^2]$  na razdalji r od vertikalne osi požara izračunamo z izrazom:

$$q'' = 136,30 - 121,00 y$$
 0,30 < y < 1,0 (6.8)

kjer je 
$$y = \frac{r + H + z}{L_{_H} + H + z}$$
 (6.10)

Toplotni tok q'' pada z naraščanjem spremenljivke y in narašča z večanjem sproščene toplote pri požaru Q. To prikazuje Slika 6.5, za vrednosti r = 0, H = 5 m in D = 3 m.



Slika 6.5: q" v odvisnosti od oddaljenosti od požara y in količine sproščene toplote Q

#### 6.2.4 Kombinacija dvoconskega modela in lokaliziranega požara

Pri lokaliziranem požaru se porazdelitev temperature plinov lahko oceni z uporabo dvoconskega modela. V tem primeru je predpostavljena konstantna temperatura plinov v vsakem sloju. Povprečna temperatura vročega sloja je v splošnem določena z zadostno natančnostjo, dokler obravnavamo globalni fenomen: izločena količina dima iz požarnega sektorja, verjetnost izbruha požara, porušitev strehe ali stropa, itd.

Pri obravnavanju lokalnega obnašanja konstrukcijskega elementa nad požarom, pa je predpostavka konstantne temperature lahko na nevarni strani, zato je potrebno dvoconski model kombinirati z enačbo lokaliziranega požara, podano v odstavku 6.1.3.

Temperaturo ob prečki dobimo z ovojnico temperatur obeh modelov.



Slika 6.6 Kombinacija dvoconskega modela in lokaliziranega požara.

Višina dimne cone in temperature vročih plinov na nivoju jeklene konstrukcije in na različnih oddaljenostih od izvora požara, določimo z modelom TEFINAF [8]. Model kombinira dvoconski model, iz katerega dobimo višino in povprečno temperaturo vroče cone, in lokaliziran požar, iz katerega dobimo ekstremno vrednost temperature tik nad požarom in na različnih oddaljenostih od požara.

# 6.3 POLNO RAZVIT POŽAR

Za modeliranje polno razvitega požara znotraj objekta obstaja več modelov. Nekateri najpogosteje uporabljeni so predstavljeni v tem poglavju.

Koncept požarne varnosti na osnovi naravnega požara je alternativa nominalnemu požaru, definiranemu v predpisih (ISO, ogljikovodikov požar...)



Hidrodinamičen računski model (Computer Fluid Dynamics ali CFD) zaradi kompleksnosti ni obravnavan.

# 6.3.1 Parametričen požar

Bistvo parametričnega požara je upoštevanje najpomembnejšega fizikalnega parametra, ki lahko vpliva na razvoj požara v določenem objektu. Tako, kot nominalni požari, tudi parametrične požare opisujejo krivulje temperature v odvisnosti od časa, vendar pa te odvisnosti vsebujejo nekaj dodatnih parametrov, ki domnevno predstavljajo določeno povezavo z realnostjo.

V skoraj vsakem parametričnem požaru, ki ga najdemo v literaturi, so na takšen ali drugačen način upoštevani parametri, kot so:

- geometrija požarnega sektorja,
- požarna obtežba znotraj požarnega sektorja,
- odprtine v stenah in/ali strehi in
- vrsta in lastnosti različnih konstrukcijskih elementov, ki sestavljajo obod požarnega sektorja.

Parametrični požari temeljijo na hipotezi enakomerne temperature v požarnem sektorju, kar omejuje njihovo možnost uporabe pri polno razvitih požarih. V požarnih sektorjih večjih dimenzij. Navsezadnje, predstavljajo pomemben korak k upoštevanju realnega stanja določenega požara v primerjavi z naravnim požarom, medtem ko še vedno vsebujejo poenostavitve nekaterih

analitičnih izrazov, zato za njihovo uporabo ne potrebujemo naprednejšega računalniškega orodja.

Parametrični požar obravnava Dodatek A standarda SIST EN 1991-1-2 [1]. Krivulje temperaturačas so veljavne za požarne sektorje površine do 500 m<sup>2</sup> brez odprtin v stropu in z maksimalno višino sektorja 4 m.

Za izboljšanje predloga standarda SIST ENV1991-2-2 [23], so bile narejene naslednje spremembe:

- točnejši izračun b faktorja v primeru večplastnih zidov iz različnih materialov,
- vpeljava minimalnega časa trajanja požara pri gorivno nadzorovanem požaru, to je pri majhni požarni obtežbi in veliki površini odprtin in
- vpeljava korekcijskega faktorja, ki upošteva velik pretok mase skozi odprtine v primeru gorivno nadzorovanega požara.

Spodaj je podana nova enačba parametričnega požara, ki je veljavna za vsak b.

Razvoj temperature plinov znotraj požarnega sektorja je podana z izrazom:

$$\Theta_{g} = 20 + 1.325 \Big( 1 - 0.324 e^{-0.2t^{*}} - 0.204 e^{-1.7t^{*}} - 0.472 e^{-19t^{*}} \Big), \qquad (6.11)$$

kjer je

$$t^* = \Gamma t \tag{6.12}$$

$$\Gamma = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1.160)^2}$$
(6.13)

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \text{ z naslednjimi omejitvami : } 0,02 \le O \le 0,20$$
(6.14)

in

| t       | čas  |
|---------|--|
| $A_{v}$ | celotna površina vertikalnih odprtin v vseh stenah v m <sup>2</sup> ,  |
| h       | uteženo povprečje višin oken v vseh stenah v m,  |
| $A_t$   | celotna površina oboda (stene, stropovi in tla,vključno z odprtinami v m2,                                       |
| b       | $\sqrt{(\rho c \lambda)}$ v [J/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K] z naslednjimi omejitvami: $100 \le b \le 2200$ |

Trajanje faze segrevanja določimo z izrazom:

$$t_{\max} = \max(0, 2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O; t_{\lim}),$$
 (6.15)

kjer je:

 $q_{t,d}$  projektna vrednost gostote požarne obremenitve glede na skupno površino  $A_t$  oboda, pri čemer velja  $q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t [MJ/m^2]$ . Preveriti je potrebno naslednjo omejitev: 50  $\leq q_{t,d} \leq 1000 [MJ/m^2]$ .

t<sub>lim</sub> V primeru počasi razvijajočega se požara je  $t_{\text{lim}}$ = 25 min; v primeru srednje hitrosti razvoja požara je  $t_{\text{lim}}$ = 20 min in v primeru hitrega razvoja požara je  $t_{\text{lim}}$ = 15 min.
Ob uporabi izraza 6.15 imamo dve možnosti:

- Če je vrednost  $0.2 \times 10^{-3} q_{i,d}/O$  večja od izbrane mejne vrednosti  $t_{lim,}$ , se uporabijo izrazi 6.11 do 6.14 in 6.21 do 6.23.
- Če je vrednost  $0.2 \times 10^{-3} q_{i,d}/O$  nižja od izbrane limitne vrednosti  $t_{lim,}$ , se izrazi 6.11 do 6.14 in 6.21 do 6.23 spremenijo s faktorjem odprtin  $O_{lim}$ , ki ga izračunamo iz izraza:

$$O_{lim} = 0, l \times 10^{-3} q_{t,d} / t_{lim}$$
(6.16)

Izraza 6.15 in 6.16 spremenimo, kot sledi:

$$t_{\rm lim}^* = \Gamma_{\rm lim} t \tag{6.17}$$

$$\Gamma_{\rm lim} = \frac{\left(O_{\rm lim}/0, 04\right)^2}{\left(b/1.160\right)^2}$$
(6.18)

pri tem je  $t_{\text{lim}}^*$  v izrazu 6.11 uporabljen namesto  $t^*$ .

Upoštevamo še vpliv prezračevanja med fazo segrevanja, takrat je  $t_d = t_{\text{lim}}$ :

$$\check{C}e$$
  $O > 0,04$  in  $q_{t,d} < 75$  in  $b < 1.160$ 

potem je

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04}\right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75}\right) \left(\frac{1,160 - b}{1,160}\right)$$
(6.19)

in 
$$\Gamma_{\rm lim} = k \, \frac{\left(O_{\rm lim}/0, 04\right)^2}{\left(b/1.160\right)^2}$$
 (6.20)

Krivulje temperatura-čas za fazo ohlajevanja so podane z enačbami:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625 \left( t - t_{\max}^* \cdot x \right) \qquad \text{za} \quad t_d^* \leq 0.5 \qquad (6.21)$$

$$\Theta_{g} = \Theta_{\max} - 250(3 - t_{\max}^{*})(t - t_{\max}^{*} \cdot x) \quad \text{za} \quad 0.5 \leq t_{d}^{*} \leq 2.0$$
(6.22)

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 \left( t - t_{\max}^* \cdot x \right) \qquad \text{za} \quad 2,0 \leq t_d^*, \qquad (6.23)$$

kjer je:

 $\theta_{max}$  maksimalna temperature ob koncu faze segrevanja, definirana s 6.11, kjer je po 6.15  $t = t_d$ .

 $t_{\max}^* = \left( 0, 2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O \right) \cdot \Gamma$ 

$$\mathbf{x} = \begin{cases} 1 & za \ t_{max} > t_{lim} \\ \frac{t_{lim} \ \Gamma}{t_{max}^*} & za \ t_{max} = t_{lim} \end{cases}$$

Rezultati za požarno obtežbo ( $q_{t,d} = 180 \text{ MJ/m}^2$ ,  $b = 1.160 \text{ J/m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K}$ , faktor odprtin *O* od 0,04 m<sup>1/2</sup> do 0,20 m<sup>1/2</sup>) so prikazani na Sliki 6.8.



Slika 6.8. Primer parametričnega požara [1].

Pri parametričnem požaru je bila narejena primerjava med rezultati testov [12] in rezultati pri izpopolnjenih predpostavkah. Slika 6.9 prikazuje maksimalne temperature plinov. Koeficient korelacije, ki ima po ENV 1991-2-2 [23] vrednost le 0.19, ima zdaj vrednost 0.83.



Slika 6.9 Maksimalna temperatura plinov v požarnem sektorju.

# 6.3.2 Conski modeli

Conski modeli so že bili predstavljeni v poglavju 6.1.1, kjer je bil na kratko opisan dvoconski model. Dvoconske modele se uporablja v fazi pred izbruhom požara. Za modeliranje polno razvitega požara se uporablja enoconski model.

# 6.3.3 Enoconski model

Enoconski model temelji na predpostavki, da je temperatura plinov v požarnem sektorju med požarom enakomerna. Enoconski modeli so uporabni za fazo po izbruhu požara.

Podatki pri enoconskem modelu morajo biti bolj precizni kot za parametrične krivulje, in so enaki kot pri dvoconskem modelu.



Slika 6.10: Požarni sektor v enoconskem modelu, z energijskimi in masnimi pritoki in odtoki.

V obsegu ECSC-jevih projektov NFSC 1 & 2 [11, 12] je bil, v sodelovanju Univerze Liège in PROFILARBED-Research, razvit in sprejet dvoconski model OZone, ki je bil osnovan na osnovi 54 eksperimentalnih testov. Slika 6.11 prikazuje primerjavo maksimalne temperature plinov, dobljene z računalniškim modelom in iz testov. Točke na diagramu prikazujejo rezultate posameznih testov medtem, ko polna črta predstavlja idealno linijo. Črtkana črta predstavlja linearno regresijsko premico.



Slika 6.11 Maksimalna temperatura plinov v požarnem sktorju.

Še ena primerjava je prikazana na Sliki 6.12. Za vsak test, je bil razvoj temperature izračunan za tipični nezavarovan jeklen profil - HEB 200,  $A_m/V = 147 \text{ m}^{-1} - \text{najprej podvržen izmerjeni}$  temperaturi plinov in nato še izračunani temperaturi plinov. To nam omogoča izris diagrama, kjer je vsak test predstavljen z maksimalno temperaturo v nezavarovanem jeklenem profilu.



Slika 6.12 Maksimalna temperatura v nezavarovanem profilu.

#### 6.4 Kombinacija enoconskega in dvoconskega modela. Izbira modela.

Pri poznanih karakteristikah, kot so RHR krivulja, geometrija požarnega sektorja in lastnosti zidov, je potrebno izbrati model naravnega požara za uporabo glede na predviden potek dogodkov. Izbira bo narejena glede na področje uporabe modela.

V skladu s tem je predpostavljeno, da na začetku vedno uporabimo dvoconski model. Tu se poraja vprašanje, kdaj in kako pretvoriti dvoconski model v enoconski model.

Rezultati dvoconskega modela so podani v obliki dveh spremenljivk:

- temperatura zgornje cone Tu in
- višina meje med dvema conama Hi

Ti dve spremenljivki pogojujeta simulacijo z enoconskim modelom (glej Sliko 6.15). Naslednji štirje pogoji pa omejujejo uporabo dvoconskega modela:

- pogoj 1 (C1):  $T_u > 500^{\circ}C$ 

Temperatura plinov, višja od 500°C, vodi do izbruha požara, preko sevanja toplotnega toka na ostale požarne obtežbe v požarnem sektorju

- pogoj 2 (C2):  $H_i < H_q IN T_u > T_{ignition}$ 

Znižanje meje med plastmi (H<sub>i</sub>) je takšno, da so vsi gorljivi materiali v dimni plasti in, če je temperatura dimne plasti višja od  $T_{ignition}$ =300°C, to vodi do širjenja požara po celotnem požarnem sektorju.

pogoj 3 (C3): H<sub>i</sub> < 0,1 H

Meja med plastema se pomakne tako nizko, da je brezdimni sloj zelo tanek, kar ni značilno za dvoconski fenomen

- pogoj 4 (C4):  $A_{fi} > 0,5 A_{fi}$ 

Površina požara je prevelika v primerjavi s površino požarnega sektorja, da bi požar lahko obravnavali kot lokaliziran.

Pogoja 1 in 2 vodita do spremembe začetne hitrosti sproščanja toplote (simulacija z dvoconskim modelom) za simulacijo z enoconskim modelom. Ta sprememba je narejena in prikazana na sliki 6.13.



Slika 6.13 Projektne krivulje hitrosti sproščanja toplote pri požaru.

Zgornji pristop je opisan na sliki 6.14. Na shemi je prikazano pod katerimi pogoji (dvoconsko ali enoconsko modeliranje) je potrebno določiti projektne krivulje temperature.



Slika 6.14 Kombinacija enoconskega in dvoconskega modela

# 7 MEHANSKI VPLIVI PO EVROKODIH

V primeru požara, se obtežba določi s kombinacijo učinkov vplivov (povezava z 6.11b v SIST EN1990)

$$\sum_{i\geq 1} G_{k,j} \, + \, (\Psi_{1\!,1} \text{ or } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} \, + \, \sum_{i\geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \, \, ,$$

kjer je:

| G <sub>k,j</sub> | karakteristična vrednost stalne obtežbe                              |
|------------------|--|
| Q <sub>k,1</sub> | karakteristična vrednost prevladujoče spremenljive obtežbe           |
| Q <sub>k,i</sub> | karakteristična vrednost drugih spremenljivih obtežb                 |
| Ψ1,1             | kombinacijski faktor za pogosto obtežno kombinacijo vplivov          |
| Ψ2,i             | kombinacijski faktor za navidezno stalno obtežno kombinacijo vplivov |

Priporočene vrednosti faktorjev  $\psi_1$  in  $\psi_2$  so podane v preglednici A1.1 standarda SIST EN1990. V nacionalnem dodatku so lahko navedene drugačne vrednosti.

| Vpliv   | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |  |
|---|----------|----------|----------|--|
| Koristna obtežba v stavbah (glej EN 1991-1-1)             |          |          |          |  |
| Kategorija A: bivalni prostori                            | 0,7      | 0,5      | 0,3      |  |
| Kategorija B: pisarne                                     | 0,7      | 0,5      | 0,3      |  |
| Kategorija C: stavbe, kjer se zbirajo ljudje              | 0,7      | 0,7      | 0,6      |  |
| Kategorija D: trgovine                                    | 0,7      | 0,7      | 0,6      |  |
| Kategorija E: skladišča                                   | 1,0      | 0,9      | 0,8      |  |
| Kategorija F: prometne površine                           |          |          |          |  |
| vozilo s težo $\leq$ 30 kN                                | 0,7      | 0,7      | 0,6      |  |
| Kategorija G: prometne površine                           |          |          |          |  |
| $30 \text{ kN} \le \text{teža vozila} \le 160 \text{ kN}$ | 0,7      | 0,5      | 0,3      |  |
| Kategorija H: strehe                                      | 0        | 0        | 0        |  |
| Obtežba snega na stavbah (glej EN 1991-1-3)               |          |          |          |  |
| Finska, Islandija, Norveška, Švedska                      | 0,7      | 0,5      | 0,2      |  |
| Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino nad        |          |          |          |  |
| 1000 m  | 0,7      | 0,5      | 0,2      |  |
| Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino pod        |          |          |          |  |
| 1000 m  | 0,5      | 0,2      | 0        |  |
| Obtežba vetra v stavbah (glej EN 1991-1-4)                | 0,6      | 0,2      | 0        |  |
| Spremembe temperature (ne pri požaru) v stavbah (glej     |          |          |          |  |
| EN 1991-1-5)  | 0,6      | 0,5      | 0        |  |

Preglednica 7.1 – Priporočene vrednosti faktorjev w za stavbe

Pri metodah požarnega projektiranja po Evrokodih, se pogosto pojavlja pomembna količina, imenovana faktor redukcije nivoja obremenitve za požarno projektno stanje  $\eta_{ji}$ , ki je definiran kot

 $\eta_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$ , pri čemer je  $E_d$  projektna vrednost merodajnega učinka vpliva iz osnovne kombinacije glede na EN 1990 in  $E_{d,fi}$  ustrezna projektna vrednost v požarni situaciji. Faktor redukcije  $\eta_{fi}$  za obtežno kombinacijo (6.10) v EN 1990 je potrebno izračunati z izrazom:

$$\eta_{\text{fi},t} = \frac{G_{\text{k}} + \psi_{\text{fi},1}Q_{\text{k},1}}{\gamma_{\text{G}}G_{\text{k}} + \gamma_{\text{Q},1}Q_{\text{k},1}}$$

kjer je:

 $\gamma_{Q,1}$  delni faktor za spremenljivi vpliv 1.

Redukcijski faktor  $\eta_{fi}$  je odvisen od faktorja  $\psi_{1,1}$ , ki je odvisen od kategorije stavbe. Slika 7.1, podana v standardih EN1993-1-2 in EN1994-1-2 prikazuje vpliv razmerja  $Q_{k,1}/G_k$  in faktorja  $\psi_{1,1}$  na redukcijski faktor.



Slika 7.1 - Spreminjanje redukcijskega faktorja  $\eta_{\rm fi}$  v odvisnosti od Qk,1 / Gk

# 8 ZAKLJUČEK

V tem dokumentu smo spoznali različne modele za izračun temperature v odvisnosti od časa znotraj požarnega sektorja. Za izračun temperature konstrukcijskih elementov v odvisnosti od časa je potreben izračun toplotnega toka do teh elementov.

Prenos toplote s konvekcijo in radiacijo se pojavi med vročimi plini, plamenom, mejnimi elementi požarnega sektorja in konstrukcijskimi elementi. Prenos toplote je odvisen od koeficientov emisije in konvekcije.

Segrevanje konstrukcijskega elementa je odvisno od vrste elementa (t.j. jeklo ali sovprežna konstrukcija jeklo/beton) in vrste in količine požarne zaščite. Podrobnosti so podane v dokumantu WP2.

Iz poznavanja temperaturnega polja v konstrukciji in nezgodne obtežne kombinacije lahko določimo termo-mehansko obnašanje konstrukcije, ki je podrobneje obdelano v dokumentu WP3.

#### **9 REFERENCE**

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brussels, November 2002.
- [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Draft 27 march 1996)
- [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. April 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology 22/07/92
- [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method Version 1 June 1991
- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Second Edition 13th April 1995
- [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
- [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Final report CEC Agreement 7210/ SA210, 317,517,618,832-February 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Final report 1999 – EUR 18867 EN
- [10] CEN; prEN1990, Eurocode Basis of structural design, 2001.
- Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Final Report 2002 EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept –Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000;, Final Report 2003 - EUR 20580 EN..
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC -042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
- [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Draft for Approval for Publication; 27. March 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function -, NFSC WG4, Zürich, March 1996
- [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1 : Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, March 1996.
- [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984.

Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.

Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire".

Hasemi Y., Yokobayashi Y., Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.

- [18] Hietaniemi J: "Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; delft 1996
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocode 1– Basis of s design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003

# II.Poglavje: Termični odziv konstrukcije pri požarni obremenitvi

#### O. Vassart

ArcelorMittal Long Carbon Europe Research Centre

#### 1 UVOD

Konstrukcija je pri požaru izpostavljena mehanskim in toplotnim vplivom. V trenutku izbruha požara je mehanski vpliv posledica delovanja stalne in spremenljive obtežbe. Toplotni vpliv na mehanske lastnosti materiala povzroči povečana temperatura plinov v požarnem sektorju. Zaradi visoke temperature plinov pride do prehoda toplote preko površine konstrukcijskih elementov in temperatura v konstrukciji naraste. Pojav imenujemo toplotni odziv. Nastopijo plastične deformacije in poslabšanje mehanskih lastnosti materiala v segretem delu konstrukcije. Velike deformacije in poslabšanje mehanskih lastnosti materiala lahko pod določenimi pogoji povzročijo tudi globalno izgubo stabilnosti celotne konstrukcije ali dela konstrukcije. Ta proces imenuje mehanski odziv. Obnašanje konstrukcije pri požaru je shematično prikazan na sliki 1.



Pristop k požarnemu projektanju je predstavljen v prvem poglavju. Mehanski odziv je obravnavan v tretjem poglavju. To poglavje obravnava toplotni odziv jeklenih in sovprežnih (beton + jeklo) elementov v skladu z evrokodi, ki obravnavajo požarnoodporno projektiranje.

# 2 OSNOVNE ENAČBE IN PRIMERI

Prehod toplote skozi element konstrukcije je opisan s Fourier-jevo diferencialno enačbo v kombinaciji z ustreznimi robnimi in začetnimi pogoji:

$$\frac{\partial(\rho \ c \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z})}{\partial z} = 0$$
(1)

kjer so:

x, y, z koordinate, v enotah m

 $\Theta$  temperatura pri x, y, z v enotah °C

 $\rho$  gostota, v enotah kg/m<sup>3</sup>

c specifična toplota, v enotah J/kg

 $\lambda$  toplotna prevodnost, v enotah W/m °K

Podrobnejša razlaga gornje enačbe je podana v prilogi A.

Iz enačbe (1) vidimo, da na razvoj temperature v elementu zgradbe izpostavljenemu požaru vplivajo naslednji materialni parametri:

toplotna prevodnost

specifična toplota

Produkt specifične toplote in gostote se imenuje toplotna kapaciteta z enotami  $J/m^3$ . Toplotna prevodnost in toplotna kapaciteta sta močno odvisni od temperature. Odvisnost toplotne prevodnosti in toplotne kapacitete za jeklo in beton je prikazana na slikah 2a in 2b.





Na sliki 2b je prikazano naraščanje toplotne kapacitete z večanjem temperature. Pri temperaturi 730 <sup>0</sup>C nastopi v jeklu konica. Ta pojav nastopi zaradi fazne spremembe jekla. Konica se pri betonu pojavi pri nižji temperaturi kot pri jeklu, nastane pa zaradi izhlapevanja vlage iz betona.

Poudariti je potrebno, da je toplotna prevodnost jekla nekajkrat večja od betona. Zato je razporeditev temperature v jeklenih elementih, ki so izpostavljeni požaru, precej bolj enakomerna kot v betonskem delu sovprežnega elementa. Zaradi poenostavitev se velikokrat privzame, da je temperaturno polje v jeklenem prerezu konstantno.

Če poznamo materialne lastnosti elementa konstrukcije, lahko razvoj temperature za podani toplotni vpliv izračunamo s pomočjo enačbe (1). Analitične rešitve so na voljo le za enostavne primere [3]. Za reševanje realnih problemov v praksi namesto analitičnih rešitev uporabljamo numerične modele. Danes imamo na razpolago celo vrsto različnih numeričnih modelov, ki so podrobneje predstavljeni v 4. poglavju. Na slikah 3, 4 in 5 so predstavljeni numerični rezultati toplotnega odziva tipičnih elementov konstrukcije.

Na sliki 3 je prikazan toplotni odziv nezaščitenega jeklenega nosilca z betonsko ploščo na vrhu, izpostavljenega naravnemu požaru iz spodnje strani [4]. Vidimo, da je temperatura v spodnji pasnici in v stojini jeklenega nosilca praktično enaka, temperatura v zgornji pasnici pa zaostaja. Zaostajanje temperature je posledica izgube toplote napram relativno hladni betonski plošči, ki leži na vrhu zgornje pasnice. V enostavnih računskih modelih za jeklo je predpostavljen konstanten razpored temperature, ki temelji na temperaturi spodnjega dela jeklenega prereza. Nižjo temperaturo v zgornji pasnici se lahko upošteva s korekcijskim faktorjem  $\kappa$  v mehanski obtežbi.



Slika 3: Toplotni odziv: jekleni nosilec + betonska plošča

Na sliki 4 vidimo površinsko temperaturno polje v betonski plošči s profilirano pločevino po 120 minutni izpostavljenosti standardnemu požaru. Izračun je narejen z ravninskimi končnimi elementi s programom DIANA [5]. Prikazana je tudi primerjava med numeričnimi rezultati in testi za temperaturno polje. Ujemanje med testom in numerično analizo je dobro, še posebno v kritičnih področjih na zgornji strani reber (npr. točka D na desni strani slike 4). Razpored temperature je izrazito neenakomeren. Razlog temu je relativno nizka toplotna prevodnost betona.



Slika 5: Toplotni odziv robnega sovprežnega nosilca (3D)

Na sliki 5 je predstavljen toplotni odziv robnega sovprežnega nosilca, ki je modeliran s prostorskimi končnimi elemeni [6]. Jeklen profil je protipožarno zaščiten. Numerične analize s prostorskimi končnimi elementi so v projektantski praksi redkost. Namen predstavitve teh rezultatov je zgolj prikaz sposobnosti računskih orodij, ki so na trenutno voljo.

# **3** ANALIZA JEKLENIH ELEMENTOV

#### 3.1 Uvod

Glavni cilj analize toplotnega odziva je določitev požarne odpornosti, ki se nanaša na nosilnosti elementa pri mejni obtežbi.

Standard EN 1993-1-2 dovoljuje uporabo dveh različni računskih modelov za izračun odziva jeklenih konstrukcij, izpostavljenih požaru

- enostavni računski modeli
- napredni računski modeli.

Toplotni odziv v naprednih računskih modelih je opisan z enačbo (1). Takšni modeli so veljavni za splošen primer, tudi za neenakomerno temperaturno polje. Za razliko od enostavnih računskih modelov, kjer je osnovna predpostavka konstantno temperaturno polje. Zaradi visokega toplotne prevodnosti jekla je predpostavka o konstantnem temperaturnem polju upravičena.

Shematski prikaz računa požarne odpornosti jekla s konstantnim temperaturnim poljem je prikazana na sliki 6.



Slika 6: Račun požarne odpornosti jeklenih elementov z enostavnim računskim modelom

Požarna odpornost se določi v treh korakih in sicer:

1. korak: račun kritične temperature jekla (temperature pri porušitvi); ta temperatura je odvisna od razmerja med dejansko obtežbo in mejno obtežbo pri sobni temperaturi obravnavanega elementa in je rezultat analize mehanskega odziva, ki je predsatvljen v 4. poglavju.

2. korak: račun razvoja temperature po jeklenem prerezu z analizo toplotnega odziva jeklenega elementa.

3. korak: račun požarne odpornosti jeklenega elementa

V nadaljevanju je podrobneje predsatvljen 2. korak. Če se predpostavi, da je vrednost toplotne prevodnosti jekla neskončno velika, potem je temperaturno polje v jeklu konstantno. V tem primeru ima enačba (1) poenostavljeno obliko (glej Prilogo B):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{A_m/V}{\rho_a c_a} \cdot \dot{h}_{net,tot} \qquad \dots (2)$$

kjer so:

| $\theta_a$          | temperatura jekla, v enotah °C (predpostavljena je konstantna temp.)                       |
|---------------------|--|
| t                   | čas, v enotah s  |
| $\rho_a$            | gostota jekla, v enotah kg/m <sup>3</sup>  |
| ca                  | specifična toplota jekla, v enotah J/kg  |
| $\dot{h}_{net,tot}$ | celotni neto toplotni tok v jeklenem elementu, v enotah W/m <sup>2</sup>                   |
| A <sub>m</sub>      | površina jeklenega elementa, izpostavljena požaru, v enotah m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> |
| V                   | volumen jeklenega elementa, v enotah m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>                        |

Na desni strani enačbe:

"h<sub>net,tot</sub>" predstavlja toplotni vpliv, ki je odvisen od ustreznega požarnega modela (npr. standardni požar, ogljikovodikov požar, naravni požar) in zaščite jeklenega elementa, če le-ta obstaja

"pa ca" predstavlja vpliv toplotnih lastnosti jekla

"A<sub>m</sub>/V" predstavlja vpliv geometrije jeklenega prereza in izpostavljenosti požaru (izpostavljenost z vseh strani ali iz treh strani)

Enačba (2) je vgrajena v enostavni računski model. Pogosto se kot začetni pogoj predpostavi, da je sobna temperatura pred požarom 20°C. Robni pogoji so določeni s celotnim neto toplotnim tokom, ki s sevanjem in z konvekcijo prehaja na jekleni element.

Prenos toplote opisuje Stefan-Boltzmannov zakon sevanja. Osnovna enačba je podana je na sliki 7. Z njo lahko določimo toplotni tok, ki ga prejme jekleni element [3]. S konzervativnim približkom v obravnavanem požarnem modelu se da pokazati, da je temperatura s katero požar seva približno enaka temperaturi plinov. Enačba na sliki 7 opisuje prenos toplote s sevanjem in je podana v standardu SIST EN 1993-1-2 [1]. V njej nastopajo naslednje fizikalne količine:

- Stefan-Bolzmannova konstanta ( $\sigma = 5.67 \ 10^{-8} \ W/m^2 K^4$ ). Je fizikalna konstanta.
- Emisivnost površine elementa ( $\varepsilon_m$ ). Odvisna je od materiala na površini
- Konfiguracijski faktor (Φ): geometrijski faktor ≤ 1. Velikokrat je vrednost tega faktorja 1 (npr. simulacija standardnega testa)<sup>1</sup>.
- $\Theta_{\rm m}$  je temperatura na površini
- $\Theta_{rad}$  je temperatura sevanja
- $\alpha_c je$  koeficient konvekcije

Radiative heat transfer:  $h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot \left[ \Theta_r + 273 \right]^4 - \left( \Theta_m + 273 \right]^4 \right]$ 

**>** Convective heat transfer: 
$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_m \cdot (\Theta_g - \Theta_m)$$

Slika 7: Prehod toplote na površini, ki je izpostavljena požaru

Temperatura se izračuna z iterativnim postopkom; temperatura na površini ( $\Theta_m$ ) v določenem časovnem koraku se izračuna iz temperature v prejšnjem koraku po enačbi (1).

Neto prenos toplote s konvekcijo se lahko približno določi s temperaturno razliko ( $\Theta_g - \Theta_m$ ) in je opisan s koeficientom konvekcije ( $\alpha_c$ ). Vrednost koeficientom konvekcije ( $\alpha_c$ ) je od 25 (standardni požarni pogoji) do 50 W/m<sup>2</sup>K (ogljikovodikovi pogoji)<sup>2</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> V primeru, da je jekleni element izpostavljen lokaliziranemu požaru se uporabi  $\Phi < 1$ .

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> V primeru naravnega požara se uporabi  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2 \text{K}.$ 

Opisana pravila za izračuna so predstavljena v nadaljevanju, ločeno za primer nezaščitenih in za primer zaščitenih jeklenih konstrukcij.

#### 3.2 Nezaščitena jeklena konstrukcija

V standardu SIST EN 1993-1-2 [8] so podana pravila za izračun temperaturnega polja v nezaščiteni jekleni konstrukciji, ki temeljijo na eksperimentalno določenih koeficientih za prenos toplote s sevanjem ali s konvekcijo.

Prirastek temperature  $\Delta \theta_{a,t}$  v nezaščitenem jeklenem elementu v časovnem intervalu  $\Delta t$  se določi na naslednji način:

$$\Delta \theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_{\rm m}/V}{c_{\rm a}\rho_{\rm a}} \dot{h}_{\rm net,d} \Delta t , \qquad (3)$$

kjer so:

k<sub>sh</sub> korekcijski koeficient zaradi zasenčenja

 $h_{\text{net,d}}$  projektna vrednost neto toplotnega toka na enoto površine izračunana za nezaščiteno jeklo

V standardu SIST EN 1993-1-2 je v primerjavi s predstandardom uveden dodatni, korekcijski koeficient zaradi vpliva sence<sup>3</sup> k<sub>sh.</sub> Zasenčenje je pojav, ko konkavna oblika elementa (npr. Profili I, H, U) lokalno ščiti pred sevanjem. Tega pojava pri konveksnih prerezih, kot so votli profili, ni. Za I prereze izpostavljene standardnemu požaru se da pokazati [9], da je vpliv zasenčenja sorazmerno dobro opisan z enačbo:

$$k_{sh} = 0.9 [A_m/V]_{box}/[A_m/V]$$
 (4<sup>a</sup>)

kjer je:

 $[A_m/V]_{box}$  faktor prereza za namišljeno škatlo, ki objema I prerez<sup>4</sup>

V vseh ostalih primerih je

$$\mathbf{k}_{\rm sh} = [\mathbf{A}_{\rm m}/\mathbf{V}]_{\rm box}/[\mathbf{A}_{\rm m}/\mathbf{V}] \tag{4b}$$

Iz zgornjih dveh enačb sledi, da pri votlih profilih učinka sence ni, saj velja  $[A_m/V] = [A_m/V]_{box}$ 

Na sliki 8 so zbrane osnovne enačbe za izračun prirastka temperature v nezaščitenem jeklenem elementu.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Korekcijski koeficient ne loči med toplotnim tokom, ki se prenaša s sevanjem oziroma s konvekcijo. Učinek sence ima manjši vpliv na prenos toplote s sevanjem kot na prenos s konvekcijo. Ta vpliv je zanemarjen, saj se le manjši del toplote pri požaru prenese s konvekcijo

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Faktor prereza za namišljeno škatlo, ki objema prerez, je definiran kot razmerje med izpostavljeno površino namišljene škatle, ki obdaja prerez in volumnom

$$\frac{d \Theta_{a}}{d t} = k_{sh} \frac{A_{m}/V}{\rho_{a}c_{a}} \cdot \dot{h}_{net,tot} \qquad \dots (1)$$

$$\Delta \Theta_{a} = k_{sh} \frac{K_{bare}}{\rho_{a}c_{a}} \cdot \frac{A_{m}}{V} \cdot (\Theta_{g} - \Theta_{a}) \cdot \Delta t \quad \dots (2)$$

$$Z$$

$$K_{bare} = \alpha_{c} + \frac{\varepsilon_{m}\sigma \left[ (\Theta_{g} + 273)^{4} - (\Theta_{a} + 273)^{4} \right]}{\Omega_{c}} \qquad \dots (2)$$

 $\Theta_{g} - \Theta_{a}$ Slika 8: Prirastek temperature v nezaščiteni jekleni konstrukciji

(3)

Na Sliki 8 so:

| ΔΘa                        | sprememba temperature v jeklu          |
|----------------------------|--|
| $\Delta t$                 | časovni korak                          |
| A <sub>m</sub> /V          | faktor prereza                         |
| K <sub>bare</sub>          | koeficient prenosa toplote             |
| $\mathbf{k}_{\mathrm{sh}}$ | korekcijski koeficient zaradi senčenja |

#### 3.3 Zaščitena jeklena konstrukcija

Temperatura v zaščiteni jekleni konstrukciji se prav tako izračuna z enačbi (3), le da se v tem primeru upošteva neto toplotni tok. Razlika temperature v zaščiti (požarni izolaciji) in zunaj nje je relativno velika. Poleg tega je temperatura na zunanji površini zaščite skoraj enaka temperaturi plinov. Vpliv toplotnega sevanja je potemtakem majhen in se ga običajno lahko zanemari. Zaradi tega je tudi vpliv sence in s tem korekcijski koeficient k<sub>sh</sub> zanemarljiv. Osnovne enačbe za izračun prirastka temperature so podane na sliki 9. Koeficient celotnega pretoka toplote K<sub>ins</sub> je definiran podobno kot za nezaščitene jeklene prereze. Dodatno je odvisen od debeline zaščite (d<sub>p</sub>) in od toplotnih lastnosti jekla ( $\rho_a$ ,  $c_a$ ) in zaščite ( $\lambda_p$ ,  $\rho_p$ ,  $c_p$ ). V standardu SIST EN1993-1-2 so enačbe podrobneje predstavljene. V primeru, da je toplotna kapaciteta zaščite zelo majhna v primerjavi s toplotno kapaciteto jekla, se lahko v požarni zaščiti predpostavi linearen potek temperature. Koeficient celotnega pretoka toplote K<sub>ins</sub> je v tem primeru K<sub>ins</sub>  $\approx \lambda_p/d_p$ .

$$\Delta \theta_{a} = \frac{K_{ins}}{\rho_{a}c_{a}} \cdot \frac{A_{m}}{V} \cdot (\Theta_{g} - \Theta_{a}) \cdot \Delta_{t} \quad \dots \text{ (a)}$$

with

$$K_{ins} = K_{ins} (\frac{\lambda}{d}, \rho_p, c_p, \rho_a, c_a) \dots (b)$$

Notes: (!)  $\Theta_g - \Theta_m <<<< \Theta_m - \Theta_a$ (2) for light weight insulation:  $K_{ins} \approx \lambda/d$ 

offects

insulation

effect thermal thermal capacity insulation

temperature distribution

steel strip

Slika 9: Sprememba temperature v zaščitenem jeklu in osnovne enačbe

# 3.4 Projektni parametri za izračun temperature

### 3.4.1 Splošno

Razvoj temperature v jeklenem elementu je za dan požar odvisen od naslednjih dveh projektnih parametrov:

- faktorja prereza A<sub>m</sub>/V, A<sub>p</sub>/V (posebej za nezaščitene in za zaščitene elemente)
- lastnosti požarne zaščite  $d_p$ ,  $\lambda_p$ ,  $\rho_p$ ,  $c_p$

Opis parametrov bo omejen predvsem na analizo s standardnim požar, ki je v inženirski praksi tudi najbolj razširjen. Poleg tega je v poglavju 3.4.4 predstavljen koncept analize z naravnim požarom za nezaščitene in za zaščitene jeklene konstrukcije.

#### 3.4.2 Faktor prereza

Na sliki 10 je podan razvoj temperature v nezaščitenem jeklenem elementu za primer standardnega požara za različne faktorje prereza. Vrednosti faktorja prereza so izbrane med 50 in 400 m<sup>-1</sup>, kar predstavlja vrednosti za standardne profile. Za faktorj prereza 100 m<sup>-1</sup> je podana krivulja tudi za zaščiteni prerez.

Razvoj temperature v odvisnosti od faktorja prereza je bolj podrobno predstavljen na sliki 11. Na sliki 11a so krivulje za nezaščiten prerez, kjer vsaka izmed krivulj predstavlja čas trajanja standardnega požara. Na sliki 11b je prikazan razvoj temperature za različne debeline zaščite, kjer je element izpostavljn 90 minutnem standardnem požaru.

Zaključimo lahko, da ima faktor prereza pomemben vpliv na razvoj temperature v jeklenem elementu še posebej, če je vrednost faktorja prereza mala in za primer tanke debeline zaščite.



Slika 10: Razvoj temperature v jeklenih prerezih v časovni odvisnosti



Slika 11: Razvoj temperature v jeklenih prerezih v odvisnosti od faktorja prereza

Faktor prereza je definiran z razmerjem med površino preko katere se toplota prenaša v jeklen prerez in volumnom jeklenega prereza. Poleg tega je potrebno upoštevati:

za zaščito z oblogo, je obseg jeklenega prereza določen z obsegom oblog, ki obdajajo jeklen prerez

 prehod toplote med betonsko ploščo in jeklenim prerezom se zanemari za jeklene prereze pod betonsko ploščo.

Na sliki 12 je prikazanih nekaj primerov izpostavljenosti elementov požaru in podani so faktorji zaščitenega prereza. Obsežnejši pregled je podan v standardu SIST EN 1993-1-2.



Neizolirani elementi Izolirani elementi

Definicija: razmerje med površino, skozi katero se prenaša toplota v jeklo, in volumnom

(a) koncept (b) primeri s številkami

Slika 12: Faktor prereza za jeklene elemente

### 3.4.3 Lastnosti požarne zaščite

Lastnosti požarne zaščite so določena z naslednjimi količinami:

- toplotna prevodnost ( $\lambda_p$ )
- specifična toplota (c<sub>p</sub>)
- gostota ( $\rho_p$ )
- debelina  $(d_p)$

Prve tri od zgoraj naštetih količin imenujemo fizikalne lastnosti. Lastnosti le teh se med samim požarom spreminjajo. Lastnosti količin pri povišani temperaturi se spreminjajo zaradi nastanka razpok, razslojevanja, potovanja vlage po zaščitnem materialu ... Še posebej velike spremebe so pri toplotni prevodnosti. Tako imajo materiali, ki se uporabljajo za požarno zaščito, ob povišani temperaturi lahko precej višjo toplotno prevodnost kot pri sobni temperaturi. Zato moramo biti pri projektiranju požarne odpornosti pozorni na izbrano vrednost toplotne prevodnosti  $\lambda_p$ , saj so le te v priročnikih ponavadi podane za sobno temperaturo.

Za pravilno določitev toplotne prevodnosti  $\lambda_p$  pri povišani je bil razvit delno empirični pristop [10], kjer sta bila predvidena dva tipa testov:

- testi na nosilcih z in brez dodatne obtežbe
- testi na kratkih stebrih, brez dodatne obtežbe

S testi pod točko (a) preverimo, ali sistem požarne zaščite ostane nepoškodovan in pritrjen na jeklene elemente med požarno obremenitvijo v skladu z zahtevami standarda SIST EN 1993-1-2. Test se izvede v peči na dveh parih nosilcev z enakim prerezom. Vsak par nosilcev je

izpostavljen standardnemu požaru, en z in drugi brez dodatne obtežbe. En par nosilcev ima debelo požarno zaščito, drugi par tanko. Predpostavi se, da je razlika v toplotnem odzivu posledica mehanskih deformacij zaradi dodatne obtežbe.

S testi pod točko (b) določimo vrednosti toplotne prevodnosti  $\lambda_p$  pri povišani temperaturi. Testiramo serijo desetih stebrov, višine en meter. Preizkušanci se med seboj razlikujejo po debelino požarne zaščite in po faktorju prereza. Rezultati testov so prikazani na sliki 11b. Danes imamo na voljo računalniške programe, ki za določitev požarne odpornosti uporabljajo omenjene eksperimentalne rezultate.

Na sliki 13 je prikazan nosilec z dodatno obtežbo pred in po požarnem testu. Nosilec se med požarom močno deformira in nastopijo tako velike poškodbe požarnega sloja, da le ta odpade.



(a) pred požarnim testom (b) po požarnem testu Slika 13: Deformacije obremenjenega nosilca kot posledica požara

Trg ponuja različne sistemi požarne zaščite. Ločimo zaščito v obliki:

- obrizgi
- plošče
- ekpanzijski premazi

Poseben način požarne zaščite predstavljajo toplotno odporni paneli. Montirajo se vertikalno (za zaščito jeklenih stebrov) ali horizontalno (za zaščito jeklenih nosilcev medetažne ali strešne konstrukcije).

Za praktično uporabo imamo na razpolago evro monograme [13], ki nam omogočajo hitro in enostavno določitev temperature v zaščitenih in v nezaščitenih prerezih v odvisnosti od časa izpostavljenosti požaru. Primer takega evro monograma je prikazan na Sliki 14. Za znani čas izpostavljenosti požaru se temperatura nezaščitenega jeklenega elementa določi kot funkcija faktorja prereza za nezaščiten jeklen element  $A_m/V$ . Pri zaščitenem elementu je vhodni parameter faktor ( $\lambda_p/d_p$ ) • ( $A_p/V$ ).



Ska 14: Euronomogrami

### Posebna požarna stanja

V prvem poglavju je bil poudarek na projektiranju z naravnim požarom. Pristop je možno neposredno uporabiti pri nezaščitenem jeklu, ker so toplotne in mehanske karakteristike jekla enake tudi pri posebnih požarnih stanjih. To pa ne drži za toplotne lastnosti izolacijskih materialov, ki so eksperimentalno določene s standardnim požarom. Na voljo nimamo informacij o tem, kako na njihove vrednosti vplivajo popolnoma drugačni pogoji od standardnega požara. Zaradi tega je projektiranje požarno zaščitenih elementov v pogojih naravnega požara vprašljivo. Po drugi strani pa se je potrebno zavedati, da se danes toplotne karakteristike uporablja brez pomislekov kljub temu, da je lahko dejanski požar precej drugačen od standardnega požara.

# 4 ANALIZA SOVPREŽNIH ELEMENTOV

#### 4.1 Uvod

Sovprežne konstrukcije obravnava standard SIST EN 1994.1.2. Glede na njihovo naravo, imajo lahko sovprežni elementi funkcijo nosilnosti ali funkcijo ločevanja. Zato, mora biti zadoščeno vsem trem kriterijem požarne odpornosti:

- nosilnost
- izolacija
- integriteta<sup>5</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Za verifikacijo kriterija integritete zaenkrat ne obstajajo nobeni računski modeli, zato ta kriterij v tej študiji ni obravnavan.



Slika. 15: Vrste sovprežnih elementov po SIST EN 1994.1.2

Beton je integralni del prečnega prereza sovprežnega elementa. Za razliko od jekla za beton ne velja predpostavka o konstantnem temperaturnem polju. V standardu SIST EN 1994-1-2 so podani napredni računski modeli za račun spremenljivega temperaturnega polja po betonskem prerezu. Poleg tega v standardu najdemo tudi uporabne podatke v obliki tabel.

Zaenkrat tabelirani podatki obravnavajo prečke z ravno betonsko ploščo na vrhu jeklenega nosilca. Medtem, ko za sovprežne plošče s profilirano pločevino tabelirani podatki niso podani.

Pri enostavnih računskih modelih toplotni odziv pogosto temelji na naprednejših modelih za prenos toplote. Toplotni odziv lahko določimo na tri različne načine:

- Enostaven računski model temelji na delno empiričnih pravilih, ki temeljijo na konvencionalnih predpostavkah; ta pristop je uporaben za sovprežne stebre z betonom med pasnicami (glej Sliko 15b).
- Napredni model se uporabi v parametrični študiji, na osnovi katere se določijo pravila za enostavne modele; ta pristop je uporaben za sovprežne stropove (glej Sliko 15b).
- Napredni model se uporabi v enostavnem modelu. Poenostavitve se nanašajo na mehanski odziv; ta pristop je bil uporabljen za okrogle votle stebre, polnjene z betonom (glej Sliko 15c).

V dodatku C standarda SIST EN 1994-1-2 je podana bolj natančna razlaga za uporabo tabeliranih podatkov in analize toplotnega odziva v enostavnih modelih.

Toplotni odziv v naprednih modelih opisuje enačba prenosa toplote, ki je podrobneje opisana v drugem poglavju (glej slike 3, 4 in 5). Rešitev te enačbe za sovprežne elemente je podobna rešitvi za beton in jeklo.

V nadaljevanu bodo predstavljena:

- Računska pravila za toplotni odziv sovprežnih stebrov z delno obbetoniranim jeklenim elementom (jeklen steber z betonom med pasnicama).
- Enostavna računska pravila za kontrolo kriterija izolacije za betonske plošče s profilirano jekleno pločevino.
- Enostavna računska pravila za določitev temperature v natezni armaturi v betonski plošči s profilirano jekleno pločevino.

 Uporaba naprednega računskega modela toplotnega odziva v "enostavnem" modelu za račun požarne odpornosti sovprežnega stebra, sestavljenega iz jeklenega okroglega votlega profila polnjenega z betonom.

# 4.2 Enostavna pravila za toplotni odziv sovprežnega stebra z delno zaprtim jeklenim profilom

Za oceno toplotnega odziva sovprežnega stebra z delno zaprtim jeklenim profilom, se prečni prerez razdeli na štiri komponente:

- pasnice jeklenega profila,
- stojino jeklenega profila,
- betonski prerez znotraj jeklenega profila,
- armaturo.

Vsaka komponenta se ovrednoti na osnovi zmanjšane nosilnosti in togosti v odvisnosti od povišane povprečne temperature. Pri betonskem prerezu in v stojini jeklenega profila se dodatno upošteva zmanjšanje prečnega prereza (glej sliko 16).



Slika 16: Zmanjšan prečni prerez sovprežnega stebra z delno zaprtim jeklenim profilom

Enostavna računska pravila veljajo le v pogojih standardnega požara in v primeru, ko je element izpostavljen požaru iz vseh štirih strani.

Povprečna temperatura in zmanjšanje betonskega prečnega prereza sta odvisna od časa izpostavljenosti standardnemu požaru (30, 60, 90 ali 120 minut) in od geometrije prečnega prereza. Slednjo opišemo s faktorjem prereza, ki ima v tem primeru obliko:

$$A_m / V = \frac{2(b+h)}{b \cdot h} \tag{5}$$

#### 4.3 Izolacijski kriterij za sovprežne betonske plošče s profilirano jekleno pločevino

Kriterij za toplotno izolacijo v primeru enostavnega računskega modela se glasi; prirastek temperature na strani elementa, ki ni neposredno izpostavljen požaru, ne sme biti večji od povprečne temperature 140 °C. Poleg tega temperaturni prirastek v nobeni točki ne sme biti večji od 180 °C. V sovprežni betonski plošči z jekleno profilirano pločevino, se temperatura na strani

elementa, ki ni neposredno izpostavljen požaru spreminja zaradi oblike prereza profilirane pločevine (glej Sliko 17). Omenjena lastnost je upoštevana v enostavnem računskem modelu.



Slika 17:Sovprežna betonska plošča - potek temperature na strani elementa, ki ni neposredno izpostavljena požaru.

Za značilne sovprežne stropove, ki se uporabljajo v Evropi so narejeni izračuni toplotnega odziva (Preglednica 1). Izračun je narejen tako za zaprto kot za odprto, trapezno obliko prereza profilirane pločevine.

| 8  | 1 1  | 1                       |
|--|--|-------------------------|
| Oblika pločevine   | Debelina sovprežne plošče<br>H <sub>B</sub> [mm] | Vrsta betona            |
| Zaprta oblika prereza profilirane pločevine (6x)               | 50, 60, 70, 80,                                  | Normalni in lahki beton |
| Odprta, trapezna oblika prereza<br>profilirane pločevine (49x) | 90, 100, 110, 120                                |                         |

#### Preglednica 1: Izračun toplote za trenutno dostopne pločevine

Izračun je narejen po enačbi (1). Velja za normalni in za lahki beton z naslednjimi predpostavkami:

- standardni požar deluje neposredno na spodnjo stran sovprežnega prereza
- pogoji prenosa toplote na izpostavljeni strani (konvekcija in radiacija) se določijo za profilirano obliko plošče in za vpliv plasti cinka (za detajlni opis glej [15])
- toplotna prevodnost ( $\lambda_c$ ) in toplotna kapaciteta ( $\rho_c c_c$ ) betona so določene v skladu s standardom Evrokod
- povprečna vlažnost betona znaša 4% pri normalnih betonih in 5% pri lahkih betonih (pri suhi teži)

Za vsak obravnavan primer (glej Preglednico 1) je izračunan čas, za doseg zgornjega izolacijskega kriterija (=  $t_{f,i}$ ). Rezultati so obdelani z linearno regresijo ob uporabi sledečih parametrov:

- faktor geometrije rebra  $(A/L_r)$
- konfiguracijski faktor zgornje pasnice ( $\Phi$ )
- višina betonske plošče  $(h_1)$
- širina zgornje pasnice  $(l_3)$ .

Regresijske konstante so določene z enostavno linearno regresijo. Postopek je prikazan na Sliki 18. Podrobnejše je izračun prikazan v Dodatku D na koncu tega poglavja.



#### Slika 18: Sovprežne plošča

Enačba za določitev požarne odpornosti z upoštevanjem izolacijskega kriterija je podana v standardu SIST EN 1994-1-2 in nadomešča ustrezno enačbo iz predstandarda ENV. Na sliki 19a je narejena primerjava med rezultati poenostavljenega in naprednega modela. Za orientacijo, je na sliki 19b narejena podobna primerjava, med pravili iz predstandarda ENV in naprednim modelom. Iz primerjave je razvidno, da z uporabo novih pravil dobimo boljšo oceno požarne odpornosti elementov, ki so zašiteni s požarno izolacijo.



Slika 19:(a) primerjava z novim pravilom $e \circ$ (b) primerjava z ENV 1994-1-2iraniUstrezni regresijski faktorji za normalni in za lahki beton so podani v Preglednici 2.

|                | $a_0$ | <i>a</i> <sub>1</sub> | <i>a</i> <sub>2</sub> | <i>a</i> <sub>3</sub> | $a_4$    | $a_5$ |
|----------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-------|
|                | [min] | [min/mm]              | [min]                 | [min/mm]              | [mm min] | [min] |
| Normalni beton | -28,8 | 1,55                  | -12,6                 | 0,33                  | -735     | 48,0  |
| Lahki beton    | -79,2 | 2,18                  | -2,44                 | 0,56                  | -542     | 52,3  |

Preglednica 2: Koeficienti za določitev požarne odpornosti z upoštevanjem toplotne izolativnosti

# 4.4 Računska pravila za izračun armature v sovprežni betonski plošči z jekleno profilirano pločevino

Za izračun plastičnega odpornostnega momenta prereza in s tem potrebne armature je ključnega pomena poznano temperaturno polje. Armatura se določi ločena za polje in nad podporo. V nadaljevanju je podrobneje prikazan izračun temperature v dodatmi armaturi v polju, ki je običajno vgrajena v sredino reber sovprežnega prereza.

Temperatura v armaturi palici pomembno vpliva na izračunu upogibne nosilnosti<sup>6</sup> prereza.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> V zgornjem delu prečnega prereza (tlak) je temperature nizka. Zato v izračunu pozitivnega plastičnega upogibnega momenta v betonskem delu prereza predpostavimo sobno temperature.

Temperaturo v armaturini palici ( $\theta_s$ ) izračunamo z regresijsko enačbo, podobno kot je to opisano v poglavju 4.3. Določimo jo v odvisnosti od naslednjih parametrov:

- oddaljenost do spodnje pasnice (u<sub>3</sub>)
- lega armaturne palice v rebru (z)
- naklonski kot stojine rebra (α)

Izračuna se po enačbi:

$$\theta_{s} = c_{0} + \left(c_{1} \cdot \frac{u_{3}}{h_{2}}\right) + \left(c_{2} \cdot z\right) + \left(c_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}}\right) + \left(c_{4} \cdot \alpha\right) + \left(c_{5} \cdot \frac{1}{l_{3}}\right)$$
(6)

Postopek izračuna je prikazan na Sliki 20. Celoten postopek je podan v Dodateku E na koncu tega poglavja. Teoretično ozadje izračuna je predstavljeno v [15].



Slika 20: Izračun temperature v pozitivni armaturi

Koeficienti  $c_i$  so odvisni od časa izpostavljenosti standardnemu požaru. Za normalne in lahke betone so podani v Preglednici 3.

|          |                 |       |                       | - <b>P</b>              | Prese Pres Pres | 8                     | • • • • |
|----------|-----------------|-------|-----------------------|-------------------------|---|-----------------------|---------|
| Beton    | Požarna         | $c_0$ | <i>c</i> <sub>1</sub> | <i>C</i> <sub>2</sub>   | $c_3$ [°C/mm]   | <i>C</i> <sub>4</sub> | C5      |
|          | odpornost [min] | [°C]  | [°C]                  | [°C/mm <sup>0.5</sup> ] |   | [°C/°]                | [°Cmm]  |
| Normalni | 60              | 1191  | -250                  | -240                    | -5.01   | 1.04                  | -925    |
|          | 90              | 1342  | -256                  | -235                    | -5.30   | 1.39                  | -1267   |
|          | 120             | 1387  | -238                  | -227                    | -4.79   | 1.68                  | -1326   |
|          | 30              | 809   | -135                  | -243                    | -0.70   | 0.48                  | -315    |
| Lahlei   | 60              | 1336  | -242                  | -292                    | -6.11   | 1.63                  | -900    |
| Lanki    | 90              | 1381  | -240                  | -269                    | -5.46   | 2.24                  | -918    |
|          | 120             | 1397  | -230                  | -253                    | -4.44   | 2.47                  | -906    |

Preglednica 3: Koeficienti za določitev temperature v armaturni palici vgrajeni v rebro

Na sliki 21a je prikazana primerjava med poenostavljenim in naprednim računskim modelom. Na sliki 21b je narejena podobna primerjava, med pravili iz predstandarda ENV za požarnoodporno projektiranje sovprežnih konstrukcij [16] in med naprednim modelom. Iz primerjave sledi, da z uporabo novih pravil dobimo boljšo oceno temperature v armaturi.



Slika 21: Primerjava različnih računskih postopkov za določitev temperature v armaturni palici

Zgoraj opisan pristop je uporabljen v standardu SIST EN 1994-1-2. Poleg tega omenjeni standard podaja tudi enostavna računska pravila za izračun temperature v različnih delih jeklene pločevine, saj k upogibni nosilnosti sovprežnega elementa nekaj prispeva tudi profilirana jeklena pločevina. Pravila za profilirano jekleno pločevino so podobna tistim za določitev temperature v armaturi.

# 4.5 Model toplotnega odziva za račun požarne odpornosti sovprežnega stebra – jekleni votli profili (SHS) zapolnjeni z betonom

Računska pravila za toplotni odziv jeklenih votlih stebrom (SHS), ki so zapolnjeni z betonom, temeljijo na naprednih računskih modelih. Poenostavitve računa sovprežnega stebra so upoštevane samo v računu mehanskega odziva. Toplotni odziv je računan za standardni požar v kombinaciji s pogoji za prenos toplote, podanimi v standardu SIST EN 1991-1-2. Glavni parametri so<sup>7</sup>:

- čas izpostavljenosti standardnemu požaru in
- dimenzije prečnega prereza škatlastega sovprežnega stebra.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Glavni parametri mehanskega odziva so: kvaliteta jekla, kvaliteta betona, % ojačilne armature

Enostavna analitična računska pravila odpadejo. Za inženirsko prakso bi bilo zato potrebno izdelati ogromno število diagramov. Tak primer je priročnik za dimenzioniranje škatlastih stebrov izpostavljenih požaru (CIDECT). V priročniku so podane informacije za dimenzioniranje, ki temeljijo na predstandardu ENV 1994-1-2 in vsebuje več kot 40 diagramov Primer diagrama za dimenzioniranje je prikazan na sliki 22a.



Poleg priročnikov imamo danes na razpolago uporabniku prijazen program POTFIRE. Program izračuna požarno odpornost škatlastega sovprežnega stebra, izpostavljenega standardnemu požaru. Program je popolnoma skladen s Evrokod standardi. Na sliki 22b je prikazano pogovorno okence programa za vnos vhodnih podatkov in izpis rezultatov. Pravilnost izračuna s računalniškim programom je potrjena s številnimi standardnimi požarnimi testi.

Na Sliki 23 je prikazana primerjava rezultatov med testi in programom POTFIRE za škatlasti sovprežni steber. Ujemanje je zadovoljivo.



Slika 23: Temperatura v škatlastem (SHS) sovprežnem stebru – test in program POTFIRE

Zavedati se moramo, da imajo na splošno računski modeli kot je POTFIRE omejeno področje uporabe (glej Preglednico 4). Vzrok je bolj v nezanesljivosti modela za izračun mehanskega odziva kot v nezanesljivosti modela za izračun toplotnega odziva.

| un | inica 4. Obinocje uporabe racunskega modela za skatiasti (5115) sovprezin s |                              |              |  |  |  |  |  |
|----|---|------------------------------|--------------|--|--|--|--|--|
|    | Spodnja meja  | Vidik                        | Zgornja meja |  |  |  |  |  |
|    | 0   | Uklonska dolžina             | 13.5 m       |  |  |  |  |  |
|    | 230 mm  | Višina prečnega prereza      | 1100 mm      |  |  |  |  |  |
|    | 230 mm  | Širina prečnega prereza      | 500 mm       |  |  |  |  |  |
|    | 0 %   | % armature                   | 6%           |  |  |  |  |  |
|    | 0 min   | Standardna požarna odpornost | 120 min      |  |  |  |  |  |

| Dragladnias 4.  | Ohmažia | unoraha | nožunskogo | modele ze | čkatlasti | (CIIC) | soumnožni stohon |
|-----------------|---------|---------|------------|-----------|-----------|--------|------------------|
| i regieunica 4. | Obmocje | uporabe | гасинъкеда | mouera za | skattasti | (SIIS) | sovprezin steber |

# 4.6 Povzetek

Račun toplotnega odziva sovprežnega elementa je v primerjavi z analizo toplotnega odziva nezaščitenega ali izoliranega jeklenega elementa kompleksen. Vzrok za kompleksnost izračuna je neenakomerna razporeditev temperature v sovprežnem prerezu. Standard SIST EN 1994-1-2 zato ponuja naslednja orodja:

- tabelirane podatke in
- enostavne računske modele.

Tabelirani podatki temeljijo na izkušnjah, pridobljenih iz standardnih požarnih testov.

Predpostavke enostavnih računskih modelov se med seboj močno razlikujejo. Predposatvke temeljijo na razlagi rezultatov, dobljenih neposredno s standardnimi požarnimi testi z upoštevanjem osnovnih teoretičnih konceptov. V nekaterih primerih so enostavna pravila dobljena iz numeričnih parametričnih študij na naprednih računskih modelih. Tak primer je sovprežna plošča s profilirano jekleno pločevino. V drugih primerih je uporabljen napredni računski model, kot npr, za škatlasti sovprežni steber, polnjen z betonom.

Skupna lastnost enostavnih modelov za analizo toplotnega odziva je omejitev področja uporabe na pogoje pri standardnem požaru.

Koncept požarno varnega projektiranja v pogojih naravnega požara sovprežnih konstrukcij zahteva bolj natančno modeliranje. Danes imamo za to na razpolago številne računalniške programe.

- [1] SIST EN 1993-1-2: "Eurocode 3: Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules Structural fire design".
- [2] SIST EN 1994-1-2: "Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, part 1.2: General Rules Fire Design".
- [3] Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.: "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer". John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [4] Twilt, L. et al: "Design tools for the behaviour of multi-storey steel-framed buildings exposed to natural fires". Report EUR 20953 EN, European Commission, Science Research and Development, 2004.
- [5] Both, C., Stark, J.W.B. and Twilt, L.: "Numerical simulation of thermal and structural response of composite steel/concrete structures to fire". Proceedings 4<sup>th</sup> Pacific Structural Steel Conference, pp 171-178, Singapore, 1995
- [6] Both, C.: "3D analysis of fire exposed composite slabs". Proceedings 3<sup>rd</sup> CIB/W14 Workshop on Modelling, Delft, 1993.
- [7] SIST EN 1991-1-2: "Eurocode 1: Actions on Structures, part 1.2: General Actions Actions on structures exposed to fire".
- [8] SIST EN 1993-1-2: "Eurocode 3: Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules Structural fire design".
- [9] Twilt, L., Leur, P.H.E. v.d., and Both, C.: "Characteristics of the heat transfer for calculating the temperature development in structural steelwork exposed to standard fire conditions under plate thermocouple control". Proceedings of the first international workshop "Structures in Fire", Copenhagen, June 19 and 20, 2001.
- [10] ENV13381-4: "Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 4: Applied protection to steel members". CEN TC 127, 2002.
- [11] prENV13381-1: "Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Horizontal protective membranes". CEN TC 127, (under preparation).
- [12] ENV13381-2: "Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Vertical protective membranes". CEN TC 127, 2002.
- [13] ECCS TC3: Eurono-monograms for fire exposed steelwork
- [14] EN 1363-1: Fire resistance tests Part 1: General requirements", CEN TC 127, 1999.
- [15] Both, C.: The Fire Resistance of Composites Steel-Concrete Slabs", Dissertation TU Delft, 1998.
- [16] SIST EN 1994-1-2: "Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, part 1.2: General Rules – Structural fire design".

- [17] Twilt, L. et al: "Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire". CIDECT, Verlag TUV Rheinland,1994.
- [18] POTFIRE Manual, version 1-1, CTICM, Paris, 2000.
- [19] Twilt, L., Both, C, Kruppa, J., Zoa, B.: "Fire Design of Unprotected Concrete Filled SHS Columns: The further development and extension of application of user friendly PC software". Proceedings of the ISTS conference, Dűsseldorf, April 2001.
- [20] REAFO/CAFIR: "Computer assisted analysis of the fire resistance of steel and composite concrete structures". CEC Research 7210-SA/502, Final Report, Luxembourg, March 1986.

# DODATEK A: FOURIERJEVA DIFERENCIALNA ENAČBA



Slika A.1: Toplotni odziv - osnove

Na enoto površine telesa z  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], c<sub>p</sub> [J/kg],  $\lambda$  [W/mK] in dimenzijami  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  [m] v smeri x deluje toplotni tok q [W/m<sup>2</sup>].  $\Theta$  je temperatura [°C]; t je čas [s].

Toplotno ravnotežje: (v telesu ne nastane nič toplote!)

 $\Delta q. \Delta y. \Delta z. + \Delta(\rho. c_p. \Theta).\Delta x. \Delta y.\Delta z = 0 \rightarrow \Delta q/\Delta x + \Delta(\rho. c_p. \Theta)/\Delta t = 0$ 

Fourier-jev zakon: (samo v x smeri)

$$q = \lambda \Delta \Theta / \Delta x$$

Od tod:

$$\Delta(\lambda \Delta \Theta / \Delta x) / \Delta x + \Delta(\rho, c_p, \Theta) / \Delta t = 0$$

Zgornjo diferencialno enačbo (glej Sliko A.1), ki se jo da razširiti na y in z smer, se dobi pri  $\Delta \rightarrow 0$ . Ta enačba je ob znanih robnih pogojih (toplotni vplivi) in začetnih pogojih (temperatura prostora) numerično rešljiva.

# DODATEK B: TOPLOTNI ODZIV JEKLENEGA ELEMENTA OB PREDPOSTAVKI ENAKOMERNE RAZPOREDITVE TEMPERATURE V JEKLU



with  $A_m \text{ is exposed surface area member } [m^2/m] \\ V \text{ is volume member } [m^3/m]$ 

Note: key is uniform temperature distribution

#### Slika B.1: Toplotni odziv jeklenega profila (enakomerna razporeditev temperature jeklenem prerezu)

Predpostavimo enakomerno razporeditev temperature v prečnem prerezu ( $\lambda \rightarrow \infty$ ). Iz tega sledi:

 $\partial \theta / \partial x \rightarrow 0, \partial \theta / \partial y \rightarrow 0, \partial \theta / \partial z \rightarrow 0.$ 

Predpostavimo, da je jeklena kocka s prostornino V in izpostavljenim prerezom  $A_m$  podvržena polno razvitemu požaru. Neto toplotni tok, ki vstopi v kocko v času dt izračunamo iz

$$\left(\int h_{tot}^{\star} dt\right) dt = h_{tot}^{\star} A dt \qquad v [J]$$
(B.1)

Prirastek toplote v jekleni kocki v časovnem intervalu dt izračunamo iz (enakomerna razporeditev temperature!):

$$\rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot d \cdot \theta_a \qquad \qquad \text{v} [J] \qquad (B.2)$$

Zaradi toplotnega ravnotežja morata biti obe količini, povečanje toplote v kocki in toplotni tok v kocko, enaki. Izenačimo enačbi B.1 in B.2 ter dobimo:

$$\frac{d\Theta_a}{dt} = \frac{A_m / V}{\rho_a c_a} \cdot h_{net,tot}$$
(B.3)

kjer je:

A<sub>m</sub>/V faktor jeklenega profila [m-1]

c<sub>a</sub>p<sub>a</sub> toplotna kapaciteta jekla [J/m3C]

Ta diferencialna enačba prvega reda je numerično rešljiva za dane začetne in robne pogoje.
# DODATEK C: TABELIRANI PODATKI IN ENOSTAVNI MODELI

| Tip elementa   | Dostopnost<br>tabeliranih<br>podatkov | Analiza toplotnega odziva uporabljena v<br>enostavnem modelu |
|--|---------------------------------------|--|
| Reinforcing<br>bar   | da                                    | ne   |
| Shear<br>connectors<br>eomostic slab with<br>profiles with<br>or without fire<br>protection material | ne                                    | pol-empirični pristop  |
| Optional<br>Stirrups<br>to web of<br>Reinforcing   | ne                                    | pol-empirični pristop  |
|  | ne                                    | posplošitev rezultatov iz točnejšega računskega<br>modela    |

Preglednica C1: Pregled tabeliranih podatkov & analiza toplotnega odziva pri enostavnih modelih (horizontalni elementi)

| Tip elementa | Dostopnost<br>tabeliranih<br>podatkov | Analiza toplotnega odziva uporabljena v<br>enostavnem modelu |
|--------------|---------------------------------------|--|
|              | da                                    | enostaven model ne obstaja                                   |
|              | da                                    | pol-empirični pristop  |
|              | da                                    | uporaba točnega računskega modela                            |

Preglednica C2: Pregled tabeliranih podatkov & analiza toplotnega odziva pri enostavnih modelih (vertikalni elementi)

# DODATEK D: PRAVILA POŽARNOODPORNEGA PROJEKTIRANJA Z UPOŠTEVANJEM TOPLOTNE IZOLACIJE SOVPREŽIH PLOŠČ S PROFILIRANO PLOČEVINO

(1) Požarna odpornost elementa ob upoštevanju dviga povprečne temperature (=140°C) in maksimalnega dviga temperature v katerikoli točki prereza (=180°C),tj. kriterij " I ", izhaja iz enačbe:

$$t_{i} = a_{0} + a_{1} \cdot h_{1} + a_{2} \cdot \Phi + a_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}} + a_{4} \cdot \frac{1}{\ell_{3}} + a_{5} \cdot \frac{A}{L_{r}} \cdot \frac{1}{\ell_{3}}, \qquad \dots (D.1)$$

kjer je:

| $t_i$          | požarna odpornost z upoštevanjem toplotne izolacije               | [min];        |
|----------------|---|---------------|
| A              | prostornina betona v rebru na tekoči meter rebra                  | [mm3/m];      |
| $L_r$          | izpostavljena površina rebra na tekoči meter rebra                | [mm2/m];      |
| $A/L_r$ $\Phi$ | faktor geometrije rebra<br>konfiguracijski faktor zgornje pasnice | [mm];<br>[-]; |
| $l_3$          | širina zgornje pasnice (glej Sliko. D.1.1)                        | [mm].         |

Koeficienti  $a_i$ , za različne vrednosti višine betonskega prereza  $h_1$ , normalno težkih ter lahkih betonov so podani v Preglednici 1 glavnega teksta. Za vmesne vrednosti je dovoljena linearna interpolacija.



Slika D.1 : Definicija geometrije rebra  $A/L_r$  za rebra sovprežnih plošč

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \cdot \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{2}\right)}{\ell_2 + 2\sqrt{h_2^2 + \left(\frac{\ell_1 - \ell_2}{2}\right)^2}}$$
(D.2)

(2) Konfiguracijski faktor zgornje pasnice  $\Phi$  se določi kot:

$$\Phi = \left(\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}\right) / l_3$$
(D.3)

# DODATEK E: IZRAČUN ARMATURE ZA PREVZEM POZITIVNEGA MOMENTA V SOVPREŽNI PLOŠČI S PROFILIRANO JEKLENO PLOČEVINO

(1) Izračun temperature v armaturni palici, ki je vgrajena v rebro sovprežnega prereza:

$$\theta_{s} = c_{0} + \left(c_{1} \cdot \frac{u_{3}}{h_{2}}\right) + \left(c_{2} \cdot z\right) + \left(c_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}}\right) + \left(c_{4} \cdot \alpha\right) + \left(c_{5} \cdot \frac{1}{l_{3}}\right)$$
(E.1)

kjer je:

| $\theta_R$            | temperatura ojačevalne armature v rebru[°C]; |                |
|-----------------------|--|----------------|
| <b>u</b> <sub>3</sub> | oddaljenost spodnje pasnice                  | [mm];          |
| Z                     | lega v rebru                                 | $[mm^{-0.5}];$ |
| α                     | naklonski kot rebra                          | [degrees];     |

Koeficienti c<sub>i</sub>, za različne vrednosti požarne odpornosti lahkih in normalnih betonov, so podani v Preglednici 3. Vmesne vrednosti dobimo z linearno interpolacijo.

(2) Določitev z-faktorja, ki predstavlja lego ojačevalne armature v rebru:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}}$$
(E.2)



Slika E.1: Lega armaturne palice

(3) Oddaljenosti  $u_1$ ,  $u_2$  in  $u_3$  so podane v milimetrih in pomenijo:

- -u1, u2 najkrajša razdalja, med težiščem armaturne palice in katerokoli točko na stojinah reber profilirane pločevine
- -u3 razdalja med težiščem armaturne palice in spodnjo pasnico profilirane pločevine.

# III.Poglavje: Mehanski odziv konstrukcije pri požarni obremenitvi

## B. ZHAO

CTICM – Centre Technique de la Construction Métallique, France

### 1 UVOD

Vpliv požara na konstrukcijo lahko v končnem stanju privede do izgube globalne stabilnosti in s tem do porušitve (glej sliko 1).



Slika 1: Požarna odpornost – vplivi požara

Mehanski odziv konstrukcije je neposredno povezan z načinom obnašanja konstrukcije, ko je le ta izpostavljena požaru. Odziv konstrukcije je prikazan na sliki 2. Ločimo :

- povišanje temperature v konstrukciji zaradi prenosa toplote pri požaru (t.i. toplotni odziv konstrukcije)
- deformiranje konstrukcije pri povišani temperaturi je odvisno od koeficienta toplotnega raztezka, ki je običajno pozitiven
- znaten porast temperature istočasno povzroči plastifikacijo materiala, kar privede do zmanjšanja nosilnosti in togosti ter do nadaljnjega deformiranja konstrukcije
- v nekaterih primerih je zmanjšanje trdnosti in togosti bistvenega pomena, saj konstrukcija ni več sposobna prenašati obtežbe in je izguba globalne stabilnosti neizbežna

➤ Naraščanje temperature → toplotno raztezanje + izguba togosti ter nosilnosti → dodatno deformiranje konstrukcije ⇒ izguba globalne stabilnosti



Slika 2: Odziv konstrukcije v primeru požara

Za projektante je bistvenega pomena, da natančno predvidijo obnašanje konstrukcije, saj lahko le tako določijo stopnjo požarne varnosti zgradbe. V požarnem projektiranju se uporabljata dva glavna pristopa za določevanje mehanskega odziva konstrukcij oz. konstrukcijskih elementov, izpostavljenih požaru (glej sliko 3):

- S požarnimi testi lahko pridobimo informacije o mehanskem odzivu konstrukcije in konstrukcijskih elementov. Kljub visokim stroškom predstavljajo zelo uporaben način določevanja mehanskega odziva konstrukcij.
- Po drugi strani pa je s strani projektantov vedno bolj pogosto uporabljen pristop določevanja mehanskega odziva konstrukcij na podlagi izpolnjevanja zahtev požarnega projektiranja. Slednji pristop je podrobneje predstavljen v nadaljevanju.



Slika 3: Določitev mehanskega odziva konstrukcij v primeru požara

# 2 SPLOŠNA NAČELA POŽARNEGA PROJEKTIRANJA JEKLENIH IN SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ

# 2.1 Osnovne značilnosti določevanja mehanskega odziva jeklenih in sovprežnih konstrukcij v primeru požara

Pri jeklenih in sovprežnih konstrukcijah se je za določevanje mehanskega odziva na podlagi izpolnjevanja zahtev požarnega projektiranja v skladu z Evrokod standardi potrebno osredotočiti na:

- določitev ustreznih mehanskih vplivov, katerim bo konstrukcija izpostavljena v požaru
- določitev materialnih lastnosti v odvisnosti od temperature (zveza napetost-deformacija, elastični modul ter meja tečenja pri povišani temperaturi)
- različne metode analize ter področja uporabe, tako z enostavnimi kot tudi z naprednimi računskimi modeli,
- posebne dele konstrukcije (npr. posebne konstrukcijske detajle, priključke, spoje konstrukcijskih elementov), ki niso izrecno obravnavani v zahtevah požarnega projektiranja, vendar so bistvenega pomena za zagotavljanje zadostne požarne varnosti

## 2.2 Mehanski vplivi – Obtežne kombinacije v skladu z Evrokod standardi

Kombinacija vplivov se določi po spodnjem izrazu (glej izraz 6.11b v SIST EN 1990):

$$\sum_{i\geq l} G_{k,j} + (\Psi_{1,l} \ ali \ \Psi_{2,l}) Q_{k,l} + \sum_{i\geq l} \Psi_{2,i} Q_{k,i} ,$$

kjer so:

 $G_{k,j}$ karakteristične vrednosti stalnih vplivov j $Q_{k,1}$ karakteristična vrednost prevladujočega spremenljivega vpliva 1

 $Q_{k,i}$  karakteristične vrednosti spremenljivih vplivov i

 $\psi_{1,1}$  faktor za pogosto vrednost prevladujočega spremenljivega vpliva 1

 $\psi_{2i}$  faktor za navidezno stalno vrednost spremenljivih vplivov i

Priporočene vrednosti za  $\psi_1$  in  $\psi_2$  so podane v preglednici A1.1 v SIST EN 1990, lahko pa so določene tudi v nacionalnem dodatku.

| Vpliv   | $\psi_0$ | $\psi_1$ | Ψ2  |
|---|----------|----------|-----|
| Koristna obtežba v stavbah (glej EN 1991-1-1)                               |          |          |     |
| Kategorija A : bivalni prostori   | 0,7      | 0,5      | 0,3 |
| Kategorija B : pisarne  | 0,7      | 0,5      | 0,3 |
| Kategorija C : stavbe, kjer se zbirajo ljudje                               | 0,7      | 0,7      | 0,6 |
| Kategorija D : trgovine   | 0,7      | 0,7      | 0,6 |
| Kategorija E : skladišča  | 1,0      | 0,9      | 0,8 |
| Kategorija F : prometne površine  |          |          |     |
| vozilo s težo $\leq 30$ kN  | 0,7      | 0,7      | 0,6 |
| Kategorija G : prometne površine  |          |          |     |
| 30 kN < teža vozila ≤ 160 kN  | 0,7      | 0,5      | 0,3 |
| Kategorija H: strehe  | 0        | 0        | 0   |
| Obtežba snega na stavbah (glej EN 1991-1-3)*                                |          |          |     |
| Finska, Islandija, Norveška, Švedska  | 0,7      | 0,5      | 0,2 |
| Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino nad 1000 m                   | 0,7      | 0,5      | 0,2 |
| Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino pod<br>1000 m                | 0,5      | 0,2      | 0   |
| Obtežba vetra na stavbah (glej EN 1991-1-4)                                 | 0,6      | 0,2      | 0   |
| Spremembe temperature (ne pri požaru) v stavbah (glej<br>EN 1991-1-5)       | 0,6      | 0,5      | 0   |
| OPOMBA : Vrednosti $\psi$ so lahko določene v nacionalnem dodatku           |          |          |     |
| * Za države, ki niso omenjene v nadaljevanju, glej ustrezne krajevne pogoje |          |          |     |

Preglednica A.1.1: Priporočene vrednosti faktorjev w za stavbe

Faktor redukcije nivoja obremenitve za požarno projektno stanje v Evrokod standardih  $\eta_{fi,t}$  je definiran kot  $\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$ , kjer sta  $E_d$  in  $E_{d,fi}$  projektni vrednosti merodajnih učinkov vpliva pri normalni temperaturi in v požarnem projektnem stanju. Redukcijski faktor določimo z izrazom:

$$\eta_{\rm fi,t} = \frac{G_k + \psi_{\rm fi,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}},$$

kjer je:

 $\gamma_{Q,1}$  delni faktor za prevladujoči spremenljivi vpliv 1.

Redukcijski faktor  $\eta_{\text{fi}}$  je odvisen od faktorja  $\psi_{fi,l}$ , ki je določen glede na kategorijo zgradbe. V EN 1993-1-2 (požarno projektiranje jeklenih konstrukcij) in EN 1994-1-2 (požarno projektiranje sovprežnih konstrukcij) je podan diagram (slika 4), ki jasno prikazuje vpliv razmerja  $Q_{k,1} / G_k$  ter faktorja  $\psi_{fi,l}$  na redukcijski faktor $\eta_{\text{fi}}$ .



Slika 4: Spreminjanje redukcijskega faktorja  $\eta_{fi}$  v odvisnosti od razmerja  $Q_{k,1}/G_k$ 

Pri izračunu redukcijskega faktorja  $\eta_{fi,t}$ , je možna naslednja poenostavitev:

$$\eta_{\text{fi},t} = \frac{E_{\text{d},\text{fi}}}{R_{\text{d}}} \,, \label{eq:eq:eq:entropy_states}$$

kjer je:

 $R_d$  projektna vrednost nosilnosti pri normalni temperaturi. S tem je izpolnjen pogoj  $E_d \leq R_d$ .

Redukcijski faktor, določen po zgoraj navedenem izrazu, v splošnem vodi do bolj ekonomičnega požarnega projektiranja.

# 2.3 Osnovne materialne lastnosti jeklenih in sovprežnih konstrukcij pri povišani temperaturi

#### 2.3.1 Zveza napetost-deformacija za jeklo pri povišani temperaturi

Osnovna materiala sovprežnih konstrukcij sta jeklo in beton. Mehanske lastnosti teh dveh materialov so podane v standardih SIST EN 1993-1-2 in SIST EN 1994-1-2. Slika 5 prikazuje mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla v odvisnosti od temperature. Vidimo lahko, da se nosilnost in togost jekla začneta znatno zmanjševati pri temperaturah nad 400 °C. Pri 600 °C se togost zmanjša za okoli 70% in nosilnost za okoli 50%.

Podrobnejše mehanske lastnosti jekla pri povišani temperaturi so prikazane v preglednici 3.1 in sliki 3.1 v EN 1993-1-2.



Slika 5: Mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla pri povišanih temperaturah

|                       | Redukcijski faktorji pri temperaturi $\theta_a$ relativno glede na vrednost $f_y$ ali |  |  |  |
|-----------------------|---|--|--|--|
|                       | <i>E</i> <sub>a</sub> pri 20 °C   |  |  |  |
| Temperatura           | Redukcijski faktor  | Redukcijski faktor                                   | Redukcijski faktor   |  |
| jekla                 | (glede na $f_y$ )   | (glede na $f_y$ )                                    | (glede na $E_a$ )  |  |
|                       | za efektivno napetost   | za mejo  | za naklon v linearno   |  |
| $	heta_{ m a}$        | tečenja   | proporcionalnosti                                    | elastičnem območju   |  |
|                       |   |  |  |  |
|                       |   |  |  |  |
|                       | $k_{\mathrm{y},\mathrm{\theta}} = f_{\mathrm{y},\mathrm{\theta}}/f_{\mathrm{y}}$      | $\kappa_{\rm p,\theta} = f_{\rm p,\theta}/f_{\rm y}$ | $K_{\mathrm{E},\theta} = E_{\mathrm{a},\theta} / E_{\mathrm{a}}$ |  |
| 20 °C                 | 1,000   | 1,000  | 1,000  |  |
| 100 °C                | 1,000   | 1,000  | 1,000  |  |
| 200 °C                | 1,000   | 0,807  | 0,900  |  |
| 300 °C                | 1,000   | 0,613  | 0,800  |  |
| 400 °C                | 1,000   | 0,420  | 0,700  |  |
| 500 °C                | 0,780   | 0,360  | 0,600  |  |
| 600 °C                | 0,470   | 0,180  | 0,310  |  |
| 700 °C                | 0,230   | 0,075  | 0,130  |  |
| 800 °C                | 0,110   | 0,050  | 0,090  |  |
| 900 °C                | 0,060   | 0,0375   | 0,0675   |  |
| 1000 °C               | 0,040   | 0,0250   | 0,0450   |  |
| 1100 °C               | 0,020   | 0,0125   | 0,0225   |  |
| 1200 °C               | 0,000   | 0,0000   | 0,0000   |  |
| <b>OPOMBA:</b> Za int | a vmesne vrednosti tempera<br>terpolacija.  | atu jekla se lahko uporabi                           | linearna   |  |

#### Preglednica 3.1: Redukcijski faktorji za zvezo napetost-deformacija za ogljikovo jeklo pri povišanih temperaturah

| Območje<br>deformacij   | Napetost $\sigma$   | Tangentni modul  |  |
|---|---|--|--|
| $\mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{\mathrm{p}, \theta}$   | $\varepsilon E_{a,\theta}$  | $E_{\mathbf{a},\mathbf{	heta}}$  |  |
| $\mathcal{E}_{\mathrm{p},\mathrm{	heta}} < \mathcal{E} < \mathcal{E}_{\mathrm{y},\mathrm{	heta}}$ | $f_{\mathrm{p},\theta} - c + (b/a) \left[ a^2 - \left( \varepsilon_{\mathrm{y},\theta} - \varepsilon \right)^2 \right]^{0,5}$   | $\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a\left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2\right]^{0,5}}$ |  |
| $\mathcal{E}_{y,\theta} \leq \mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{t,\theta}$                             | $f_{\mathrm{y}, \mathrm{	heta}}$  | 0  |  |
| $\mathcal{E}_{t,\theta} \leq \mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{u,\theta}$                             | $f_{y,\theta} \Big[ l - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \Big]$   | -  |  |
| $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{u,\theta}$  | 0,00  | -  |  |
| Parametri   | $\varepsilon_{\mathrm{p},\mathrm{\theta}} = f_{\mathrm{p},\mathrm{\theta}}/E_{\mathrm{a},\mathrm{\theta}} \qquad \varepsilon_{\mathrm{y},\mathrm{\theta}} = 0.02$   | $\varepsilon_{t,\theta} = 0.15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0.20$  |  |
| Funkcije  | $a^{2} = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta})$<br>$b^{2} = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^{2}$<br>$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^{2}}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$ |  |  |
| Napetost $\sigma$   |   |  |  |
| $f_{y,\theta}$  |   |  |  |
| f <sub>p,θ</sub>  | $E_{a,\theta} = \tan \alpha$  |  |  |
|   | $\epsilon_{p,\theta}$ $\epsilon_{y,\theta}$   | $\epsilon_{t,\theta}$ $\epsilon_{u,\theta}$ Deformacija $\epsilon$   |  |

| Legenda: | $f_{\mathrm{y}, \mathrm{	heta}}$ |
|----------|----------------------------------|
|----------|----------------------------------|

efektivna napetost tečenja;

 $f_{p,\theta}$  meja proporcionalnosti;

 $E_{a,\theta}$  naklon v linearnem elastičnem območju;

 $\varepsilon_{p,\theta}$  deformacija na meji proporcionalnosti;

- $\varepsilon_{y,\theta}$  deformacija na meji tečenja;
- $\varepsilon_{t,\theta}$  deformacija na koncu plastičnega platoja;
- $\varepsilon_{u,\theta}$  mejna deformacija pri porušitvi.

Slika 3.1: Zveza napetost-deformacija za ogljikovo jeklo pri povišanih temperaturah.

#### 2.3.2 Zveza napetost-deformacija za beton pri povišani temperaturi

Mehanske lastnosti betona pri povišanih temperaturah so podane v standardu SIST EN 1994-1-2 (glej sliko 6). Tlačna trdnost pri povišani temperaturi postopoma pada in pri 600°C doseže 50% tlačne trdnosti pri normalni temperaturi, kar je precej podobno obnašanju konstrukcijskega jekla.

Podrobnejše mehanske lastnosti betona pri povišanih temperaturah so podane v preglednici 3.3 in na sliki 3.2 v standardu SIST EN 1994-1-2.



Tlačna trdnost: 50% redukcija pri 600°C
 Slika 6: Mehanske lastnosti običajnega betona pri povišanih temperaturah



<u>OBMOČJE II:</u> Za numerični izračun predpostavimo padajočo linijo

Slika 3.2: Izrazi za določitev zveze napetost - deformacija za beton v tlaku pri povišanih temperaturah

| Temperatura betona | $k_{c,\theta} =$ | $f_{c,\theta} / f_c$ | $\varepsilon_{_{cu,	heta}}$ . 10 $^{_3}$ |
|--------------------|------------------|----------------------|--|
| $	heta_{_c}$ [°C]  | NC               | LC                   | NC                                       |
| 20                 | 1                | 1                    | 2,5                                      |
| 100                | 1                | 1                    | 4,0                                      |
| 200                | 0,95             | 1                    | 5,5                                      |
| 300                | 0,85             | 1                    | 7,0                                      |
| 400                | 0,75             | 0,88                 | 10,0                                     |
| 500                | 0,60             | 0,76                 | 15,0                                     |
| 600                | 0,45             | 0,64                 | 25,0                                     |
| 700                | 0,30             | 0,52                 | 25,0                                     |
| 800                | 0,15             | 0,40                 | 25,0                                     |
| 900                | 0,08             | 0,28                 | 25,0                                     |
| 1000               | 0,04             | 0,16                 | 25,0                                     |
| 1100               | 0,01             | 0,04                 | 25,0                                     |
| 1200               | 0                | 0                    | -  |

Preglednica 3.3: Vrednost parametrov v zvezi napetost-deformacija za običajni beton (NC) in lahki beton (LC)

#### 2.3.3 Toplotno raztezanje jekla in betona

V požarnem projektiranju je poleg mehanskih lastnosti pogosto potrebno upoštevati tudi toplotno raztezanje, še posebno v primeru uporabe naprednejših računskih metod.

Standarda SIST EN 1993-1-2 in SIST EN 1994-1-2 podajata krivulje relativnih toplotnih raztezkov v odvisnosti od temperature za jeklo in beton (glej sliko 7).





Podrobnejši izrazi za izračun relativnih toplotnih raztezkov so podani v nadaljevanju.

| Jeklo | $\Delta I \ / \ I \ = - \ 2,416 \ . \ 10^{4} \ + \ 1,2 \ . \ 10^{5} \ \ \theta_a \ + \ 0,4 \ . \ 10^{8} \ \theta_a^2$  | za 20 °C< $\theta_a \le$ 750 °C      |  |  |
|-------|--|--------------------------------------|--|--|
|       | $\Delta I / I = 11.10^{-3}$  | za 750 °C < $\theta_a \le$ 860 °C    |  |  |
|       | $\Delta I$ / I = -6,2 . 10 <sup>-3</sup> + 2 . 10 <sup>-5</sup> $\theta_a$   | za 860 °C < $\theta_a \le$ 1200 °C   |  |  |
|       | Poenostavitev: $\Delta I / I = 14 \cdot 10^{-6} (\theta_a - 20)$   |                                      |  |  |
| Beton | $\Delta I / I = -1.8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta_{c} + 2.3 \cdot 10^{-11} \theta_{c}^{3}$   | za 20 °C $\leq \theta_c \leq$ 700 °C |  |  |
|       | $\Delta I / I = 14.10^{-3}$  | za 700 °C < <sup>0</sup> ≩ 1200 °C   |  |  |
|       | Poenostavitev: $\Delta^{  } = 18 \cdot 10^{-6} (\theta_c - 20)$  |                                      |  |  |
| kjer: | $ \begin{array}{ccc} I & & dolžina jeklenega ali betonskega elementa pri 20°C \\ \Delta I & & sprememba dolžine jeklenega ali betonskega elementa zaradi spremembe ten \\ \theta_a \text{ in } \theta_c & \text{ temperaturi jekla in betona } \end{array} $ |                                      |  |  |

#### 2.4 Metode preverjanja mehanskega odziva konstrukcij v primeru požara

V skladu z Evrokodi lahko mehanski odziv konstrukcij, izpostavljenih požaru, preverimo na tri načine (glej sliko 8):

- Z analizo elementov kontroliramo vsak element konstrukcije posebej. Upoštevamo, da so elementi med seboj popolnoma ločeni; stikovanje elementov zajamemo z ustreznimi robnimi pogoji
- Z analizo dela konstrukcije kontroliramo določen del konstrukcije z ustreznimi robnimi pogoji, s katerimi zajamemo vpliv stikovanja z ostalimi deli konstrukcije
- Z globalno analizo kontroliramo celotno konstrukcijo



Slika 8: Različni načini preverjanja mehanskega odziva konstrukcije v primeru požara

V povezavi z zgoraj omenjenimi načini preverjanja mehanskega odziva, je potrebno poudariti sledeče:

- V analizi elementa se upošteva samo izoliran element, analiza pa se opravi za vsak element posebej. Zato je enostavna za uporabo, še posebej v kombinaciji s poenostavljenimi računskimi metodami in pri analizi s standardnim požarom (npr. ISO-834)
- Analiza dela konstrukcije zajame nekaj elementov konstrukcije skupaj, tako da je upoštevana interakcija med elementi; npr. prerazporeditev obtežbe iz predelov z visoko temperaturo na predele z nizko temperaturo Rezultat je bolj realen mehanski odziv konstrukcije v primeru požara.
  - Analiza elementov
     Globalna analiza konstrukcije

     Image: Construction of the second state of the second stat

Slika 9: Primerjava različnih načinov analize mehanske odziva konstrukcije v primeru požara

V skladu z Evrokodi lahko za določitev mehanskega odziva konstrukcije v primeru požara uporabimo naslednje računske metode:

- Enostavna računska metoda s tabelami; uporabimo jo lahko le pri sovprežnih konstrukcijah
- Enostavni računski modeli, ki jih lahko razdelimo v dve skupini: v prvi skupini je uporabljena metoda kritične temperature v analizi posameznega elementa konstrukcije. V drugi skupini so uporabljeni enostavni mehanski modeli za uporabo v analizi posameznega elementa jeklenih in sovprežnih konstrukcij.
- Napredni računski modeli, ki jih lahko uporabimo na katerikoli konstrukciji. Osnova računa je bodisi metoda končnih elementov bodisi metoda končnih diferenc. V modernem pristopu požarnega projektiranja postaja vedno bolj pogosta.

Na sliki 10 so prikazane različne možnosti uporabe omenjenih računski metod v primeru standardnega požara. Vidimo lahko, da se pri analizi posameznega elementa lahko uporabijo vse tri računske metode. Enostavna računska metoda z uporabo tabel je omejena na uporabo pri analizi posameznega elementa, v redkih primerih pa se lahko uporabi tudi pri analizi dela konstrukcije (npr. enostavni jekleni portalni okviri). Priporočljivo je, da se pri kompleksnejših konstrukcijah tudi v primeru standardnega požara uporabijo napredni računski modeli.

| □Toplotni vpli<br>požarom        |  |                                  |                                |
|----------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------|
| Analiza                          | Uporaba tabel                            | Enostavni<br>računski<br>modeli  | Napredni<br>računski<br>modeli |
| Analiza elementa<br>konstrukcije | Da<br><u>ISO-834</u><br>standardni požar | Da                               | Da                             |
| Analiza dela<br>konstrukcije     | Ni<br>primerna                           | Da<br>(vprašanje<br>veljavnosti) | Da                             |
| Globalna analiza<br>konstrukcije | Ni<br>primerna                           | Ni<br>primerna                   | Da                             |

Slika 10: Uporaba računskih metod v primeru standardnega požara

Uporaba tabel ni primerna v primeru naravnega požara, saj je potek segrevanja bistveno drugačen kot pri standardnem požaru. To je tudi razlog, da metoda ni uporabna v nobeni izmed treh analiz. Izjema je možna samo v primeru analize jeklenega elementa, ki je direktno izpostavljen plamenom, s pasivno požarno zaščito ali brez nje.

Uporaba naprednih računskih metod v primeru naravnega požara ni omejena, saj lahko z zadovoljivo natančnostjo določimo tako toplotni kot tudi mehanski odziv vseh elementov, delov konstrukcije ali celotne konstrukcije (izpostavljene spremenljivim toplotnim vplivom) z upoštevanjem realnih redukcijskih faktorjev nosilnosti in togosti, toplotnega raztezanja, temperaturnega gradienta, itd.

Т.

| □Toplotni vpliv definiran z naravnim požarom |                |                                  | $\int$                      |
|--|----------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Analiza                                      | Uporaba tabel  | Enostavni<br>računski<br>modeli  | Napredni<br>računski modeli |
| Analiza<br>elementa<br>konstrukcije          | Ni<br>primerna | Da<br>(vprašanje<br>veljavnosti) | Da                          |
| Analiza dela<br>konstrukcije                 | Ni<br>primerna | Ni<br>primerna                   | Da                          |
| Globalna analiza<br>konstrukcije             | Ni<br>primerna | Ni<br>primerna                   | Da                          |

Slika 11: Uporaba računskih metod v primeru naravnega požara

Uporaba računski metod je podrobneje opisana v Evrokodih (glej sliko 12).



Slika 12: Postopki projektiranja

# **3** OSNOVNI OPIS RAČUNSKIH MODELOV ZA ANALIZO ELEMENTOV JEKLENIH IN SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ

#### 3.1 Uporaba tabel

Uporaba tabel je zaradi enostavnosti največkrat uporabljena računska metoda. Kot je prikazano na sliki 13, jo lahko uporabimo pri sledečih konstrukcijskih elementih:

- Sovprežni nosilci (delno ali popolnoma obbetonirani jekleni profili)
- Sovprežni stebri (delno ali popolnoma obbetonirani jekleni profili)
- Sovprežni stebri (votli jekleni profili, zapolnjeni z betonom)



Slika 13: Uporaba računske metode s tabeliranimi podatki

Vrednosti v tabelah so večinoma določene s standardnim požarnim testom in korigirane z analitičnimi postopki, kot prikazuje slika 14. Vrednosti povezujejo standardno požarno odpornost, nivo obremenitve, minimalne dimenzije prečnega prereza, potrebno armaturo ter minimalen krovni sloj betona.

Glavna prednost te metode je enostavnost in večja zanesljivost postopka v primerjavi z enostavnimi in naprednimi računskimi modeli. Posledično omogoča arhitektom in inženirjem hitro oceno minimalnih dimezij elementov pred dejanskim projektiranjem.



Slika 14: Uporaba tabel - primer sovprežnega stebra (delno obbetonirani jeklen profil)

Omenjena metoda se uporablja v dveh primerih (glej sliko 15): prvi primer predstavlja situacijo, ko dimenzije elementov že poznamo (kontrola znanih dimenzij), drugi primer pa situacijo, ko pred dejanskim projektiranjem poznamo samo projektne vplive (izbira začetnih dimenzij).

V situacijah, kjer poznamo dimenzije prečnih prerezov ter s tem tudi odpornost elementa  $R_d$ , lahko določimo mehanske vplive v požarnem projektnem stanju  $E_{fi,d}$  in tako izračunamo faktor redukcije nivoja obremenitve  $\eta_{fi,t} = E_{fi,d}/R_d$ . Nato iz tabel za ustrezne dimenzije prečnega prereza in ustrezen nivo obremenitve določimo standardno požarno odpornost elementa.

V situacijah, kjer dimenzij prečnega prereza ne poznamo, določimo učinke vplivov  $E_d$  (iz ustrezne obtežne kombinacije pri normalni temperaturi) in  $E_{f_i,d}$  (iz požarnega projektnega stanja). V tem primeru faktor redukcije nivoja obremenitve znaša  $\eta_{f_i,t} = E_{f_i,d}/E_d$ . Nato iz tabel za ustrezen nivo obremenitve in zahtevano standardno požarno odpornost določimo minimalne dimenzije prečnega prereza elementa. Seveda je tako dimenzioniran element potrebno preveriti še pri normalni temperaturi, t.j. da je izpolnjen pogoj  $R_d \ge E_d$ .



Slika 15: Dva različna postopka uporabe tabel

#### 3.2 Enostavni računski modeli

Enostavni računski modeli so (v nasprotju s tabeliranimi podatki) uporabni tako za jeklene kot tudi za sovprežne elemente.

Na sliki 16 je prikazana uporaba enostavnih računskih modelov. Uporabljamo jo za:

- Jeklene elemente (natezni elementi, nosilci, stebri, s pasivno požarno zaščito ali brez nje)
- Sovprežne nosilce (delno ali popolnoma obbetonirani jekleni profili)



Slika 16: Uporaba enostavnih računskih modelov

Enostavne računske modele lahko razdelimo v tri skupine:

- Enostavni računski model, ki upošteva plastifikacijo prereza pri povišanih temperaturah.
   Primeren je za bočno podprte elemente, obremenjene z osno silo ali z upogibnim momentom.
- Enostavni računski model, ki upošteva uklonske krivulje, prirejene požarni obtežni situaciji. Primeren je za elemente, ki so obremenjeni s tlačno osno silo in so stabilnostno občutljivi (npr. osno obremenjeni vitki stebri)
- Enostavni računski model, ki upošteva interakcijo osne sile in momenta. Primeren je za elemente, ki so obremenjeni tako z osno silo kot z upogibnim momentom (npr. vitki stebri, obremenjeni z ekscentrično osno silo, dolgi nosilci z nevarnostjo bočne zvrnitve, itd).

#### 3.2.1 Primer enostavnega računskega modela - sovprežni nosilec, izpostavljen požaru

Tipični primer je prostoležeč sovprežni nosilec, kot je prikazan na sliki 17. V enostavnem računskem modelu upoštevamo, da ima lahko temperatura jeklenega prereza tri različne vrednosti (spodnja pasnica, stojina in zgornja pasnica), temperaturna betonskega prereza pa se spreminja po debelini betonske plošče z eno dimenzionalnim temperaturnim gradientom. Tako lahko na relativno enostaven način določimo ravnotežje napetosti v plastičnem stanju in izračunamo upogibno nosilnost prereza pri povišani temperaturi.



Slika 17: Primer sovprežnega nosilca, izpostavljenega požaru

#### 3.2.2 Primer enostavnega računskega modela - sovprežen steber, izpostavljen požaru

Tipični primer enostavnega računskega modela je tudi sovprežni steber, kjer je jeklen profil deloma obbetonirani (glej sliko 18).

V splošnem lahko zapišemo:

- Nosilnost elementa je enaka osni nosilnosti pri povišani temperaturi  $N_{fi,pl,Rd}$ , ki jo reduciramo s faktorjem  $\chi(\overline{\lambda}_{\theta})$  zaradi uklona tlačenih palic.
- Redukcijski faktor zaradi uklona  $\chi(\overline{\lambda}_{\theta})$  je odvisen od relativne vitkosti v požarni obtežni situaciji  $\overline{\lambda}_{\theta}$ , ki je odvisna od osne nosilnosti prečnega prereza  $N_{fi,pl,Rd}$ , efektivne togosti prečnega prereza (EI)<sub>eff,fi</sub> in uklonske dolžine L<sub>fi</sub> pri povišanih temperaturah.



Slika 18: Sovprežni steber, kjer je jeklen profil deloma obbetoniran

V primeru požarne analize elementa z nevarnostjo uklona ali bočne zvrnitve, je potrebno upoštevati tudi reducirano togost in ne samo nosilnost elementa pri povišani temperaturi.

#### 3.3 Metoda kritične temperature

Med enostavne računske metode metoda kritične temperatur. Uporabna je samo pri konstrukcijskih elementih, kjer se jekleni prečni prerez segreje enakomerno oziroma ima zadosti majhen temperaturni gradient. Zaradi tega je uporabnost metode omejena na naslednje konstrukcijske elemente (glej sliko 19):

- Zaščitene ali nezaščitene jeklene in sovprežne nosilce, ki so izpostavljeni ognju na treh ali štirih straneh
- Jekleni stebri, s pasivno požarno zaščito ali brez, ki so izpostavljeni ognju iz vseh štirih strani
  - Nosilci (jekleni in sovprežni)
     Stebri

     Image: Constraint of the source of the
- Natezni elementi, izpostavljeni ognju

Slika 19: Uporaba metode kritične temperature

Kot je bilo že omenjeno, je metoda kritične temperature omejena na uporabo pri jeklenih elementih, ki se enakomerno segrevajo. Tako lahko nosilnost elementa pri povišanih temperaturah  $R_{f_{i,d,t}}$  določimo, če nosilnost elementa pri 20°C  $R_{f_{i,d,o}}$  množimo s faktorjem redukcije nosilnosti  $k_{y,0}$ , t.j.  $R_{f_{i,d,t}} \ge k_{y,0}R_{f_{i,d,0}}$ .

Po drugi strani pa je požarna odpornost elementa zadostna, če velja  $R_{f_{i,d,t}} \ge E_{f_{i,d}}$ . Iz tega sledi  $R_{f_{i,d,t}} \ge \mu_0 R_{f_{i,d,0}}$  (glej sliko 20), kjer je  $\mu_0 = E_{f_{i,d}}/R_{f_{i,d,0}}$  stopnja izkoriščenosti. Zato mora za zadostno požarno odpornost elementa veljati  $k_{y,\theta} \ge \mu_0$ . V primeru, kjer je  $k_{y,\theta} = \mu_0$  (optimalen primer, ki zadosti požarni odpornosti), je pripadajoča temperatura  $\theta_{cr}$  definirana kot kritična temperatura.

Kritično temperaturo lahko določimo tudi glede na faktor  $k_{y,0}$ , podan v preglednici 3.1 v standardu SIST EN 1993-1-2. Za natančno določitev kritične temperature je največkrat potrebna interpolacija. Uporabimo lahko analitični izraz, s katerim določimo kritično temperaturo v odvisnosti od stopnje izkoriščenosti  $\mu_0$ :

$$\theta_{cr} = 39.19 \ell n \left[ \frac{1}{0,9674 \, \mu_0^{-3,833}} - 1 \right] + 482$$

Če na istem diagramu primerjamo krivulji  $k_{y,\theta}$  in  $\mu_0$  v odvisnosti od temperature (glej sliko 20), lahko ugotovimo, da krivulji skoraj sovpadata, kar dokazuje ustreznost zgornjega izraza.

 $\Box$  V skladu z enostavnimi računskimi modeli, za jeklene elemente, ki se segrevajo enakomerno:  $R_{fi,dt} = k_{y,\theta} R_{fi,d,0}$ 

De drugi strani mora požama odpornost zadostiti:

$$R_{\text{fi},\text{d}t} \ge E_{\text{fi},\text{d}} = \frac{E_{\text{fi},\text{d}}}{R_{\text{fi},\text{d},0}} R_{\text{fi},\text{d},0} = \mu_0 R_{\text{fi},\text{d},0} \qquad \Longrightarrow \qquad k_{y,\theta} \ge \mu_0$$

 $\Box$  Ko velja k<sub>y,0</sub> =  $\mu_0$ , je pripadajoča temperatura definirana kot kritična temperatura  $\theta_{cr}$ 

SIST EN 1993-1-2 podaja enostaven izraz za določitev kritične temperature θ<sub>crb</sub>

$$\theta_{\rm cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

Slika 20: Postopek računa z metodo kritične temperature

Postopek računa pri uporabi metode kritične temperature (glej sliko 21):

- Račun vplivov v požarni obtežni situaciji E fi, d
- Račun projektne nosilnosti  $R_d$  ali projektnih vrednosti vplivov  $E_d$
- Z izrazom  $\eta_{fi,t} = E_{fi,d}/R_d$  določimo faktor redukcije nivoja obremenitve  $\eta_{fi,t}$
- Z izrazom  $\mu_0 = \eta_{fi,t} \gamma_{M,fi} / \gamma_M$  določimo stopnjo izkoriščenosti  $\mu_0$
- Kritično temperaturo  $\theta_{cr}$  določimo z enačbo:

$$\theta_{cr} = 39.19 \ell n \left[ \frac{1}{0,9674 \, \mu_0^{-3,833}} - 1 \right] + 482$$

ali uporabimo krajši iteracijski postopek (omejen na dve iteraciji)

Posebno pozornost moramo posvetiti določitvi stopnje izkoriščenosti  $\mu_0$ . Stopnja izkoriščenosti  $\mu_0$  je določena glede na požarno odpornost $R_{f_{i,d,0}}$  v času t = 0, torej pri normalni temperaturi, vendar z varnostnim faktorjem  $\gamma_{M,f_i}$  v požarni situaciji. Redukcijski faktor nivoja obremenitve  $\eta_{f_{i,t}}$  je določen s projektno nosilnostjo pri normalni temperaturi  $R_d$ , z varnostnim faktorjem  $\gamma_M$ . Ta se razlikuje od  $\gamma_{M,f_i}$  (glej sliko 21). Zato velja  $R_{f_{i,d,0}} = R_d \gamma_M / \gamma_{M,f_i}$  in tako dobimo:

$$\mu_{0} = \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} = \frac{E_{d,fi}}{R_{d} \gamma_{M} / \gamma_{M,fi}} = \frac{E_{d,fi}}{R_{d}} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M}} = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M}}$$

Omeniti je še potrebno, da je stopnja izkoriščenosti  $\mu_0$  v splošnem manjša od faktorja redukcije nivoja obremenitve  $\eta_{fi,t}$ , saj je  $\gamma_M$  običajno višji od  $\gamma_{M,fi}$ .



Slika 21: Uporaba metode kritične temperature

Pri računu kritične temperature je priporočen iterativni račun (slika 21). Razlog je podan v spodnjem primeru.

Obravnavajmo primer jeklenega stebra, ki je izpostavljen požaru:

- Če je steber dovolj kratek in uklon stebra ni prisoten, lahko osno nosilnost stebra pri povišanih temperaturah določimo z izrazom  $N_{b,fi,t,Rd} = Ak_{y,\theta max} f_y / \gamma_{M,fi}$ . V temu primeru je nosilnost stebra pri povišani temperaturi odvisna samo od redukcijskega faktorja nosilnosti  $k_{y,\theta}$ , saj so vsi ostali parametri konstante.
- Če je steber vitek in je možen uklon pri povišanih temperaturah, se osna nosilnost stebra pri povišanih temperaturah določi z izrazom  $N_{b,fi,t,Rd} = \chi(\lambda_{\theta})Ak_{y,\theta max} f_y / \gamma_{M,fi}$ . V temu primeru je nosilnost elementa pri povišanih temperaturah odvisna od redukcijskega faktorja nosilnosti  $k_{y,\theta}$  in relativne vitkosti v primeru požara  $\overline{\lambda}_{\theta}$ , ki pa je nadalje funkcija tako nosilnosti  $(k_{y,\theta})$ , kot tudi togosti  $(k_{E,\theta})$ , saj velja  $\overline{\lambda}_{\theta} = \overline{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5}$ . Tako račun kritične temperature  $\theta_{cr}$ , ki je odvisna samo od  $k_{y,\theta}$ , ni več možen. Za račun kritične temperature v primeru stabilnostnih problemov moramo uporabiti iterativen postopek z največ dvema iteracijama.

Iterativno določanje kritične temperature ima določene pomanjkljivosti. Temu se lahko izognemo tako, da za  $[k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5}$  izberemo konstantno vrednost, ki je na varni strani (največja vrednost). Potem  $\overline{\lambda}_{\theta} = \overline{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5}$  ni več funkcija temperature in je ponovno možna uporaba direktnega postopka tudi v primeru stabilnostnih problemov.



Slika 22: Uporaba direktnega in iterativnega računa kritične temperature

#### 3.4 Napredni računski modeli

Napredni računski modeli so v splošnem uporabni za katerikoli element v analizi posameznega elementa konstrukcije. Potrebno pa je omeniti sledeče:

- Napredni računski modeli morajo temeljiti na priznanih načelih in predpostavkah teorije mehanike konstrukcij in upoštevati spreminjanje mehanskih materialnih lastnosti s temperaturo
- Vsak možen način porušitve, ki ni vključen v napredni računski model (lokalno izbočenje, strižna porušitev) je potrebno na primeren način preprečiti (npr. numerična analiza z linijskimi elementi)
- Napredne računske metode se lahko uporabljajo v povezavi s poljubno krivuljo segrevanja, če so za obravnavano temperaturno območje na voljo mehanske lastnosti materiala,
- Upoštevati je potrebno napetosti in deformacije zaradi povišane temperature
- Model mehanskega odziva mora upoštevati tudi:
  - istočasno delovanje mehanskih vplivov, geometrijskih nepopolnosti in toplotnih vplivov
  - temperaturno odvisne mehanske lastnosti materialov (glej 3.poglavje)
  - vplive geometrijske nelinearnosti
  - vplive nelinearnega obnašanja materiala, vključno z neugodnimi vplivi obremenjevanja in razbremenjevanja na togost konstrukcije

Tipičen primer uporabe naprednih računskih modelov je prikazan na sliki 23, kjer je jeklen nosilec z odprtinami izpostavljen standardnemu požaru. Za tak nosilec standard ne podaja rešitve.

Veljavnost modela je potrebno dokazati s požarnimi testi, ki obsegajo tako globalno obnašanje (pomiki, čas porušitve, itd), kot tudi lokalne porušne mehanizme.



Slika 23: Uporaba naprednih računskih modelov - primer jeklenega nosilca z odprtinami

### 4 OSNOVE GLOBALNE ANALIZE KONSTRUKCIJE

#### 4.1 Osnovne značilnosti globalne analize konstrukcij

Ker se globalna analiza konstrukcije čedalje bolj uporablja za požarno projektiranje konstrukcij, so v Evrokodih podana natančna pravila za uporabo analize. Če se osredotočimo na mehanski odziv konstrukcije, je potrebno omeniti sledeče:

- v večini primerov je za globalno analizo konstrukcije potrebno uporabiti napredne računske modele
- bistvenega pomena je primerna izbira konstrukcijskega modela (velikost, tip, itd)
- dejanske robne pogoje konstrukcije je potrebno v računskem modelu pravilno upoštevati
- obtežba računskega modela mora ustrezati požarni obtežbi
- materialni modeli računskega modela naj se ujemajo z dejanskim obnašanjem materiala pri povišanih temperaturah
- v primeru, da modeliramo samo del konstrukcije, naj se interakcija z ostalimi deli konstrukcije upošteva na primeren način
- potrebno je opraviti poglobljeno analizo rezultatov in na tej osnovi preveriti kriterije porušitve
- potrebno je preučiti vse posebnosti konstrukcije, ki niso bile zajete direktno v analizi, da zagotovimo konsistentnost med numeričnimi rezultati in konstrukcijskimi detajli

Podrobnejši postopek je razložen v nadaljevanju.

# 4.2 Posebne zahteve glede uporabe naprednih računskih modelov v globalni analizi jeklenih ali sovprežnih konstrukcij

Kar zadeva jeklene in sovprežne konstrukcije, je potrebno posebno pozornost posvetiti:

- Materialni modeli
- sestavo deformacij pri povišanih temperaturah od različnih vplivov
- kinematični materialni model, ki upošteva razvoj temperature
- trdnost materiala (npr. betona) v fazi ohlajanja
- segrevanje konstrukcije med požarom ni konstantno, zato je potrebno uporabiti iterativen postopek reševanja ("korak za korakom")
- dejanski robni pogoji morajo biti pravilno upoštevani
- obtežba računskega modela mora ustrezati požarni obtežbi
- materialni modeli računskega modela naj se ujemajo z dejanskim obnašanjem materiala pri povišanih temperaturah
- pri naprednih računskih metodah moramo biti posebej pazljivi na posebnosti v konstrukciji, ki niso direktno upoštevane v modelu (npr. pretrg armature zaradi prekomernih deformacij, razpoke v betonu, drobljenje betona, odpornost spojev, stik med betonom in jeklom, itd)

#### 4.2.1 Deformacije

Celotne deformacije so sestavljene iz (glej sliko 24):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + (\varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_c + \varepsilon_{tr}) + \varepsilon_r,$$

kjer so:

| ε <sub>t</sub>  | celotna deformacija  |
|-----------------|--|
| ε <sub>th</sub> | deformacija zaradi toplotnega raztezanja                               |
| ε <sub>σ</sub>  | deformacija zaradi napetosti   |
| ε <sub>c</sub>  | deformacija zaradi lezenja pri povišanih temperaturah                  |
| $\epsilon_{tr}$ | deformacija zaradi spremenljivega in neenakomernega segrevanja betona  |
| ε <sub>r</sub>  | deformacija zaradi zaostalih napetosti, ki so pogosto prisotne v jeklu |
|                 |  |

Deformacije zaradi lezenja in deformacije zaradi spremenljivega in neenakomernega segrevanja so upoštevane implicitno v zvezi napetost - deformacija pri povišanih temperaturah. Deformacije zaradi zaostalih napetosti lahko ponavadi zanemarimo (razen v posebnih primerih).



Slika 24: Deformacije v materialnem modelu

#### 4.2.2 Materialni model

Zvezo med napetostimi in deformacijami opišemo s kinematičnim materialnim modelom. Model upošteva temperaturno polje, ki se s časom spreminja. Kinematični materialni model za jeklo in beton je prikazan na sliki 25.



Slika 25: Kinematični model, ki upošteva razvoj temperature

Običajno so kinematični materialni modeli že vgrajeni v napredne računske modele za požarno analizo.

#### 4.2.3 Reševanje ravnotežnih enačb

Osnova analize v požarnem projektnem stanju je mejno stanje nosilnosti. To pomeni, da iščemo ravnotežje konstrukcije med nosilnostjo in zunanjo obremenitvijo pri različnih temperaturah. Konstitucijske enačbe opisujejo elasto-plastično zvezo med napetostmi in deformacijami. Zaradi sprememb temperaturnega polja v odvisnosti od časa je uporabljen iterativni postopek reševanja ravnotežnih enačb (glej sliko 26):

- Postopna analiza poteka v več zaporednih korakih z različnimi temperaturnimi polji
- Znotraj vsakega koraka poiščemo ravnotežje konstrukcije, ki se obnaša elasto-plastično



Slika 26: Reševanje ravnotežnih enačb z iterativnim postopkom

#### 4.2.4 Mehansko obnašanje betona v fazi ohlajevanja

Posebnost pri uporabi naprednih računskih metod za analizo jeklenih in sovprežnih konstrukcij za primer naravnega požara je obnašanje materiala v fazi ohlajevanja. Pri jeklu običajnih kvalitet se mehanske lastnosti po segrevanju (v fazi ohlajevanja) povrnejo v prvotno stanje (t.j. stanje pri normalni temperaturi). Pri betonu pa se mehanske lastnosti popolnoma spremenijo. Še več, nosilnost betona je lahko celo slabša kot je bila v točki segrevanja pri najvišji temperaturi. Zato so v standardu SIST EN 1994-1-2 definirana posebna pravila za kontrolo tega pojava (glej sliko 27). Če beton segrejemo nad 300 °C, se v fazi ohlajevanja do 20°C preostala nosilnost zmanjša za dodatnih 10% že zmanjšane nosilnosti pri najvišji temperaturi v fazi segrevanja. Nemalokrat se porušitev betonskih konstrukcij zgodi v fazi ohlajevanja.



Slika 27: Mehansko obnašanje betona v fazi ohlajevanja

#### 4.3 Primer globalne analize jeklenih in sovprežnih konstrukcij

#### 4.3.1 Opis konstrukcije

Obravnavana je dvoetažna konstrukcija, sestavljena iz dveh sovprežnih medetažnih konstrukcij (sovprežna plošča, povezana z jeklenimi nosilci) in jeklenih stebrov. (glej sliko 28). Glavne dimenzije konstrukcije so:

- razpon sekundarnih nosilcev: 15 m
- razpon primarnih nosilcev: 10 m
- razpon sovprežne plošče: 3.33 m
- višina prve etaže: 4.2 m
- višina druge etaže: 3.2 m

V požarnem projektnem stanju bo lokaliziran naravni požar lociran v eni izmed etaž na površini 5 m x 12 m, kar znaša 60 m<sup>2</sup>.



Slika 28: Zasnova konstrukcije

V nadaljevanju se bomo omejili samo na mehanski odziv prikazane konstrukcije.

#### 4.3.2 Izbira računske modela konstrukcije in modeliranje detajlov

V našem primeru sta možna dva napredna računska modela; ravninski model sovprežnega nosilca in zahtevnejši prostorski model sovprežne medetažne konstrukcije. V nadaljevanju so predstavljene prednosti in slabosti obeh modelov:

- Ravninski model sovprežnega nosilca z linijskimi elementi:
  - prerazporeditev obtežbe med nosilci je možna
  - zanemarjen je membranski vpliv sovprežne plošče med nosilci
  - za en požarni scenarij je potrebnih več numeričnih simulacij
  - majhen računski čas
- Prostorski model sovprežne medetažne konstrukcije z lupinastimi, linijskimi in veznimi elementi
  - upoštevan je membranski vpliv sovprežne plošče
  - prerazporeditev obtežbe je možna s pomočjo lupinastih elementov
  - za en požarni scenarij je potrebna ena numerična simulacija
  - velik računski čas

Po primerjavi gornjih dveh modelov ugotovimo, da je ravninski model računsko hitrejši, vendar so določene ugodne mehanske lastnosti dejanske konstrukcije zanemarjene. Ravninski model izkazuje manjšo požarno odpornost konstrukcije in s tem izbiro večjih profilov ali potrebo po požarni zaščiti. Iz tega razloga je prostorski model primernejši.

Omeniti je potrebno, da je pri kompleksnejših konstrukcijah potrebno potrditi ustreznost računskega modela s požarnimi testi. Zgoraj omenjena konstrukcija je bila obravnavana v treh požarnih testih v naravni velikosti v okviru ECSC raziskovalnega projekta.



Slika 29: Primerjava numeričnih rezultatov z rezultati testa

Iz zgornje slike lahko vidimo, da boljše ujemanje z rezultati požarnega testa dosežemo z uporabo prostorskega modela. Pri uporabi takšnega modela pa se je potrebno odločiti, kakšen bo obseg modeliranja, saj bi bilo prostorsko modeliranje celotne sovprežne konstrukcije računsko preobsežno.

V našem primeru smo izbrali prostorski model konstrukcije, prikazan na sliki 30. Obravnavamo lokaliziran požar, zato lahko modeliramo samo del konstrukcije. Če primerjamo površino izbranega dela, ki znaša 15x20=300 m<sup>2</sup>, s površino celotne etaže, ki znaša 45x30=1350 m<sup>2</sup>, vidimo, da je obravnavana površina bistveno manjša, kar močno skrajša računski čas.

Sovprežna konstrukcija je bila modelirana z naslednjimi končnimi elementi:

- lupinasti končni elementi za sovprežno ploščo in armaturo
- linijski končni elementi za jeklene elemente (stebre in prečke), jekleno pločevino in rebra sovprežne plošče
- toga vez za modeliranje toge povezave med jeklenimi nosilci in sovprežno ploščo



Slika 30: Izbrani del konstrukcije za požarno analizo

#### 4.3.3 Obtežba in robni pogoji

Najprej določimo:

- obtežbo na konstrukcijo
- robne pogoje obravnavanega dela konstrukcije

Pri projektiranju pri normalni temperaturi, je sovprežna konstrukcija obremenjena s:

- stalno obtežbo (lastna teža konstrukcije, instalacije, itd): G
- spremenljivo obtežbo: Q
- obtežbo vetra: W
- obtežbo snega: S

V primeru obravnavane konstrukcije, kjer je bočna stabilnost konstrukcije zagotovljena s povezji, lahko zanemarimo vpliv vetra. Tako upoštevamo naslednje obtežne kombinacije stalne obtežbe G, spremenljive obtežbe Q in obtežbe snega S:

$$- \qquad G + \Psi_{1,1}Q \ + \Psi_{2,1}S = G + 0.7Q + 0.0S = G + 0.7Q$$

 $- G + \Psi_{1.1}S + \Psi_{2.1}Q = G + 0.6Q + 0.2S$ 

Za merodajno se izkaže prva kombinacija.

Modeliran del konstrukcije sicer nima začetnih robnih pogojev (podpor), upoštevati pa moramo vpliv ostale konstrukcije. Vpliv ostale konstrukcije upoštevamo kot ekvivalentne robne pogoje (glej sliko 31):

- polno vpetost stebrov zaradi kontinuirnosti stebrov in lokacije požara (spodnja etaža ni podvržena požaru)
- rotacijsko in bočno podprta plošča, ki poteka kontinuirno čez več polj



Slika 31: Mehanski vplivi in robni pogoji modeliranega dela konstrukcije

#### 4.3.4 Presoja numeričnih rezultatov

➤Kontrola pomikov

Presoja numeričnih rezultatov je nujna za oceno požarne odpornosti konstrukcije. Na sliki 32 so prikazani rezultati računskega primera. Vidimo lahko, da maksimalen pomik po 20 min požara znaša 140 mm, po 40 min pa se poveča na 310 mm.



Slika 32: Pomiki plošče po 20 minutni in 40 minutni izpostavljenosti požaru

Po 60 minutah se največji pomik plošče zmanjša na 230 mm. Zaradi razvoja plastifikacije pa se poveča območje plastifikacije. Največje segrevanje v požaru je končano in začenja se faza ohlajevanja (glej sliko 33), kar povzroči zmanjšanje pomika.

Največji pomik sekundarnih nosilcev znaša 280 mm in primarnih nosilcev 110 mm. Dobljeni pomiki so manjši od predpisanih, ki znašajo 1/20 razpona. Tako lahko zaključimo, da požarna odpornost obravnavane konstrukcije zadošča kontroli pomikov.

Kontrola pomikov



Slika 33: Pomiki plošče po 60 minutah

Potrebna je kontrola raztezka armature v betonski plošči (glej sliko 34). Maksimalni raztezek armature je omejen na 5% v skladu s standardom SIST EN 1992-1-2 (požarno projektiranje betonskih konstrukcij).

Maksimalen raztezek armature znaša 1.4%, kar je precej manj kot predpisanih 5%.



#### 4.3.5 Posebne zahteve za konstrukcijske detajle

Poleg globalne analize je potrebno posebno pozornost posvetiti konstrukcijskim detajlom (glej sliko 35):

 armaturne zanke na mestu stikovanja robnih in vogalnih stebrov ter sovprežne plošče (izboljšanje požarne odpornosti robnega dela konstrukcije)
- dilatacija med spodnjo pasnico nosilcev in pasnico stebrov ter tudi med primarnimi in sekundarnimi nosilci (omogoča, da izkoristimo upogibno nosilnost prečke v požaru)
- uporaba členkastih spojev prečka-prečka in steber-prečka
- uporaba polne strižne povezave spojev med jeklenimi prečkami in sovprežno ploščo



Slika 35: Konsistenca numeričnih modelov in konstrukcijskih detajlov

#### 4.3.6 Primer objekta, projektiranega z globalno požarno analizo konstrukcije

Primer konstrukcije, projektirane z globalno požarno analizo konstrukcije in z uporabo naprednih računskih metod in s krivuljo naravnega požara, je prikazan na sliki 36.

Za prikazan objekt je bilo obravnavanih več požarnih scenarijev. Za vsak požarni scenarij je bil izdelan natančen napredni računski model. Kriterij porušitve je v vseh požarnih scenarijih predstavljal poves jeklenih nosilcev ter raztezek armature.

Obravnavan objekt je bil prvi objekt v Franciji z nezaščiteno jekleno konstrukcijo, projektiran po principih požarnega projektiranja.



Slika 36: Primer obstoječega objekta, projektiranega z globalno požarno analizo in s krivuljo naravnega požara

## 5 POSEBNOSTI POŽARNEGA PROJEKTIRANJA JEKLENIH IN SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ

Pri požarnem projektiranju jeklenih in sovprežnih konstrukcij moramo posebno pozornost nameniti naslednjim konstrukcijskim detajlom:

– spojem

povezavi betona in jekla

Pri uporabi globalne požarne analize konstrukcije namreč predpostavimo, da je zagotovljena celovitost konstrukcije. Če temu pogoju ni zadoščeno, analiza ni pravilna. Prav tako ni v nobenem primeru dopustno, da konstrukcija izgubi globalno stabilnost zaradi porušitve spojev.

Osredotočiti se moramo tudi na možno porušitev spojev v fazi ohlajevanja. Le ta je posebej pomembna pri globalni požarni analizi z naravnim požarom, kjer se lahko zgodi, da je del konstrukcije že v fazi ohlajevanja, medtem ko se drugi del še segreva.

V standardu SIST EN 1993-1-2 in SIST EN 1994-1-2 so za projektiranje spojev in povezav podani enostavni računski modeli in priporočeni konstrukcijski detajli. Tipičen detajl v sovprežnih konstrukcijah predstavlja spoj prečka-steber (glej sliko 37). Spoj izvedemo z manjšo dilatacijo med spodnjo pasnico prečke in stebrom. Pri normalni temperaturi ga obravnavamo kot členkast spoj, saj je poves prečke precej omejen. V požarni obtežni situaciji se zaradi povišane temperature in zmanjšane nosilnosti poves znatno poveča, kar povzroči precejšnjo rotacijo ob podpori. Dilatacija omogoča, da se spodnja pasnica nasloni na steber, kar skupaj z armaturo v plošči poveča upogibno nosilnost prečke, to pa seveda poveča požarno odpornost pečke.



Slika 37: Členkasti spoj prečke na steber

Pri jeklenih prerezih, ki so delno obbetonirani, mora imeti povezava med betonom in jeklom zadostno nosilnost, da omogoči sodelovanje armature in jeklenega profila. V standardu SIST EN 1994-1-2 je za tako situacijo priporočen konstrukcijski detajl, prikazan na sliki 38. Tako izvedena povezava togo poveže različne komponente nosilca ter nudi zaščito pred luščenjem betona, ki se pojavi, ko je beton direktno izpostavljen plamenom.

V literaturi najdemo še več priporočenih konstrukcijskih detajlov, kot jih podaja omenjeni standard. Naloga inženirja pa je, da te detajle ovrednoti in izbere takega, ki nudi najboljšo požarno varnost.



Slika 38: Primer konstrukcijskega detajla za zagotavljanje zadostne nosilnosti povezave med jeklom in betonom (EN1994-1-2)

#### **6 REFERENCE**

- EN1990: Eurocode 0: Basis of structural design, Brussels, CEN, July 2001
- EN1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures Part 1-2: General rules Actions on structures exposed to fire, Brussels, CEN, November 2002
- EN1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-2: General rules Structural fire design, Brussels, CEN, 2005
- EN1994-1-2: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules Actions on structures exposed to fire, Brussels, CEN, 2005
- EN1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules Structural fire design, Brussels, CEN, 2005
- 7215 SA125: Competitive steel buildings through natural fire safety concept, final report of CEC agreement 7210 SA125, 126, 213, 214, 323, 423, 522, 623, 839, 937, British Steel, March 1999
- 7215 SA112: Design Tools of the behaviour of multi-storey steel framed buildings exposed to natural fire conditions (CARD (2)), Rapport final of ECSC project, TNO, January 2003
- 7215 PP025: Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings, final report of ECSC project-EUR 20466 EN 2002, CTICM, Brussels, December 2003

# IV.POGLAVJE 4: Računalniški programi za požarno analizo konstrukcij

J.J. Martínez de Aragón; F. Rey & J.A. Chica *LABEIN Technological Centre, Bilbao, Spain* 

POVZETEK: Ena glavnih nalog projekta DIFISEK (RFS-C2-03048) pod okriljem ECSC je zbrati in ovrednotiti obstoječo, javno dostopno programsko opremo za požarno odporno projektiranje. Da bi jo lahko pravilno ovrednotili, je potrebno določiti kriterije in jo klasificirati. Leta 1992 je Friedman na forumu International Co-operation on Fire Research predstavil pregled požarnih modelov za numerično analizo. Leta 2003 sta Olenick & Carpenter pregled razširila z vključitvijo več programske opreme in podrobno predstavila kategorije. V tem prispevku je predstavljena nova klasifikacija, ki temelji na zbranih podatkih iz omenjenih dokumentov in vsebuje posodobljen spisek obstoječe programske opreme s posebnim poudarkom na javno dostopni programski opremi. Predstavljeni so pomembni vidiki ovrednotenja obstoječe programske opreme za požarno odporno projektiranje. Pripravljen je vodnik za izbiro programske opreme, ki bo najbolje služila uporabniku. Vsebovanih je 177 različnih programskih orodij in od tega kar 30 javno dostopnih.

## 1 UVOD

Namen požarnega inženirstva je razviti zanesljive metodologije za varno projektiranje konstrukcij izpostavljenih vplivom požara. Za dosego tega cilja je potrebno dokazati, da je konstrukcija med požarom zmožna obdržati svojo nosilnost toliko časa, da jo lahko ovrednotimo kot varno (glej sliko 1).



Slika 1: Zahteva, ki mora biti zagotovljena za požarno varno konstrukcijo

V zadnjih 15 letih je bilo izvedenih veliko projektov, ki se nanašajo na razvoj metodologij določitve odpornosti konstrukcij, izpostavljenih požaru. Vse te metode so bile upoštevane pri sestavi Evrokodov in so povezane z razvojem različnih pojavov v primeru požara (glej razvoj dogodkov na sliki 2).



Slika 2: Razvoj dogodkov med požarom

Za določitev varnosti je potrebno natančno določiti zahteve, ki jim mora konstrukcija zadoščati. Zahteve so običajno predpisane s funkcijami, odvisnimi od časa in so sestavni del tehničnih predpisov (predpisni pristop). V sklopu požarnega inženirstva je bilo razvitih veliko metod, v katerih so te omejitve upoštevane na bolj realističen način (odzivni pristop; glej sliko 3).





Za izračun faktorjev R<sub>odpornost konstrukcije v požaru</sub> in R<sub>zahteva po varnosti</sub> je bilo razvite veliko programske opreme.

Zabeleženih je bilo 177 programskih paketov in od tega 30 javno dostopnih.

Namen prispevka ni samo zbrati podatke o obstoječi programski opremi, ampak uporabniku olajšati izbiro primerne opreme za določene problem. Zelo pomembno je poznati posamezne požarne modele, ustrezno programsko opremo in področje na katerem jo je možno uporabiti.

Požarni model je model, ki opiše dogodek povezan s požarom, od začetka požara, evakuacije, do porušitve konstrukcije (in ne samo razvoj požara in prenos dima). Modele lahko razdelimo na matematične in eksperimentalne. Eksperimentalni modeli so modeli, ki se uporabljajo v realnem prostoru ter v tem prispevku ne bodo nadalje obravnavani. Obravnavani so matematični modeli, ki dogodek med požarom opisujejo s pomočjo enačb in matematičnih pristopov.

Matematične modele lahko razdelimo na deterministične in statistične. Deterministični modeli so oblikovani s pomočjo fizikalnih, termičnih in kemičnih zakonov, medtem ko statistični modeli niso opisani direktno z zakoni fizike, temveč s pomočjo statistične obdelave. Zaradi kompleksnosti modelov in velikega števila potrebnih iteracij je uporaba računalnikov nujna. Programska oprema za požarno varno projektiranje je oprema, s katero je možno rešiti enačbe, ki jih vsebujejo tako statistični kot deterministični požarni modeli.

V požaru se zvrsti mnogo dogodkov. Za namene pravilne primerjave je bila različna programska oprema razvrščena glede na področje, ki ga zajema (področje obravnave programske opreme).

# 2 KLASIFIKACIJA PROGRAMSKE OPREME ZA POŽAR:

Najbolj običajni programski paketi opisujejo prenos dima in toplote v prostoru. Imenujejo se conski in področni modeli. Obstaja še vrsta drugih modelov glede na področje njihove uporabe kot na primer modeli za požarno odpornost konstrukcije ali modeli za odziv detektorjev. Klasifikacija, ki sta jo predstavila Olenick & Carpenter, omenja 6 tipov področja uporabe modelov: Modeli za odpornost konstrukcije med požarom, conski modeli, področni modeli, modeli izstopa, modeli odziva detektorjev in ostali modeli. V prispevku je število področij

reducirano na 5 z združitvijo področij conskih in področnih modelov v bolj splošno področje imenovano termični požarni modeli. Na ta način lahko modele klasificiramo le glede na področje uporabe in ne glede na matematične metode, s katerimi probleme rešujemo.

V okviru predstavljene klasifikacije lahko razlikujemo med dvema skupinama (glej sliko 4):

- Skupina, ki se nanaša na modele z opisom termičnega in mehanskega odziva konstrukcije (glej sliko 2)
- Skupina modelov, ki pomagajo pri določitvi zahtev, ki jih je potrebno zadovoljiti, da bo konstrukcija med požarom varna.



Slika 4: Skupine področij uporabe

## 2.1 Termični požarni modeli:

V to področje spadajo različni tipi programskih paketov, ki se uporabljajo za rešitev problema prenosa toplote med požarom. Za klasifikacijo lahko uporabimo SIST EN 1991 Del 1-2: Splošni vplivi –Vplivi na konstrukcije (glej sliko5).

| Požarni modeli  |                                       |                    |  |  |  |
|---|---------------------------------------|--------------------|--|--|--|
|   | Standardna krivulja temperatura - čas |                    |  |  |  |
| Nominalna krivulja temperatura –<br>čas (predpisni pristop) | Zunanja požarna krivulja              |                    |  |  |  |
|   | Hidrokarbonska krivulja               |                    |  |  |  |
|   | Doonostavlion nožarni model           | Požarni sektorji   |  |  |  |
| Naravni požar (odzivni pristop)                             | r oenostavijen pozarni moder          | Lokalizirani požar |  |  |  |
|   | Nama da i na žami ma dal              | Conski modeli      |  |  |  |
|   | Napredni pozarni model                | Prostorski modeli  |  |  |  |

#### Slika. 5 Termična obtežba za požarno analizo – Požarni termični modeli

Na ta način je mogoče termične požarne modele klasificirati na naslednji način:

- Poenostavljeni termični požarni modeli:
  - modeli z lokaliziranim požarom

- modeli s požarom v sektorjih
- Napredni termični požarni modeli
  - conski modeli
  - prostorski modeli

#### 2.1.1 Poenostavljeni termični požarni modeli

Ti modeli temeljijo na uporabi specifičnih fizikalnih parametrov in imajo majhno področje uporabe. Za požare v sektorjih je predpostavljena zvezna temperaturna razporeditev medtem ko je za lokalizirane požare predpostavljena nezvezna razporeditev.

| Model                           | Država     | Id. številka | Kratek opis   |
|---------------------------------|------------|--------------|---|
| DIFISEK-CaPaFi                  | Luxembourg | 1            | Izračun temperature jeklenega elementa.<br>Možnost upoštevanja 5 lokalnih virov toplote.<br>Temelji na EN 1991-1-2, prEN 1993-1-2 in<br>ECSC projektni dokumentaciji "Large<br>Compartment" & "Closed Car Parks".   |
| DIFISEK-EN 1991-1-<br>2 Annex A | Luxembourg | 2            | Izračun parametrične krivulje temperatura-čas<br>požarnega sektorja ter temperature elementa z<br>zaščito ali brez izpostavljenega vplivom po<br>izračunani krivulji. Temelji na EN 1991-1-2<br>Annex A and prEN 1993-1-2.  |
| DIFISEK-TEFINAF                 | Luxembourg | 3            | Izračun temperaturnega polja v prečnem prerezu<br>jeklenega stropnega elementa v odvisnosti od<br>funkcije časa in oddaljenosti od požara. Temelji<br>na oročilu EUR 18868 "Development of design<br>rules for steel structures submitted to natural<br>fires in large compartments".   |
| Parametrická teplotní<br>křivka | Češka      | 174          | Izračun temperaturne krivulje v prostoru.<br>Vhodni prodatki: dimenzije prostore in odprtine,<br>požarna obtežba, materialne lastnosti sten. Velja<br>za poljubno obliko prostora, za vse oblike in<br>velikosti oken. Izračun rezultatov in izris<br>krivulje  |
| Přestup tepla                   | Češka      | 175          | Izračun temperature v jekleni konstrukciji pri<br>požaru. Uporablja iteracijsko metodo, podano v<br>SIST EN 1993-1-2. Prerez je lahko požarno<br>zaščiten s premazom ali z oblogami ali je<br>nezaščiten. Program vsebuje knjižnico<br>vročevaljanih profilov in njihovih karakteristik.<br>Uporabimo lahko ;standardno krivuljo,<br>hidrokarbonsko krivuljo ali parametrično<br>krivuljo (potreben je vnos parametrov). Program<br>izriše krivulji temperature plinov v prostoru<br>temperaturno krivuljo v jekleni konstrkciji. |

Področje uporabe: Poenostavljeni termični požarni modeli

Prvi trije programski paketi v zgornji preglednici so bili razviti v Profil-Arbed in kasneje dopolnjeni s strani Profile Arbed Researchers (PARE) za namene tega projekta. Ostala dva sta razvita na CTU v Pragi, dostopna na www.access-steel.cz/page-nastroj.

# 2.1.2 Napredni termični požarni modeli

#### 2.1.2.1 Conski modeli:

Conski požarni model je računalniški model, ki razdeli obravnavano območje na različne kontrolne volumne, imenovane cone. Največ conskih modelov uporablja dve coni, zgornjo vročo cono in spodnjo hladno cono. Poseben primer conskih modelov so enoconski modeli, ki temeljijo na predpostavki, da cona ni slojevita ampak ima homogene lastnosti po vsem prostoru. Nekateri conski modeli omogočajo prehod iz dvoconskega v enoconski model, ko so za to izpolnjeni določeni pogoji.

Da bi lahko uporabili vodilne enačbe, ki predstavljajo bistvo požarnih modelov, je potrebno privzeti mnogo predpostavk. Veliko od teh predpostavk temelji na opazovanju eksperimentalnih preizkusov in modelov. Glavne predpostavke so:

- Dim se formira v dve plasti (opaženo v realnih požarih). Predpostavljeno je, da so pogoji v plasti konstantni. Predpostavka je sprejemljiva, saj je razlika med posameznimi plastmi v realnem požaru veliko večja kot razlike v posamezni plasti.
- Ognjeni plameni potiskajo maso (delce dima) in toploto v zgornjo cono. Volumen plamenov je predpostavljen kot majhen proti volumnu zgornje in spodnje cone.
- Velika večina predmetov v obravnavani sobi se zanemari; Toplota se izgublja skozi ovoj obravnavanega prostora in ne v pohištvo (nekateri modeli upoštevajo širjenje ognja po pohištvu, vendar le v majhni meri)

\_

Vhodni podatki običajno vsebujejo temperaturo prostora, konfiguracijo prostora (vse stene, tla in stropove), število odprtin in njihove velikosti, lastnosti pohištva v prostoru in hitrost sproščanja toplote (kakšna snov gori).

Izhodni podatki običajno vsebujejo informacije o potrebi in načinu namestitve sprinkler sistema, času sprožitve požarnih alarmov, času do izbruha požara, zgornji in spodnji temperaturi plasti, višini plasti dima ter popustitev materiala.

Z uporabo conskih modelov ne zajamemo povratnega sevanja okolice. Toplota, ki se sprosti, ni izhodni podatek. Potrebno je opraviti preizkuse za določitev velikosti požara. Izkušnje požarnega inženirja so velikega pomena pri pravilnem modeliranju posameznega požara.

| Področje uporabe: C | Conski modeli          |              |  |
|---------------------|------------------------|--------------|--|
| Model               | Država                 | Id. številka | Kratek opis.   |
| ARGOS               | Danish                 | 4            | Večprostorski conski model.  |
| ASET/ASET-B         | ZDA                    | 5            | Enoprostorski conski model brez prezračevanja.   |
| ASMET               | ZDA                    | 6            | Atria inženirsko orodje za simulacijo dima.  |
| Branzfire           | New Zealand            | 7            | Večprostorski conski model s polno implementacijo  |
| BRI-2               | Japonska/US            | 8            | modela za širitev in rast požara.<br>Dvoplastni conski mdoel za večnadstropne stavbe z<br>več prostori Prenos dima |
| CCFM/Vents          | ZDA                    | 9            | Večprostorski conski model s prezračevanjem.   |
| Cfire-X             | Nemčija/Norveš         | 10           | Conski model za sektorske požare. Posebej za   |
| CiFi                | Ka<br>Francija         | 11           | pozare tekocin gonv.<br>Večprostorski conski model   |
| COMPREN             |                        | 12           | Conski model s sektorij  |
| COMPE2              |                        | 12           | Enoprostorski model za simulacijo stanja po  |
|                     |                        | 1.4          | izbruhu pozra v določenem sektorju.  |
| DACFIR-3            | ZDA<br>Č               | 14           | Conski mdel za letalsko kabino.  |
| DSLAYV              | Svedska                | 15           | Enoprostorski conski model.  |
| FAST/CFAST          | ZDA                    | 16           | Conski model s sektorji.   |
| FASTLite            | ZDA                    | 17           | Omejena verzija CFAST.   |
| FFM                 | ZDA                    | 18           | Conski model za analizo pred izbruhom požara.  |
| FIGARO II           | Nemčija                | 19           | Conski model za določitev vzdržljivosti.   |
| FIRAC               | ZDA                    | 20           | Uporablja FIRIN in kompleksne prezračevalne sisteme.   |
| FireMD              | ZDA                    | 21           | Enoprostorski, dvoconski model.  |
| FireWalk            | ZDA                    | 22           | Uporablja CFAST z izboljšano vizualizacijo.  |
| FireWind            | Avstralija             | 23           | Večprostorski conski model z več podmodeli.  |
| FIRIN               | ZDA                    | 24           | Večprostorski conski model s kanali, ventilatorji in filterji.   |
| FIRM                | ZDA                    | 25           | Enoprostorski, dvoconski model.  |
| FIRST               | ZDA                    | 26           | Enoprostorski, conski model, z ventilacijo.  |
| FLAMME-S            | Francija               | 27           | Dvoconski model.   |
| FMD                 | ZDA                    | 28           | Conski model za Atrio.   |
| HarvardMarkVI       | ZDA                    | 29           | Starejša verzija FIRST-a.  |
| HEMFAST             | ZDA                    | 30           | Gorenje pohištva.  |
| HYSLAB              | Švedska                | 31           | Conski model za čas pred izbruhom požara.  |
| IMFE                | Poljska                | 32           | Enoprostorski, dvoconski model z ventilacijo.  |
| MAGIC               | Franciia               | 33           | Dvoconski model <i>za nuklearne elektrarne</i> .   |
| MRFC                | Nemčija                | 34           | Večprostorski conski model, pretok plinov in   |
| NAT                 | Francija               | 35           | termična obtežba konstrukcij.<br>Enoprostorski, conski model s poudarkom na<br>odzimu konstrukcija                 |
| NBS                 | 7D4                    | 36           | Conski model čas pred izbruhom požara  |
| NBCC1               | Kanada                 | 37           | Enoprostorski, conski model  |
| NRCC1               | Kanada                 | 28           | Conski model za velika niserna   |
| OSU OSU             | ZDA                    | 30           | Enonrostorski aonski model   |
| 030                 | LDA<br>Dolgijo         | 39<br>40     | Conski model a neuderkom ne odzivu   |
| Ozone               | Deigija                | 40           | konstrukcije   |
| POGAR               | Rusija                 | 41           | Enoprostorski, conski model.   |
| RADISM              | Velika Britanija       | 42           | Conski model z upoštevanjem uporabe sprinkler  |
| DEIDES              | 7D4                    |              | sistema v buoyant-ovi plasti.  |
| NTIKES<br>D VENT    | LDA                    | 43<br>44     | Enonrostorski model za ventilesije nlinev  |
| R-VENI<br>SEIDE 4   | inoi veska<br>Švodalao | 44<br>15     | Enopiosioiski model za ventilacijo pilnov.   |
| STIKE-4             | Sveuska<br>Francija    | 4J           | Conski model, cas pred izbrunom pozara.  |
| SICUM               | Fiancija               | 40           | Enoprostorski, conski model.   |
| SMKFLW              | јаропѕка               | 4/           | Conski model za prenos plinov v eni plasti v   |

|          |                  |    | stavbah.                                   |
|----------|------------------|----|--|
| Smokepro | Avstralija       | 48 | Enoprostorski, conski model                |
| SP       | Velika Britanija | 49 | Conski model za analizo po izbruhu požara. |
| WPI-2    | ZDA              | 50 | Enoprostorski, conski model.               |
| WPIFIRE  | ZDA              | 51 | Večprostorski, conski model.               |
| ZMFE     | Poljska          | 52 | Enoprostorski, conski model.               |

Večina te programske opreme obravnava prenos plinov in toplote. Uporaba pri projektiranju konstrukcij je omejena na določitev zunanje temperature določenih konstrukcijskih elementov. Programi, ki so v tabeli označeni s krepkim tiskom, se lahko neposredno uporabijo za požarno odporno projektiranje konstrukcij. Z ležečim tiskom so oznečeni programi, ki so omejeni na uporabo za posebne primere in so malo uporabni za požarno odporno projektiranje. Omenjeni niso še trije drugi modeli, za katere ni bilo mogoče pridobiti več informacij: CISNV (Rusija), FirePro (Velika Britanija) and FireWalk (ZDA).

## 2.1.2.2 Področni modeli:

Področni modeli (CFD) predstavljajo najnovejšo tehnologijo na področju požarno odpornega projektiranja. CFD modeli uporabljajo kontrolne volumne, ki so podobni conskim modelom, le da imajo conski modeli le nekaj con, področni modeli pa lahko uporabijo tisoče konstrolnih volumskih celic.

S CFD modeliranjem se problem reši z reševanjem časovno odvisnih diferencialnih enačb (Navier-Stokesove enačbe) za vsak kontrolni volumen posebej. Tako podroben opis problema je časovno zelo zahteven, a je z njim možno opisati bolj zapletene geometrije prostorov. Natančnost opisa je s tem večja, saj je potrebno manj določiti manj predpostavk in robni pogoji enačb so enostavnejši.

Vhodni podatki vsebujejo podroben opis geometrije prostorov, konfiguracijo prostora (vse stene, tla in stropove), število odprtin in njihove velikosti, lastnosti pohištva v prostoru, karakteristike gorljivih snovi, parametre turbulence ter parametre radiacije.

Izhodni podatki običajno vsebujejo smer in hitrost prenosa plinov in toplote, informacije o potrebi in načinu namestitve sprinkler sistema, času sprožitve požarnih alarmov, času do izbruha požara, temperature področja, hitrosti, velikosti plasti dima in pričetek tečenja določenih elementov.

Za CFD analize je potrebno veliko časa, saj se računski čas povečuje z gostitvijo mreže kontrolnih volumnov. Veliko parametrov je predpostavljenih, zato je potrebno CFD modele preveriti in umeriti.

CFD modele je mogoče uporabiti na kompleksnih modelih (npr. ukrivljenih stenah). V primerjavi s conskimi modeli se CFD uporablja na veliko drugih področjih tehnike (strojništvo, letalska industrija), zato je dostopnih veliko podatkov, s čimer je verifikacija modelov olajšana.

| Področje uporabe: | Področni modeli (          | CFD)         |   |
|-------------------|----------------------------|--------------|---|
| Model             | Država                     | Id. številka | Kratek opis   |
| ALOFT-FT          | ZDA                        | 53           | Prenos dima velikih zunanjih požarov.   |
| CFX               | Velika                     | 54           | CFD za splošno uporabo.   |
|                   | Britanija                  |              |   |
| FDS               | ZDA                        | 55           | CFD koda za specifično uporabo.   |
| FIRE              | Avstralija                 | 56           | CFD model z uporabo vodnih šob, z upoštevanjem trdih in tekočih goriv ter procesa gorenja in gašenja.                       |
| FISCO-3L          | Nemčija/Norveš<br>ka       | 57           | Enoprostorski področni model za opis interakcije<br>splikler sistema s plini požara in vsiljeno ali<br>naravno ventilacijo. |
| FLUENT            | ZDA                        | 58           | CFD za splošno uporabo.   |
| JASMINE           | Velika Britanija           | 59           | CFD model za širjenje ognja in dima.  |
| KAMALEON          | Norveška                   | 60           | CFD model za uporabo s kodo končnih elementov   |
|                   |                            |              | za termični odziv konstrukcij.  |
| KOBRA-3D          | Nemčija                    | 61           | CFD model za prenos toplote in dima.  |
| MEFE              | Portugal                   | 62           | CFD model za dva prostora, vsebuje časovno odvisen odziv vezanih problemov.   |
| PHOENICS          | Velika<br>Britanija        | 63           | CFD za splošno uporabo.   |
| RMFIRE            | Kanada                     | 64           | Dvodimenzionalni področni model za zvezen izračun prenosa dima.   |
| SMARTFIRE         | Velika Britanija           | 65           | Model področja požara.  |
| SmokeView         | ZDA                        | 66           | Orodje za grafični prikaz FDS podatkov.   |
| SOFIE             | Velika<br>Britanija/Švedsk | 67           | CFD model za širitev ognja in dima.   |
| SOI VENT          | a<br>ZD 4                  | 68           | CED model za širitev toplote in dima v tunelih  |
| SOLVENI<br>SPLASH | Velika Britanija           | 69           | Področni model za onis interakcije sprinkler  |
| SILASII           | v enka Drhanija            | 0)           | sistema in plinov.  |
| STAR-CD           | Velika<br>Britanija        | 70           | CFD za splošno uporabo.   |
| TUNFIRE           | Velika Britanija           | 71           | CFD model za širitev toplote in dima v tunelih.   |
| UNDSAFE           | ZDA/Japonska               | 72           | Področni model za zunanje in notranje požare.   |

Večina programske opreme je omejena na prenos toplote in plinov v primeru požara. Uporaba pri projektiranju konstrukcij je omejena na določitev zunanje temperature določenih konstrukcijskih elementov. Programi, ki so v tabeli označeni s krepkim tiskom, se lahko uporabljajo v splošne namene. Z ležečim tiskom so oznečeni programi, ki so omejeni na uporabo za posebne naemne in so malo uporabni za požarno odporno projektiranje. Omenjeni niso še trije drugi modeli, za katere ni bilo mogoče pridobiti več informacij: STREAM (Japonska), VESTA (Nizozemska) in FLOTRAN (ZDA).

#### 2.2 Modeli za odpornost proti požaru:

Ti modeli simulirajo odziv konstrukcijskih elementov izpostavljenim požaru. Osnovni namen je določitev časa porušitve elementov med požarom. Modeli so sestavljeni s pomočjo termičnih in mehanskih fizikalnih zakonov.

Kot pri termičnih modelih, je tudi tukaj mogoče najti različne vrste programskega orodja, s katerim je mogoče določiti mehanski odziv konstrukcij izpostavljenih požaru. Kvalifikacija modelov je delno prevzeta iz Evrocodov (EN 1991-1-2:2002 in EN 1993-1-2:2005). V tem primeru lahko modele razdelimo na poenostavljene in napredne.

Zahtevani vhodni vključujejo materialne karakteristike in robne pogoje, vključno s požarno obtežbo.

|                      | Postopek                     | x računa                   | Tabele s<br>podatki | Enostavne<br>računske<br>metode | Napredne<br>metode |
|----------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|
|                      | Analiza elementov            | Račun mehanskega vpliva in | Da                  | Da                              | Da                 |
| Predpisni<br>pristop | Analiza dela konstrukcije    | robnih pogojev             | Ne                  | Da (če je na<br>voljo)          | Da                 |
|                      | Globalna<br>analiza          | Izbira mehanskega vpliva   | Ne                  | Ne                              | Da                 |
|                      | Analiza elementov            | Račun mehanskega vpliva in | Ne                  | Da (če je na<br>voljo)          | Da                 |
| Odzivni<br>pristop   | Analiza dela<br>konstrukcije | robnih pogojev             | Ne                  | Ne                              | Da                 |
| -                    | Globalna<br>analiza          | Izbira mehanskega vpliva   | Ne                  | Ne                              | Da                 |

Izhodni podatki so čas porušitve, napetosti in deformacije konstrukcijskih elementov.

#### Slika 6 Klasifikacija potekov požarnega projektiranja.

#### 2.2.1 Poenostavljeni modeli za požarno odpornost:

Ti modeli obravnavajo konstrukcijske modele posamično in temeljijo večinoma na poenostavljenih metodah. Nekatere od njih je mogoče vključiti v conske in področne modele.

| Področje uporabe | Področje uporabe: Poenostavljeni modeli za požarno odpornost |              |   |  |  |  |
|------------------|--|--------------|---|--|--|--|
| Model            | Država   | Id. številka | Kratek opis   |  |  |  |
|                  |  |              |   |  |  |  |
| AFCB             | Luxembourg   | 73           | Projektiranje sovprežnih nosilcev po Evrokodu 4.  |  |  |  |
| AFCC             | Luxembourg   | 74           | Projektiranje sovprežnih stebrov po Evrokodu 4.   |  |  |  |
| CIRCON           | Kanada   | 75           | Model požarne odpornosti za armiranobetonske stebre z okroglim prerezom.  |  |  |  |
| COFIL            | Kanada   | 76           | Požarna odpornost okroglih, votlih prerezov,<br>napolnjenih z betonom.  |  |  |  |
| Elefir-EN        | Portugal/Belg.   | 173          | Požarna odpornost jeklenih elementov v skladu s<br>Evrokod 3 standardom.  |  |  |  |
| Elefir           | Belgija  | 77           | Požarna odpornost jeklenih elementov Evrokodu 3.  |  |  |  |
| H-Fire           | Nemčija  | 78           | Izračun projektne nosilnosti sovprežnih elementov s poenostavljenimi modeli po EN 1994-1-2                          |  |  |  |
| INSTAI           | Kanada   | 79           | Požarna odpornost izoliranih, okroglih, votlih jeklenih stebrov.  |  |  |  |
| INSTCO           | Kanada   | 80           | Požarna odpornost okroglih, votlih jeklenih prerezov, napolnjenih z betonom.  |  |  |  |
| POTFIRE          | Francija   | 81           | Požarna odpornost okroglih, votlih jeklenih prerezov,<br>napolnjenih z betonom z uporabo aneksa G it Evrokoda<br>4. |  |  |  |
| RCCON            | Kanada   | 82           | Model požarne odpornosti za armiranobetonske stebre<br>s pravokotnim prerezom.                                      |  |  |  |
| RECTST           | Kanada   | 83           | Požarna odpornost izoliranih, pravokotnih, votlih jeklenih stebrov.   |  |  |  |
| SQCON            | Kanada   | 84           | Požarna odpornost armiranobetonskih stebrov s pravokotnim prerezom.   |  |  |  |
| WSHAPS           | Kanada   | 85           | Požarna odpornost zaščitenih jeklenih stebrov s<br>prrezom W oblike.  |  |  |  |

Programska oprema, označena z ležečim tiskom, je uporabna samo za betonske konstrukcijske elemente.

## 2.2.2 Napredni modeli za požarno odpornost:

Z uporabo teh modelov je mogoče statično ali dinamično simulirati odziv del ali celotno konstrukcijo, s čimer je mogoče določiti čas porušitve celotne konstrukcije. Ta programska oprema praviloma vsebuje okolje za končne elemente in se uporablja v splošne namene.

| Področje uporab | e: Napredni mo | deli za požarno | odpornost  |
|-----------------|----------------|-----------------|--|
| Model           | Država         | Id. številka    | Kratek opis.   |
| ABAQUS          | ZDA            | 86              | Splošno okolje za končne elemente.   |
| ALGOR           | ZDA            | 87              | Splošno okolje za končne elemente.   |
| ANSYS           | ZDA            | 88              | Splošno okolje za končne elemente.   |
| BoFire          | Nemčija        | 89              | Okolje za končne elemente za tranzientne, nelinearne                           |
|                 | 5              |                 | sisteme z inkrementno metodo. Termične in mehanske                             |
|                 |                |                 | lastnosti materiala se podaja v skladu z ENV 1994-1-2.                         |
|                 |                |                 | Obravnavati je možno jeklene, sovprežne in                                     |
|                 |                | 00              | armiranobetonske konstrukcije.   |
| BRANZ-IR8       | New Zealand    | 90              | Program za dolocitevo pozarne odpornosti                                       |
| CEEICOSS        | Belgija        | 91              | Model za požarno odpornost   |
| CMPST           | Francija       | 92              | Mehanska odnornost prerezov pri povišani temperaturi                           |
| COMPSI          | Kanada         | 03              | Tamparatura vačslojnih plošč, iznostavljanih požaru                            |
| COMISE          |                | 95              | Spložno okolio za končno olomonto  |
| EASPIIS         |                | 94<br>05        | Mahanska adnornost konstrukcijskih alamantov                                   |
| FASDUS          | LDA            | 95              | iznostavljenih požaru  |
| FIRES-T3        | ZDA            | 96              | Uporabliena metoda končnih elementov za prevod                                 |
| 1111115 15      | LDIT           | <i>y</i> 0      | toplote 1. 2 in 3D konstrukcij.  |
| HSLAB           | Švedska        | 97              | Razvoj temperature v ploščah, sestavljenih iz več                              |
|                 |                |                 | materialov.  |
| LENAS           | Francija       | 98              | Mehanski odziv jeklenih konstrukcij med požarom.                               |
| LZDAS           | Velika         | 99              | Splošno okolje za končne elemente.   |
|                 | Britanija      |                 |  |
| NASTRAN         | ZDA            | 100             | Splošno okolje za končne elemente.   |
| SAFIR           | Belgija        | 101             | Toplotna in mehanska analiza konstrukcij med požarom.                          |
| SAWTEF          | ZDA            | 102             | Analiza jeklenih povezovalnih plošč lesenih paličij,                           |
| SISMEE          | Francija       | 102             | izpostavljenim pozaru.<br>Mehanski odziv sovprežnih konstrukcji iz jekle in    |
| SISNIEF         | FTallelja      | 105             | betona   |
| STA             | Velika         | 104             | Tranzienten prehod v segretih trdnih telesih                                   |
| 5111            | Britanija      | 101             |  |
| STELA           | Velika         | 105             | 3D model s končnimi volumni, integriran v JASMINE                              |
|                 | Britanija      |                 | inand SOFIE. Izračun odziva konstrukcijskih elementov                          |
|                 |                |                 | na požarne pline.  |
| TAGEE           | Č . 1.1 .      | 100             | A  |
| TASEF           | Svedska        | 106             | Analiza konstrukcij, izpostavljenim pozaru, s pomocjo metode končnih elementov |
| TCSIRM          | Kanada         | 107             | 2D raznored temperature betonskih stebrov in plošč                             |
| TCSLDW          | Kunuuu         | 10/             | med nožarom  |
| THELMA          | Velika         | 108             | Analiza konstrukcij, izpostavljenim požaru, s pomočjo                          |
|                 | Britanija      |                 | metode končnih elementov.  |
| TR8             | New Zealand    | 109             | Požarna odpornost betonskih plošč in stropnih sistemov.                        |
| VULCAN          | Velika         | 110             | 3D analiza jeklenih in sovprežnih okvirjev s stropovi                          |
|                 | Britanija      |                 | med požarom.   |
| WALL2D          | Kanada         | 111             | Prehod toplote skozi skozi stene iz lesenih desk med                           |
| 0.1             | Č v 1          | 177             | požarom.   |
| Ocel pozar      | Ceska          | 1//             | Predstavlja del sistema FINETO. Kacun pozarne                                  |
|                 |                |                 | Program vsehuje knjižnico vročevaljanih profilov                               |
|                 |                |                 | Dodajo se lahko poljubni prerezi. Prerezi so lahko                             |
|                 |                |                 | zaščiteni ali nezaščiteni. Uporabimo lahko :standardno                         |
|                 |                |                 | krivuljo, hidrokarbonsko krivuljo ali parametrično                             |
|                 |                |                 | krivuljo (potreben je vnos parametrov). Elemeti so                             |
|                 |                |                 | lahko natezno, tlačno ali upogibno obremenjeni,                                |
|                 |                |                 | upoštevana je tudi interakcija osna sila in upogib.                            |
|                 |                |                 | Notranje sile so izračunane s paketom FINE 2D ali                              |
|                 |                |                 | FINE 3D.   |

Programska oprema, označena s poševnim tiskom ni uporabna za analizo jeklenih konstrukcij. S krepko poudarjenim tekstom je označena programska oprema za splošno uporabo. Omenjena nista bila še dva programska paketa, za katera ni bilo mogoče pridobiti več informacij: HEATING in TAS (ZDA).

# 2.3 Evakuacijski modeli (Egress):

Evakuacijski modeli se uporabljajo za izračun predvidenega časa za evakuacijo stavbe. Modeli se običajno uporabljajo v posebnih analizah, ki predstavljajo alternativni pristop h klasičnemu projektiranju in za določitev krajev nastanka gneče v času evakuacije.

Nekatere od omenjenih modelov je mogoče povezati s conskimi in področnimi modeli za namene določitve nastopa skrajnih življenjskih pogojev v stavbi.

Z bolj zapletenimi modeli te skupine je mogoče upoštevati vplive kot so psihološki vpliv ognja na človeka, pojave slabe vidljivosti, toksičnost plinov. Nekateri od njih imajo celo razvit grafični prikaz premikanja ljudi med evakuacijo.

Vhodni podatki običajno vsebujejo zasedenost stavbe ter geometrijo.

Izhodni podatki vključujejo čas, ki je potreben za evakuacijo in lokalizacija področja, kjer prihaja do gneče.

Evakuacijski modeli so običajno statistični.

| Področje uporabe: | Evakuacija       |             |   |
|-------------------|------------------|-------------|---|
| Model             | Država           | Id. število | Kratek opis   |
| AEA EGRESS        | ZDA              | 112         | Analiza poteka evakuacije ljudi.  |
| ALLSAFE           | Norveška         | 113         | Analiza poteka evakuacije z upoštevanjem narave liudi.  |
| ASERI             | Nemčija          | 114         | Pomikanje ljudi po stavbah z zapleteno geometrijo<br>z upoštevanjem faktorjev širitve ognja in dima.      |
| BGRAF             | ZDA              | 115         | Evakuacijski model, ki vključuje stohastičen<br>model človeških odločitev                                 |
| EESCAPE           | Avstralija       | 116         | Evakuacija visokih zgradb z uporab stopnišč.  |
| EGRESS            | Velika Britanija | 117         | Evakuacijski model za objekte z zapleteno<br>geometrijo z grafičnim prikazom                              |
| EGRESSPRO         | Avstralija       | 118         | geometrijo z grunenim prikuzom.   |
|                   | 5                |             | Evakuacijski model, ki vključuje vplive splinker sistemov in aktivacijo detektorjev.                      |
| ELVAC             | ZDA              | 119         | Evakuacija visokih zgradh z uporaho dvigal  |
| EVACNET           | ZDA              | 120         | Določitev optimalnega načrta za evakuacijo.   |
| EVACS             | Japonska         | 121         | Evakuacijski model za optimalno projektiranje.  |
| EXIT89            | ZDA              | 122         | Evakuacija visokih zgradb z uporabo.  |
| EXITT             | ZDA              | 123         | Točkovni in ločni tip evakuacijskih modelov z<br>upoštevanjem vedenja ljudi.                              |
| EXODUS            | Velika Britanija | 124         | Orodje za varnostno industrijo.   |
| GRIDFLOW          | Velika Britanija | 125         | Simulacija poteka evakuacije ter določitev časa<br>spraznitve posameznih nadstropij in celotne<br>stavbe. |
| PATHFINDER        | ZDA              | 126         | Evakuacijski model.   |
| PEDROUTE          | Velika Britanija | 127         | Simulacija gibanja pešcev.  |
| SEVE_P            | Francija         | 128         | Evakuacijski model z grafičnim prikazom, upoštevanje preprek.   |
| SIMULEX           | Velika Britanija | 129         | Evakuacijski model.   |
| STEPS             | Velika Britanija | 130         | Simulacija gibanja pešcev, 3D vizualizacija.  |
| WAYOUT            | Avstralija       | 131         | Evakuacijski model programskega paketa Wind package.  |

V zgornji tabeli ni bilo omenjenih še naslednjih nekaj programskih paketov, za katere ni bilo mogoče pridobiti več informacij: BFIRE, ERM, Magnetic Simulation, Takashi's Fluid Model in VEGAS (Velika Britanija).

#### 2.3.1 Modeli odziva detektorjev:

Modeli odziva detektorjev so namenjeni določitvi časa, ki je potreben za aktivacijo aktivnih naprav kot so detektorji dima, termalni detektorji in detektorji v sprinkler sistemih.

Pri teh modelih se uporabljajo conski modeli za določitev prenosa toplote in plinov ter podmodeli za določitev odziva detektorjev na pline in toploto. Predpostavijo se poenostavljenje relacije za določitev prenosa toplote do detektorjev, s čimer je mogoč izračun časa do aktivacije.

Vhodni podatki običajno zajemajo karakteristike in lokacijo detektorjev ter količino sproščene toplote požara. Za bolj zahtevne modele je so potrebni podatki natančne geometrije prostorov in materialov.

Izhodni podatki vključujejo čas aktivacije detektorjev in bolj natančnih modelih posledice aktivacije aktivnih varnostnih sistemov.

Pri izbiri modelov je potrebna pazljivost, saj veliko modelov odziva detektorjev upošteva samo ravne stropove.

| Področje uporabe: | Področje uporabe: Modeli odziva detektorjev |             |   |  |  |
|-------------------|---|-------------|---|--|--|
| Model             | Država                                      | Id. število | Kratek opis   |  |  |
| ASCOS             | ZDA   | 132         | Analiza sistemov za kontrolo vsebnosti dima.  |  |  |
| DETACT-QS         | ZDA   | 133         | Izračun aktivacije termalnih detektorjev vgrajenih v<br>neomejene stropove, poljuben požar.                     |  |  |
| DETACT-T2         | ZDA   | 134         | Izračun aktivacije termalnih detektorjev vgrajenih v<br>neomejene stropove, t2 požar.                           |  |  |
| FPETOOL           | ZDA   | 135         | Set enačb, ki so uporabne za ocene tveganja z<br>upoštevanjem sistemov za zaščito pri požaru.                   |  |  |
| G-JET             | Norveška                                    | 136         | Model za detekcijo dima.  |  |  |
| JET               | ZDA   | 137         | Model za ocenitev časa aktivacije detektorjev ter<br>temperature plinov v plasti dima.                          |  |  |
| LAVENT            | ZDA   | 138         | Odziv sprinkler sistemov v sektorskih požarih z stropnimi in vertikalnimi šobami.                               |  |  |
| PALDET            | Finland                                     | 139         | Odziv sprinkler sistema in detektorjev dima na<br>neomejenih stropovih.   |  |  |
| SPARTA            | Velika<br>Britanija                         | 140         | Sprinkler model (particle-tracking), integriran v<br>JASMINE, za izračun vplivov na pline nastale pri<br>požaru |  |  |
| SPRINK            | ZDA   | 141         | Odziv sprinkler sistema v visokih skladiščih.   |  |  |
| TDISX             | ZDA   | 142         | Odziv sprinkler sistema v skladiščih.   |  |  |

Omenjen ni model HAD, za katerega ni bilo mogoče pridobiti več informacij.

#### 2.4 Splošno:

Obstajajo še drugi požarni modeli, ki niso zajeti v naštete kategorije. Nekateri od njih so sestavljeni iz dveh ali več zgoraj naštetih modelov, drugi se uporabljajo za specifične namene analize požarov, ki niso vključeni v omenjene kategorije. Ti modeli so kategorizirani pod točko splošno.

Veliko teh modelov je v obliki računalniških programov in vsebujejo več podmodelov in jih zato lahko vključimo v več zgoraj omenjenih kategorij. Podmodeli so običajno programski paketi, ki se vsak zase uporablja za poseben namen analize požarov.

| Področje upora | ibe: Splošno        |             |  |
|----------------|---------------------|-------------|--|
| Model          | Država              | Id. število | Kratek opis  |
| ALARM          | Velika              | 143         | Optimizacija stroškov                                      |
|                | Britanija           |             |  |
| ASKFRS         | Velika              | 144         | Paket modelov, conski model.                               |
| DDEAV1         | Britanija           | 145         |  |
| BREAKI         | ZDA                 | 145         | Odziv oken v pozaru.                                       |
| BREATH         | Velika              | 146         | Disperzija škodljivih snovi v mreži sektorjev z            |
| Drilliont      | Britanija           | 147         | ventilacijo.<br>CED model kombinizen z englitičnimi modeli |
| Brilliant      | Norveska            | 14/         | CFD model kombiniran z analiticnimi modeli.                |
| COFRA          | ZDA                 | 148         | Model za oceno tveganja.                                   |
| CONTAMW        | ZDA                 | 149         | Model zracnega toka.                                       |
| CRISP          | Velika<br>Pritonijo | 150         | Conski model z oceno tveganja in načinom evakuacije.       |
| FIER Asystem   | Kanada              | 151         | Model za oceno tvegania s korelacijami                     |
| FireCad        | ZDA                 | 152         | Dodatek za CFAST   |
| FIRECAM        | Kanada              | 153         | Ocena tvegania poškodb                                     |
| FIREDEMND      | ZDA                 | 154         | Določitev potrebnih zalog vode za gašenje                  |
| FIRESYS        | New Zealand         | 155         | Paket programov za uporabo z načrtovanjem nosilnosti       |
| 111111010      |                     | 100         | konstrukcije.  |
| FIREX          | Nemčija             | 156         | Poenostavljeni conski modeli z statistično korelacijo.     |
| FIVE           | ZDA                 | 157         | Izračun ranljivosti konstrukcij v primeru požara.          |
| FRAME          | Belgija             | 158         | Model ocene tveganja požara.                               |
| FREM           | Avstralija          | 159         | Model ocene tveganja požara.                               |
| FriskMD        | ZDA                 | 160         | Conski model FireMD z oceno tveganja.                      |
| HAZARD I       | ZDA                 | 161         | Conski model z možnostjo upoštevanja evakuacije.           |
| JOSEFINE       | Velika              | 162         | Vmesnik za conske in SFD modele, ter modele                |
|                | Britanija           |             | evakuacije in modele ocene tveganja.                       |
| MFIRE          | ZDA                 | 163         | Ventilacijski sistemi za uporabo z Mine.                   |
| RadPro         | Avstralija          | 164         | Model radiacije pri požaru.                                |
| Risiko         | Switzerland         | 165         | Model za oceno tveganja.                                   |
| RISK-COST      | Kanada              | 166         | Pričakovano tveganje glede na življensko dobo in ceno      |
| RiskPro        | Avstralija          | 167         | Model za rangiranie glede na oceno tvegania                |
| SMACS          | ZDA                 | 168         | Prenos dima skozi prezračevalne sisteme                    |
| SPREAD         | ZDA                 | 169         | Napoved hitrosti sproščanja toplote in širienja požara po  |
|                | 2011                |             | steni.   |
| ToxFED         | Velika              | 170         | Izračun FED (Fractional Effective Dose) s pomočjo          |
|                | Britanija           |             | koncentracij v plasteh dima.                               |
| UFSG           | ZDA                 | 171         | Napoved širjenja ognja v vertikalni smeri.                 |
| WALLEX         | Kanada              | 172         | Izračun prenosa toplote ognja skozi okno v steno nad njim. |

Omenjen ni model Dow indices (ZDA), za katerega ni bilo mogoče pridobiti več informacij.

# 2.5 Javno dostopna programska oprema za požar:

Izmed vsemi zbranimi programskimi paketi je 30 javno dostopnih. Našteti so v naslednji tabeli:

| Javno dostopna progra           | mska oprema za požar                      |             |   |
|---------------------------------|---|-------------|---|
| Model                           | Področje:                                 | Id. število | Dostopno na:  |
| DIFISEK-CaPaFi                  | Poenostavljeni termični požarni modeli    | 1           | www.sections.arcelor.com                              |
| DIFISEK-EN 1991-1-<br>2 Annex A | Poenostavljeni termični požarni modeli    | 2           | www.sections.arcelor.com                              |
| DIFISEK-TEFINAF                 | Poenostavljeni termični požarni modeli    | 3           | www.sections.arcelor.com                              |
| ASET/ASET-B                     | Conski termični požarni modeli            | 5           | www.fire.nist.gov                                     |
| ASMET                           | Conski termični požarni modeli            | 6           | www.fire.nist.gov                                     |
| CCFM/Vents                      | Conski termični požarni modeli            | 9           | www.fire.nist.gov                                     |
| FAST/CFAST                      | Conski termični požarni modeli            | 16          | www.fire.nist.gov                                     |
| FIRST                           | Conski termični požarni modeli            | 26          | www.fire.nist.gov                                     |
| OZONE                           | Conski termični požarni modeli            | 40          | www.ulg.ac.be   |
|                                 |   |             | www.sections.arcelor.com                              |
| ALOFT-FT                        | Področni termični požarni modeli          | 53          | www.fire.nist.gov                                     |
| FDS                             | Področni termični požarni modeli          | 55          | www.fire.nist.gov                                     |
| SmokeView                       | Področni termični požarni modeli          | 66          | www.fire.nist.gov                                     |
| AFCB                            | Požarna odpornost-poenostavljeno          | 73          | www.sections.arcelor.com                              |
| AFCC                            | Požarna odpornost -poenostavljeno         | 74          | www.sections.arcelor.com                              |
| ELEFIR                          | Požarna odpornost -poenostavljeno         | 77          | www.ulg.ac.be   |
| H-Fire                          | Požarna odpornost -poenostavljeno         | 78          | <u>www.stahlbau.uni-</u><br>hannover.de               |
| POTFIRE                         | Požarna odpornost -poenostavljeno         | 81          | www.cidect.org  |
| ELVAC                           | Evakuacijski modeli                       | 119         | www.fire.nist.gov                                     |
| EVACNET                         | Evakuacijski modeli                       | 120         | http://www.ise.ufl.edu/kisko/fi<br>les/evacnet        |
| ASCOS                           | Modeli odziva detektorjev                 | 132         | www.fire.nist.gov                                     |
| DETACT-QS                       | Modeli odziva detektorjev                 | 133         | www.fire.nist.gov                                     |
| DETACT-T2                       | Modeli odziva detektorjev                 | 134         | www.fire.nist.gov                                     |
| FPETOOL                         | Modeli odziva detektorjev                 | 135         | www.fire.nist.gov                                     |
| JET                             | Modeli odziva detektorjev                 | 137         | www.fire.nist.gov                                     |
| LAVENT                          | Modeli odziva detektorjev                 | 138         | www.fire.nist.gov                                     |
| BREAK1                          | Splošno                                   | 145         | www.fire.nist.gov                                     |
| FIREDEMND                       | Splošno                                   | 154         | www.fire.nist.gov                                     |
| Parametrická teplotní<br>křivka | Poenostavljen termični model              | 174         | www.access-steel.cz/page-<br>nastroje-pro-navrhovani/ |
| Přestup tepla                   | Termični model za požarno analizo         | 175         | www.access-steel.cz/page-<br>nastroje-pro-navrhovani/ |
| Požární odolnost                | Poenostavljen model za požarno<br>analizo | 176         | www.access-steel.cz/page-<br>nastroje-pro-navrhovani/ |

## **3 OCENA PROGRAMSKE OPREME:**

Glavni ocenjevalni vidiki programske opreme so:

- Metodologija izračuna uporabljeni fizikalni in matematični modeli
- Dokumentacija programske opreme
- Uporabniški vidik

#### 3.1 Metodologija izračuna – uporabljeni fizikalni in matematični modeli:

Najbolj pomemben del metodologije izračuna je formulacija problema, ki običajno temelji na fizikalnih ali termičnih zakonih ali eksperimentalnih podatkih. Zanesljivost programske opreme je odvisna od natančnosti in zanesljivosti uporabljene formulacije.

Nemogoče je upoštevati vse vplive, ki so povezani z dogodkom požara, zato je potrebno vpeljati mnogo predpostavk. Natančnost programske opreme temelji na uporabljenih predpostavkah.

Tako formulacija kot uporabljene predpostavke vplivajo na uporabnost programskega orodja za določen namen. Na omejenost uporabe pa vplivajo tudi drugi dejavniki kot so velikost modela in kompleksnost geometrije. Vsi ti dejavniki vplivajo na to, ali bo možno programsko opremo uporabiti za določen primer ali ne.

#### 3.2 Dokumentacija programske opreme:

Ko začnemo uporabljati programsko opremo, je pomembno, da zberemo vse informacije. Najbolj pomembni deli dokumentacije so uporabniška navodila, tehnični vodniki, članki in računski primeri za oceno ustreznosti. Kvaliteta in jasnost naštetih dokumentov je zelo pomembna za pravilno uporabo programske opreme in tako tudi za zanesljivost in natančnost dobljenih rezultatov.

## 3.3 Uporabniški vidik:

Uporabniški vidik je dejavnik, ki ne vpliva na zanesljivost in natančnost programske opreme, a ima kljub temu velik vpliv na uporabo programa. Dober uporabniški vmesnik omogoča lažji vnos podatkov, s čimer se lahko izognemo nepotrebnim napakam. Dober prikaz rezultatov programa v tekstovni in grafični obliki je zelo pomemben za pravilno predstavo o obravnavanem problemu. Ti dejavniki predstavljajo prijaznost programske opreme do uporabnika in lahko prispevajo k manj napakam in h krajšem času obdelave rezultatov.

# 4 PREIZKUŠENA PROGRAMSKA OPREMA

V fazi projekta je bilo pridobljenih veliko informacij o različni programski opremi za požar. Zaradi velikega števila je podroben opis programov omejen na 14 izbranih, za ketere so v Aneksu I predstavljeni podrobni rezultati ocen in preizkušanj. Izdelana je bila baza podatkov o podrobno predstavljeni programski opremi, ter vsej ostali, za katero so navedeni le osnovni podatki. Baza je dostopna na spletni strani DIFSEK partnerjev.

## 4.1 Informacije za vsak programski paket v tekstovni obliki:

Identifikacija programske opreme (splošne informacije): ime, verzija, leto, področje uporabe, država, avtorji, organizacija, sistemske zahteve, programski jezik, velikost, dostopnost, kontaktne informacije in opis.

- Ocenjevalni vidiki:
  - Metodologija izračuna: formulacija, predpostavke in omejitve
  - Dokumentacija programske opreme, uporabniška navodila, tehnični vodniki, članki in računski primeri za oceno ustreznosti.
  - Uporabniški vidik: uporabniški vmesnik, oblika vhodnih in izhodnih podatkov ter grafika.
- Zaključki: Ocena na podlagi zgoraj navedenih vidikov in zahtev uporabnika.

## 4.2 Petnajst računalniških programov:

- Termični požarni modeli (4):
  - Poenostavljeni termični požarni modeli (1): DIFISEK-EN 1991-1-2 Annex A
  - Napredni termični požarni modeli (3): FAST/CFAST, OZONE (conski) in FDS (področni)
- Modeli za požarno odpornost (8):
  - Poenostavljeni modeli za požarno odpornost (6): AFCB, AFCC, Elefir, Elfir-EN, H-Fire in Potfire.
  - Napredni modeli za požarno odpornost (2): Abaqus in BoFire.
- Evakuacijski modeli (1): Evacnet4.
- Modeli odziva detektorjev (2): Detact-Qs in Jet.

Glej Aneks I in bazo podatkov.

#### 5 ANEKS I: PROGRAMSKA OPREMA

#### 5.1 DIFISEK-EN 1991-1-2 Annex A

#### 5.1.1 Splošne informacije (ID število: 2)

- Ime: Difisek-EN 1991-1-2 Annex A,
- Verzija: 1,
- Leto: 2004,
- Področje uporabe: Termični požarni modeli poenostavljeni,
- Država: Luxembourg,
- Avtorji: L.G. Cajot; M. Haller,
- Organizacija: Arcelor LCS Research Centre,
- Jezik: angleščina,
- Sistemske zahteve: Windows,
- Velikost: 2.26 MB,
- Cena: zastonj,
- Dostopno na: <u>www.sections.arcelor.com</u>.

#### 5.1.2 Opis:

Izračun parametričnih krivulj temperatura-pomik v sektorju ter temperaturo zaščitenega ali nezaščitenega jeklenega konstrukcijskega elementa, izpostavljenega časovni temperaturni krivulji. Temelji na EN 1991-1-2 Annex A in prEN 1993-1-2.

#### 5.1.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Formulacija: Glej EN 1991-1-2 Annex A in prEN 1993-1-2
- Uporabljene predpostavke: predpostavljeno je, da se požar v sektorju izvrši do konca.
- Kadar so gostote požarne obtežbe določene brez upoštevanja načina gorenja, je priporočeno, da se ta pristop uporabi za sektorje, kjer požarno obtežbo v večini povzročijo celulozni materiali.
- Omejitve: Požane krivulje so veljavne le za sektorje, veliko do 500 m<sup>2</sup> površine nadstropja, brez lukenj v strehi in največjo višino 4m.

#### 5.1.4 Dokumentacija:

Glej EN 1991-1-2 Annex A in prEN 1993-1-2.

#### 5.1.5 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows, Excel.
- Vhodni in izhodni podatki so v obliki enostavnih Excel datotek.
- Grafika: Excelova grafika.

# 5.1.6 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Dokumentacija: EN 1991-1-2 Annex A in prEN 1993-1-2.
- Uporabniku prijazna.
- Zahtevan nivo znanja: Nizek.

# 5.2 FAST/CFAST:

## 5.2.1 Splošne informacije (ID št.: 16)

- Ime: FAST/CFAST,
- Verzija: FAST 3.1.7/CFAST 5.1.1,
- Leto: 2004,
- Področje uporabe: Conski požarni modeli,
- Država: ZDA,
- Avtorji: Walter W. Jones,
- Organizacija: NIST National Institute of Standards and Technology,
- Jezik: angleščina,
- Sistemske zahteve: vsaj 4 MB delovnega spomina, VGA kompatibilen grafični zaslon,
- Velikost: FAST 11.1 MB / CFAST 6.73 MB,
- Cena: zastonj,
- Dostopno na: <u>www.fast.nist.gov</u> or <u>www.nfpa.org</u>,
- Kontaktne informacije: <u>www.fast.nist.gov</u> ali po elektronski pošti: Walter W. Jones (e-mail: <u>wwj@nist.gov</u>).

# 5.2.2 Opis:

FAST je zbirka procedur, ki nadgrajujejo CFAST z možnostjo inženirske ocene nevarnosti požara v konstrukcijah razdeljenih na sektorje. Glavne funkcije omogočajo izračun:

- entalpije in mase (dima in plinov), proizvedene od ene ali več gorečih snovi v eni sobi, temelječ na podrobnih ali grobih meritvah,
- transport dima in plinov na osnovi vzgona ali prisiljenega gibanja skozi sobe in povezave (vrata, okna, prezračevalni kanali),
- rezultirajoče temperature, gostoto dima in kopičenje plinov z upoštevanjem prenosa temperature na ostale površine in mešanja plinov s čistim zrakom.

CFAST je dvoconski model, ki se uporablja za izračun razporeda dima, plinov in temperature med požarom v celotni zgradbi. Verzija 3.1.6 zmore obdelavo 30 sektorjev vključno s prezračevalnim sistemom za vsak sektor, 31 posameznih požarov, upoštevanje objekta, ki širi ogenj, več plamenov in požarov, več splinker sistemov in detektorjev ter izračun gostote in kritično vrednost vsebnosti desetih najbolj pomembnih toksičnih snovi, ki se razvijajo med požarom. Pri podajanju geometrije program omogoča uporabo spremenljivih višin in širin prostorov, hkraten vžig več predmetov kot na primer pohištvo, termofizikalnih in požarnih baz podatkov, večplastnih sten, vžiga skozi prepreke, jaške, povezave skozi luknje v konstrukciji.

## 5.2.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: CFAST je osnovan s pomočjo enačb, ki določajo spremenljivke stanja (pritisk, temperaturo, itd.) na osnovi entalpije in prenosa mase v določenih časovnih intervalih. Enačbe so izpeljane iz zakona o ohranitvi energije in splošne plinske enačbe. Napake, ki nastanejo pri izračunu, niso posledica opisa enačb, temveč numerične napake in napake, ki nastanejo pri posplošitvah predpostavk.
- Uporabljene predpostavke: Splošna predpostavka vseh conskih požarnih modelov je ta, da je možno vsak prostor razdeliti na majhno število kontrolnih volumnov, v katerih vlada konstantno temperaturno stanje in sestava. CFAST omogoča dve coni za vsak prostor, razen prostora z ognjem. Temu je možno dodati več con za plamene ognja in stropne vodne šobe, ki se obravnavajo posebej z namenom upoštevanja prenosa toplote in mase skozi cone in prenosa med conami in mejami sektorjev. Za namen simulacije širjenja ognja je mogoče definirati uporabniško določen požar, podan s količino proizvedene energije in mase v odvisnosti od vrste snovi, ki gorijo. Analize so izvedene posebej za možno onesposobitev ali smrt zaradi nastalih strupenih plinov in visoke temperature ter onesposobitev zaradi opeklin.
- Omejitve: CFAST model ne vsebuje modela za širitev ognja. Ni povezav med toksičnostjo in temperaturo plinov.

## 5.2.4 Dokumentacija:

Uporabniška navodila:

- Uporabniška navodila za FAST: Engineering tools for stimating fire growth and smoke transport NIST-SP-921; 200 p. March 2000.
- Peacock, R. D.; Reneke, P. A.; Jones, W. W.; Bukowski, R. W.; Forney, G. P.
- Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>
- Uporabniška navodila za CFAST Verzija 1.6.
- NISTIR-4985; 106 p. December 1992.
- Portier, R. W.; Reneke, P. A.; Jones, W. W.; Peacock, R. D.
- Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>

## Tehnični vodniki:

- Tehnični napotki za CFAST: An engineering tool for estimating fire and smoke transport. NIST TN 1431; 190 p. March 200.
- Jones, W. W.; Forney, G. P.; Peacock, R. D.; Reneke, P. A.
- Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>

Članki in validacijski primeri

- "A review of four compartment fires with four compartment fire models", Deal, S. Fire safety Developments and Testing, Proceedings of the annual meeting of the Fire Retardant Chemicals Association. October 21-24, 1990, Ponte Verde Beach, Florida, 33-51.
- "Verification of a model of fire and smoke transport", Peacock, R. D.; Jones, W. W.; Bukowsky, R. W. Fire Safety Journal., 21 89-129 (1993).

- "The accuracy of computer fire models: some comparisons with experimental data from Australia", Duong, D. Q. Fire Safety Journal 1990, 16(6), 415-431.
- "Comparison of fire model predictions with experiments conducted in a hangar with a 15 m ceiling", Davis, W. D.; Notarianni, K. A.; McGrattan, K. B. NIST, NISTIR 5927 (1996).

Uporabniški vidik:

- Vmesnik: MS-DOS
- Vhodni/izhodni podatki: Vsebuje generator tekstovnega poročila.
- Grafika: Vsebuje generator grafičnega poročila.

#### 5.2.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: srednje.

## 5.3 OZONE

#### 5.3.1 Splošne informacije (ID št.: 40):

- Ime: OZONE.
- Verzija: V2.2.2.
- Leto: 2002.
- Področje uporabe: Conski model.
- Država: Belgija.
- Avtorji: J. F. Cadorin and J. M. Franssen iz ULG in L. G. Cajot; M. Haller in J. B. Schleich iz Arcelor.
- Organizacija: University of Liege, Inst. de Mécanique el Génie Civil, 1, Chemin des Chevreuils, 4000 Liege 1, Belgija; Arcelor LCS research centre.
- Sistemske zahteve: Operacijski sistem Windows.
- Računalniški jezik: FORTRAN Visual Basic.
- Velikost: 5 MB.
- Dostopno na: <u>www.ulg.ac.be</u>; <u>www.sections.arcelor.com</u>.
- Kontaktne informacije: <u>www.ulg.ac.be</u> ali Jean Marc Franssen (<u>jm.franssen@ulg.ac.be</u>) ali J.
  F. Cadorin (<u>jf.cadorin@ulg.ac.be</u>).

## 5.3.2 Opis:

Programska koda OZONE v2 je bila razvita, da bi inženirjem olajšala dimenzioniranje elementov, ki so izpostavljeni sektorskim požarom. Vsebovana so zadnja dognanja na področju sektorskih požarov ter lokalizacije požarov. Vsebuje enostaven poenostavljen sektorski požarni model, ki je sestavljen iz dvoconskega in enoconskega požarnega modela. Zmožen je upoštevati lokaliziran požar z Hasemijevim modelom, kar pomeni, da je veljaven za čas pred in po izbruhu požara. Izračuna temperaturo konstrukcijskih elementov v požaru ter je zmožen dimenzioniranja enostavnih elementov po ENV 1993-1-2. Razvoj programa spada pod okrilje dveh evropskih

raziskovalnih projektov: "Competitive Steel Buildings through Natural fire safety Concept" in "Natural Fire Safety Concepts – Full Scale Test, Implementation in the Eurocodes and Development of an User Friendly design tool". Izboljšave programa predstavljajo nov stenski model, ki je je osnovan na metodi končnih elementov (impliciten) ter možnost različnih modelov poteka požara.

## 5.3.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija:
  - Numerični dvoconski modeli temeljijo na enajst fizikalnih spremenljivkah. Spremenljivke so vezane s šestimi omejitvenimi pogoji ter štirimi diferencialnimi enačbami, ki opisujejo ravnotežje mas in energij v vsaki coni. Enačbe ravnotežja mas opisujejo variacijo mase plinov v vsaki coni, ki je enaka vsoti mas plinov, nastalih pri izgorevanju ter razlike plinov, ki so v sektor dovedeni ali odvedeni skozi odprtine. Enačbe ravnotežja energije opisujejo ravnotežje energije, ki je sproščena v sektorju pri izgorevanju ter energijo, ki je porabljena. Porabljeno energijo predstavlja energija, ki je potrebna za segrevanje plinov v sektorju, izguba mase vročega zraka skozi odprtine (skupaj z negativnim predznakom za zrak, ki prihaja od zunaj), izgub zaradi radiacije skozi odprtine in segrevanja drugih sestavnih delov. V primeru conskega požarnega modela je število spremenljivk zmanjšano na 6, število omejitev na 4 in število diferencialnih enačb na 2. Ozone vsebuje še pregradni model in dva modela izgorevanja.
- Uporabljene predpostavke:

Glavna predpostavka vseh conskih požarnih modelov je ta, da je možno vsak prostor razdeliti na majhno število kontrolnih volumnov, v katerih vlada konstantno temperaturno stanje in sestava. V enoconskih modelih je porazdelitev temperature v celotnem sektorju enakomerna. Zaradi tega je takšen model veljaven samo v primeru v celoti razvitega požara, medtem ko so dvoconski modeli veljavni le v primeru lokaliziranega požara. V drugem primeru je sektor razdeljen v dve plasti. Prva plast je vroča in je tik ob stropu, druga je mrzla in je ob podu.

 Omejitve: Ozone ne vsebuje modela za pirolizo, vsebuje pa dva modela za izgorevanje (eksterni ter razširjen model), ki vplivata na razvoj sproščanja toplote (RHR – krivulja hitrosti sproščanja toplote) s funkcijami mas kisika. Geometrija prostora je omejena na 4 stene in tri ventilacijske odprtine na stropu.

## 5.3.4 Dokumentacija:

Uporabniška navodila:

- "The design Fire Tool Ozone V2.0 Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests", Rapport interne SPEC/2001\_01 University of Liege, Belgija, Junij 2001. J. F. Cadorin; J. M. Franssen; D. Pintea.
- Dostopno na: <u>www.ulg.ac.be</u>.

Tehnični vodniki:

– Je vključeno v uporabniška navodila.

Članki in validacijski primeri:

- "Competitive steel buildings through natural fire safety concepts"
  Part 2: Natural fire models The one zone model OZone, Final report
- CEC Agreement 7210-SA/125/126/213/214/323/423/522/623/839/937.
  Profil ARBED, March 1999.
  Dostopno s kontaktom: ecsc-steel@cec.eu.int .
- "Natural Fire Safety Concepts- Full Scale Test, Implementation in the Eurocodes and Development of an User Friendly design tool"
   Part 2: Natural fire models - The one zone model OZone, Final report
- CEC Agreement 7210-PA/PB/PC/PE/PF/PR-060.
  Draft final report, December 2000.
  Dostopno s kontaktom: ecsc-steel@cec.eu.int
- "On the application field of Ozone V2"
  Rapport interne N°M&S/2002-003 University of Liege, Belgija, 2002.
- J. F. Cadorin
  "Compartment fire models for structural engineering"
  Doctoral thesis of J. F. Cadorin University of Liege.
  J. F. Cadorin
  Dostopno na: www.ulg.ac.be

Za več informacij, pošljite elektronsko pošto na zgoraj podane naslove.

# 5.3.5 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Visual Basic.
- Vhodni/izhodni podatki: Vsebuje generator poročila v tekstovni obliki.
- Grafika: Vsebuje generator grafičnega poročila.

# 5.3.6 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: srednje.

# 5.4 FDS - Fire Dynamics Simulator & Smokeview:

## 5.4.1 Splošne informacije (FDS - ID št.: 55 – ID št.: 66):

- Ime: FDS Fire Dynamics Simulator / Smokeview
- Verzija: FDS Version 3 / Smokeview Version 3.1
- Leto: 2002
- Področje uporabe: področni model (CFD).
- Država: ZDA
- Avtorji: FDS Kevin McGrattan, Glenn Forney. / Smokeview Glenn Forney
- Organizacija: NIST National Institute of Standards and Technology
- Sistemske zahteve: UNIX ali PC PII 450 ali boljše.
- Računalniški jezik: FORTRAN 90.

- Velikost: 5.48 MB + 24 MB za primere in dokumentacijo.
- Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>.
- Kontaktne informacije: <u>www.fire.nist.gov</u> ali elektronska pošta: <u>kevin.mcgrattan@nist.com</u>.

## 5.4.2 Opis:

Fire Dynamics Simulator (FDS) je model na osnovi mehanike tekočin ali model toka fluidov v prisotnosti ognja. Programski paket rešuje Navier-Stokesove enačbe, ki so prirejene za nizke hitrosti, termično vzbujen tok in s poudarkom na prenosu dima in plinov ognja. FDS je namenjen reševanju primerov v praksi požarno varnega inženirstva ter je hkrati uporaben za raziskovanje osnovnih značilnosti dinamike ognja in izgorevanja.

Smokeview je program za vizualizacijo simulacij programa FDS. Vizualizacija vsebuje prikaz toka delcev, 2D in 3D senčene konture podatkov toka plinov kot je temperatura ter vektorji smeri s hitrostjo. Možen je tudi 2D ali 3D statičen prikaz istih količin.

## 5.4.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: Model uporablja aproksimacijo Navier-Stokesovih enačb za majhna Mach števila. Aproksimacija je izvedena na tak način, da so odstranjeni členi z akustičnim valovanjem, medtem ko so hkrati dopuščene velike variacije temperature in gostote. To daje enačbam eliptično obliko, ki je primerna za termalne konvekcijske procese z nizko hitrostjo. Izračun je lahko obravnavan kot direktna numerična simulacija (DNS), kjer so disipativni elementi izračunani direktno ali kot Large Eddy Simulation (LES), kjer so »large-scale eddies« izračunani direktno in podprocesi na podnivojih modelirani. Izbira med DNS in LES je odvisna od predmeta izračuna in velikosti mreže diskretiziranega problema. V FDS se uporabljata dva modela izgorevanja. Pri izračunu po DNS, kjer je možno difuzijo gorljive snovi in kisika modelirati direktno, je najbolj primerna uporaba enega globalnega koraka kemične reakcije s končnimi vrednostmi. Pri LES, kjer mreža ni dovolj fina za rešitev difuzije gorljivih snovi in kisika, se uporabi model za izgorevanje z upoštevanjem frakcij zmesi.
- Uporabljene predpostavke:
  - Enačbe z nizkim Machovim številom se rešujejo numerično z razdelitvijo fizičnega prostora na veliko število majhnih pravokotnih celic. V vsaki celici so količine hitrosti plinov, temperature, itd. Predpostavljene kot enakomerne, ki se spreminjajo samo po času. Natančnost, s katero je simulirana dinamika igorevanja, je odvisna od števila uporabljenih celic.
- Omejitve:
  - Izračun mora biti opravljen na domeni, ki se jo da opisati s pravokotnimi kvadri, vsakega z svojo pravokotno razdelitvijo na celice. Druge oblike ni moč modelirati.
    FDS ne vsebuje predprocesorja, zato je potreben tekstovni vnos z vhodno datoteko (uporabniku neprijazno).

Dokumentacija:

- · Uporabniška navodila:
  - "Fire Dynamics Simulator (Version 3) User's Guide"

- NISTIR 6784 2002.
- McGrattan K. B., Forney G. P., Floyd J. E., Hostikka S. And Prasad K.
- Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>.
- "User's Guide for Smokeview Version 3.1 A Tool for Visualising Fire Dynamics Simula-
- tion Data"
- NISTIR 6980 2003.
- Forney G. P. and McGrattan K. B.
- Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>.
- Tehnični vodniki:
  - "Fire Dynamics Simulator (Version 3) Technical reference Guide"
  - NISTIR 6783 2002.
  - McGrattan K. B., Baum H. R., Rehm R. G., Hamins A., Forney G. P., Floyd J. E., Hostikka S. and Prasad K.
  - Dostopno na: <u>www.fire.nist.gov</u>.
- Članki in validacijski primeri

Dostopno na <u>www.fire.nist.gov</u>.

#### 5.4.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: FDS MS-DOS / Smokeview Windows Open GL view
- Vhodni/izhodni podatki: Smokeview program.
- Grafika: Smokeview program.

## 5.4.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- FDS uporabniku neprijazen.
- Smokeview uporabniku prijazen.
- Nivo zahtevanega znanja: Visok.

## 5.5 AFCB (Požarno odporno projektiranje sovprežnih nosilcev)

#### 5.5.1 Splošne informacije (ID št. 73)

- Ime: AFCB (Composite Beam Fire Design)
- Verzija: 3.07
- Leto: 2003
- Področje uporabe: Modeli požarne odpornosti.
- Država: Luxembourg.
- Avtorji: Henri Colbach.
- Organizacija: Arcelor LCS research centre.
- Sistemske zahteve: Windows 95/98/2000/NT, 100 Mhz, 32 MB RAM, 6x CD-ROM drive.
- Velikost: 3 MB.

- Dostopno na: <u>www.sections.arcelor.com</u>.
- Kontaktne informacije: Arcelor LCS research centre
   66, rue de Luxembourg
   L-4221 Esch-sur-Alzette
   Phone (+352) 5313-3007
   Fax (+352) 5313-3095
   E-mail: <u>europrofil.dsm@profilarbed.lu</u>
   Internet: <u>www.sections.arcelor.com</u>

## 5.5.2 Opis:

Program AFCB izračuna mejni upogibni moment za sovprežne nosilce po EUROCODE 4 Part 1.1 (ENV 1994-1-1) in ISO požarne razrede R30, R60, R90, R120 and R180 z upoštevanjem EUROCODE 4 Part 1.2 (ENV 1994-1-2).

Programski paket ima naslednjo zgradbo:

- VHODNI PODATKI:
  - <u>Project:</u> splošne informacije glede projekta.
  - <u>Section</u>: Obstajajo tri načini podajanja geometrije prereza:
  - a) Ime profila z velikimi črkami (e.g. HE 300 A)
  - b) Izbira tipa profila (IPE, HE, HL, HD, HP, W, UB or UC) in kasnejša izbira iz seznama po velikosti.
  - c) Izbira direktno iz seznama.
  - <u>Slab:</u> Čeprav program ne računa plošče, potrebuje osnovne informacije za določitev vpliva plošče na nosilec
  - <u>Rebars:</u> Podajanje armature.
  - <u>Materials:</u> Definicija mehanskih lastnosti za vsak material.
  - <u>Material safety factors</u>: Parcialni varnostni faktorji za vsak material posebej za mejno stanje uporabnosti in mejno stanje požara.
  - System: Možnost izbire med tremi tipi analize:
  - a) Izračun nosilnosti prereza: določitev plastične nosilnosti prereza.
  - b) Dimenzioniranje pri podani obtežbi. Pri tem je najprej opravljena analiza v hladnem stanju. Če je nosilnost zadostna, se opravi analiza pri požaru. Določi se količina potrebne armature, ki se zapiše v datoteko »rebars.reb«, ki jo je možno spreminjati.
  - c) Dimenzioniranje pod pogojem najmanjše zahtevane nosilnosti prereza: podobno b). Podajo se nosilnosti prerezov. Možnost se uporabi, kadar so nosilnosti prerezov izračunane z drugim programom.
- REZULTATI: program izračuna naslednje rezultate za hladno stanje in primer požara:
  - Mejni pozitiven moment, M+
  - Mejni negativen moment, M-
  - Mejne prečne sile

- Za tipe analize b) in c) program izračuna razmerje kapacitet in armaturo (če je bila podana).
- Details: Na tem izpisu so izpisane vse podrobnosti o izračunu za mejno stanje uporabnosti Vsebuje vse reducirane vrednosti pozitivnih in negativnih momentov.
- Graphic: V odvisnosti od tipa analize je možno prikazati naslednje grafike: skico prereza, momentno krivuljo in grafični prikaz nosilnosti prereza.

#### 5.5.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: Metodologija izračuna je opisana v Evrokodu 4 Del 1.1 in 1.2.
- Uporabljene predpostavke:
  - Program omogoča analizo enostavno podprtih in kontinuirnih nosilcev.
  - Ni upoštevan Annex H, ENV 1994-1-1.
  - Prikazana količina armature za palice v profile vsebuje le palice, ki so bile definirane v prerezu in so lahko drugačne kot tiste, ki so bile uporabljene v izračunu. Za to je potrebno uporabiti rezultate v "Details".
- Omejitve:
  - Kontrola strižnih sil ni vključena v program, zato jo je potrebno opraviti ločeno.
  - Omogočen je izračun samo odprtih prečnih prerezov.

Dokumentacija:

- Uporabniška navodila: so vsebovana v modulu help.
- Tehnični vodniki: Evrokod 4 Del 1.1 in 1.2.
- Dostopno na: <u>www.sections.arcelor.com</u>.
- Članki in validacijski primeri: Uporabljeni so postopki iz Evrokoda 4, ki so bili preverjeni.

Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows
- Vhodni/izhodni podatki: Izhodne podatke je moč iztiskati v kratki ali dolgi obliki. Na voljo so vse prej omenjene izračunane količine za hladno stanje in primer požara.
- Grafika: Možen je grafični izris prereza ter rezultirajočih momentov za hladno stanje ter primer požara za pozitiven in negativen moment.

Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: srednje.

#### 5.6 AFCC (Composite Column Fire Design)

#### 5.6.1 Splošne informacije (ID št. 74)

- Ime: AFCC (Composite Column Fire Design)
- Verzija: 3.05
- Leto: 2003

- Področje uporabe: Modeli požarne odpornosti.
- Država: Luxembourg.
- Avtorji: Henri Colbach.
- Organizacija: Arcelor LCS research centre.
- Sistemske zahteve: Windows 95/98/2000/NT, 100 Mhz, 32 MB RAM, 6x CD-ROM drive.
- Velikost: 2,5 MB.
- Dostopno na: <u>www.sections.arcelor.com</u>.
- Kontaktne informacije:

Arcelor LCS research centre

66, rue de Luxembourg

L-4221 Esch-sur-Alzette

Phone (+352) 5313-3007

Fax (+352) 5313-3095

E-mail: europrofil.dsm@profilarbed.lu

Internet: www.sections.arcelor.com

## 5.6.2 Opis:

Program AFCC:

Program AFCC se uporablja za izračun mejne obtežbe sovprežnih stebrov AF 30/120 pri sobni temperaturi po Evrokodu 4 del 1.1 (ENV 1994-1-1) ter za ISO požarne razrede R30, R60, R90 in R120 po Evrokodu 4 del 1.2 (ENV 1994-1-2).

Struktura programske opreme je naslednja:

- Vhodni podatki:
  - Project: splošne informacije o projektu..
  - <u>Section</u>: Obstajajo tri načini podajanja geometrije prereza:
  - a) Ime profila z velikimi črkami (e.g. HE 300 A)
  - b) Izbira tipa profila (IPE, HE, HL, HD, HP, W, UB or UC) in kasnejša izbira iz seznama po velikosti.
  - c) Izbira direktno iz seznama.
  - <u>Rebars:</u> Podajanje armature.
  - <u>Materials</u>: Definicija mehanskih lastnosti za vsak material.
  - <u>Material safety factors</u>: Parcialni varnostni faktorji za vsak material posebej za mejno stanje uporabnosti in mejno stanje požara.
  - <u>Buckling lengths:</u> podati je potrebno uklonske dolžine za mošno in šibko smer za AF steber za MSU ter primer požara.
  - Eccentricities: ekscentričnost obtežbe v šibki in močni smeri (v mm).
- REZULTATI: program izračuna rezultate za 5 različnih stanj: stanje pri sobni temperature za MSU, čas požarne odpornosti 30 minut (R30), požarne odpornosti 60 minut (R60), požarne odpornosti 90 minut (R90) in požarne odpornosti 120 minut (R120). Izračunane so naslednje mejne obtežbe:

- mejna osna sila, uklon okoli šibke osi prereza (prvi steber),
- mejna osna sila, uklon okoli močne osi prereza (drugi steber),
- mejna ekscentrična osna sila, uklon okoli šibke osi prereza (tretji steber),
- mejna ekscentrična osna sila, uklon okoli močne osi prereza (četrti steber),
- mejna ekscentrična osna sila, uklon okoli obeh osi prereza (peti steber),
- Details: Na tem izpisu so izpisane vse podrobnosti o izračunu za mejno stanje uporabnosti ter za požarne razrede R30, R60, R90 in R120. Podana je tudi specifična teža stebra, vsi podatki o prerezu in armaturi ter materialih.
- Graphic: splošen prikaz prereza na podlagi podatkov, ki ji je podal uporabnik (geometrijske karakteristike, pozicija armature, itd.)

## 5.6.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: povzeta po Evrokodu 4 Deli 1.1 in 1.2.
- Uporabljene predpostavke:
  - Izračun stebrov pri malih, konstantnih ekscentričnostih.
  - Izračun le dvojno simetričnih, delno zaprtih stebrov s konstantnim prerezom po vsej dolžini.
  - Aneks H iz ENV 1994-1-1 ni upoštevan.
  - Delež armature mora zadoščati kriterijem: ENV 1994-1-1, 4.8.3.1(3e) in 4.8.2.5(3), ter ENV 1994-1-2, 4.3.6.2(2).
- Omejitve:
  - Program podpira le elemente z odprtim prečnim prerezom.

## Dokumentacija:

- Uporabniška navodila: so vključena v modul pomoči programa.
- Tehnični vodniki: Evrokod 4 Del 1.1 in 1.2.
- Dostopno na: <u>www.sections.arcelor.com</u>.
- Članki in validacijski primeri: uporabljeni so postopki iz Evrokoda 4, ki so bili preverjeni.

## 5.6.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows.
- Vhodni/izhodni podatki: izhodne podatke je moč iztiskati v kratki ali dolgi obliki. Na voljo so vse zgoraj omenjene izračunane količine za stanje pri sobni temperaturi in primeru požara.
- Grafika: Izris prečnega prereza.

## 5.6.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: srednje.

# 5.7 Elefir:

## 5.7.1 Splošne informacije (ID št. 77):

- Ime: Elefir
- Verzija: 2.1.
- Leto: 1998.
- Področje uporabe: Modeli požarne odpornosti.
- Država: Belgija
- Avtorji: Dan Pintea, Laurent Miévis, Gilles Gustin, Jean-Marc Franssen.
- Organizacija: University of Liege.
- Sistemske zahteve: Windows 95 ali višjer.
- Velikost: 8 MB.
- Dostopno na: University of Liege spletna stran (<u>http://www.ulg.ac.be/matstruc/Download.html</u>).
- Kontaktne informacije: Jean-Marc Franssen (jm.franssen@ulg.ac.be).

# 5.7.2 Opis:

ELEFIR je računalniški program, ki se uporablja za izračun enostavnih jeklenih konstrukcijskih elementov s prečnim prerezom I oblike, obteženih le v smeri močne osi.

- Možna je uporaba tipičnih oblik prečnih prerezov: HD, HE, HL, HP, IPE, UB, UC, W, L.
- Dve možnosti za izpostavljenost požaru: 3 ali 4 strani elementa.
- Možnost upoštevanja požarne zaščite: brez zaščite, površinska zaščita, zaščita z ovojem.
- Možnost podajanja različnih zaščitnih materialov: steklena/volnena volna, mavec ter uporabniško definiran material.
- Možna uporaba več požarnih krivulj: ISO krivulja, požarna krivulja zunanjega požara, ogljikovodikova krivulja, ASTM krivulja ter uporabni[ko definirana krivulja.

Možni so naslednji tipi izračuna:

- Izračun časa, pri katerem je dosežena kritična temperature določenega elementa.
- Izračun temperature pri kritičnem času.
- Izračun kritične temperature elementov ter kritičnega časa elementov v nategu, tlaku, v upogibu ter hkratnem upogibu in tlaku.

# 5.7.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija:
  - Temelji na ENV 1993-1-2.
  - Belgijski nacionalni standardi (NBN ENV 1993-1-2).
- Uporabljene predpostavke:
  - Predpostavljena je enakomerna porazdelitev temperature po prerezu.
- Omejitve:
  - Možnost uporabe le odprtih prerezov.
  - Izpostavljenost ognju samo na treh od štirih stranic elementa.
- Izbira prereza omejena na dvojno simetrične prereze.
- Če se med segrevanjem razred kompaktnosti prereza spremeni v četrti razred, se analiza ustavi. Ne upošteva zadnje spremembe EN 1993-1-2, ki dopušča, da se upošteva enak razred kompaktnosti kot pri sobni temperature.

Dokumentacija:

- Uporabniška navodila: Niso na voljo, vendar niso potrebna.
- Tehnični vodniki: ENV 1993 1-2 (Evrokod 3)
- Članki in validacijski primeri: Niso na voljo.

### 5.7.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows
- Input/output reporting: Tekstovna datoteka ter grafikoni.
- Graphic: Program izrisuje požarne krivulje..

### 5.7.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Dokumentacija: ENV 1993-1-2 (EC3).
- Uporabniku prijazno.
- Zahtevana stopnja znanja uporabnika: nizka.

### 5.8 Elefir-EN:

### Splošne informacije (ID številka 173):

- Ime: Elefir-EN
- Verzija: 1.0
- Leto: 2008
- Območje uporabe: Model za požarno analizo konstrukcij
- Dražava: Portugalska/Belgija
- Avtorji: Bárbara Pires, Nuno Lopes, Paulo Vila Real, Dan Pintea, Jean-Marc Franssen
- Organizacija: Univerza Aveiro/Universa v Liege
- Opreracijski sistem: Windows 95 ali novejši sistem.
- Velikost: 8 MB
- Dostop: skupaj z ECCS Evrokod priročnikom "Fire Design of Steel structures" (www.eccspublications.eu)
- Informacije: Paulo Vila Real (<u>pvreal@ua.pt</u>), (Jean-Marc Franssen (<u>jm.franssen@ulg.ac.be</u>)

### **Opis:**

Elefir-EN je računalniški program za račun požarne odpornosti enostavnih jeklenih elementov, narejenih iz I, H, L, RHS in CHS profilov in upogibno obremenjenih okoli močne in okoli šibke osi.

- Knjižnica vsebuje značilne profile: HD, HE, HL, HP, IPE, UB, UC, W, L, RHS, CHS.
- Dva scenarija izpostavljenosti požaru: iz treh ali iz vseh štirih strain profila.
- Z ali brez požarne zaščite.

- Knjižnica lastnosti za nekatere vrste požarne zaščite: kamnita/steklena volna, mavčne obloge, možnost vgradnje novih materialov v bazo.
- Uporabniku omogoča vgradnjo novih materialov za požarno zaščito in njihovih lastnosti, ki so lahko tudi odvisni od temperature.
- Na razpolago je več požarnih krivulj: ISO krivulje, požarna krivulja, hidrokarbonska krivulja, localiziran ogenj, parametrične požarne krivulje, možnost vgradnje novih krivulj iz strain uporabnika.

Vrste analiz, ki jih omogoča program:

- Račun časa v katerem je dosežena kritična temperatura.
- Račun temperature.
- Račun kritične temperature in kritičnega časa v elementih, ki so natezno, tlačno, upogibno tlačno in upogibno strižno obremenjeni. Vgrajena je globalna plastična analiza kontinuirnih nosilcev.
- Izračun potrebne debeline za izbrano požarno zaščito in potrebno požarno odpornost.

### Ocenjevalni vidiki:

### Metodologija izračuna:

- Uporabljena metodologija:
  - Račun temelji na standardih EN 1991-1-2 in EN 1993-1-2.
- Uporabljene predpostavke:
  - Temperatura v prerezu je konstantna.
- Omejitve:
  - Izpostavljenost požaru iz treh ali iz štirih strain..
  - Samo za dvojno simetrične prereza, ki so upogibno tlačno obremenjeni.
  - Samo za 1., 2. In 3. razred kompaktnosti.

### Dokumentacija:

• Poglavje v ECCS Evrokod priročniku "Fire Design of Steel structures" je posvečeno opisu programa.

### Uporabniški vidiki:

- Vmesnik: Windows
- Izpis rezultatov: tekst in grafika.
- Grafika: Program izriše temperaturno krivuljo..

### Zaključek:

- Zanesljiva računska metoda
- Na razpolago je priročnik, ki ga je izdalo združenje ECCS
- Prijazno do uporabnika
- Za uporabo programa zadostuje osnovno znanje uporabnika.
  - \_

# 5.9 H-Fire

### 5.9.1 Splošne informacije (ID št.: 78)

- Ime: H-Fire

- Verzija: 04.1.
- Leto: 2004.
- Področje uporabe: Poenostavljeni modeli požarne odpornosti.
- Država: Nemčija.
- Avtorji: P. Schaumann, S. Hothan.
- Organizacija: University of Hannover, Institute for Steel Construction
- Jezik: nemški, angleški.
- Sistemske zahteve: Pentium PC, Microsoft Windows, Microsoft Office.
- Velikost: 12.6 MB.
- Cost: Prost dostop.
- Dostopno na: University of Hannover, Institute for Steel Construction.
- Kontaktne informacije: <u>www.stahlbau.uni-hannover.de</u>.

# 5.9.2 Opis:

Izračun požarne odpornosti sovprežnih elementov z uporabo poenostavljenih modelov iz EN 1994-1-2.

# 5.9.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: temelji na ENV 1994-1-2 (Evrokod 4), razen za sovprežne plošče, kjer se uporablja poenostavljen model po prEN 1994-1-2.
- Uporabljene predpostavke: Enake kot v uporabljenih poenostavljenih modelih.
- Omejitve: like simple Enake kot v uporabljenih poenostavljenih modelih.

Dokumentacija:

- Uporabniška navodila: Kratek opis na <u>www.stahlbau.uni-hannover.de</u>
- Tehnični vodniki: izračuni temeljijo na poenostavljenih modelih iz ENV 1994-1-2 (Evrokod 4), razen za sovprežne plošče, kjer se uporablja poenostavljen model po prEN 1994-1-2.
- Dostopno na: <u>www.stahlbau.uni-hannover.de</u> .
- Članki in validacijski primeri: Niso na voljo.

# 5.9.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows; Microsoft Excel in Microsoft Access.
- Vhodni/izhodni podatki: Izpisani so vsi glavni vhodni in izhodni podatki.
- Grafika: Kjer je potrebno, so izrisane krivulje.

# 5.9.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Dokumentacija: Zelo podrobna .
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: srednje.

# 5.10 Potfire (ID št. 81):

### 5.10.1 Splošne informacije:

- Ime: Potfire.
- Verzija: 1.11.
- Leto: 2001.
- Področje uporabe: Structural fire resistance.
- Država: Francija.
- Avtorji: Geneviève Fouquet, George Tabet, Bin Zhao, Julien Kruppa.
- Organizacija: CTICM, TNO, CIDECT.
- Sistemske zahteve: Pentium 200 Mhz, W95, CD-Rom, in 24 MB RAM.
- Velikost: 15 MB.
- Dostopno na: <u>www.cidect.org</u>.
- Kontaktne informacije: <u>www.cidect.org</u>.

### 5.10.2 Opis:

POTFIRE je program za dimenzioniranje, ki temelji na postopkih, opisanih v aneksu G evrokoda 4 ENV 1994-1-2 "General rules - Calculation of behaviour to fire".

POTFIRE se uporablja za izračun požarne odpornosti jeklenih votlih prerezov, napolnjenih z betonom, z znanimi obtežbami ali izračun nosilnosti prereza v določenem trenutku izpostavljenosti požaru po standardni ISO krivulji.

### 5.10.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: Vse poenostavljene enačbe, ki so uporabljene za zapis termičnega in mehanskega stanja, so podane v aneksu 2 k navodilom "POTFIRE User's Manual", ki so del programske opreme.
- Uporabljene predpostavke: Uporabnik POTFIRE-a mora biti posebno pozoren na podajanje obtežb na konceh stebrov, da se ohrani pravilen prenos sil med požarom.
- Omejitve: Evrokod 4 Del 1.2 Aneks G je omejen na samo določeno vrsto stebrov (prerezi in višine).

Dokumentacija:

- Uporabniška navodila: Vključena v programski paket.
- Tehnični vodniki: Nasveti za kvalitetno požarno odporno projektiranje so podani v Evrokodu 4, Del 1-2 in v CIDECT Design Guide 4 "Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire".
- Članki in validacijski primeri: Niso na voljo.

### 5.10.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows, na podlagi oken.
- Vhodni/izhodni podatki: Izpis vseh vhodnih in izhodnih podatkov.
- Grafika: Ne podpira grafičnega prikaza.

# 5.10.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: nizko.

# 5.11 ABAQUS

### 5.11.1 Splošne informacije (ID št.: 86)

- Ime: Abaqus.
- Verzija: 6.4.
- Leto: 2003.
- Področje uporabe: Napredni modeli požarne odpornosti.
- Država: ZDA.
- Avtorji: David Hibbit, Bengt Karlsson, Paul Sorensen.
- Organizacija: Abaqus Inc.
- Jezik: angleščina.
- Sistemske zahteve: Za Windows okolje:
  - Windows 2000 Professional (SP3),
  - Pentium© III (or later) proccesors hitrostjo vsaj 2 GHz je priporočljiv,
  - Compaq Visual Fortran 6.0 (Update A)
  - Microsoft Visual C/C++ 6.0 (12.00.8804)
  - Internet Explorer 5.5 ali Netscape 6 (potreben za prebiranje dokumentacije).
- Velikost: -
- Cena: Preveri pri zastopniku.
- Dostopno na: <u>www.abaqus .com</u>.

Abaqus Inc

1080 Main Street

Pawtucket, RI 02860-4847

Tel: +1 401 727 4200

Fax: +1 401 727 4208

- Kontaktne informacije: <u>www.abaqus.com</u> .

# 5.11.2 Opis:

Abaqus programski paket je paket medsebojno povezljivih orodij za uporabo z metodo končnih elementov. Nudi poenoten sistem za inženirske analize in numerično analizo kot podporo za projektiranje in izdelavo izdelkov.

### 5.11.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- ABAQUS/Standard: nudi bogato paleto procedur za numerično analizo problemov od navadne linearne analize do kompleksnih večstopenjskih numeričnih analiz z možnostjo robustnih in efektivnih postopkov. Možno je simulirati vrsto fizikalnih fenomenov kot so prenos toplote, difuzija mas, akustika ter razmerje med napetostmi in deformacijami.
- ABAQUS/Explicit: nudi uporabo tehnik na podlagi metode končnih elementov za reševanje vrste dinamičnih in kvazi statičnih problemov (posebej tistih, ki zajemajo pojave trkov ter drugih izrazito nekontinuirnih dogodkov) na način, ki zagotavlja natančnost, robustnost in efektivnost. Podpira tudi analizo polno povezanih termo-dinamičnih, akustičnih in povezanih akustično mehanskih problemov.
- ABAQUS/CAE: je okolje za modeliranje problemov, ki je organizirano v module in sete orodnih vrstic.

Dokumentacija:

- Dostopna dokumentacija:
  - Učenje:
    - Getting started with Abaqus.
    - Getting started with Abaqus/Standard: Keywords version.
    - Getting started with Abaqus/Explicit: Keywords version.
    - Lecture notes.
- Analiza:
  - Abaqus analysis user's manual.
- Modeliranje in vizualizacija:
  - Abaqus/CAE user's manual.
- Primeri:
  - Abaqus example problems manual.
  - Abaqus benchmarks manual.
- Reference:
  - Abaqus theory manual.

### 5.11.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows.
- Vhodni/izhodni podatki: Vhodni podatki v obliki datoteke (\*.inp) ter izhodni podatki v obliki izhodne baze podatkov (\*.odb).
- Grafika: 2D/3D prikaz modela ter podatkov iz izhodne baze podatkov.

# 5.11.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Dokumentacija: Zelo podrobno.
- Ni uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: Visok.

# 5.12 BoFire

### 5.12.1 Splošne informacije (ID št.: 89)

- Ime: BoFire.
- Verzija: 7.
- Leto: 2004.
- Področje uporabe: Model požarne odpornosti.
- Država: Nemčija.
- Avtorji: Peter Schaumann, Jens Upmeyer, Florian Kettner.
- Organizacija: Institute for Steel Construction.
- Language: Nemčija.
- Sistemske zahteve: Windows 95/98/2000/NT, 100 Mhz, 32 MB RAM.
- Velikost: 200 kB.
- Trenutno programski paket ni na voljo.

# 5.12.2 Opis:

BoFire je računalniški program na podlagi metode končnih elementov za modeliranje prehodnih, nelinearnih problemov. Implementirane so materialne lastnosti na podlagi ENV 1994-1-2. Možno je analizirati betonske, jeklene ter sovprežne konstrukcije.

# 5.12.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: Prehodni, nelinearni sistemi. Metoda končnih elementov.
- Uporabljene predpostavke:
  - Linijski 2D modeli s poljubnimi prečnimi prerezi.
  - Materialne lastnosti po ENV 1994-1-2 (1994).
- Omejitve:
  - Ni možnosti 3D obravnave konstrukcije.
  - Ni možnosti obravnave dvoosnega upogiba.
  - Strižne deformacije niso upoštevane (Bernoulli-jeva hipoteza).

# Dokumentacija:

Trenutno ni dostopne dokumentacije.

# 5.12.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: Windows
- Vhodni/izhodni podatki se podajo s tekstovnimi datotekami. Za generacijo vhodne datoteke je možno uporabiti program HaFront.
- Grafika: Barvni prikaz razporeditve temperature ter tridimenzionalni izris napetosti in deformacij.

# 5.12.5 Zaključki:

- Zanesljiva metodologija izračuna.
- Dokumentacija še ni na voljo.
- Uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: srednje.

### 5.13 Evacnet4:

### 5.13.1 Splošne informacije (ID št. 120)

- Ime: Evacnet4.
- Verzija: 1.4.
- Leto: 1998.
- Področje uporabe: Evakuacijski model.
- Država: ZDA.
- Avtorji: T.M. Kisko, R.L. Francis, C.R. Nobel.
- Organizacija: University of Florida.
- Sistemske zahteve: Windows 95 or višje.
- Velikost: Manj kot 1 MB.
- Dostopno na: <u>http://www.ise.ufl.edu/kisko/files/evacnet</u>.
- Kontaktne informacije: Thomas Kisko, 352-392-1293, kisko@ise.ufl.edu.

### 5.13.2 Opis:

EVACNET4 je interaktivni računalniški program za modeliranje evakuacije poslopij. Model stavbe se podaja v obliki mreže z dodatnimi informacijami o vsebini stavbe na začetku evakuacije. S pomočjo teh podatkov EVACNET4 izračuna rezultate, s katerih je razvidno, kakšen je najbolj ugoden potek evakuacije. Optimalnost evakuacije pomeni najkrajši čas evakuacije stavbe.

### 5.13.3 Ocenjevalni vidiki:

Metodologija izračuna:

- Uporabljena formulacija: EVACNET uporabi mrežni model, ki ga posreduje uporabnik. Izračuna se optimalen način evakuacije, za katerega je potrebno najmanj časa. Uporabljen je poseben algoritem za reševanje mrežnih problemov s pomočjo linearnega programiranja.
- Uporabljene predpostavke: Formulacija EVACNET modela zahteva uvedbo nekaterih predpostavk, ki lahko povzročijo nerealnost rezultatov. Razumevanje modela je pomembno za pravlno interpretacijo rezultatov. Glavne predpostavke, na katere mora uporabnik biti pozoren, so:
  - EVACNET je linearen model. Količine se ne spreminjajo skozi čas.
  - EVACNET model ne zajema obnašanja subjektov. Edine dejavnosti, ki so modelirano, so tiste, ki prispevajo k najmanjšemu času evakuacije.
  - EVACNET model je zgrajen na globalnem nivoju. V dejanski evakuaciji vsak subjekt želi doseči najmanjši čas evakuacije zase.

- Omejitve:

Dokumentacija:

- Uporabniška navodila: Obstajajo (Dostopno na: http://www.ise.ufl.edu/kisko/files/evacnet)
- Technical guides: Obstajajo (Dostopno na: <u>http://www.ise.ufl.edu/kisko/files/evacnet</u>)
- Članki in validacijski primeri: <u>http://www.ise.ufl.edu/kisko/files/evacnet</u>

# 5.13.4 Uporabniški vidik:

- Vmesnik: MS-DOS
- Vhodno izhodni podatki: Program poda informacije o ozkih grlih prehoda ljudi v kritičnem času.
- Grafični izpisi: Ni grafičnih izpisov.

# 5.13.5 Zaključki:

- Manj zanesljiva metodologija izračuna.
- Zelo podrobna dokumentacija.
- Ni uporabniku prijazno.
- Nivo zahtevanega znanja: nizko.

**REFERENCE**:

- [1] Olenick S. M. And Carpenter D. J., May 2003, "An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 13
- [2] Friedman R., 1992, "An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke", Journal of Fire Engineering Vol. 4
- [3] Janssens M. L., 2002, "Evaluating Computer Fire Models", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 13
- [4] ASTM E 1355; ASTM E 1472; ASTM E 1591; ASTM E 1895
- [5] EC3 Eurocode 3 Part 1.2 (ENV 1993-1-2).
- [6] EC4 Eurocode 4 Part 1.1 (ENV 1994-1-1) and Part 1.2 (ENV 1994-1-2).
- [7] Twilt L., Hass R., Klingsch W., Edwards M. and Dutta D., 1996, "Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire", CIDECT Design Guide 4
- [8] Peacock R. D., Reneke P. A., Jones W. W., BVelika Britanijaowski R. W. And Forney G. P., 2000, "User's Guide for Fast: Engineering Tools for Stimating Fire Growth and Smoke Transport", NIST-SP-921
- [9] Portier R. W., Reneke P. A., Jones W. W and Peacock R. D, 1992, "User's Guide for Cfast Version 1.6", NISTIR-4985
- [10] Peacock R. D., Reneke P. A., Jones W. W. and Forney G. P, 2000, "Tecnical References for Cfast: An Engineering Tool for Stimating Fire Growth and Smoke Transport", NIST-TON-1431
- [11] Peacock R. D., Jones W. W. and BVelika Britanijaowski R. W., 1993, "Verification of a model of fire and smoke transport", Fire Safety Jaournal Vol. 21"
- [12] Deal S., 1990, "A review of four compartment fires with four compartment fire models", Fire Safety Developments and Safety, Proceedings of the annual meeting of Fire Retardant Chemicals Association
- [13] Duong D. Q., 1990, "The accuracy of Computer Fire models: some comparison with experimental data from Australia", Fire safety Journal Vol. 16
- [14] Davis W. D., Notarianni K. A., and McGrattan K.B., 1996, "Comparison of fire model predictions with experiments conducted in a hangar with a 15 m ceiling", NISTIR-5927
- [15] Cadorin J. F., Franssen J. M., and Pintea D., 2001, "The design Fire Tool Ozone V2.0 Theoretical Description and Validation On experimental Fire tests", Rapport interne SPEC/2001\_01 University of Liege
- [16] Sleich J. B., Cajot L. G., Pierre M., Joyeux D., Aurtenetxe G., Unanua J., Pustorino S., Heise F. J., Salomon R., Twilt L. and Van Oerle J., 2002, "Competitive steel buildings through natural fire safety concepts" Final Report EUR 20360 EN
- [17] Cadorin J. F., 2002, "On the application field of Ozone V2", Rapport interne N° M&S/2002-003 University of Liege

- [18] Cadorin J. F., 2003, "Compartment fire models for structural engineering", Doctoral Thesis of J. F. Cadorin, University of Liege
- [19] Sleich J. B., Cajot L. G., Pierre M., Joyeux D., Moore D., Lennon T., Kruppa J., Hüller V., Hosser D., Dobbernack R., Kirchner U., Eger U., Twilt L., Van Oerle J., Kokkala M. And Hostikka S., 2002, "Natural Fire Safety Concepts – Full Scale Tests, Implementation in the Eurocodes and Development of an user friendly design tool" Final Report EUR 20580 EN
- [20] McGrattan K. B., Forney G. P., Floyd J. E., Hostikka S. And Prasad K., 2002, "Fire Dynamics Simulator (Version 3) User's Guide", NISTIR-6784
- [21] Forney G. P. and McGrattan K. B., 2003, "User's Guide for Smokeview Version 3.1 A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data", NISTIR-6980
- [22] McGrattan K. B., Baum H. R., Hamins A., Forney G. P., Floyd J. E., Hostikka S. And Prasad K., 2002, "Fire Dynamics Simulator (Version 3) – Technical Reference Guide", NISTIR-6783
- [23] Hurley M. J. and Madrzykowsky D., 2002, "Evaluation of the computer fire model DETECT-QS", Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 4th International Conference. Proceedings
- [24] Davis W. D., 1999, "The Zone Fire model JET: A Model for the prediction of detector activation and gas temperature in presence of a smoke layer", NISTIR-6324

### SPLETNI NASLOVI:

www.arcelor.com www.branz.co.nz/main.php?page=Fire%20Software www.bre.co.Velika Britanija/frs/software.jsp www.cidect.org www.cticm.com www.doctorfire.com www.europrofil.lu. www.fire.nist.gov www.fire.org www.firemodelsurvey.com www.fpe.umd.edu/department/modeling/index.html www.framemethod.be/modeling.html www.fseg.gre.ac.Velika Britanija www.irc.nrc-cnrc.gc.ca www.ise.ufl.edu/kisko/files/evacnet www.labein.es www.nfpa.org www.rautaruVelika Britanijaii.com www.sections.arcelor.com www.tno.nl w.ulg.ac.be www.uni-hannover.de www.fine.cz

# 1. Primer k SIST EN1994-1-2: Sovprežni nosilec sestavljen iz jeklene prečke in betonske plošče

### P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover - Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Preveriti je potrebno požarno odpornost prostoležečega sovprežnega nosilca, ki je del nosilne konstrukcije skladišča. Razpon nosilca je 12.0 m in je obremenjen z linijsko obtežbo. Jeklen profil je delno obbetoniran in povezan z betonsko ploščo s profilirano pločevino. Zahtevana požarna odpornost je razreda R 90.



Slika 1: Statični sistem



Slika 2: Prerez

# MATERIALNE LASTNOSTI:

| Prečka:                |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| Profil:                | valjan profil IPE 500          |
| Kvaliteta jekla:       | S 355                          |
| Višina:                | h = 500  mm                    |
| Širina:                | b = 200  mm                    |
| Debelina stojine:      | $e_w = 10.2 \text{ mm}$        |
| Debelina pasnice:      | $e_f = 16 \text{ mm}$          |
| Površina prereza:      | $A_a = 11,600 \text{ mm}^2$    |
| Meja plastičnosti:     | $f_{y,a} = 355 \text{ N/mm}^2$ |
| Plošča:                |                                |
| Kategorija betona:     | C 25/30                        |
| Višina:                | $h_c = 160 \text{ mm}$         |
| Efektivna širina:      | $b_{ef} = 3000 \text{ mm}$     |
| Tlačna trdnost:        | $f_c = 25 \text{ N/mm}^2$      |
| Profilirana pločevina: |                                |
| Tip:                   | zaprta                         |
| Višina:                | $h_a = 51 \text{ mm}$          |
| Ojačevalna armatura:   |                                |
| Kvaliteta jekla:       | S 500                          |
| Premer:                | 2 Ø 30                         |
| Površina prereza:      | $A_s = 1410 \text{ mm}^2$      |
| Osne razdalje:         | $u_1 = 110 \text{ mm}$         |
|                        | $u_{sl} = 60 \text{ mm}$       |
| Meja plastičnosti:     | $f_{y,s} = 500 \text{ N/mm}^2$ |
| Beton med pasnicami:   |                                |
| Kategorija betona:     | C 25/30                        |
| Širina:                | $b_c = 200 \text{ mm}$         |
| Tlačna trdnost:        | $f_c = 25 \text{ N/mm}^2$      |

# **3 OBTEŽBA:**

| Stalna obtežba:       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| Lastna teža:          | $g_{s,k} = 15.0 \text{ kN/m}$ |
| Zaključni sloj:       | $g_{f,k} = 6.0 \text{ kN/m}$  |
| Spremenljiva obtežba: |                               |
| Koristna obtežba:     | $p_k = 30.0 \text{ kN/m}$     |

# 4 POŽARNA ODPORNOST SOVPREŽNE PREČKE

### 4.1 Mehanski vplivi med požarom

Mehanske vplive med požarom kombiniramo za nezgodno projektno stanje:

$$E_{dA} = E\left(\sum G_k + A_d + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\right)$$

Kombinacijski faktor za glavni spremenljivi vpliv je v primeru skladišča  $\psi_{2,1} = 0.8$ .

Računski upogibni moment v primeru požara je:

$$M_{fi,d} = ((15.0 + 6.0) + 0.8 \cdot (30.0)) \cdot \frac{12.0^2}{8} = 810.0 \text{ kNm}$$

#### 4.2 Kontrola z enostavnim računskim modelom

Prečko računamo z enostavnim računskim modelom, v skladu s standardom EN 1994-1-2, Odstavek 4.3.4.3, in Dodatkom F.

Pri uporabi tega modela mora imeti plošča minimalno debelino  $h_c$ . Dodatno mora imeti prečka minimalno višino h, minimalno širino  $b_c$  (kjer je  $b_c$  minimalna širina jeklenega profila ali betonske obloge) in minimalno površino  $h \cdot b_c$  (glej Preglednico 1).

| reglednica 1. Minimalne dimenzije za uporabo enostavnega računskega modela |
|--|
| sovprežne prečke (glej EN 1994 - 1-2, poglavje 4.3.4.3, Preglednica 4.8)   |

| Standardna požarna<br>odpornost | Minimalna debelina plošče<br>hc [mm] |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| R 30                            | 60                                   |
| R 60                            | 80                                   |
| R 90                            | 100                                  |
| R 120                           | 120                                  |
| R 180                           | 150                                  |

 $h_c = 160 \text{ mm} > \min h_c = 100 \text{ mm}$ 

V računskem modelu, ki je opisan v dodatku F, je prečni prerez razdeljen na posamezne dele, katerim reduciramo mejo plastičnosti ali dimenzije prečnega prereza.

### EN1991-1-2

### EN 1994-1-2

### Odstavek 4.3.4.3

Poglavje F.1



Slika 3. Reduciran prečni prerez za izračun projektnega plastičnega upogibnega momenta in razporeditve napetosti v jeklu (A) in betonu (B).

Segrevanje betonske plošče upoštevamo z reduciranjem, zmanjšanjem, prečnega prereza. Zmanjšanje debeline  $h_{c,fi}$  je za različne razrede požarne odpornosti podano v Preglednici 2. Pri uporabi zaprtih valovitih profilov je zmanjšanje debeline  $h_{c,fi}$  potrebno upoštevati. Ta minimalna redukcija debeline je enaka višini jeklene profilirane pločevine (glej EN 1994-1-2, Dodatek F, Slika F.2).

 $h_{c,fi} = 30 \text{ mm}$ 

$$h_{c,fi,min} = 51 \text{ mm}$$

Debelina betonske plošče med izpostavljenostjo požaru  $h_{c,h}$  je torej:

 $h_{c,h} = 160 - 51 = 109 \text{ mm}$ 

Preglednica 2: Redukcija debeline betonske plošče  $h_{c,fi}$  (glej EN 1994-1-2, Dodatek F, Preglednica F.1)

| Standardna požarna odpornost | Redukcija debeline betonske<br>plošče h <sub>c,fi</sub> [mm] |
|------------------------------|--|
| R 30                         | 10   |
| R 60                         | 20   |
| R 90                         | 30   |
| R 120                        | 40   |
| R 180                        | 55   |

$$= \underbrace{ \sum \sum \sum }_{\substack{t \in c, f, min}} h_{c, fi}$$

Slika 4: Minimalna redukcija debeline hc,fi,min pri nazaj izbočenih profilih

Segrevanje zgornje pasnice jeklenega profila se upošteva z zmanjšanjem njenega prečnega prereza. Izračun zmanjšanja širine  $b_{fi}$  je prikazan v Preglednici 3.

 $b_{fi} = (16.0/2) + 30 + (200 - 200)/2 = 38.0 \text{ mm}$ 

Efektivna širina pasnice je:

 $b_{fi\,\mu} = 200 - 2 \cdot 38 = 124.0 \text{ mm}$ 

Preglednica 3: Zmanjšanje širine b<sub>fi</sub> zgornje pasnice (glej EN 1994-1-2, Dodatek F, Preglednica F.2)

| Standardna požarna odpornost | Zmanjšanje širine<br>bfi [mm]                 |
|------------------------------|---|
| R 30                         | $\left(e_{f}/2\right)+\left(b-b_{c}\right)/2$ |
| R 60                         | $(e_{f}/2)+10+(b-b_{c})/2$                    |
| R 90                         | $(e_f/2) + 30 + (b - b_c)/2$                  |
| R 120                        | $(e_f/2) + 40 + (b - b_c)/2$                  |
| R 180                        | $(e_f/2) + 60 + (b - b_c)/2$                  |

Stojino jeklene prečke razdelimo na dva dela. Pri zgornjem delu upoštevamo polno mejo plastičnosti medtem, ko je potek meje plastičnosti pri spodnjem delu linearen, od meje plastičnosti zgornjega dela stojine do zmanjšane meje plastičnosti spodnje pasnice. Višina spodnjega dela stojine  $h_l$  se izračuna kot:

$$h_l = \frac{a_1}{b_c} + \frac{a_2 \cdot e_w}{b_c \cdot h} > h_{l,\min}$$

Parametra  $a_1$  in  $a_2$ , kot tudi minimalna višina  $h_{l,min}$ , so podani v Preglednici 4 za  $h/b_c > 2$ .

 $h/b_c = 500 \text{ mm} / 200 \text{ mm} = 2.5$ 

$$h_l = \frac{14,000}{200} + \frac{75,000 \cdot 10.2}{200 \cdot 500} = 77.7 \text{ mm} > 40 \text{ mm}$$

| Standardna<br>požarna<br>odpornost | a <sub>1</sub> [mm <sup>2</sup> ] | a <sub>2</sub> [mm <sup>2</sup> ] | h <sub>l,min</sub> [mm] |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| R 30                               | 3600                              | 0                                 | 20                      |
| R 60                               | 9500                              | 0                                 | 30                      |
| R 90                               | 14,000                            | 75,000                            | 40                      |
| R 120                              | 23,000                            | 110,000                           | 45                      |
| R 180                              | 35,000                            | 250,000                           | 55                      |

Preglednica 4: Parametri  $a_1$ ,  $a_2$  in minimalna višina  $h_{l,min}$  za  $h/b_c > 2$  (glej EN 1994-1-2, Dodatek F, Preglednica F.3)

Spodnje pasnice ne reduciramo z zmanjšanjem prečnega prereza, ampak z zmanjšanjem meje plastičnosti, s faktorjem  $k_a$ . Faktor ima omejeno minimalno in maksimalno vrednost. Omejitve, kot tudi izračun faktorja  $k_a$ , so podani v Preglednici 5.

 $a_0 = 0.018 \cdot e_f + 0.7 = 0.018 \cdot 16.0 + 0.7 = 0.988$ 

$$k_a = \left(0.12 - \frac{17}{200} + \frac{500}{38 \cdot 200}\right) \cdot 0.988 = 0.100 \begin{cases} > 0.06 \\ < 0.12 \end{cases}$$

Preglednica 5: Redukcijski faktor k<sub>a</sub> meje plastičnosti spodnje pasnice (glej EN 1994-1-2, Dodatek F, Preglednica F.4)

| Standardna požarna<br>odpornost | Redukcijski faktor k <sub>a</sub>                                       | k <sub>a,min</sub> | k <sub>a,max</sub> |
|---------------------------------|---|--------------------|--------------------|
| R 30                            | $\left(1.12 - \frac{84}{b_c} + \frac{h}{22 \cdot b_c}\right) \cdot a_0$ | 0.5                | 0.8                |
| R 60                            | $\left(0.21 - \frac{26}{b_c} + \frac{h}{24 \cdot b_c}\right) \cdot a_0$ | 0.12               | 0.4                |
| R 90                            | $\left(0.12 - \frac{17}{b_c} + \frac{h}{38 \cdot b_c}\right) \cdot a_0$ | 0.06               | 0.12               |
| R 120                           | $\left(0.1 - \frac{15}{b_c} + \frac{h}{40 \cdot b_c}\right) \cdot a_0$  | 0.05               | 0.1                |
| R 180                           | $\left(0.03 - \frac{3}{b_c} + \frac{h}{50 \cdot b_c}\right) \cdot a_0$  | 0.03               | 0.06               |

Segrevanje ojačevalne armature v parcialnem betonskem prerezu se upošteva z zmanjšanjem njene meje plastičnosti. Redukcijski faktor je odvisen od razreda požarne odpornosti in lege armaturnih palic. Tako kot redukcijski faktor  $k_a$ , je tudi redukcijski faktor  $k_r$  omejen z neko minimalno in maksimalno limitno vrednostjo.

 $A_m = 2 \cdot h + b_c = 2 \cdot 500 + 200 = 1200 \text{ mm}$ 

$$V = h \cdot b_c = 500 \cdot 200 = 100,000 \text{ mm}^2$$

$$u = \frac{1}{(1/u_i) + (1/u_{si}) + 1/(b_c - e_w - u_{si})}$$
  
=  $\frac{1}{(1/110) + (1/60) + 1/(200 - 10.2 - 60)} = 29.88 \text{ mm}$   
 $k_r = \frac{(u \cdot a_3 + a_4) \cdot a_5}{\sqrt{A_m/V}} = \frac{(29.88 \cdot 0.026 - 0.154) \cdot 0.09}{\sqrt{1200/100,000}} = 0.51 \begin{cases} > 0.1 \\ < 1.0 \end{cases}$ 

Preglednica 6: Parametri za izračun faktorja  $k_r$  (glej EN 1994-1-2, Dodatek F, Preglednica F.5)

| Standardna<br>požarna<br>odpornost | a3    | a4     | a5    | kr,min | kr,max |
|------------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|
| R 30                               | 0.062 | 0.16   | 0.126 | 0.1    | 1.0    |
| R 60                               | 0.034 | -0.04  | 0.101 | 0.1    | 1.0    |
| R 90                               | 0.026 | -0.154 | 0.090 | 0.1    | 1.0    |
| R 120                              | 0.026 | -0.284 | 0.082 | 0.1    | 1.0    |
| R 180                              | 0.024 | -0.562 | 0.076 | 0.1    | 1.0    |

Za določitev plastične upogibne nosilnosti je potrebno izračunati osne nosilnosti vseh delov prereza.

Betonski prerez:

 $C_c = b_{eff} \cdot h_{c,h} \cdot \alpha_c \cdot f_c = 300.0 \cdot 10.9 \cdot 0.85 \cdot 2.5 = 6948.8 \text{ kN}$ 

Zgornja pasnica:

 $T_{f,u} = b_{\hat{n},u} \cdot e_f \cdot f_y = 12.4 \cdot 1.60 \cdot 35.5 = 704.3 \text{ kN}$ 

Zgornji del stojine:

$$T_{w,u} = e_w \cdot h_h \cdot f_v = 1.02 \cdot 39.03 \cdot 35.5 = 1413.3 \text{ kN}$$

kjer je:

 $h_h = h - 2 \cdot e_f - h_l = 50.0 - 2 \cdot 1.6 - 7.77 = 39.03$  cm

Spodnji del stojine:

$$T_{w,l} = e_w \cdot h_l \cdot \left(\frac{1+k_a}{2}\right) \cdot f_y = 1.02 \cdot 7.77 \cdot \left(\frac{1+0.1}{2}\right) \cdot 35.5 = 154.7 \text{ kN}$$
$$z_{w,l} = h_l \cdot \frac{2 \cdot k_a + 1}{3 \cdot (k_a + 1)} = 7.77 \cdot \frac{2 \cdot 0.1 + 1}{3 \cdot (0.1 + 1)} = 2.8 \text{ cm}$$

Spodnja pasnica:

 $T_{f,l} = b \cdot e_f \cdot k_a \cdot f_{y,a} = 20.0 \cdot 1.6 \cdot 0.1 \cdot 35.5 = 113.6 \text{ kN}$ 

Ojačevalne armaturne palice:

$$T_r = A_s \cdot k_r \cdot f_{v,s} = 14.1 \cdot 0.51 \cdot 50.0 = 359.6 \text{ kN}$$

Zaradi dejstva, da je tlačna nosilnost  $C_c$  večja od vsote nateznih nosilnosti  $T_i$ , je plastična nevtralna os v betonski plošči. Plastično nevtralno os se določi kot:

$$z_{pl} = \frac{\sum T_i}{\alpha_c \cdot f_c \cdot b_{eff}} = \frac{704.3 + 1413.3 + 154.7 + 113.6 + 359.6}{0.85 \cdot 2.5 \cdot 300} = 4.31 \text{ cm}$$

Za določitev upogibne nosilnosti je potrebno določiti ročice sil:

Betonska plošča (glede na zgornji rob plošče):

 $z_c = z_{pl}/2 = 4.31/2 = 2.16$  cm

Zgornja pasnica (glede na težišče betonskega prereza):

$$z_{f,u} = h_c + e_f / 2 - z_c = 16.0 + 1.6 / 2 - 2.16 = 14.64 \text{ cm}$$

Zgornji del stojine:

$$z_{w,u} = h_c + e_f + h_h/2 - z_c = 16.0 + 1.6 + 39.03/2 - 2.16 = 34.96$$
 cm

Spodnji del stojine:

$$z_{w,l} = h_c + e_f + h_h + z_{w,l} - z_c = 16 + 1.6 + 39.03 + 2.8 - 2.16 = 57.27 \text{ cm}$$

Spodnja pasnica:

$$z_{f,l} = h_c + h - e_f / 2 - z_c = 16.0 + 50.0 - 1.6 / 2 - 2.16 = 63.04 \text{ cm}$$

Ojačevalna armatura:

$$z_r = h_c + h - e_f - u_1 - z_c = 16.0 + 50.0 - 1.6 - 11.0 - 2.16 = 51.24$$
 cm

Upogibni plastični moment se izračuna kot:

$$\begin{split} M_{fi,Rd} &= T_{f,u} \cdot z_{f,u} + T_{w,u} \cdot z_{w,u} + T_{w,l} \cdot z_{w,l} + T_{f,l} \cdot z_{f,l} + T_r \cdot z_r \mathbb{Z} \\ &= 704.3 \cdot 14.64 + 1413.3 \cdot 34.96 + 154.7 \cdot 57.27 + 113.6 \cdot 63.04 + 359.6 \cdot 51.24 \\ &= 10,311 + 49,409 + 8860 + 7161 + 18,426 = 94,167 \text{ kNcm} = 942.7 \text{ kNm} \\ \text{Kontrola:} \end{split}$$

 $\frac{810.0}{942.7} = 0.86 < 1 \qquad \checkmark$ 

### VIRI

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions onstructures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

EN 1994, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, Brussels: CEN, November 2006

# 2. Računski primer k SIST EN 1994-1-2: Sovprežna plošča

### P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover – Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Sovprežno ploščo je potrebno dimenzionirati na požar. Sovprežna plošča se nahaja v nakupovalnem centru in ima razpon 4.8 m. Plošča bo podprta kot niz prostoležečih nosilcev. Zahtevana požarna odpornost je razreda R 90.



Slika 5: Statični sistem



Slika 6: Profilirana jeklena pločevina

### 2 MATERIALNE LASTNOSTI

| Jeklena pločevina:         |          |      |                         |
|----------------------------|----------|------|-------------------------|
| Meja plastičnosti:         | $f_{yp}$ | =    | 350 N/mm <sup>2</sup>   |
| Površina prečnega prereza: | $A_p$    | =    | 1562 mm²/m              |
| Parameteri za metodo m+k:  | k        | =    | 0.150 N/mm <sup>2</sup> |
| Beton:                     |          |      |                         |
| Trdnostni razred:          | C 25     | 5/30 |                         |
| Tlačna trdnost:            | $f_c$    | =    | 25 N/mm <sup>2</sup>    |
| Višina:                    | $h_t$    | =    | 140 mm                  |
| Površina prečnega prereza: | $A_c$    | =    | 131,600 mm²/m           |

### **3 OBTEŽBA:**

| Stalna:           |           |   |                        |
|-------------------|-----------|---|------------------------|
| Jeklena pločevina | $g_{p,k}$ | = | 0.13 kN/m <sup>2</sup> |
| Beton:            | $g_{c,k}$ | = | 3.29 kN/m <sup>2</sup> |
| Zaključni sloj:   | $g_{f,k}$ | = | 1.2 kN/m <sup>2</sup>  |
| Spremenljiva:     |           |   |                        |
| koristna:         | $p_k$     | = | 5.0 kN/m <sup>2</sup>  |
|                   |           |   |                        |

Projektni pozitivni upogibni moment pri sobni temperaturi:

 $M_{s,d} = 39.56 \text{ kNm}$ 

# 4 POŽARNA ODPORNOST SOVPREŽNE PLOŠČE

Sovprežna plošča mora biti preverjena v skladu z odstavkom 4.3 in Dodatkom D.

### 4.1 Geometrijski parametri in območje uporabe



Slika 7: Geometrija prečnega prereza

| $h_1 = 89 \text{ mm}$  | $h_2 = 51 \text{ mm}$  |                       |
|------------------------|------------------------|-----------------------|
| $l_1 = 115 \text{ mm}$ | $l_2 = 140 \text{ mm}$ | $l_3 = 38 \text{ mm}$ |

Preglednica 7: Območje uporabe za plošče, narejene iz normalnega betona in pločevine z nazaj izbočenimi valovitimi profili

| Območje uporabe [mm]       | Geometrijski parametri<br>[mm] |
|----------------------------|--------------------------------|
| $77.0 \le l_1 \le 135.0$   | $l_1 = 115.0$                  |
| $110 \leq l_2 \leq 150.0$  | $l_2 = 140.0$                  |
| $38.5 \leq l_3 \leq 97.5$  | $l_3 = 38.0$                   |
| $50.0 \leq h_1 \leq 130.0$ | $h_1 = 89.0$                   |
| $30.0 \leq h_2 \leq 70.0$  | $h_2 = 51.0$                   |

### 4.2 Mehanski vplivi med požarom

Obtežbo se kombinira za nezgodno projektno stanje

$$E_{dA} = E\left(\sum G_k + A_d + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\right)$$

### EN 1991-1-2

 $h_1$  $h_2$ 

### Odstavek 4.3

V skladu z EN 1994-1-2 se projektno obremenitev  $E_d$  reducira z redukcijskim koeficientom  $\eta_{fi}$ :

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}} = \frac{(0.13 + 3.29 + 1.2) + 0.6 \cdot 5.0}{1.35 \cdot (0.13 + 3.29 + 1.2) + 1.5 \cdot 5.0} = 0.55$$

Projektni upogibni moment  $M_{fi,d}$  se izračuna kot:

 $M_{_{fi,d}} = \eta_{_{fi}} \cdot M_{_{sd}} = 0.55 \cdot 39.56 = 21.76 \text{ kNm/m}$ 

### 4.3 Toplotna izolacija

Kriterij toplotne izolacije "I" mora zagotoviti omejitev temperature v elementu. Temperatura na vrhu plošče ne sme preseči povprečno 140 °C in maksimalno 180 °C v katerikoli točki.

Čas, v katerem plošča izpolnjuje kriterij "I" izračunamo iz:

$$t_{i} = a_{0} + a_{1} \cdot h_{1} + a_{2} \cdot \Phi + a_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}} + a_{4} \cdot \frac{1}{l_{3}} + a_{5} \cdot \frac{A}{L_{r}} \cdot \frac{1}{l_{3}}$$

Faktor geometrije rebra  $A/L_r$  je enak faktorju prereza  $A_p/V$  pri nosilcih. Faktor upošteva pozitiven vpliv mase in višine na segrevanje plošče.



Slika 8: Definicija faktorja geometrije rebra

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \cdot \left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right)}{l_2 + 2 \cdot \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}} = \frac{51 \cdot \left(\frac{115 + 140}{2}\right)}{140 + 2 \cdot \sqrt{51^2 + \left(\frac{115 - 140}{2}\right)^2}} = 26.5 \text{mm}$$

Oblikovni faktor  $\Phi$  upošteva vpliv efekta sence rebra na zgornjo pasnico.

$$\Phi = \left[ \sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} \right] / l_3$$
$$= \left[ \sqrt{51^2 + \left(38 + \frac{115 - 140}{2}\right)^2} - \sqrt{51^2 + \left(\frac{115 - 140}{2}\right)^2} \right] / 38 = 0.119$$

Koeficienti *a<sub>i</sub>* za normalno težke betone so podani v Preglednici 8.

EN 1994-1-2

Odstavek D.1

|                          | $a_0$ | $a_1$    | <b>a</b> <sub>2</sub> | <b>a</b> <sub>3</sub> | $a_4$  | $a_5$ |
|--------------------------|-------|----------|-----------------------|-----------------------|--------|-------|
|                          | [min] | [min/mm] | [min]                 | [min/mm]              | mm∙min | [min] |
| Normalno<br>težki betoni | -28.8 | 1.55     | -12.6                 | 0.33                  | -735   | 48.0  |
| Lahki betoni             | -79.2 | 2.18     | -2.44                 | 0.56                  | -542   | 52.3  |

Preglednica 8: Koeficienti za določitev požarne odpornosti z upoštevanjem požarne izolacije (glej EN 1994-1-2, Dodatek D, Preglednica D.1)

Z uporabo teh parametrov izračunamo  $t_i$ :

 $t_i = (-28.8) + 1.55 \cdot 89 + (-12.6) \cdot 0.119 + 0.33 \cdot 27 + (-735) \cdot 1/38 + 48 \cdot 27 \cdot 1/38$ 

= 131.48 min > 90 min  $\checkmark$ 

### 4.4 Kontrola nosilnosti

Upogibni plastični moment izračunamo kot:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum A_i \cdot z_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}}\right) + \alpha_{slab} \cdot \sum A_j \cdot z_j \cdot k_{c,\theta,j} \cdot \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}}\right)$$

Za določitev redukcijskih koeficientov  $k_{y,\theta}$ , za zgornjo pasnico, spodnjo pasnico in stojino, moramo poznati temperature. Te izračunamo kot:

$$\theta_a = b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{l_3} + b_2 \cdot \frac{A}{L_r} + b_3 \cdot \Phi + b_4 \cdot \Phi^2$$
 Po

Koeficiente  $b_i$  odčitamo iz Preglednice 9.

Poglavje 4.3.2

Poglavje D.

| Beton               | Požarna<br>odpornost<br>[min] | Deli<br>pločevine  | b <sub>0</sub><br>[°C] | b₁<br>[°C·mm] | b <sub>2</sub><br>[°C/mm] | <i>b</i> <sub>3</sub><br>[°C] | <i>b</i> <sub>4</sub> [°C] |
|---------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|---------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|                     |                               | Spodnja<br>pasnica | 951                    | -1197         | -2.32                     | 86.4                          | -150.7                     |
|                     | 60                            | Stojina            | 661                    | -833          | -2.96                     | 537.7                         | -351.9                     |
| ni                  |                               | Zgornja<br>pasnica | 340                    | -3269         | -2.62                     | 1148.4                        | -679.8                     |
| Normalno težki beto | 90                            | Spodnja<br>pasnica | 1018                   | -839          | -1.55                     | 65.1                          | -108.1                     |
|                     |                               | Stojina            | 816                    | -959          | -2.21                     | 464.9                         | -340.2                     |
|                     |                               | Zgornja<br>pasnica | 618                    | -2786         | -1.79                     | 767.9                         | -472.0                     |
|                     |                               | Spodnja<br>pasnica | 1063                   | -679          | -1.13                     | 46.7                          | -82.8                      |
|                     | 120                           | Stojina            | 925                    | -949          | -1.82                     | 344.2                         | -267.4                     |
|                     | -                             | Zgornja            | 770                    | -2460         | -1.67                     | 592.6                         | -379.0                     |

Preglednica 9: Koeficienti, za določitev temperatur v delih jeklene pločevine (glej EN 1994-1-2, Dodatek D, Preglednica D.2)

Temperature v delih jeklene pločevine so:

Spodnja pasnica:

$$\theta_{a,l} = 1018 - 839 \cdot \frac{1}{38} - 1.55 \cdot 27 + 65.1 \cdot 0.119 - 108.1 \cdot 0.119^2 = 960.29 \text{ °C}$$

Stojina:

$$\theta_{a,w} = 816 - 959 \cdot \frac{1}{38} - 2.21 \cdot 27 + 464.9 \cdot 0.119 - 340.2 \cdot 0.119^2 = 781.60 \text{ °C}$$

Zgornja pasnica:

$$\theta_{a,l} = 618 - 2786 \cdot \frac{1}{38} - 1.79 \cdot 27 + 767.9 \cdot 0.119 - 472.0 \cdot 0.119^2 = 580.87 \text{ °C}$$

Da dosežemo zadostno nosilnost med izpostavljenostjo požaru, je potrebno vgraditi ojačevalno armaturo. Za vsako rebro izberemo armaturno palico Ø 10 mm. Lega palice je prikazana na Sliki 9.



Slika 9: Lega armaturne palice.

Temperaturo v armaturni palici določimo kot:

$$\theta_{s} = c_{0} + c_{1} \cdot \frac{u_{3}}{h_{2}} + c_{2} \cdot z + c_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}} + c_{4} \cdot \alpha + c_{5} \cdot \frac{1}{l_{3}}$$

kjer je:

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} = \frac{1}{\sqrt{l_1/2}} + \frac{1}{\sqrt{l_1/2}} + \frac{1}{\sqrt{h_2 + 10}}$$
 (poenostavljeno)  
$$= \frac{1}{\sqrt{57}} + \frac{1}{\sqrt{57}} + \frac{1}{\sqrt{61}} = 0,393 \text{ 1/mm}^{0.5}$$

 $\Rightarrow$  z = 2.54 mm<sup>0.5</sup>



Slika 10: Definicija oddaljenosti  $u_1, u_2, u_3$  in naklonskega kota  $\alpha$ 

Koeficienti c<sub>i</sub> za normalno težke betone so podani v Preglednici 10.

Preglednica 10:. Koeficienti za določitev temperature v armaturni palici v rebru (glej EN 1994-1-2, Dodatek D, Preglednica D.3)

| Beton        | Požarna<br>odpornost<br>[min] | <i>c</i> <sub>0</sub><br>[°C] | <i>c</i> <sub>1</sub><br>[°C] | $c_2 [^{\circ}\mathrm{C/mm}^{0.5}]$ | <i>c</i> <sub>3</sub><br>[°C/mm] | <i>c</i> <sub>4</sub><br>[°C/°] | <i>c</i> <sub>5</sub><br>[°C] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Normalno     | 60                            | 1191                          | -250                          | -240                                | -5.01                            | 1.04                            | -925                          |
| težki betoni | 90                            | 1342                          | -256                          | -235                                | -5.30                            | 1.39                            | -1267                         |
|              | 120                           | 1387                          | -238                          | -227                                | -4.79                            | 1.68                            | -1326                         |

Temperatura v armaturni palici je:

$$\theta_s = 1342 + (-256) \cdot \frac{61}{51} + (-235) \cdot 2,54 + (-5,30) \cdot 27 + 1,39 \cdot 104 + (-1267) \cdot \frac{1}{38}$$
  
= 407.0 °C

Redukcijski koeficienti,  $k_{y,i}$  za profilirano jekleno pločevino so podani v Preglednici 3.2 standarda EN 1994-1-2. Redukcijske koeficiente za armaturo odčitamo v drugi preglednici, Preglednica 3.4, saj je armatura hladno oblikovana.

|                    | Temperatura<br>$\theta_i$ [°C] | Redukcijski<br>koeficient<br>$k_{y,i}$ [-] | Delna<br>površina<br>A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ] | $f_{y,i}$<br>[kN/cm <sup>2</sup> ] | Z <sub>i</sub><br>[kN] |
|--------------------|--------------------------------|--|--|------------------------------------|------------------------|
| Spodnja<br>pasnica | 960.29                         | 0.047                                      | 1.204  | 35.0                               | 1.98                   |
| Stojina            | 781.60                         | 0.132                                      | 0.904  | 35.0                               | 4.18                   |
| Zgornja<br>pasnica | 580.87                         | 0.529                                      | 0.327  | 35.0                               | 6.05                   |
| Armatura           | 407.0                          | 0.921                                      | 0.79   | 50.0                               | 36.38                  |

Preglednica 11: Redukcijski koeficienti za nosilnost.

Plastično nevtralno os izračunamo iz ravnotežja horizontalnih sil. Ravnotežje, zapisano za eno rebro ( $b = l_1 + l_2$ ):

$$z_{pl} = \frac{\sum Z_i}{a_{slab} \cdot (l_1 + l_3) \cdot f_c} = \frac{1.98 + 4.18 + 6.05 + 36.38}{0.85 \cdot (115 + 38) \cdot 25 \cdot 10^{-3}} = 15.0 \text{ mm}$$

Plastični upogibni moment za eno rebro izračunamo kot:

Preglednica 12. Izračun upogibne odpornosti za eno rebro.

|                     | Z <sub>i</sub> [kN] | z <sub>i</sub> [cm]    | M <sub>i</sub> [kNcm] |
|---------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| Spodnja pasnica     | 1.98                | 14.0                   | 27.72                 |
| Stojina             | 4.18                | 14.0 - 5.1 / 2 = 11.45 | 47.86                 |
| Zgornja pasnica     | 6.05                | 14.0 - 5.1 = 8.9       | 53.85                 |
| Ojačevalna armatura | 36.38               | 14.0 - 5.1 - 1,0 = 7.9 | 287.4                 |
| Beton               | -48.59              | 1.50 / 2 = 0.75        | -36.44                |
|                     |                     |                        | Σ 380.39              |

Iz plastičnega upogibnega momenta rebra  $M_{pl,rib} = 3.80$  kNm in širine rebra  $w_{rib} = 0.152$  m, izračunamo plastični upogibni moment sovprežne plošče:

 $M_{fi,Rd} = 3.80/0.152 = 25.00 \text{ kNm/m}$ 

Kontrola:

 $\frac{21.76}{25.00} = 0.88 < 1 \qquad \checkmark$ 

#### VIRI

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

EN 1994, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, Brussels: CEN, November 2006

# **3. Računski primer k SIST EN 1991-1-2: Požar v** požarnem sektorju

# P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover - Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Določiti je potrebno temperaturo plinov pri polno razvitem požaru v pisarniškem sektorju. Za primerjavo so na Sliki 13 podane izmerjene temperature plinov pri polno razvitem požaru.

Za račun je izbran model naravnega požara. V Dodatku A standarda EN 1991-1-2 je podan enostaven računski postopek za parametrično krivuljo temperatura-čas.



Slika 11. Objekt Cardington (levo) in »simulacijska« pisarna v požarnem testu (desno).

| Tlorisna površina:                   | $A_f = 135 \text{ m}^2$                         |
|--------------------------------------|---|
| Skupna površina prostora             | $A_t = 474 \text{ m}^2$                         |
| Skupna površina vertikalnih odprtin: | $A_v = 27 \text{ m}^2$                          |
| Faktor vertikalnih odprtin:          | $\alpha_v = 0.2$                                |
| Faktor horizontalnih odprtin:        | $\alpha_h = 0.0$                                |
| Višina:                              | H = 4.0  m                                      |
| Povprečna višina okna:               | $h_{eq} = 1.8 \text{ m} \text{ (predpostavka)}$ |
| Lahki beton:                         | $ ho = 1900 \text{ kg/m}^2$                     |
|                                      | c = 840  J/kgK                                  |
|                                      | $\lambda = 1.0 \text{ W/mK}$                    |
| Hitrost širjenja požara:             | srednja   |

### 2 DOLOČITEV GOSTOTE POŽARNE OBTEŽBE

Za določitev gostote požarne obtežbe je v Dodatku E standarda EN 1991-1-2 predlagan računski model. Gostota požarne obtežbe, uporabljena v izračunih, naj bo projektna vrednost, ki temelji bodisi na meritvah ali v posebnih primerih na zahtevah požarne varnosti, podanih v nacionalnih pravilnikih.

V tem primeru je izbrana prva metoda:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{n}$$

kjer je:

| m             | izgorevalni faktor   |
|---------------|--|
| $\delta_{q1}$ | faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja   |
| $\delta_{q2}$ | faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo (naselitev)  |
| $\delta_n$    | faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja (pršilci, detektorji, avtomatski prenos alarma, gasilci). |

Požarna obtežba je sestavljena iz 20% plastik, 11% papirja in 69% lesa, torej je sestavljena večinoma iz celuloznih materialov. Izgorevalni faktor je torej:

m = 0.8

Faktor  $\delta_{q1}$ , ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost požarnega sektorja je podan v Preglednici 13.

Preglednica 13: Nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja (glej EN 1991-1-2, Preglednica E.1)

|                                  | Talna površina sektorja $A_{f}[m^{2}]$ |            |             |             |               |
|----------------------------------|--|------------|-------------|-------------|---------------|
|                                  | ≤25                                    | $\leq$ 250 | $\leq$ 2500 | $\leq 5000$ | $\leq$ 10,000 |
| Nevarnost nastanka<br>požara δq1 | 1.10                                   | 1.50       | 1.90        | 2.00        | 2.13          |

 $\delta_{q1} = 1.5$ 

Faktor  $\delta_{q2}$  ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo (naselitev) je podan v Preglednici 14.

# EN 1991-1-2

Dodatek E.1

| Nevarnost nastanka<br>požara δ <sub>q2</sub>   | Primeri rabe (naselitve)  |             |  |  |  |
|--|---|-------------|--|--|--|
| 0.78   | umetnostne galerije, muzeji, plavalni bazeni  |             |  |  |  |
| 1.00   |   |             |  |  |  |
| 1.22   | tovarne za proizvodnjo strojev in motorjev  |             |  |  |  |
| 1.44   | kemični laboratoriji, barvarske delavnice   |             |  |  |  |
| 1.66   | tovarne pirotehničnih izdelkov ali barv   |             |  |  |  |
| $\delta_{q2} = 1.0$  |   |             |  |  |  |
| Faktor, ki upošteva (pršilci,detektorji, avtomats                                      | uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja<br>ski prenos alarma, gasilci) se izračuna kot:          |             |  |  |  |
| $\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$  |   |             |  |  |  |
| Faktorji $\delta_{ni}$ so podani v Pre   | glednici 15.  |             |  |  |  |
| $\delta_n = 1.0 \cdot 0.73 \cdot 0.87 \cdot 0.78 \cdot 1$                              | 0.0.1.0.1.0 = 0.50  |             |  |  |  |
| Karakteristična požarna ob   | težba je definirana kot:  |             |  |  |  |
| $Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \psi_i$                                    |   | Dodatek E.2 |  |  |  |
| kjer je: $M_{k,i}$ količina gorljiv $H_{ui}$ neto kalorična v $\psi_i$ možni faktor za | rega materiala [kg]<br>vrednost [MJ/kg], glej EN 1991-1-2, Table E.3<br>aščitenosti požarne obtežbe |             |  |  |  |
| Skupna požarna obtežba je požarna obtežba:   | e bila enaka 46 kg lesa/m², torej je karakteristična  |             |  |  |  |
| $Q_{fi,k} = (135 \cdot 46) \cdot 17.5 \cdot 1.0 = 108,675 \text{ MJ}$                  |   |             |  |  |  |
| Karakteristično gostoto požarne obtežbe izračunamo kot:                                |   |             |  |  |  |
| $q_{f,k} = Q_{fi,k} / A_f = 108,675 / 135 = 805 \text{ MJ/m}^2$                        |   |             |  |  |  |
| Projektno gostoto požarne  | obtežbe izračunamo kot:   |             |  |  |  |
| $q_{f,d} = 805 \cdot 0.8 \cdot 1.5 \cdot 1.0 \cdot 0.5$                                | $= 483.0 \text{ MJ/m}^2$  |             |  |  |  |
|  |   |             |  |  |  |

.Preglednica 14 Nevarnost nastanka požara glede na rabo (naselitev) (glej EN 1991-1-2, Preglednica E.1)

| $\delta_{ni}$ funkcija aktivnih ukrepov za preprečevanje požara |   |               |             |                           |  |  |
|---|---|---------------|-------------|---------------------------|--|--|
|   | Avtomatski vodni gasilni sistem             | 0.61          |             |                           |  |  |
| Avtomatsko  |   |               | 0           | 1.0                       |  |  |
| požara  | Neodvisna preskrba z vodo                   | $\delta_{n2}$ | 1           | 0.87                      |  |  |
| -   |   |               | 2           | 0.7                       |  |  |
| A   | Avtomatsko zaznavanje požara in             | $\delta_{n3}$ | kot toploto | 0.87                      |  |  |
| zaznavanie  | alarm                                       | $\delta_{n4}$ | kot dim     | 0.73                      |  |  |
| požara  | Avtomatska povezava alarma z gasilsko enoto |               |             | 0.87                      |  |  |
|   | Lastna gasilska enota                       | $\delta_{n6}$ |             | 0.61                      |  |  |
|   | Zunanja gasilska enota                      | $\delta_{n7}$ |             | 0.78                      |  |  |
| Ročno   | Varne intervencijske<br>poti                | $\delta_{n8}$ |             | 0.9 ali<br>1.0 ali<br>1.5 |  |  |
| požara  | Gasilski pripomočki                         | $\delta_{n9}$ |             | 1.0 ali<br>1.5            |  |  |
|   | Sistem za odvod dima                        |               |             | 1.0 ali<br>1.5            |  |  |

Preglednica 15. Faktorji  $\delta_{ni}$  (glej EN 1991-1-2, Preglednica E.2)

# 3 IZRAČUN PARAMETRIČNE KRIVULJE TEMPERATURA-ČAS

Parametrične krivulje je potrebno določiti v primeru, če je polno razviti požar ventilacijsko ali gorivno kontroliran. Potrebujemo torej faktor odprtin in projektno gostoto požarne obtežbe.

$$O = \sqrt{h_{eq}} \cdot A_{v} / A_{t} = \sqrt{1.8} \cdot 27/474 = 0.076 \text{ m}^{1/2} \begin{cases} \ge 0.02 \\ \le 0.2 \end{cases}$$

in

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t = 483.0 \cdot 135 / 474 = 137.6 \,\mathrm{MJ/m^2}$$

V primeru gorivno ali ventilacijsko kontroliranega požara:

 $0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 137.6 / 0.076 = 0.362 \text{ h} > t_{\text{lim}} = 0.333 \text{ h}$ 

 $\Rightarrow$  Požar je ventilacijsko kontroliran.

Za izračun krivulj temperatura-čas za fazi segrevanja in ohlajanja, potrebujemo faktor b. Ta faktor upošteva toplotno absorbtivnost mejnih konstrukcijskih elementov sektorja. Gostota, specifična toplota in toplotna prevodnost, mejnih konstrukcijskih elementov sektorja se vzamejo pri sobni temperaturi. Tla, stropna plošča in stene so narejeni iz lahkega betona.

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} = \sqrt{1900 \cdot 840 \cdot 1.0} = 1263.3 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K} \begin{cases} \ge 100 \\ \le 2200 \end{cases}$$

Krivulja temperatura-čas za fazo segrevanja je podana z izrazom:

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0.324 \cdot e^{-0.2 \cdot t^*} - 0.204 \cdot e^{-1.7 \cdot t^*} - 0.472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}\right)$$

Pri ventilacijsko kontroliranem požaru se čas  $t^*$  izračuna kot:  $t^* = t \cdot \Gamma$ 

kjer je:

$$\Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0.04/1160)^2} = \frac{(0.076/1263.3)^2}{(0.04/1160)^2} = 3.04$$

Zdaj lahko izračunamo fazo segrevanja:

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0.324 \cdot e^{-0.2 \cdot (3.04 \cdot t)} - 0.204 \cdot e^{-1.7 \cdot (3.04 \cdot t)} - 0.472 \cdot e^{-19 \cdot (3.04 \cdot t)}\right)$$

Za izračun faze ohlajanja je potrebno poznati maksimalno temperaturo:

$$\theta_{\max} = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0.324 \cdot e^{-0.2 \cdot t^*_{\max}} - 0.204 \cdot e^{-1.7 \cdot t^*_{\max}} - 0.427 \cdot e^{-19 \cdot t^*_{\max}}\right)$$

kjer je:

$$t *_{\max} = t_{\max} \cdot \Gamma$$

Čas  $t_{\text{max}}$  se določi iz spodnje enačbe, pri čemer je  $t_{\text{lim}}$  podan v preglednici 16.

$$t_{\max} = \max \begin{cases} 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 137.6 / 0.076 = 0.363 \text{ h} \\ t_{\lim} = 0.333 \text{ h} \end{cases}$$

Preglednica 16: Čas t<sub>lim</sub> pri različnih hitrostih širjenja požara.

|                      | Počasno širjenje<br>požara | Srednje hitro širjenje<br>požara | Hitro širjenje požara |
|----------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| t <sub>lim</sub> [h] | 0.417                      | 0.333                            | 0.250                 |

Čas  $t^*_{max}$  se izračuna kot:

$$t^*_{\text{max}} = 0.363 \cdot 3.04 = 1.10 \text{ h}$$

Maksimalna temperatura se izračuna kot:

$$\theta_{\max} = 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0.324 \cdot e^{-0.2 \cdot 1.10} - 0.204 \cdot e^{-1.7 \cdot 1.10} - 0.427 \cdot e^{-19 \cdot 1.10}\right)$$
  
= 958.8 °C

Med fazo ohlajanja se časa  $t^*$  in  $t^*_{max}$  izračunata iz:

$$t^* = t \cdot \Gamma = t \cdot 3.04$$
 [h]  
 $t^*_{\text{max}} = (0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma = 1.10$ h

Krivulja temperatura-čas v fazi ohlajanja, za čas  $0.5 \le t^*_{\text{max}} \le 2.0$ , je podana z:

$$\theta_{g} = \theta_{\max} - 250 \cdot (3 - t *_{\max}) \cdot (t * - t *_{\max} \cdot x)$$
  
= 958.8 - 250 \cdot (3 - 1.10) \cdot (t \cdot 3.04 - 1.10 \cdot 1.0)

kjer je:

 $t_{\rm max} > t_{\rm lim}$ 

x = 1.0

Kombinacija krivulj segrevanja in ohlajanja, vodi do parametrične krivulje temperatura-čas, ki je prikazana na Sliki 2.



Slika 12: Temperatura plinov v pisarni, izračunana z uporabo parametrčne krivulje temperatura-čas

# 4 PRIMERJAVA MED VREDNOSTMI IZRAČUNA IN TESTOV

Za primerjavo izračunanih in izmerjenih vrednosti temperatur je potrebno za faktorje  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  in  $\delta_{ni}$ , pri izračunu gostote požarne obtežbe, uporabiti vrednost 1.0 (glej Sliko 13).



Slika 13: Primerjava med izmerjeno in izračunano krivuljo

### VIRI

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

The Behaviour of multi-storey steel framed buildings in fire, Moorgate: British Steel plc, Swinden Technology Centre, 1998

Valorisation Project: Natural Fire Safety Concept, Sponsored by ECSC, June 2001

# 4. Računski primer k SIST EN 1991-1-2: Lokaliziran požar

P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover - Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Določiti je potrebno temperaturo jeklenega nosilca. Nosilec je del podzemne garažne hiše, pod nakupovalno ulico Auchan v Luxembourgu. Nosilci parkirišča niso požarno zaščiteni. Najhujši požarni scenarij predstavlja goreč avtomobil na sredini razpona nosilca (glej Sliko 14).

Za določitev temperature jekla je potrebno uporabiti model lokaliziranega požara.



Slika 14: Podzemna garažna hiša


Slika 15: Statični sistem in prečni prerez nosilca

# 2 PODATKI:

Premer požara: D = 2.0 mVertikalna oddaljenost med izvirom požara in stropom: H = 2.7 mHorizontalna razdalja med osjo požara in sredino razpona nosilca: r = 0.0 m $\epsilon f = 1.0$ Emisivnost požara: Konfiguracijski faktor:  $\Phi = 1.0$ Stephan Boltzmann-ova konstanta:  $\sigma = 5.67 \cdot 10-8 \text{ W/m}2\text{K}4$ Koeficient prenosa toplote:  $\alpha c = 25.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ Jeklen profil: **IPE 550** Faktor prereza:  $Am/V = 140 \ 1/m$ Gostota:  $\rho a = 7850 \text{ kg/m}^3$ Emisivnost površine:  $\varepsilon m = 0.7$ Korekcijski faktor: ksh = 1.0

# **3** HITROST SPROŠČANJA TOPLOTE

Hitrost sproščanja toplote se ponavadi določi v skladu s poglavjem E.4. standarda EN 1991-1-2. Za ta primer dimenzioniranja nosilca, je hitrost sproščanja toplote vzeta iz ECSC projekta, imenovanega "Razvoj računskih pravil za jeklene konstrukcije, podvržene naravnim požarom v ZAPRTIH PARKIRNIH HIŠAH" (glej Sliko 16).

# PROJEKT ECSC



Slika 16: Hitrost sproščanja toplote pri enem avtomobilu

# 4 IZRAČUN TEMPERATURE JEKLA

### 4.1 Izračun dolžine plamena

Najprej je potrebno določiti dolžino plamena:

 $L_f = -1.02 \cdot D + 0.0148 \cdot Q^{2/5} = -2.04 + 0.0148 \cdot Q^{2/5}$ 

Krivulja te funkcije, za vrednosti iz Slike 16, je prikazana na Sliki 17. Pri višini stropa 2.80 m, se plamen dotika stropa v času med 16.9 min in 35.3 min. (glej Sliko 17).

EN 1991-1-2

**Dodatek** C



Slika 17: Dolžina plamena lokaliziranega požara

Zelo pomembno vedeti ali se plamen dotika stropa ali ne, saj se za vsak primer uporabi druga metoda za izračun neto toplotnega toka (glej Sliko 18)



Slika 18: Modeli plamena: Plamen se ne dotika stropa (A); Plamen v stiku s stropom (B)

#### 4.2 Izračun neto toplotnega toka

#### 4.2.1 Plamen se ne dotika stropa

Neto toplotni tok se izračuna v skladu s poglavjem 3.1 standarda EN 1991-1-2.

/

$$\dot{h}_{net} = \alpha_c \cdot \left(\theta_{(z)} - \theta_m\right) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot \left(\left(\theta_{(z)} + 273\right)^4 - \left(\theta_m + 273\right)^4\right)$$
  
= 25.0 \cdot  $\left(\theta_{(z)} - \theta_m\right) + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\left(\theta_{(z)} + 273\right)^4 - \left(\theta_m + 273\right)^4\right)$  Odstavek 3.1

Temperatura plinov se izračuna kot:

$$\theta_{(z)} = 20 + 0.25 \cdot (0.8 \cdot Q)^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \le 900 \text{ °C}$$
  
= 20 + 0.25 \cdot (0.8 \cdot Q)^{2/3} \cdot (4.74 - 0.0052 \cdot Q^{2/5})^{-5/3} \le 900 \cdot C

kjer je:

zvišina [m] vzdolž osi plamena (2.7 m) $z_0$ Navidezno izhodišče plamenske osi [m] $z_0 = -1.02 \cdot D + 0.0052 \cdot Q^{2/5} = -2.04 + 0.0052 \cdot Q^{2/5}$ 

#### 4.2.2 Plamen v stiku s stropom

Neto toplotni tok se izračuna kot:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c \cdot (\theta_m - 20) - \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot \left( (\theta_m + 273)^4 - (293)^4 \right)$$
$$= \dot{h} - 25.0 \cdot (\theta_m - 20) - 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left( (\theta_m + 273)^4 - (293)^4 \right)$$

Toplotni tok je odvisen od parametra y. Za različne dimenzije parametra y, je potrebno uporabiti različne enačbe za izračun toplotnega toka.

- $y \le 0.30$ :  $\dot{h} = 100,000$
- 0.30 < y < 1.0:  $\dot{h} = 136,300 121,000 \cdot y$

$$- y \ge 1.0$$
:  $\dot{h} = 15,000 \cdot y^{-3.7}$ 

kjer je:

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} = \frac{2.7 + z'}{L_h + 2.7 + z'}$$

Horizontalno dolžino plamena izračunamo iz:

$$L_{h} = \left(2.9 \cdot H \cdot \left(Q_{H}^{*}\right)^{0.33}\right) - H = \left(7.83 \cdot \left(Q_{H}^{*}\right)^{0.33}\right) - 2.7$$

kjer je:

$$Q_{H}^{*} = Q/(1.11 \cdot 10^{6} \cdot H^{2.5}) = Q/(1.11 \cdot 10^{6} \cdot 2.7^{2.5})$$

Vertikalno lego virtualnega izvora toplote določimo kot:

$$- Q_D^* < 1.0: \ z' = 2.4 \cdot D \cdot \left( \left( Q_D^* \right)^{2/5} - \left( Q_D^* \right)^{2/3} \right) = 4.8 \cdot \left( \left( Q_D^* \right)^{2/5} - \left( Q_D^* \right)^{2/3} \right) \\ - Q_D^* \ge 1.0: \ z' = 2.4 \cdot D \cdot \left( 1.0 - \left( Q_D^* \right)^{2/5} \right) = 4.8 \cdot \left( 1.0 - \left( Q_D^* \right)^{2/5} \right)$$

kjer je:

$$Q_D^* = Q/(1.11 \cdot 10^6 \cdot D^{2.5}) = Q/(1.11 \cdot 10^6 \cdot 2.0^{2.5})$$

Dodatek C

#### 4.3 Izračun krivulje temperatura-čas

Za izračun temperature jekla je potrebno poznati specifično toploto jekla  $c_a$ . Parameter je podan v odvisnosti od temperature jekla v odstavku 3.4.1.2, standarda EN 1993-1-2.



Slika 19: Specifična toplota ogljikovega jekla (glej EN 1993- 1-2, Slika 3.4)

$$\theta_{a,t} = \theta_m + k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t = \theta_m + \frac{1.78 \cdot 10^{-2}}{c_a} \cdot \dot{h}_{net}$$

Krivulja temperatura-čas za jeklo je prikazana na Sliki 20. Za primerjavo so na Sliki 6 prikazani tudi rezultati FEM-analize, narejene v PROFILARBED-u.



Slika 20: Primerjava izračunane krivulje temperatura-čas in krivulje iz FEM-analize v PROFILARBED-u

Odstavek 4.2.5.1

# EN 1993-1-2

Odstavek 3.4.1.2

#### VIRI

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels: CEN, October 2006

ECSC Project, Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in CLOSED CAR PARKS, CEC agreement 7210-SA/211/318/518/620/933, Brussels, June 1996

# 5. Računski primer k SIST EN 1993- 1-2: Nosilec iz jeklenega varjenega votlega profila

## P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover - Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Dimenzionirati je potrebno nosilec iz jeklenega varjenega profila votlega prereza. Nosilec je del strešne konstrukcije dvorane. Dolžina nosilcev je 35.0 m in so razporejeni v rastru 10.0 m. Nosilci so obremenjeni z linijsko obtežbo, so bočno podprti in so brez požarne zaščite. Zahtevana je požarna odpornost razreda R 30 (ISO požarna krivulja).







Slika 22. Prečni prerez

# 2 MATERIALNE LASTNOSTI

| Kvaliteta jekla: | S 355                      |
|------------------|----------------------------|
| Meja tečenja:    | $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ |
| Višina:          | h = 700  mm                |
| Višina stojine:  | $h_w = 650 \text{ mm}$     |
| Širina:          | b = 450  mm                |

| Debelina pasnice:                  | $t_f = 25 \text{ mm}$                                 |
|------------------------------------|---|
| Debelina stojine:                  | $t_w = 25 \text{ mm}$                                 |
| Površina prečnega prereza pasnice: | $A_f = 11,250 \text{ mm}^2$                           |
| Površina prečnega prereza stojine: | $A_w = 16,250 \text{ mm}^2$                           |
| Specifična toplota:                | $c_a = 600 \text{ J/(kg·K)}$                          |
| Gostota:                           | $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$                        |
| Emisivnost površine nosilca:       | $\varepsilon_m = 0.7$                                 |
| Emisivnost požara:                 | $\varepsilon_r = 1.0$                                 |
| Konfiguracijski faktor             | $\Phi = 1.0$  |
| Koeficient prenosa toplote:        | $\alpha_c = 25.0 \text{ W/m}^2\text{K}$               |
| Stephan Boltzmann-ova konstanta:   | $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ |

# 3 OBTEŽBA

| Stalna:       |             |            |
|---------------|-------------|------------|
| Nosilec:      | $g_{a,k}$ = | 4.32 kN/m  |
| Kritina:      | $g_{r,k}$ = | 5.0 kN/m   |
| Spremenljiva: |             |            |
| Sneg:         | $p_{s,k} =$ | 11.25 kN/m |

# 4 POŽARNA ODPORNOST NOSILCA, VOTLEGA PREČNEGA

# PREREZA

# 4.1 Mehanski vplivi med požarom

Požar se obravnava kot nezgodno projektno stanje, torej:

$$E_{dA} = E\left(\sum G_k + A_d + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\right)$$

Kombinacijski faktor za sneg znaša  $\psi_{2,1} = 0.0$ . Projektni upogibni moment tako znaša:

$$M_{fi,d} = \left[ \left( 4.32 + 5.0 \right) + 0.0 \cdot 11.25 \right] \cdot \frac{35.0^2}{8} = 1427.1 \text{ kNm}$$

EN 1991-1-2

Odstavek 4.3

#### 4.2 Izračun temperature jekla

Prirastek temperature v jeklenem elementu izračunamo:

$$\Delta \theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m / V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t = 1.0 \cdot \frac{40}{600 \cdot 7850} \cdot 5 \cdot \dot{h}_{net} = 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot \dot{h}_{net}$$

kjer je:

 $k_{sh}$ korekcijski faktor za efekt sence  $(k_{sh} = 1.0)$  $\Delta t$ časovni interval  $(\Delta t = 5 \text{ sekund})$  $A_m/V$ faktor prereza pri nezaščitenem profilu (Preglednica 4.2) $A_m/V = 1/t = 1/0.025 = 40 \ 1/m$ 

Neto toplotni tok izračunamo v skladu s standardom EN 1991- 1-2

$$\dot{h}_{net} = \alpha_c \cdot \left(\theta_g - \theta_m\right) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot \left(\left(\theta_g + 273\right)^4 - \left(\theta_m + 273\right)^4\right)$$
$$= 25 \cdot \left(\theta_g - \theta_m\right) + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\left(\theta_g + 273\right)^4 - \left(\theta_m + 273\right)^4\right)$$

Temperaturo plinov izračunamo iz standardne krivulje Temperatura-čas:  $\theta_{g} = 20 + 345 \cdot \log_{10} (8 \cdot t + 1)$ 

Krivulja Temperatura-čas, votlega jeklenega prereza, je prikazana na Sliki 23.



Slika 23. Krivulja temperatura-čas jeklenega votlega profila. $\Rightarrow \theta_{a,max,30} = 646 \ ^{\circ}\text{C}$ 

Odstavek 4.2.5.1

EN 1993-1-2

EN 1991-1-2

Odstavek 3.

Odstavek 3.2.

| 4.3 Kontrola temperature   | EN 1993-1-2      |
|--|------------------|
| Za določitev faktorja izkoriščenosti moramo poznati projektni upogibni moment med požarom v času t=0.  |                  |
| $M_{fi,Rd,0} = W_{pl} \cdot f_y \cdot k_{y,\theta,\max} / \gamma_{M,fi}$   | Odstavek 4.2.3.3 |
| =12,875,000 · 355 · $\frac{1.0}{1.0}$ · 10 <sup>-6</sup> = 4570.6 kNm  |                  |
| kjer je:   |                  |
| $ky_{\theta,max} = 1.0$ za $\theta = 20$ °C v času $t = 0$   |                  |
| $\gamma_{M,fi} = 1.0$  |                  |
| in:  |                  |
| $W_{pl} = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot A_w}{2} \cdot \frac{h_w}{4} + A_f \cdot \frac{h - t_w}{2}\right) = 2 \cdot \left(16,250 \cdot \frac{650}{4} + 11,250 \cdot \frac{700 - 25}{2}\right)$              |                  |
| $=12,875,000 \text{ mm}^3$   |                  |
| Faktor izkoriščenosti izračunamo iz:   |                  |
| $\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} = M_{fi,d} / M_{fi,Rd,0} = 1427.1/4570.6 = 0.31$  | Odstavek 4.2.4   |
| Kritična temperatura $\theta_{a,cr}$ je podana v Preglednici 4.1 standarda EN 1993- 1-2.<br>$\theta_{a,cr} = 659 \text{ °C}$   |                  |
| Kontrola:  |                  |
| $\frac{646}{659} = 0.98 < 1 \qquad \checkmark$   |                  |
| 4.4 Kontrola nosilnosti  |                  |
| Za izračun upogibne nosilnosti je potrebno določiti redukcijski faktor $k_{y,\theta}$ pri temperaturi $\theta_{a,max,30} = 646$ °C. Redukcijski faktor je podan v Preglednici 3.1 standarda EN 1993-1-2. |                  |
| $k_{y,\theta} = 0.360$   | Odstavek 3.2.1   |
| Dodatno je potrebno določiti faktorja prilagoditve $\kappa_1$ in $\kappa_2$ . Faktor prilagoditve $\kappa_1$ upošteva neenakomerni razpored temperature po prečnem                                       |                  |
| prerezu.   | Odstavek 4.2.3.3 |

#### Preglednica 17. Faktor prilagoditve $\kappa_1$

|  | к1 [-] |
|--|--------|
| Nosilec izpostavljen na vseh štirih straneh  | 1.0    |
| Nezaščiten nosilec, izpostavljen na treh straneh, na četrti strani zaščiten z<br>betonsko ali sovprežno ploščo | 0.7    |
| Zaščiten nosilec, izpostavljen na treh straneh, na četrti strani zaščiten z betonsko ali sovprežno ploščo      | 0.85   |

V našem primeru je nosilec izpostavljen požaru na vseh štirih straneh. Torej je  $\kappa_l$ :

 $\kappa_l = 1.0$ 

Faktor prilagoditve  $\kappa_2$  upošteva neenakomerni razpored temperature vzdolž nosilca.

| Preglednica | 18. | Faktor | pril | agoditve | $\kappa_2$ |
|-------------|-----|--------|------|----------|------------|
|-------------|-----|--------|------|----------|------------|

|   | к2 [-] |
|---|--------|
| Ob podporah statično nedoločenega nosilca | 0.85   |
| V vseh ostalih primerih                   | 1.0    |

Kontrolo naredimo na sredini razpona statično določenega nosilca. Torej je faktor prilagoditve  $\kappa_2$ :

 $\kappa_2 = 1.0$ 

Projektno upogibno nosilnost izračunamo kot:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{pl,Rd,20^{\circ}C} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} \cdot \frac{1}{\kappa_1 \cdot \kappa_2}$$
  
= (12,875,000 \cdot 355/1.1) \cdot 0.36 \cdot \frac{1.1}{1.0} \cdot \frac{1}{1.0 \cdot 1.0} \cdot 10^{-6} = 1645.4 kNm

Kontrola:

 $\frac{1427.1}{1645.4} = 0.87 < 1$ 

### VIRI

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels: CEN, October 2006

# 6. Računski primer k EN 1993- 1-2: Upogibno in tlačno obremenjen nosilec

## P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover – Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Nosilec je obremenjen z osno tlačno silo in z linijsko obtežbo, ki povzroča upogibni moment. Upoštevati je potrebno fenomen stabilnosti. Nosilec je del pisarniškega objekta. Požarna zaščita je narejena iz votlega mavčnega ovoja. Zaradi betonske plošče, je nosilec izpostavljen požaru le na treh straneh. Med nosilcem in ploščo ni nobene strižne povezave. Zahtevana požarna odpornost je razreda R 90.



 $I_z = 2000 \text{ cm}^4$ Vztrajnostno moment okrog šibke osi  $I_t = 59.3 \text{ cm}^4$ Vztrajnostni moment za neovirano torzijo  $I_w = 171,100 \text{ cm}^6$ Vztrajnostni moment za ovirano torzijo  $W_{el,v} = 570 \text{ cm}^2$ Odpornostni momenti  $W_{pl,y} = 642.5 \text{ cm}^3$ Ovoj: Material mavec Debelina  $d_p = 20 \text{ mm} (\text{votel ovoj})$  $\lambda_p = 0.2 \text{ W/(m·K)}$ Toplotna prevodnost Specifična toplota  $c_p = 1700 \text{ J/(kg·K)}$ Gostota  $\rho_p = 945 \text{ kg/m}^3$ 

 $A_a = 7810 \text{ mm}^2$ 

# 3 OBTEŽBA

Površina prečnega prereza

| $G_k = 96.3 \text{ kN}$  |
|--------------------------|
| $g_k = 1.5 \text{ kN/m}$ |
| $p_k = 1.5 \text{ kN/m}$ |
|                          |

# 4 POŽARNA ODPORNOST UPOGIBNO IN TLAČNO OBREMENJENEGA NOSILCA

# 4.1 Mehanski vplivi med požarom

Mehanske vplive med požarom kombiniramo za nezgodno projektno stanje:

$$E_{dA} = E\left(\sum G_k + A_d + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\right)$$

Kombinacijski faktor za pisarniške objekte znaša  $\psi_{2,1} = 0.3$ . Projektne obremenitve pri visoki temperaturi so torej:

 $N_{fid} = 96.3 \text{ kN}$ 

$$M_{fi,d} = [1.5 + 0.3 \cdot 1.5] \cdot \frac{10.0^2}{8} = 24.38 \text{ kNm}$$

# 4.2 Izračun temperature jekla

Temperatura jekla je podana v Evro nomogramih (ECCS No.89). Potrebujemo torej faktor prereza  $A_p/V$ . Za element votlega zaprtega prereza izpostavljenega požaru na treh straneh, se faktor prereza izračuna kot:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2 \cdot h + b}{A_a} = \frac{2 \cdot 20.0 + 20.0}{78.1} \cdot 10^2 = 77 \text{ m}^{-1}$$

EN 1991-1-2

Odstavek 4.3

Odstavek 4.2.5.2

EN 1993-1-2

Kjer je

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 77 \cdot \frac{0.2}{0.02} = 770 \frac{W}{m^3 \cdot K}$$

kritična temperatura je:

$$\Rightarrow \theta_{a,max,90} \approx 540 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

#### 4.3 Kontrola temperature

V skladu s standardom EN 1993-1-2, točka 4.2.4 (2), kontrole na domeni temperature zaradi stabilitetnih problemov elementa ni možno izvesti.

#### 4.4 Kontrola nosilnosti

Elementi v prvem razredu kompaktnosti se preverijo na upogibni uklon in bočno zvrnitev.

#### 4.4.1 Upogibni uklon

Kontrola upogibnega uklona:

$$\frac{N_{\textit{fi},\textit{d}}}{\chi_{\min,\textit{fi}} \cdot A \cdot k_{\textit{y},\theta} \cdot f_{\textit{y}} / \gamma_{M,\textit{fi}}} + \frac{k_{\textit{y}} \cdot M_{\textit{y},\textit{fi},\textit{d}}}{W_{\textit{pl},\textit{y}} \cdot k_{\textit{y},\theta} \cdot f_{\textit{y}} / \gamma_{M,\textit{fi}}} \leq 1$$

Redukcijski faktor  $\chi_{min,fi}$  določimo kot minimalno vrednost dveh redukcijskih faktorjev za upogibni uklon  $\chi_{y,fi}$  in  $\chi_{z,fi}$ . Za izračun teh faktorjev potrebujemo brezdimenzionalno vitkost pri temperaturi  $\theta_a$ .

Za določitev brezdimenzionalne vitkosti v pogojih požara je potrebno najprej izračunati brezdimenzionalno vitkost pri ambientni temperaturi.

$$\overline{\lambda}_{y} = \frac{L_{cr}}{i_{y} \cdot \lambda_{a}} = \frac{1000}{8.54 \cdot 93.9} = 1.25$$
$$\overline{\lambda}_{z} = \frac{L_{cr}}{i_{z} \cdot \lambda_{a}} = \frac{1000}{5.07 \cdot 93.9} = 2.10$$

Redukcijska faktorja  $k_{y,\theta}$  in  $k_{E,\theta}$  sta podana v EN 1993-1-2, Preglednica

3.1:  
$$k_{y,\theta} = 0.656$$

 $k_{E,\theta} = 0.484$ 

Z uporabo zgornjih redukcijskih faktorjev lahko določimo brezdimenzijsko vitkost v požarnih pogojih:

ECCS No.89

#### EN 1993-1-2

Odstavek 4.2.3.5

EN 1993-1-1

Odstavek 6.3.1.3

EN 1993-1-2

Odstavek 3.2.1

$$\overline{\lambda}_{y,\theta} = \overline{\lambda}_y \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.25 \sqrt{\frac{0.656}{0.484}} = 1.46$$
$$\overline{\lambda}_{z,\theta} = \overline{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 2.1 \sqrt{\frac{0.656}{0.484}} = 2.44$$

Kjer je

$$\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235/f_y} = 0.65 \cdot \sqrt{235/235} = 0.65$$
 in

$$\varphi_{y,\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \overline{\lambda}_{y,\theta} + \overline{\lambda}_{y,\theta}^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + 0.65 \cdot 1.46 + 1.46^2 \right) = 2.04,$$
  
$$\varphi_{z,\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \overline{\lambda}_{z,\theta} + \overline{\lambda}_{z,\theta}^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + 0.65 \cdot 2.44 + 2.44^2 \right) = 4.27$$

Redukcijska faktorja  $\chi_{y,fi}$  in  $\chi_{z,fi}$  izračunamo kot: 1 1

$$\chi_{y,fi} = \frac{1}{\varphi_{y,\theta} + \sqrt{\varphi_{y,\theta}^2 - \overline{\lambda}_{y,\theta}^2}} = \frac{1}{2.04 + \sqrt{2.04^2 - 1.46^2}} = 0.29$$
$$\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_{z,\theta} + \sqrt{\varphi_{z,\theta}^2 - \overline{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{4.27 + \sqrt{4.27^2 - 2.44^2}} = 0.13$$

Kontrola:

$$\frac{96.3}{0.13 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot 23.5} + \frac{1.50 \cdot 2438}{642.5 \cdot 0.656 \cdot 23.5} = 0.98 < 1$$

Odstavek 4.2.3.5

kjer je:

$$\mu_{y} = (1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \overline{\lambda}_{y,\theta} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29$$
  
= (1.2 \cdot 1.3 - 3) \cdot 1.46 + 0.44 \cdot 1.3 - 0.29  
= -1.82  
$$k_{y} = 1 - \frac{\mu_{y} \cdot N_{fi,d}}{\chi_{y,fi} \cdot A_{a} \cdot k_{y,\Theta} \cdot f_{y} / \gamma_{m,fi}} = 1 - \frac{-1.82 \cdot 96.3}{0.29 \cdot 78.1 \cdot 0,656 \cdot 23.5 / 1.0} = 1.50$$

# 4.4.2 Bočna zvrnitev

Druga kontrola zadeva bočno zvrnitev.

$$\frac{N_{fi,d}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,d}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

Odstavek 4.2.3.2

Za izračun brezdimenzijske vitkosti v primeru požara je potrebno najprej izračunati brezdimenzijsko vitkost pri ambientni temperaturi.

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{642.5 \cdot 23.5}{14,203.5}} = 1.03$$

kjer je:

$$M_{cr} = \zeta \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0.25 \cdot z_p^2} + 0.5 \cdot z_p\right)$$
  
= 1.12 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21,000 \cdot 2000}{(1.0 \cdot 1000)^2} \cdot \left(\sqrt{1241.9} + 0,25 \cdot \left(\frac{20}{2}\right)^2 - 0.5 \cdot \frac{20}{2}\right)  
= 14,203.5 kNcm

kjer je:

$$c^{2} = \frac{I_{\omega} + 0.039 \cdot l^{2} \cdot I_{T}}{I_{z}} = \frac{171,100 + 0.039 \cdot 1000^{2} \cdot 59.3}{2000} = 1241.9$$

Med izpostavljenostjo požaru, se brezdimenzijska vitkost spremeni v:

$$\overline{\lambda}_{LT,\theta} = \overline{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 1.03 \cdot \sqrt{\frac{0.656}{0.484}} = 1.20$$

kjer je

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \overline{\lambda}_{LT,\theta} + \overline{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + 0.65 \cdot 1.20 + 1.20^2 \right) = 1.61,$$

redukcijski koeficient  $\chi_{LT,fi}$  se izračuna kot:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \overline{\lambda}_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{1.61 + \sqrt{1.61^2 - 1.20^2}} = 0.37$$

Kontrola:

$$\frac{96.3}{0.13 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot 23.5/1.0} + \frac{0.80 \cdot 2438}{0.37 \cdot 642.5 \cdot 0.656 \cdot 23.5/1.0}$$

$$= 0.62 + 0.53 = 1.15 \le 1$$

kjer je:

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,d}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} = 1 - \frac{0.33 \cdot 96.3}{0.13 \cdot 78.1 \cdot 0.656 \cdot \frac{23.5}{1.0}} = 0.80$$

EN 1993-1-1

IN 18800-2

EN 1993-1-2

# Odstavek 4.2.3.3

Odstavek 4.2.3.5

$$\mu_{LT} = 0.15 \cdot \lambda_{z,\theta} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15 < 0.9$$
  
= 0.15 \cdot 2.44 \cdot 1.3 - 0.15  
= 0.33 < 0.9

#### VIRI

DIN 18800, Stahlbauten, Teil 2 Stabilitätsfälle, Knicken bei Stäben , Berlin: Beuth Verlag GmbH, Germany, November 1990

ECCS No.89, Euro-Nomogram, Brussels: ECCS – Technical Committee 3 – Fire Safety of Steel Structures, 1995

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules, Brussels: CEN, May 2005

EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels: CEN, October 2006

Literatur for MCr (for example: Steel Construction Manual)

# 7. Računski primer k EN SIST 1993-1-2: Osno obremenjen steber

#### P. Schaumann, T. Trautmann

University of Hannover - Institute for Steel Construction, Hannover, Germany

# 1 NALOGA

Na požar je potrebno dimenzionirati steber v veleblagovnici. Dolžina stebra je 3.0 m. Med izpostavljenostjo požaru se lahko za uklonsko dolžino stebra vzame zmanjšana vrednost, kot je prikazano na Sliki 26. Steber je obremenjen s centrično osno tlačno silo. Požaru je izpostavljen iz vseh štirih strani in je zaščiten z mavčnim ovojem. Zahtevana standardna požarna odpornost je razreda R 90.



Slika 26: Uklonske dolžine stebrov.



Slika 27. Prečni prerez stebra.

#### 2 MATERIALNE LASTNOSTI

Steber:

| Profil:                      | vroče valjan prerez HE 300 B                 |
|------------------------------|--|
| Kvaliteta jekla:             | S 235  |
| Razred kompaktnosti prereza: | 1  |
| Meja plastičnosti:           | $f_y = 23.5 \text{ kN/cm}^2$                 |
| Površina prečnega prereza:   | $A_a = 149 \text{ cm}^2$                     |
| Elastični modul:             | $E_a = 21,000 \text{ kN/cm}^2$               |
| Vztrajnostni moment:         | $I_a = 8560 \text{ cm}^4 \text{ (šibka os)}$ |
| Ovoj:                        |  |
| Material:                    | mavec  |
| Debelina:                    | $d_p = 3.0 \text{ cm} (\text{votel ovoj})$   |
| Toplotna prevodnost:         | $\lambda_p = 0.2 \text{ W/(m·K)}$            |
| Specifična toplota:          | $c_p = 1700 \text{ J/(kg·K)}$                |
| Gostota:                     | $\rho_p = 945 \text{ kg/m}^3$                |
|                              | -  |

# 3 OBTEŽBA

| Stalna:       | $G_k = 1200 \text{ kN}$ |
|---------------|-------------------------|
| Spremenljiva: | $P_k = 600 \text{ kN}$  |

# 4 POŽARNA ODPORNOST STEBRA

#### 4.1 Mehanski vplivi med izpostavljenostjo požaru

Med izpostavljenostjo požaru mehanske vplive kombiniramo za nezgodno projektno stanje:

$$E_{dA} = E\left(\sum G_k + A_d + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\right)$$

Kominacijski faktor za veleblagovnico je  $\psi_{2,1} = 0.6$ . Projektna osna obremenitev je tako:

 $N_{fi,d} = 1200 + 0.6 \cdot 600 = 1560 \text{ kN}$ 

#### 4.2 Izračun maksimalne temperature jekla

Za izračun temperature jekla se uporabi postopek iz EN 1993-1-2. Za votle izolirane stebre se faktor prereza izračuna kot:

$$A_p/V = 2 \cdot (b+h)/A_a = 2 \cdot (30+30) \cdot 10^2/149 = 81 \text{ m}^{-1}$$

Z uporabo Evro monogramov (ECCS No.89), je maksimalna temperatura  $\theta_{a,max,90}$  jeklenega dela:

EN 1991-1-2

Odstavek 4.3

EN 1993-1-2

Odstavek 4.2.5.2

$$\begin{array}{ll} \left( A_{\mu}/V \right) \cdot \left( A_{\mu}/d_{\mu} \right) = 81 \cdot 0.2/0.03 = 540 \text{ W/m}^3 \text{K} \\ \Rightarrow \partial_{a,max,90} \approx 445 \,^{\circ}\text{C} \end{array} \right) \\ \begin{array}{ll} \text{ECCS No.89} \\ \hline \\ \textbf{43 Kontrola temperature} \\ \text{V skladu s standardom EN 1993-1-2 kontrole na področju temperature zaradi stabilitetnih problemov elementa ni možno izvesti. \\ \hline \\ \textbf{44 Kontrola nosilnosti med izpostavljenostjo požaru se preverja kot pri mejnem stanju nosilnosti med izpostavljenostjo požaru se preverja kot pri mejnem stanju nosilnosti med izpostavljenostjo požaru se preverja kot pri mejnem stanju nosilnosti med izpostavljenostjo požaru se preverja kot pri mejnem stanju nosilnosti med izpostavljenostjo požaru se preverja kot pri mejnem stanju nosilnosti med izpostavljenostjo požaru se preverja kot pri mejnem stanju nosilnosti med izpostavljenostje požaru. \\ \hline \\ \hline \\ R_{\mu,d} \leq N_{h,\mu,M} \\ \text{Računska odpornost pri visoki temperaturi se izračuna kot: } \\ \hline \\ N_{h,d,SL,M} = \chi_{\beta} \cdot A_{a} \cdot k_{y,0,ma} \cdot \frac{f_{\gamma}}{Y_{M,\beta}} \\ \text{Redukcijska koeficienta } k_{y,0} \text{ in } k_{E,0} \text{ sta v odvisnosti of } \partial_{a,max,90} \text{ podana v Preglednici 3.1 standarda EN 1993-1-2. Za vmesne vrednosti temperatur jekla je dovoljena uporaba linearne interpolacije. \\ k_{y,4dy C} = 0.655 \\ \text{Nosilnost se določi z upoštevanjem brezdimenzijske vitkosti, ki jo določimo za stanje med izpostavljenostjo požaru. } \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \\ a_{\mu,\mu} = \frac{1}{\sigma_{\nu} + \sqrt{g_{\nu}^2 - \overline{\lambda}_{\nu}^2}} = 0.21 \cdot \sqrt{0.901/0.655} = 0.25 \\ \text{Kjer je:} \\ \varphi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \overline{\lambda} + \overline{\lambda}^2\right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.65 \cdot 0.25 + 0.25^2\right] = 0.61 \\ \hline \\ \hline \\ \end{array}$$

in:

$$\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235/f_y} = 0.65 \cdot \sqrt{235/235} = 0.65$$

Projektna tlačna nosilnost je:

$$N_{b,\hat{f}_{i,t,Rd}} = 0.86 \cdot 149 \cdot 0.901 \cdot \frac{23.5}{1.0} = 2713 \text{ kN}$$

Kontrola:

 $N_{fi,d} / N_{b,fi,t,Rd} = 1560/2713 = 0.58 < 1$ 

#### VIRI

ECCS No.89, Euro-Nomogram, Brussels: ECCS – Technical Committee 3 – Fire Safety of Steel Structures, 1995

EN 1991, Eurocode 1:Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels: CEN, November 2002

EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules, Brussels: CEN, May 2005

EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels: CEN, October 2006